



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Kleber Isaac Silva de Souza

**Definição de áreas de preservação permanente com função de proteção aos
recursos hídricos naturais**

Florianópolis
2021

Kleber Isaac Silva de Souza

Definição de áreas de preservação permanente com função de proteção aos recursos hídricos naturais

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Prof.^a Cátia Regina Silva de Carvalho Pinto, Dr.^a

Coorientador: Prof. Pedro Luiz Borges Chaffe, Dr.

Florianópolis

2021

Souza, Kleber Isaac Silva de

Definição de áreas de preservação permanente com função de proteção aos recursos hídricos naturais / Kleber Isaac Silva de Souza ; orientadora, Cátia Regina Silva de Carvalho Pinto, coorientador, Pedro Luiz Borges Chaffe, 2021.

332 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Ambiental. 2. Área de Preservação Permanente. 3. Código Florestal. 4. Lacunas Normativas. 5. Recursos Hídricos. I. Pinto, Cátia Regina Silva de Carvalho. II. Chaffe, Pedro Luiz Borges. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. IV. Título.

Kleber Isaac Silva de Souza

Definição de áreas de preservação permanente com função de proteção aos recursos hídricos naturais

O presente trabalho em nível de doutorado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Leonardo Hoinaski, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Roberto Fabris Goerl, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.^a Suely Mara Vaz Guimarães de Araújo, Dr.^a
Universidade de Brasília

Prof. Davide Franco, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Fernando Grison, Dr.
Universidade Federal da Fronteira Sul

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Doutor em Engenharia Ambiental.

Prof.^a Maria Eliza Nagel Hassemer, Dr.^a
Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof.^a Cátia Regina Silva de Carvalho Pinto, Dr.^a
Orientadora

Florianópolis, 2021.

Aos meus filhos Luís Felipe e Thiago.

AGRADECIMENTOS

Além do agradecimento por todo o apoio prestado durante meu período de dedicação ao doutorado, minha linda e amada esposa, Alessandra Juttel Almeida, merece minhas escusas pelos momentos que me ausentei, mesmo que fisicamente presente, para dedicar-me às atividades acadêmicas.

Agradeço aos Professores Cátia Regina Silva de Carvalho Pinto e Pedro Luiz Borges Chaffe pelas orientações durante as atividades acadêmicas que culminaram no presente trabalho, que pelo volume de dados e assuntos tratados nos exigiram horas extraordinárias de revisão e desenvolvimento.

Aos Professores Leonardo Hoinaski, Roberto Fabris Goerl e José Rubens Morato Leite, agradeço às importantes contribuições ao aprimoramento desta tese, inclusive nos inúmeros diálogos realizados em diversas oportunidades.

Ao Professor Davide Franco, de quem recebi importantes sugestões para aprimoramento dos critérios de análise de dados, cujos ganhos para pesquisa podem ser observados nos produtos gerados no presente trabalho.

Ao Professor Fernando Grison pelos seus artigos de geometria hidráulica, que serviram de partida para importantes análises na presente tese e, em especial, pelo auxílio prestado na análise de seções transversais de centenas de rios, o que permitiu aprimorar o método desenvolvido para identificação geométrica dos leitos fluviais.

Agradeço à Professora Suely Mara Vaz Guimarães de Araújo por ter aceitado prontamente o convite para participação da banca examinadora, bem como pelas importantes contribuições para o aprimoramento desta tese.

Cabe, ainda, registrar um agradecimento especial a todos os colegas e alunos que cotidianamente compartilham dúvidas sobre formas de delimitação de espaços territoriais protegidos, cujas discussões incentivaram as investigações científicas para busca de soluções para a maior parte dos assuntos tratados nesta tese.

Peço escusas caso tenha esquecido de relacionar algum colega, mas agradeço e destaco aqueles que, em algum momento, acompanharam de forma próxima o presente trabalho ou participaram de discussões sobre os temas aqui tratados (em ordem alfabética): Cíntia Uller Gómez, Daniel Mansur Pimpão, Germano Alves de Souza Pirajá Martins, Ítalo Lopes Borges, Marcelo Kammers, Michelle Fernandes de Faria Campello, Ricardo Boelter Moraes, Sidnei Luís da Cruz Zomer e Tadeu Maia Portela Nogueira.

Agradeço ao IBAMA pela concessão do afastamento para dedicação integral à presente pesquisa e à ANA pelo fornecimento de acesso integral aos dados hidrológicos utilizados.

Por fim, agradeço aos meus pais e à tia Paula, que sempre incentivaram e valorizaram a minha educação.

RESUMO

A presente tese tem por objetivo propor soluções às principais lacunas técnicas e normativas que dificultam a delimitação espacial de áreas de preservação permanente (APP) com função de proteção aos recursos hídricos naturais. Apesar da intensa discussão que definiu a atual Lei de proteção da vegetação nativa (Lei nº 12.651, de 2012, conhecida como Código Florestal), o legislador não conseguiu exaurir todos os conceitos e critérios técnicos necessários para delimitação precisa de algumas tipologias daquelas APPs. Tais lacunas têm gerado conflitos no âmbito do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) em procedimentos de autorização, licenciamento e fiscalização, por permitirem o surgimento de divergências técnicas em estudos, laudos e pareceres ambientais, inclusive em perícias forenses. Por meio da análise dos conceitos e metodologias presentes na legislação e literatura científica buscou-se elementos para integração das principais lacunas técnicas e normativas que geram divergências para a definição espacial de áreas de preservação permanente para proteção de olhos d'água, nascentes, cursos d'água, reservatórios naturais (lagos, lagoas e lagunas), encostas e topos de morros, montes, montanhas e serras. Diante da pluralidade de hipóteses para integração, apresenta-se a solução que melhor promove a proteção do bem ambiental. Entre as lacunas estudadas, a definição dos critérios hidrológicos para determinação do leito regular, a partir do qual são definidas as APPs nas margens de rios, foi objeto de pesquisa aprofundada, por ter impacto direto na quantificação de áreas protegidas em todos os rios não efêmeros em território brasileiro. Para isso, foi desenvolvido um programa computacional para análise individual e integrada das séries históricas de dados hidrológicos e das de seções transversais dos principais rios brasileiros, como ferramenta para pesquisa de critérios para regulamentação da definição hidrológica de leitos fluviais regulares. Entre as suas funcionalidades, destacam-se os métodos para definição de curvas-chave entre cota e vazão, seleção de dados considerando a variação da geometria da seção transversal no tempo, o prolongamento dos perfis topográficos a partir de dados de modelos digitais de terreno e a obtenção de variáveis geométricas dos canais por meio de dados de sensoriamento remoto. O programa serviu de instrumento para avaliação dos impactos ambientais à proteção dos ecossistemas ripários nos rios brasileiros para diferentes cenários hidrológicos, considerando para cada cenário a área total protegida resultante e a probabilidade de sua inundação integral (perturbação). A partir dos resultados, são apresentadas soluções para integração das lacunas técnicas e normativas para delimitação de APPs com função de proteção aos recursos hídricos naturais. Independente da expedição de ato regulamentar, os parâmetros propostos, quando refletem os métodos científicos preponderantemente aceitos para determinado objeto de análise, podem ser incorporados imediatamente em termos de referência para estudos ou em outros procedimentos ambientais. Espera-se que a presente tese contribua para o aperfeiçoamento da gestão ambiental dos órgãos e entidades do SISNAMA quanto à identificação, delimitação e proteção das APPs investigadas.

Palavras-chave: Área de Preservação Permanente; Código Florestal; Lacunas Normativas; Recursos Hídricos; Leito Regular.

ABSTRACT

This dissertation proposes solutions to the main technical and regulatory gaps in the spatial delimitation of permanent preservation areas (PPA) with the function of protecting natural water resources. Despite the intense discussion that defined the current Law on the protection of native vegetation (Law No. 12,651, of 2012, known as the Forest Code), the legislator was not able to exhaust all the concepts and technical criteria necessary for the precise delineation of some types of PPAs. Those gaps have generated conflicts in the authorization, licensing and enforcement procedures within the scope of the National Environment System (SISNAMA), as they allow the emergence of technical divergences in environmental studies, reports and opinions, including forensic analyzes. The elements that integrate the main technical and normative divergences in the definition of areas of permanent preservation – i.e., for the protection of springs, sources, water courses, natural reservoirs (lakes, ponds and lagoons), slopes and hilltops – were defined through the analysis of the concepts and methods present in the legislation and scientific literature. Given the plurality of hypotheses for integration, the solution that best promotes the protection of the environment is adopted. The definition of hydrological criteria for determining the regular bed, from which PPAs are defined on the banks of rivers, was the object of in-depth research, as it has a direct impact on the quantification of protected areas in all non-ephemeral rivers in Brazilian territory. A computer program was developed for individual and integrated analysis of the historical series of hydrological data and of the cross sections of the main Brazilian rivers as a tool for defining the regulation criteria of the regular river beds. Among its features, we highlight the methods for defining rating curves between stage and streamflow, data selection considering the variation of the river cross section geometry over time, the extension of topographic profiles based on digital terrain models and the extraction of channel geometric variables using remote sensing data. The program served as an instrument to analyze the environmental impacts to the protection of riparian ecosystems in Brazilian rivers for different hydrological scenarios, considering for each scenario the total protected area and the probability of its integral flooding (disturbance). Based on the results, solutions are presented for the integration of technical and regulatory gaps for the delimitation of PPAs with the function of protecting natural water resources. Regardless of the issuance of a regulatory act, the proposed parameters, when they reflect the scientific methods predominantly accepted for a given object of analysis, can be incorporated immediately in terms of reference for studies or in other environmental procedures. It is expected that the present thesis will contribute to the improvement of the environmental management of government agencies that are part of SISNAMA for the identification, delineation and protection of the investigated PPAs.

Keywords: Permanent Preservation Area; Forest Code; Normative Gaps; Water Resources; Regular Bed.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução histórica da proteção ambiental no entorno de afloramentos de água subterrânea no Brasil.	55
Figura 2 – Evolução do espaço mínimo definido como área de preservação permanente em faixa marginal a cursos d’água por meio das Leis n ^{os} 4.771/1965, 7.511/1986, 7803/1989 e 12.651/2012.	56
Figura 3 – Evolução da área de preservação permanente no entorno de reservatórios naturais e suas lacunas	57
Figura 4 – Perfil esquemático da área de preservação permanente (APP) considerando as três modalidades de cursos d’água previstas na Lei n ^o 12.651/2012, com destaque para o trecho intermitente formado por nascente móvel, cujo ponto de início do afloramento (montante) constitui lacuna técnica e normativa.	66
Figura 5 – Ilustração das hipóteses para delimitação da área de preservação permanente (APP) no entorno de olhos d’água sujeitos à variação sazonal de nível em locais de topografia plana.	69
Figura 6 – Evolução espaçotemporal da ocupação urbana na planície de Jurerê (Florianópolis/SC), nos períodos: (a) 1938, (b) 1957, (c) 16.5.1966, (d) 1977, (e) 10.6.1986, (f) 15.5.1989, (g) 1994 e (h) 2002.	70
Figura 7 – Exemplo de análise espaçotemporal. Álveos (leitos) e área de preservação permanente suprimidos na planície de Jurerê (Florianópolis/SC), considerando a legislação vigente na época da execução de cada fase do arruamento para o parcelamento do solo.	71
Figura 8 – Exemplo de curso d’água que não nasce a partir de uma nascente: braço de maré. Canal da barra da Lagoa da Conceição (Florianópolis/SC).	73
Figura 9 – Perfil esquemático de um rio descontínuo.	75
Figura 10 – Zoneamento (HUET, 1954) e características esperadas de um rio conforme a teoria do contínuo (VANNOTE et al., 1980).	77
Figura 11 – Elementos de uma corrente e localização dos terrenos marginais, segundo Brasil (1867, 1868, 1934a, 1946b).	80
Figura 12 – Evolução do nível de referência para o leito fluvial que define o início da área de preservação permanente em faixa marginal a cursos d’água por meio das Leis n ^{os} 4.771/1965, 7.803/1989 e 12.651/2012, e seus regulamentos (Resoluções do CONAMA n ^o 4/1985 e 303/2002).	81

Figura 13 – Espaço territorial protegido formado pela soma das larguras dos leitos e áreas de preservação permanente em faixas marginais de rios em 472 pontos do território brasileiro para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}).	83
Figura 14 – Comparação entre dois métodos para o cálculo dos limites da área de preservação permanente (APP) em um rio, cujo leito regular possui larguras inferiores e superiores a 50 m. (a) Limites calculados em projeção (<i>offset</i>) no plano da seção transversal. (b) Limites definidos no entorno (<i>buffer</i>) a partir da borda do leito regular.	84
Figura 15 – Hipóteses para definição da área de preservação permanente (APP) em rios com presença de ilhas.	86
Figura 16 – Exemplo de canal fluvial antropizado	88
Figura 17 – Exemplo hipotético da área de preservação permanente em faixa marginal de curso d’água considerando uma cheia de referência para definição do limite externo máximo.	90
Figura 18 – Evolução do nível de referência que define o início da área de preservação permanente no entorno de reservatórios naturais e suas lacunas nas Leis n ^{os} 4.771/1965, 7.803/1989, e 12.651/2012, e seus regulamentos (Resoluções do CONAMA n ^o 4/1985 e 303/2002).	93
Figura 19 – Exemplo de estuário formado por um complexo de rios, lagos e lagunas. (a) Condição normal do estuário, onde se consegue identificar os corpos hídricos individualmente. (b) Cenário de sobrelevação do nível do estuário em 40 cm, onde toda a planície de maré apresenta-se como um só corpo hídrico.	96
Figura 20 – Espaços territoriais especialmente protegidos em função da declividade calculados a partir de modelo digital de terreno altamente discretizado (resolução de 1 metro).	98
Figura 21 – Análise de áreas protegidas por declividade para a Ilha de Santa Catarina. (a) Mapa de altimetria a partir de modelo digital de terreno com resolução de 1 m (SC, 2014c). (b) Mapa de declividades. (c) Classificação das áreas protegidas de acordo com os arts. 4 ^o , inciso V, e 11, da Lei n ^o 12.651/2012, com amostra detalhada para as resoluções de (d) 1 m, (e) 5 m e (f) 30 m.	101
Figura 22 – Efeitos da resolução do modelo digital de terreno para o cálculo de áreas protegidas por declividade para a Ilha de Santa Catarina.	102

Figura 23 – Comparação entre os critérios para incidência de área de preservação permanente em elevações segundo a Lei nº 4.771/1965, regulamentada pela Res. CONAMA nº 303/2002, e a Lei nº 12.651/2012.	105
Figura 24 – Resultados apresentados por Soares-Filho et al. (2014) considerando as áreas de preservação permanente em topo de morro definidas na Lei nº 12.651/2012 e os espaços protegidos pela legislação anterior que foram desafetados.	105
Figura 25 – Comparação, numa situação hipotética para fins didáticos, entre as áreas de preservação permanente (em verde) em uma linha de cumeada com cumes distantes menos de 1000 metros um do outro, em face dos critérios definidos na Lei nº 4.771/1965, regulamentada pela Res. CONAMA nº 303/2002, e Lei nº 12.651/2012.	107
Figura 26 – Perfis das linhas que contornam elevações costeiras no limite da transição do terreno para valores de inclinação superiores a 10%.	109
Figura 27 – Área de preservação permanente no terço superior de elevações (<i>E2</i> e <i>E5</i>) e em linhas de cumeada (<i>C1</i> , <i>C2</i> e <i>C3</i>), conforme definido no art. 3º, incisos V e VI e parágrafo único, da Resolução do CONAMA nº 303/2002.	110
Figura 28 – Visualização tridimensional e perfil da área de preservação permanente no terço superior de elevações e em linhas de cumeada, conforme definido no art. 3º, incisos V e VI e parágrafo único, da Resolução do CONAMA nº 303/2002.	110
Figura 29 – Resultado da aplicação dos critérios definidores da área de preservação permanente por topo de elevação estabelecidos na Lei nº 12.651/2012.	111
Figura 30 – Exemplo de elevações em relevo ondulado. Bases das elevações sem contato com planície ou espelho d’água adjacente.	113
Figura 31 – Definição da base de elevações vizinhas com ponto de sela no divisor de águas e vertentes em contato com espelho d’água e planície adjacente. Ilustração para fins didáticos.	114
Figura 32 – Fluxograma sintético do programa desenvolvido. Parte 1 de 3.	118
Figura 33 – Fluxograma sintético do programa desenvolvido. Parte 2 de 3.	119
Figura 34 – Fluxograma sintético do programa desenvolvido. Parte 3 de 3.	119
Figura 35 – Estrutura típica do diretório com o banco de dados individualizado por estações após a fase de preparação de dados.	122
Figura 36 – Exemplo de saída gráfica acompanhada de tabela de resultados com a análise da área de preservação permanente em função de três cenários hidrológicos arbitrados para uma seção transversal.	124

Figura 37 – Exemplo de saída gráfica acompanhada de tabela de resultados com a análise da faixa mínima de área de preservação permanente sujeita à recuperação ambiental para áreas rurais consolidadas em imóveis até um 1 MF (módulo fiscal) considerando três cenários hidrológicos arbitrados para uma seção transversal.	127
Figura 38 – Síntese dos resultados para análise integrada da área total protegida (leito do rio e áreas de preservação permanente marginais) para cada cenário hidrológico simulado.	132
Figura 39 – Síntese dos resultados para análise integrada da faixa mínima sujeita à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) em propriedades com área até um módulo fiscal para cada cenário hidrológico simulado.	132
Figura 40 – Histogramas com a síntese dos resultados para análise integrada da probabilidade de inundação integral da faixa de área de preservação permanente (APP) para cada cenário hidrológico simulado.	133
Figura 41 – Histogramas com a síntese dos resultados para análise integrada da probabilidade de inundação integral da faixa mínima sujeita à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) em propriedades com área até 1 MF (módulo fiscal) para cada cenário hidrológico simulado.	134
Figura 42 – Exemplo conceitual da interface gráfica de resultados para uma estação. Por meio da ferramenta <i>web</i> é possível clicar na estação e abrir um balão com os resultados apresentados em abas.	135
Figura 43 – Interface gráfica de resultados para uma estação. Dados gerais e gráficos com as séries históricas diárias de cotas e vazões.	136
Figura 44 – Interface gráfica de resultados para uma estação. Análise de vazões.	137
Figura 45 – Interface gráfica de resultados para uma estação. Análise de seções transversais.	138
Figura 46 – Interface gráfica de resultados para uma estação. Análise de cenários hidrológicos para área de preservação permanente.	139
Figura 47 – Interface gráfica de resultados para uma estação. Análise de cenários hidrológicos para faixa mínima sujeita à recuperação ambiental em área de preservação permanente em áreas rurais consolidadas (ARC) para imóveis rurais com dimensões até 1 MF (módulo fiscal). Para as demais classes de imóveis rurais, a saída gráfica é análoga.	139
Figura 48 – Exemplo conceitual da interface gráfica de resultados para uma bacia hidrográfica. Por meio da ferramenta <i>web</i> é possível clicar na estação e abrir um balão com os resultados apresentados em abas.	140

Figura 49 – Exemplo conceitual da interface gráfica de resultados para o território continental do Brasil. Por meio da ferramenta <i>web</i> é possível clicar na estação e abrir um balão com os resultados apresentados em abas. . . .	140
Figura 50 – Interface gráfica de resultados para o território continental brasileiro. Análise de cenários hidrológicos para área de preservação permanente. . . .	141
Figura 51 – Interface gráfica de resultados para o território continental brasileiro. Análise de cenários hidrológicos para perturbação das faixas marginais de preservação permanente (APP) por meio de histogramas representando a distribuição do tempo de recorrência para inundação integral da área protegida.	141
Figura 52 – Interface gráfica de resultados para o território continental brasileiro. Análise de cenários hidrológicos para faixa mínima sujeita à recuperação ambiental em área de preservação permanente (APP) em áreas rurais consolidadas (ARC) para imóveis rurais com dimensões até 1 MF (módulo fiscal). Para as demais classes de imóveis rurais, a saída gráfica é análoga.	142
Figura 53 – Interface gráfica de resultados para o território continental brasileiro. Análise de cenários hidrológicos para perturbação da faixa mínima sujeita à recuperação ambiental em área de preservação permanente em áreas rurais consolidadas (ARC), para imóveis rurais com dimensões até 1 MF (módulo fiscal), por meio de histogramas representando a distribuição do tempo de recorrência para inundação integral da área protegida. Para as demais classes de imóveis rurais, a saída gráfica é análoga.	143
Figura 54 – Otimização da série de dados a partir do menor intervalo de confiança na função de probabilidade acumulada (CDF), no ponto de valor mais provável da variável (pico da função de densidade de probabilidade - PDF), para todas as subséries extraídas da série de dados, por meio da distribuição generalizada de valores extremos (GEVd).	153
Figura 55 – Exemplo de histograma e tabela com resultados da estatística descritiva para série de vazões válidas de uma estação.	154
Figura 56 – Histograma de vazões máximas anuais válidas e funções de densidade (PDF) e distribuição acumulada (CDF) da distribuição generalizada de valores extremos (GEVd) para uma estação. Pontos destacados para as vazões de margens plenas ($Q_{1,58}$), média anual (Q_{med}) e de tempo de recorrência de 2,33 anos ($Q_{2,33}$)	155

Figura 57 – Histograma dos valores mínimos anuais válidos da média móvel de sete dias das vazões (Q_7) e funções de densidade (PDF) e distribuição acumulada (CDF) da distribuição generalizada de valores extremos (GEVd) de uma estação. Ponto destacado para o tempo de recorrência de 10 anos ($Q_{7;10}$).	156
Figura 58 – Histograma apresentando a relação entre os valores encontrados para a vazão mais provável na distribuição generalizada de valores extremos - GEVd - nas análises pelo método de otimização (teste) e pelos critérios estritos da Organização Meteorológica Mundial (paradigma).	161
Figura 59 – Histograma apresentando a relação entre os valores encontrados para as alturas de cheias, para a vazão mais provável na distribuição generalizada de valores extremos – GEVd, nas análises pelo método de otimização (teste) e pelos critérios estritos da Organização Meteorológica Mundial (paradigma). Para fins de comparação, as alturas de cheias são relativas à cota do talvegue do rio.	162
Figura 60 – Histograma com os valores do parâmetro de forma (ξ) da distribuição generalizada de valores extremos encontrados para as séries de dados de cada estação selecionada para análise.	163
Figura 61 – Variação espacial do parâmetro de forma (ξ) da distribuição generalizada de valores extremos para as séries de dados das estações fluviométricas analisadas.	164
Figura 62 – Histograma apresentando a relação entre os valores das vazões da cheia anual mais provável (Q_{mp}) e com tempo de recorrência de 1,58 ano ($Q_{1,58}$) para as estações analisadas.	165
Figura 63 – Histograma apresentando a relação entre os valores das cotas das cheias para as vazões da cheia anual mais provável (H_{mp}) e com tempo de recorrência de 1,58 ano ($H_{1,58}$) para as estações analisadas.	166
Figura 64 – Histograma com os valores encontrados para o tempo de recorrência das vazões para as cheias anuais mais prováveis (Q_{mp}) para as estações analisadas.	166
Figura 65 – Exemplo de série de dados diários, mensais e anuais válidos para os registros de cota de uma estação.	171
Figura 66 – Exemplo de série de dados diários, mensais e anuais válidos para os registros de vazão de uma estação.	171
Figura 67 – Exemplo de curva de permanência para uma estação.	172
Figura 68 – Exemplo de plotagem dos levantamentos de perfis de seções transversais para uma estação.	173

Figura 69 – Síntese do método para extração de perfis estendidos das seções transversais de rios a partir de modelos digitais de elevação. (a) Rede hidrográfica com indicação do ponto do rio (RV) mais próximo do local da estação fluviométrica. (b) Direção de drenagem. (c) Altimetria. (d) Perfil da seção transversal do rio entre os pontos A, B e C.	176
Figura 70 – Exemplo de perfil de seção transversal estendido a partir de dados de modelo digital de elevação.	179
Figura 71 – Definição do domínio para os testes estatísticos entre duas seções transversais.	181
Figura 72 – Curva-chave cota <i>vs.</i> vazão abrangendo toda a amplitude altimétrica da seção transversal. Trechos iniciais e finais calculados pela equação Manning (Q_1 e Q_2). Trecho intermediário calculado por regressão numérica por meio de curva <i>spline</i> suavizada (Q_r).	186
Figura 73 – Curva-chave cota <i>vs.</i> vazão sobreposta ao perfil da seção transversal. Trechos iniciais e finais calculados pela equação Manning (Q_1 e Q_2). Trecho intermediário calculado por regressão numérica por curva <i>spline</i> suavizada (Q_r).	186
Figura 74 – Exemplo de identificação da cota de cheia na condição da vazão de margens plenas (início da planície de inundação do rio) a partir da variação da área molhada unitária exponencial da seção transversal. Curva Υ indicada em azul.	189
Figura 75 – Metodologia para obtenção da declividade média (\bar{S}) do trecho R_s do canal fluvial próximo ao local da estação fluviométrica a partir dos dados de Shen, Vergara et al. (2016), Shen, Anagnostou et al. (2017) e Shen e Mei (2017).	191
Figura 76 – Relação entre os valores das cotas dos rios na condição de margens plenas obtidas a partir da geometria da seção transversal (H_{bf} ou <i>bankfull stage</i>) e para vazões da cheia anual mais provável (H_{mp}).	192
Figura 77 – Histograma dos valores da razão entre a raiz quadrada da declividade do canal e o coeficiente de rugosidade de Manning ($K = \frac{\sqrt{S}}{\eta}$) para as condições de (a) vazão de 95% de permanência (Q_{95}), retratando a condição de estiagem, e (b) vazão com tempo de recorrência de 1,58 ano ($Q_{1,58}$), retratando a condição de margens plenas.	196
Figura 78 – Histograma com a relação da razão entre a raiz quadrada da declividade do canal e o coeficiente de rugosidade de Manning ($K = \frac{\sqrt{S}}{\eta}$) para condição de vazão com tempo de recorrência de 1,58 ano ($Q_{1,58}$), retratando a condição de margens plenas, e da vazão de 95% de permanência (Q_{95}), retratando a condição de estiagem.	197

Figura 79 – Histograma dos valores de declividade longitudinal média dos canais fluviais (S) para as estações analisadas, calculados a partir dos dados do <i>Global distributed basin morphometric dataset – GDBC</i> (SHEN; VERGARA et al., 2016; SHEN; ANAGNOSTOU et al., 2017; SHEN; MEI, 2017).	197
Figura 80 – Histograma com os valores do coeficiente de rugosidade de Manning (η) para as condições de (a) vazão de 95% de permanência (Q_{95}), retratando a condição de estiagem, e (b) vazão com tempo de recorrência de 1,58 ano ($Q_{1,58}$), retratando a condição de margens plenas.	198
Figura 81 – Fluxograma sintético do programa <i>HidroAPP</i>	201
Figura 82 – Espaço territorial protegido formado pela soma das larguras dos leitos e áreas de preservação permanente em faixas marginais de rios em 472 pontos do território brasileiro para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), vazão de margens plenas (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}).	206
Figura 83 – Espaço territorial protegido formado pela soma das larguras dos leitos e áreas de preservação permanente em faixas marginais de rios para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), vazão de margens plenas (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}), para as bacias hidrográficas do (a) Rio Amazonas (AMZ), (b) Rio Tocantins (TOC), (c) Atlântico – trecho norte/nordeste (ATN), (d) Rio São Francisco (SFO), (e) Atlântico – trecho leste (ATL), (f) Rio Paraná (PRN), (g) Rio Uruguai (URU) e (h) Atlântico – trecho sudeste (ATS).	208
Figura 84 – Perdas estimadas de áreas protegidas ripárias em rios brasileiros por bacia hidrográfica considerando como hipótese para definição do leito regular o cenário hidrológico de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}) em comparação com (a) a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}) e (b) a vazão de margens plenas (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$).	209
Figura 85 – Análise integrada da probabilidade de perturbação (inundação integral) das áreas de preservação permanente (APP) em faixas marginais de rios em 472 pontos do território brasileiro para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), vazão de margens plenas (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}).	212

Figura 86 – Análise integrada da probabilidade de perturbação (inundação integral) das áreas de preservação permanente em faixas marginais de rios para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), vazão de margens plenas (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}), para as bacias hidrográficas do (a) Rio Amazonas (AMZ), (b) Rio Tocantins (TOC), (c) Atlântico – trecho norte / nordeste (ATN), (d) Rio São Francisco (SFO), (e) Atlântico – trecho leste (ATL), (f) Rio Paraná (PRN), (g) Rio Uruguai (URU) e (h) Atlântico – trecho sudeste (ATS).	213
Figura 87 – Faixas mínimas sujeitas à recuperação ambiental para áreas de preservação permanente (APP) em faixas marginais de rios em 472 pontos do território brasileiro para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), vazão de margens plenas (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}), considerando imóveis em áreas rurais consolidadas (ARC) com (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 MF até 2 MF, (c) de 2 MF até 4 MF e (d) superior a 4 MF.	215
Figura 88 – Análise integrada da probabilidade de perturbação (inundação integral) das áreas de preservação permanente (APP) sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) em faixas marginais de rios em 472 pontos do território brasileiro para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), vazão de margens plenas (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}), considerando imóveis (a) com até 1 Módulo Fiscal (MF), (b) de 1 MF até 2 MF, (c) de 2 MF até 4 MF e (d) superior a 4 MF.	220
Figura B.1 – Elevações situadas na zona costeira. Exemplo para fins de análise da definição da cota da base de elevações com planície adjacente.	262
Figura B.2 – Fluxograma do algoritmo desenvolvido por Soares-Filho et al. (2014) para mapear topo de elevação.	263
Figura B.3 – Formas do relevo representadas pela rotina <i>r.geomorphon</i> disponível no programa <i>GRASS GIS</i>	264
Figura B.4 – Definição da planície adjacente a elevações costeiras para valores de declividade até 10%.	264
Figura B.5 – Vertentes identificadas para as elevações por meio das bacias de contribuição obtidas a partir do modelo digital de terreno invertido.	265

Figura B.6–Base hidrológica das elevações, geradas a partir da fusão dos polígonos das vertentes formadas a partir dos cumes das elevações.	265
Figura B.7–Hipsometria das elevações.	265
Figura B.8–Declividade das elevações.	265
Figura B.9–Resultado da aplicação dos critérios definidores da área de preservação permanente por topo de elevação estabelecidos na Lei nº 12.651/2012.	266
Figura B.10–Base hidrológica e linha de cumeada (divisores de águas) de elevações sujeitas à área de preservação permanente no terço superior conforme critérios definidos pela Resolução do CONAMA nº 303/2002.	267
Figura B.11–Área de preservação permanente no terço superior de elevações identificadas individualmente, conforme critérios definidos pela Resolução do CONAMA nº 303/2002.	268
Figura B.12–Área de preservação permanente no terço superior de elevações conjuntas com cume separados por distâncias inferiores a 500 m, conforme definido no art. 3º, parágrafo único, da Resolução do CONAMA nº 303/2002.	268
Figura B.13–Área de preservação permanente no terço superior de elevações (<i>E2</i> e <i>E5</i>) e em linhas de cumeada (<i>C1</i> , <i>C2</i> e <i>C3</i>), conforme definido no art. 3º, incisos V e VI e parágrafo único, da Resolução do CONAMA nº 303/2002.	269
Figura B.14–Visualização tridimensional e perfil da área de preservação permanente no terço superior de elevações (<i>E2</i> e <i>E5</i>) e em linhas de cumeada (<i>C1</i> , <i>C2</i> e <i>C3</i>), conforme definido no art. 3º, incisos V e VI e parágrafo único, da Resolução do CONAMA nº 303/2002.	270
Figura B.15–Método para identificação de áreas de preservação permanente no topo de elevações desenvolvido por Oliveira e Fernandes Filho (2016) . Etapas 1 a 4.	272
Figura B.16–Método para identificação de áreas de preservação permanente no topo de elevações desenvolvido por Oliveira e Fernandes Filho (2016) . Etapas 5 a 8.	273
Figura C.1–Estrutura do diretório raiz do ambiente de desenvolvimento do programa para análise de seções transversais.	276
Figura C.2–Fluxograma da fase de preparação dos dados fornecidos pela ANA. Parte 1 de 3.	277
Figura C.3–Fluxograma da fase de preparação dos dados fornecidos pela ANA. Parte 2 de 3.	278
Figura C.4–Fluxograma da fase de preparação dos dados fornecidos pela ANA. Parte 3 de 3.	279

Figura C.5–Fluxograma da fase de análise individual dos dados para cada estação. Parte 1 de 9.	282
Figura C.6–Fluxograma da fase de análise individual dos dados para cada estação. Parte 2 de 9.	283
Figura C.7–Fluxograma da fase de análise individual dos dados para cada estação. Parte 3 de 9.	284
Figura C.8–Fluxograma da fase de análise individual dos dados para cada estação. Parte 4 de 9.	285
Figura C.9–Fluxograma da fase de análise individual dos dados para cada estação. Parte 5 de 9.	286
Figura C.10–Fluxograma da fase de análise individual dos dados para cada estação. Parte 6 de 9.	287
Figura C.11–Fluxograma da fase de análise individual dos dados para cada estação. Parte 7 de 9.	288
Figura C.12–Fluxograma da fase de análise individual dos dados para cada estação. Parte 8 de 9.	289
Figura C.13–Fluxograma da fase de análise individual dos dados para cada estação. Parte 9 de 9.	290
Figura C.14–Fluxograma da fase de análise integrada dos dados por delimitação geográfica. Parte 1 de 4.	299
Figura C.15–Fluxograma da fase de análise integrada dos dados por delimitação geográfica. Parte 2 de 4.	300
Figura C.16–Fluxograma da fase de análise integrada dos dados por delimitação geográfica. Parte 3 de 4.	301
Figura C.17–Fluxograma da fase de análise integrada dos dados por delimitação geográfica. Parte 4 de 4.	302
Figura D.1–Faixas mínimas sujeitas à recuperação ambiental para áreas de preserva- ção permanente (APP) nas margens de rios para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}) para áreas rurais consolidadas (ARC) em imóveis (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 até 2 MF, (c) de 2 até 4 MF e (d) superiores a 4 MF, para bacia do Rio Amazonas (AMZ).	312

Figura D.2—Faixas mínimas sujeitas à recuperação ambiental para áreas de preservação permanente (APP) nas margens de rios para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}) para áreas rurais consolidadas (ARC) em imóveis (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 até 2 MF, (c) de 2 até 4 MF e (d) superiores a 4 MF, para bacia do Atlântico, trecho leste (ATL). 313

Figura D.3—Faixas mínimas sujeitas à recuperação ambiental para áreas de preservação permanente (APP) nas margens de rios para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}) para áreas rurais consolidadas (ARC) em imóveis (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 até 2 MF, (c) de 2 até 4 MF e (d) superiores a 4 MF, para bacia do Atlântico, trecho norte / nordeste (ATN). 314

Figura D.4—Faixas mínimas sujeitas à recuperação ambiental para áreas de preservação permanente (APP) nas margens de rios para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}) para áreas rurais consolidadas (ARC) em imóveis (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 até 2 MF, (c) de 2 até 4 MF e (d) superiores a 4 MF, para bacia do Atlântico, trecho sudeste (ATS). 315

Figura D.5—Faixas mínimas sujeitas à recuperação ambiental para áreas de preservação permanente (APP) nas margens de rios para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}) para áreas rurais consolidadas (ARC) em imóveis (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 até 2 MF, (c) de 2 até 4 MF e (d) superiores a 4 MF, para bacia do Rio Paraná (PRN). 316

Figura D.6–Faixas mínimas sujeitas à recuperação ambiental para áreas de preservação permanente (APP) nas margens de rios para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}) para áreas rurais consolidadas (ARC) em imóveis (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 até 2 MF, (c) de 2 até 4 MF e (d) superiores a 4 MF, para bacia do Rio São Francisco (SFO). 317

Figura D.7–Faixas mínimas sujeitas à recuperação ambiental para áreas de preservação permanente (APP) nas margens de rios para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}) para áreas rurais consolidadas (ARC) em imóveis (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 até 2 MF, (c) de 2 até 4 MF e (d) superiores a 4 MF, para bacia do Rio Tocantins (TOC). 318

Figura D.8–Faixas mínimas sujeitas à recuperação ambiental para áreas de preservação permanente (APP) nas margens de rios para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}) para áreas rurais consolidadas (ARC) em imóveis (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 até 2 MF, (c) de 2 até 4 MF e (d) superiores a 4 MF, para bacia do Rio Uruguai (URU). 319

Figura D.9–Análise integrada da probabilidade de perturbação (inundação integral) das áreas de preservação permanente sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) em faixas marginais de rios na bacia do Rio Amazonas (AMZ) para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}) para imóveis (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 até 2 MF, (c) de 2 até 4 MF e (d) superiores a 4 MF. 325

Figura D.10—Análise integrada da probabilidade de perturbação (inundação integral) das áreas de preservação permanente sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) em faixas marginais de rios na bacia do Atlântico, trecho leste (ATL), para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}), para imóveis (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 até 2 MF, (c) de 2 até 4 MF e (d) superiores a 4 MF. 326

Figura D.11—Análise integrada da probabilidade de perturbação (inundação integral) das áreas de preservação permanente sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) em faixas marginais de rios na bacia do Atlântico, trecho norte / nordeste (ATN), para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}) para imóveis (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 até 2 MF, (c) de 2 até 4 MF e (d) superiores a 4 MF. 327

Figura D.12—Análise integrada da probabilidade de perturbação (inundação integral) das áreas de preservação permanente sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) em faixas marginais de rios na bacia do Atlântico, trecho sudeste (ATS), para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}) para imóveis (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 até 2 MF, (c) de 2 até 4 MF e (d) superiores a 4 MF. 328

Figura D.13—Análise integrada da probabilidade de perturbação (inundação integral) das áreas de preservação permanente sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) em faixas marginais de rios na bacia do Rio Paraná (PRN), para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}) para imóveis (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 até 2 MF, (c) de 2 até 4 MF e (d) superiores a 4 MF. 329

Figura D.14—Análise integrada da probabilidade de perturbação (inundação integral) das áreas de preservação permanente sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) em faixas marginais de rios na bacia do Rio São Francisco (SFO) para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}) para imóveis (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 até 2 MF, (c) de 2 até 4 MF e (d) superiores a 4 MF. 330

Figura D.15—Análise integrada da probabilidade de perturbação (inundação integral) das áreas de preservação permanente sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) em faixas marginais de rios na bacia do Rio Tocantins (TOC) para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}) para imóveis (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 até 2 MF, (c) de 2 até 4 MF e (d) superiores a 4 MF. 331

Figura D.16—Análise integrada da probabilidade de perturbação (inundação integral) das áreas de preservação permanente sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) em faixas marginais de rios na bacia do Rio Uruguai (URU) para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}) para imóveis (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 até 2 MF, (c) de 2 até 4 MF e (d) superiores a 4 MF. 332

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Área de preservação permanente em faixa marginal a cursos d'água naturais perenes e intermitentes, conforme definido no art. 4º, inciso I, da Lei nº 12.651/2012.	60
Quadro 2 – Faixa mínima sujeita à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) até 22.7.2008 para atividades agrossilvipastoris, de ecoturismo e de turismo rural em área de preservação permanente em faixa marginal de cursos d'água naturais, em função do tamanho da propriedade em módulos fiscais (MF), definida no art. 61-A, §§ 1º a 4º, da Lei nº 12.651/2012, e art. 19, do Decreto nº 7.830/2012.	62
Quadro 3 – Faixa mínima sujeita à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) até 22.7.2008 para atividades agrossilvipastoris, de ecoturismo e de turismo rural em área de preservação permanente no entorno de reservatórios naturais, em função do tamanho da propriedade em módulos fiscais (MF), definida no art. 61-A, § 6º, da Lei nº 12.651/2012.	62
Quadro 4 – Zoneamento e características esperadas de um rio conforme a teoria do contínuo.	76
Quadro 5 – Critérios para definição de área de preservação permanente (APP) em topos de morro, montanhas, montes e serras na Lei nº 12.651/2012 e na legislação anterior.	104
Quadro 6 – Definições de relevo plano, suave ondulado, ondulado, fortemente ondulado, montanhoso e escarpado segundo Embrapa (1979)	112
Quadro 7 – Faixas mínimas para recuperação de áreas de preservação permanente em área rural consolidada (ARC) até 22.7.2008, utilizadas para atividades agrossilvipastoris, de ecoturismo e de turismo rural, em função do tamanho do imóvel rural.	125
Quadro 8 – Códigos das bacias hidrográficas.	130
Quadro 9 – Tempo de recorrência para vazão de margens plenas tipicamente utilizado na literatura.	146
Quadro 10 – Critérios utilizados para seleção dos dados de vazão.	148
Quadro 11 – Cenários hidrológicos simulados para cálculo de áreas de preservação permanente.	203
Quadro 12 – Cenários legais simulados para o cálculo da faixa mínima a ser conservada nas áreas de preservação permanente nas margens de rios.	205

Quadro A.1 – Síntese dos resultados para integração das lacunas técnico-normativas para definição precisa das áreas de preservação permanente (APPs) ao redor de olhos d’água e nascentes, em faixa marginal aos cursos d’água naturais, no entorno de reservatórios naturais, nas encostas e em topo de elevações.	253
Quadro C.1 – Programas e funções desenvolvidas para fase de preparação dos dados.	280
Quadro C.2 – Variáveis para definição dos critérios de análise dos dados.	291
Quadro C.3 – Programas e funções desenvolvidas para fase de análise individual dos dados das estações fluviométricas.	294
Quadro C.4 – Programas e funções desenvolvidas para fase de análise integrada dos dados das estações fluviométricas.	303

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variação da área total protegida por declividade (áreas de preservação permanente e de uso restrito) e efeito de fragmentação para diversos modelos digitais de elevação aplicados ao território da Ilha de Santa Catarina.	100
Tabela 2 – Efeitos da resolução e escala para delimitação de área de preservação permanente (APP) em topo de elevações para o Município de Campinas/SP.	115
Tabela 3 – Características das séries temporais para diferentes análises com variação da condição de continuidade mínima exigida (c_{min}) em comparação com a análise paradigma, que emprega os critérios estritos definidos pela WMO (2007, 2011, 2017).	159
Tabela 4 – Variáveis definidas para as análises dos dados por meio do programa <i>HidroAPP</i>	160
Tabela 5 – Variáveis estabelecidas para o programa <i>HidroAPP</i> para análise de cenários regulatórios para definição do leito regular de cursos d’água.	202
Tabela 6 – Extensão total das seções transversais formadas pelos leitos dos rios e as respectivas áreas de preservação permanente (APP) para as estações fluviométricas analisadas por bacia hidrográfica e cenário hidrológico simulado.	207
Tabela 7 – Probabilidade de perturbação por inundação integral das seções transversais formadas pelos leitos dos rios e as respectivas áreas de preservação permanente (APP) para as estações fluviométricas analisadas por bacia hidrográfica e cenário hidrológico simulado.	211
Tabela 8 – Extensão total das seções transversais formadas pelos leitos dos rios e as respectivas áreas de preservação permanente (APP) sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) em função do tamanho dos imóveis rurais e os cenários hidrológicos simulados, para todas as estações fluviométricas analisadas.	216
Tabela 9 – Relações entre a faixa mínima sujeita à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) e as respectivas áreas de preservação permanente (APP) em função do tamanho dos imóveis rurais e os cenários hidrológicos simulados, para todas as estações fluviométricas analisadas.	217

Tabela 10 – Probabilidade de perturbação por inundação integral das seções transversais formadas pelo leito dos rios e respectivas faixas mínimas das áreas de preservação permanente (APP) sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC), em função do cenário hidrológico simulado e do tamanho do imóvel rural, para todas as estações fluviométricas analisadas.	221
Tabela D.1 – Extensão total das seções transversais formadas pelos leitos dos rios e as respectivas áreas de preservação permanente (APP) sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) para as estações fluviométricas analisadas, considerando o tamanho dos imóveis rurais e os cenários hidrológicos simulados, por bacia hidrográfica. . . .	307
Tabela D.2 – Probabilidade de perturbação por inundação integral das seções transversais formadas pelo leito dos rios e respectivas faixas mínimas das áreas de preservação permanente (APP) sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC), em função do cenário hidrológico simulado e do tamanho do imóvel rural, por bacia hidrográfica. . . .	320

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADC	Ação Declaratória de Constitucionalidade
ADI	Ação Direta de Inconstitucionalidade
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
AP	Área protegida
APE	Área protegida efetiva
APP	Área de preservação permanente
ARC	Área rural consolidada
ASTER GDEM	<i>Advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer global digital elevation model</i>
AUR	Área de uso restrito
CAR	Cadastro ambiental rural
CBERS	Satélite sino-brasileiro de recursos terrestres
CDF	Cumulative distribution function
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DEM	<i>Digital elevation model</i>
EIFOV	<i>Effective instantaneous field of view</i>
GDBC	<i>Global distributed basin morphometric dataset</i>
GEVd	<i>Generalized Extreme Value Distribution</i>
GRWL	<i>Global river widths from landsat</i>
HAND	<i>Height above the nearest drainage</i>
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
ID	Código identificador de um registro em banco de dados
IFOV	<i>Instantaneous field of view</i>

INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MDE	Modelo digital de elevação
MDT	Modelo digital de terreno
MDT SC	Modelo digital de terreno do levantamento aerofotogramétrico do Estado de Santa Catarina de 2010 a 2012
MF	Módulo fiscal
PDF	<i>Probability density function</i>
PDF/A	<i>Portable Document Format</i> para a preservação de longo prazo de documentos eletrônicos
PNMA	Política Nacional do Meio Ambiente
REsp	Recurso Especial
REURB-E	Regularização fundiária urbana de interesse específico
REURB-S	Regularização fundiária urbana de interesse social
SC	Santa Catarina
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SNUC	Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza
SRTM	<i>Shuttle radar topography mission</i>
STF	Supremo Tribunal Federal
STJ	Superior Tribunal de Justiça

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	43
1.1	JUSTIFICATIVA	44
1.2	HIPÓTESE	46
1.3	OBJETIVO GERAL	46
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	46
1.5	ESTRUTURA DA TESE	47
2	DEFINIÇÃO DE ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE PARA PROTEÇÃO DOS CORPOS HÍDRICOS NATURAIS: HISTÓRICO E LACUNAS TÉCNICAS ATUAIS	49
2.1	METODOLOGIA PARA INTEGRAÇÃO DE CONCEITOS TÉCNICOS INDETERMINADOS	51
2.2	EVOLUÇÃO DAS ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE COM FUNÇÃO DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DOS RECURSOS HÍDRI- COS NATURAIS	53
2.3	NASCENTES E OLHOS D'ÁGUA	63
2.3.1	Nascentes móveis: estabelecimento do ponto de montante a ser considerado como início da nascente, final do trecho efêmero do curso d'água e início do intermitente	64
2.3.2	Delimitação da extensão do entorno de nascentes e olhos d'água em função da flutuação sazonal do lençol freático	67
2.4	CURSOS D'ÁGUA	69
2.4.1	Definição de cursos d'água naturais e artificiais	71
2.4.2	Importância ecológica dos rios e da vegetação ripária	76
2.4.3	Ponto de início da APP ripária no sentido longitudinal em rios com nascentes móveis	78
2.4.4	Ponto de início da APP ripária no sentido transversal: delimi- tação do leito regular	78
2.4.5	Transição das faixas marginais em função da variação da lar- gura do leito fluvial	83
2.4.6	Presença de ilha fluvial: APP insular e cálculo da largura do curso d'água	85
2.4.7	Faixa marginal de proteção em canais fluviais divagantes	86
2.4.8	Translação da faixa de APP por alterações naturais e antrópi- cas de leitos fluviais	87
2.4.9	Largura máxima da faixa marginal para proteção de ecossiste- mas ripários	89

2.5	ENTORNO DE RESERVATÓRIOS NATURAIS	91
2.5.1	Conceitos de lago, lagoa e laguna e a proteção uniforme do entorno	91
2.5.2	Nível a partir do qual se inicia a APP no entorno dos reservatórios naturais	92
2.5.3	Estabelecimento da largura máxima da área de preservação permanente para proteção do entorno de corpos hídricos lacustres	93
2.5.4	Transição das faixas marginais em função da alteração do zoneamento das margens entre rural e urbano	94
2.5.5	Ilhas lacustres: cálculo da largura da APP e incidência insular	94
2.5.6	Área de preservação permanente em estuários	95
2.6	ENCOSTAS	97
2.6.1	Histórico, conceito e lacunas	97
2.6.2	Resolução adequada para definição de áreas protegidas por declividade	98
2.7	TOPO DE MORRO, MONTES, MONTANHAS E SERRAS	102
2.7.1	Critérios definidores da APP em topo de elevações	103
2.7.2	Elevações com espelho d'água ou planície adjacente	107
2.7.3	Elevações em relevo ondulado	111
2.7.4	Resolução adequada para o cálculo da declividade média das elevações	114
2.8	SÍNTESE DOS RESULTADOS E ESCOLHA DE LACUNA RELEVANTE PARA PROSSEGUIR NA PESQUISA DE SOLUÇÕES PARA INTEGRAÇÃO	116
3	<i>HIDROAPP – UMA PLATAFORMA WEB PARA A DEFINIÇÃO DE LEITOS FLUVIAIS REGULARES DE RIOS DO BRASIL</i>	117
3.1	METODOLOGIA	117
3.2	PREPARAÇÃO DOS DADOS	120
3.3	ANÁLISE INDIVIDUAL DE ESTAÇÕES	122
3.3.1	Definição de cenários hidrológicos	123
3.3.2	Cálculo das áreas de preservação permanentes e análise da probabilidade de perturbação	123
3.3.3	Cálculo da probabilidade de inundação das faixas mínimas para recuperação de áreas de preservação permanente em área rural consolidada (ARC)	125
3.3.4	Função distribuição acumulada (CDF) em razão da cota da seção transversal do rio	128

3.3.5	Cálculo da relação entre declividade e rugosidade para equação de Manning	129
3.3.6	Códigos-fonte das rotinas desenvolvidas para fase de análise individual	129
3.4	ANÁLISE INTEGRADA	129
3.4.1	Delimitação geográfica	129
3.4.2	Integração dos resultados individuais	130
3.4.3	Histogramas para análise da probabilidade de inundação integral da faixa marginal em cada cenário	133
3.4.4	Relatório e interfaces gráficas para visualização dos resultados	134
3.4.5	Códigos-fonte das rotinas desenvolvidas para fase de análise integrada	135
3.5	SÍNTESE DO CAPÍTULO	144
4	VAZÃO DOMINANTE PARA RIOS BRASILEIROS: SELEÇÃO, OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS PARA DEFINIÇÃO DAS CHEIAS ANUAIS MAIS PROVÁVEIS	145
4.1	METODOLOGIA	146
4.1.1	Filtragem e tratamento preliminar dos dados	146
4.1.2	Condições definidas para completude da série de dados	147
4.1.2.1	Critérios de completude da Organização Meteorológica Mundial	148
4.1.2.2	Critérios complementares para otimização do período de análise das séries de dados	149
4.1.2.3	Otimização da série de dados a partir da distribuição generalizada de valores extremos (GEVd) com menor intervalo de confiança	151
4.1.3	Análise exploratória da distribuição empírica de vazões	154
4.1.4	Análise estatística das vazões máximas anuais pela distribuição generalizada de valores extremos (GEVd)	155
4.1.5	Análise estatística da média móvel de sete dias das vazões diárias (Q_7) pela distribuição generalizada de valores extremos (GEVd)	156
4.1.6	Exclusão de estações situadas junto a pontes rodoviárias	157
4.1.7	Seleção dos dados de entrada	157
4.1.8	Critérios para seleção das séries temporais	158
4.1.9	Quadro síntese das variáveis de entrada do programa	160
4.2	RESULTADOS E DISCUSSÃO	161
4.2.1	Validação do método de otimização das séries temporais por meio da distribuição generalizada de valores extremos	161
4.2.2	Variação espacial do parâmetro de forma da distribuição generalizada de valores extremos	162

4.2.3	Tempo de recorrência para a vazão da cheia anual mais provável ou vazão dominante	164
4.3	SÍNTESE DO CAPÍTULO	167
5	ANÁLISE DE SEÇÕES TRANSVERSAIS E CURVAS-CHAVE DE RIOS BRASILEIROS	169
5.1	METODOLOGIA	169
5.1.1	Exclusão de perfis transversais com depressões inferiores à cota do talvegue	169
5.1.2	Exclusão de registros incoerentes nas medições em campo	170
5.1.3	Análise dos critérios de seleção e consistência dos dados	170
5.1.4	Figuras das séries históricas de cotas e vazões selecionadas para análise	170
5.1.5	Curva de permanência	172
5.1.6	Figura das seções transversais disponíveis para análise	172
5.1.7	Cálculo da geometria da seção transversal	173
5.1.8	Método para prolongamento das seções transversais dos rios a partir de modelos digitais de elevação	174
5.1.8.1	Extração de perfis de seções transversais a partir de modelos digitais de elevação	174
5.1.8.2	Acoplamento entre os perfis das seções transversais da ANA e os extraídos de modelos digitais de elevação	177
5.1.9	Definição das curvas-chave	179
5.1.9.1	Estabelecimento de uma curva-chave cota vs. vazão por meio de regressão numérica dos dados medidos em campo considerando a variabilidade das seções transversais no tempo	180
5.1.9.2	Curva-chave definida pela ANA	182
5.1.9.3	Curva-chave uniforme para toda a série	184
5.1.9.4	Extrapolação da curva-chave pela equação de Manning para abranger toda a seção transversal	184
5.1.10	Identificação geométrica do início da planície de inundação adjacente ao curso d'água	187
5.1.11	Cálculo da relação entre declividade e rugosidade para equação de Manning	190
5.1.12	Distribuição espacial do coeficiente de rugosidade de Manning	190
5.2	RESULTADOS E DISCUSSÃO	191
5.2.1	Identificação geométrica do leito do rio na condição de margens plenas (<i>bankfull stage</i>)	191
5.2.2	Distribuição espacial da razão entre a raiz quadrada da declividade do canal e o coeficiente de rugosidade de Manning	193

5.3	SÍNTESE DO CAPÍTULO	195
6	AMBIGUIDADE NA LEGISLAÇÃO AMBIENTAL PODE REDUZIR 37% DAS ÁREAS PROTEGIDAS RIPÁRIAS NO BRASIL	199
6.1	METODOLOGIA	200
6.1.1	Definição dos cenários hidrológicos	202
6.1.2	Faixas marginais simuladas: cenários legais	204
6.2	RESULTADOS E DISCUSSÃO	205
6.2.1	Área de preservação permanente	205
6.2.1.1	Área total protegida por cenário hidrológico	205
6.2.1.2	Perturbação das faixas marginais por cenário hidrológico	210
6.2.2	Áreas rurais consolidadas: faixa mínima sujeita à recuperação ambiental	214
6.2.2.1	Área protegida efetiva por cenário hidrológico	214
6.2.2.2	Perturbação das faixas marginais mínimas sujeitas à recuperação ambiental por cenário hidrológico	218
6.3	SÍNTESE DO CAPÍTULO: CENÁRIO IDEAL PARA REGULAMENTAÇÃO DO LEITO REGULAR DE CURSO D'ÁGUA	222
7	CONCLUSÃO	223
	REFERÊNCIAS	225
	APÊNDICES	251
A	QUADRO SÍNTESE COM OS RESULTADOS PARA INTEGRAÇÃO DAS LACUNAS TÉCNICO-NORMATIVAS PARA DELIMITAÇÃO DE ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE COM FUNÇÃO DE PROTEÇÃO AOS RECURSOS HÍDRICOS NATURAIS	253
B	MÉTODOS PARA DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE NO TOPO DE ELEVAÇÕES	261
B.1	ELEVAÇÕES COM BASE EM ESPELHO D'ÁGUA OU PLANÍCIE ADJACENTE	261
B.1.1	Delimitação da base hidrológica das elevações	263
B.1.2	Cálculo da área de preservação permanente de acordo com a Lei nº 12.651/2012	264
B.1.3	Cálculo da área de preservação permanente de acordo com a Lei nº 4.771/1965 e Resoluções do CONAMA nº 4/1985 e 303/2002: topo de elevações, conjunção de morros e linhas de cumeada	266

B.2	ELEVAÇÕES COM BASE EM RELEVO ONDULADO	270
C	ROTINAS DESENVOLVIDAS PARA ANÁLISE DE SEÇÕES TRANSVERSAIS	275
C.1	PREPARAÇÃO DOS DADOS	275
C.1.1	Estrutura dos diretórios com o banco de dados individualizado por estações	275
C.1.2	Fluxograma da fase de preparação dos dados	275
C.1.3	Códigos-fonte das rotinas desenvolvidas para preparação dos dados	275
C.2	ANÁLISE INDIVIDUAL DE CADA ESTAÇÃO	281
C.2.1	Fluxograma da fase de análise individual	281
C.2.2	Variáveis para definição dos critérios de análise dos dados . . .	281
C.2.3	Códigos-fonte das rotinas desenvolvidas para fase de análise individual	281
C.3	ANÁLISE INTEGRADA	298
C.3.1	Fluxograma da fase de análise integrada	298
C.3.2	Variáveis para análise integrada dos resultados	298
C.3.3	Códigos-fonte das rotinas desenvolvidas para fase de análise integrada	298
D	RESULTADOS DAS ANÁLISES POR BACIA HIDROGRÁ- FICA DAS FAIXAS MÍNIMAS SUJEITAS À RECUPERA- ÇÃO AMBIENTAL NAS MARGENS DE RIOS EM ÁREAS RURAIS CONSOLIDADAS	307

1 INTRODUÇÃO

Para efetivação do direito fundamental ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, um dos compromissos internacionais assumidos pelos Estados signatários da Convenção da Diversidade Biológica foi a criação, gestão e regulamentação de áreas protegidas para conservação da biodiversidade (UNEP, 1992). As leis são ferramentas necessárias para proteger áreas úmidas (MALTCHIK et al., 2017), contudo, o planejamento das ações de conservação normalmente trata de forma separada os ambientes terrestres e aquáticos (ABELL; HARRISON, 2020). Estima-se que 89% das áreas úmidas da América do Sul foram perdidas após 1900 (CREED et al., 2017) e 20% do território brasileiro ainda é coberto por elas (JUNK et al., 2013). Para serem eficientes, as estratégias para conservação dos recursos hídricos terrestres precisam ser integradas, alinhadas e incorporadas às políticas e leis ambientais atuais (LEAL; LENNOX et al., 2020).

A partir de 1999 foi iniciada a reforma legislativa da Lei nº 4.771/1965 – Código Florestal, resultando na atual Lei de proteção da vegetação nativa (Lei nº 12.651/2012, conhecida como Código Florestal¹ de 2012), cujo projeto foi o assunto mais discutido pelas casas legislativas brasileiras desde a Constituição de 1988, quando da redemocratização do país. O motivo para discussão tão expressiva deve-se ao fato que 53% da vegetação nativa no Brasil ocorre dentro de propriedades privadas urbanas e rurais (SOARES-FILHO et al., 2014) e as áreas protegidas pelo Código Florestal geram restrições ao exercício do direito de propriedade, em benefício do bem-estar coletivo.

Modificações na legislação ambiental devem considerar os avanços recentes da ciência na área de ecologia e conservação (METZGER, 2010). Entretanto, apesar da intensa discussão do Projeto de Lei nº 1.876/1999 e da Medida Provisória nº 571/2012², que definiram a versão atual do Código Florestal de 2012, o legislador não conseguiu exaurir todos os conceitos e critérios técnicos necessários para aplicação das normas que definem os espaços territoriais especialmente protegidos previstos na legislação anterior e atual, em especial, aqueles relacionados à delimitação precisa de *áreas de preservação permanente com função de proteção aos recursos hídricos naturais*.

Reconhecer as limitações e problemas da Lei nº 12.651/2012 é uma necessidade premente no atual cenário político brasileiro (GRASEL; FEARNSIDE; ROVAI et al., 2019).

¹ A lei é considerada uma “*codificação*” quando se organiza sistematicamente, num corpo de normas, relativamente extenso, a totalidade das disposições e prescrições de um setor da ordem jurídica. Não é necessário que esse corpo de normas receba o nome de *código* para que tenha essa natureza” (SILVA, 2004, p. 530–531). A Lei de proteção da vegetação nativa – Lei nº 12.651/2012, apesar de não se autointitular como “Código Florestal” e não concentrar toda a matéria relativa à proteção de espaços territoriais e ecossistemas no Brasil, será neste trabalho referenciada como *Código Florestal de 2012* por ter sido a nomenclatura que se popularizou quando da sua edição, bem como por ser a expressão utilizada pelo Supremo Tribunal Federal para designá-la (cf. BRASIL, 2018a,b,c,d,e).

² Posteriormente convertida na Lei nº 12.727/2012.

A título de exemplo, de forma sintética, pode-se citar algumas lacunas importantes que precisam ser solucionadas:

- A definição precisa de curso d'água natural;
- O nível hidrológico do leito regular, a partir do qual inicia a faixa marginal de cursos d'água intermitentes e perenes;
- A definição hidrológica do ponto de transição entre cursos d'água efêmeros e intermitentes;
- O nível hidrológico que define o início do entorno dos lagos e lagoas naturais;
- A definição do entorno de nascentes e olhos d'água, considerando variações espaciais e temporais do afloramento da água subterrânea;
- Metodologias e definições para o cálculo de topos de morros, montes, montanhas e serras, especialmente para elevações com planícies adjacentes.

Tais lacunas legais têm gerado conflitos no âmbito da gestão ambiental de organizações públicas (órgãos e entidades integrantes do Sistema Nacional do Meio Ambiente – SISNAMA) em procedimentos de autorização, licenciamento e fiscalização, por permitirem o surgimento de divergências técnicas em estudos, laudos e pareceres ambientais. O mesmo ocorre em procedimentos jurisdicionais, cuja ausência de critérios e conceitos normatizados permite divergências técnicas em análises e perícias ambientais. No âmbito do licenciamento ambiental, a imprecisão quanto aos conceitos e critérios a serem adotados para identificação de áreas de preservação permanente gera conflitos entre o órgão licenciador e os interessados, resultando em sucessivas complementações de estudos, com implicação direta no tempo de tramitação dos processos, na quantificação de impactos ambientais e na definição das compensações ambientais exigidas para as intervenções em áreas protegidas.

1.1 JUSTIFICATIVA

O Direito Ambiental tem como característica a transdisciplinaridade (LEITE, 2015), cuja formulação de novos institutos e a regulamentação das normas gerais ambientais necessitam da convergência entre diversos ramos do conhecimento, tais como: o direito, a geologia, a geografia, a biologia e as engenharias.

A legislação ambiental ao estabelecer limitações ao direito de propriedade, tais como as áreas de preservação permanente (APP), necessita definir critérios claros e precisos para delimitação dos espaços territoriais especialmente protegidos, de forma a garantir a efetividade da proteção ao bem ambiental tutelado e, ao mesmo tempo, evitar insegurança na aplicação das normas. A falta de regulamentação de conceitos e critérios técnicos necessários à identificação de bens ambientais protegidos implica redução da eficiência da gestão ambiental pública e privada, prejudicando o planejamento e contribuindo para formação estudos ambientais com diagnósticos imprecisos.

A ausência de regulamentação de elementos definidores das áreas de preservação permanente (APP), em regra, não lhes retira a eficácia, pois o ordenamento prevê que a integração dar-se-á de forma interdisciplinar, empregando-se o método preponderantemente aceito na área de conhecimento originária (BRASIL, 2015, art. 473, inciso III). Na atividade de regulação “o âmbito de aplicação da lei será estabelecido de forma tão específica quanto o possibilite o conhecimento técnico ou científico da área respectiva” (BRASIL, 1998, art. 7º, III). Contudo, mudanças na legislação, sem suporte científico, trazem riscos consideráveis para a conservação dos ecossistemas de água doce (TANIWAKI et al., 2018). Por outro lado, os esforços redobrados de pesquisa também podem ajudar a resolver lacunas de conhecimento críticas para uma política hídrica eficaz (SULLIVAN; RAINS; RODEWALD et al., 2020). Brancalion et al. (2016) sugerem que as decisões judiciais e regulamentações que visem resolver questões pendentes da Lei de proteção da vegetação nativa sejam realizadas com base no conhecimento científico e com maior participação social. Dentro das ciências naturais pode inexistir uniformidade quanto a determinado conceito ou método, o que exige pesquisas específicas para avaliar as consequências da adoção de cada um deles para efetividade da proteção ambiental de uma determinada categoria de espaço territorial, podendo, ainda, ser necessário desenvolver novos métodos científicos para tal finalidade.

A normatização de conceitos operacionais e métodos pode dar-se por normas legais ou técnicas e tem por finalidade aumentar a segurança da gestão ambiental pública e privada, bem como proporcionar segurança e garantia de proteção à sociedade. Em regra, no âmbito da Engenharia, os parâmetros técnicos são uniformizados através das normas técnicas dos órgãos normativos, como a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, cujas normas uniformizam e universalizam indicações técnico-científicas (MEIRELLES, 1994).

Na área ambiental, quando os parâmetros relativos ao controle e à manutenção da qualidade do meio ambiente não estão definidos em lei em sentido estrito, a regulamentação técnica cabe ao CONAMA³ (BRASIL, 1981), mediante proposta do IBAMA⁴, sem prejuízo da sua exigência e detalhamento no âmbito dos órgãos ambientais executores por meio de procedimentos padronizados, como os termos de referência para elaboração de estudos ambientais. Contudo, apesar da significativa produção científica sobre biodiversidade e conservação dos recursos hídricos no Brasil, persiste o abismo entre a ciência e os tomadores de decisões, cuja lacuna necessita ser preenchida por meio de *cientistas translacionais*, que estabeleçam o diálogo e facilitem a compreensão do conhecimento científico às autoridades, gestores e formadores de políticas públicas (AZEVEDO-SANTOS et al., 2017; KARAM-GEMAEL et al., 2018; GRASEL; FEARNSIDE; VITULE et al., 2018; GRASEL; MORMUL et al., 2018; GRASEL; FEARNSIDE; ROVAI et al., 2019).

³ Conselho Nacional do Meio Ambiente.

⁴ Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis.

Nesse sentido, a presente tese dedicar-se-á à pesquisa de soluções para fins de integração dos elementos indeterminados no Código Florestal de 2012 para a efetivação da proteção dos recursos hídricos naturais, em especial, as áreas de preservação permanente para proteção de olhos d'água, nascentes, cursos d'água, reservatórios naturais, encostas e topos de morros, montes, montanhas e serras.

1.2 HIPÓTESE

A literatura científica fornece subsídios para delimitação precisa das áreas de preservação permanente com função de proteção dos recursos hídricos naturais, por meio dos conceitos e métodos preponderantemente aceitos nas suas áreas de conhecimento originais, os quais podem ser utilizados para atividade regulatória com a finalidade de uniformização das técnicas de identificação daqueles espaços territoriais especialmente protegidos, garantindo-se a efetividade de suas funções ecológicas.

1.3 OBJETIVO GERAL

Propor soluções para integração das principais lacunas técnicas e normativas que dificultam a delimitação espacial precisa de áreas de preservação permanente com função de proteção de recursos hídricos naturais.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Avaliar as principais lacunas para proteção de olhos d'água, nascentes, cursos d'água, reservatórios naturais (lagos, lagoas e lagoas), encostas e topos de morros, montes, montanhas e serras, a partir da análise dos conceitos e metodologias presentes na legislação e literatura científica;
- b) Desenvolver um programa computacional para análise individual e integrada das séries históricas de dados hidrológicos e de seções transversais dos principais rios brasileiros;
- c) Avaliar o tempo de recorrência esperado para a vazão dominante ou de margens plenas para definição das cheias anuais mais prováveis nos rios brasileiros;
- d) Determinar as seções transversais de rios brasileiros para obtenção das propriedades geométricas dos canais fluviais;
- e) Avaliar os impactos ambientais à proteção dos ecossistemas ripários nos rios brasileiros em diferentes cenários hidrológicos.

1.5 ESTRUTURA DA TESE

A presente tese foi estruturada de forma a realizar cada objetivo específico por meio de um capítulo individualizado, cada um com sua própria metodologia e resultados, os quais, à medida que são produzidos, servem de fundamento para os Capítulos subsequentes.

Sob um aspecto geral, na busca de soluções para as principais lacunas técnicas e normativas envolvendo a delimitação espacial das áreas de preservação permanente com função de proteção de recursos hídricos naturais, a metodologia empregada pode ser sintetizada nas seguintes etapas:

O [Capítulo 2](#) é destinado à pesquisa de conceitos e métodos presentes na legislação ambiental e literatura científica para integrá-las, podendo ser considerado uma grande revisão, que apresenta resultados. O método adotado para integração das lacunas regulamentares consiste na adoção do critério científico predominantemente aceito na área de conhecimento originária. Contudo, uma das características da ciência é sua diversidade, de forma que um determinado problema pode apresentar soluções plurais, principalmente para questões ambientais que são essencialmente interdisciplinares ou transdisciplinares. Nesses casos, procura-se indicar a solução científica mais favorável à tutela do meio ambiente. Então, uma parte dos resultados dessa primeira etapa permite apontar soluções, ao mesmo tempo que se identificam lacunas com divergências na literatura científica ou na doutrina jurídica, dentro das quais foi escolhida aquela aparentemente mais relevante para prosseguir na avaliação das alternativas para sua resolução.

A definição hidrológica de leitos regulares foi considerada de extrema relevância e escolhida para análise pormenorizada, devido ao fato dos diversos cenários apresentados nas ciências naturais e jurídicas afetarem significativamente a delimitação dos ecossistemas ripários de todos os rios brasileiros. Para avaliar o impacto de cada hipótese regulatória identificada na revisão, foi necessário criar um programa computacional, o qual é apresentado no [Capítulo 3](#). O desenvolvimento do programa exigiu a elaboração de métodos para solucionar problemas científicos ligados à análise de dados ambientais, hidráulica, hidrologia e geoprocessamento. A metodologia empregada para o desenvolvimento do programa consiste em gerar uma biblioteca com algoritmos que podem ser adaptados para diversas análises ambientais e hidrológicas com abrangência geográfica local (estações fluviométricas individualizadas) ou de forma integrada por bacia hidrográfica ou para todo o território brasileiro continental.

No [Capítulo 4](#), por meio da aplicação do programa desenvolvido, foi possível avaliar se a probabilidade esperada para a vazão dominante ou de margens plenas prevista na literatura é aplicável aos rios brasileiros, cujo resultado é adotado nas análises realizadas no [Capítulo 6](#) como cenário científico para avaliação das hipóteses regulatórias para áreas de preservação permanente em faixa marginal a cursos d'água naturais.

A análise das seções transversais dos rios brasileiros também exigiu a elaboração de métodos específicos durante o desenvolvimento do programa, os quais são apresentados no [Capítulo 5](#). Naquele Capítulo são descritos os métodos para definição de curvas-chave entre cota e vazão, seleção de dados considerando a variação da geometria da seção transversal no tempo, o prolongamento dos perfis topográficos a partir de dados de modelos digitais de terreno, a obtenção de variáveis geométricas dos canais por meio de dados de sensoriamento remoto e a validação de uma técnica de identificação do leito fluvial em condição de margens plenas somente com dados de geometria, para fins de aplicação em análises cotidianas em rios que não apresentam monitoramento regular.

No [Capítulo 6](#), por meio da aplicação da ferramenta computacional desenvolvida no [Capítulo 3](#), adotando-se os critérios de análise de dados e resultados obtidos nos Capítulos 4 e 5, foram avaliados os impactos ambientais à proteção dos ecossistemas ripários para diferentes cenários hidrológicos, considerando a área total protegida e a probabilidade de sua inundação integral (perturbação).

O trabalho é concluído ([Capítulo 7](#)) com a análise integrada dos resultados obtidos durante o desenvolvimento da tese para integração das lacunas técnico-normativas para delimitação de áreas de preservação permanente com função de proteção aos recursos hídricos naturais, os quais são sintetizados no [Quadro A.1](#).

2 DEFINIÇÃO DE ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE PARA PROTEÇÃO DOS CORPOS HÍDRICOS NATURAIS: HISTÓRICO E LACUNAS TÉCNICAS ATUAIS⁵

A degradação ambiental provocada pelas atividades humanas, acentuada após a revolução industrial, tornou necessário ampliar a concepção do direito fundamental à vida para incorporar uma nova geração de garantias que buscam assegurar as condições adequadas de vida e a melhoria contínua da qualidade ambiental, para as presentes e futuras gerações, mediante compromisso internacional assumido pelas partes na Declaração da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano (UNEP, 1972).

O meio ambiente ecologicamente equilibrado foi incorporado à Constituição da República Federativa do Brasil (CRFB) de 1988 com status de direito fundamental essencial à sadia qualidade de vida (BRASIL, 1988, art. 225, *caput*). Ele constitui um macrobem de interesse público, formado por elementos corpóreos e incorpóreos singulares (microbens), públicos e privados, e.g., a fauna, a flora, as áreas protegidas, o patrimônio cultural, entre outros (LEITE, 2003).

Para efetivação do direito fundamental ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, um dos compromissos internacionais assumidos pelos Estados signatários da Convenção da Diversidade Biológica foi a criação, gestão e regulamentação de áreas protegidas para conservação da biodiversidade (UNEP, 1992). No Brasil, a Constituição impõe ao Poder Público a definição de espaços territoriais e seus componentes a serem especialmente protegidos, nos quais é vedada “qualquer utilização que comprometa a integridade dos atributos que justifiquem sua proteção” (BRASIL, 1988, art. 225, § 1º, III). Podem, segundo Silva (2004), ser agrupados nas seguintes categorias: espaços territoriais integrantes do Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza – SNUC (BRASIL, 2000a), áreas de manejo sustentável, zoneamento ambiental e outros espaços não incluídos nas categorias anteriores.

Por meio do Decreto nº 4.421/1921, o Brasil instituiu as florestas protetoras como espaços destinados à conservação de ecossistemas nativos (BRASIL, 1922, 1934a), que foram sucedidas pelas áreas de preservação permanente (APPs), criadas pela Lei nº 4.771/1965. Essas áreas protegidas abrangem a superfície e a vegetação que as cobre, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas (BRASIL, 1965, 2000b, 2001, 2012b).

Para Fiorillo (2008), Milaré (2011) e Machado (2014) as áreas de preservação permanente são espaços territoriais especialmente protegidos a que se refere o inciso III, § 1º, do art. 225, da CRFB/1988, cuja natureza jurídica foi reconhecida pelo plenário do

⁵ Partes deste Capítulo reproduzem ou utilizam como base as seguintes publicações: Souza, Chaffe, Pinto e Nogueira (2019) e Souza, Chaffe e Pinto (2019a, 2020).

Supremo Tribunal Federal (STF) no julgamento do pedido de liminar na Ação Direta de Inconstitucionalidade (ADI) nº 3.540/DF (BRASIL, 2005). No âmbito do direito administrativo, quanto à intervenção do Estado no domínio econômico, admite-se que as APPs – definidas no art. 4º, da Lei nº 12.651/2012, que sucederam aquelas definidas no art. 2º, da Lei nº 4.771/1965 – têm natureza jurídica de limitação administrativa (MACHADO, 2002), de forma que somente lei em sentido estrito pode afastar sua eficácia (BRASIL, 2005), enquanto que aquelas definidas no art. 6º, da Lei nº 12.651/2012, que sucedeu o art. 3º, da Lei nº 4.771/1965, são consideradas como servidões administrativas⁶.

A partir de 1999 foi iniciada a reforma legislativa da Lei nº 4.771/1965, resultando na atual Lei de proteção da vegetação nativa (Lei nº 12.651/2012, conhecida como Código Florestal de 2012), cujo projeto foi o assunto mais discutido pelas casas legislativas brasileiras desde a Constituição de 1988, quando da redemocratização do país. O motivo para discussão tão expressiva deve-se ao fato que 53% da vegetação nativa no Brasil ocorre dentro de propriedades privadas urbanas e rurais (SOARES-FILHO et al., 2014) e as áreas protegidas pelo Código Florestal geram restrições ao exercício do direito de propriedade, em benefício do bem-estar coletivo.

Apesar da intensa discussão no processo legislativo que resultou no Código Florestal de 2012, o legislador não conseguiu exaurir todos os conceitos e critérios técnicos necessários para delimitação precisa de áreas de preservação permanente, principalmente daquelas com *função de proteção aos recursos hídricos*. A ausência de normatização de conceitos e critérios técnicos definidores de espaços territoriais protegidos *manteve e criou novas lacunas*, que permitem o surgimento de divergências na identificação de APPs em análises ambientais, seja nos procedimentos de autorização ou licenciamento, como em processos reparatórios (cíveis) ou sancionatórios (administrativos e criminais). Ao gerarem incertezas e imprecisões para definição espacial dessas áreas protegidas, tais lacunas prejudicam a proteção efetiva de recursos hídricos e seus ecossistemas associados.

Além das lacunas regulamentares, é necessário considerar que a natureza quando em equilíbrio é dinâmica, i.e., o ambiente quando estável não é estático, o que se pode observar na maior parte dos corpos hídricos, os quais estão sujeitos a fenômenos espaciais e temporais que não podem ser representados por uma única amostra no tempo (e.g., uma imagem). Além da importância da análise sazonal, alterações significativas no regime hidrológico de todo o planeta têm ocorrido nos últimos 30 anos, tornando necessário que as análises envolvendo recursos hídricos sejam multidecadais (PEKEL et al., 2016).

⁶ As áreas de preservação permanente de aplicação geral definidas na legislação ambiental, inclusive em Resoluções do CONAMA anteriores a 2012, regem-se pelas seguintes características: executoriedade, razoabilidade, não-confiscatoriedade, legalidade, irrenunciabilidade, intransacionabilidade, imprescritibilidade, generalidade e gratuidade, pois, em regra, não são indenizáveis. As servidões administrativas ambientais têm praticamente as mesmas características das limitações administrativas, diferindo quanto às duas últimas: generalidade e gratuidade, pois são singulares (incidem sobre espaços territoriais determinados, criados para situações específicas) e onerosas (indenizáveis). Sobre o tema sugere-se consultar: Souza (2003).

Considerando a complexidade e interdisciplinaridade das análises ambientais, neste Capítulo aborda-se as principais lacunas normativas que geram divergências técnicas para o mapeamento de áreas de preservação permanente. Analisou-se os conceitos e metodologias presentes na legislação e literatura científica que podem auxiliar na sua integração. São abordadas as principais modalidades de APPs relacionadas com a proteção de corpos hídricos naturais: entorno de olhos d'água, nascentes, faixas marginais de cursos d'água, entorno de reservatórios naturais (lagos, lagoas e lagoas), encostas e topo de morro, montes, montanhas e serras.

2.1 METODOLOGIA PARA INTEGRAÇÃO DE CONCEITOS TÉCNICOS INDETERMINADOS

As normas ambientais que definem espaços territoriais especialmente protegidos são normas-instrumento de eficácia da norma-matriz que define o princípio do direito de todos ao meio ambiente ecologicamente equilibrado (SILVA, 2004). Assim, elas têm aplicação imediata (MACHADO, 2014) e, na ausência de regulamentação de algum critério necessário para sua definição espacial, o intérprete necessitará empregar as técnicas hermenêuticas para buscar soluções justas e constitucionalmente adequadas (LEITE, 2015), que melhor garantam a efetividade do direito fundamental.

Na jurisprudência ambiental recente do Superior Tribunal de Justiça (STJ), a hermenêutica jurídico-ambiental tem sido norteadada pelo princípio *in dubio pro natura*⁷ (cf. BENJAMIN, 2014). Sua aplicação pode dar-se de forma integrada com os demais *princípios estruturantes* do Direito Ambiental, em especial: solidariedade intergeracional, vedação de retrocesso, precaução, prevenção, sustentabilidade, mínimo existencial ecológico e função socioambiental da propriedade.

A legislação ambiental deve ser sempre interpretada de forma mais favorável à tutela do meio ambiente e ao amparo de sujeitos vulneráveis. Quando existir dúvida ou uma lacuna que precise ser resolvida por meio de analogia, costumes ou princípios gerais de direito (BRASIL, 1942, art. 4º), deve-se buscar a solução que melhor tutele o bem jurídico protegido de interesse público (neste caso, o meio ambiente ecologicamente equilibrado). O Estado deve adotar medidas progressivas, permanentes e contínuas para melhoria da qualidade ambiental (LEITE, 2015). E as pesquisas em direito ambiental devem promover soluções metodológicas diretas e imediatas com relação aos urgentes problemas ambientais planetários do antropoceno (PHILIPPOPOULOS-MIHALOPOULOS, 2017).

Entre os princípios de direito ambiental, aquele com maior implicação para cartografia dos espaços territoriais protegidos é o *princípio da vedação de retrocesso ambiental*. Com fundamento no referido princípio, o STJ não tem admitido a aplicação

⁷ Cf. STJ, Recursos Especiais - REsp - 1.145.083/MG, 1.198.727/MG, 1.328.753/MG, 1.367.923/RJ, 1.356.207/SP, 1.255.127/MG, 1.669.185/RS e 1.646.193/SP.

das disposições de legislação superveniente menos protetiva a fatos pretéritos, que devem observar a legislação vigente na época do evento danoso (*tempus regit actum*)⁸. Então, para cada caso concreto deve-se avaliar qual o material cartográfico mais adequado para delimitar o espaço protegido no tempo, sendo necessário, na maioria dos casos, a produção de documento cartográfico específico por meio da análise espaçotemporal do uso do solo, correlacionada com a evolução da legislação ambiental aplicável em cada período.

Os princípios não são absolutos, sendo sempre necessário realizar um juízo de ponderação entre os direitos fundamentais envolvidos no momento de produção ou aplicação de uma norma. O STF, quando analisou a constitucionalidade da Lei nº 12.651/2012, afirmou que nem sempre a norma mais favorável ao meio ambiente prevalece (*in dubio pro natura*) e “o princípio da vedação do retrocesso não se sobrepõe ao princípio democrático no afã de transferir ao Judiciário funções inerentes aos Poderes Legislativo e Executivo” (BRASIL, 2018e). O reconhecimento e a aplicação dos referidos princípios pelos tribunais brasileiros ainda não é uniforme e dependem muito do objeto que está em discussão em cada caso⁹.

Diante de lacunas normativas para definição de espaços territoriais protegidos, será necessário integralizar a norma ambiental a partir das definições e métodos consolidados nos demais ramos da ciência. Para fins da atividade de regulação, a Lei Complementar nº 95/1998 define que “o âmbito de aplicação da lei será estabelecido de forma tão específica quanto o possibilite o conhecimento técnico ou científico da área respectiva” (BRASIL, 1998, art. 7º, III). E, na ausência de norma regulamentar, o Código de Processo Civil (CPC) fornece solução no mesmo sentido, ao definir que o perito deve demonstrar que o método utilizado é “predominantemente aceito pelos especialistas da área do conhecimento da qual se originou” (BRASIL, 2015, art. 473, inciso III), cuja aplicação é supletiva e subsidiária à esfera administrativa (BRASIL, 2015, art. 15) e admitida no Código de Processo Penal (BRASIL, 1941, art. 3º).

⁸ Cf. STJ, PET no REsp 1.240.122/PR, AgRg no AREsp 327.687/SP e 1.646.193/SP.

⁹ O caráter relativo dos princípios da vedação do retrocesso e *in dubio pro natura* e suas aplicações casuísticas, decorrentes da ponderação entre os direitos fundamentais envolvidos em cada caso, podem ser observados no julgamento conjunto proferido pelo STF nas Ações Diretas de Constitucionalidade (ADC) 42 e de Inconstitucionalidade (ADI) 4.901, 4.902, 4.903 e 4.937, que tinham por objeto o Código Florestal de 2012, quando diversos dispositivos com retrocessos normativos foram considerados constitucionais (e.g., a redução do nível do leito fluvial para o início da APP nas margens de rios), enquanto outros foram declarados inconstitucionais ou tiveram declarada sua interpretação conforme a Constituição (e.g., o reconhecimento da APP nos entornos das nascentes e dos olhos d'água intermitentes). Na ADI 3.646/DF, o STF reconheceu a constitucionalidade do art. 22, da Lei nº 9.985/2000, de forma que o retrocesso no status de proteção de unidade de conservação pode ser objeto de lei específica em sentido formal. Contudo, na ADI 4.717/DF o Tribunal declarou inconstitucional a desafetação dessas áreas protegidas por meio de Medida Provisória, com fundamento expresso no *princípio da proibição de retrocesso socioambiental*, por ter sido atingido o núcleo essencial do direito fundamental ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, devido ao caráter transitório e precário inerente a esse instrumento normativo.

Sobre os princípios da vedação do retrocesso e *in dubio pro natura* sugere-se consultar: Aragão (2012), Prieur (2012), Benjamin (2012, 2014) e Leite (2015).

2.2 EVOLUÇÃO DAS ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE COM FUNÇÃO DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DOS RECURSOS HÍDRICOS NATURAIS

No Brasil, os principais marcos legais para fins de definição espaçotemporal das áreas ambientalmente protegidas adjacentes aos corpos hídricos são, historicamente, o primeiro Código Florestal (Decreto nº 23.793/1934), o Código Florestal de 1965 (Lei nº 4.771/1965), a Lei da Política Nacional de Meio Ambiente (PNMA), que instituiu as reservas ecológicas (art. 18, da Lei nº 6.938/1981), a Resolução do CONAMA nº 4/1985, as Leis nº 7.511/1986, 7.754/1989, 7.803/1989 e 9.985/2000 (que extingue as reservas ecológicas), as Resoluções do CONAMA nº 302/2002 e 303/2002 e, atualmente, a Lei de proteção da vegetação nativa (Lei nº 12.651/2012, conhecida como Código Florestal de 2012). Cada um destes atos normativos definiu alguma alteração substancial para o mapeamento de áreas de preservação permanente (APP) com função de proteção aos recursos hídricos.

Até 1934, as normas do período colonial, imperial e da primeira República definiam bens e limitações administrativas ao longo dos rios, cujas funções podiam ser sanitárias, orçamentárias, de defesa ou para infraestrutura de transporte (VALLADÃO, 1933).

Desde a Constituição de 1946, as nascentes e os rios integram o domínio público (BRASIL, 1946a; NUNES, 1977). Atualmente, as águas, nascentes e os álveos (leitos) dos rios pertencem à União, aos Estados ou ao Distrito-Federal (cf. arts. 20, III, 26, I, e 32, da Constituição de 1988, e art. 1º, I, da Lei nº 9.433/1997), sendo considerados como bens de uso comum do povo (MILARÉ, 2011; MACHADO, 2014), de forma que estão revogadas as disposições sobre águas particulares do Código de Águas de 1934.

Nas margens dos rios, não se deve confundir a área de preservação permanente com outros institutos independentes, que podem ocorrer de forma sobreposta, tais como, os terrenos marginais, terrenos de marinha, servidão de trânsito do Código de Águas ou limitações administrativas da Lei do Parcelamento do Solo Urbano¹⁰.

¹⁰ As margens dos rios navegáveis são de domínio público (Enunciado nº 479, da Súmula do Supremo Tribunal Federal). Os terrenos marginais são bens públicos localizados nas margens dos rios navegáveis, sem influência de maré, numa faixa de 15 m contados a partir da linha média das enchentes ordinárias (BRASIL, 1867, art. 39). Quando possuírem influência de maré, nas suas margens incidirão os denominados terrenos de marinha, bens públicos da União, criados pelo art. 51, § 14, da Lei Orçamentária de 1831, numa faixa de 33 m contados da linha do preamar médio daquele ano (BRASIL, 1831). Para os demais rios, cujos leitos também são públicos, o Código de Águas estabelece uma faixa de 10 m de largura como “servidão de trânsito para os agentes da administração pública, quando em execução de serviço” (BRASIL, 1934b, art. 12). Posteriormente, a Lei do Parcelamento do Solo Urbano estabeleceu para os loteamentos uma faixa não edificável (limitação administrativa) de 15 m nas margens dos corpos hídricos (BRASIL, 1979b, art. 4º), cuja função é resguardar o terreno marginal ou a servidão de trânsito do Código de Águas. As áreas de preservação permanente (APP) nas margens de rios incidem sobre propriedades públicas e privadas, urbanas e rurais (cf. BRASIL, 2012b, art. 4º, *caput*), constituindo limitações administrativas cuja função é ambiental, podendo ocorrer em sobreposição com outras limitações e servidões administrativas, independente do domínio das margens. Atualmente, tramita no Superior Tribunal de Justiça, os Recursos Especiais nº 1.770.760/SC, 1.770.808/SC e 1.770.967/SC, afetados ao regime de recursos repetitivos, sob o Tema 1.010, no qual será definido se nas áreas urbanas consolidadas a faixa não edificante de 15 m nas margens dos rios prevista na Lei do Parcelamento do Solo Urbano prevalece em relação à APP prevista no art. 4º, inciso I, da Lei nº 12.651/2012.

No Decreto nº 4.421/1921 havia a previsão de criação de florestas protetoras pela União, a fim de beneficiar a saúde pública, garantir a qualidade e disponibilidade hídrica de mananciais, evitar processos erosivos fluviais e marinhos, entre outras funções. Entretanto, sua eficácia dependia de desapropriação ou requerimento dos Estados, Municípios ou particulares, após análise do Serviço Florestal do Brasil (cf. BRASIL, 1922).

O primeiro Código Florestal definiu como florestas protetoras, aquelas destinadas a conservar o regime das águas e evitar a erosão pela ação dos agentes naturais, sujeitando-as à conservação perene (arts. 3º, 4º e 8º, do Decreto nº 23.793/1934). Considerando que os corredores protegidos no entorno de corpos hídricos, em áreas sujeitas a processos erosivos e em zonas de recarga de aquífero, têm função de proteger o regime hidrológico, com implicações locais em bacias hidrográficas e, até mesmo, regionais em função dos efeitos da presença da vegetação para regulação do clima, em princípio, os ecossistemas florísticos nas margens dos corpos hídricos naturais poderiam ser enquadrados na definição de florestas protetoras. Mas o Código Florestal de 1934 não discriminava as espécies de florestas protetoras com função de conservação do regime hídrico. O regulamento do Código de Pesca de 1938 definiu como infração administrativa “a destruição de matas e a derrubada de árvores numa faixa de 20 metros das margens dos rios” (BRASIL, 1939, art. 7º), que sujeitava os ribeirinhos à pena de multa e à obrigação de reflorestar o local do dano.

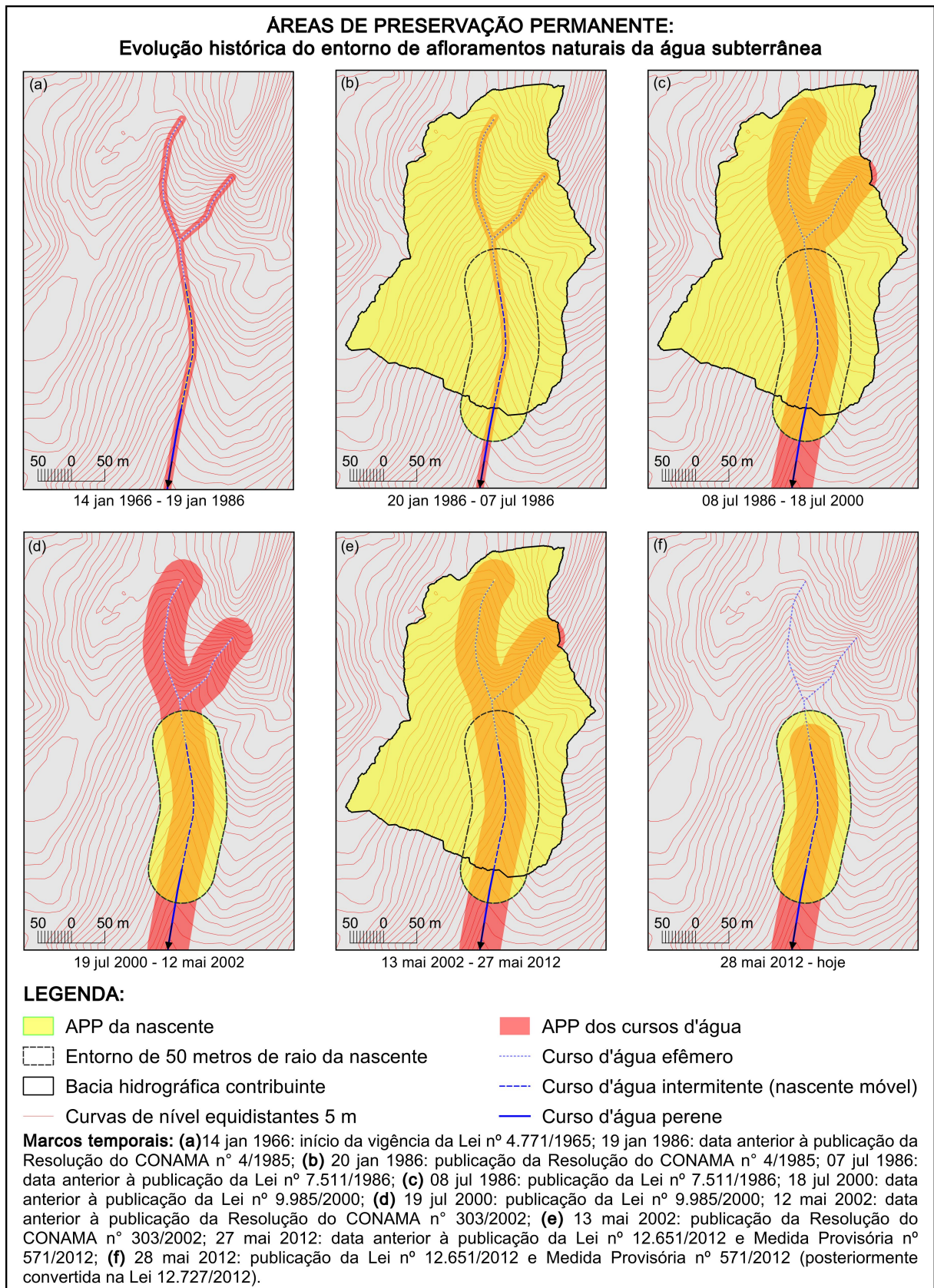
A partir de 14.01.1966¹¹ foram consideradas como de preservação permanente as florestas e demais formas de vegetação natural nas nascentes, nos olhos d’água, nas encostas ou parte destas com declividade superior a 45°(100%) e nas margens de *qualquer tipo de curso d’água (natural ou artificial*¹²), em faixa variável em função da largura do canal fluvial (Figuras 1a e 2). Apesar de a redação original do art. 2º, da Lei nº 4.771/1965, prever áreas de preservação permanente no topo de elevações (morros, montes, montanhas e serras) e ao redor de reservatórios naturais e artificiais, não foram definidos os critérios e medidas para esses espaços protegidos, o que prejudicou sua proteção até a superveniência de regulamentação, que só foi publicada em 1986.

Em 1981, por meio do art. 18, da Lei da PNMA, foram criadas as *reservas ecológicas*, que incorporaram as APPs previstas no art. 2º, do Código Florestal, cujo *poder regulamentar* foi atribuído ao CONAMA (BRASIL, 1981, art. 8º, VII, 1983, art. 7º, X, 1984a, art. 4º). O CONAMA regulamentou as reservas ecológicas por meio da Resolução nº 4/1985 (publicada em 20.01.1986), que procurou eliminar lacunas técnicas e conceituais, bem como ampliou e criou novos espaços territoriais protegidos.

¹¹ A Lei nº 4.771/1965 teve 120 dias de *vacatio legis*.

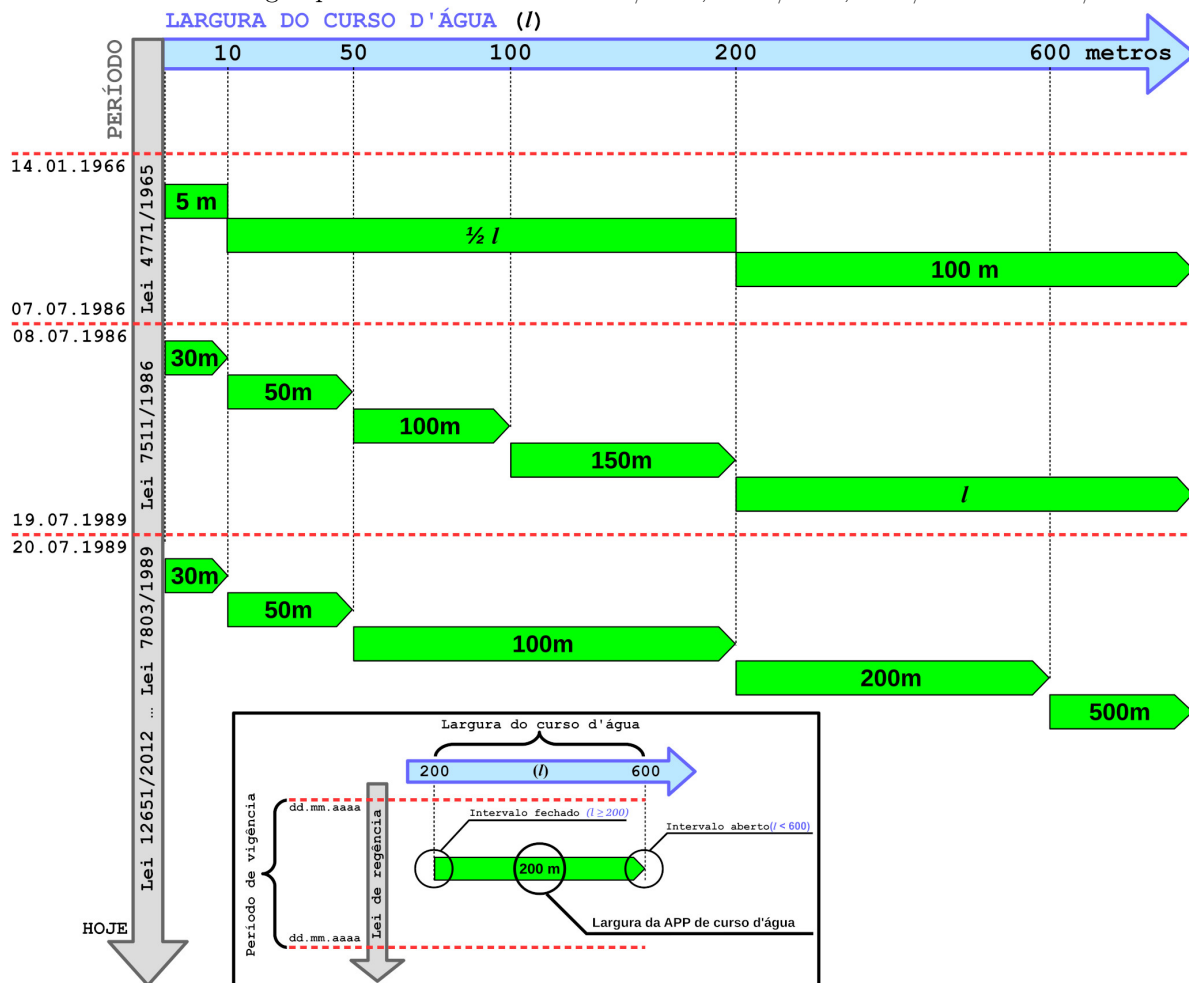
¹² Os canais produtos de obras de retificação de rios e drenagem de áreas úmidas não são considerados curso d’água artificiais, mas obra de desvio do fluxo natural das águas, devendo ser considerados como cursos d’água naturais antropizados. A única exceção cabível para não se exigir área de preservação permanente em cursos d’água artificiais, *naquela época*, seria para o caso de canal destinado tão somente à captação das águas pluviais, mesmo que a obra alcance o nível do lençol freático, interceptando as águas subterrâneas, por inteligência dos arts. 96 e 102, do Código de Águas.

Figura 1 – Evolução histórica da proteção ambiental no entorno de afloramentos de água subterrânea no Brasil.



Fonte: Souza, Chaffe, Pinto e Nogueira (2019).

Figura 2 – Evolução do espaço mínimo definido como área de preservação permanente em faixa marginal a cursos d'água por meio das Leis n^{os} 4.771/1965, 7.511/1986, 7803/1989 e 12.651/2012.



Fonte: Souza, Chaffe e Pinto (2020).

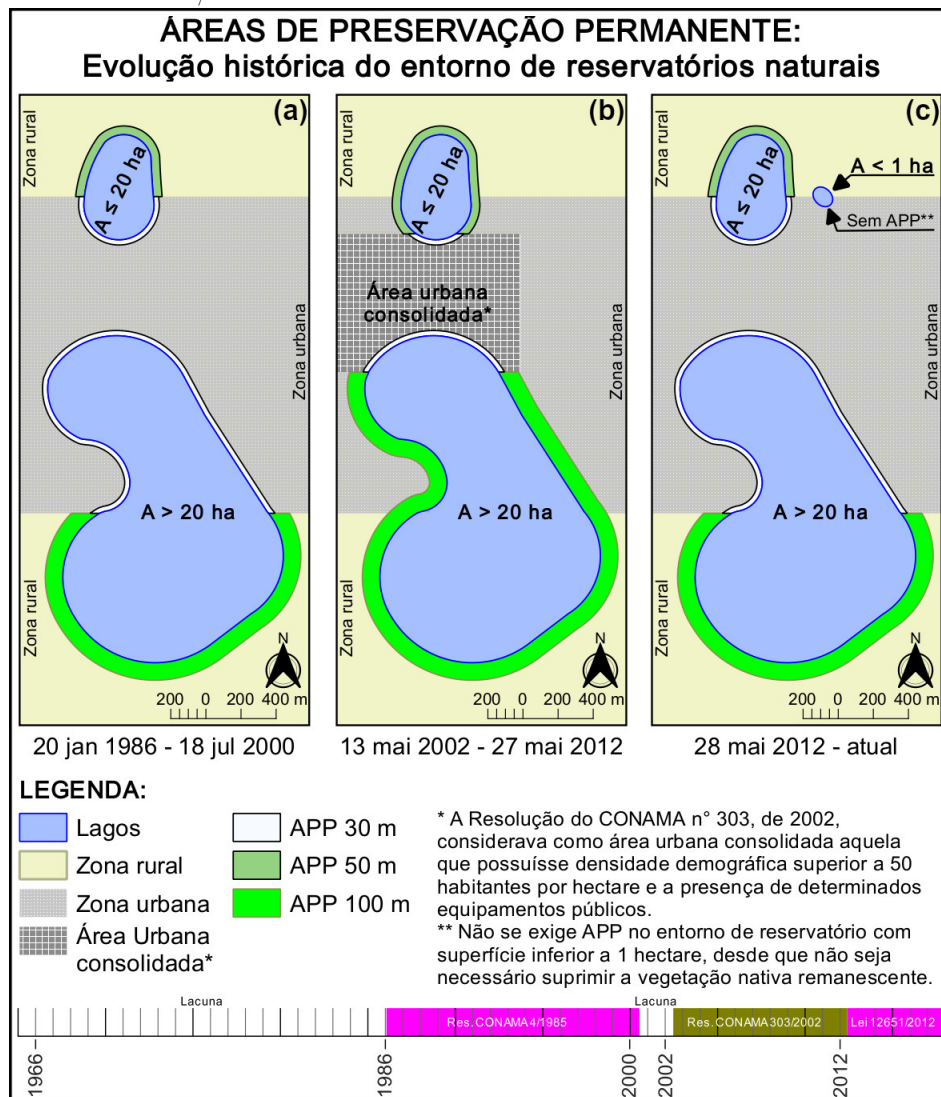
No caso de olhos d'água e nascentes, a referida Resolução estabeleceu como reserva ecológica uma faixa *mínima* de proteção de 50 m de largura, a contar da margem do afloramento do lençol freático, a qual deveria incorporar toda a bacia de drenagem contribuinte (BRASIL, 1986b, art. 3^o, alínea “b”, inciso III), conforme Figura 1b.

Segundo a redação original do Código Florestal de 1965, a largura da faixa marginal de proteção de cursos d'água era equivalente à metade da largura do rio, limitada ao mínimo de 5 m e ao máximo de 100 m, mas não havia regulamentação quanto ao leito fluvial a partir do qual iniciava a faixa marginal da APP. Para Nunes (1977, p. 43), a área protegida deveria ser “medida a partir da ribanceira, com base na maior largura que o rio apresente em algum trecho do seu percurso”. Somente em 1985 o CONAMA estabeleceu que a medição dar-se-ia a partir do *leito maior sazonal* do rio, conceituando-o como a “calha alargada ou maior de um rio, ocupada nos períodos anuais de cheia” (BRASIL, 1986b, art. 2^o, alínea “c”), o qual, geomorfologicamente, é delimitado pelo ponto onde inicia a planície de inundação, i.e., a ribanceira (cf. subseção 2.4.4).

Para o entorno dos reservatórios naturais, o CONAMA estabeleceu que a APP

iniciaria a partir do “nível mais alto medido horizontalmente” (BRASIL, 1986b, art. 3º, alínea “b”, inciso II) com as seguintes faixas mínimas para preservação: 30 m em áreas urbanas e 50 m em áreas rurais, quando o lago possuir superfície até 20 ha (hectares). Nos demais casos, a faixa protegida era de 100 m (Figura 3a).

Figura 3 – Evolução da área de preservação permanente no entorno de reservatórios naturais e suas lacunas na Lei nº 4.771/1965, regulamentada pelas Resoluções do CONAMA nº 4/1985 e 303/2002, e na Lei nº 12.651/2012.



Fonte: Souza, Chaffe e Pinto (2020).

Morros foram definidos como elevações com altura entre 50 e 300 m, cujas encostas possuíssem inclinação superior a 30% na linha de maior declividade. Aos montes eram aplicadas as mesmas condições, com a diferença que constituíam elevações isoladas na paisagem. Na época eram consideradas como montanhas as elevações com altura superior a 300 m, frequentemente formadas por agrupamentos de morros, e não se exigia condições especiais quanto à declividade das encostas. Eram considerados como serras os terrenos acidentados com fortes desníveis, frequentemente associados a escarpas assimétricas com

uma vertente abrupta e outra menos inclinada (BRASIL, 1986b).

A altura das elevações deveria ser medida a partir da diferença altimétrica entre o ponto mais alto (cume) e a base, sendo esta o “plano horizontal definido por planície ou superfície de lençol d’água adjacente ou nos relevos ondulados, pela cota da depressão mais baixa ao seu redor” (BRASIL, 1986b, art. 2º, alínea “j”).

Além da regulamentação das APP no topo de elevações, previstas na Lei nº 4.771/1965, a Resolução do CONAMA nº 4/1985, criou duas novas espécies de reservas ecológicas: as *linhas de cumeadas*, protegidas a partir da curva de nível de dois terços da altura do pico mais baixo do divisor de águas, recalculada a cada 1000 m, e a *conjunção de morros*, que estabelecia a proteção dos cumes distantes menos de 500 m um do outro pela altura da menor elevação (BRASIL, 1986b).

Em 8.7.1986 passaram a vigorar novos limites para APP ao longo de cursos d’água (Figura 1b), por meio da alteração do Código Florestal de 1965 pela Lei nº 7.511/1986. A largura da faixa marginal passou a variar em função da extensão da seção transversal do leito rio em intervalos descontínuos (Figura 2), com um mínimo de 30 m, podendo chegar ao valor igual à largura do leito (BRASIL, 1965, art. 2º, alínea “a”; com redação dada por BRASIL, 1986a). Por exemplo, durante a vigência da norma, a APP do Rio Negro no perímetro urbano de Manaus (AM) podia ultrapassar 9 km de largura.

Existia uma discrepância entre o nível a partir do qual se iniciava a APP no entorno dos reservatórios naturais e o nível que definia a faixa marginal de proteção em seus rios afluentes e emissários. Enquanto para os reservatórios considerava-se o nível mais alto, para os rios empregava-se o leito maior sazonal, cujo nível é menor. Essa situação foi resolvida pela Lei nº 7.803/1989 (publicada em 20.7.1989), que definiu a faixa marginal de proteção nos cursos d’água a partir do *nível mais alto da corrente*, i.e., o *leito maior excepcional* (aquele definido pelas cheias mais elevadas).

A Lei nº 7.803/1989 novamente alterou a largura da APP ao longo de cursos d’água (Figura 2). A largura mínima da faixa marginal permaneceu a mesma (30 m), mas outros valores foram estabelecidos em função das dimensões do leito do rio, podendo chegar ao máximo de 500 m (BRASIL, 1965, art. 2º, alínea “a”; com redação dada por BRASIL, 1989b).

Ainda em 1989, foi editada a Lei de proteção às nascentes (Lei nº 7.754/1989), que definiu a possibilidade de os regulamentos administrativos criarem um *paralelogramo de cobertura florestal* para proteção das zonas de cabeceiras (BRASIL, 1989a). No mesmo ano, a Lei nº 7.803/1989 modificou o Código Florestal de 1965, que passou a prever expressamente a APP no entorno de nascentes e olhos d’água num raio mínimo de 50 m de largura (BRASIL, 1989b). Quando necessário, exigir-se-ia, ainda, aquela área adicional correspondente à bacia de drenagem contribuinte, com fundamento na Resolução do CONAMA nº 4/1985, recepcionada pela Lei de proteção às nascentes (Figura 1b,c).

Contudo, em 19.07.2000 foi publicada a Lei nº 9.985/2000, que criou o Sistema

Nacional de Unidades de Conservação (SNUC) e extinguiu as reservas ecológicas (cf. BRASIL, 2000a, art. 60). O efeito imediato foi a ab-rogação da Resolução do CONAMA nº 4/1985. Conseqüentemente, a APP de nascentes deixou de incorporar a bacia de drenagem contribuinte, ficando restrita ao entorno de 50 m de largura a partir do afloramento (Figura 1d). Também perderam eficácia as reservas ecológicas em linha de cumeadas e conjunção de morros, que eram previstas somente naquela Resolução. Outra consequência, foi a desregulamentação das APPs no topo de elevações e ao redor de reservatórios naturais, pois a Lei nº 4.771/1965 não estabelecia os critérios para definição desses espaços protegidos.

O CONAMA então editou a Resolução nº 303/2002, regulamentando o Código Florestal de 1965 e a Lei de proteção às nascentes de 1989. Assim, restabeleceu a APP “ao redor de nascente ou olho d’água, ainda que intermitente, com raio mínimo de cinquenta metros de tal forma que proteja, em cada caso, a bacia hidrográfica contribuinte” (BRASIL, 2002c, art. 3º, II), cf. Figura 1e. Pela mesma Resolução, o CONAMA definiu as faixas de preservação no entorno de reservatórios naturais com larguras praticamente idênticas às aquelas definidas pela Resolução nº 4/1985. A diferença, na nova norma, deu-se para a faixa excepcional de 30 m de APP, que passou a ser aplicável somente em áreas urbanas *consolidadas*, enquanto na legislação anterior bastava se tratar de área declarada como urbana pelo poder público municipal (Figura 3b).

Cabe observar que a Resolução nº 303/2002 não redefiniu o nível a partir do qual se inicia a faixa de proteção no entorno dos reservatórios naturais, permanecendo como lacuna normativa até os dias atuais. Para os cursos d’água, a referida Resolução, em aparente contradição com a Lei nº 7.803/1989, minimizou o conceito normativo de *nível mais alto*, definindo-o como aquele “alcançado por ocasião da cheia sazonal do curso d’água perene ou intermitente” (BRASIL, 2002c, art. 2º, inciso I), que era o critério definido na Resolução nº 4/1985.

Quanto à proteção dos topos de morros, montes, montanhas e serras, a Resolução nº 303/2002 reproduziu os conceitos e métodos já definidos na Resolução nº 4/1985, restabelecendo a APP para o topo dessas elevações, bem como redefiniu os espaços territoriais especialmente protegidos em linhas de cumeadas e conjunção de morros, agora com status de áreas de preservação permanente (BRASIL, 2002c).

Após o esforço do CONAMA em 2002 para regulamentar as APPs, sobreveio a Lei nº 12.651/2012, denominada como Lei de proteção da vegetação nativa (conhecida como Código Florestal de 2012), que introduziu profundas alterações no regime jurídico daqueles espaços protegidos, bem como não resolveu e, ainda, criou novas lacunas para delimitação espacial.

O texto sancionado do Código Florestal de 2012 estabelecia APPs marginais às nascentes, olhos d’água e cursos d’água naturais, independente do regime hidrológico. Porém, na mesma data em que foi publicada, a Lei nº 12.651/2012 foi alterada pela Medida

Provisória nº 571/2012, que desde o início extinguiu as APPs no entorno de afloramentos intermitentes (BRASIL, 2012d) e, posteriormente, sofreu emendas parlamentares que terminaram por extinguir as APPs nas margens de cursos d'água efêmeros (BRASIL, 2012c), quando convertida na Lei nº 12.727/2012 (cf. Figura 1f).

Contudo, em 28.02.2018, o Supremo Tribunal Federal (STF) no julgamento da Ação Direta de Inconstitucionalidade (ADI) nº 4903 fixou interpretação conforme a Constituição para declarar que “os entornos das nascentes e dos olhos d'água intermitentes configuram área de preservação ambiental” (BRASIL, 2018e), restabelecendo a proteção ao redor de qualquer afloramento natural de água subterrânea, seja perene ou intermitente.

Para as faixas marginais ao longo de cursos d'água, os valores definidos em 1989 para as APPs foram mantidos pelo Código Florestal de 2012 (Figura 2 e Quadro 1). Entretanto, ocorreram alterações nos conceitos e critérios para delimitação do ponto de início da faixa marginal junto à margem do rio, que deixou de ser no *nível mais alto* para considerar o *leito regular*, conceituado como “a calha por onde correm regularmente as águas do curso d'água durante o ano” (BRASIL, 2012b, art. 3º, inciso XIX). Tal conceito é mal definido, abrindo oportunidades para a destruição de áreas úmidas marginais aos rios, principalmente nas planícies sujeitas a pulsos de inundação na Amazônia (SOUSA; FERNANDEZ PIEDADE; CANDOTTI, 2011), bem como não deixa claro qual o cenário hidrológico a ser considerado para delimitar essa modalidade de APP.

Quadro 1 – Área de preservação permanente em faixa marginal a cursos d'água naturais perenes e intermitentes, conforme definido no art. 4º, inciso I, da Lei nº 12.651/2012.

LARGURA DO RIO (l_{rio})	FAIXA MARGINAL PROTEGIDA
$l_{rio} \leq 10$ m	30 m
10 m $< l_{rio} \leq 50$ m	50 m
50 m $< l_{rio} \leq 200$ m	100 m
200 m $< l_{rio} \leq 600$ m	200 m
$l_{rio} > 600$ m	500 m

Fonte: organizado pelo autor a partir de Brasil (2012b).

Com relação à APP no entorno de lagos e lagoas, o art. 4º, II, da Lei nº 12.651/2012, restabeleceu as regras previstas originalmente na Resolução do CONAMA nº 4/1985, de forma que, para aplicação da faixa de proteção excepcional de 30 m, não é mais necessário que a área urbana esteja consolidada (Figura 3c), bastando sua declaração como urbana por lei municipal. E o art. 4º, § 4º, do Código Florestal de 2012, deixou de exigir a APP no entorno de pequenas acumulações naturais (lagoas) com superfície inferior a 1 ha, desde que os remanescentes de vegetação não sejam objeto de novas supressões.

A Lei nº 12.651/2012 provocou profundas modificações nas definições para incidência das APPs no topo de elevações. Uma elevação passou a ter seu terço superior protegido somente quando possuir altura (h) igual ou superior a 100 m e declividade média ($\bar{\phi}$) maior que 25° (46,6%).

Outra mudança significativa deu-se com relação à delimitação da *base da elevação*, que pelo Código Florestal de 2012 pode ser definida, em regra, pelo plano horizontal formado pela *planície* ou *espelho d'água* adjacentes (e.g., lagos e oceanos). Já nos relevos ondulados, quando não existirem vertentes da elevação em contato com planície ou espelho d'água adjacentes, a altura (*h*) é calculada pelo *ponto de sela* mais próximo da elevação.

Apesar das APPs em linhas de cumeada e junção de morros, aparentemente, tratem-se de modalidades específicas de espaços territoriais protegidos criadas pelo CONAMA, a nova metodologia para o cálculo da base das elevações tornou estas duas modalidades incompatíveis com a norma atual de hierarquia superior, motivo pelo qual acabaram por ser revogadas tacitamente por incompatibilidade (BRASIL, 1942, art. 2º, § 1º).

Os critérios definidores da APP em topo de elevações para fins de análises espaço-temporais serão abordados com detalhes na [subseção 2.7.1](#).

Das modalidades de APP até aqui analisadas, somente para as encostas os critérios legais permaneceram inalterados desde 1965, mas existem lacunas técnicas a serem solucionadas para sua proteção efetiva (cf. [subseção 2.6](#)).

Para *áreas rurais consolidadas* (ARC), consideradas como a parte do imóvel rural objeto de “ocupação antrópica preexistente a 22 de julho de 2008, com edificações, benfeitorias ou atividades agrossilvipastoris” (BRASIL, 2012b, art. 3º, IV), a Lei nº 12.651/2012 permitiu a continuidade de determinadas atividades em área de preservação permanente.

Nas APPs de nascentes e olhos d'água, para ARC admite-se a continuidade das atividades agrossilvipastoris, de ecoturismo e de turismo rural, com a exigência de recuperação parcial de uma faixa de 15 m no entorno dos afloramentos (art. 61-A, § 5º). Para as faixas marginais aos cursos d'água e no entorno dos reservatórios naturais, a permanência dessas atividades são admitidas, contudo as faixas mínimas das APPs a serem submetidas à recuperação ambiental têm larguras que variam em função do tamanho da propriedade (expressa em módulos fiscais - MF¹³), conforme regras de transição compiladas nos Quadros 2 e 3.

Nas APPs em encostas e no topo de elevações é admitida a manutenção de “atividades florestais, culturas de espécies lenhosas, perenes ou de ciclo longo, bem como da infraestrutura física associada ao desenvolvimento de atividades agrossilvipastoris, vedada a conversão de novas áreas para uso alternativo do solo” (BRASIL, 2012b, art. 63, *caput*).

Existe a possibilidade de nas ARC a faixa sujeita à recuperação ambiental serem inferiores ao estabelecido no art. 61-A. Segundo o art. 61-B, a área máxima a ser recomposta,

¹³ Módulo fiscal é uma unidade de medida agrária brasileira, prevista desde 1979 no Estatuto da Terra, que procura representar a área mínima para um imóvel rural ser viável economicamente, bem como serve de base para determinação da alíquota do Imposto Territorial Rural (cf. BRASIL, 1964, 1979a). O [valor do módulo fiscal](#) é definido para cada município brasileiro pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA).

somadas todas as áreas de preservação permanente da propriedade, não ultrapassará os seguintes valores: 10% da área total do imóvel rural com até 2 MF; e 20% da área total do imóvel rural entre 2 MF e 4 MF.

Quadro 2 – Faixa mínima sujeita à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) até 22.7.2008 para atividades agrossilvipastoris, de ecoturismo e de turismo rural em área de preservação permanente em faixa marginal de cursos d'água naturais, em função do tamanho da propriedade em módulos fiscais (MF), definida no art. 61-A, §§ 1º a 4º, da Lei nº 12.651/2012, e art. 19, do Decreto nº 7.830/2012.

ÁREA TOTAL DO IMÓVEL RURAL (A)	LARGURA DO RIO (l_{rio})	FAIXA MARGINAL A SER RECUPERADA
$A \leq 1$ MF	Independente	5 m
1 MF $< A \leq 2$ MF	Independente	8 m
2 MF $< A \leq 4$ MF	Independente	15 m
4 MF $< A \leq 10$ MF	$l_{rio} \leq 10$ m	20 m
Demais casos	Independente para $A > 10$ MF ou $l_{rio} > 10$ m, $\forall A \in (4$ MF ; 10 MF]	Metade da largura do rio $\left(\frac{l_{rio}}{2}\right)$, observado o mínimo de 30 m e o máximo de 100 m.

Notas:

A = área do imóvel em módulos fiscais;

MF = módulo fiscal, unidade de medida agrária brasileira (cf. BRASIL, 1964, 1979a);

l_{rio} = largura do rio.

Fonte: organizado pelo autor a partir de Brasil (2012a,b).

Quadro 3 – Faixa mínima sujeita à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) até 22.7.2008 para atividades agrossilvipastoris, de ecoturismo e de turismo rural em área de preservação permanente no entorno de reservatórios naturais, em função do tamanho da propriedade em módulos fiscais (MF), definida no art. 61-A, § 6º, da Lei nº 12.651/2012.

ÁREA TOTAL DO IMÓVEL RURAL (A)	FAIXA MARGINAL A SER RECUPERADA
$A \leq 1$ MF	5 m
1 MF $< A \leq 2$ MF	8 m
2 MF $< A \leq 4$ MF	15 m
$A > 4$ MF	30 m

Notas:

A = área do imóvel em módulos fiscais;

MF = módulo fiscal, unidade de medida agrária brasileira (cf. BRASIL, 1964, 1979a).

Fonte: organizado pelo autor a partir de Brasil (2012b).

É importante ressaltar que as regras de transição definidas nos arts. 61-A, 61-B e 63, da Lei nº 12.651/2012, não reduzem o tamanho das APPs nas ARCs, pois são hipóteses excepcionais que permitem a continuidade somente daquelas atividades previstas no texto legal. Caso, em algum momento, o imóvel tenha sua destinação alterada para outra atividade não prevista na regra de exceção, a APP deverá ser integralmente recuperada.

Apresentado o histórico da evolução da legislação brasileira que define áreas de preservação permanente para proteção de corpos hídricos naturais, nas seções seguintes serão abordados os principais conceitos e hipóteses que necessitam de atenção especial para fins de delimitação precisa desses espaços territoriais protegidos.

2.3 NASCENTES E OLHOS D'ÁGUA

Nascente pode ser considerada como a primeira modalidade de recurso hídrico protegido. Antes de existirem normas de natureza ambiental, os afloramentos de água subterrânea que constituíam por si só a cabeceira do rio (*caput fluminis*) eram considerados como bens de uso comum do povo (art. 2º, “e”, do Código de Águas), portanto, protegidos como bem público. As diversas formas de afloramento da água subterrânea não possuem conceitos uniformes na legislação brasileira e na literatura (FELIPPE; MAGALHÃES JUNIOR, 2013). Assim, a revisão aprofundada faz-se necessária para compreender qual o espaço territorial é efetivamente protegido, bem como identificar as lacunas científicas ou regulatórias que impedem a definição precisa das APPs nas nascentes e olhos d’água.

O *International glossary of hydrology* denomina, em língua inglesa, a nascente sob o termo *spring*, conceituado como o lugar onde a água emerge naturalmente da rocha ou do solo e flui pela superfície ou para um corpo hídrico superficial. Quando der origem a um rio, o afloramento também é denominado como *source* (WMO, 2012). *Spring* é considerado como a descarga de água subterrânea, seja efêmera ou contínua, na superfície do solo (POEHLIS; SMITH, 2009). Na literatura técnica nacional, as nascentes e os olhos d’água são considerados afloramentos naturais de água subterrânea e sinônimos de *fonte* (SUGUIO, 1998; IBGE, 2004). A água subterrânea é aquela que ocorre no subsolo (BRASIL, 2008, art. 2º, I), mais precisamente na zona de saturação (SUGUIO, 1998; ISO, 2011), sendo sinônimo de água freática, que tem por característica ser livre e não confinada (SUGUIO, 1998).

Na legislação brasileira, originalmente, o Código de Águas conceituava as nascentes como “as águas que surgem naturalmente ou por indústria humana” (BRASIL, 1934b, art. 89), de forma que podem ser naturais ou artificiais. O CONAMA considerou as nascentes e olhos d’água como sinônimos na Resolução nº 4/1985, e conceituou-os como o “local onde se verifica o aparecimento de água por afloramento do lençol freático” (BRASIL, 1986b, art. 2º, alínea “d”). Posteriormente, a Resolução nº 303/2002 manteve as referidas feições como sinônimos e aprimorou o conceito definindo-as como o “local onde aflora naturalmente, mesmo que de forma intermitente, a água subterrânea” (BRASIL, 2002c, art. 2º, inciso II).

Apesar do tratamento dado às nascentes e aos olhos d’água como sinônimos na literatura técnica e na legislação ambiental regulamentar, o Código Florestal de 2012 modificou os conceitos legais dessas feições, diferenciando-as. Para a legislação ambiental atual, todo afloramento natural de água subterrânea (freática) constitui ou um olho d’água ou uma nascente. A diferença fundamental entre eles é que as nascentes sempre dão início a um curso d’água, enquanto dos olhos d’água não derivam rios (art. 3º, XVII e XVIII, da Lei nº 12.651/2012).

É importante que o intérprete, quando da análise e aplicação das normas ambientais, sempre considere que a legislação anterior a 2012 trata nascentes e olhos d’água

como sinônimos. Por exemplo, os dispositivos previstos no Código de Águas de 1934 que regulamentam nascentes, também são aplicáveis a olhos d'água, pois naquela época as referidas feições não eram diferenciadas.

A principal dificuldade para o mapeamento das APPs no entorno de nascentes e olhos d'água está relacionada ao fato que essas feições não costumam ser estáticas, pois o lençol freático normalmente apresenta oscilações significativas de nível entre os anos hidrológicos (MANZIONE; TANIKAWA; SOLDERA, 2014; JACKSON et al., 2016). E, dependendo da escala do material consultado, essas áreas de afloramento do lençol freático não estarão representadas, de forma que o perito, em regra, necessita realizar vistorias ou utilizar-se de outros métodos para confirmar ou complementar as informações disponíveis em materiais cartográficos.

2.3.1 Nascentes móveis: estabelecimento do ponto de montante a ser considerado como início da nascente, final do trecho efêmero do curso d'água e início do intermitente

Nas cabeceiras de uma bacia hidrográfica normalmente são observadas flutuações no nível do lençol freático. A localização e fluxo dos afloramentos da água subterrânea variam em função das condições de recarga do aquífero freático (GUERRA, 1993; ISO, 2011; FELIPPE; MAGALHÃES JUNIOR, 2014; ZIMMER; MCGLYNN, 2017). Flutuações do nível do lençol freático podem ser produto de eventos singulares de precipitação, mudanças climáticas e alteração do uso da terra. Podem, ainda, ocorrer na escala de horas até décadas (SNYDER, 2008).

O Código de Águas prevê que “a nascente de uma água será determinada pelo *ponto em que ela começa a correr sobre o solo* e não pela veia subterrânea que a alimenta” (BRASIL, 1934b, art. 95, grifo nosso). A nascente “geralmente não é um ponto e sim uma zona considerável da superfície da terra” (GUERRA, 1993, p. 301). E é o comportamento dinâmico da nascente que definirá se um curso d'água é intermitente ou perene.

Apesar de a literatura geomorfológica preponderantemente considerar rios intermitentes e efêmeros como sinônimos, na hidrologia costuma-se separá-los em duas categorias distintas (GUERRA, 1993; PEREZ et al., 2020). É o que se observa na classificação de Leopold e Miller (1956), pela qual é considerado efêmero o canal natural onde o fluxo da água decorre exclusivamente da precipitação, enquanto o curso d'água intermitente é caracterizado pela presença de trechos secos que se alternam ao longo da corrente em condições de baixo fluxo.

Na legislação brasileira, rios efêmeros e intermitentes foram sinônimos até a publicação da Lei nº 12.727/2012, que alterou o Código Florestal de 2012 e definiu três classes distintas de rios: perene, intermitente e efêmero, cujos conceitos foram estabelecidos pelo Decreto nº 7.830/2012. O corpo de água lótico é considerado *perene* quando possui

naturalmente escoamento superficial durante todo o período do ano, *intermitente* se o fluxo hídrico não é observado em determinados períodos e *efêmero* quando o escoamento superficial ocorrer somente durante ou imediatamente após eventos de precipitação (BRASIL, 2012a, art. 2º, incisos XII, XIII e XIV). Cabe destacar que não deixam de ser perenes as águas que secarem devido a uma estiagem extraordinária, conforme previsto no art. 3º, parágrafo único, do Código de Águas.

As águas de rios efêmeros, intermitentes e sazonais são frequentemente não mapeadas e mal protegidas e, portanto, são suscetíveis à degradação ou destruição (CREED et al., 2017). Taniwaki et al. (2018) observaram que o sistema do Cadastro Ambiental Rural (CAR) é ineficiente para identificação de cursos d'água de primeira ordem, pois utiliza uma escala regional de 1:50.000, sendo indicado pelos autores o emprego de uma escala mínima de 1:10.000 para essa finalidade. Na área amostrada, quando comparada a base de dados do CAR com a hidrografia em escala local (1:10.000), os autores constaram que 80% dos rios, medidos pelo comprimento, foram negligenciados. Se para identificação de cursos d'água a escala regional é ineficiente, para diagnosticar nascentes ela se torna ainda mais crítica, devidos às peculiaridades quanto à dimensão e sazonalidade que as envolvem.

Um erro comum em análises ambientais é definir a nascente como um ponto fixo no início do talvegue de um curso d'água efêmero. Na zona de cabeceira ocorre a primeira fase da morfogênese fluvial, onde os primeiros cursos d'água costumam ser efêmeros, formados somente pelo escoamento superficial durante ou imediatamente após a chuva (GUERRA, 1993), e ocorrem em maior número que os perenes (LEOPOLD; MILLER, 1956; TANIWAKI et al., 2018). Então, nem todo curso d'água inicia numa nascente.

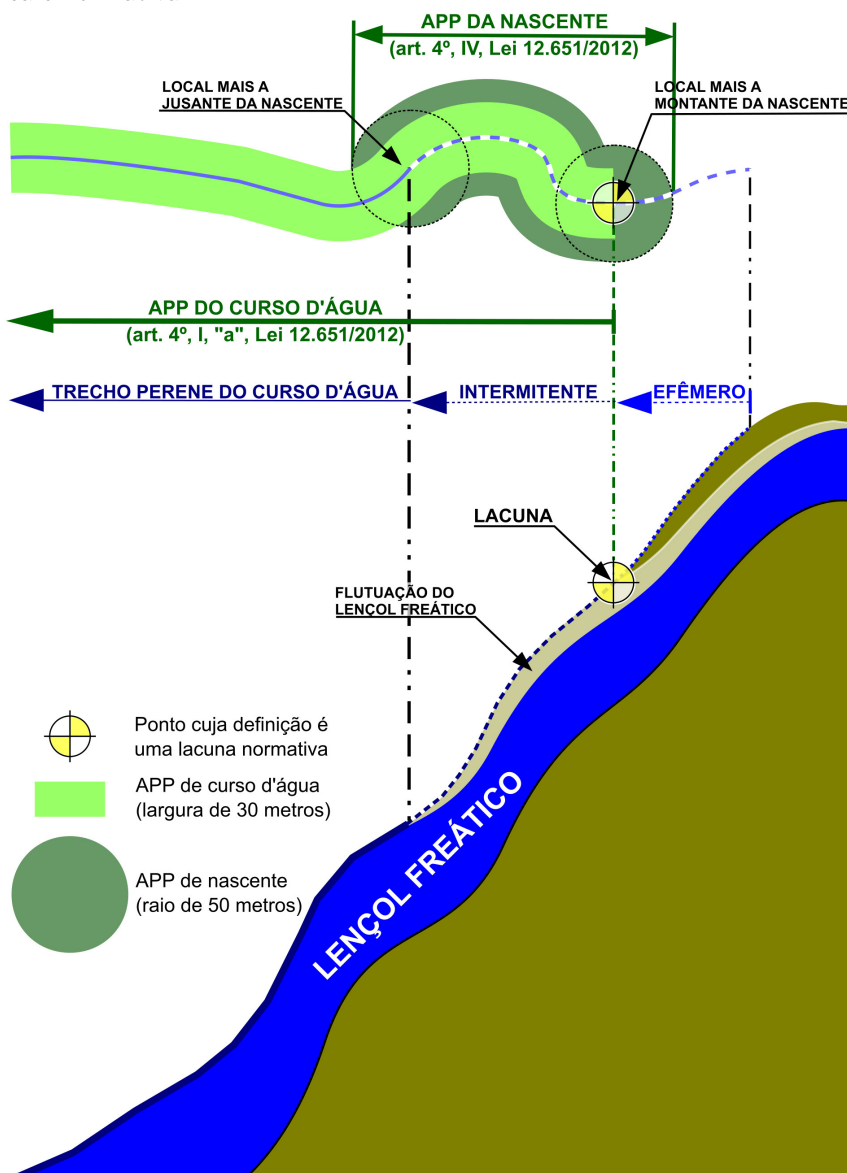
A zona de cabeceira de uma bacia hidrográfica, onde ocorrem as nascentes, não é um ponto bem definido, por vezes constituindo uma verdadeira área (GUERRA, 1993). Comumente a cabeceira é associada a locais em topos de morro ou encostas, mas também podem ocorrer em planaltos e planícies, tais como as áreas úmidas formadas por nascentes difusas.

Uma nascente ou olho d'água pode temporariamente deixar de aflorar ou até mesmo migrar de lugar, dependendo das condições do nível freático em determinado momento, que é função da pluviosidade e da recarga do aquífero não confinado (GUERRA, 1993; ISO, 2011; FELIPPE; MAGALHÃES JUNIOR, 2014; ZIMMER; MCGLYNN, 2017; PEREZ et al., 2020). Tal fenômeno natural é bem documentado na literatura. Felipe (2013) monitorou mensalmente durante um ano hidrológico 24 nascentes no Parque Nacional da Serra do Cipó (MG) e em Lagoa Santa (MG), onde foi observado que 58,3% eram móveis, com deslocamentos de até 1,6 km. Perez et al. (2020) analisaram uma bacia de cabeceira no Parque Municipal da Lagoa do Peri em Florianópolis (SC) e mostraram que a extensão total da drenagem ativa de uma bacia de cabeceira pode variar em até 97% de acordo com a estação e o evento de chuva. Esse comportamento dinâmico tem implicações para

definição da extensão da faixa de proteção.

Após o trecho efêmero, o curso d'água pode ter um seguimento intermitente, com nascente móvel, que se desloca em função do nível do lençol freático. A nascente sempre acompanhará o trecho intermitente de um curso d'água, cujo local do afloramento translada em função das variações de nível da água subterrânea na zona de flutuação do lençol freático. O ponto mais a montante onde a nascente ocorre constitui o *limite entre o trecho efêmero e intermitente* do curso d'água, sendo o *local onde se inicia a APP da nascente e do curso d'água*. E o ponto de ocorrência mais a jusante constitui o *limite entre o trecho intermitente e o perene* (Figura 4).

Figura 4 – Perfil esquemático da área de preservação permanente (APP) considerando as três modalidades de cursos d'água previstas na Lei nº 12.651/2012, com destaque para o trecho intermitente formado por nascente móvel, cujo ponto de início do afloramento (montante) constitui lacuna técnica e normativa.



Fonte: Souza, Chaffe, Pinto e Nogueira (2019).

Atualmente a identificação da nascente é pressuposto para a delimitação da APP do curso d'água, que se origina após o final do seguimento efêmero, onde tem início o afloramento da água subterrânea (SOUZA; CHAFFE; PINTO; NOGUEIRA, 2019).

A definição de critérios técnicos para o estabelecimento da zona de afloramento da água subterrânea é importante pelos seguintes fatos: (a) ao redor das nascentes a APP no seu entorno pode ser mais larga (50 m) do que aquela do rio por ela formado, cuja faixa marginal protegida normalmente inicia com uma largura mínima de 30 m; (b) o ponto mais a montante onde ocorre o afloramento do lençol freático coincide com o início do trecho intermitente do rio, local a partir do qual as margens do curso d'água passam a possuir APP, pois a Lei nº 12.727/2012 extinguiu a faixa marginal de proteção ambiental nos rios efêmeros.

Tais situações devem ser regulamentadas para evitar divergências técnicas, bem como garantir a eficácia plena das APPs instituídas para proteção dos afloramentos naturais da água subterrânea. Na ausência de regulamentação, é necessário que o perito procure elementos que auxiliem na identificação do ponto de montante com maior probabilidade de ocorrência do afloramento do lençol freático, i.e., o ponto mais elevado onde a nascente começa a correr sobre o solo (art. 95, do Código de Águas).

2.3.2 Delimitação da extensão do entorno de nascentes e olhos d'água em função da flutuação sazonal do lençol freático

De forma análoga aos fenômenos aos quais estão submetidas as nascentes no sentido longitudinal dos rios, os afloramentos de água subterrânea têm suas extensões laterais sujeitas a alterações significativas em função da variação do nível do lençol freático, principalmente em locais cuja topografia apresente baixa declividade, tais como as planícies costeiras, normalmente constituídas por grandes áreas úmidas. Enquanto nos rios em cabeceiras o deslocamento do afloramento é perceptível no sentido longitudinal (montante-jusante), em locais de topografia plana observam-se variações consideráveis nas nascentes e olhos d'água em todas as direções. Comumente, as áreas de afloramento das águas subterrâneas formam banhados ou áreas alagadas facilmente confundidas com pequenas lagoas.

Em função do comportamento do regime de precipitações, que geram variações do nível do lençol freático, as áreas das nascentes diminuem nos períodos de estiagem. Os afloramentos ficam concentrados em locais de topografia mais baixa, podendo migrar no espaço ou, até mesmo, secarem em estiagens extraordinárias, sem, contudo, perderem sua natureza perene (art. 3º, parágrafo único, do Código de Águas). Por outro lado, nos períodos chuvosos, a recarga do aquífero freático propicia a elevação do nível do lençol o que, conforme a topografia do terreno, permite a ampliação significativa da superfície hídrica da nascente ou do olho d'água.

A Lei nº 7.754/1989, revogada pelo Código Florestal de 2012, estabelecia que os regulamentos deveriam definir as APPs nas nascentes na forma de paralelogramos para proteção da cobertura florestal. Tratava-se de solução interessante por reconhecer que a nascente não é um ponto, ao mesmo tempo que o local de afloramento deveria ser identificado, com o respectivo perímetro delimitado.

Em planícies costeiras, a delimitação da APP no entorno de afloramentos da água subterrânea não é tarefa simples, pois variações nos níveis do lençol freático podem ocorrer em função da oscilação da maré (WANG et al., 2012; KONG et al., 2015), principalmente em locais no interior de estuários (MONTALTO; PARLANGE; STEENHUIS, 2007), próximos da praia (JENG et al., 2005) ou de rios com influência de maré (CAROL et al., 2009).

Carmo, Felipe e Magalhães Junior (2014) adotaram o perímetro médio da área inundada como critério para traçar o entorno de nascente com variação sazonal de nível. Contudo, deve-se considerar que a Lei nº 12.651/2012 estabelece que a APP está situada no *entorno* das nascentes e dos olhos d'água, “qualquer que seja sua situação topográfica” (BRASIL, 2012b, art. 4º, IV). Entende-se como entorno a *área externa ao afloramento*. Para ter função ambiental efetiva, o ideal é que as APPs no entorno de nascentes e olhos d'água não se situem dentro do espaço de variação sazonal dos afloramentos, pois isso formaria ambientes de baixa resiliência ecológica e com diversidade reduzida, de acordo com a teoria da perturbação (CONNELL, 1978).

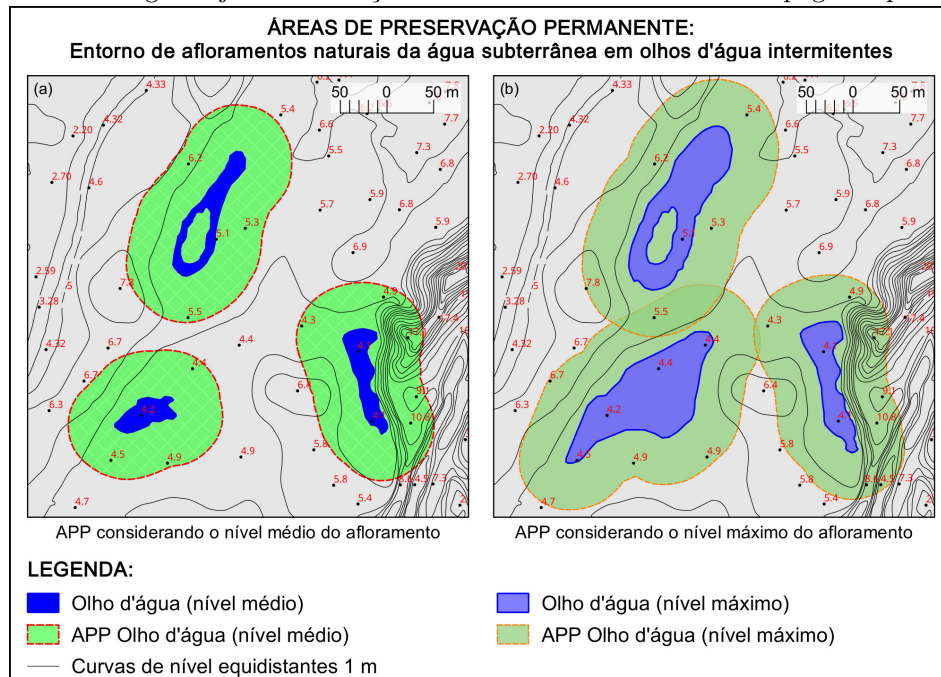
Para delimitação do nível máximo sazonal de um corpo d'água, é necessário analisar, quando disponível, uma série histórica de imagens ou realizar vistorias por longo período, superior a 1 ano. Uma solução para tornar a identificação da extensão do afloramento mais efetiva é a adoção de bioindicadores de áreas úmidas. Moraes (2020) em estudo realizado em planície costeira na Ilha de Santa Catarina, desenvolveu um método para identificação dos limites de proteção dos olhos d'água em baixadas úmidas caracterizadas como paleolagoas, a partir da análise de espécies vegetais indicadoras de restinga herbácea/subarbustiva.

A Figura 5 apresenta de forma esquemática os comportamentos dos afloramentos de água subterrânea em relevo plano, no qual se percebe a complexidade que envolve a delimitação das bordas de nascentes e olhos d'água. Seguindo a lógica do art. 95, do Código de Águas, segundo o qual a nascente é definida pelo ponto em que ela começa a correr sobre o solo, o ideal é que eventual definição técnico-normativa considere o início da APP a partir da borda do afloramento no momento de máximo sazonal. Deve-se definir um tempo de recorrência padrão para evitar-se divergências no caso de serem realizados monitoramentos em anos de baixa pluviosidade.

Enquanto não existir regulamentação, a melhor solução hermenêutica para maximizar a proteção ambiental é considerar que a APP será medida a partir do *nível máximo sazonal do afloramento* (SOUZA; CHAFFE; PINTO; NOGUEIRA, 2019), sendo necessário

que o perito pesquise registros documentais, indicações físicas e elementos bióticos que permitam delimitar a extensão sazonal da área úmida (Figura 5b).

Figura 5 – Ilustração das hipóteses para delimitação da área de preservação permanente (APP) no entorno de olhos d'água sujeitos à variação sazonal de nível em locais de topografia plana.



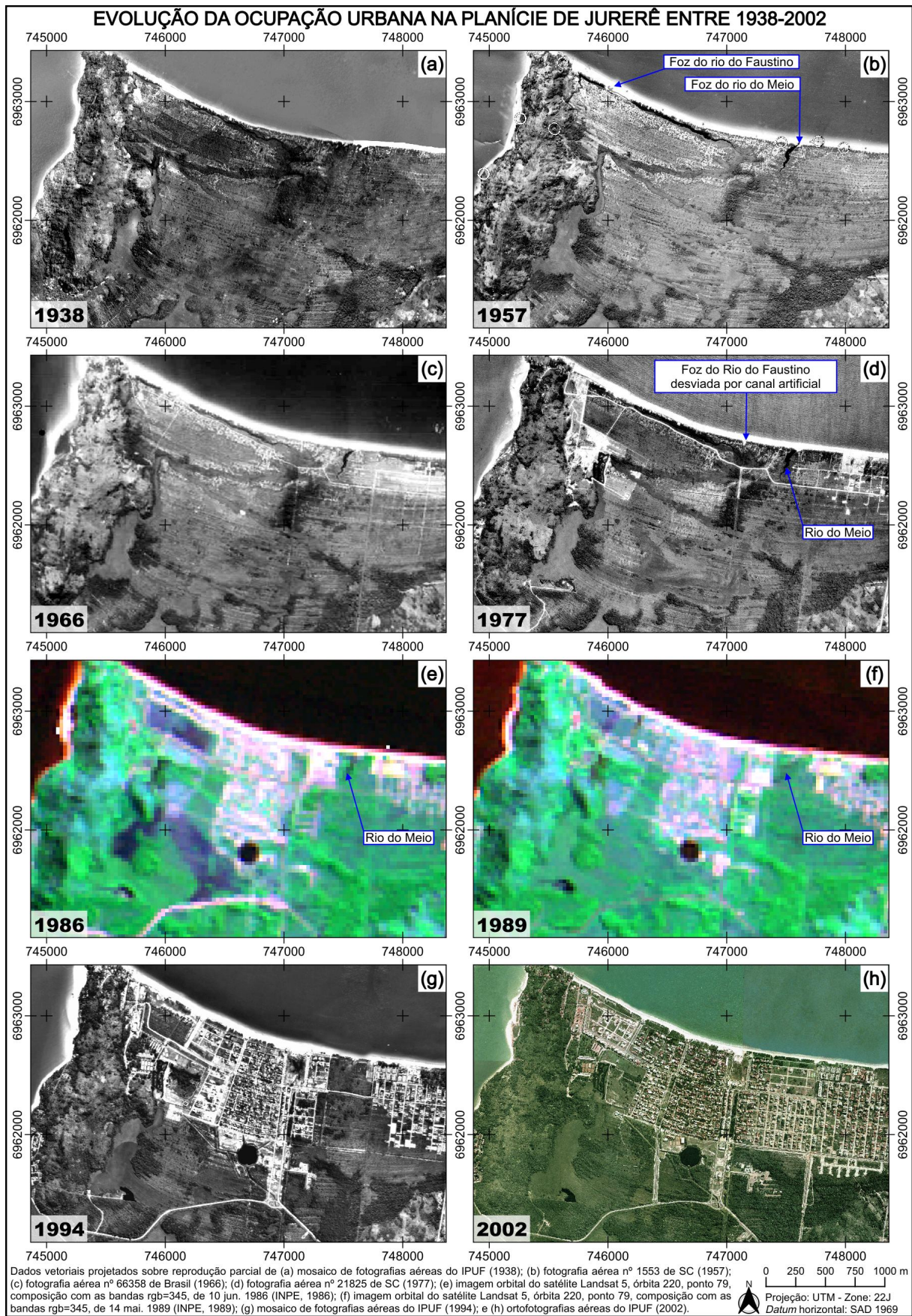
Fonte: Souza, Chaffe, Pinto e Nogueira (2019).

2.4 CURSOS D'ÁGUA

O conhecimento da evolução histórica dos espaços territoriais protegidos é importante para fins de quantificação do dano ambiental, o qual, por ser imprescritível (LEITE, 2003), exige que a avaliação de impacto ambiental considere as alterações da paisagem no espaço e no tempo (cf. subseção 2.2). A título de exemplo, a Figura 6 apresenta o caso dos Rios do Faustino e do Meio, no bairro de Jurerê, Município de Florianópolis (SC), cuja quantificação dos danos ambientais exigiu a análise da evolução histórica da ocupação em face do regime jurídico vigente na época dos fatos (Figura 7).

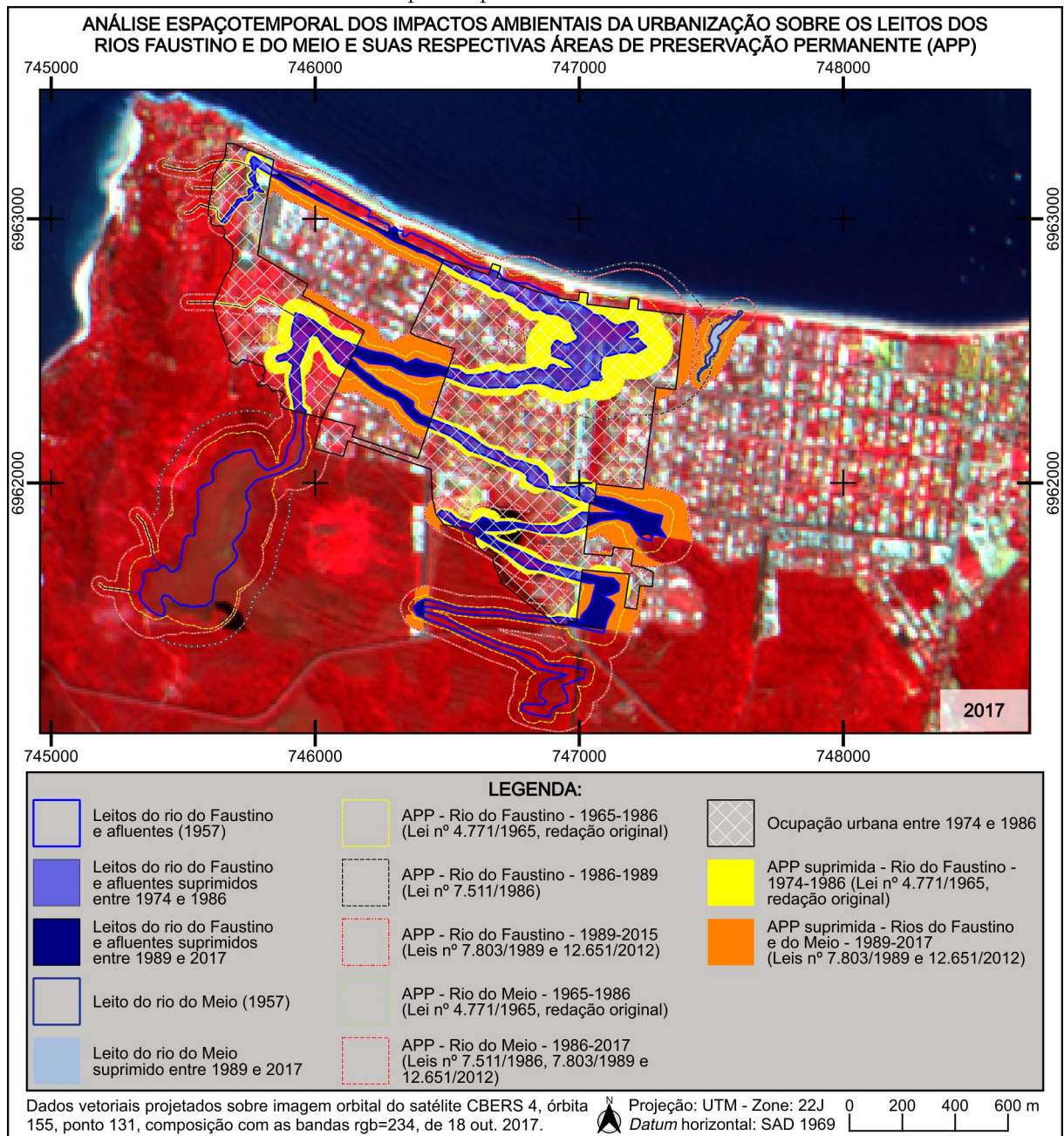
Apesar de a legislação brasileira ser muito clara quanto à largura a ser adotada para APP ripária em rios (Figura 2), permanecem sem regulamentação elementos importantes, tais como, o conceito de curso d'água natural, os critérios hidrológicos para definição do início da faixa de proteção, o procedimento quando presentes ilhas fluviais, entre outros casos que serão detalhados a seguir.

Figura 6 – Evolução espaçotemporal da ocupação urbana na planície de Jurerê (Florianópolis/SC), nos períodos: (a) 1938, (b) 1957, (c) 16.5.1966, (d) 1977, (e) 10.6.1986, (f) 15.5.1989, (g) 1994 e (h) 2002.



Fonte: o autor, com dados de SC (1938, 1957), Brasil (1966), SC (1977), INPE (1986, 1989) e IPUF (1994, 2002).

Figura 7 – Exemplo de análise espaçotemporal. Alveos (leitos) e área de preservação permanente suprimidos na planície de Jurerê (Florianópolis/SC), considerando a legislação vigente na época da execução de cada fase do arruamento para o parcelamento do solo.



Fonte: o autor, com dados de INPE (2017).

2.4.1 Definição de cursos d'água naturais e artificiais

No Brasil, originalmente, a Lei tratou de estabelecer APP em faixa marginal “ao longo dos rios ou de outro qualquer curso d’água” (BRASIL, 1965, art. 2º, alínea “a”, redação original). Contudo, a legislação atual definiu que somente os *cursos d’água naturais não efêmeros* possuem APP em faixa marginal, o que torna relevante e necessária a diferenciação entre os canais naturais e artificiais (cf. art. 4º, I, da Lei nº 12.651/2012,

com redação dada pela Lei nº 12.727/2012). O Código Florestal de 2012 e regulamentações posteriores não estabeleceram o conceito e os critérios que definem um curso d'água *natural*. Segundo Milton Santos,

Muitas vezes o que imaginamos natural não o é, enquanto o artificial se torna “natural”, quando se incorpora à natureza. Nesta, as coisas criadas diante dos nossos olhos, e que para cada um de nós é o novo, já aparece às novas gerações como um fato banal. O que vimos ser construído é, para as gerações seguintes, o que existe diante deles como natureza. Descobrir se um objeto é natural ou artificial exige a compreensão de sua gênese, isto é, de sua história (SANTOS, 1988, p. 75).

Por exemplo, a partir do início do holoceno, há aproximadamente 11 mil anos, os seres humanos começaram a alterar acentuadamente a paisagem na Amazônia, com repercussões duradouras na heterogeneidade de habitats e na conservação de espécies, criando verdadeiras ilhas de biodiversidade no interior de áreas úmidas (LEVIS; CLEMENT *et al.*, 2017; LEVIS; COSTA *et al.*, 2017; LOMBARDO *et al.*, 2020), que para a geração atual são consideradas como ecossistemas naturais e primários.

Em todo o mundo, a maior parte dos rios também já sofreu algum tipo de alteração pela ação do homem. Os efeitos dessas alterações propagam-se por décadas ou séculos, ao ponto de os observadores atuais não terem a percepção das condições originais dos cursos d'água (WOHL; MERRITTS, 2007).

Um curso d'água primitivo (original) pode ser objeto de alterações quanto à forma e função, por meio de modificações diretas ou indiretas em seu leito ou na qualidade da água, com implicações à fauna, à flora e à própria sociedade. Cursos d'água são canais naturais ou artificiais por onde a água flui (WMO, 2012) e, por extensão, o termo refere-se tanto à água em movimento, quanto ao canal que a contém (ISO, 2011). Por canal, compreende-se: o curso d'água claramente definido pelo qual flui a água de forma periódica ou contínua (WMO, 2012), cuja superfície do fluído está sujeita à pressão atmosférica (NEVES, 1986); o curso d'água natural ou artificial que serve de interligação entre corpos de água maiores (WMO, 2012; SUGUIO, 1992); os canais artificiais de irrigação e drenagem (NEVES, 1986); e a parte mais profunda de um curso d'água por onde flui a corrente principal (WMO, 2012). A norma ISO 772:2011 considera *stream* e *river* sinônimos e define-os como fluxo de água em um canal aberto natural (ISO, 2011). Os cursos d'água também podem fluir sob a forma de água subterrânea em formações cársticas ou por condutos abertos ou fechados (WMO, 2012).

Uma vez que o conceito legal atual de nascentes é o afloramento perene e natural da água subterrânea que dá início a um curso d'água (art. 3º, XVII, Lei nº 12.651/2012), muitos têm sido levados a crer que um canal não será legalmente considerado um curso d'água se não possuir uma nascente. Um exemplo típico de curso d'água que não possui nascente é o braço de maré, que consiste no “curso de água que liga uma laguna ao mar aberto” (SUGUIO, 1998, p. 102-103), o qual pode ser observado na Figura 8. Pode-se citar também os canais de maré e os rios distributários (SUGUIO, 1998). E a própria Lei

considera a existência de rios efêmeros, que não possuem nascentes, por definição técnica e legal. Então, a nascente dá origem a um curso d'água, mas *nem todo curso d'água tem origem em nascente*.

Figura 8 – Exemplo de curso d'água que não nasce a partir de uma nascente: braço de maré. Canal da barra da Lagoa da Conceição (Florianópolis/SC).



Fonte: o autor com dados de SC (2014a,b).

Outro ponto recorrente de divergência dá-se com relação aos cursos d'água que foram antropizados por retificações, canalizações e outras obras de alteração do leito fluvial. A maioria das definições de rios “naturais” estão ligadas à ocorrência do dano ambiental (cf. NEWSON; LARGE, 2006) e sua gradação (cf. GRAF, 1996), cujas pesquisas estão relacionadas às técnicas de recuperação ou restauração dos processos ecológicos fluviais. Então, faz-se necessário definir se a classificação de um curso d'água como natural está vinculada ao seu estado de interferência humana (degradação) ou à sua gênese (origem do fluxo das águas).

Para fins de proteção ambiental, a melhor interpretação para definição de curso d'água natural é aquela ligada à gênese da corrente. Neste sentido, a classificação de um curso d'água como natural não está relacionada ao fato dele ser primitivo (i.e., não ter sofrido qualquer intervenção humana), mas na sua função hidrológica de concentrar e permitir o fluxo natural da água dentro de uma bacia hidrográfica (*caminho natural das águas superficiais*). Considera-se natural o fluxo esperado para um curso d'água em condições naturais (WMO, 2012).

Naturalmente, um curso d'água é estável e dinâmico no tempo e no espaço. As intervenções realizadas pela engenharia deixam estático aquilo que originalmente era

estável (WOHL; MERRITTS, 2007), por isso os rios naturais modificados (antropizados) não devem ser considerados como puramente artificiais, pois não são criações humanas, mas transformações de estruturas naturais preexistentes.

Na literatura em hidrologia as expressões *canais* ou *rios naturais* são utilizadas para descrever cursos d'água que se encontram dentro do *sistema de drenagem da bacia hidrográfica*, independente de terem sido ou não alterados por ações antrópicas, conforme se pode observar em estudos de sistemas fluviais de todo o mundo (cf. MORAMARCO et al., 2013; GLEASON, 2015; LIN; PAN; BECK et al., 2019; YAMAZAKI; IKESHIMA et al., 2019; BJERKLIE et al., 2020).

Os *cursos d'água artificiais* serão aqueles criados exclusivamente para drenagem de uma superfície originalmente enxuta ou para conduzir a água de um corpo hídrico artificial para outro (natural ou artificial). Ou seja, o canal para ser considerado artificial não deve interferir no fluxo natural das águas.

O Código de Águas, quando trata dos direitos ao aproveitamento das águas particulares e comuns, estabelece que o proprietário pode realizar alterações nos álveos de cursos d'água no interior da propriedade desde que “não altere o ponto de saída das águas remanescentes” (BRASIL, 1934b, art. 71, *caput*) e define que “não se compreende na expressão águas remanescentes as escorredouras” (BRASIL, 1934b, art. 71, § 2º), ou seja, aquelas que são produto do escoamento superficial imediatamente posterior à precipitação, antes de formar os primeiros canais naturais efêmeros. Estas são as águas tipicamente pluviais, cujos canais implantados para sua drenagem constituem cursos d'água artificiais.

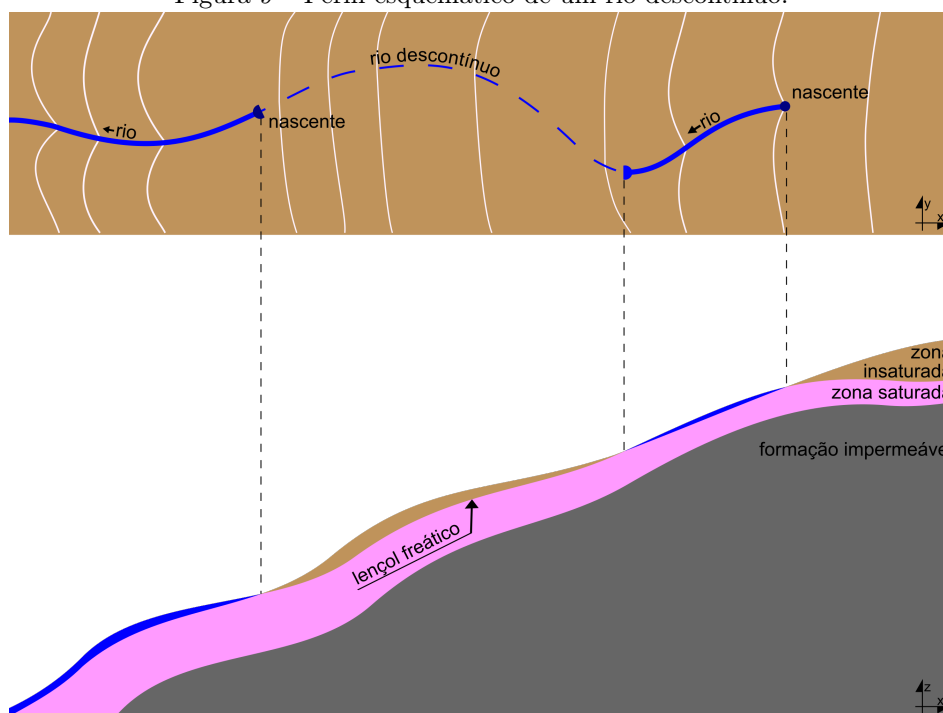
Partindo-se do princípio que a gênese das águas define a natureza da corrente, os cursos d'água naturais quando canalizados não se tornam artificiais, mesmo que a obra tenha sido lícita (autorizada e com observância da legislação de regência). Continuam sendo considerados correntes naturais, sujeitos às respectivas limitações e servidões sanitárias, mas haverá implicações quanto à faixa marginal de preservação permanente, devido à ausência de leito em condutos fechados.

É a interpretação que se extrai do Código de Águas de 1934, o qual define que “as correntes que desaparecerem momentaneamente do solo, formando um curso subterrâneo, para reaparecer mais longe, não perdem o caráter de coisa pública de uso comum, quando já o eram na sua origem” (BRASIL, 1934b, art. 100).

No mesmo sentido, os *rios descontínuos* (Figura 9), caracterizados por possuírem trechos alternados de fluxo perene e intermitente (WMO, 2012), e *subterrâneos*, que fluem através do subsolo por grandes espaços vazios (SUGUIO, 1998), mantêm as classificações dos cursos d'água originários.

Analogamente, os cursos d'água descontínuos e subterrâneos preservam a característica de naturais. Contudo, quando não possuírem trechos que afloram na superfície, não haverá APP nas suas margens devido à ausência de um álveo nestes trechos e, conseqüentemente, de um leito regular.

Figura 9 – Perfil esquemático de um rio descontínuo.



Fonte: o autor.

Cabe observar que nem todo curso d'água possui foz num lago, oceano ou outro corpo hídrico. Há casos de endorreísmo, quando a água superficial não chega ao oceano (SUGUIO, 1998), e.g., nos casos de infiltração integral no solo formando rios descontínuos, comumente observados em encostas e nas planícies da orla marítima.

A partir da literatura, normas técnicas e da análise sistêmica dos Códigos de Águas e Florestal, com as respectivas alterações e regulamentações, para fins de identificação de cursos d'água pode-se adotar os seguintes conceitos:

Curso d'água natural consiste no (a) canal claramente definido que concentra o fluxo natural da água superficial ou produto de afloramento da água subterrânea em uma bacia hidrográfica, podendo ser contínuo, descontínuo ou subterrâneo e, quanto ao regime hidrológico, ser efêmero, intermitente ou perene; (b) o canal que conecta dois corpos hídricos naturais permitindo o fluxo natural das águas; e (c) o canal implantado ou alterado pela ação humana que, mesmo em situação diversa da primitiva, conserva a função de concentrar ou propiciar o fluxo natural das águas em uma bacia hidrográfica.

Curso d'água artificial, por exclusão, consiste no (a) canal criado exclusivamente para drenagem de uma superfície originalmente enxuta; (b) o canal criado exclusivamente para conduzir a água entre um corpo hídrico artificial e outro (natural ou artificial); e (c) o canal que não interfere no fluxo natural das águas.

2.4.2 Importância ecológica dos rios e da vegetação ripária

Diversas teorias procuram descrever o comportamento de um rio sob os aspectos geomorfológico e ecológico (BOUWMAN et al., 2013), merecendo destaque, dentro dos objetivos do presente trabalho, o zoneamento (HUET, 1954) e a teoria do rio contínuo (VANNOTE et al., 1980).

Um rio pode ser zoneado em três setores (HUET, 1954), que podem ser correlacionados com as ordens definidas por Strahler (1952): cabeceira (1^a a 3^a ordem), transição (4^a a 6^a ordem) e deposição (ordens superiores), conforme sintetizado no Quadro 4 e na Figura 10.

Quadro 4 – Zoneamento e características esperadas de um rio conforme a teoria do contínuo.

SETOR	ORDEM	DESCRIÇÃO
Cabeceira	1 a 3	A cabeceira dos rios são muito influenciadas pela vegetação ripária; Relação entre organismos de produção primária (P) e respiração (R) é pequena ($P/R < 1$); Predominam partículas grossas de matéria orgânica (CPOM); Predominam espécies heterotróficas.
Transição	4 a 6	O sombreamento do álveo do rio pela vegetação ripária é menor e o fornecimento de matéria orgânica das margens cresce, implicando maior produção primária e relação $P/R > 1$; Predominam partículas finas de matéria orgânica (FPOM); Predominam espécies autotróficas.
Deposição	Maior que 6	O efeito da vegetação ripária perde significância; A atividade primária (autotrófica) é limitada pela turbidez e profundidade do rio, pois está associada à penetração da luz no corpo hídrico; Relação $P/R < 1$; Predominância de espécies heterotróficas cresce gradualmente.

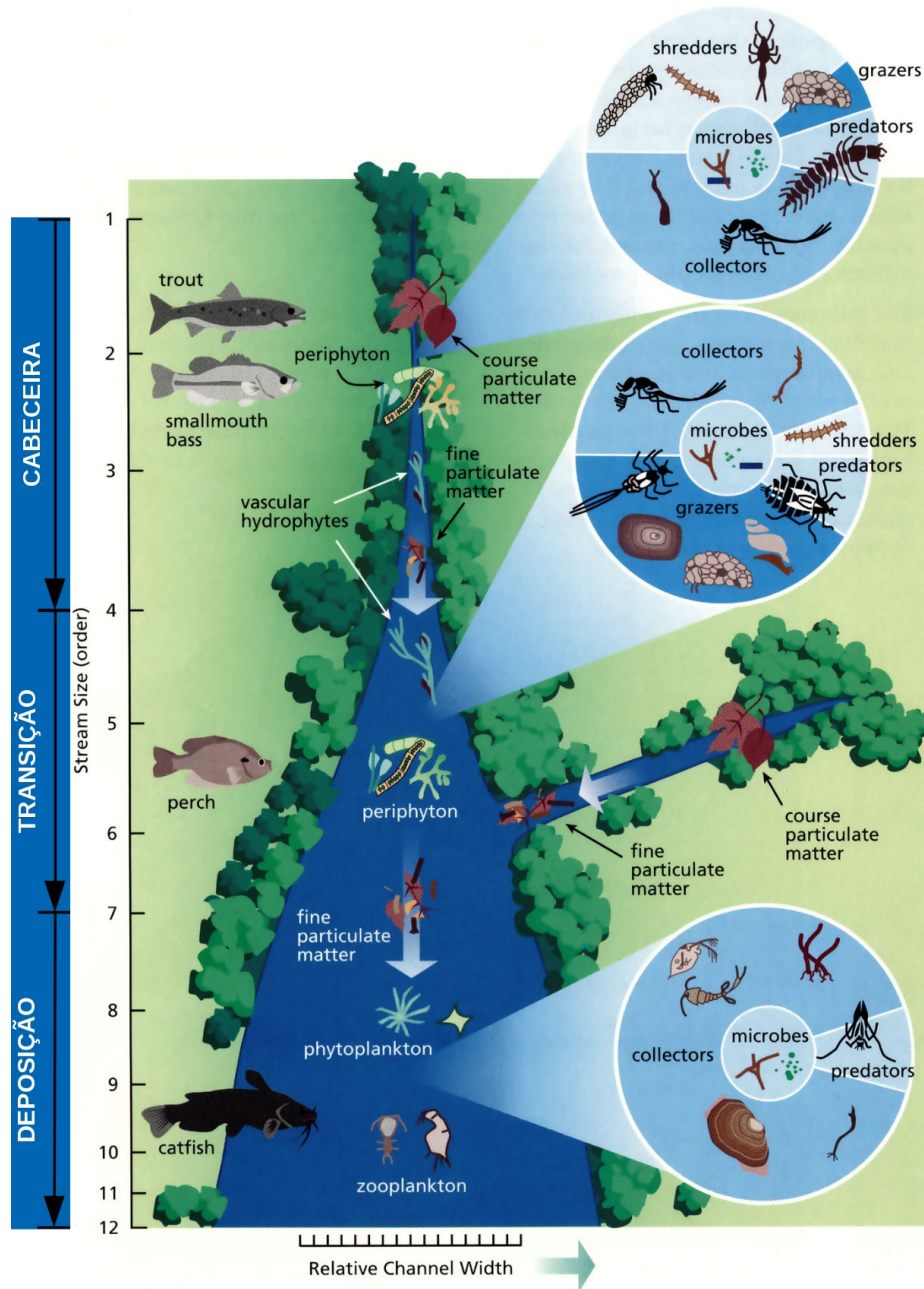
Fonte: o autor a partir de informações de HUET (1954), Vannote et al. (1980) e Bouwman et al. (2013).

Os cursos d'água de cabeceira, muitos dos quais têm natureza efêmera, são importantes para o fornecimento de nutrientes para a biota instalada nos setores a jusante da bacia hidrográfica. Para teoria do rio contínuo (VANNOTE et al., 1980), a vegetação ripária tem maior importância ecossistêmica nos setores de cabeceira e transição do zoneamento da rede hídrica.

A qualidade da água depende de interações complexas e altamente variáveis entre clima, geologia, topografia, uso da terra, perturbações humanas e processos de ecossistema operando em múltiplas escalas espaciais e temporais. Embora a contribuição de uma única zona úmida ou curso d'água efêmero para a qualidade da água possa ser pequena, os efeitos cumulativos são impressionantes (SULLIVAN; RAINS; RODEWALD, 2019).

As águas de rios efêmeros, intermitentes e sazonais são frequentemente não mapeadas e mal protegidas e, portanto, são suscetíveis à degradação ou destruição. Junto com os pântanos localizados fora das planícies aluviais, são consideradas como *águas vulneráveis*, cuja importância é reforçada pelas evidências científicas disponíveis, que fornecem provas dos efeitos do fluxo de cabeceira e dos pântanos nas águas a jusante, no

Figura 10 – Zoneamento (HUET, 1954) e características esperadas de um rio conforme a teoria do contínuo (VANNOTE et al., 1980).



Fonte: adaptado de Vannote et al. (1980) e EPA (2007).

seu papel para outras funções da paisagem, os enormes custos para sua restauração e a necessidade de precaução para manutenção de suas funções, dadas as rápidas mudanças climáticas e as pressões de setores econômicos (CREED et al., 2017). Segundo Finn et al. (2011), o conhecimento científico atual exige que as cabeceiras sejam priorizadas para conservação, porque cada pequeno seguimento de curso d'água perdido representa a perda de diversidade única em uma rede de rios.

Na época em que se discutia a revisão do Código Florestal de 1965, Metzger (2010) informava que o conhecimento científico obtido até aquele momento corroborava os valores indicados para largura das APPs nas margens dos rios, indicando a necessidade de ampliar

seus valores mínimos para 50 m, bem como, “independentemente do bioma ou do grupo taxonômico considerado, toda paisagem deveria manter corredores ripários, dado os seus benefícios para a conservação das espécies” (METZGER, 2010, p. 93).

Contudo, em sentido oposto, o legislador brasileiro por meio da Lei nº 12.727/2012 retirou a proteção das faixas marginais dos cursos d’água efêmeros, constituindo retrocesso ecológico, pois ao permitir o uso das margens destes cursos d’água e, conseqüentemente, a supressão da vegetação ripária, provoca prejuízos ambientais aos ecossistemas a jusante.

Mudanças na legislação, sem suporte científico, trazem riscos consideráveis para a conservação dos ecossistemas de água doce (TANIWAKI et al., 2018). Segundo Grasel, Mormul et al. (2018), as funções dos ecossistemas emergem de múltiplas conexões, de forma que a perda da proteção para rios efêmeros deve prejudicar severamente a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos suportados por lagoas e outras áreas úmidas elevadas, que com eles se conectam pela rede hidrológica de superfície (cf. LANE et al., 2018; SCHOFIELD et al., 2018).

Além do evidente retrocesso, o Código Florestal de 2012 deixou a seguinte lacuna: a ausência de critérios normativos para definir o ponto a partir do qual se inicia a área de preservação permanente nas margens dos rios no sentido longitudinal, i.e., o ponto de transição entre os trechos efêmeros e intermitentes ou perenes de cursos d’água.

2.4.3 Ponto de início da APP ripária no sentido longitudinal em rios com nascentes móveis

A definição precisa do ponto de montante a partir do qual se considera o início da APP do curso d’água e da nascente já foi abordada na [subseção 2.3.1](#).

2.4.4 Ponto de início da APP ripária no sentido transversal: delimitação do leito regular

Analisando-se os rios na dimensão transversal, percebe-se que a efetividade ecossistêmica da faixa marginal da APP é função da diversidade de sua biota, que é sensível à frequência das perturbações que incidem sobre aquele espaço. Segundo a *teoria da perturbação* (CONNELL, 1978), espera-se maior diversidade ecológica em ambientes sujeitos a distúrbios intermediários, que permitem o desenvolvimento de ecossistemas complexos num estado não estático ou não uniforme.

A manutenção de corredores ripários amplos o suficiente para incluir não apenas a floresta inundada anualmente, mas também a floresta mais seca, em geral mais rica e diversificada, favorece a conservação da diversidade de espécies regionais em paisagens fragmentadas (METZGER; BERNACCI; GOLDENBERG, 1997).

Segundo Spackman e Hughes (1995), a largura mínima do ecossistema ripário para rios de terceira ordem alcançarem riqueza significativa de espécies florísticas deve

encontrar-se entre 10 m e 45 m. Para avifauna os autores indicam que a largura mínima deve estar no intervalo entre 75 m e 175 m.

Para fornecer um habitat apropriado para aves e mamíferos, [Lees e Peres \(2008\)](#) afirmam que a faixa marginal protegida deve ter pelo menos 200 m de extensão em cada margem para rios com mais de 10 m de largura. Mesmo valor indicado por [Laurance e Laurance \(1999\)](#) para ecossistemas estritamente florestais.

Na planície amazônica, [Leal, Barlow et al. \(2017\)](#) observaram grande variabilidade de biodiversidade entre rios de baixa ordem e concluem que a largura mínima da APP prevista na legislação brasileira para aqueles locais é insuficiente para proteção da fauna. No mesmo sentido, [Dala-Corte et al. \(2020\)](#) observam que os valores definidos pela legislação brasileira para as APPs nas margens dos rios são insuficientes e deveriam partir de um valor mínimo de 50 m de largura, mesmo valor indicado por [Metzger \(2010\)](#).

[Flores et al. \(2017\)](#), em estudo sobre a resiliência de áreas da floresta amazônica submetidas a incêndios, realizou a comparação entre remanescentes situados em planícies de inundação e aqueles localizados em áreas não inundáveis (terra firme). Os resultados indicam que as florestas sujeitas a inundações sazonais são menos resilientes do que aquelas situadas em terra firme. Então, não é interessante que toda a APP seja inundada em curtos intervalos de recorrência, pois nesse cenário o ecossistema protegido é de baixa diversidade e, também, de baixa resiliência. Por isso, a delimitação precisa do ponto de início da faixa marginal de preservação nos rios é importante para garantir sua eficiência.

A constatação de deficiências na legislação para proteção de ecossistemas ripários aos rios (*stream corridors*) não é exclusiva do Brasil. [Kuglerová et al. \(2020\)](#), em pesquisa sobre matas ciliares em pequenos rios no Canadá, Suécia e Finlândia, concluíram que a maior parte desses corpos hídricos estão insuficientemente protegidos, sugerindo que as atuais diretrizes florestais desses países sejam revistas para aumentar a proteção dos pequenos cursos d'água.

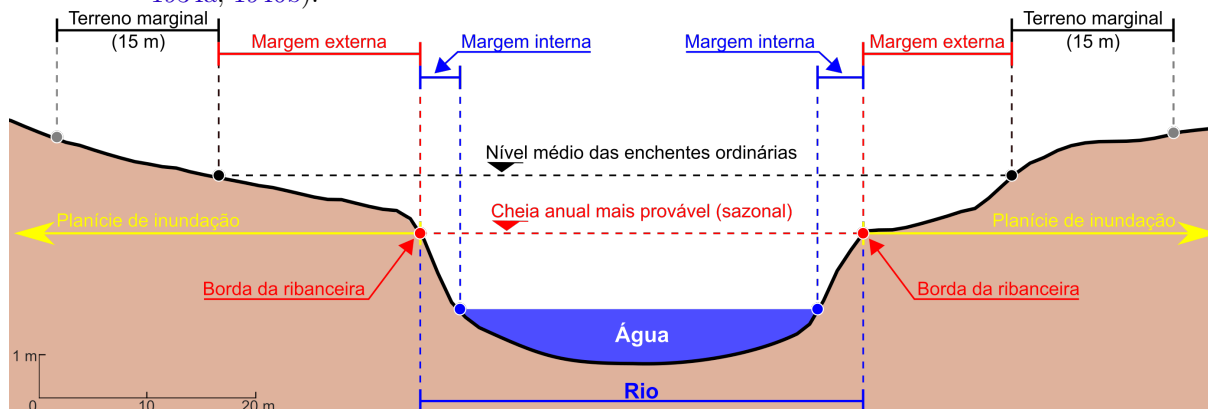
Segundo [Valladão \(1931\)](#) apud [Nunes \(1977\)](#), autor do Projeto do Código de Águas (Decreto nº 24.643/1934), um curso d'água é composto pelos seguintes elementos: *água, leito (álveo) e margens*.

O álveo ou leito “é a superfície que as águas cobrem sem transbordar para o sólo natural e ordinariamente enxuto” ([BRASIL, 1934b](#), art. 9º). As margens podem ser *internas* ou *externas*. A margem interna é localizada dentro do álveo do rio, na ribanceira, estendendo-se até a “linha a que chegam as mais altas águas da corrente, no seu estado normal, sem transbordamento” ([NUNES, 1977](#), p. 3). A partir desse ponto, inicia a planície de inundação. “Margem externa existe como componente do rio, sem integrá-lo como a margem interna” ([NUNES, 1977](#), p. 9), sendo “coberta pelas águas até o ponto médio das enchentes ordinárias” ([NUNES, 1977](#), p. 18).

Nas margens dos rios navegáveis estão localizados os terrenos marginais, os quais consistem em bens públicos instituídos pelo art. 39, da Lei nº 1.507/1867, numa faixa

marginal de 15 m de largura delimitada a partir da *linha média das enchentes ordinárias*¹⁴. A Figura 11 sintetiza os elementos de uma corrente.

Figura 11 – Elementos de uma corrente e localização dos terrenos marginais, segundo Brasil (1867, 1868, 1934a, 1946b).



Fonte: o autor.

Conforme abordado na [subseção 2.2](#), quando o Código Florestal de 1965 criou as APPs nas margens dos rios, não definiu o leito a partir do qual se iniciava a faixa marginal protegida. Para Nunes (1977), a APP deveria medir-se a partir da ribanceira, o que corresponde ao leito regularmente ocupado pelas cheias, pelo menos uma vez ao ano, conhecido como leito maior periódico ou sazonal (CHRISTOFOLETTI, 1976). E esse foi o parâmetro adotado pelo CONAMA por meio da Resolução 4/1985, que definiu o *leito maior sazonal* como ponto a partir do qual se mede a APP nas margens dos rios (BRASIL, 1986b, arts. 2º, “c”, e 3º, “b”, I).

Posteriormente, a Lei nº 7.803/1989 ampliou a proteção e definiu que a referida faixa marginal iniciar-se-ia do *nível mais alto da corrente (leito maior excepcional)*. Posteriormente, o CONAMA por meio da Resolução nº 303/2002 regulamentou o conceito legal de “nível mais alto”, reduzindo-o para o “nível alcançado por ocasião da cheia sazonal do curso d’água” (BRASIL, 2002c, art. 2º, I). A Lei nº 12.651/2012 inovou ao estabelecer

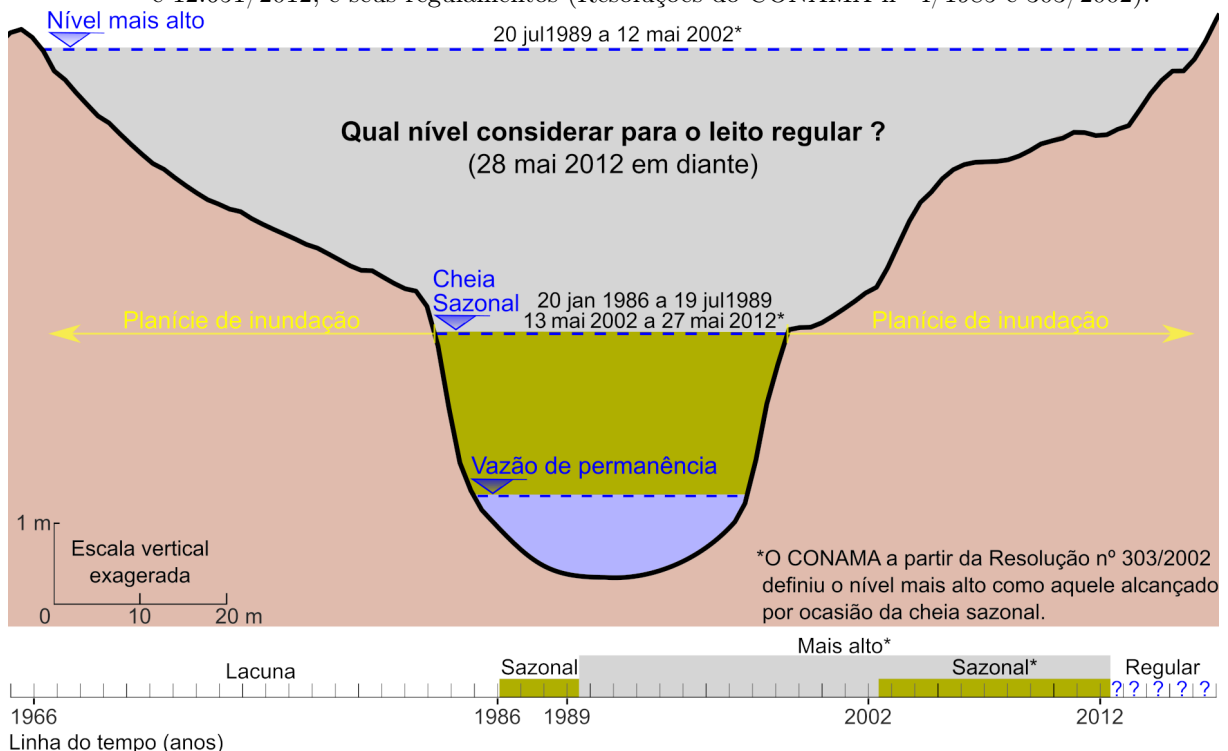
¹⁴ Desde o Direito Romano os rios, neles inclusos as ribanceiras, são considerados como bens de uso comum do povo, servindo as margens como ponto de atracação de embarcações (NUNES, 1977). Para assegurar o livre trânsito pelos rios navegáveis, o legislador definiu o terreno marginal afastado da borda da ribanceira. Observa-se que no século XIX já se sabia que o nível médio das cheias anuais ocorria acima da ribanceira do rio. E o aforamento dos terrenos marginais “não abrangia as margens do rio” (NUNES, 1977, p. 26), pois o Decreto nº 4.150/1868 visava destinar ao uso comum uma faixa adjacente ao rio navegável. Considera-se navegável “o curso d’água no qual, *plenissimo flumine*, isto é, coberto todo o álveo, seja possível a navegação por embarcações de qualquer natureza, inclusive Jangadas, num trecho não inferior à sua largura: para os mesmos efeitos, é navegável o lago ou a lagoa que, em águas médias, permita a navegação, em iguais condições, num trecho qualquer de sua superfície” (BRASIL, 1940, art. 6º, *caput*).

Outro ponto interessante que se observa na legislação do século XIX é a incorporação de aspectos técnicos para apresentação de pedidos para concessão de terrenos de marinha e marginais ou seus acrescidos, os quais deveriam ser instruídos com plantas, respeitadas as seguintes condições:

“As referidas plantas deverão ser traçadas na escala de 1:200, os detalhes de 1:100, e os perfiz e côrtes de 1:50, referindo-se ao metro, e bem assim indicar os planos e projectos de obras publicas geraes, provincias e municipaes, na localidade” (BRASIL, 1868, art. 2º, § 2º).

que a APP ao longo dos cursos d'água inicia a partir da borda do *leito regular*, que consiste na “calha por onde correm regularmente as águas do curso d'água durante o ano” (BRASIL, 2012b, art. 3º, XIX). Mas a definição legal de leito regular não deixou clara qual a frequência da vazão de referência ou outro critério geomorfológico a ser considerado para defini-lo (Figura 12). Segundo Sousa, Fernandez Piedade e Candotti (2011), o nível de água “regular” é mal definido no Código Florestal de 2012, abrindo oportunidades para a destruição de áreas úmidas elevadas, marginais aos rios, principalmente nas planícies sujeitas a pulsos de inundação de alta amplitude na Amazônia.

Figura 12 – Evolução do nível de referência para o leito fluvial que define o início da área de preservação permanente em faixa marginal a cursos d'água por meio das Leis nºs 4.771/1965, 7.803/1989 e 12.651/2012, e seus regulamentos (Resoluções do CONAMA nº 4/1985 e 303/2002).



Fonte: Souza, Chaffe e Pinto (2020).

Machado (2014) considera que a faixa marginal da APP em curso d'água deve iniciar no mesmo ponto do terreno marginal, de forma a evitar a apropriação de bens públicos por particulares nos rios navegáveis. Antunes (2013) considera que a alteração promovida pelo Código Florestal em 2012 afronta o domínio público dos terrenos marginais e a definição do leito regular corresponde ao leito médio do rio.

Uma vez que o STF declarou constitucional o estabelecimento do leito regular para definição espacial das APPs (BRASIL, 2018e), confirmando a extinção da regra anterior que adotava o nível mais alto do rio, pode-se, devido à falta de regulamentação, trabalhar inicialmente com a hipótese do nível médio das enchentes ordinárias para sua integração. Contudo, a análise integrada dos conceitos de *faixa de passagem* e *planície de inundação*, definidos na Lei nº 12.651/2012, em face dos métodos e definições preponderantemente

adotados na geomorfologia fluvial, permite situar espacialmente o leito regular.

Segundo a Lei nº 12.651/2012, a planície de inundação é formada por “áreas marginais a cursos d’água sujeitas a enchentes e inundações periódicas” (BRASIL, 2012b, art. 3º, XXI) e a faixa de passagem de inundação é a “área de várzea ou *planície de inundação adjacente a cursos d’água* que permite o escoamento da enchente” (BRASIL, 2012b, art. 3º, XXII, grifo nosso). Então, pode-se afirmar que *o leito regular termina onde inicia a planície de inundação*.

Leito regular não é uma expressão típica na literatura geomorfológica. Mesmo existindo algumas variações nas definições, as denominações típicas para classificar os tipos de leitos fluviais, segundo Christofolletti (1976), são: vazante, menor e maior (subdividido em periódico, sazonal e excepcional).

Diversos estudos indicam que o transbordamento do rio para a planície de inundação ocorre na cheia anual mais provável (CHRISTOFOLLETTI, 1976; WATSON; BIEDENHARN; SCOTT, 1999; GRISON; KOBAYAMA, 2011b), conhecida como vazão dominante ou de margens plenas, que é definida como aquela com capacidade “modificadora ou modeladora de um canal fluvial” (GRISON; KOBAYAMA, 2011a, p. 117). Trata-se de uma cheia com período de recorrência entre 1 e 2,5 anos (cf. LEOPOLD; WOLMAN; MILLER, 1992; ANDREADIS; SCHUMANN; PAVELSKY, 2013), sendo típico adotar-se na literatura a vazão de 1,58 ano de recorrência ($Q_{1,58}$).

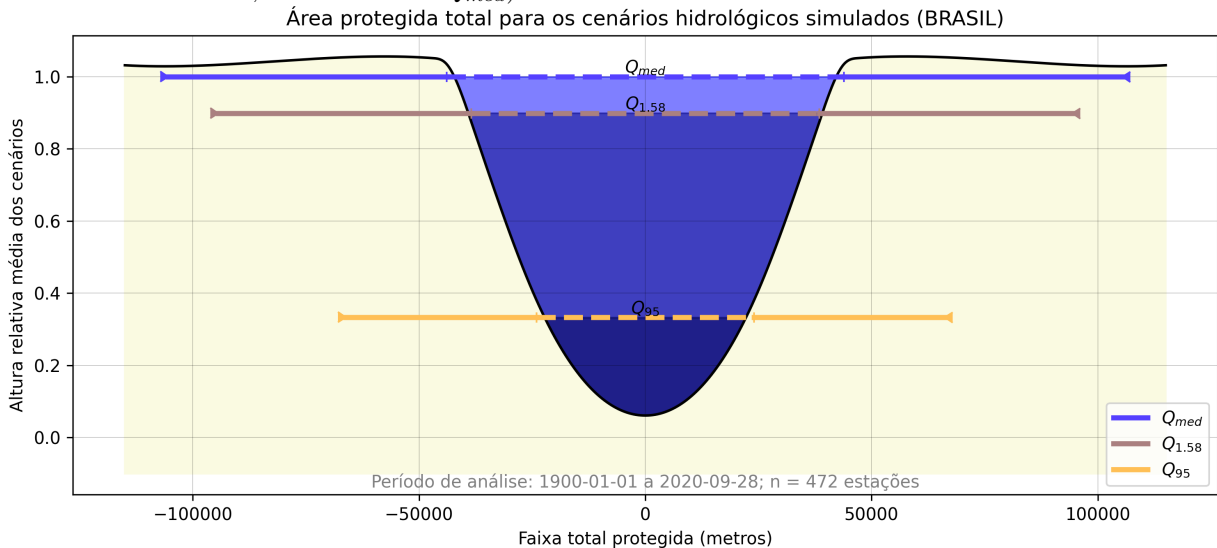
Para fins de mapeamento das APPs em faixas marginais a cursos d’água, o perito necessita levar em consideração que no momento da obtenção de uma fotografia aérea ou imagem orbital os rios encontram-se em regime de recessão, sendo difícil obter-se um retrato exato no momento da cheia de interesse para delimitação precisa da APP, que normalmente ocorre em períodos de precipitação com significativa cobertura de nuvens. Para casos anteriores ao Código Florestal de 2012, adota-se o nível mais alto, enquanto para fatos posteriores, o leito regular será adotado no nível médio das cheias ordinárias (critério dominial) ou no nível da cheia anual mais provável (critério científico da geomorfologia).

Por meio da aplicação de programa desenvolvido por Souza, Chaffe e Pinto (2019b), objeto do Capítulo 3, é possível estimar a diferença relativa do espaço territorial protegido entre diversos cenários hidrológicos (Figura 13). Analisando-se a base de dados de monitoramento fluvial da Agência Nacional de Águas (ANA) no território nacional (cf. resultados apresentados no Capítulo 6), numa amostra de 472 estações fluviométricas observa-se que entre o nível médio das enchentes anuais (Q_{med}) e o cenário de vazão de permanência na condição de estiagem (Q_{95}) há uma perda aproximada de 37% da faixa total de proteção ambiental (leito e APPs). E entre os cenários delimitados pelo nível médio das enchentes (Q_{med}) e as cheias anuais mais prováveis ($Q_{1,58}$), a diferença é pequena, próxima a 10%. Por fim, entre $Q_{1,58}$ e Q_{95} há uma perda aproximada de 30%.

Então, para fins de mapeamento de APPs em margens de rios, considerando o critério dominial, sugere-se a adoção do nível médio das cheias ordinárias. Para fins de

aplicação do método predominantemente aceito para delimitação científica das margens plenas de rios, o critério sugerido é o da cheia anual mais provável, que na prática apresenta pequenas diferenças em relação ao nível médio das cheias ordinárias.

Figura 13 – Espaço territorial protegido formado pela soma das larguras dos leitos e áreas de preservação permanente em faixas marginais de rios em 472 pontos do território brasileiro para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}).



2.4.5 Transição das faixas marginais em função da variação da largura do leito fluvial

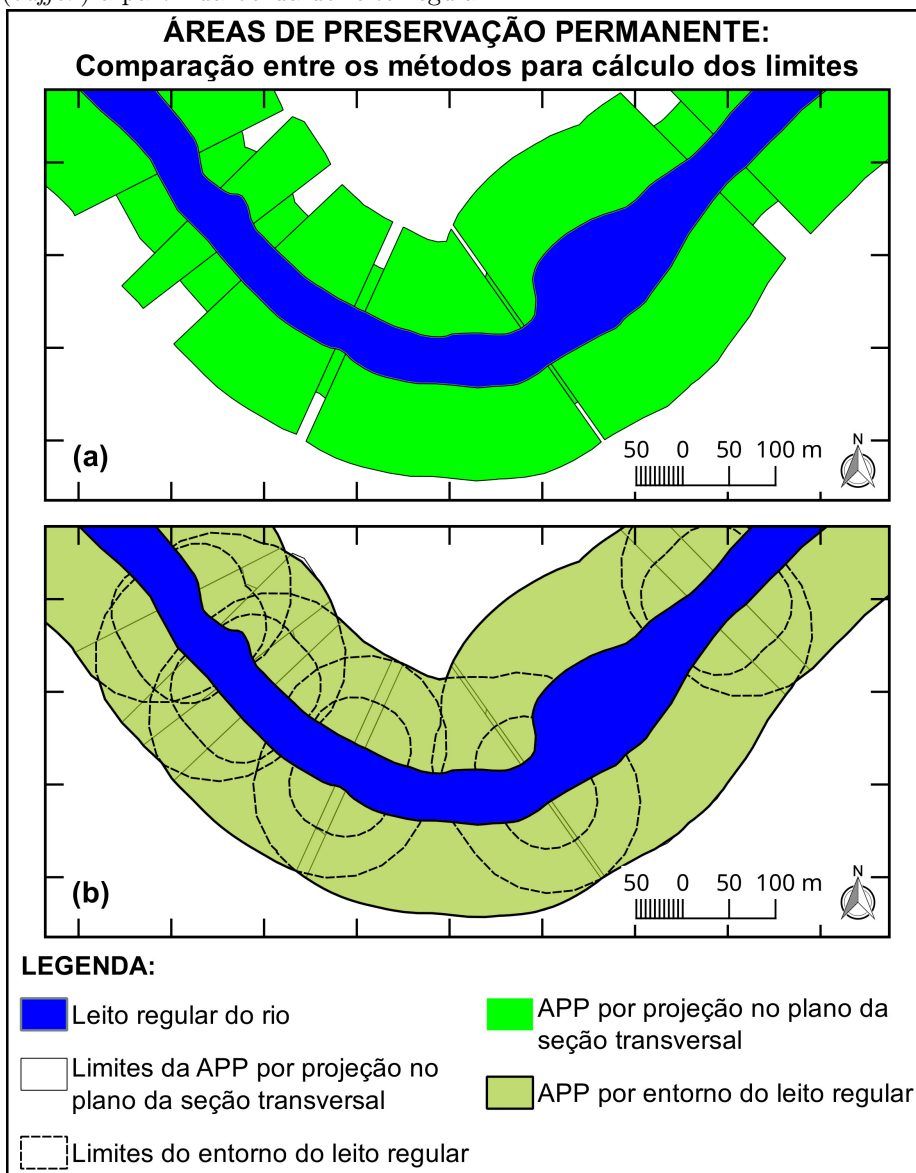
Quando instituídas em 1965, as APPs nas margens de rios tinham larguras variáveis, porém contínuas, e após 1986 adotou-se intervalos de valores descontínuos (Figura 2). Há duas formas de projetar-se a APP em cada margem: (a) no plano da seção transversal do rio (Figura 14a); ou no entorno (*buffer*) ao ponto limite do leito regular (Figura 14b).

Caso adotada a primeira hipótese (projeção no plano da seção transversal), dependendo da escala trabalhada, formam-se descontinuidades nos trechos de transição de largura do leito regular, o que não é aconselhado. No caso da segunda hipótese (entorno), o estabelecimento de critérios para trechos de transição não é necessário. Mesmo existindo variações da largura do leito regular do rio, as descontinuidades são diluídas no entorno de cada ponto, criando uma APP contínua.

A segunda hipótese é intuitivamente mais vantajosa ao meio ambiente e também à técnica. É ambientalmente melhor por reconhecer que a faixa de proteção de um elemento hídrico dá-se em todas as direções, no caso, um semicírculo em relação a cada ponto da borda do leito regular, bem como evita a formação de limites descontínuos (degraus) no corredor formado pelo ecossistema ripário protegido. É uma boa técnica, pois permite

traçar as APPs sem a preocupação com eventuais variações na largura dos cursos d'água nas zonas de transição entre valores-limite de cada faixa de proteção (Figura 14b).

Figura 14 – Comparação entre dois métodos para o cálculo dos limites da área de preservação permanente (APP) em um rio, cujo leito regular possui larguras inferiores e superiores a 50 m. (a) Limites calculados em projeção (*offset*) no plano da seção transversal. (b) Limites definidos no entorno (*buffer*) a partir da borda do leito regular.



Fonte: Souza, Chaffe e Pinto (2020).

2.4.6 Presença de ilha fluvial: APP insular e cálculo da largura do curso d'água

Ilha fluvial pode ser conceituada como uma área de terra emersa circundada pela água do rio (SUGUIO, 1998), com relativa estabilidade para resistir aos processos erosivos e sedimentares, permitindo o estabelecimento de vegetação permanente (OSTERKAMP, 1998). Segundo Queiroz et al. (2018), a presença de vegetação é um bom indicador, mas não é suficiente para diferenciar ilhas e barras fluviais. Nos canais trançados, em condição de baixa vazão, o fluxo fluvial é dividido por barras, que são frequentemente submersas por vazões elevadas (LEOPOLD; WOLMAN; MILLER, 1992).

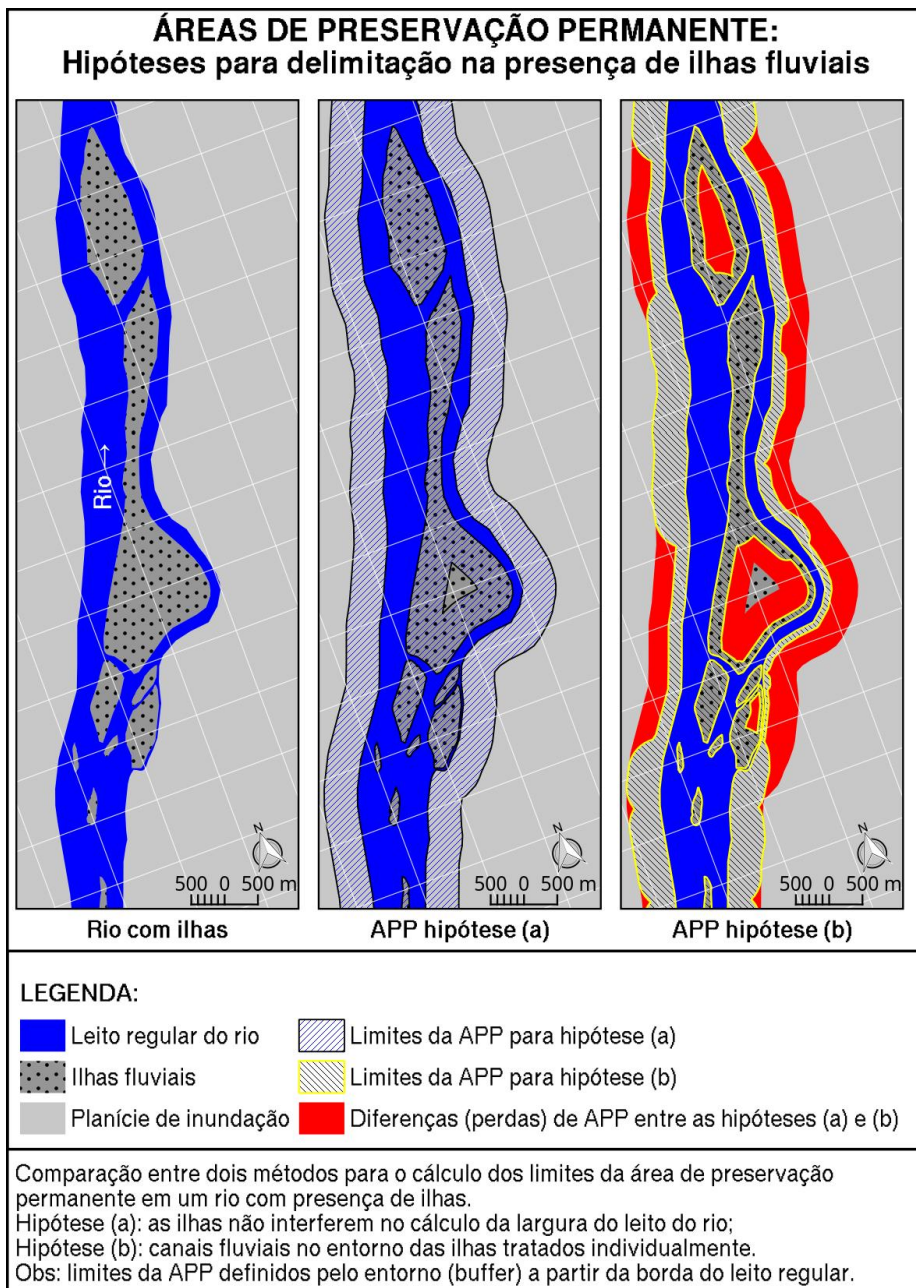
A legislação é silente quanto à incidência da faixa marginal da APP de curso d'água em ilhas fluviais. Contudo, o álveo (leito) é conceituado como a “superfície que as águas cobrem sem transbordar para o sólo natural e ordinariamente enxuto” (BRASIL, 1934b, art. 9º), então as ilhas fluviais não fazem parte do leito regular do rio. Conseqüentemente, incidirá a APP sobre o terreno insular, pois o perímetro das ilhas fluviais coincide com a borda da calha do leito regular.

Outra lacuna observada quando se mapeia a APP de um rio com ilhas fluviais diz respeito ao cálculo da largura do curso d'água, pois há duas hipóteses a serem consideradas: (a) a largura do rio é definida pela distância entre suas margens externas, hipótese na qual a presença de ilhas não interfere no dimensionamento da APP (Figura 15a); ou (b) a presença de ilhas gera a formação de dois ou mais canais fluviais passando em volta delas, cada qual sendo considerado como um curso d'água específico, cuja APP é calculada a partir da largura de cada canal singular (Figura 15b).

A primeira hipótese é adotada no mapa global de hidrografia de alta resolução desenvolvido por Yamazaki, Ikeshima et al. (2019), cujo método empregado exclui as ilhas e barras arenosas do cálculo da largura dos cursos d'água (YAMAZAKI; O'LOUGHLIN et al., 2014), que é determinada pelas margens externas do rio. Deve-se considerar, ainda, que as ilhas fluviais podem sofrer modificações dinâmicas com o tempo, com alterações quanto à forma, superfície e, até mesmo, serem objeto de avulsão ou aluvião. Ademais, não faz sentido que na presença de ilhas fluviais a largura do rio e, conseqüentemente, da faixa de APP sejam reduzidas (Figura 15b), quando as funções ambientais dos ecossistemas ripários permanecem as mesmas.

Pelos motivos acima, a melhor solução para a definição da largura dos rios é medi-los entre as margens externas (Figura 15a).

Figura 15 – Hipóteses para definição da área de preservação permanente (APP) em rios com presença de ilhas.



Fonte: Souza, Chaffe e Pinto (2020).

2.4.7 Faixa marginal de proteção em canais fluviais divagantes

O padrão do canal fluvial divagante ou meandrante é “característico de rios maduros de baixo gradiente, com ampla planície de inundação (*floodplain*), por onde divaga o rio com trajetória mais ou menos sinuosa” (SUGUIO, 1998, p. 509). Os meandros divagantes “deslocam-se pela *planície de inundação*, podendo enfim o débito fluvial alcançar toda a extensão da planície” (GUERRA, 1993, p. 282). Para rios meandrantés de planície sujeitos à translação frequente dos leitos é necessário estabelecer critérios especiais para definição

das bordas do que será considerado como leito regular, bem como em relação à presença de ilhas, em especial, aluvionares ou por formação de novos canais fluviais.

Quando, na condição de vazão definida para o leito regular, a área inundada por um rio meandrante alcançar toda a planície ou, pelo menos, todo o espaço por onde o leito do rio translada, a APP será definida como qualquer outro rio, i.e., pelo nível de referência para o leito regular. No caso de migração natural definitiva, a solução aplicável é aquela empregada para o deslocamento de álveos: a APP acompanhará o leito regular na configuração atual, para manter suas funções ambientais (cf. [subseção 2.4.8](#)).

Já na hipótese de haver um leito fluvial que se desloca ciclicamente dentro de um espaço delimitado, o qual não é totalmente inundado na condição de vazão para o leito regular, a depender do tempo provável para o álveo retornar a um determinado local, pode ser interessante a propositura de uma nova forma para definição da linha a partir da qual se inicia a APP. Aqui, propõe-se que se considere as posições do leito regular nas condições mais extremas em relação ao domínio do espaço pelo qual costuma deslocar-se.

2.4.8 Translação da faixa de APP por alterações naturais e antrópicas de leitos fluviais

Na [subseção 2.4.1](#) demonstrou-se que a classificação de um curso d'água como natural não está relacionada ao fato dele ser primitivo, ou seja, não ter sofrido qualquer intervenção humana, mas na sua função hidrológica de permitir o fluxo natural da água dentro de uma bacia hidrográfica. Então, canais fluviais que tiveram seus leitos deslocados devem ter seus novos álveos considerados como cursos d'água naturais.

Apesar de o Código de Águas prever a possibilidade de alteração no curso do álveo de uma corrente comum ou particular (respeitados os regulamentos ambientais), sem que isto implique perda da condição de curso d'água natural, a legislação ambiental não é expressa sobre os efeitos deste tipo de intervenção quanto às APPs.

Uma vez que o curso d'água antropizado (licitamente) continua sendo considerado como natural, nas margens de seu novo álveo incidirá a limitação administrativa ambiental da faixa marginal de preservação em função das dimensões do seu novo leito regular, ou seja, a APP acompanha o deslocamento do álveo ([Figura 16](#)).

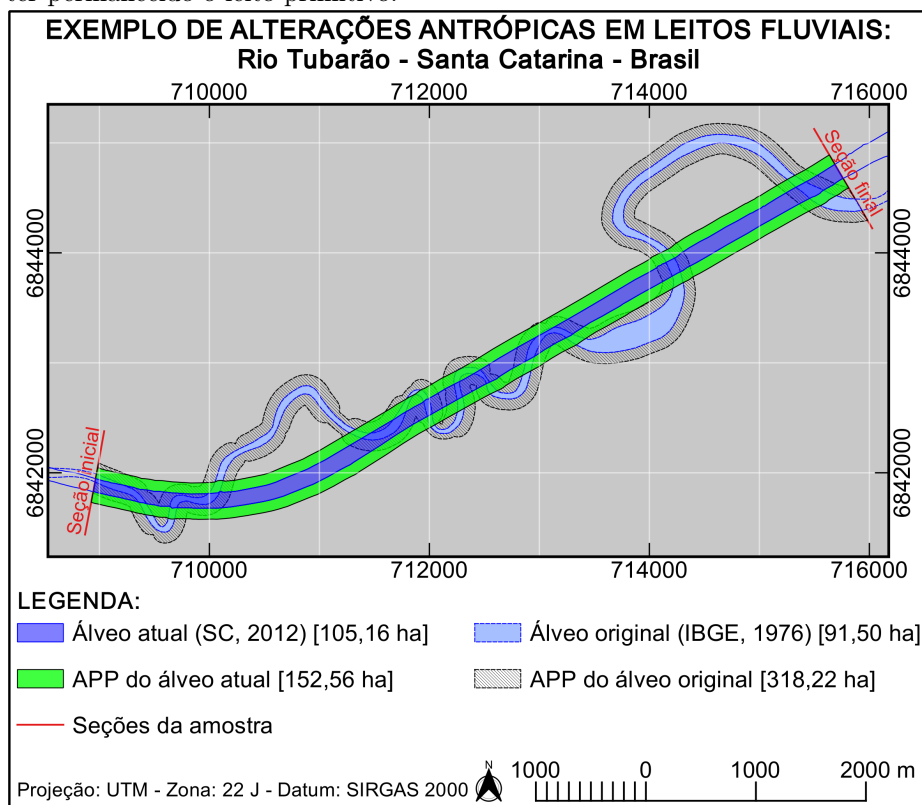
Contudo, esta medida, por si só, não resolve os problemas técnicos e jurídicos provocados pela translação do álveo ou modificações em sua largura, cujos principais problemas são os seguintes:

- a) O deslocamento do álveo ocasiona a translação da APP, que poderá incidir sobre propriedades de terceiros, limitando o direito de propriedade, de forma que no âmbito privado necessitará de concordância e prévia compensação do vizinho afetado e, no caso de obra de utilidade pública, pode gerar dever de indenização pelo poder público, o que é controverso, face a gratuidade das limitações administrativas.

Trata-se de impacto ambiental ao meio socioeconômico;

- b) No âmbito da avaliação de impactos ambientais, com fundamento nos princípios do usuário-pagador, do poluidor-pagador e da responsabilização, há também a necessidade do estabelecimento de compensações ambientais quando após as alterações no leito do rio a nova APP tiver área menor do que a anterior, inclusive, deve-se considerar o dano intermitente (i.e., a perda de espaço territorial especialmente protegido deve ser objeto de compensação). Trata-se de impacto ambiental ao meio biótico.

Figura 16 – Exemplo de canal fluvial antropizado. Comparação entre os leitos do Rio Tubarão em sua situação original e atual, com as respectivas APP definidas na Lei nº 12.651/2012, caso a retificação do leito tivesse ocorrido perante a legislação atual. Observe-se que a faixa marginal de proteção após a retificação do rio corresponde a 47,9% da área protegida na hipótese de ter permanecido o leito primitivo.



Fonte: o autor com dados de [IBGE \(1976\)](#) e [SC \(2014a\)](#).

A compensação ambiental é uma forma qualificada de indenização ([MACHADO, 2002](#)), quanto aos danos causados pela atividade para a coletividade, pela perda de espaços territoriais protegidos, e não afasta o dever de indenizar os prejuízos individuais suportados por particulares afetados diretamente pela criação de novo gravame singular à propriedade privada.

Apesar dos problemas acima se tratarem de impactos ambientais cuja solução jurídica pode ser obtida por meio da análise da legislação civil e ambiental, é interessante que o procedimento seja considerado em regulamentos administrativos ou termos de

referência para que o órgão ambiental, quando realize a avaliação de impacto ambiental, não os ignore e evite um decréscimo na qualidade ambiental.

2.4.9 Largura máxima da faixa marginal para proteção de ecossistemas ripários

Desde o Código Florestal de 1965 a legislação define as *larguras mínimas* para a faixa marginal de APP em função da largura dos cursos d'água, podendo o poder público estabelecer hipóteses nas quais se exigiria larguras adicionais quando necessário, cujos critérios nunca foram regulamentados.

As faixas marginais de preservação permanente ao longo dos rios constituem *ecótonos* na forma de corredores entre o ambiente fluvial e terrestre, cuja efetividade está relacionada ao cumprimento de suas funções ambientais essenciais (objetivos legais).

Conforme demonstrado na [subseção 2.4.2](#), no sentido longitudinal, a teoria do rio contínuo reconhece que todos os ecossistemas instalados nos diversos setores de um sistema fluvial estão de alguma forma interligados, desde a cabeceira até sua foz (VANNOTE et al., 1980), cf. [Figura 10](#). É uma teoria considerada *longitudinal* por não se dedicar com profundidade às interferências provenientes de ações externas às margens dos cursos d'água, em especial, na planície de inundação. Apesar de não possuir dimensão *lateral*, a teoria reconhece a importância da vegetação ripária para os ecossistemas fluviais, principalmente nos rios em setores de cabeceira e transição.

Analisando-se os rios na dimensão transversal, percebe-se que a efetividade ecossistêmica da faixa marginal de APP é função da diversidade de sua biota, que é sensível à frequência das perturbações que incidem sobre aquele espaço, o que permite fundamentar uma metodologia para definição de larguras variáveis a partir dos postulados da *teoria da perturbação* (CONNELL, 1978), segundo a qual espera-se maior diversidade ecológica em ambientes sujeitos a distúrbios intermediários, que permitem o desenvolvimento de ecossistemas complexos num estado não estático ou não uniforme.

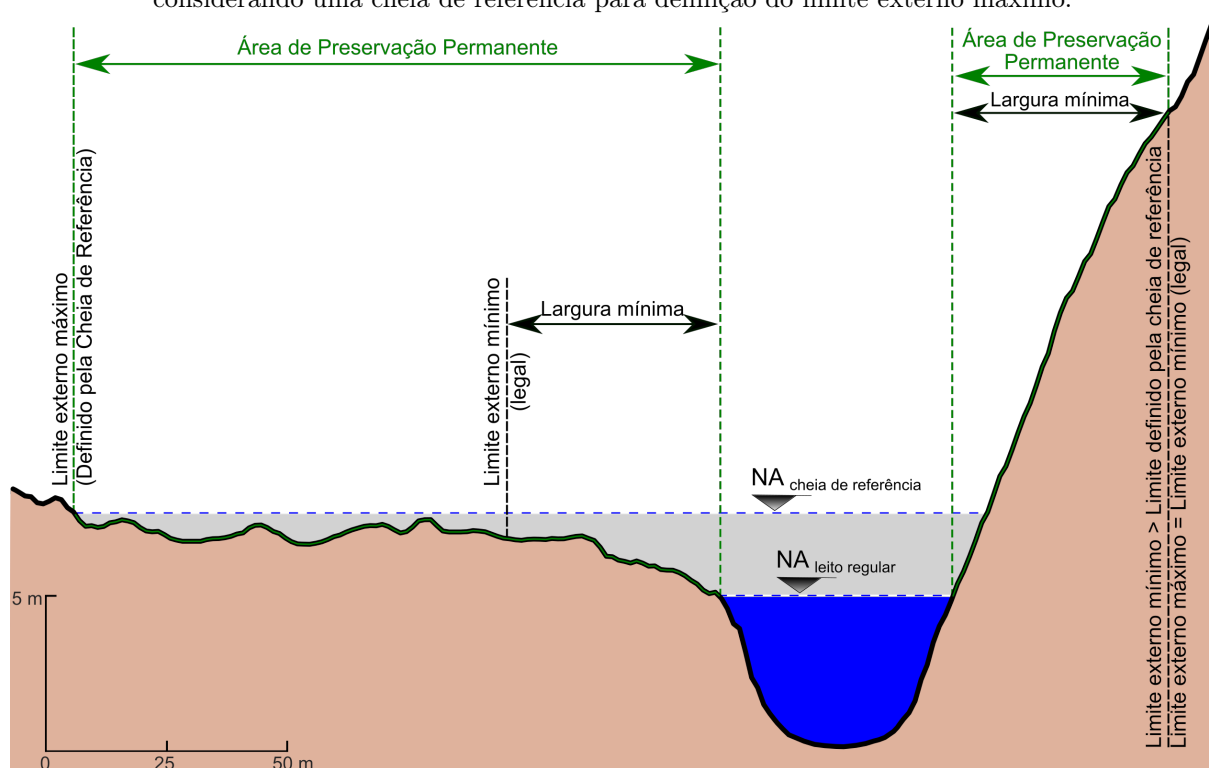
Então, não é interessante que toda a APP seja inundada em curtos intervalos de recorrência, pois neste cenário o ecossistema protegido é de baixa diversidade e, também, de baixa resiliência. Nestes casos, visando constituir um espaço territorial resiliente com diversidade maximizada, é necessário ampliar a largura da faixa marginal de proteção ao longo dos cursos d'água de forma a garantir que exista uma parcela do corredor ripário sujeito a inundações menos frequentes, que promoverá um entorno de maior resiliência para a APP.

A legislação e a literatura não informam qual seria a probabilidade ideal para análise do risco de inundação de ecossistemas ripários. O Grupo de Trabalho Interinstitucional Federal do governo dos Estados Unidos da América para Restauração de cursos d'água indica que o projeto deve considerar no longo prazo a probabilidade de excedência

de 1% para inundação do corredor ripário, i.e., um tempo de recorrência (TR) de 100 anos (FISRWG, 1988). Segundo Larentis et al. (2020), esse valor também é adotado para fins de planejamento de áreas de risco de inundação nos EUA, de forma que os autores o adotam para fins de zoneamento de planícies de inundação em áreas urbanas.

A partir dos resultados apresentados no Capítulo 6 quanto à probabilidade de perturbação das APP em rios brasileiros, uma metodologia que se sugere é a definição de um tempo de recorrência para definir o *limite externo máximo* da APP, de fora a garantir que sempre exista uma parcela do ecossistema ripário que não esteja sujeita a perturbações de alta frequência, cujo método é sintetizado na Figura 17.

Figura 17 – Exemplo hipotético da área de preservação permanente em faixa marginal de curso d'água considerando uma cheia de referência para definição do limite externo máximo.



Fonte: o autor.

Quanto à probabilidade de perturbação das APPs para os rios analisados, adotando-se o leito regular a partir da vazão de margens plenas (critério científico, equivalente a $Q_{1,58}$), observa-se que 29% das APPs nas margens dos rios brasileiros analisados são integralmente inundadas por cheias com TR inferior a 100 anos. Considerando-se o critério dominial para definição das APPs (média das cheias ordinárias, i.e., Q_{med}), estima-se que até 23% das faixas marginais de APP são integralmente inundadas com a mesma probabilidade de recorrência. Os resultados detalhados podem ser consultados na subseção 6.2.1.2, Figura 85 e Tabela 7.

A adoção da probabilidade de inundação integral em 1% (TR = 100 anos), em qualquer ano, para definição do limite externo máximo das APPs, quando os limites

mínimos legais não forem suficientes, possibilita garantir um ecossistema ripário sujeito a menor perturbação, principalmente naqueles cursos d'água com planícies de inundação adjacentes de baixa declividade e sujeitas a inundações frequentes. Observa-se que a proposta tem impacto regulatório reduzido, pois amplia os valores legais mínimos das APPs nas margens dos rios estudados, de forma variável, para somente 23% dos casos analisados, no cenário regulatório mais extremo (Q_{med}).

A escolha da probabilidade para cheia de referência é uma decisão de política pública, que deve procurar harmonizar o interesse público, vinculado à preservação ambiental, com os interesses privados, fundamentados no caráter absoluto do direito de propriedade. Inclusive, é elemento obrigatório nos Planos de Recursos Hídricos o estabelecimento de “propostas para a criação de áreas sujeitas a restrição de uso, com vistas à proteção dos recursos hídricos” (BRASIL, 1997, art. 7º, inciso X).

Cabe à ciência estudar os diversos cenários para suprir a sociedade e os tomadores de decisão com informações precisas quanto aos impactos para os diversos cenários imaginados.

2.5 ENTORNO DE RESERVATÓRIOS NATURAIS

2.5.1 Conceitos de lago, lagoa e laguna e a proteção uniforme do entorno

A legislação ambiental não define o conceito de lago e lagoa, pois o Código Florestal de 1965 protegia as áreas ao redor de lagos, lagoas e de todos os “reservatórios d'água naturais” (BRASIL, 1965, art. 2º, “b”), sendo desnecessário, na época, conceituar cada tipo de reservatório. Mas a Lei nº 12.651/2012 na redação do art. 4º, inciso II, manteve a proteção do “entorno dos lagos e lagoas naturais” (BRASIL, 2012b, art. 4º, II) com a supressão da expressão *reservatórios naturais*. A nova redação para a norma protetiva e a ausência de conceituação legal de lago e lagoa têm gerado conflitos quanto à proteção dos reservatórios naturais na zona costeira, em especial, para as lagoas.

Lago (*lake*) é um corpo hídrico de extensão significativa, com águas mais ou menos tranquilas, situado no interior continental e cercado de terra por todos os lados (SUGUIO, 1998; WMO, 2012). Geralmente, é alimentado por um ou mais rios afluentes e possui rio emissário, o qual evita seu transbordamento (GUERRA, 1993). Pode, ainda, ser *endorreico*, quando perde água somente pela evaporação, por não possuir fluxo de saída superficial ou subsuperficial (WMO, 2012). Lagoa (*pond*) consiste em uma acumulação de água de pequenas dimensões (WMO, 2012), rasa, de forma variada, mas tendendo a circular, preenchida com água doce, salobra ou salgada (GUERRA, 1993; SUGUIO, 1998). O tamanho do reservatório influencia nas suas características físicas e bióticas (SØNDERGAARD; JEPPESEN; JENSEN, 2005), sendo que o padrão de diversidade em reservatórios muda significativamente a partir de uma área de superfície hídrica de 2 ha,

que pode ser utilizada como um limite ecológico para distinguir lagoas e lagos (BIGGS et al., 2005; HAMERLÍK et al., 2013). Quanto ao regime hídrico, os lagos e lagoas podem ser perenes ou temporários, também denominados como efêmeros¹⁵ (GUERRA, 1993; SUGUIO, 1998; WMO, 2012).

A legislação prevê APPs no *entorno dos lagos e lagoas naturais*, de forma que não é relevante discutir uma diferenciação precisa entre as duas feições, sendo suficientes as observações da literatura. Uma fonte de divergências quanto à proteção ambiental são as lagoas (*lagoon*), corpos hídricos situados em planícies costeiras, formado por águas rasas e calmas (ambiente lântico) e que mantém uma conexão restrita com o mar por meio de uma abertura rasa, na forma de um braço de maré ou um obstáculo (GUERRA, 1993; SUGUIO, 1998; WMO, 2012). Ao longo da costa brasileira a maioria das lagoas são conhecidas pelo topônimo de lagoa (SUGUIO, 1998), tanto que Guerra (1993) considera o termo *lagoa litorânea* como sinônimo de lagoa. Resta analisar se os termos lagoa, lago e lagoa são sinônimos para fins de proteção jurídica do entorno.

A Constituição Brasileira considera como de propriedade da União os *lagos* em terrenos de seu domínio, ou que banhem mais de um Estado, sirvam de limites com outros países, ou se estendam a território estrangeiro ou dele provenham (art. 20, III, CRFB/1988). No plano infraconstitucional, a Lei sobre bens imóveis da União (Decreto-Lei nº 9.760/1946) estabelece terrenos de marinha nas margens das “lagoas, até onde se faça sentir a influência das marés” (BRASIL, 1946b, art. 2º, “a”) As referidas *lagoas com influência de maré*, no âmbito da geomorfologia, são definidas como lagoas.

O Código de Águas, quando classifica os bens públicos do domínio hídrico, estabelece que “são águas públicas de uso comum: [...] *lagos e lagoas* navegáveis ou flutuáveis” (BRASIL, 1934b, art. 2º, “b”, grifo nosso). E o Decreto nº 5.300/2004, quando estabelece os limites da orla marítima, trata no mesmo dispositivo as *lagoas e lagoas costeiras* (cf. BRASIL, 2004, art. 23, § 1º, II).

Observa-se que o ordenamento jurídico brasileiro utiliza as expressões lago, lagoa e lagoa de forma indiscriminada em relação aos conceitos da geologia, permitindo afirmar que, para fins de aplicação da legislação ambiental de proteção, os referidos corpos hídricos devem ser tratados como sinônimos.

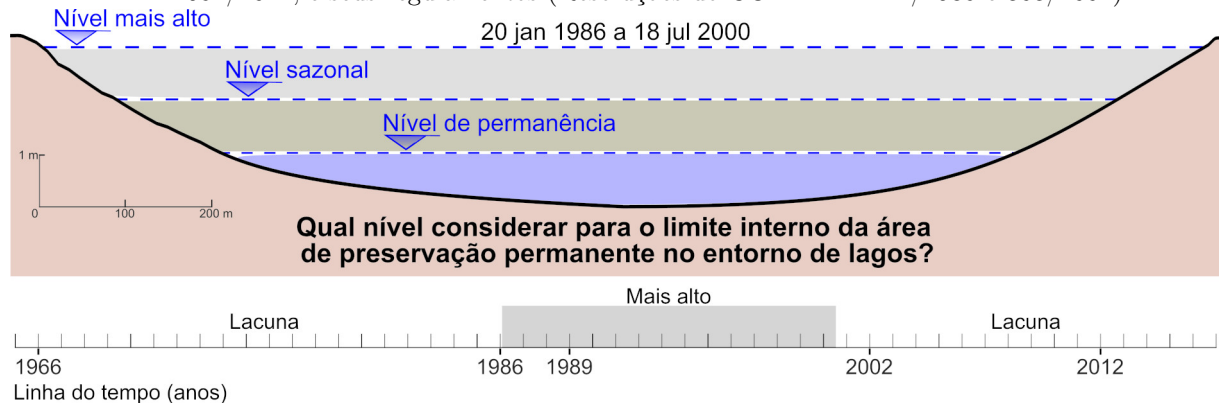
2.5.2 Nível a partir do qual se inicia a APP no entorno dos reservatórios naturais

Conforme já abordado, a legislação atual estabelece a largura mínima da faixa de proteção no entorno de lagos e lagoas, contudo não define o critério a ser utilizado

¹⁵ O efêmero aqui é no sentido geológico, que é sinônimo de intermitente. E está se tratando de ambientes lânticos. Não se trata do conceito de efemeridade empregado pela legislação para cursos d’água efêmeros (art. 2º, XIV, do Decreto nº 7.830/2012), onde a definição abrange somente feições lânticas e com vazão decorrente unicamente do escoamento superficial e da precipitação direta.

para identificação precisa da linha de borda a ser considerada como início da APP. Assim, faz-se necessária sua regulamentação, pois os reservatórios naturais possuem variações de nível em função de condições hidrológicas (Figura 18).

Figura 18 – Evolução do nível de referência que define o início da área de preservação permanente no entorno de reservatórios naturais e suas lacunas nas Leis n^{os} 4.771/1965, 7.803/1989, e 12.651/2012, e seus regulamentos (Resoluções do CONAMA n^o 4/1985 e 303/2002).



Fonte: Souza, Chaffe e Pinto (2020).

Os reservatórios naturais e artificiais apresentam variações de nível no espaço e no tempo (FASSONI-ANDRADE; PAIVA; FLEISCHMANN, 2020), de forma que as considerações realizadas anteriormente para os ecossistemas ripários nos rios, quanto à necessidade de correlacioná-las com os impactos decorrentes das frequências das perturbações aos quais são submetidos, aplicam-se ao entorno de lagos e lagoas. As planícies adjacentes aos reservatórios naturais costumam possuir topografia de baixa declividade, de forma que pequenas variações no nível da água podem ocasionar inundação de uma área considerável, cuja diversidade ecológica e resiliência são função da frequência dos eventos de cheia.

O ideal é que exista convergência entre os critérios que definem o nível de referência nos lagos e aqueles estabelecidos para os rios, de forma a evitar-se transições descontínuas. Então, para fins de delimitação da APP ao redor de reservatórios naturais, o mais coerente é adotar o nível da cheia anual mais provável ou a cheia anual média, em analogia ao que foi proposto para os rios.

2.5.3 Estabelecimento da largura máxima da área de preservação permanente para proteção do entorno de corpos hídricos lacustres

As considerações realizadas anteriormente para os ecossistemas ripários aos rios, quanto à necessidade de correlacioná-las com os impactos decorrentes das frequências das perturbações aos quais são submetidos (cf. subseção 2.4.9), aplicam-se por analogia ao entorno de lagos e lagoas.

Então, pode-se buscar fundamentar uma metodologia para definição das larguras

do entorno de proteção de lagos e lagoas a partir dos postulados da *teoria da perturbação intermediária* (CONNELL, 1978).

A exemplo do que foi proposto para a faixa marginal de proteção aos rios, visando constituir um espaço territorial resiliente com diversidade maximizada no entorno de lagos e lagoas, é necessário ampliar a largura da faixa marginal de proteção, de forma a garantir que exista uma parcela do ecossistema ripário sujeito a inundações menos frequentes, que promoverá um entorno de maior resiliência para a APP.

Neste sentido, para fins de regulamentação futura, sugere-se a adoção da probabilidade de excedência de 1% (TR = 100 anos) como referência para definição do limite externo máximo das APPs no entorno de reservatórios naturais, em analogia ao que foi proposto para as faixas marginais aos cursos d'água.

2.5.4 Transição das faixas marginais em função da alteração do zoneamento das margens entre rural e urbano

A área de preservação permanente no entorno de reservatório natural tem sua largura definida em função das dimensões do corpo hídrico e do zoneamento das margens, que pode ser urbano (30 m) ou rural (100 m ou 50 m, se a superfície hídrica for menor ou igual a 20 ha).

Diferente das margens de cursos d'água, cuja oscilação da largura da seção transversal pode gerar o efeito de *degraus* sucessivos na faixa marginal de preservação permanente (cf. Figuras 2 e 14), para os reservatórios tal problema é minimizado pelo fato de a largura da APP variar em função do zoneamento (urbano ou rural). Neste caso, a transição da APP ao redor do reservatório acompanhará os limites do zoneamento da área urbana definida na legislação municipal. A Figura 3 demonstra com precisão a transição da APP entre áreas urbanas e rurais nos reservatórios naturais.

2.5.5 Ilhas lacustres: cálculo da largura da APP e incidência insular

As considerações para ilhas lacustres são análogas aquelas realizadas para ilhas fluviais (cf. subseção 2.4.6), com algumas diferenças. Enquanto nos rios a presença de ilhas pode interferir no cálculo da largura do leito regular e, portanto, nas dimensões da faixa marginal de preservação, nos lagos as porções de terra que permanecem emersas quando o reservatório se encontra no nível de referência podem influenciar no cálculo da área da superfície do corpo hídrico, principalmente quando possuir área próxima a 20 ha, valor de transição para definição da largura do entorno a ser preservado (50 m ou 100 m em área rural).

Considerando que as ilhas lacustres podem sofrer modificações em ambientes muito dinâmicos, a solução mais estável é a adoção de toda a superfície circundada pelas margens do lago para fins de dimensionamento da área de preservação permanente. Outra

lacuna a ser preenchida é quanto à presença de APP no interior das ilhas lacustres em reservatórios naturais.

Apesar de a legislação ambiental ser silente quanto ao tema, para os reservatórios artificiais o CONAMA foi expresso ao definir que a APP também incide sobre as ilhas (BRASIL, 2002b, art. 2º, II), o que permite seu emprego às formações naturais por analogia.

2.5.6 Área de preservação permanente em estuários

Estuários consistem na parte larga de um curso d'água próximo a sua desembocadura junto ao mar, um lago ou uma salina (WMO, 2012). São corpos hídricos de circulação mais ou menos restrita e podem constituir uma rede de canais que drenam zonas pantanosas costeiras, a exemplo do estuário Santista no Estado de São Paulo (SUGUIO, 1998) e o complexo estuarino-lagunar no Sul do Estado de Santa Catarina.

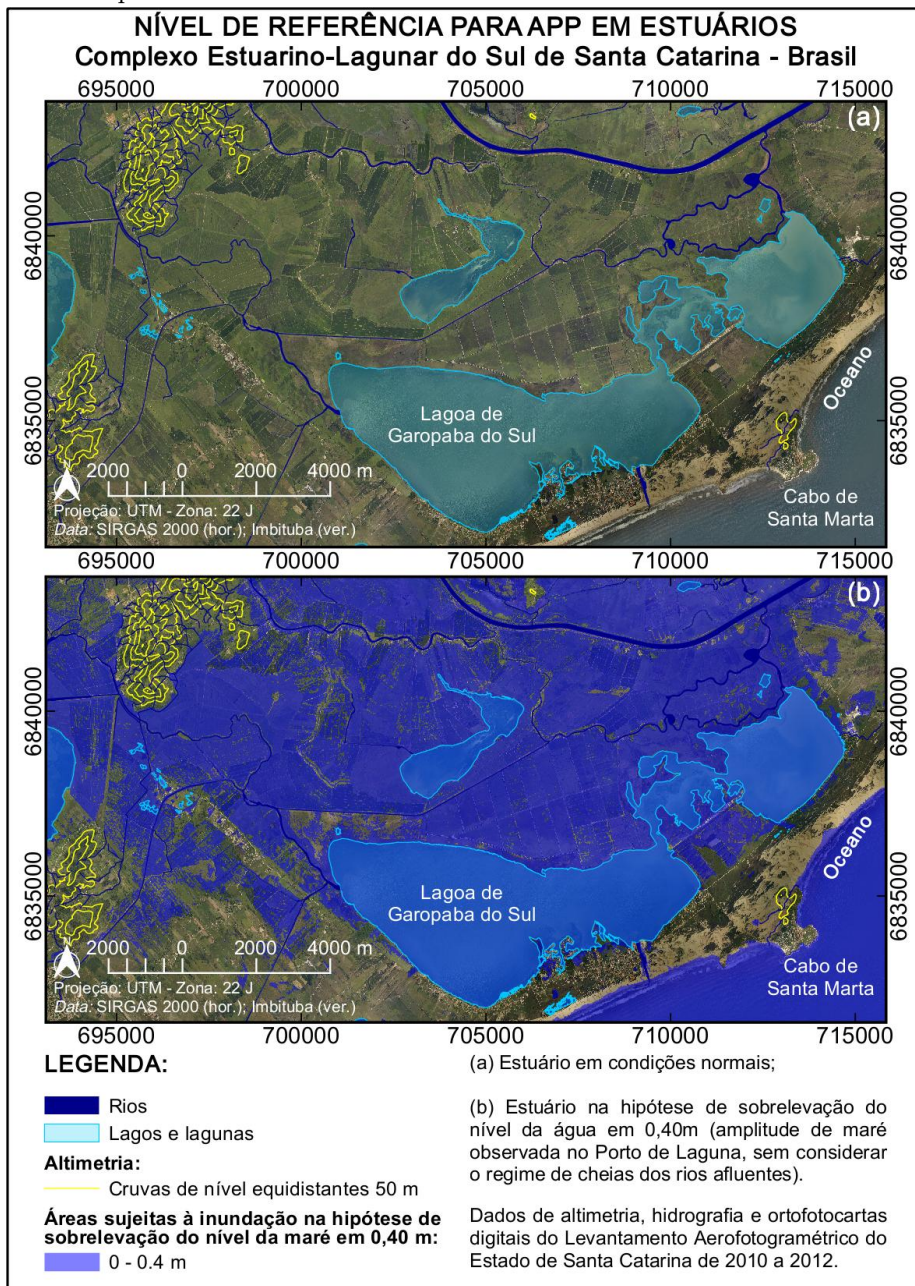
Nos estuários os níveis dos corpos hídricos possuem grande variabilidade em função da maré (astronômica e meteorológica) e da contribuição da bacia hidrográfica dos rios afluentes. Pequenas variações de nível podem fazer com que a lâmina d'água unifique canais de maré (SUGUIO, 1998), lagunas e partes consideráveis da planície de maré (Figura 19).

Dependendo do nível de referência da superfície hídrica a ser considerado para definição das APPs nas margens dos cursos d'água (braços de maré, canais fluviais e de maré) e no entorno das lagunas, pode-se encontrar uma grande e única superfície hídrica, dotada de algumas ilhas, onde é difícil definir quais trechos ou setores da área inundada podem ser tratados como cursos d'água ou reservatórios naturais.

Aparentemente, os estuários mereciam ser tratados como uma categoria de APP a ser regulamentada, devido às suas peculiaridades. Contudo, considerando as categorias atualmente vigentes, uma solução a ser adotada é verificar o comportamento do corpo hídrico estuarino quando se encontrar no nível de referência, separando os locais segundo seu fluxo hídrico em trechos lóticos e lênticos.

Aos ambientes com comportamento lótico adota-se a APP aplicável aos cursos d'água e, naqueles preponderantemente lênticos, considera-se toda a superfície como um reservatório natural para definição da APP no seu entorno. Na última hipótese, quando o nível da água estiver abaixo da cheia anual de referência, todas as áreas emersas serão consideradas como margens internas dos corpos hídricos estuarinos e, conseqüentemente, bens de uso comum do povo (cf. Figura 11).

Figura 19 – Exemplo de estuário formado por um complexo de rios, lagos e lagoas. (a) Condição normal do estuário, onde se consegue identificar os corpos hídricos individualmente. (b) Cenário de sobrelevação do nível do estuário em 40 cm, onde toda a planície de maré apresenta-se como um só corpo hídrico.



Fonte: o autor com dados de SC (2014a,c,b).

2.6 ENCOSTAS

A proteção dos recursos hídricos conferida pela legislação florestal não se restringe somente aos corpos d'água, alcançando formas do relevo como as encostas, cuja estabilidade é importante para o regime hídrico e a segurança nas bacias hidrográficas.

2.6.1 Histórico, conceito e lacunas

Segundo [Guerra \(1993, p. 148\)](#), *encosta* é o “declive nos flancos de um morro, de uma colina ou de uma serra”. A proteção das encostas tem nítida função de segurança quanto à estabilidade física (evitar a ocupação de áreas suscetíveis ao deslizamento), e também evita impactos ao meio biótico. Em função da declividade do terreno, nas encostas o escoamento superficial e subsuperficial tem maior velocidade e, portanto, maior potencial erosivo, cujos efeitos não se limitam aos aspectos físicos, pois o carreamento do solo para os corpos hídricos gera efeitos deletérios à biota (e.g., aumento de turbidez e consequente redução da atividade primária fotossintética, alterações na concentração de oxigênio dissolvido, entre outros impactos).

Historicamente, estes espaços territoriais protegidos remontam ao Código Florestal de 1934, o qual definia como florestas protetoras aquelas que tivessem a finalidade de “evitar a erosão das terras pela acção dos agentes naturais” ([BRASIL, 1934a](#), art. 4º, “b”). Contudo, não foram definidos parâmetros para identificação e efetivação destas florestas sujeitas à conservação perene, o que só veio a acontecer com o Código de 1965.

A Lei nº 4.771/1965, desde a sua redação original, considerou como área de preservação permanente (APP) as “encostas ou partes destas, com declividade superior a 45°, equivalente a 100% na linha de maior declive” e como área de uso restrito (AUR), imunes ao corte raso, aquelas com inclinação entre 25° e 45° ([BRASIL, 1965](#), arts. 2º, alínea “e”, e 10), cujas limitações administrativas persistem inalteradas até os dias atuais, reproduzidas nos arts. 4º, inciso V, e 11, do atual Código Florestal ([BRASIL, 2012b](#)).

Na literatura a presença de uma encosta está associada a ocorrência de elevações do relevo¹⁶. Contudo, o Código Florestal de 2012 não estabelece conceitos legais para morros, montes, montanhas e serras, limitando-se, tão somente, a estabelecer os critérios físicos para incidência de APP no topo dessas elevações (altura e declividade média mínimas). Então, a ocorrência de APP em encosta com declividade superior a 45° é independente da presença de APP no topo da elevação.

A legislação também protege partes das encostas, sem especificar critérios quanto aos fragmentos mínimos a serem considerados para fins de proteção. Por exemplo, tomando-se como paradigma um modelo digital de elevação com resolução de 1 m², a simples face abrupta de um pequeno afloramento rochoso poderia ser considerada como uma área

¹⁶ Sobre morros, montes, montanhas e serras consultar [subseção 2.7, p. 102](#) et seq.

de preservação permanente de poucos metros quadrados, o que, intuitivamente, não é razoável.

Para delimitação precisa das áreas de preservação permanente em encostas algumas lacunas técnicas necessitam ser regulamentadas, em especial: a resolução adequada para definição de APPs por declividade e a área mínima a ser considerada quando presentes fragmentos descontínuos.

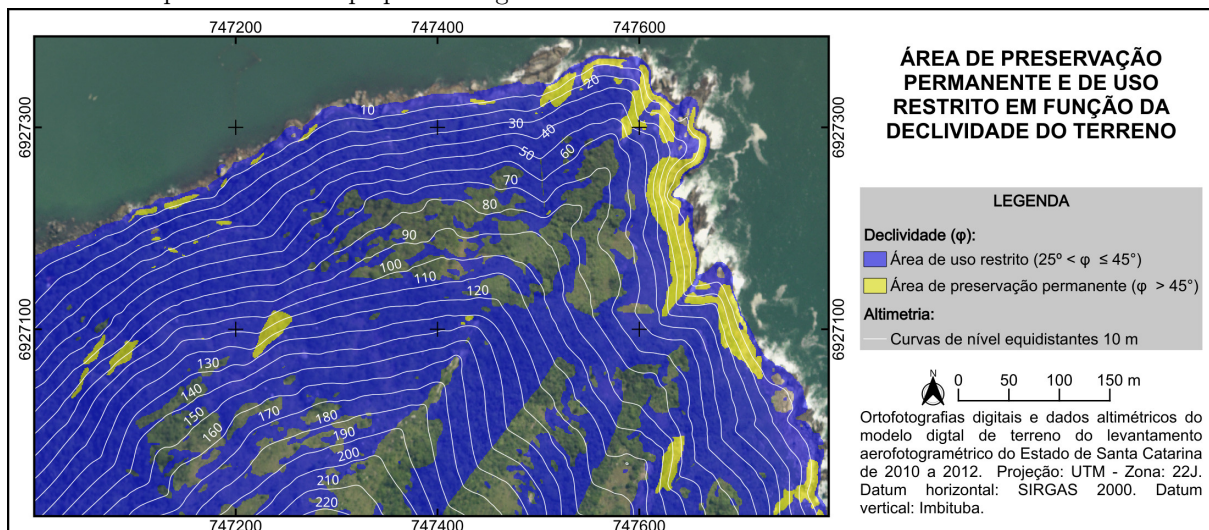
É importante ressaltar que a definição destas lacunas auxiliará na resolução das áreas de preservação permanente nos topos de elevações, cujos critérios atuais exigem o cálculo da declividade média da elevação, tornando necessário definir a resolução adequada para análise estatística da superfície.

2.6.2 Resolução adequada para definição de áreas protegidas por declividade

Normalmente, os estudos envolvendo os efeitos da resolução de modelos digitais de elevação para definição de áreas de preservação permanente têm por objeto a delimitação de topos de morro, cujo cálculo da declividade média da elevação enfrenta parte dos problemas encontrados para identificação de encostas protegidas (cf. [subseção 2.7.4](#)).

Especificamente para a análise de declividade de superfícies, um problema recorrente é o aparecimento de pequenos fragmentos ([Figura 20](#)), muitas vezes do tamanho de um termo da matriz (pixel), ocasionados pela rugosidade dos modelos digitais de elevação, ou seja, pelo ruído.

Figura 20 – Espaços territoriais especialmente protegidos em função da declividade calculados a partir de modelo digital de terreno altamente discretizado (resolução de 1 metro). Observa-se o aparecimento de pequenos fragmentos.



Fonte: o autor com dados de [SC \(2014a,c\)](#).

Durante o cálculo das áreas de preservação permanente a partir de modelos digitais de pequena resolução (altamente discretizados) o ruído devido à rugosidade pode influenciar significativamente os resultados, com tendência a superestimá-los. Por outro lado, quando

se analisa uma encosta para fins de proteção, é intuitivo que se deseja proteger áreas significativas. Pequenas parcelas com alguns metros quadrados necessitam ser filtradas dos resultados a partir de algum método que elimine os ruídos e, conseqüentemente, suavize a rugosidade, sem perder as características naturais do terreno.

Visando identificar qual a resolução do modelo digital de terreno é mais adequada para o cálculo das áreas protegidas pelo Código Florestal de 2012 em função da declividade, realizou-se o cálculo desses espaços tendo como estudo de caso a Ilha de Santa Catarina.

A Ilha de Santa Catarina possui cerca de 42.119 ha, com elevações que chegam até 521,94 m acima do nível médio dos mares (SC, 2014c), e para sua análise estão disponíveis os modelos digitais de elevação globais como o SRTM V2 (NASA JPL, 2013) e ASTER GDEM V3 (NASA/METI/AIST/JAPAN SPACESYSTEMS, 2019), ambos com resolução de 1 arcseg ($\approx 28,3$ m), bem como o modelo digital de terreno do levantamento aerofotogramétrico do Estado de Santa Catarina – MDT SC, com resolução horizontal de 1 m e precisão vertical de 60 cm (SC, 2014c).

Para fins de análise da quantificação de áreas protegidas e de sua fragmentação em diferentes resoluções, o MDT SC foi reamostrado pelo método do vizinho mais próximo para as resoluções de 3 m, 5 m, 10 m, 15 m, 25 m e 30 m. Junto com o SRTM V2 e ASTER GDEM V3 foram gerados os modelos de declividade (ϕ), o qual foi classificado em três categorias: área sem restrição ($\phi \leq 25^\circ$), área de uso restrito – AUR ($25^\circ < \phi \leq 45^\circ$) e área de preservação permanente – APP ($\phi > 45^\circ$). Considera-se como área total protegida toda aquela incluída em AUR e APP, i.e., $\phi > 25^\circ$.

Segundo os resultados, sintetizados na Tabela 1, a medida que a resolução espacial é reduzida (mais discretizada), maior é a área total protegida identificada em função da declividade, com destaque para a APP, a qual, para o mesmo material (MDT SC), entre o modelo com resolução de 30 m e de 1 m teve um acréscimo de 538%. Diferenças significativas também são encontradas quando se compara o MDT SC com resolução de 1 m com o SRTM V2 (391%) e ASTER GDEM V3 (228%), ambos com aproximadamente 28,3 m de resolução. Isso se deve ao fato que as áreas com declividades superiores a 45° serem menos frequentes e mais fragmentáveis, de forma que são muito sensíveis à resolução.

Para as AUR, as diferenças encontradas são menores, porém significativas. Por possuírem declividades menos acentuadas ($25^\circ < \phi \leq 45^\circ$), são mais frequentes e formam maiores áreas contínuas, mas, ainda assim, são fortemente influenciadas pela resolução do modelo de elevação. Comparando-se o MDT SC com resoluções de 1 m e 30 m, observa-se um acréscimo de 44% na AUR em favor do modelo mais discreto. Valores significativos são encontrados ao comparar-se o MDT SC com 1 m de resolução com o SRTM V2 (59%) e ASTER GDEM V3 (30%), ambos com aproximadamente 28,3 m de resolução.

A questão a ser resolvida é: qual resolução espacial permite identificar com precisão áreas protegidas em função da declividade, sem ser necessária uma discretização excessiva do relevo?

Tabela 1 – Variação da área[†] total protegida por declividade (áreas de preservação permanente e de uso restrito) e efeito de fragmentação para diversos modelos digitais de elevação aplicados ao território da Ilha de Santa Catarina.

MATERIAL E RESOLUÇÃO*	AUR	APP	ÁREA TOTAL PROTEGIDA	FRAGMENTOS ATÉ 0,10 ha		
				NÚMERO	ÁREA	FRAÇÃO
MDT SC (1 m)	5018,27	64,38	5082,65	32772	277,08	5,45%
MDT SC (3 m)	4947,01	59,01	5006,01	17813	240,44	4,80%
MDT SC (5 m)	4853,15	52,02	4905,17	9710	199,75	4,07%
MDT SC (10 m)	4578,07	35,73	4613,80	4118	130,24	2,82%
MDT SC (15 m)	4285,84	24,57	4310,41	2291	94,66	2,20%
MDT SC (20 m)	4004,44	17,44	4021,88	1179	63,33	1,57%
MDT SC (25 m)	3741,94	12,62	3754,56	654	40,86	1,09%
MDT SC (30 m)	3495,89	10,08	3505,97	484	43,54	1,24%
SRTM V2 (1 arcseg ≈ 28,3 m)	3151,79	13,12	3164,90	486	38,87	1,23%
ASTER GDEM V3 (1 arcseg ≈ 28,3 m)	3851,79	19,60	3871,39	819	65,51	1,69%

Notas:

[†]Valores de área em hectares;

*MDT SC é o modelo digital de terreno do levantamento aerofotogramétrico do Estado de Santa Catarina (SC, 2014c), com resolução original de 1 m, reamostrado pelo método do vizinho mais próximo para as resoluções de 3 m, 5 m, 10 m, 15 m, 25 m e 30 m; ASTER GDEM V3 é a 3ª versão do modelo digital de elevação global disponibilizado por NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems (2019), com resolução espacial de 1 arcseg; SRTM V2 é o modelo digital de elevação gerado pela Missão Topográfica de Radar Embarcado (NASA JPL, 2013), na 2ª versão, com resolução de 1 arcseg, que corresponde a aproximadamente 28,3 m na área de estudo, quando transformado para projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), datum SIRGAS 2000 e fuso 22J.

Abreviaturas:

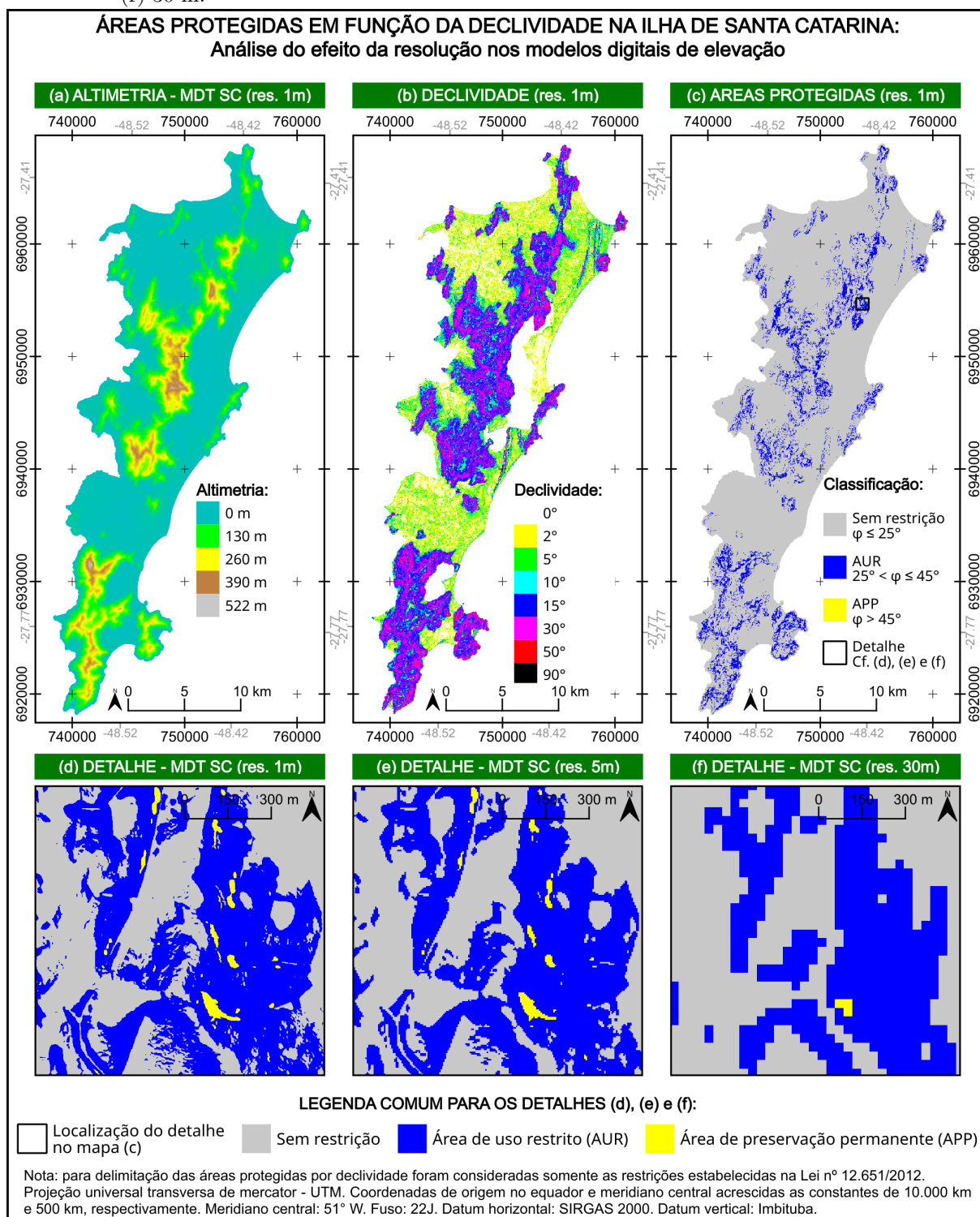
AUR = área de uso restrito, definida pelas parcelas da superfície com declividades de 25° até 45°; APP = área de preservação permanente, definida pelas parcelas da superfície com declividades acima de 45°; A Área Total Protegida em função da declividade é a soma das AUR e APP.

Fonte: o autor, a partir dos dados de NASA JPL (2013), SC (2014c) e NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems (2019).

A partir da análise do número de fragmentos menores que 1.000 m² (eq. 0,10 ha) percebe-se que no modelo com resolução de 5 m há 9710 fragmentos que correspondem a 4,07% do valor de todas as áreas protegidas. Ao aumentar o nível de discretização para 1 m de resolução, o número de fragmentos aumenta para 32772 e juntos equivalem a 5,45% da área total protegida.

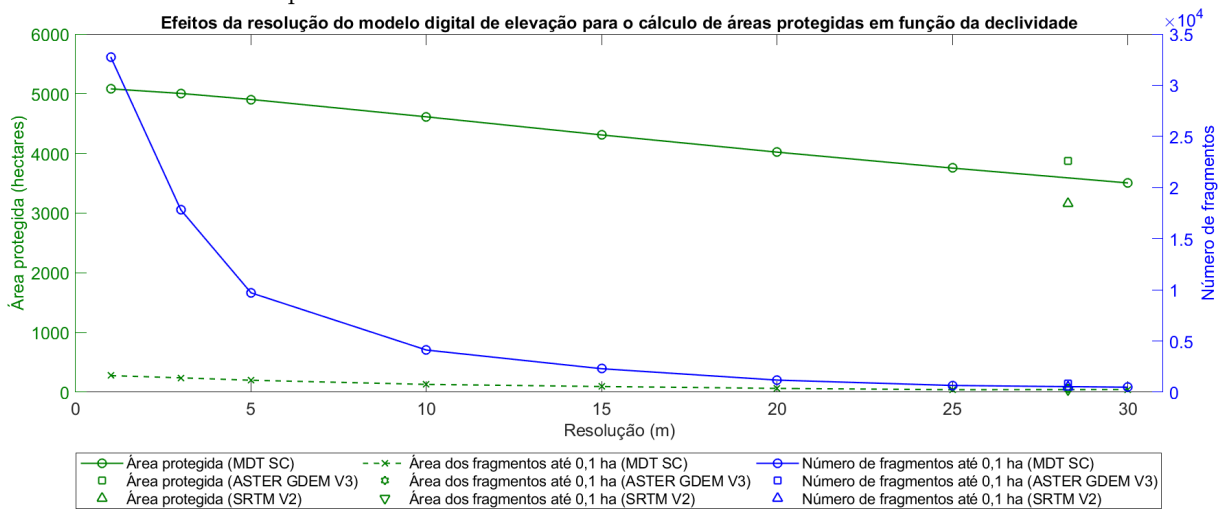
Então, para resoluções inferiores a 5 m o número de fragmentos aumenta consideravelmente (Figura 21), sem que isso implique ganho significativo de área protegida (Figura 22), de forma que a resolução de 5 m pode ser adotada como padrão para análises técnicas envolvendo áreas protegidas em função da declividade.

Figura 21 – Análise de áreas protegidas por declividade para a Ilha de Santa Catarina. (a) Mapa de altimetria a partir de modelo digital de terreno com resolução de 1 m (SC, 2014c). (b) Mapa de declividades. (c) Classificação das áreas protegidas de acordo com os arts. 4º, inciso V, e 11, da Lei nº 12.651/2012, com amostra detalhada para as resoluções de (d) 1 m, (e) 5 m e (f) 30 m.



Fonte: o autor, a partir dos dados de SC (2014c).

Figura 22 – Efeitos da resolução do modelo digital de terreno para o cálculo de áreas protegidas por declividade para a Ilha de Santa Catarina.



Fonte: o autor, a partir dos dados de [NASA JPL \(2013\)](#), [SC \(2014c\)](#) e [NASA/METI/AIST/Japan SpaceSystems \(2019\)](#).

2.7 TOPO DE MORRO, MONTES, MONTANHAS E SERRAS

Morros, montes, montanhas e serras são elevações naturais do terreno que têm importante participação no ciclo hidrológico. São nos terrenos mais elevados que estão situadas as zonas de cabeceiras dos rios e as áreas de recarga do aquífero freático, de forma que a proteção dos topos de elevações tem nítida correlação com a qualidade ambiental dos recursos hídricos.

Uma situação de topo de elevação do terreno desprovida de cobertura vegetal e com menor capacidade de retenção de água no solo resulta em escoamento superficial da maior parte da água proveniente de precipitações pluviométricas, acentuando os processos erosivos nas encostas e formando cursos d'água efêmeros e intermitentes com maior pico de vazão e capacidade erosiva ([SHEN; ZHANG et al., 2017](#); [ZHAO et al., 2019](#)).

Por outro lado, uma situação de topo de elevação do terreno coberta por vegetação possui maior capacidade de retenção de água no solo, o que resulta em menor escoamento superficial, reduzindo a ocorrência de processos erosivos e possibilita maior perenidade às nascentes e cursos d'água, bem como menor variação de suas vazões.

Há outros aspectos físicos que exigem especial atenção para os terrenos mais elevados de bacias hidrográficas, principalmente quanto à maior tendência de instabilidade estrutural no ápice de encostas.

Quanto aos aspectos bióticos, a proteção das zonas de cabeceiras dos rios é necessária para garantir o fornecimento de matéria orgânica para os processos ecológicos fluviais (cf. [HUET, 1954](#); [VANNOTE et al., 1980](#); [BOUWMAN et al., 2013](#)). Qualquer situação de topo de elevação do terreno que possua nascentes, olhos d'água e cursos d'água em suas encostas deve ter sua cobertura vegetal preservada, pois isso assegura

a manutenção dos recursos hídricos existentes nas cotas mais baixas, o que é um dos principais objetivos da existência dessa modalidade de APP.

2.7.1 Critérios definidores da APP em topo de elevações

Na literatura, morros e montes são denominações comuns utilizadas para descrever elevações que surgem na paisagem de forma isolada, divergindo em função da altura, onde os morros têm alturas entre 100 e 200 metros e os montes apresentam elevações maiores (GUERRA, 1993). Por outro lado, as montanhas são grandes elevações (altura superior a 300 metros) e são constituídas por um agrupamento de morros (GUERRA, 1993), enquanto que o termo serra é empregado para descrever paisagens de elevações com terrenos acidentados com fortes desníveis a partir do topo na forma de escarpas. “*Nem toda serra corresponde a um divisor de águas, e nem todo divisor de águas é uma serra*” (GUERRA, 1993, p. 391, grifo nosso). Conforme abordado na subseção 2.2, a legislação ambiental nem sempre manteve correlação entre os conceitos legais e científicos para aquelas elevações.

As APPs nos topos de elevações foram instituídas pela Lei nº 4.771/1965, sem eficácia imediata pela ausência de regulamentação dos critérios especiais definidores daqueles espaços protegidos, o que somente veio a ocorrer com a publicação da Resolução do CONAMA nº 4/1995, já sob a forma de reservas ecológicas. Posteriormente, os mesmos critérios foram reproduzidos pela Resolução do CONAMA nº 303/2002, permanecendo eficazes até a publicação da Lei nº 12.651/2012, que alterou significativamente as condições para presença de APP em topo de elevações.

Para fins de análises espaçotemporais, o **Quadro 5** sintetiza os requisitos para uma elevação possuir áreas de preservação permanente no seu *terço superior*, considerando os dois regimes jurídicos que se sucederam após 1986 (publicação da Resolução do CONAMA nº 4/1985).

Os primeiros retrocessos observados na atual legislação foram as modificações nos critérios de altura e declividade para incidência de APP no topo de elevações. Na regra anterior, a altura da elevação deveria ser superior a 50 m e, para elevações com altura entre 50 m e 300 m, a encosta deveria ter mais de 30% ($\approx 16,7^\circ$) na *linha de maior declividade*, enquanto que, atualmente, o Código Florestal de 2012 exige 100 m de altura mínima e *declividade média* superior a 25° ($\approx 46,6\%$) para qualquer elevação (**Figura 23**).

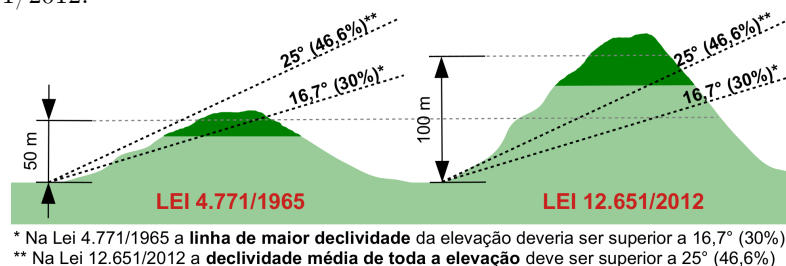
Os efeitos dos novos requisitos de altura e declividade para definição da APP no topo de elevações para um mesmo espaço geográfico podem ser observados na **Figura 24**, que reproduz parcialmente os resultados apresentados por Soares-Filho et al. (2014).

Quadro 5 – Critérios para definição de área de preservação permanente (APP) em topos de morro, montanhas, montes e serras na Lei nº 12.651/2012 e na legislação anterior.

REQUISITOS E CRITÉRIOS PARA APP	LEI Nº 4.771/1965 e RESOLUÇÕES DO CONAMA 4/1985 e 303/2002	LEI Nº 12.651/2012
Conceitos de morro, montanha, monte e serras	Estabelece conceitos para morro e montanhas.	Não estabelece conceitos legais, mas procura definir os requisitos para incidência de APP nas elevações, independente da nomenclatura adotada.
Altura mínima (h)	$h \geq 50$ m	$h \geq 100$ m
Declividade (ϕ)	$\phi_{max} > 30\%$ ($\approx 16,7^\circ$) na linha de maior declividade, para elevações até 300 m de altura. Não há condição de declividade para elevações com altura superior a 300 m.	$\bar{\phi} > 25^\circ$ ($\approx 46,6\%$) de declividade média de toda a elevação. Aplicável a qualquer elevação independente da altura.
Espaço protegido	Área delimitada a partir da curva de nível correspondente a 2/3 (dois terços) da altura mínima da elevação em relação à base.	Área delimitada a partir da curva de nível correspondente a 2/3 (dois terços) da altura mínima da elevação em relação à base.
Base da elevação	Plano horizontal definido por planície ou superfície de lençol d'água adjacente ou, nos relevos ondulados, pela <i>cota da depressão mais baixa ao seu redor (base hidrológica)</i> .	Plano horizontal determinado por planície ou espelho d'água adjacente ou, nos relevos ondulados, pela <i>cota do ponto de sela mais próximo da elevação</i> .
Base da elevação em planícies	O critério para definir a cota da base em planícies é uma lacuna técnica e normativa.	O critério para definir a cota da base em planícies é uma lacuna técnica e normativa.
Conceito de relevo ondulado	Lacuna técnica e normativa.	Estabelece conceito, mas falta detalhamento para fins de classificação do relevo em função da declividade.
Linha de cumeada	Estabelece conceito e proteção legal especial.	Não recepcionada. Conflita com a nova metodologia que define a base para cada elevação no ponto de sela.
Conjunção de elevações	Quando existir duas ou mais elevações, cuja distância dos cumes seja menor que 500 m, a APP é estabelecida considerando a cota do menor cume.	Não recepcionada. Conflita com a nova metodologia que define a base para cada elevação no ponto de sela.

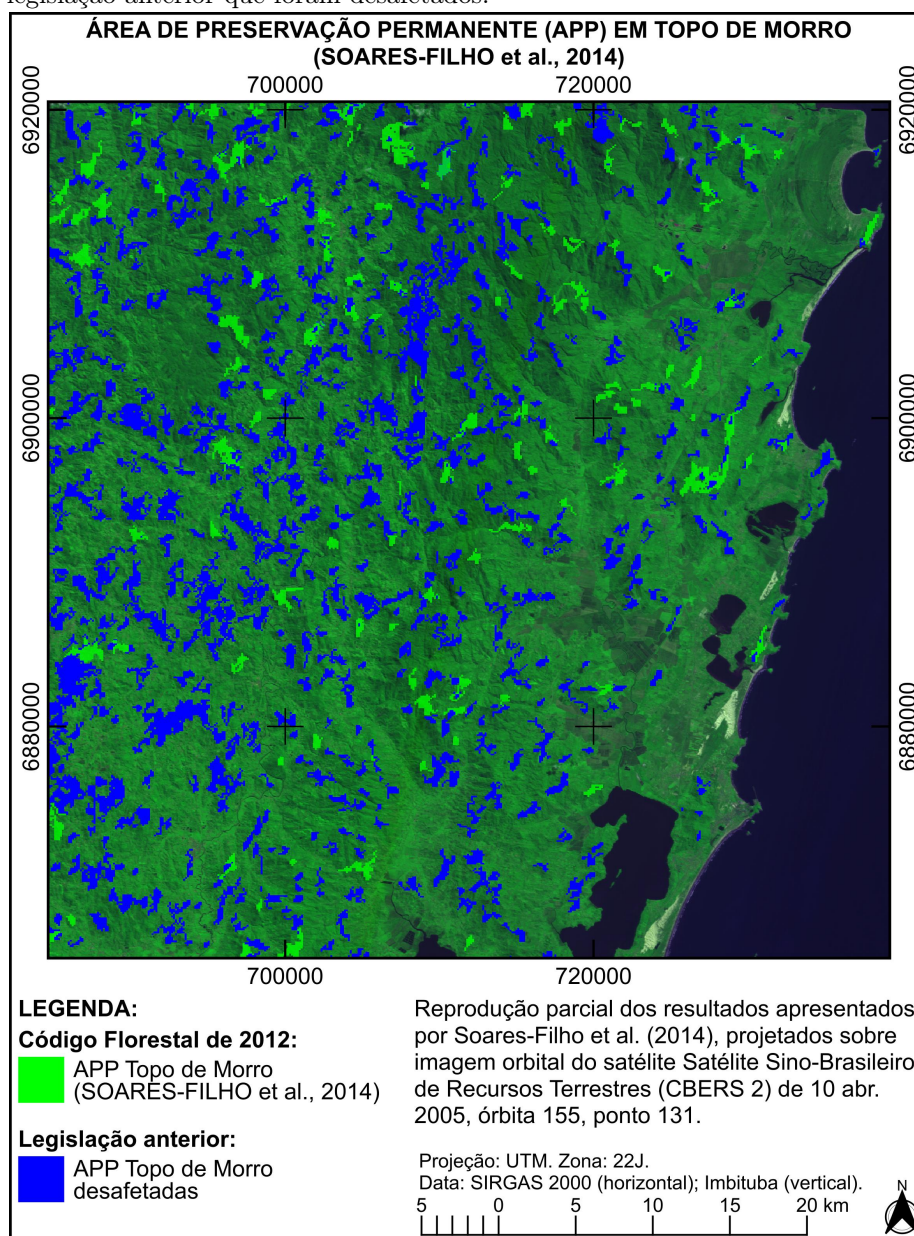
Fonte: organizado pelo autor a partir das definições estabelecidas por Brasil (1965, 2002c, 2012b).

Figura 23 – Comparação entre os critérios para incidência de área de preservação permanente em elevações segundo a Lei nº 4.771/1965, regulamentada pela Res. CONAMA nº 303/2002, e a Lei nº 12.651/2012.



Fonte: o autor.

Figura 24 – Resultados apresentados por Soares-Filho et al. (2014) considerando as áreas de preservação permanente em topo de morro definidas na Lei nº 12.651/2012 e os espaços protegidos pela legislação anterior que foram desafetados.



Fonte: o autor a partir dos resultados apresentados por Soares-Filho et al. (2014), projetados sobre dados do INPE (2005).

Outra mudança significativa deu-se com relação à delimitação da *base da elevação*. As Resoluções do CONAMA nº 4/1985 e 303/2002 definiam que a altura da elevação deveria ser medida a partir da diferença altimétrica entre o ponto mais alto (cume) e a base, sendo esta o “plano horizontal definido por planície ou superfície de lençol d’água adjacente ou nos relevos ondulados, pela *cota da depressão mais baixa ao seu redor*” (BRASIL, 2002c, art. 2º, inciso IV, grifo nosso). Entretanto, o Código Florestal de 2012 definiu-a da seguinte forma:

- Regra: plano horizontal formado pela planície ou espelho d’água adjacente (e.g., lagos e oceanos);
- Relevos ondulados: pelo *ponto de sela* mais próximo da elevação.

Uma lacuna a ser inicialmente tratada é a definição do que se entende por relevo ondulado, cuja presença modifica o método a ser empregado para o cálculo da cota da base de uma elevação (cf. [subseção 2.7.3](#)).

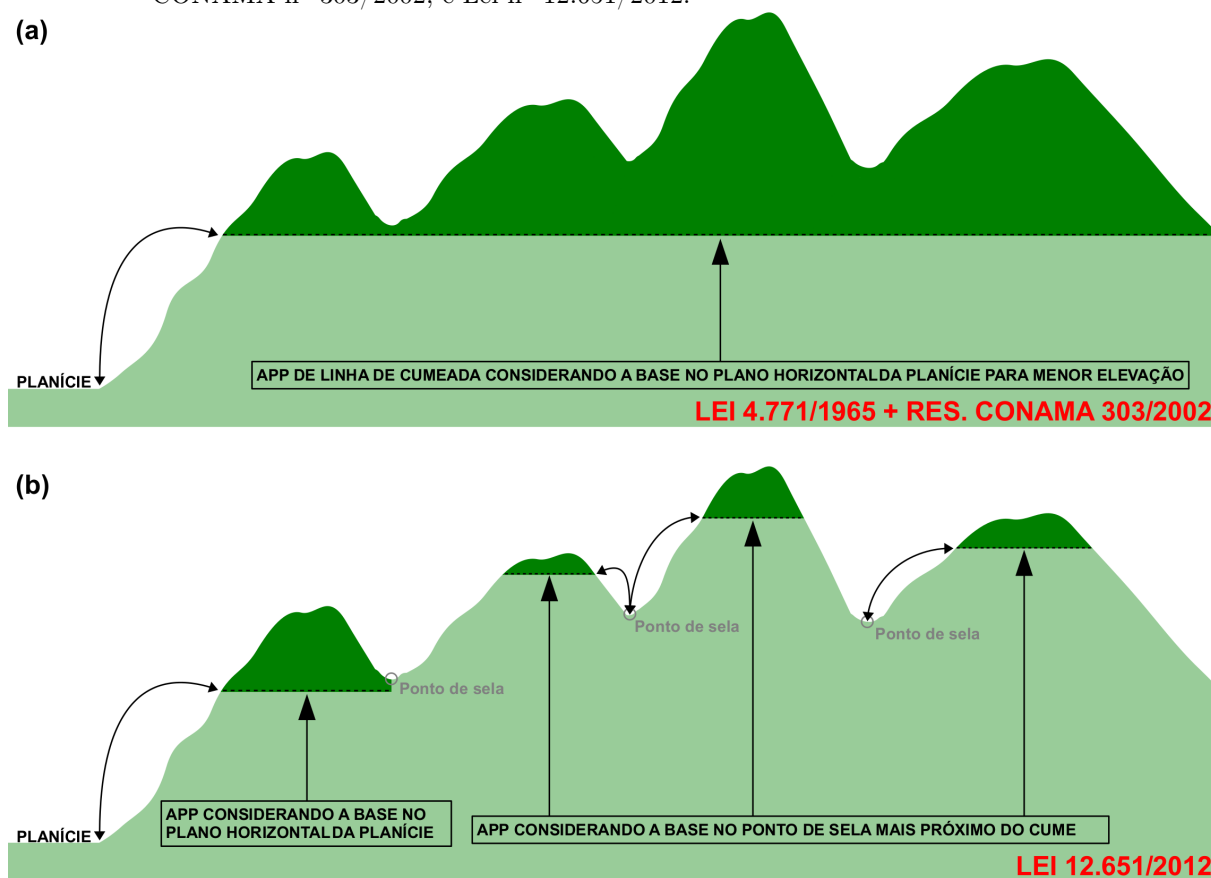
Em relevos ondulados, o *ponto de sela* pode ser definido matematicamente como o ponto de mínimo absoluto (i.e., de declividade nula) localizado na linha de cumeada entre duas elevações sucessivas ([Figura 25b](#)). Pode-se, ainda, defini-lo como o ponto de máximo absoluto na linha de contorno da base hidrológica de uma elevação (OLIVEIRA; FERNANDES FILHO, 2016). O ponto de sela sempre será um ponto estacionário localizado na linha de cumeada e no contorno comum das bases hidrológicas entre elevações vizinhas.

É um critério menos restritivo do que aquele previsto nas Resoluções do CONAMA nº 4/1985 e 303/2002, que definiam a base da elevação nos relevos ondulados pela *cota da depressão mais baixa ao redor da elevação*.

A definição da base por meio do ponto de sela também conflita com os métodos de definição por linhas de cumeada e conjunção de morros ou montanhas da legislação anterior, constituindo outro retrocesso evidente. A regra introduzida pela Lei nº 12.651/2012, na prática, permite que a base a ser considerada possa encontrar-se em cota superior ao sopé da elevação. O resultado é que partes da linha de cumeada não são mais consideradas como área de preservação permanente (cf. [Figura 25a,b](#)).

Apesar das alterações nos critérios de altura e declividade para elevações possuírem APPs em seus topos (cf. [Quadro 5](#) e [Figura 23](#)), o Código Florestal de 2012 não resolveu a mais importante lacuna técnica e normativa para o cálculo destes espaços territoriais protegidos: a *definição da base da elevação em planícies*, cuja identificação espacial é condição essencial para o cálculo da altura e da declividade média da elevação.

Figura 25 – Comparação, numa situação hipotética para fins didáticos, entre as áreas de preservação permanente (em verde) em uma linha de cumeada com cumes distantes menos de 1000 metros um do outro, em face dos critérios definidos na Lei nº 4.771/1965, regulamentada pela Res. CONAMA nº 303/2002, e Lei nº 12.651/2012.



Fonte: o autor.

2.7.2 Elevações com espelho d'água ou planície adjacente

A definição da base quando a elevação possuir um espelho d'água adjacente (e.g., lago ou oceano) é tarefa simples, pois a cota a ser adotada é o nível de referência do corpo hídrico (e.g., o nível médio dos mares para elevações em contato com o oceano). No caso das elevações circundadas por planícies a tarefa torna-se complexa devido às lacunas existentes na legislação.

A literatura sobre o tema é pouco expressiva em número, tendo como referência inicial o artigo de [Hott, Guimarães e Miranda \(2005\)](#), o qual, na vigência da legislação anterior, definiu um método para delimitação das elevações a partir da concepção da *base hidrológica*.

O procedimento, em síntese, consiste em considerar que uma elevação (morro ou montanha) é caracterizada pelas suas vertentes. A partir do escoamento natural das águas, com início no cume, pode-se delimitar qual parcela da superfície pertence à elevação e o ponto mais baixo das vertentes define a *base hidrológica* (i.e., a cota da depressão mais

baixa ao seu redor), que era a regra prevista nas Resoluções do CONAMA nº 4/1985 e 303/2002.

Apesar de o CONAMA não ter definido um conceito técnico-normativo para planícies, quando estabelece critérios para feições geomorfológicas de *topografia plana* condiciona-as a uma declividade média inferior a 10% ($\approx 5,71^\circ$), tal como fez na definição de tabuleiro ou chapada nas Resoluções nº 4/1985 e 303/2002:

Tabuleiro ou chapada: *paisagem de topografia plana, com declividade média inferior a dez por cento, aproximadamente seis graus e superfície superior a dez hectares, terminada de forma abrupta em escarpa, caracterizando-se a chapada por grandes superfícies a mais de seiscentos metros de altitude. (BRASIL, 2002c, art. 2º, inciso XI, grifo nosso).*

Uma elevação que possui uma planície adjacente não tem sua base definida por um rompimento nítido e constante do relevo, pois existe uma transição entre a planície e a encosta com curvas de nível com declividades transversais variáveis, que pode ser observada no exemplo reproduzido na [Figura 26](#), no qual se procurou demonstrar a variação da altimetria do terreno numa linha circundante à elevação que une pontos com a mesma inclinação (para fins de ilustração utilizou-se a linha de declividade igual a 10%).

[Soares-Filho et al. \(2014\)](#) delimita as áreas de preservação permanente em topo de morro (*hilltop*) por meio de um método próprio, no qual se observa que o critério utilizado para definir a base das elevações perante a legislação atual e anterior é o ponto com declividade de $5,73^\circ$, equivalente a 10%.

Considerando que o CONAMA define a paisagem de topografia plana como aquela com declividade média inferior a 10% ([BRASIL, 2002c](#), art. 2º, inciso XI), valor também utilizado por [Soares-Filho et al. \(2014\)](#), pode-se adotá-lo para fins de definição do contorno da base de elevações com planície adjacente.

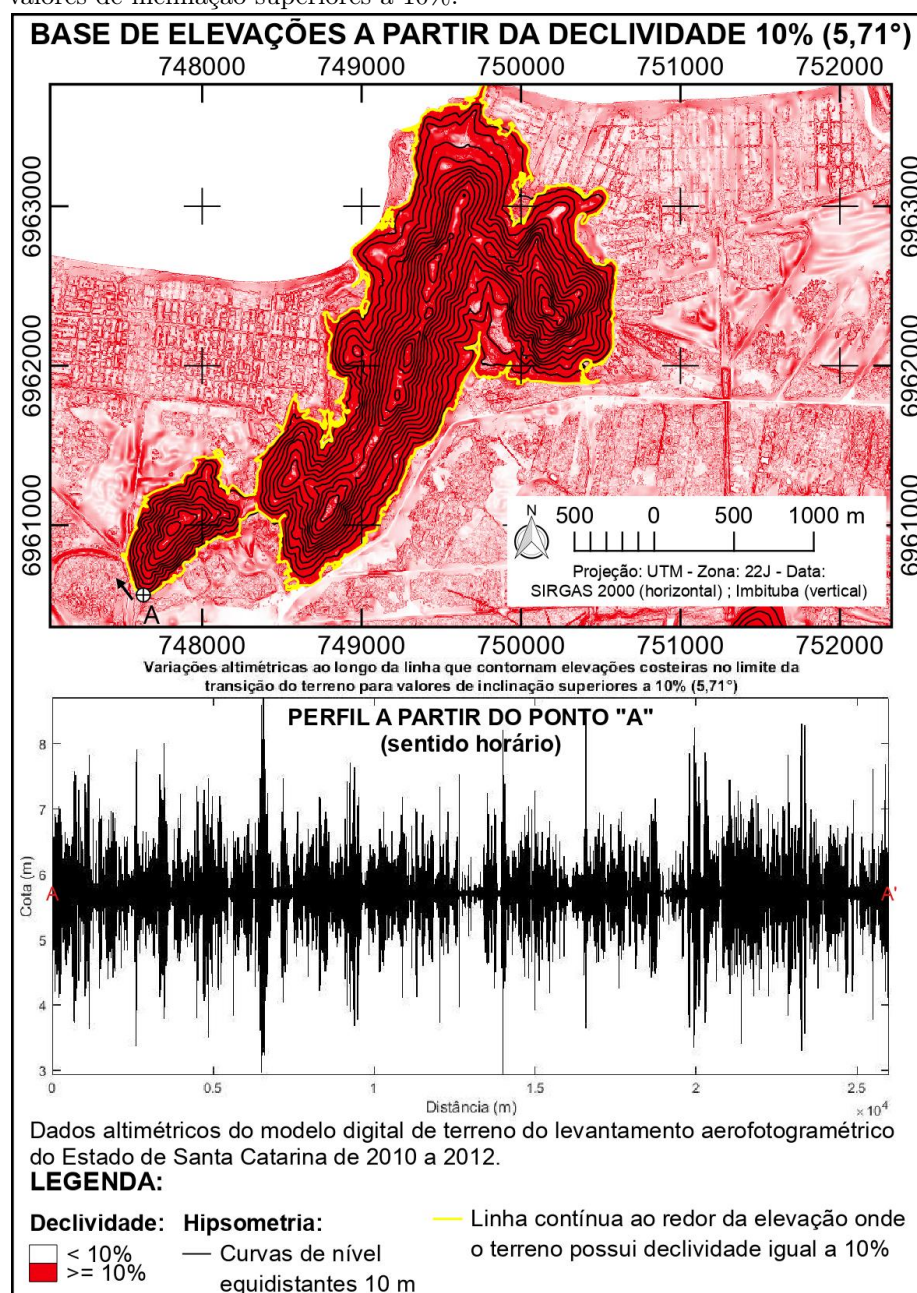
A partir dos métodos definidos por [Hott, Guimarães e Miranda \(2005\)](#) e [Oliveira e Fernandes Filho \(2016\)](#), é possível estabelecer um procedimento para cálculo das APPs em topo de elevações com planícies adjacentes, o qual se encontra detalhado no [Apêndice B](#).

Com relação aos regimes jurídicos vigentes antes e depois da publicação da Lei nº 12.651/2012, a partir do exemplo reproduzido na [Figura 26](#) é possível perceber a diferença no quantitativo da APP no topo das elevações.

Considerando que o STJ não tem admitido a aplicação das disposições de legislação superveniente menos protetiva a fatos pretéritos, que devem observar a legislação vigente na época do evento danoso (cf. [subseção 2.1](#)), eventualmente pode ser necessário avaliar um determinado local em face da APP em topo de elevação definida na Lei nº 4.771/1965, regulamentada pelas Resoluções do CONAMA 4/1985 e 303/2002, sucessivamente.

Conforme já abordado, a legislação vigente antes da publicação do Código de 2012 resultava em maior superfície protegida. Além dos critérios de altura mínima e declividade proporcionarem um número maior de elevações com APP, ainda existiam as modalidades de conjunção de morros e linhas de cumeadas, conforme demonstram as [Figuras 27 e 28](#).

Figura 26 – Perfis das linhas que contornam elevações costeiras no limite da transição do terreno para valores de inclinação superiores a 10%.

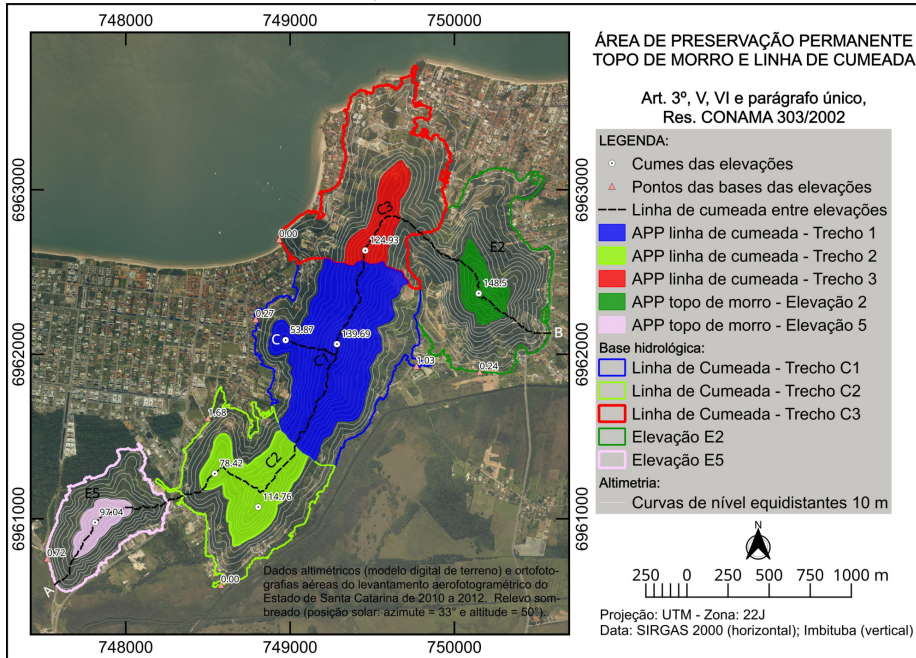


Fonte: o autor com dados de SC (2014c).

Para o mesmo exemplo, verifica-se que nenhuma elevação obedece à condição de declividade mínima de 25° estabelecida no art. 4º, inciso IX, da Lei nº 12.651/2012, motivo pelo qual não possuem área de preservação permanente no topo de suas elevações (Figura 29).

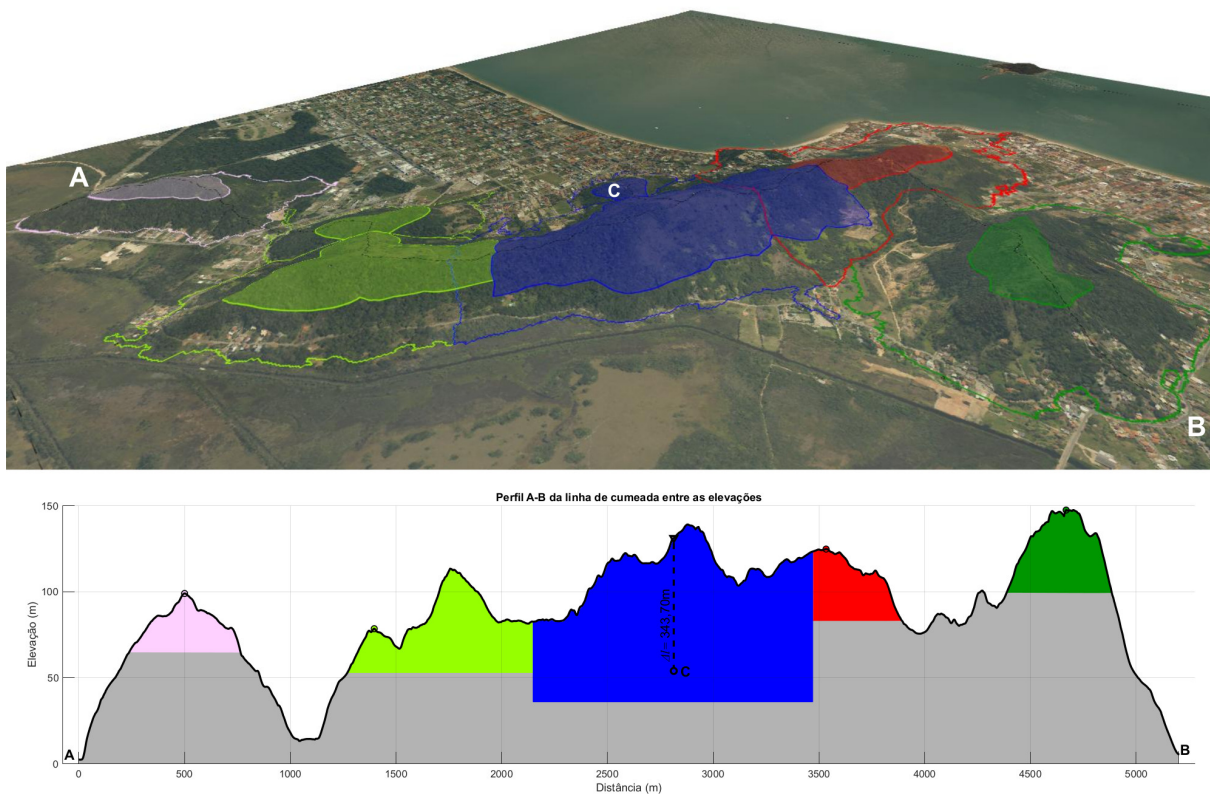
O método definido nas Resoluções do CONAMA nº 4/1985 e 303/2002 para definição da APP em topo de elevações era aplicável para qualquer tipo de relevo. Atualmente, a Lei nº 12.651/2012 instituiu o método do ponto de sela para elevações que não possuem base em espelho d'água ou planície adjacente, o qual será objeto de análise na próxima subseção.

Figura 27 – Área de preservação permanente no terço superior de elevações (*E2* e *E5*) e em linhas de cumeada (*C1*, *C2* e *C3*), conforme definido no art. 3º, incisos V e VI e parágrafo único, da Resolução do CONAMA nº 303/2002.



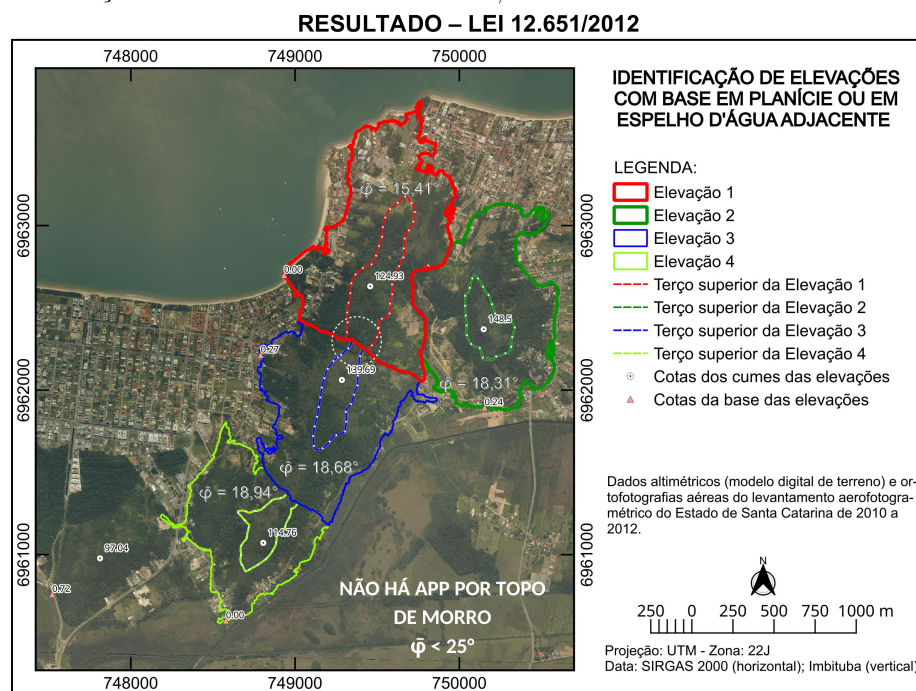
Fonte: o autor com dados de SC (2014c).

Figura 28 – Visualização tridimensional e perfil da área de preservação permanente no terço superior de elevações e em linhas de cumeada, conforme definido no art. 3º, incisos V e VI e parágrafo único, da Resolução do CONAMA nº 303/2002.



Fonte: o autor com dados de SC (2014a,c).

Figura 29 – Resultado da aplicação dos critérios definidores da área de preservação permanente por topo de elevação estabelecidos na Lei nº 12.651/2012.



Fonte: o autor com dados de [SC \(2014a,c\)](#).

2.7.3 Elevações em relevo ondulado

O *relevo ondulado* foi objeto de preocupação especial pelo legislador, que estabeleceu o seguinte conceito:

Expressão geomorfológica usada para designar área caracterizada por movimentações do terreno que geram depressões, cuja intensidade permite sua classificação como relevo suave ondulado, ondulado, fortemente ondulado e montanhoso. ([BRASIL, 2012b](#), art. 3º, inciso XXIII).

Na legislação anterior, o CONAMA estabelecia a base nos relevos ondulados como a cota da depressão mais baixa ao redor da elevação e a Lei nº 12.651/2012 estabelece-a na cota do ponto de sela mais próximo da elevação, sem especificar os critérios para definição da sela (resolução e escala, principalmente), bem como se a proximidade considerada é no plano horizontal, vertical ou ambos.

Quanto à definição de relevo suave ondulado, ondulado, fortemente ondulado e montanhoso a legislação não definiu requisitos de declividade, portanto há evidente lacuna normativa. Na prática, tem-se observado a comunidade técnica e científica fazer referência à súmula da 10ª Reunião Técnica de Levantamento de Solos realizada pela [Embrapa \(1979\)](#), cujas definições estão reproduzidas no [Quadro 6](#).

[Embrapa \(1979\)](#) considera como plano somente formações do relevo com declividade inferior a 3%, o que limita consideravelmente o estabelecimento da base de elevações em planícies. Conforme já abordado, quando o CONAMA estabelece critérios para feições

geomorfológicas de *topografia plana* condiciona-as a uma declividade média inferior a 10% ($\approx 5,71^\circ$), tal como fez na definição de tabuleiro ou chapada nas Resoluções nº 4/1985 e 303/2002.

Quadro 6 – Definições de relevo plano, suave ondulado, ondulado, fortemente ondulado, montanhoso e escarpado segundo [Embrapa \(1979\)](#).

RELEVO	DESCRIÇÃO
Plano	Superfície de topografia esbatida ou horizontal, onde os desnivelamentos são muito pequenos, com expressiva ocorrência de áreas com declives de 0% a 3%.
Suave ondulado	Superfície de topografia pouco movimentada, constituída por conjunto de colinas e/ou outeiros (elevações de altitudes relativas da ordem de 50 m a 100 m, respectivamente), apresentando declives suaves, com expressiva ocorrência de áreas com declives de 3% a 8%.
Ondulado	Superfície de topografia pouco movimentada, constituída por conjunto de colinas e/ou outeiros, apresentando expressiva ocorrência de áreas com declives entre 8% e 20%.
Forte ondulado	Superfície de topografia movimentada formada por outeiros e/ou morros (elevações de 100 m a 200 m de altitude relativa), com predominância de declives de 20% a 45%.
Montanhoso	Superfície de topografia vigorosa, com predominância de formas acidentadas, usualmente constituída por morros, montanhas, maciços montanhosos e alinhamentos montanhosos, apresentando desnivelamentos relativamente grandes da ordem de 45% a 75%.
Escarpado	Regiões ou áreas com predomínio de formas abruptas, compreendendo escarpamentos tais como: aparados, itaimbés, frentes de cuevas, falésias, vertentes de declives muito fortes de vales encaixados, etc., com declives acima de 75%.

Fonte: adaptado de [Embrapa \(1979\)](#).

Então, o que perante o CONAMA ([BRASIL, 1986b, 2002c](#)) é considerado como topografia plana ($\bar{\phi} < 10\%$), nos critérios definidos pela [Embrapa \(1979\)](#) pode ser caracterizado como relevo plano ($\bar{\phi} \leq 3\%$), suave ondulado ($3\% < \bar{\phi} \leq 8\%$) ou ondulado ($8\% < \bar{\phi} \leq 20\%$). É interessante ressaltar que na classificação da [Embrapa \(1979\)](#) os morros (elevações com altura entre 100 m e 200 m) estão descritos somente a partir do relevo fortemente ondulado (i.e., com declividades superiores a 20%).

O propósito do material produzido pela [Embrapa \(1979\)](#) é pedológico. Para fins de diagnósticos ambientais os conceitos definidos na legislação ambiental são preponderantes, cuja competência regulatória pertence ao CONAMA ([BRASIL, 1981](#)), motivo pelo qual se adota a declividade média inferior a 10% para definição de feições planas ([BRASIL, 2002c](#), art. 2º, inciso XI).

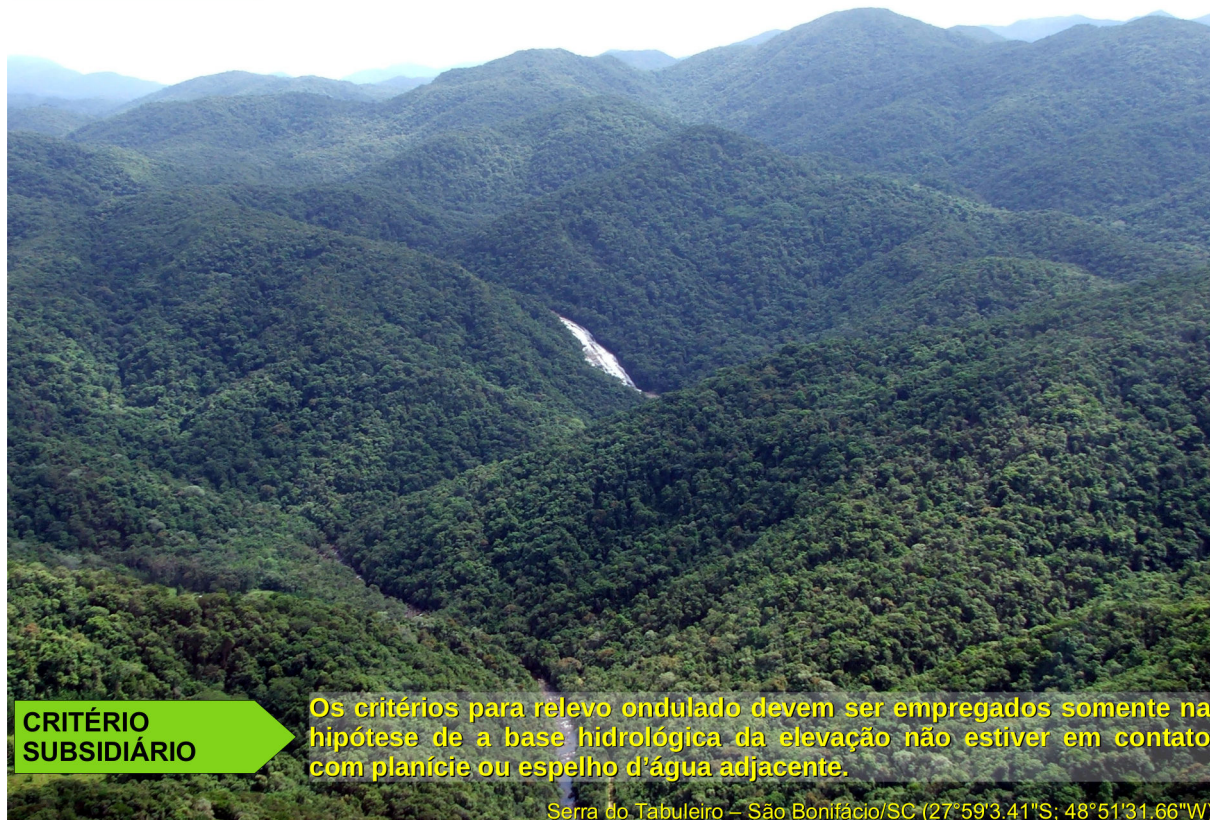
Especificamente, a Lei nº 12.651/2012 foi expressa ao prever que a base será definida pelo “plano horizontal determinado por planície ou espelho d’água adjacente” ([BRASIL, 2012b](#), art. 4º, inciso IX) devendo esse ser considerado o critério preponderante a ser adotado. Subsidiariamente, por exceção, utilizar-se-á o critério definido para relevos ondulados (ponto de sela) quando no entorno da elevação não existirem espelhos d’água ou planícies adjacentes ([Figura 30](#)). Quando a linha entre os cumes de elevações vizinhas formarem divisores de águas, o morro ou montanha que possuir vertente em contato com

espelho d'água ou planície, ali terá sua base e, conseqüentemente, não terá sua altura calculada pelo ponto de sela ([Figura 31](#)).

Figura 30 – Exemplo de elevações em relevo ondulado. Bases das elevações sem contato com planície ou espelho d'água adjacente.

**CRITÉRIO
PREPONDERANTE**

Quando no sopé da elevação existir planície ou espelho d'água adjacente, esse será o critério para definição da base.



Fonte: o autor. Fotografia de 31 jan. 2007.

Conforme se pode perceber, a classificação do relevo em suave ondulado, ondulado, fortemente ondulado e montanhoso é um esforço que não possui nenhum efeito prático para fins de cálculo das APP no topo de uma elevação. É a ausência de contato das vertentes do morro ou montanha com espelho d'água ou planície adjacente que define, por exceção, o relevo como ondulado, sendo a altura da elevação calculada a partir do ponto de sela.

Na literatura, há dois métodos que se destacam para o cálculo de APP em relevos ondulados. Apesar de o material complementar de [Soares-Filho et al. \(2014\)](#) não fornecer o código fonte da rotina desenvolvida para o cálculo das APP em topo de elevação, observa-se, a partir da descrição da metodologia ([Figura B.2](#)), que ao identificar ao redor de cada cume polígonos circunvizinhos em “fatias” hipsométricas contínuas, é esperado que os pontos de sela sejam reconhecidos quando a rotina tentar gerar “fatias” para cotas inferiores ao ponto estacionário verticalmente mais próximo do cume, que ficarão descontínuas.

[Oliveira e Fernandes Filho \(2016\)](#) para relevos ondulados utilizam uma outra abordagem, que separa as elevações a partir de uma concepção hidrológica (fluxos nas

vertentes originados a partir dos cumes) similar ao método de [Hott, Guimarães e Miranda \(2005\)](#), para no momento seguinte realizar uma série de análises até obter os pontos de sela e os polígonos das áreas de preservação permanente.

Os métodos empregados por [Soares-Filho et al. \(2014\)](#) e [Oliveira e Fernandes Filho \(2016\)](#) são suficientes para fins de identificação de área de preservação permanente no topo de elevação que não possua vertente com sopé em espelho d'água ou planície adjacente. Os referidos métodos encontram-se detalhados no [Apêndice B, subseção B.2](#).

Figura 31 – Definição da base de elevações vizinhas com ponto de sela no divisor de águas e vertentes em contato com espelho d'água e planície adjacente. Ilustração para fins didáticos.



Fonte: o autor. Fotografia de 6 jun. 2006.

2.7.4 Resolução adequada para o cálculo da declividade média das elevações

Para realizar o cálculo da declividade média de uma elevação, primeiro é necessário definir o que se entende por base da elevação, o que foi realizado nas subseções anteriores. A partir da definição precisa da base é possível delimitar a superfície da elevação para realizar-se o cálculo da declividade média.

A quantificação das APPs por topo de morro é muito sensível às alterações nas escalas e resolução do material topográfico ([SOARES-FILHO et al., 2014](#)). [Hott, Guimarães e Miranda \(2005\)](#) e [Victoria \(2010\)](#) ao analisarem as áreas de preservação permanente em diferentes escalas e resoluções para um mesmo espaço geográfico também observaram interferências significativas da resolução nos resultados. A sensibilidade é fruto das variações provocadas pela discretização do relevo quando do cálculo da declividade das elevações, fator este que é comum para a definição de encostas protegidas.

A [Tabela 2](#) apresenta a quantificação da APP no topo de elevação para um mesmo espaço geográfico a partir dos resultados dos trabalhos de [Hott, Guimarães e Miranda \(2005\)](#), [Victoria \(2010\)](#) e [Soares-Filho et al. \(2014\)](#). A APP de topo de morro cresce à medida que a escala aumenta e a resolução torna-se mais discreta, sendo a escala 1:10.000 aquela que fornece o valor mais preciso para APP.

Tabela 2 – Efeitos da resolução e escala para delimitação de área de preservação permanente (APP) em topo de elevações para o Município de Campinas/SP.

MATERIAL E ESCALA ¹⁷	APP DE TOPO DE MORRO (km ²)	FONTE
SRTM 120 m (eq. 1:240.000)	37,7	Soares-Filho et al. (2014)
SRTM 90 m (eq. 1:180.000)	25,4	Victoria (2010)
SRTM 30 m (eq. 1:60.000)	56,0	Victoria (2010)
Mapa 1:50.000	116,0	Hott, Guimarães e Miranda (2005)
Mapa 1:50.000	173,8	Victoria (2010)
Mapa 1:10.000	213,1	Victoria (2010)

Nota: [Hott, Guimarães e Miranda \(2005\)](#) e [Victoria \(2010\)](#) utilizam o mesmo método para o cálculo da APP.

Fonte: organizado pelo autor a partir de dados de [Hott, Guimarães e Miranda \(2005\)](#), [Victoria \(2010\)](#) e [Soares-Filho et al. \(2014\)](#).

Coincidentemente, [Taniwaki et al. \(2018\)](#) quando analisaram os rios declarados no Cadastro Ambiental Rural (CAR) em escala 1:50.000, observaram uma diferença de 80% no comprimento dos cursos d'água de primeira ordem quando avaliados na escala 1:10.000 (material mais preciso disponível para área de estudo), sugerindo que essa seria a escala mais indicada para esse tipo de diagnóstico ambiental.

Para encostas, conforme foi abordado na [subseção 2.6.2](#), os resultados indicam que uma resolução de 5 m é suficiente para identificação de áreas protegidas em função da declividade, sem fragmentação excessiva das amostras.

Então, como critério para discretização do relevo, visando garantir maior efetividade na identificação e proteção de espaços territoriais protegidos, sugere-se adotar a escala *mínima* de 1:10.000 (eq. 0,0001) ou a resolução matricial *máxima* de 5 m.

¹⁷ A correlação entre escala equivalente e a resolução nominal de imagens digitais, definida pelo campo de visão instantâneo (IFOV - *Instantaneous Field of View*) do sensor, não depende somente da geometria do sistema de projeção, sendo influenciada por outros fatores que interferem na qualidade ótica do produto, cujo desempenho pode ser medido pela resolução ótica efetiva ou EIFOV - *Effective Instantaneous Field of View* (cf. [BOGGIONE, 2014](#)).

Para modelos digitais de elevação, a precisão altimétrica está relacionada ao erro padrão entre as elevações informadas pelo modelo e seus valores no terreno (cf. [BRASIL, 1984b](#)), de forma que é difícil estabelecer uma relação entre resolução, precisão e escala.

Considerando o propósito da presente tabela, cuja finalidade é fornecer ao leitor uma comparação aproximada entre mapas físicos e modelos digitais apresentados por fontes diversas, por meio da análise do efeito da discretização sobre o quantitativo de áreas protegidas, sem considerar critérios de precisão altimétrica, procurou-se estimar a escala aproximada dos dados matriciais pela equação apresentada por [Boggione et al. \(2009\)](#): $Escala = \frac{5 \cdot 10^{-4}}{IFOV}$, considerando as dimensões do pixel do modelo digital de elevação, em princípio, equivalente à resolução ótica.

2.8 SÍNTESE DOS RESULTADOS E ESCOLHA DE LACUNA RELEVANTE PARA PROSSEGUIR NA PESQUISA DE SOLUÇÕES PARA INTEGRAÇÃO

O [Quadro A.1 \(Apêndice A\)](#) sintetiza os resultados para integração das lacunas técnico-normativas para delimitação de áreas de preservação permanente com função de proteção aos recursos hídricos naturais, objeto de análise no presente Capítulo, complementados pelos resultados obtidos nos capítulos seguintes.

Entre as lacunas identificadas, a definição dos critérios hidrológicos para determinação do leito regular, provavelmente, tem o maior impacto para a quantificação de áreas protegidas no território brasileiro. Por isso, essa lacuna foi selecionada para prosseguimento da pesquisa, sendo dedicados os próximos capítulos para descrever o desenvolvimento de um programa computacional específico para analisar as séries de dados hidrológicos e as seções transversais dos principais rios brasileiros e, ao final, por meio da aplicação da ferramenta desenvolvida, apresentar-se-á a análise dos impactos ambientais relativa a cada uma das hipóteses regulatórias em estudo.

3 **HIDROAPP – UMA PLATAFORMA WEB PARA A DEFINIÇÃO DE LEITOS FLUVIAIS REGULARES DE RIOS DO BRASIL**

O estabelecimento de áreas protegidas possibilita, entre outros objetivos, garantir e recuperar os recursos hídricos. No Brasil, entre as áreas protegidas destacam-se as áreas de preservação permanente (APP) nas faixas marginais dos rios (*stream corridors*), verdadeiros ecótonos entre o ambiente aquático e o terrestre.

O planejamento das ações de conservação normalmente trata de forma separada os ambientes terrestres e aquáticos (ABELL; HARRISON, 2020). Para serem eficientes, as estratégias integradas de água doce terrestre precisam ser alinhadas ou incorporadas às políticas e leis ambientais atuais (LEAL; LENNOX et al., 2020).

A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) possui um extenso banco de dados com registros históricos de variáveis hidrológicas dos rios brasileiros que abrange mais de 2000 estações fluviométricas. Para a análise do impacto ambiental de cada cenário hidrológico para definição do leito regular de cursos d'água, objetivo final deste trabalho, foi necessário desenvolver um programa computacional que reunisse os métodos empregados para o tratamento de dados hidrológicos (cf. Capítulo 4) e da geometria dos canais fluviais (cf. Capítulo 5).

O objetivo do presente Capítulo é apresentar o desenvolvimento de um programa computacional (*HidroAPP*) para análise individual e integrada das séries históricas de dados hidrológicos e de seções transversais dos principais rios brasileiros, como ferramenta para pesquisa de critérios para regulamentação da definição hidrológica de leitos fluviais regulares, a partir dos quais são definidas as áreas de preservação permanente nas faixas marginais aos cursos d'água naturais.

Neste capítulo apresentar-se-á a concepção do programa, suas capacidades de análise e de exibição dos resultados. Os métodos específicos para análise de dados e seções transversais são detalhados nos Capítulos 4 e 5, acompanhados de aplicações para validação e obtenção de resultados para problemas científicos, que subsidiarão a análise dos cenários regulatórios para APP em margem de curso d'água, objeto do Capítulo 6.

A ferramenta *web* desenvolvida para análise e visualização espacial dos resultados pode ser acessada em: <<http://www.labhidro.ufsc.br/hidroapp/>>.

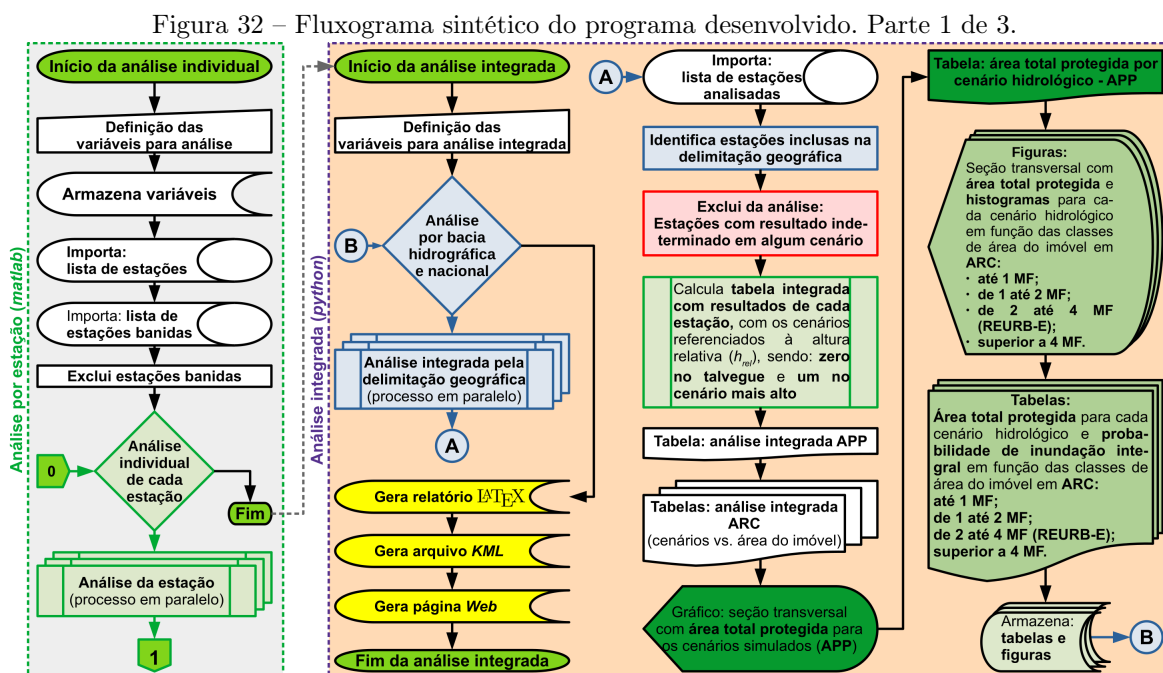
3.1 METODOLOGIA

A etapa de preparação de dados é realizada uma única vez e aproveita-se para excluir estações que não possuam dados úteis para análise (e.g., ausência de levantamento de perfis transversais), bem como variáveis para armazenamento de textos descritivos longos, que não serão utilizadas nas análises e podem prejudicar a importação dos dados nas fases posteriores de processamento de dados.

A análise dos dados é dividida em duas etapas:

- Análise individual: na qual os dados de cada estação são avaliados de acordo com os critérios de análise global, em ambiente de desenvolvimento que emprega a linguagem *matlab* (THE MATHWORKS, 2017), cujos métodos desenvolvidos são detalhados nos Capítulos 4 e 5;
- Análise integrada: que concatena os resultados das análises individuais dos cenários hidrológicos por bacias hidrográficas e para todo o território nacional, com desenvolvimento em linguagem *python*.

As Figuras 32, 33 e 34 apresentam o fluxograma sintético¹⁸ do programa *HidroAPP*. Os critérios para análise são estabelecidos pelo usuário por meio de variáveis que permitem definir o nível de consistência para os dados, número mínimo de medições de cota e vazão em campo, tolerância das medições, período de análise, número máximo de lacunas aleatórias ou contínuas em dias e anos da série temporal, entre outras variáveis detalhadas no Apêndice C, subseção C.2.2, Quadro C.2.

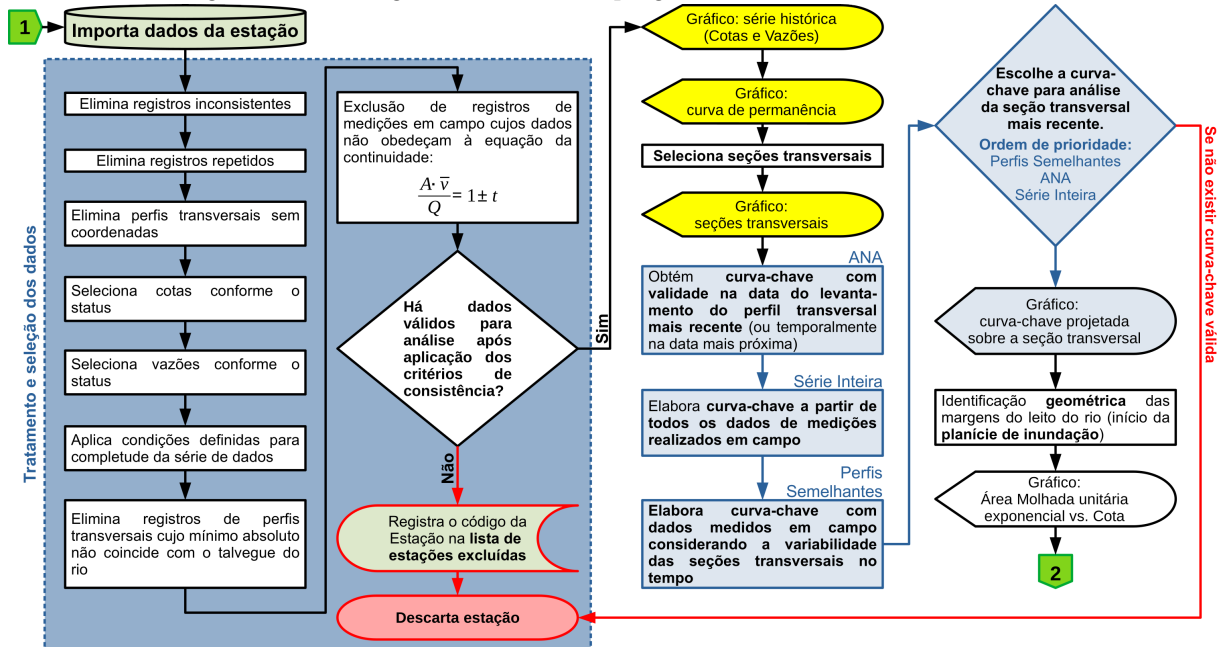


Fonte: o autor.

Iniciado o programa por meio da função principal, a tabela de estações selecionadas é importada fornecendo a lista de estações definidas previamente na fase de preparação dos dados. O usuário pode previamente excluir estações que não deseja analisar, por meio do fornecimento de uma lista com o código de cada estação a ser ignorada. Essa opção pode ser utilizada para retirar da análise as estações com dados problemáticos ou que possuam alguma característica que não interessa para determinado propósito (e.g., estações sob pontes rodoviárias).

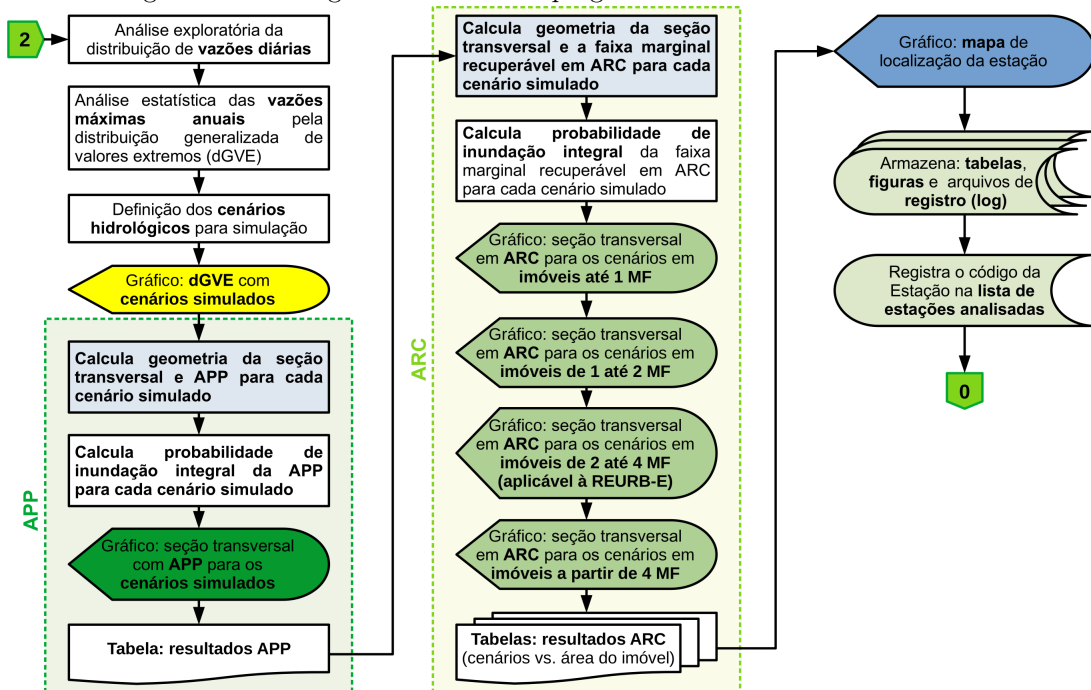
¹⁸ Fluxogramas detalhados disponíveis no Apêndice C.

Figura 33 – Fluxograma sintético do programa desenvolvido. Parte 2 de 3.



Fonte: o autor.

Figura 34 – Fluxograma sintético do programa desenvolvido. Parte 3 de 3.



Fonte: o autor.

Uma vez definida a lista de estações, o programa analisa cada uma de forma independente, podendo o usuário definir se a execução será *sequencial* ou *paralela*, havendo a possibilidade de também executá-la de forma *distribuída* (cf. na [Figura 32](#) o fluxograma de análise individual). Concluído o processamento individual dos dados de cada estação, é iniciada a fase de análise integrada dos resultados, que serão consolidados por delimitações geográficas. Na versão atual do programa é possível agrupar os resultados para cada uma das 8 grandes bacias com ocorrência no Brasil ou para todo o território nacional.

Os resultados consolidados da análise integrada são apresentados na forma de figuras e tabelas armazenadas em disco, bem como em relatórios sob três formas de apresentação:

- Arquivo PDF/A (*Portable Document Format*): por meio da compilação de código em linguagem \LaTeX , gerado pelo programa desenvolvido. Além da formação de um relatório específico, o código gerado permite sua inclusão como apêndice de outros trabalhos ou material suplementar de artigo científico;
- Arquivo KML (*Keyhole Markup Language*): que permite a apresentação dos resultados georreferenciados para as análises individuais e integrada diretamente sobre programas de visualização geográfica (e.g., *google earth pro*);
- Ferramenta *web*: da mesma forma que o arquivo KML, permite a visualização dos resultados georreferenciados, porém sem a necessidade de um programa específico, por apresentá-los na internet por meio do navegador. Essa ferramenta também serve como meio de divulgação científica dos resultados.

Nas seções seguintes serão apresentados e discutidos os resultados obtidos durante o desenvolvimento do programa, com detalhamento de métodos desenvolvidos para solucionar problemas específicos ligados ao tratamento e à análise de dados, programação, hidrologia e visualização de resultados.

3.2 PREPARAÇÃO DOS DADOS

Os registros são fornecidos pela ANA no formato *Microsoft Jet Database Engine* (*Microsoft Access*) e exportados para planilhas de texto separado por vírgula (*csv*) por meio do pacote de código aberto *mdb-tools* ([BRUNS et al., 2013](#)), através de um *script* em *Bash Shell Scripting* (*bash*).

O banco de dados da ANA possui campos extensos de texto que geram erros de importação no *matlab*. Observou-se que o módulo *csv* da linguagem *python* consegue tratá-los com facilidade por meio dos métodos *DictReader* e *DictWriter*. Então, para preparação dos dados desenvolveu-se rotinas em *python*, filtrando-se das tabelas somente as variáveis (colunas) úteis para o presente trabalho.

Somente são consideradas para análise aquelas estações que possuem registros de vazões diárias, cotas diárias, vazões medidas, curva-chave e perfil da seção transversal. Por

tratar-se de pré-processamento, nesta etapa os dados não são submetidos a qualquer análise de validade. Para cada estação, os dados são extraídos e organizados em subdiretórios nomeados pelo código da estação. Por meio desta técnica, permite-se criar rotinas que fazem a análise rápida dos dados de uma única estação, com a possibilidade de paralelização da execução, com redução do tempo de processamento do conjunto total de estações. Os dados de cada estação, armazenados em planilhas *.csv*, são transformados para tabelas no formato binário para o *matlab* (*.mat*), o que confere velocidade consideravelmente maior para processamento dos dados submetidos às análises, quando comparado com o tempo de importação de dados no formato de texto (*.csv*).

Utiliza-se de rotinas em computação paralela no *matlab* por meio da função *parfor* e todas as variáveis têm seus nomes customizados para identificação da respectiva estação fluviométrica. As planilhas, no formato *table* são armazenadas em arquivo binário *.mat* único, com a seguinte denominação *E_ <código da estação>.mat*. No interior do arquivo são armazenadas em formato binário as seguintes tabelas¹⁹:

- *E_00000000_Cotas*;
- *E_00000000_Estacao*;
- *E_00000000_PerfilTransversal*;
- *E_00000000_PerfilTransversalVert*;
- *E_00000000_ResumoDescarga*;
- *E_00000000_VazoesANA*;
- *E_00000000_CurvaDescarga*; e
- *E_00000000_CurvaDescargaTabelaVazao*.

Os perfis das seções transversais disponíveis no banco de dados da ANA, normalmente, adentram pouco nas planícies de inundação, prejudicando o cálculo de cenários hidrológicos de cheias com tempos de recorrência elevados. Para ampliar os perfis topográficos das seções transversais foram desenvolvidas rotinas para extração de perfis estendidos das seções transversais dos rios a partir de modelos digitais de elevação (MDE), os quais são acoplados às margens das seções transversais medidas pela ANA durante o processamento individual de cada estação. Por questões didáticas, o método desenvolvido será detalhado na [subseção 5.1.8](#) em conjunto com o procedimento para acoplamento do perfil extraído do MDE com os perfis topográficos da ANA.

A [Figura 35](#) apresenta a estrutura típica do diretório com o banco de dados individualizado por estações após a fase de preparação de dados.

No [Apêndice C](#), [subseção C.1.2](#), é apresentado o fluxograma detalhado dos procedimentos e rotinas empregadas para preparação dos dados ([Figuras C.2 a C.4](#)), cujas rotinas desenvolvidas estão informadas no [Quadro C.1](#).

¹⁹ Código da estação atribuído como “00000000” para fins de exemplo.

Figura 35 – Estrutura típica do diretório com o banco de dados individualizado por estações após a fase de preparação de dados.

```

HIDROAPP/DADOS_ESTACOES/
|-- 10200000
| |-- 10200000_Cotas.csv
| |-- 10200000_CurvaDescarga.csv
| |-- 10200000_CurvaDescargaTabelaVazao.csv
| |-- 10200000_Estacao.csv
| |-- 10200000_PerfilTransversal.csv
| |-- 10200000_PerfilTransversalVert.csv
| |-- 10200000_ResumoDescarga.csv
| |-- 10200000_Vazoes.csv
| |-- E_10200000_PERFIL_SRTM_3S_HydroSHEDS.csv
| |-- E_10200000.mat
|
(...)
|
|-- 88850000
| |-- 88850000_Cotas.csv
| |-- 88850000_CurvaDescarga.csv
| |-- 88850000_CurvaDescargaTabelaVazao.csv
| |-- 88850000_Estacao.csv
| |-- 88850000_PerfilTransversal.csv
| |-- 88850000_PerfilTransversalVert.csv
| |-- 88850000_ResumoDescarga.csv
| |-- 88850000_Vazoes.csv
| |-- E_88850000_PERFIL_SRTM_3S_HydroSHEDS.csv
| |-- E_88850000.mat
|
|-- TabelaEstacoesSelecionadas.csv
|-- TabelaEstacoesSelecionadas.mat

```

Fonte: o autor.

3.3 ANÁLISE INDIVIDUAL DE ESTAÇÕES

Concluída a organização dos dados fornecidos pela ANA no procedimento de preparação (subseção 3.2), o programa desenvolvido para análise de dados, denominado *HidroAPP*, passa a ser empregado.

O processamento inicia a partir da análise individual dos dados das estações, onde o usuário define os critérios para análise por meio das variáveis detalhadas na subseção C.2.2, Quadro C.2. Em síntese, o usuário define o período de análise, nível de consistência dos dados a serem utilizados, critérios de continuidade da série de dados para fins estatísticos e o método a ser empregado para seleção dos dados representativos para a análise.

O programa executa a análise de cada estação de forma sequencial ou paralela para gerar os resultados individuais. Aquelas estações cujos dados preenchem as condições fixadas para as análises têm seus códigos armazenados na lista de estações analisadas. Essa lista será necessária na fase posterior para realizar a análise integrada dos resultados.

Para análise individual de estações, utiliza-se os dados disponibilizados em formato binário *.mat* no respectivo subdiretório da estação, sendo os resultados armazenados no mesmo subdiretório também em arquivo binário com a seguinte nomenclatura: *E_ <código da estação> _RESULTADOS.mat*. Os resultados também são armazenados, por variáveis, em arquivos no formato *.csv* para permitir sua utilização na fase de análise integrada,

que é desenvolvida em *python*, e em outros programas desenvolvidos para interpretação e visualização dos resultados.

O fluxograma representando o procedimento detalhado de análise individual das estações podem ser observados nas Figuras C.5 e C.13, localizadas na subseção C.2.1.

3.3.1 Definição de cenários hidrológicos

O programa é customizável e permite o estabelecimento de cenários regulatórios para análises a partir da curva de permanência ou da distribuição de valores extremos. Os dados de vazões da série histórica de cada estação são submetidos à análise estatística com cálculo de médias, medianas, aspecto, curtose, curva de permanência e probabilidades de cheias para determinados cenários.

Por exemplo, para o cálculo da vazão média diária com probabilidade de 95% para ser excedida (Q_{95} ou vazão de permanência) o método empregado é o da curva de permanência. Para o cálculo de vazões extremas, definidas por determinado tempo de recorrência (TR) ou de retorno, é utilizada a distribuição generalizada para valores extremos (GEVd), a partir das vazões máximas diárias anuais.

O usuário pode definir quantos cenários hidrológicos desejar, devendo informar para cada um deles o *nome do cenário* e o valor da *vazão de referência*.

Para gerar exemplos da aplicação neste capítulo, foram definidos três cenários: vazão de permanência (Q_{95}), vazão de margens plenas (cheia anual mais provável, definida pelo tempo de recorrência de 1,58 ano, também denominada $Q_{1,58}$) e a média das cheias anuais (Q_{med}).

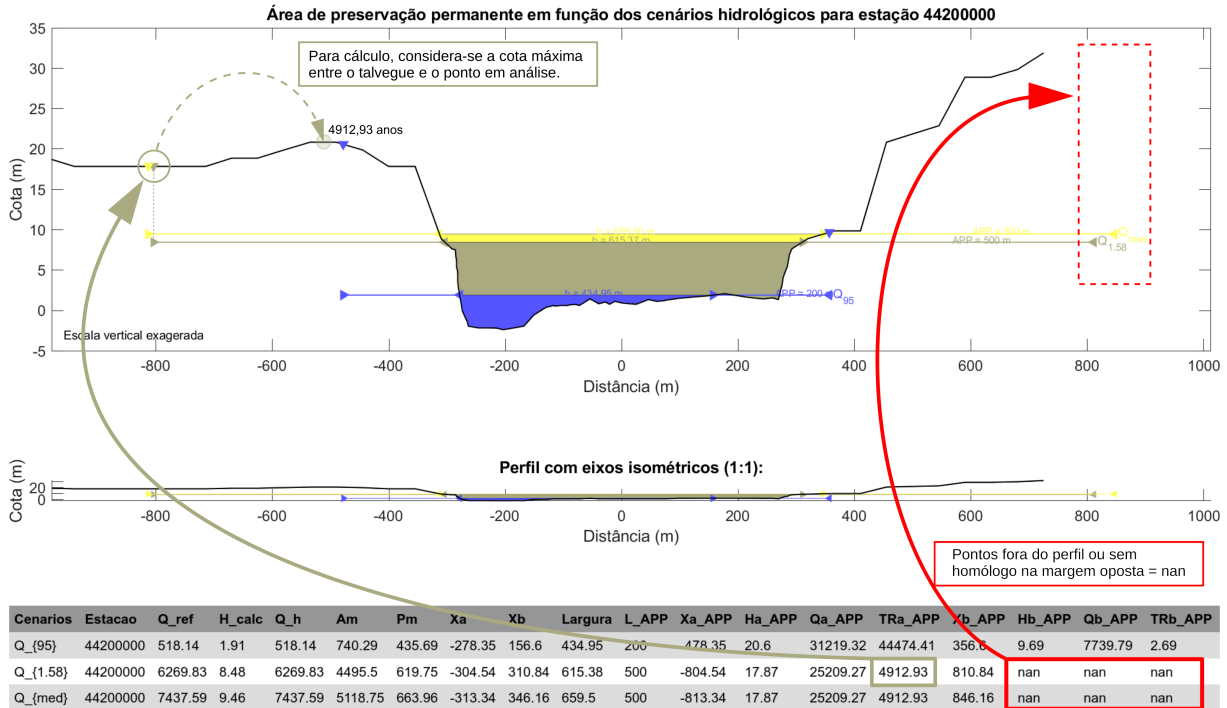
3.3.2 Cálculo das áreas de preservação permanentes e análise da probabilidade de perturbação

A partir das vazões prováveis em cada cenário definido anteriormente, o programa calcula a respectiva faixa marginal da APP, por meio de iteração da seção transversal em intervalos δh , e a cheia provável capaz de inundar seus limites externos direito e esquerdo, cujos resultados são úteis para analisar o risco de perturbação por enchentes naquele espaço protegido.

Os resultados são armazenados em tabelas e figuras ilustrativas dentro do subdiretório de cada estação. A nomenclatura dos arquivos em disco sempre traz o número da estação fluviométrica, para fins de indexação. E as tabelas geradas com os resultados também são indexadas em função do número da estação e do cenário regulatório simulado.

A Figura 36 apresenta um exemplo da saída gráfica da análise de três cenários hidrológicos numa seção transversal acompanhada da tabela de resultados.

Figura 36 – Exemplo de saída gráfica acompanhada de tabela de resultados com a análise da área de preservação permanente em função de três cenários hidrológicos arbitrados para uma seção transversal.



Fonte: o autor

Os resultados, para análises aprofundadas dos cenários, também são disponibilizados em tabela no formato de texto (*csv*), com separador ponto e vírgula (;), com as seguintes variáveis:

- *NomeCenario*: nome atribuído ao cenário;
- *EstacaoCodigo*: código da estação segundo a ANA;
- *Q_ref*: vazão de referência para o cenário, calculada por análise estatística dos dados;
- *H_calc*: cota para vazão de referência, calculada a partir de iteração na seção transversal ou curva chave;
- *Q_h*: vazão calculada para seção *H* considerando a cota *H_calc*;
Observação: enquanto *Q_ref* é proveniente da análise estatística da série de vazões, *Q_h* é obtida pela curva-chave ou pela equação de *Manning*, de forma que seus valores são aproximados, mas não necessariamente iguais. A comparação entre os valores de *Q_ref* e *Q_h* serve para verificar a confiabilidade do método utilizado para correlacionar cotas e vazões numa seção transversal;
- *Am*: área molhada quando $h = H_{calc}$;
- *Pm*: perímetro molhado quando $h = H_{calc}$;
- *Xa*: coordenada horizontal da borda esquerda do leito do rio quando $h = H_{calc}$;
- *Xb*: coordenada horizontal da borda direita do leito do rio quando $h = H_{calc}$;
- *largura*: largura do leito quando $h = H_{calc}$, i.e., $\|X_b - X_a\|$;

- L_{APP} : largura da faixa marginal da APP;
- $X_{a APP}$: coordenada horizontal do limite exterior da APP na margem esquerda;
- $H_{a APP}$: cota do terreno no limite exterior da APP na margem esquerda;
- $Q_{a APP}$: vazão necessária para inundação integral da APP na margem esquerda do rio;
- $TR_{a APP}$: tempo de recorrência para inundação integral da APP na margem esquerda do rio;
- $X_{b APP}$: coordenada horizontal do limite exterior da APP na margem direita;
- $H_{b APP}$: cota do terreno no limite exterior da APP na margem direita;
- $Q_{b APP}$: vazão necessária para inundação integral da APP na margem direita do rio; e
- $TR_{b APP}$: tempo de recorrência para inundação integral da APP na margem direita do rio.

3.3.3 Cálculo da probabilidade de inundação das faixas mínimas para recuperação de áreas de preservação permanente em área rural consolidada (ARC)

O art. 61-A, §§ 1º a 4º, da Lei nº 12.651/2012, define que nas áreas rurais consolidadas até 22.7.2008 as atividades agrossilvipastoris, de ecoturismo e de turismo rural podem permanecer nas APPs em faixa marginal de cursos d'água naturais, sendo exigida uma recuperação ambiental de uma faixa mínima, cuja extensão é função do tamanho da propriedade. Para propriedades com área superior a 4 MF (módulos fiscais), o art. 19, do Decreto nº 7.830/2012, estabelece valores especiais (Quadro 7).

Quadro 7 – Faixas mínimas para recuperação de áreas de preservação permanente em área rural consolidada (ARC) até 22.7.2008, utilizadas para atividades agrossilvipastoris, de ecoturismo e de turismo rural, em função do tamanho do imóvel rural.

ÁREA DO IMÓVEL	LARGURA DA FAIXA MÍNIMA PARA RECUPERAÇÃO AMBIENTAL (l_{ARC})
$A \leq 1$ MF	5 m
1 MF $< A \leq 2$ MF	8 m
2 MF $< A \leq 4$ MF	15 m
$A > 4$ MF	20 m, para rios com largura até 10 m e imóvel com área até 10 MF. Nos demais casos, metade da largura do curso d'água $\left(\frac{l_{rio}}{2}\right)$, observado o mínimo de 30 m e o máximo de 100 m.

Notas:

A = área do imóvel em módulos fiscais;

MF = módulo fiscal, unidade de medida agrária brasileira (cf. BRASIL, 1964, 1979a);

l_{ARC} = largura mínima da faixa marginal ao leito fluvial sujeita à recuperação ambiental;

l_{rio} = largura do rio.

Fonte: organizado pelo autor a partir de Brasil (2012a,b).

Cabe observar que o cenário de áreas rurais consolidadas para propriedades com área de 2 MF até 4 MF apresenta mesma faixa mínima de recuperação definida para regularização de núcleos urbanos informais por interesse específico (art. 65, § 2º, da Lei nº 12.651/2012), o que permite simular esse cenário.

Foram desenvolvidas rotinas para o cálculo da geometria da seção transversal em cada cenário hidrológico simulado, com as respectivas análises de probabilidade de inundação da faixa marginal mínima sujeita à recuperação ambiental. As faixas marginais são simuladas para quatro classes diferentes de propriedades em função do tamanho em módulos fiscais (variável *classeARC*, conforme definido no [Quadro 7](#)).

Para o cálculo da probabilidade de inundação das faixas marginais sujeitas à recuperação em ARC, foi utilizada a mesma função desenvolvida para o cálculo das áreas de preservação permanente, sem necessidade de adaptação.

As análises de geometria da seção transversal e probabilidades de inundação das faixas mínimas para recuperação ambiental em ARC têm seus resultados armazenados para cada cenário hidrológico em uma tabela denominada *E_<codigo_estacao>_TabelaResultadosCenariosARC_<classeARC>.csv*, cujas colunas representam as seguintes variáveis:

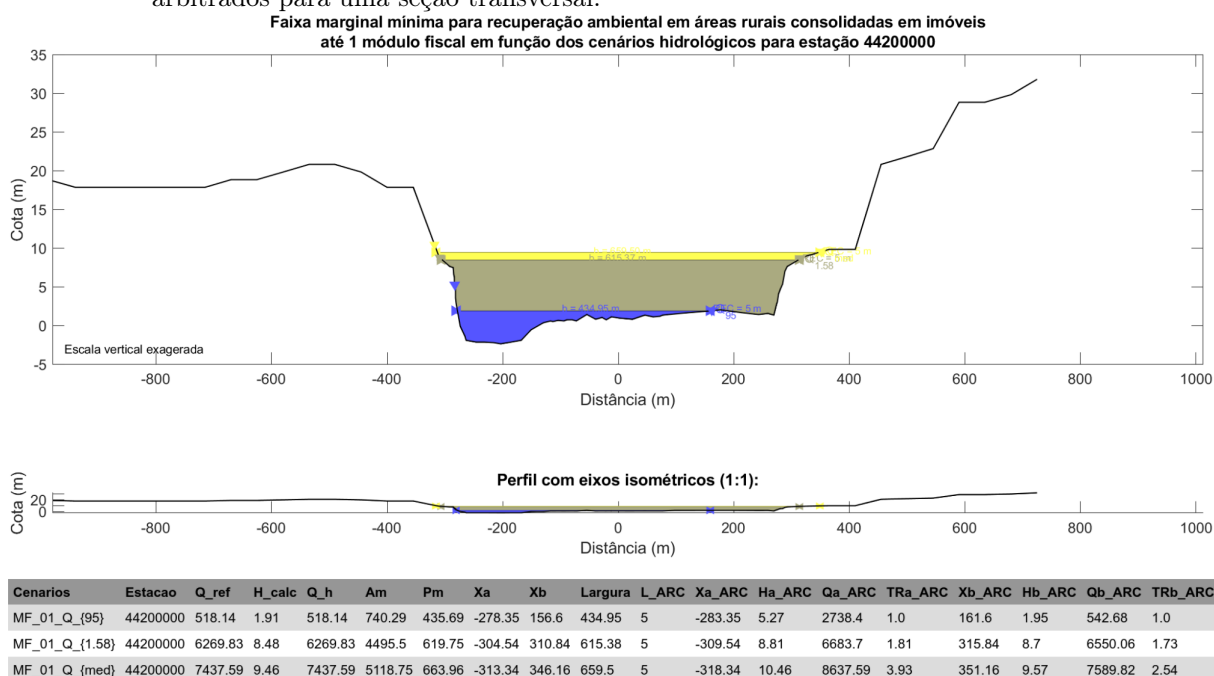
- *Cenario*: código do cenário com a concatenação entre a classe da propriedade e o cenário hidrológico simulado (*<classeARC>_<nomeCenario>*);
- *EstacaoCodigo*: código da estação em análise;
- *Q_{ref}*: vazão de referência para o cenário;
- *H_{calc}*: cota (*stage*) correspondente à *Q_{ref}*;
- *Q_h*: vazão calculada para seção *H* considerando a cota *H_{calc}*;
Observação: enquanto *Q_{ref}* é proveniente da análise estatística da série de vazões, *Q_h* é obtida pela curva-chave ou pela equação de Manning, de forma que seus valores são aproximados, mas não necessariamente iguais. A comparação entre os valores de *Q_{ref}* e *Q_h* serve para verificar a confiabilidade do método utilizado para correlacionar cotas e vazões numa seção transversal;
- *Am*: área molhada quando $h = H_{calc}$;
- *Pm*: perímetro molhado quando $h = H_{calc}$;
- *X_a*: coordenada horizontal da borda esquerda do leito do rio quando $h = H_{calc}$;
- *X_b*: coordenada horizontal da borda direita do leito do rio quando $h = H_{calc}$;
- *largura*: largura do leito quando $h = H_{calc}$, i.e., $\|X_b - X_a\|$;
- *L_{ARC}*: largura da APP (faixa marginal) considerando o cenário $H = H_{calc}$, o tamanho da propriedade em módulos fiscais (*A*) e a largura do leito do rio em metros ($l_{rio} = X_b - X_a$) por meio da função [CalculaARC\(A, l_{rio}\)](#);
- *X_{a,ARC}*: coordenada horizontal do limite externo da faixa mínima sujeita à recuperação da APP na margem esquerda do rio;
- *H_{a,ARC}*: cota do terreno no limite externo da faixa mínima sujeita à recuperação

da APP margem esquerda do rio;

- $Q_{a,ARC}$: vazão para inundação integral da faixa mínima sujeita à recuperação da APP na margem esquerda do rio;
- $TR_{a,ARC}$: tempo de recorrência para inundação integral da faixa mínima sujeita à recuperação da APP na margem esquerda do rio;
- $X_{b,ARC}$: coordenada horizontal do limite externo da faixa mínima sujeita à recuperação da APP na margem direita do rio;
- $H_{b,ARC}$: cota do terreno no limite externo da faixa mínima sujeita à recuperação da APP margem direita do rio;
- $Q_{b,ARC}$: vazão para inundação integral da faixa mínima sujeita à recuperação da APP na margem direita do rio;
- $TR_{b,ARC}$: tempo de recorrência para inundação integral da faixa mínima sujeita à recuperação da APP na margem esquerda do rio.

A Figura 37 apresenta um exemplo da saída gráfica da análise de três cenários hidrológicos numa seção transversal para propriedades com área até 1 MF acompanhada da tabela de resultados.

Figura 37 – Exemplo de saída gráfica acompanhada de tabela de resultados com a análise da faixa mínima de área de preservação permanente sujeita à recuperação ambiental para áreas rurais consolidadas em imóveis até um 1 MF (módulo fiscal) considerando três cenários hidrológicos arbitrados para uma seção transversal.



Fonte: o autor.

3.3.4 Função distribuição acumulada (CDF) em razão da cota da seção transversal do rio

Para possibilitar a consulta da probabilidade de cheias nas margens da seção transversal em função da altura h (*stage*), para cada estação foi definida a tabela CDF_{st} que armazena as seguintes variáveis (colunas):

- *Estacao*: código da estação;
- h : cota simulada;
- $Q(h)$: vazão obtida pela curva-chave para a cota h ;
- $Am(h)$: área molhada para cota h ;
- $Pm(h)$: perímetro molhado para cota h ;
- $Xa(h)$: coordenada horizontal do limite externo da margem esquerda do rio na cota h ;
- $Xb(h)$: coordenada horizontal do limite externo da margem direita do rio na cota h ;
- $Largura(h)$: largura do leito do rio na cota h ;
- $p(h)$: probabilidade para inundação integral do leito na cota h ;
- $TR(h)$: tempo de recorrência (probabilidade) para inundação integral do leito na cota h .

Cada linha da tabela corresponde a um estágio no valor de h , com iterações em intervalos δ_h , partindo-se do primeiro ponto acima do talvegue ($h = h_{min} + \delta_h$) até o ponto mais elevado da seção transversal ($h = h_{max}$).

Na forma matricial:

$$[CDF_{st}] = \begin{bmatrix} h_1 & Q|_{h_1} & Am|_{h_1} & Pm|_{h_1} & Xa|_{h_1} & Xb|_{h_1} & Largura|_{h_1} & p|_{h_1} & TR|_{h_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_n & Q|_{h_n} & Am|_{h_n} & Pm|_{h_n} & Xa|_{h_n} & Xb|_{h_n} & Largura|_{h_n} & p|_{h_n} & TR|_{h_n} \end{bmatrix} \left[\frac{h_{max} - h_{min}}{\delta_h} + 1 \right] \times 9 \quad (1)$$

Onde:

$$h_i = \begin{cases} h_1 + i \cdot \delta_h & , \forall i \in \left\{ \mathbb{N} \left| 1 \leq i \leq \left\lfloor \frac{h_{max} - h_{min}}{\delta_h} \right\rfloor \right. \right\} \\ h_{max} & , \forall i = \left\lfloor \frac{h_{max} - h_{min}}{\delta_h} \right\rfloor + 1 \end{cases} \quad (2)$$

A rotina desenvolvida pode ser útil no futuro para verificar alterações na cota de cheia para um determinado período de recorrência, por meio da análise de seções transversais e trechos da série de dados.

3.3.5 Cálculo da relação entre declividade e rugosidade para equação de Manning

O conhecimento da declividade (S) e do coeficiente de rugosidade de Manning (η) é de extrema utilidade para análise de modelos hidrológicos. Por isso, foi criada uma função adicional que calcula o valor de K ($= \sqrt{S}/\eta$) a partir do fornecimento da vazão, curva-chave, coordenadas da seção transversal e valores de área molhada e perímetro molhado iniciais (em regra, estes dois últimos parâmetros são nulos, mas podem ser necessários em alguns casos, e.g., quando a seção transversal tiver sido extraída de um modelo digital de terreno).

De conhecimento dos valores de K , é possível ao usuário obter a declividade do canal fluvial por meio de medições diretas ou indiretas (e.g., modelos digitais de elevação) e obter o coeficiente de rugosidade de Manning (η) para aquele local e em condições hidrológicas (cenários) diversas.

3.3.6 Códigos-fonte das rotinas desenvolvidas para fase de análise individual

Os códigos-fonte das rotinas desenvolvidas para fase de análise individual dos dados das estações fluviométricas estão transcritos no [Apêndice C, subseção C.2.3](#), cujos *hyperlinks* para acesso são informados no [Quadro C.3](#).

3.4 ANÁLISE INTEGRADA

A análise integrada permite agrupar os resultados individuais de cada estação dentro de uma delimitação geográfica para fins de comparação em cada cenário hidrológico da área total ambientalmente protegida e a distribuição da probabilidade de inundação integral das faixas marginais (perturbação aos ecossistemas), por meio de tabelas de dados concatenados e consolidados, bem como figuras com esquema de seções transversais hipotéticas para representação dos resultados.

3.4.1 Delimitação geográfica

O território nacional é dividido em 8 grandes bacias hidrográficas, codificadas pela ANA na tabela *Bacias* de 1 a 8, sendo reservado o código 9 para outras bacias, pois existe a possibilidade de o sistema armazenar dados de outros países da América do Sul que não compartilham bacias hidrográficas com o Brasil. As opções de delimitação geográfica para análise integrada são apresentadas no [Quadro 8](#). As listas de estações selecionadas por bacia hidrográfica são definidas a partir do cruzamento de códigos das estações analisadas com a tabela que define os códigos das bacias hidrográficas. Quando o usuário desejar simular todas as bacias, deverá utilizar a variável $Bacia = 0$. Os arquivos com os resultados

(tabelas e figuras) são armazenados no subdiretório “[ANALISE_INTEGRADA](#)” com a adição do prefixo da bacia no início do nome do arquivo de resultado.

Quadro 8 – Códigos das bacias hidrográficas.

CÓDIGO	SIGLA	BACIA
0	BRASIL	Brasil
1	AMZ	Rio Amazonas
2	TOC	Rio Tocantins
3	ATN	Atlântico, trecho norte/nordeste
4	SFO	Rio São Francisco
5	ATL	Atlântico, trecho leste
6	PRN	Rio Paraná
7	URU	Rio Uruguai
8	ATS	Atlântico, trecho sudeste
9	OUT	Outras

Fonte: o autor a partir de dados de [ANA \(2020\)](#).

3.4.2 Integração dos resultados individuais

A primeira tarefa realizada é a concatenação das tabelas de resultados individuais em um único arquivo. Para as áreas de preservação permanente (APP), os resultados de cada estação são concatenados na tabela *<prefixoBacia>_RelacoesCenariosAPPintegrado.csv*. E para as áreas rurais consolidadas (ARC), os resultados individuais são indexados pela classe do imóvel rural e concatenados nas tabelas *<prefixoBacia>_RelacoesCenariosARCintegrado_<classeImovelRural>.csv*.

A análise integrada dos resultados para os cenários hidrológicos de APP envolve a comparação da extensão linear total da área protegida para cada cenário (AP), compreendida como a soma das larguras dos leitos fluviais (l_{rio}) e as duas faixas marginais de área de preservação permanente (l_{APP}), para cada estação j e em cada cenário hidrológico i :

$$AP \left|_{\text{cenário } i} = \sum_{j=1}^{ne} (l_{rioj} + 2 \cdot l_{APPj}) \right|_{\text{cenário } i} \quad (3)$$

Onde i se refere ao cenário hidrológico; j é o número da estação fluviométrica; ne é o número total de estações.

Para áreas rurais consolidadas (ARC), calcula-se a área protegida efetiva (APE), compreendida como a soma das larguras dos leitos fluviais (l_{rio}) e as duas faixas marginais mínimas sujeitas à recuperação ambiental (l_{ARC}), em função do tamanho do imóvel rural ([Quadro 7](#)), para cada estação j e cenário hidrológico k numa determinada classe do imóvel:

$$APE \left|_{\text{cenário } k} = \sum_{j=1}^{ne} (l_{rioj} + 2 \cdot l_{ARCj}) \right|_{\text{cenário } k} \quad (4)$$

Onde j é o número da estação fluviométrica; k é o cenário hidrológico para uma

determinada classe do imóvel rural em função da área da propriedade (cf. Quadro 7), e.g., “MF_01_Q_{95}” para designar o cenário de vazão de permanência Q_{95} para imóveis com área inferior a 1 MF; ne é o número total de estações.

Para elaboração de gráficos que apresentam os resultados, optou-se por apresentar a área total protegida para cada cenário sobre uma seção transversal padronizada (hipotética). Para isso, as cotas dos cenários simulados da seção transversal de cada estação foram padronizadas, sendo a altura do cenário com cotas mais elevadas (h_{max}) considerada igual a um ($y_{max} = 1$). Os demais cenários tiveram sua altura transformada para a fração correspondente à amplitude da seção transversal até o nível do cenário mais alto, adotando-se altura zero ($y_{min} = 0$) para o talvegue (h_{min}). Para confecção dos gráficos de análise integrada, é adotada para cada cenário a altura média relativa (H_{rel}) a partir de todas as estações analisadas.

$$y_i = \frac{h_{cenario\ i} - h_{min}}{h_{max} - h_{min}} \quad (5)$$

Onde $y \in [0; 1]$, h_{min} é a cota do talvegue (ponto mais baixo da seção transversal) e h_{max} é a cota do cenário mais alto simulado.

Quando numa determinada estação algum cenário não pode ser calculado, atribui-se $h = NaN$. Isso acontece quando a vazão de referência não é abrangida pela curva-chave ou quando a respectiva cota extrapolar os limites da seção transversal. Essas estações são excluídas da análise integrada.

Para confecção dos gráficos de análise integrada, é adotada para cada cenário a altura média relativa das cheias (H_{rel}) a partir de todas as estações analisadas.

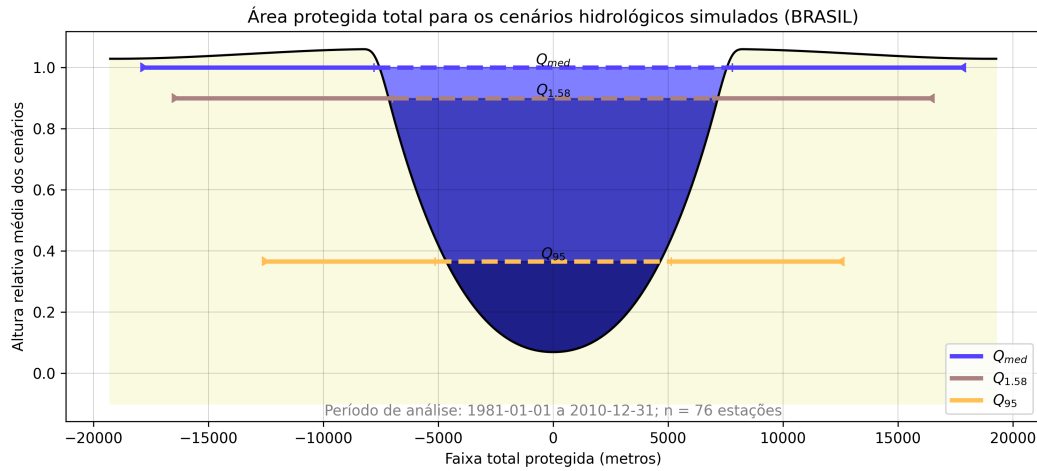
$$H_{rel, i} = \sum_{j=1}^{n_{estações}} y_j \Big|_{\text{cenário } i} \quad (6)$$

Onde $H_{rel, i}$ é a altura relativa média das cheias para o cenário i e $n_{estações}$ é o número de estações aptas para análise que apresentaram resultados determinados para todos os cenários hidrológicos simulados.

Para áreas rurais consolidadas, o procedimento é análogo, com a diferença que os cenários são segregados pela classe do imóvel rural em função de sua área (k).

A Figura 38 sintetiza os resultados para APP integral e a Figura 39 apresenta o mesmo exemplo para ARC em imóvel com até 1 MF.

Figura 38 – Síntese dos resultados para análise integrada da área total protegida (leito do rio e áreas de preservação permanente marginais) para cada cenário hidrológico simulado.

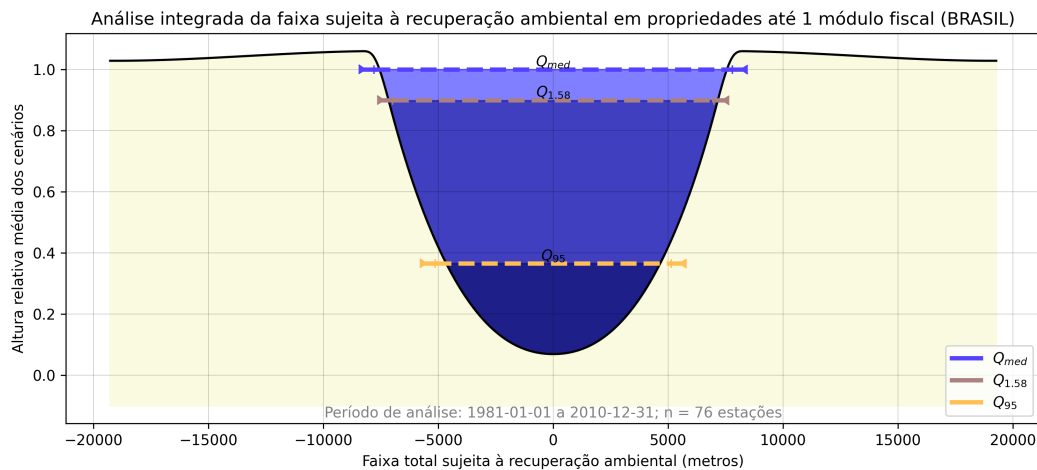


	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{APP}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{APP}$
Q_{med}	1.0	15604.3	9880.0	35364.3
$Q_{1,58}$	0.9	13992.32	9310.0	32612.32
Q_{95}	0.36	10265.23	7260.0	24785.23

Notas: APP = área de preservação permanente; H_{rel} = altura relativa média dos cenários em relação ao talvegue; Q_{med} = média das cheias anuais; $Q_{1,58}$ = cheia anual com tempo de recorrência de 1,58 ano (vazão dominante ou de margens plenas); Q_{95} = vazão média diária com 95% de probabilidade de ser excedida (vazão de permanência); $\sum Largura_{APP}$ = largura total das APPs em faixas marginais aos leitos fluviais; $\sum Largura_{rio}$ = largura total dos leitos fluviais; $\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{APP}$ = área total protegida.

Fonte: o autor.

Figura 39 – Síntese dos resultados para análise integrada da faixa mínima sujeita à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) em propriedades com área até um módulo fiscal para cada cenário hidrológico simulado.



	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	15604.3	380.0	16364.3
$Q_{1,58}$	0.9	13992.32	380.0	14752.32
Q_{95}	0.36	10265.23	380.0	11025.23

Notas: ARC = área rural consolidada; H_{rel} = altura relativa média dos cenários em relação ao talvegue; Q_{med} = média das cheias anuais; $Q_{1,58}$ = cheia anual com tempo de recorrência de 1,58 ano (vazão dominante ou de margens plenas); Q_{95} = vazão média diária com 95% de probabilidade de ser excedida (vazão de permanência); $\sum Largura_{ARC}$ = largura total das faixas marginais aos leitos fluviais sujeitas à recuperação ambiental em ARCs; $\sum Largura_{rio}$ = largura total dos leitos fluviais; $\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$ = área total sujeita à recuperação ambiental em ARC.

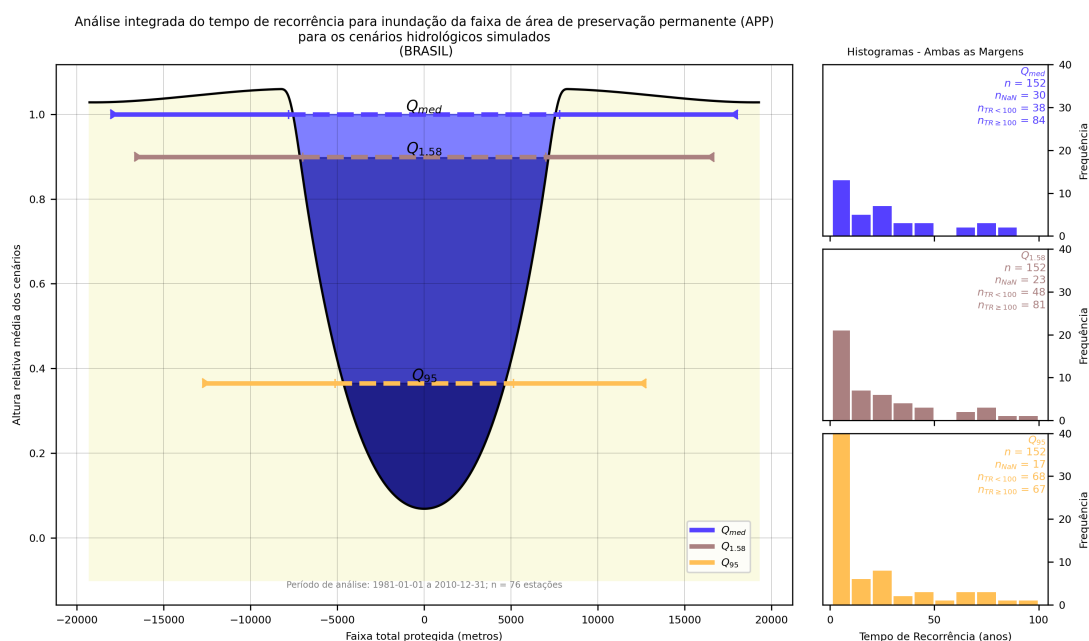
Fonte: o autor.

3.4.3 Histogramas para análise da probabilidade de inundação integral da faixa marginal em cada cenário

Para cada cenário hidrológico simulado, em cada margem do rio há uma faixa de APP sujeita à recuperação ambiental integral ou parcial (áreas rurais consolidadas). Considerando que, em regra, as margens não são simétricas, o tempo de recorrência para inundação integral da APP nas margens esquerda (TR_a) e direita (TR_b) do rio são diferentes, motivo pelo qual, para fins de análise integrada, cada margem será considerada como uma amostra, de forma que cada estação fornece duas amostras por cenário simulado.

Com o objetivo de apresentar os resultados para fins de análise integrada, foram elaborados gráficos que apresentam o histograma dos tempos de recorrência para inundação integral de cada faixa marginal de APP de todas as estações analisadas, considerando cada cenário hidrológico simulado. O mesmo procedimento foi empregado para faixa marginal mínima a ser recuperada em ARC (Quadro 7) em todas as estações analisadas, considerando o tamanho da propriedade e o cenário hidrológico simulado. As Figuras 40 e 41 sintetizam os resultados para APP integral e para faixa mínima sujeita à recuperação ambiental em imóveis rurais até 1 MF em ARC.

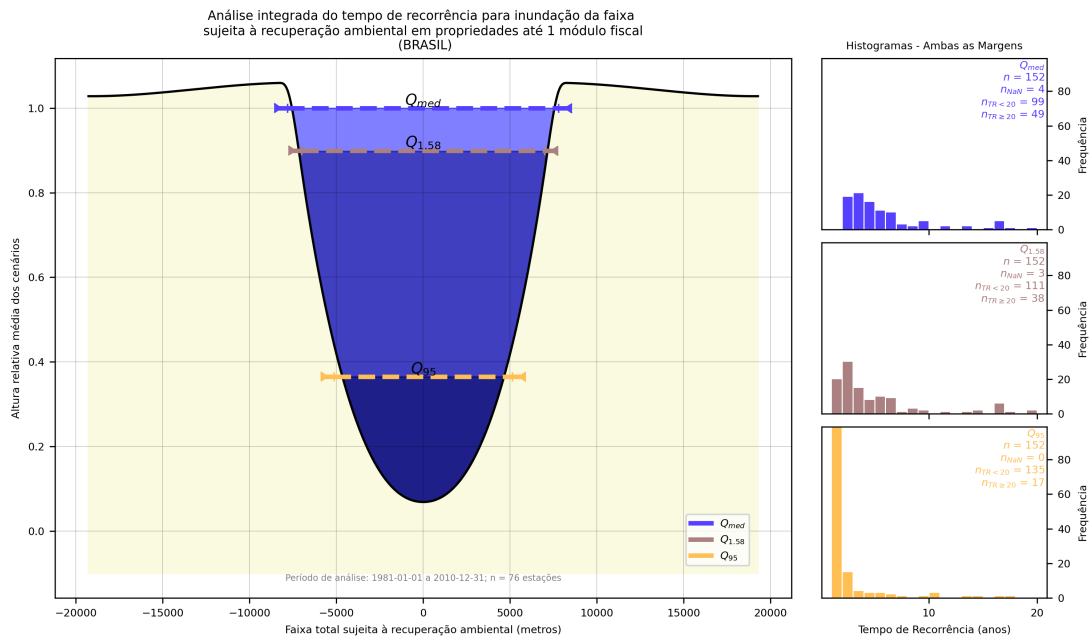
Figura 40 – Histogramas com a síntese dos resultados para análise integrada da probabilidade de inundação integral da faixa de área de preservação permanente (APP) para cada cenário hidrológico simulado.



Notas: Q_{med} = média das cheias anuais; $Q_{1,58}$ = cheia anual com tempo de recorrência de 1,58 ano (vazão dominante ou de margens plenas); Q_{95} = vazão média diária com 95% de probabilidade de ser excedida (vazão de permanência).

Fonte: o autor.

Figura 41 – Histogramas com a síntese dos resultados para análise integrada da probabilidade de inundação integral da faixa mínima sujeita à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) em propriedades com área até 1 MF (módulo fiscal) para cada cenário hidrológico simulado.



Notas: Q_{med} = média das cheias anuais; $Q_{1,58}$ = cheia anual com tempo de recorrência de 1,58 ano (vazão dominante ou de margens plenas); Q_{95} = vazão média diária com 95% de probabilidade de ser excedida (vazão de permanência).

Fonte: o autor.

3.4.4 Relatório e interfaces gráficas para visualização dos resultados

Concluídas as análises dos dados e geradas as figuras e tabelas de resultados, o programa gera um relatório em linguagem \LaTeX , que permite sua compilação em um único arquivo no formato eletrônico de arquivo de documento para preservação de longo prazo, conhecido como PDF/A, definido conforme a norma ISO 19005, para leitura e análise pelo usuário, independente do sistema operacional utilizado.

Para facilitar a visualização e interação do usuário com os resultados, o programa gera um arquivo no formato *KML* (*Keyhole Markup Language*), que consiste numa linguagem de marcação padrão *XML* (*Extensible Markup Language*) focada na visualização geográfica de dados, incluindo anotações, mapas e imagens. Atualmente a linguagem é livre, mantida e normatizada pelo *Open Geospatial Consortium* (OGC, 2015).

Por meio de programas para visualização geoespacial, pode-se navegar e ao clicar no marcador de uma estação abre-se uma página (Figura 42) com os dados gerais, gráfico com as séries de cotas e vazões diárias (em escala linear e logarítmica - útil para visualizar pequenas vazões), histograma de vazões, curva de permanência, seções transversais medidas, gráfico com estimativa da cota de início da planície de inundação, áreas de preservação permanente e faixas mínimas para recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas, geradas para cada cenário hidrológico atribuído, bem como a análise de perturbação das faixas marginais (seções transversais hipotéticas acompanhadas de histogramas com o tempo de recorrência para inundação integral em cada cenário simulado).

Figura 42 – Exemplo conceitual da interface gráfica de resultados para uma estação. Por meio da ferramenta *web* é possível clicar na estação e abrir um balão com os resultados apresentados em abas.



Fonte: o autor.

Ao final, é gerada uma interface integrada para internet que permite a visualização dos dados diretamente no navegador, sem a necessidade de programas adicionais, a qual pode servir de meio para divulgação de resultados e discussão dos critérios regulamentares com a comunidade técnica e científica.

A apresentação gráfica dos resultados serve tanto para o programa *Google Earth Pro*, quanto para a interface no navegador²⁰, pois utilizam do mesmo código-fonte para o hipertexto. As Figuras 43 a 47 reproduzem a interface gráfica com os resultados da análise de uma estação.

Além dos marcadores que permitem a visualização dos resultados de cada estação, ao clicar no interior do polígono das bacias hidrográficas (Figura 48) ou selecionando o território nacional (Figura 49), abre-se uma página com os resultados da análise integrada com o quantitativo consolidado de áreas de preservação permanente e faixas mínimas para recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas, geradas para cada cenário hidrológico atribuído, bem como a análise de perturbação das faixas marginais por meio de histogramas para auxiliar na tomada de decisão.

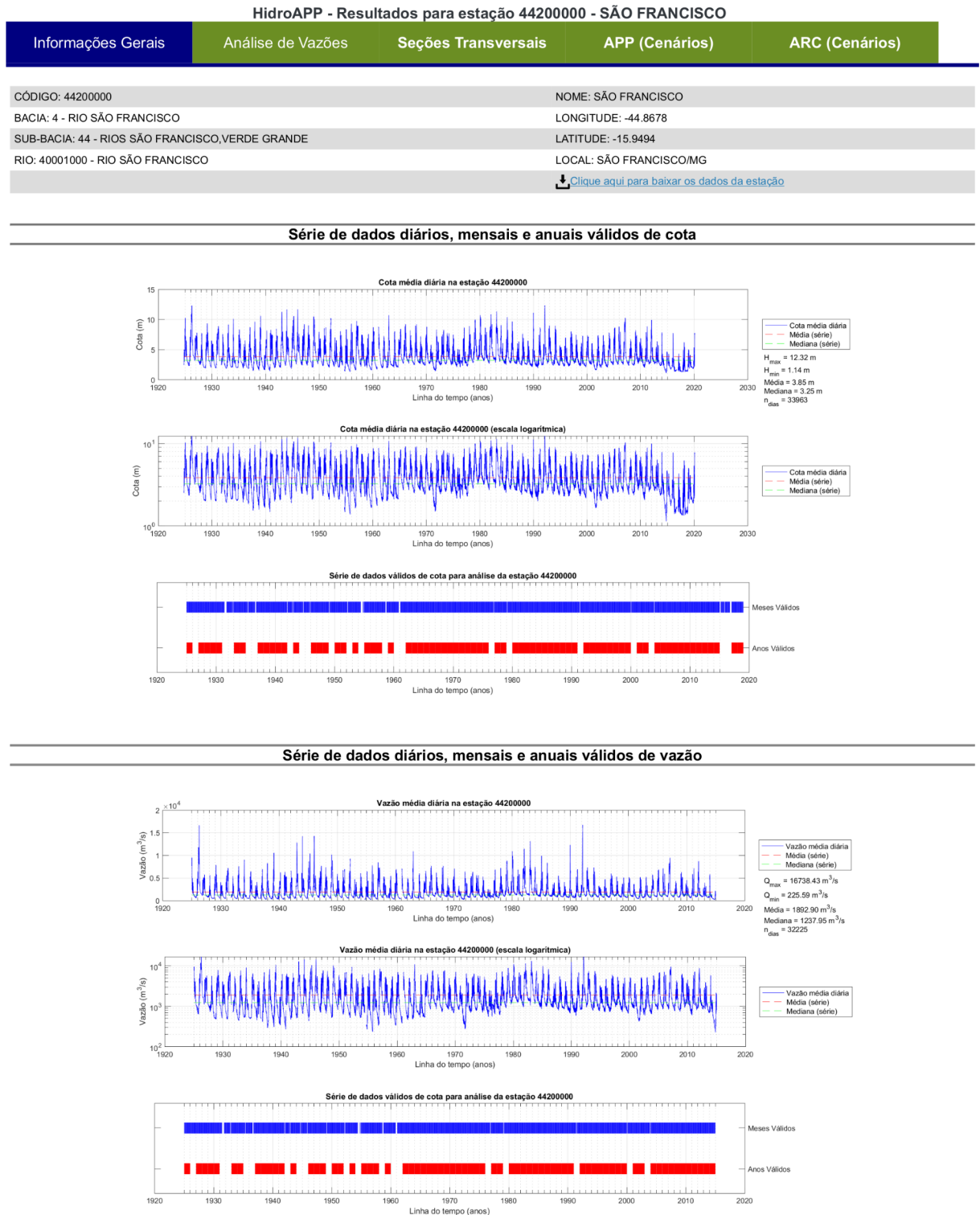
As Figuras 50 a 53 reproduzem a interface gráfica com os resultados da análise para todo o território continental brasileiro. A saída gráfica para bacias hidrográficas é análoga.

3.4.5 Códigos-fonte das rotinas desenvolvidas para fase de análise integrada

Os códigos-fonte das rotinas desenvolvidas para fase de análise integrada dos resultados das análises individuais das estações fluviométricas estão disponíveis no Apêndice C, cuja descrição e *hyperlinks* para acesso podem ser consultados na subseção C.3.3, Quadro C.4. As Figuras C.14 a C.17 representam os fluxogramas detalhados da fase de análise integrada.

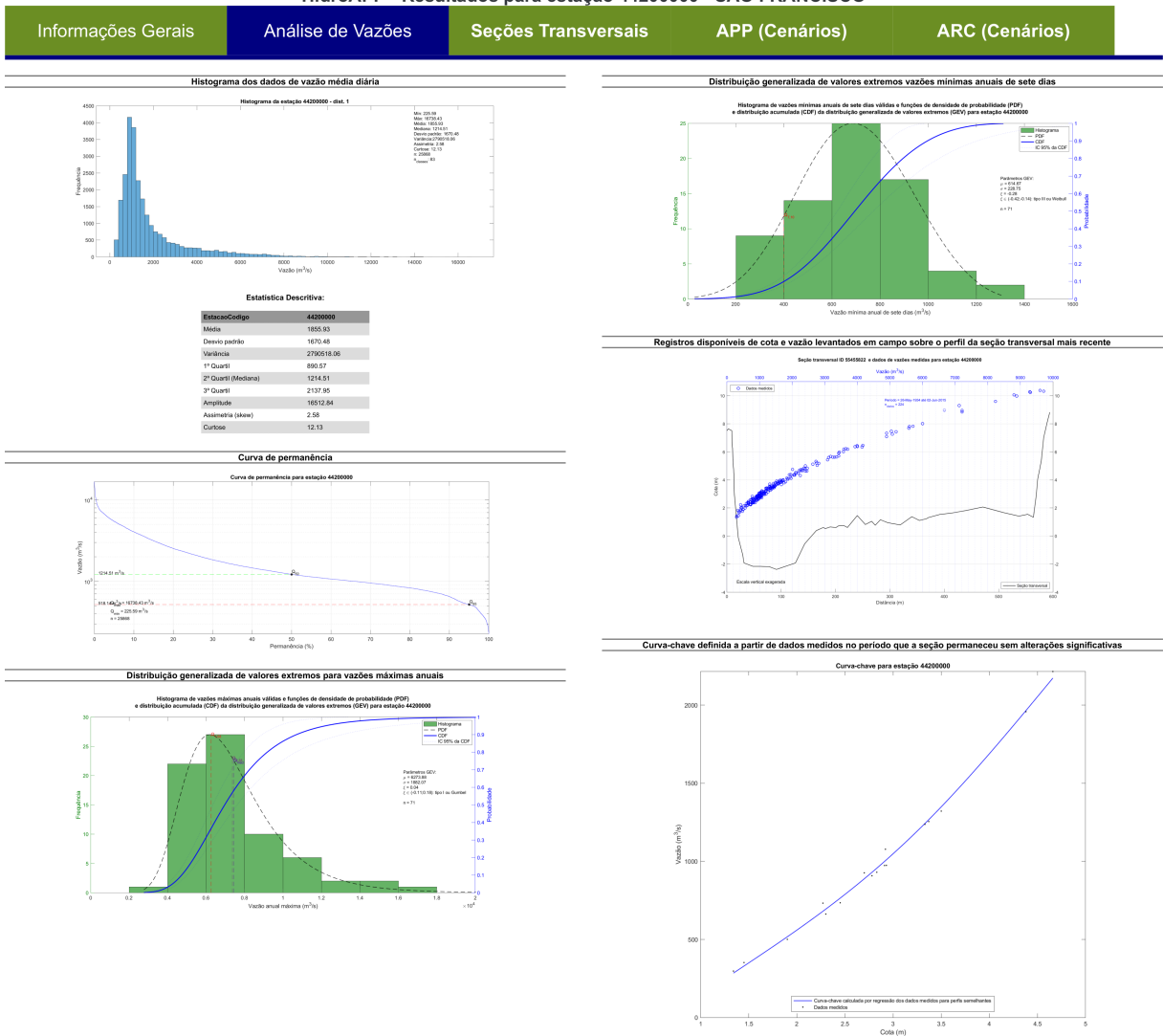
²⁰ Cf. <http://www.labhidro.ufsc.br/hidroapp>.

Figura 43 – Interface gráfica de resultados para uma estação. Dados gerais e gráficos com as séries históricas diárias de cotas e vazões.



Fonte: o autor.

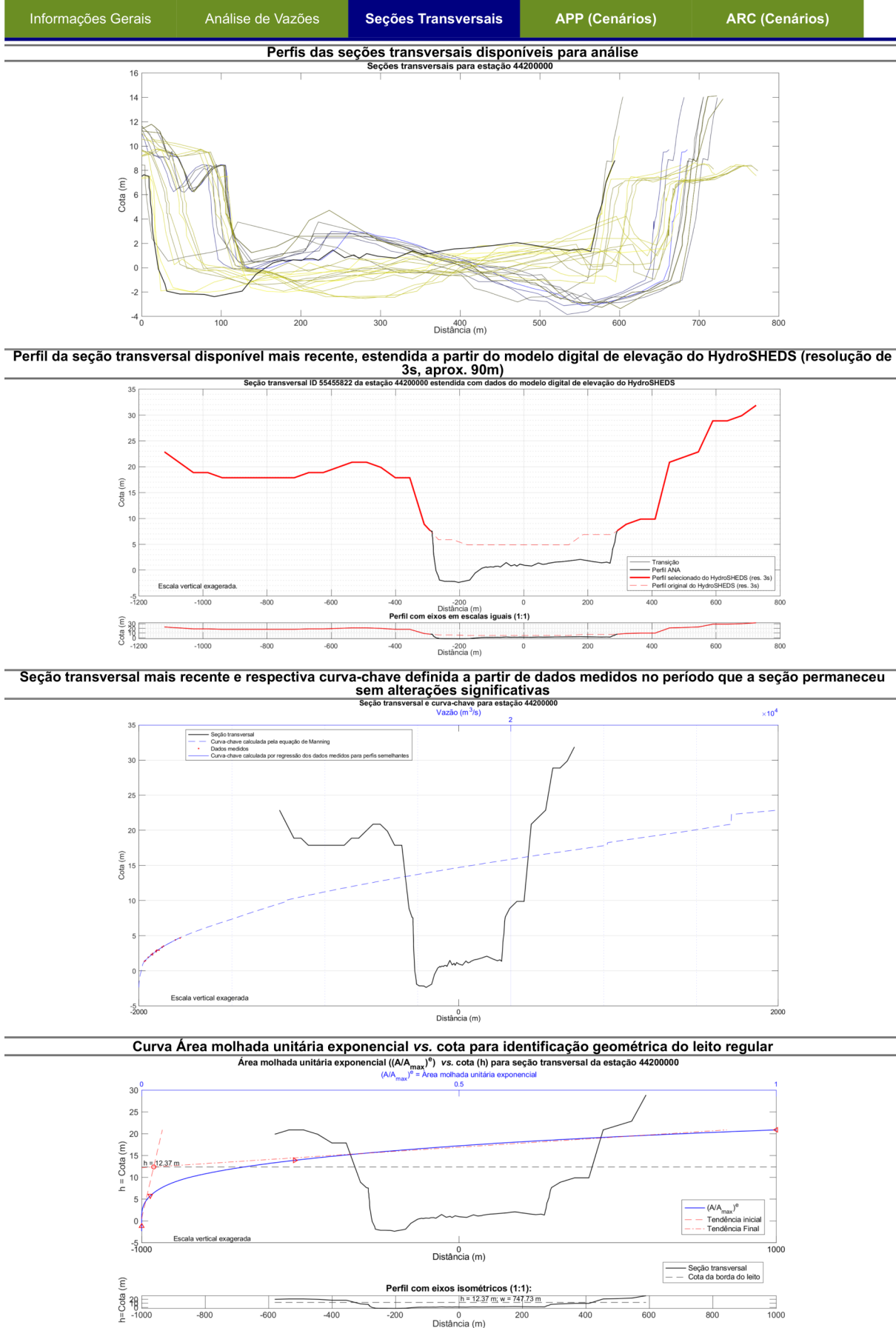
Figura 44 – Interface gráfica de resultados para uma estação. Análise de vazões.
 HidroAPP - Resultados para estação 44200000 - SÃO FRANCISCO



Fonte: o autor.

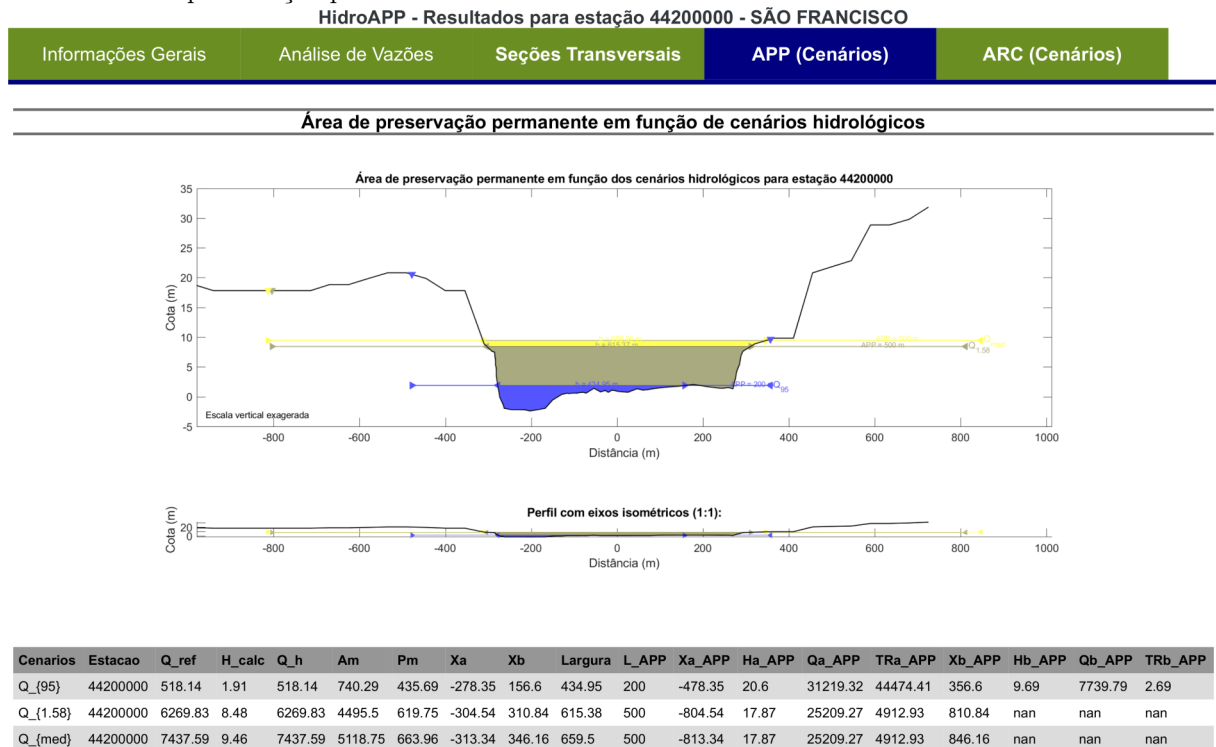
Figura 45 – Interface gráfica de resultados para uma estação. Análise de seções transversais.

HidroAPP - Resultados para estação 44200000 - SÃO FRANCISCO



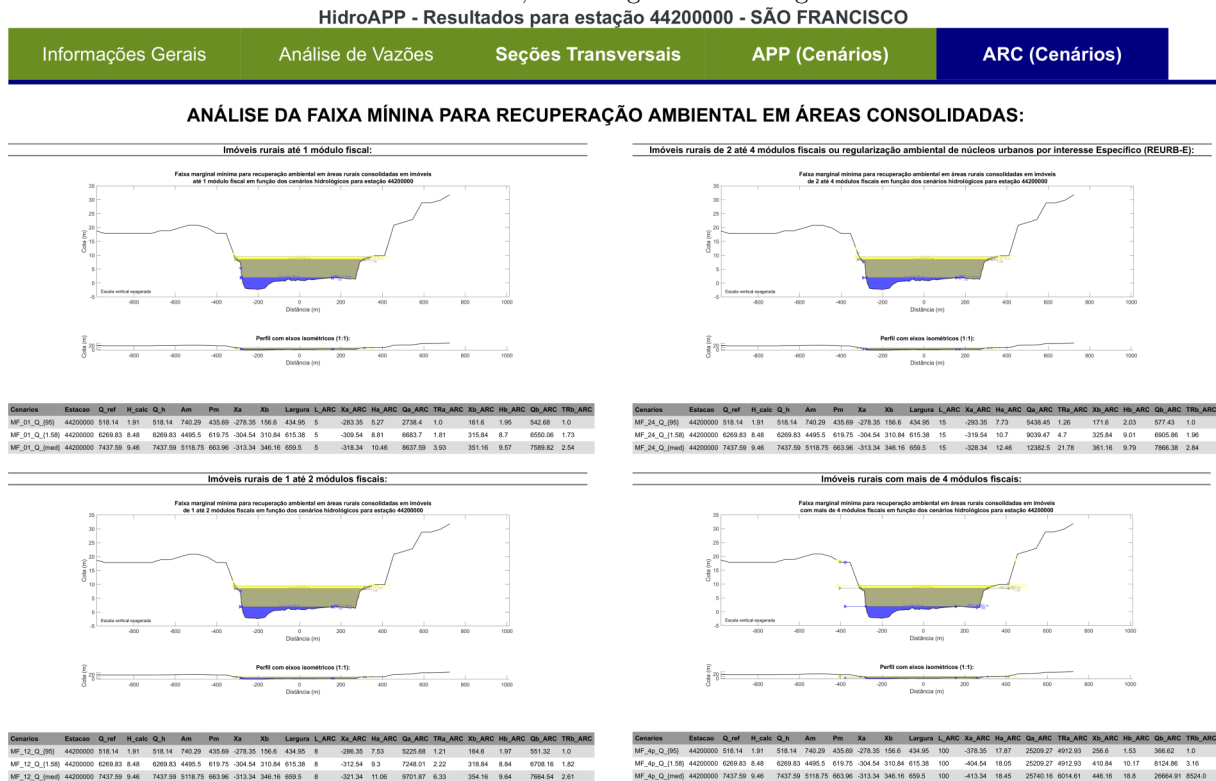
Fonte: o autor.

Figura 46 – Interface gráfica de resultados para uma estação. Análise de cenários hidrológicos para área de preservação permanente.



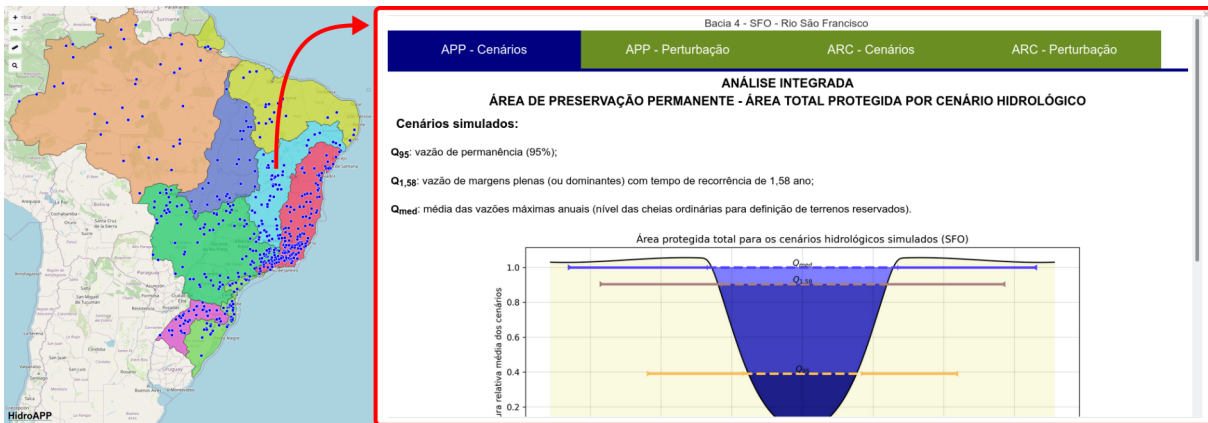
Fonte: o autor.

Figura 47 – Interface gráfica de resultados para uma estação. Análise de cenários hidrológicos para faixa mínima sujeita à recuperação ambiental em área de preservação permanente em áreas rurais consolidadas (ARC) para imóveis rurais com dimensões até 1 MF (módulo fiscal). Para as demais classes de imóveis rurais, a saída gráfica é análoga.



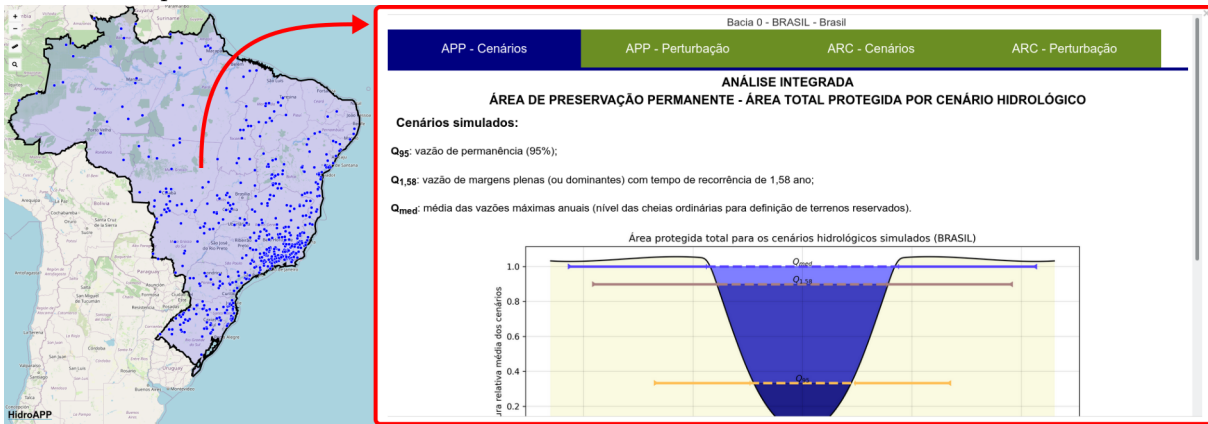
Fonte: o autor.

Figura 48 – Exemplo conceitual da interface gráfica de resultados para uma bacia hidrográfica. Por meio da ferramenta *web* é possível clicar na estação e abrir um balão com os resultados apresentados em abas.



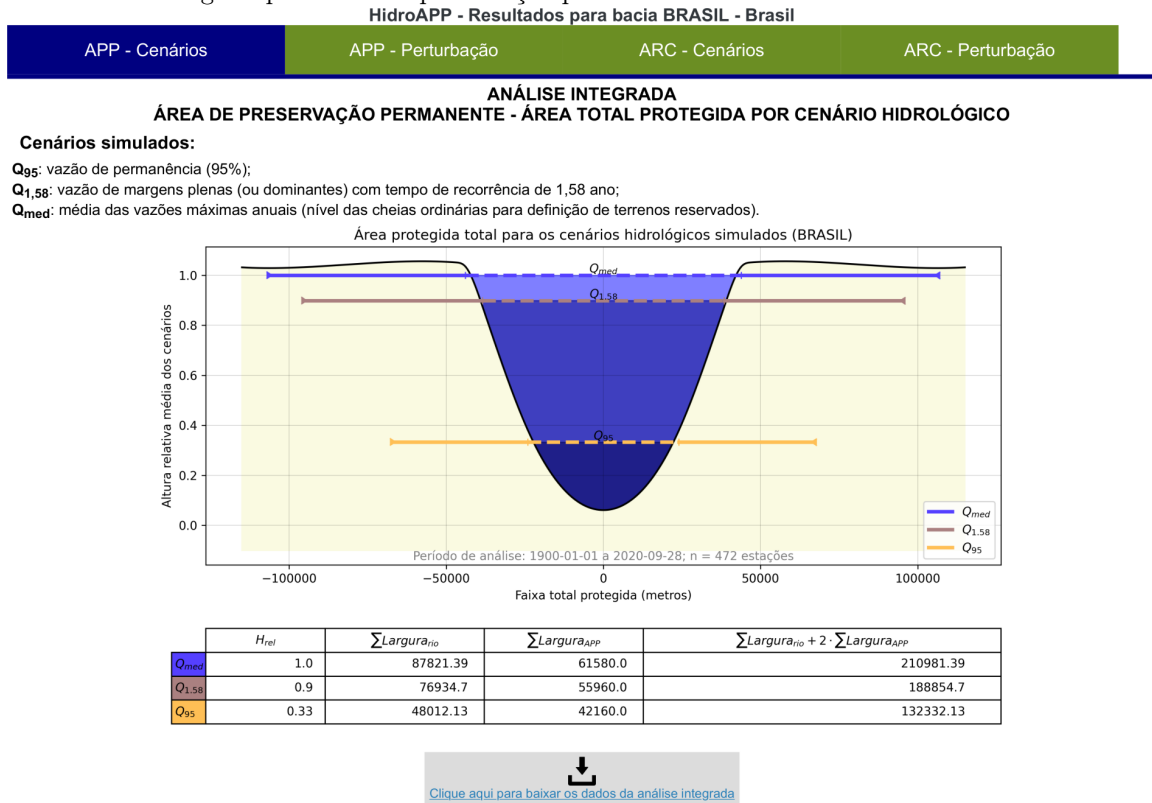
Fonte: o autor.

Figura 49 – Exemplo conceitual da interface gráfica de resultados para o território continental do Brasil. Por meio da ferramenta *web* é possível clicar na estação e abrir um balão com os resultados apresentados em abas.



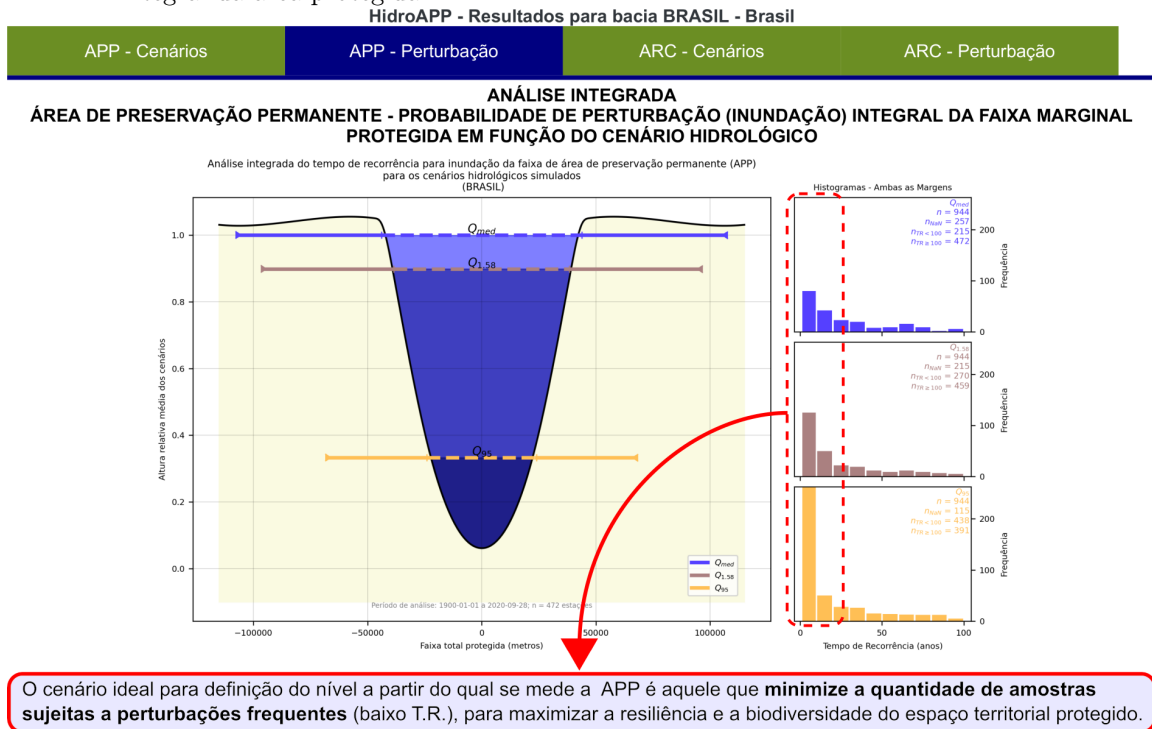
Fonte: o autor.

Figura 50 – Interface gráfica de resultados para o território continental brasileiro. Análise de cenários hidrológicos para área de preservação permanente.



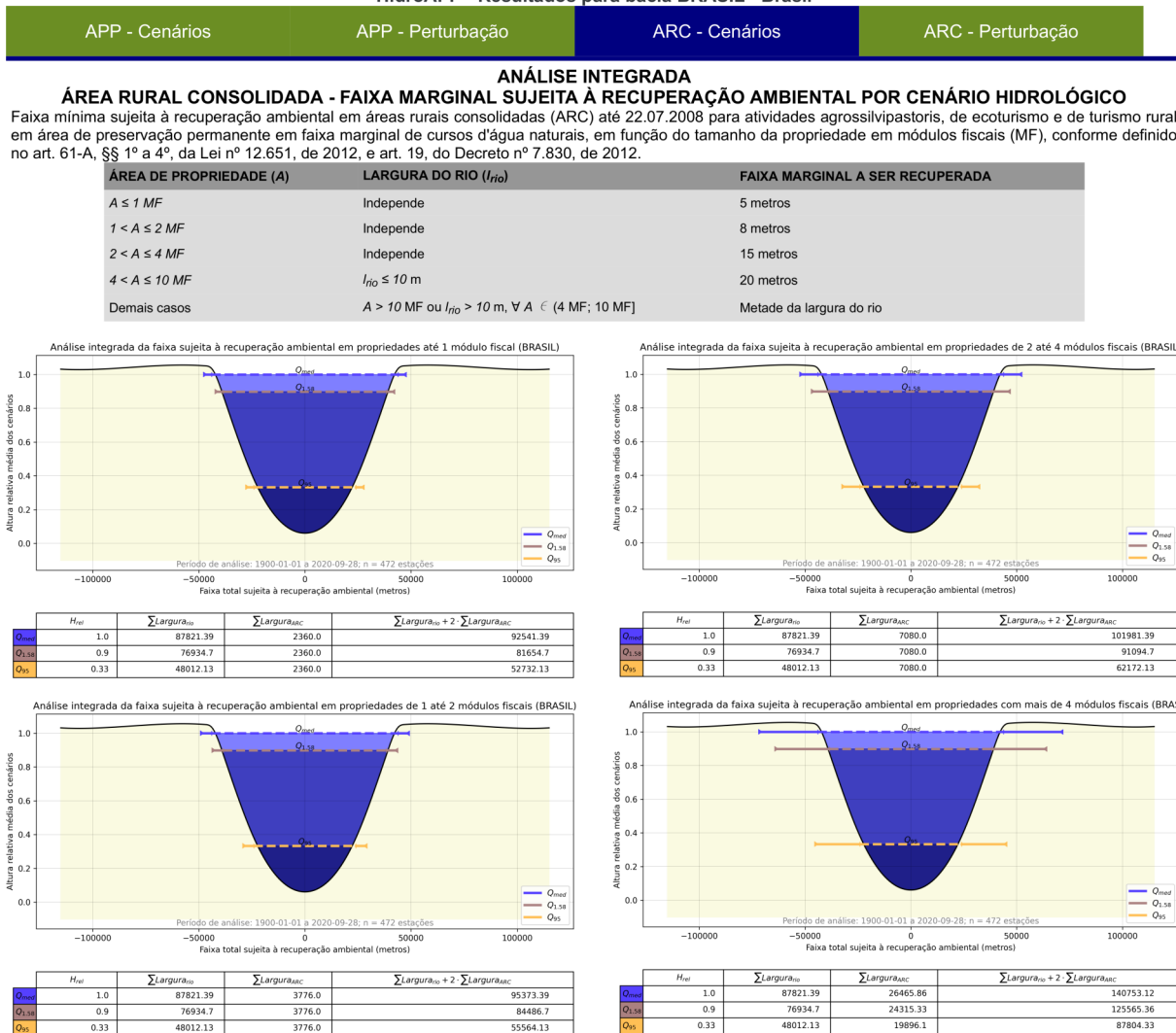
Fonte: o autor.

Figura 51 – Interface gráfica de resultados para o território continental brasileiro. Análise de cenários hidrológicos para perturbação das faixas marginais de preservação permanente (APP) por meio de histogramas representando a distribuição do tempo de recorrência para inundação integral da área protegida.



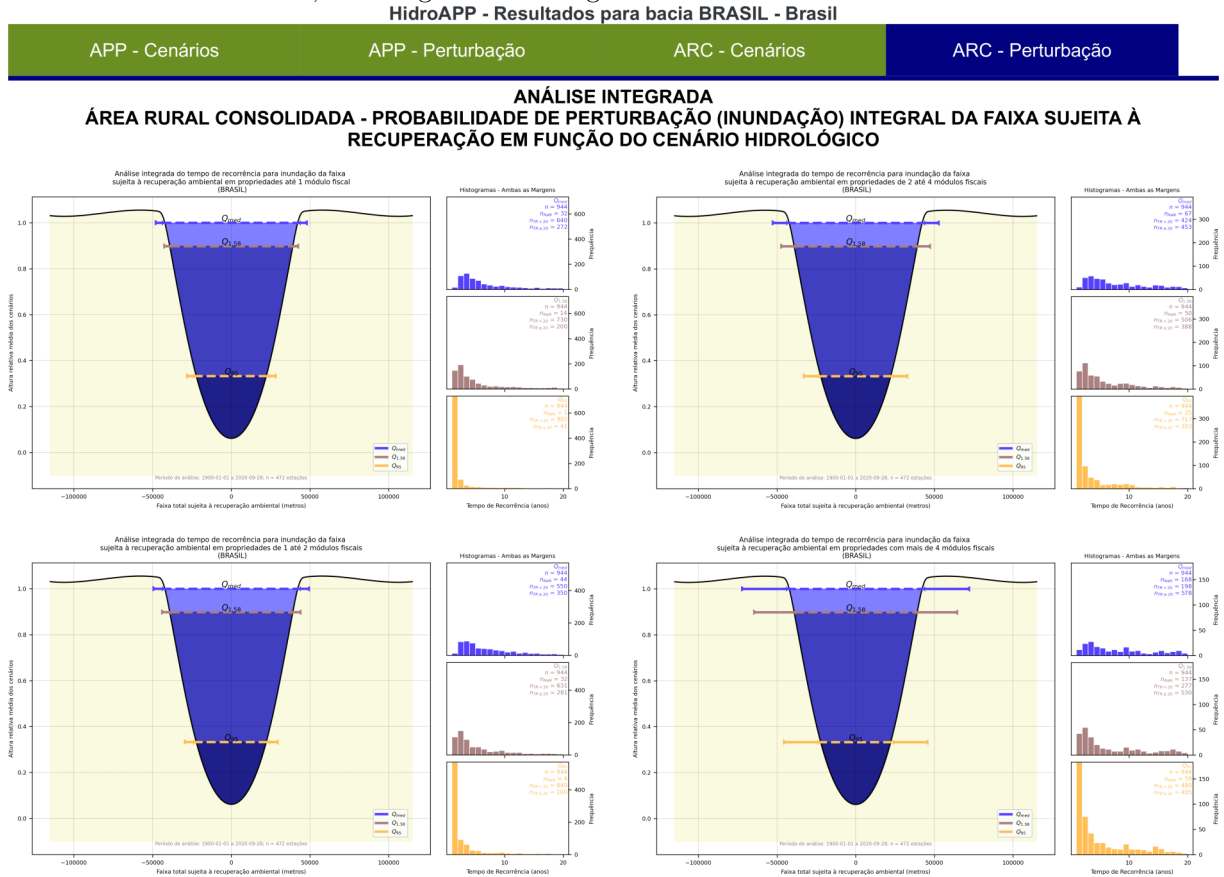
Fonte: o autor.

Figura 52 – Interface gráfica de resultados para o território continental brasileiro. Análise de cenários hidrológicos para faixa mínima sujeita à recuperação ambiental em área de preservação permanente (APP) em áreas rurais consolidadas (ARC) para imóveis rurais com dimensões até 1 MF (módulo fiscal). Para as demais classes de imóveis rurais, a saída gráfica é análoga.



Fonte: o autor.

Figura 53 – Interface gráfica de resultados para o território continental brasileiro. Análise de cenários hidrológicos para perturbação da faixa mínima sujeita à recuperação ambiental em área de preservação permanente em áreas rurais consolidadas (ARC), para imóveis rurais com dimensões até 1 MF (módulo fiscal), por meio de histogramas representando a distribuição do tempo de recorrência para inundação integral da área protegida. Para as demais classes de imóveis rurais, a saída gráfica é análoga.



3.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Na falta de norma expressa definindo o método, as atividades periciais (forenses ou administrativas) devem observar os critérios predominantemente aceitos pelos especialistas da área do conhecimento da qual se originou (BRASIL, 2015, art. 473, inciso III). O programa *HidroAPP* – objeto do presente capítulo – possibilita a realização de análises de cenários para propor critérios para regulamentação da definição hidrológica do leito regular por meio de discussão técnica qualificada, amparada em dados hidrológicos e técnicas científicas para fins de *análise de impacto regulatório* prevista na Declaração de Direitos de Liberdade Econômica (BRASIL, 2019, art. 5º). Enquanto não definido regulamento específico para integração das lacunas normativas, o programa pode ser empregado para auxiliar na comparação de cenários predominantemente utilizados no meio científico para descrição de leitos fluviais.

Os próximos capítulos detalharão a forma de tratamento e análise de séries de dados diários, valores anuais extremos e a avaliação de seções transversais, com a aplicação do programa desenvolvido para fins de validação dos métodos e definição da base de dados e condições para a última análise e aplicação pretendida: comparar os critérios sugeridos na doutrina jurídica e na literatura para definição de leitos fluviais e, com fundamento nos resultados alcançados, sugerir a adoção de um critério regulamentar para os leitos fluviais regulares.

4 VAZÃO DOMINANTE PARA RIOS BRASILEIROS: SELEÇÃO, OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS PARA DEFINIÇÃO DAS CHEIAS ANUAIS MAIS PROVÁVEIS

Conforme abordado na [subseção 2.4.4](#), apesar da preocupação em instituir e manter APP nas margens dos rios, a atual Lei de proteção da vegetação nativa (Lei nº 12.651/2012), conhecida como Código Florestal de 2012, apresenta uma importante lacuna técnico-científica que necessita ser regulamentada: *a delimitação precisa do ponto de início da APP ripária no sentido transversal dos leitos fluviais*.

Não existe definição de qual cenário hidrológico deve ser considerado para definir o leito regular de um curso d'água, uma vez que a expressão não é comum na literatura científica que, em regra, classifica os leitos dos rios em vazante, menor e maior ([CHRISTOFOLETTI, 1976](#)). Da leitura do conceito legal de *planícies (ou várzeas) de inundação*, percebe-se que o legislador as situou como “áreas marginais a cursos d'água sujeitas a enchentes e inundações periódicas” ([BRASIL, 2012b](#), art. 3º, inciso XXI), o que permite correlacionar o leito regular com a vazão de margens plenas, quando ocorre o transbordamento do curso d'água para a planície de inundação ([CHRISTOFOLETTI, 1976](#); [WATSON; BIEDENHARN; SCOTT, 1999](#); [GRISON; KOBAYAMA, 2011b](#)). Um parâmetro comumente adotado para defini-la é a vazão máxima anual mais provável, com tempo de recorrência de 1,58 ano ($Q_{1,58}$), também conhecida como vazão dominante, por possuir capacidade “modificadora ou modeladora de um canal fluvial” ([GRISON; KOBAYAMA, 2011a](#), p. 117), cf. [Quadro 9](#).

A tomada de decisão para definição de políticas públicas ambientais deve ser cientificamente fundamentada (cf. [BRANCALION et al., 2016](#); [SULLIVAN; RAINS; RODEWALD et al., 2020](#)). Para isso, os dados hidrometeorológicos e ecológicos precisam ser confiáveis, eliminando-se aqueles que não são representativos ou que apresentam algum erro de coleta ou armazenamento ([WILBY et al., 2017](#)).

O objetivo do presente Capítulo é apresentar os métodos para seleção, otimização e análise de dados para definição de valores extremos, desenvolvidos para o programa *HidroAPP* (cf. [Capítulo 3](#)), e avaliar para os rios brasileiros o tempo de recorrência esperado para a vazão dominante ou de margens plenas, o qual será posteriormente adotado como cenário científico para avaliação das hipóteses regulatórias para áreas de preservação permanente em faixa marginal a cursos d'água naturais (cf. [Capítulo 6](#)).

Quadro 9 – Tempo de recorrência para vazão de margens plenas tipicamente utilizado na literatura.

FONTE	TR (anos)
Dury, Hails e Robbie (1963 apud GRISON; KOBIYAMA, 2011b)	1,58
Hickin (1968 apud GRISON; KOBIYAMA, 2011b)	1,58
Riley (1972)	1,58
Dury (1973 apud GRISON; KOBIYAMA, 2011b)	1,58
Dury (1976)	1,58
Christofoletti (1976)	1,58
Dunne e Leopold (1978 apud SIMON; DICKERSON; HEINS, 2004)	1,5
Williams (1978)	1,5
Leopold, Wolman e Miller (1992, p. 319)	1 a 2 “1,5 é uma boa média”
Leopold (1994 apud GRISON; KOBIYAMA, 2011b; ANDREADIS; SCHUMANN; PAVELSKY, 2013)	1 a 2,5
Watson, Biedenharn e Scott (1999)	1,58
Castro e Jackson (2001)	1,4
Simon, Dickerson e Heins (2004)	1,5
Wilkerson (2008)	2
De Rose, Stewardson e Harman (2008)	2
Grison e Kobiyama (2011a,b)	1,58
Andreadis, Schumann e Pavelsky (2013)	1 a 2,5 Adota 2
Meyer et al. (2018)	2

Fonte: organizado pelo autor a partir das referências citadas.

Nota: TR = tempo de recorrência ou período de retorno de um evento.

4.1 METODOLOGIA

4.1.1 Filtragem e tratamento preliminar dos dados

Em todas as tabelas são excluídos os registros fora do período de análise. Também são eliminados os dados de médias mensais, pois serão futuramente recalculados após a aplicação dos critérios de completude de dados definidos para a análise. Quando aos registros diários instantâneos de cotas e vazões às 7 e 17h, verifica-se que não são todas as estações que os possuem, de forma que também são eliminados.

Então, para análise são mantidos somente os registros de média diária de cota e vazão, que são variáveis típicas para todas as estações.

Em seguida, são eliminados os dados que não obedecem ao nível de consistência atribuído para análise. Nesta etapa também são eliminados os registros repetidos, prevalecendo aquele cujo identificador (*ID*) é numericamente maior (i.e., de inclusão mais recente no banco de dados).

O Banco de Dados da ANA no *HidroWeb* armazena os dados originais (*raw*) não consistidos (*NivelConsistencia* = 1) e os consistidos (*NivelConsistencia* = 2). Para o programa desenvolvido, criou-se a opção de utilizar todos os dados, independente da

consistência, atribuindo-se zero à variável ($NivelConsistencia = 0$). Quando o usuário utiliza desse critério, no caso de haver conflitos de registros, prepondera o registro de maior consistência e, dentre eles, o de maior *ID*.

Concluída a seleção dos dados, são eliminados os registros diários de cota e vazão que não obedecem ao *status* fixado pelo usuário (1 = valor real; 2 = valor estimado), bem como os perfis transversais que, mesmo com registro consistente, não apresentam coordenadas da seção transversal.

As vazões médias diárias não positivas ($Q \leq 0$) também são removidas da série de dados. Vazões nulas podem ter significados ecológicos importantes e necessitam ser interpretadas caso a caso (ZIMMER; KAISER et al., 2020). Os motivos mais comuns para o registro de vazões nulas são a intermitência do fluxo, congelamento (incomum no Brasil), erros de instrumentos e desvio naturais ou artificiais da corrente a montante da estação. Como o programa não foi desenvolvido para investigar o motivo específico de cada ocorrência de vazões não positivas, esses dados foram excluídos da análise.

A partir deste ponto, para cotas e vazões médias diárias o programa e as funções desenvolvidas deixam de utilizar as tabelas do banco de dados e adota matrizes (cf. eq. 7 e 8) cuja primeira coluna é o dia do registro (em formato numérico do *matlab*) e a segunda coluna o valor da variável. O armazenamento dos dados selecionados dessa forma permite que as funções desenvolvidas para análise sejam empregadas em outros conjuntos de dados, provenientes de distintos organismos públicos ou privados, sem ficar vinculado a um formato específico de tabela adotado pela ANA.

$$COTAS = \begin{bmatrix} data_i & h_i \\ \vdots & \vdots \\ data_n & h_n \end{bmatrix}_{n \times 2} \quad (7)$$

$$VAZOES = \begin{bmatrix} data_i & Q_i \\ \vdots & \vdots \\ data_n & Q_n \end{bmatrix}_{n \times 2} \quad (8)$$

Onde $data_i$ é o dia do registro em formato numérico de data do *matlab*, h_i é a cota média e Q_i a vazão média, ambas registradas naquela data.

4.1.2 Condições definidas para completude da série de dados

Para definir as variáveis a serem utilizadas na análise de completude da série de dados, o programa desenvolvido foi inspirado nos critérios para cálculo de normais climáticas definidos nas publicações da Organização Meteorológica Mundial (OMM ou WMO, em inglês).

4.1.2.1 Critérios de completude da Organização Meteorológica Mundial

Apesar dos manuais da WMO dedicarem-se à análise de variáveis climatológicas, devido à relação existente entre precipitação e vazão, utilizar-se-á os critérios definidos por WMO (2017), sintetizados no Quadro 10, para a seleção dos dados a serem utilizados na análise dos cenários de hidrológicos para cálculo de áreas de preservação permanente no programa *HidroAPP*. Para implementação computacional, os critérios de completude foram deixados como variáveis a serem definidas pelo usuário, permitindo análises com parâmetros diversos daqueles fixados por WMO (2017).

Quadro 10 – Critérios utilizados para seleção dos dados de vazão.

INTERVALO	CRITÉRIO	FONTE
MÊS INDIVIDUAL	Rejeitam-se os meses com lacunas em 5 ou mais dias consecutivos ou 11 ou mais dias aleatórios.	WMO (2011, 2017).
ANO INDIVIDUAL	Rejeita-se quando um dos meses tiver seus dados rejeitados pelos critérios para meses individuais (acima).	WMO (2017).
PERÍODO DE REFERÊNCIA	80% dos dados anuais devem ser considerados válidos. Para análise de um período de referência de 30 anos (e.g., 1981-2010) é necessário haver dados válidos para 24 anos. O critério de rejeitar séries com lacunas em 3 anos consecutivos não precisa ser empregado, pois não traz benefícios significativos (WMO, 2007).	WMO (2007, 2011, 2017).

Fonte: organizado pelo autor.

Os critérios de completude são os seguintes:

- *maxDiasContinuosAusentesMes*: número máximo de dias consecutivos com dados inválidos ou omitidos na série individual de cada mês do período de análise;
- *maxDiasAusentesMes*: número máximo de dias aleatórios com dados inválidos ou omitidos na série individual de cada mês do período de análise;
- *continuidade*: fração da série de dados anuais no período de análise que possuem dados válidos;
- *maxAnosContinuosAusentes*: número máximo de anos consecutivos com dados inválidos no período de análise.

A partir de uma série de dados diários, aplicando-se os critérios de completude, o algoritmo fornece os seguintes resultados:

- Matriz [*MaxMensais*], que fornece para cada mês o valor do máximo calculado. Para os meses que não obedeçam aos critérios de *maxDiasContinuosAusentesMes* e *maxDiasAusentesMes* o valor atribuído é vazio ([]):

$$[MaxMensais] = \begin{bmatrix} YYYYMM_1 & E_{max\ 1} \\ \vdots & \vdots \\ YYYYMM_{12na} & E_{max\ 12na} \end{bmatrix}_{12na \times 2} \begin{matrix} \text{PeríodoAnálise(1)} \\ \text{PeríodoAnálise(2)} \end{matrix} \quad (9)$$

Onde E_{max} é o valor esperado para máxima mensal da variável no mês MM do ano $YYYY$, cuja concatenação forma um identificador no formato $YYYYMM$.

- Matriz $[MaxAnuais]$, que fornece para cada ano o valor do máximo mensal calculado. Para os anos que possuam algum mês inválido (incompleto) o valor atribuído é vazio ($[]$):

$$[MaxAnuais] = \begin{matrix} \begin{bmatrix} YYYY_1 & E_{max1} \\ \vdots & \vdots \\ YYYY_{na} & E_{maxna} \end{bmatrix} & \begin{matrix} \left. \begin{matrix} PeriodoAnalise(1) \\ \\ \\ \\ PeriodoAnalise(2) \end{matrix} \right\} \end{matrix} \end{matrix} \quad (10)$$

Onde E_{max} é o valor esperado para máxima anual da variável no ano $YYYY$.

- *Completude*, variável booleana, que informa 1 (verdadeiro) se as condições de *continuidade* e *maxAnosContinuosAusentes* (opcional) forem obedecidas. Caso contrário, informa como resultado 0 (falso);
- *YS* que consiste numa [estrutura](#) que armazena os resultados produzidos na análise em campos separados por anos ($YS.y<YYYY>$) e subcampos com as séries mensais dos elementos ($YS.y<YYYY>.m<MM>$), parâmetro de máximas mensais dos elementos ($YS.y<YYYY>.m<MM>max$) e completude da série anual individual ($YS.y<YYYY>.completeness$). A estrutura também armazena dados de completude de todo o período de análise multianual ($YS.completeness$).

4.1.2.2 Critérios complementares para otimização do período de análise das séries de dados

Uma vez que a rotina desenvolvida fornece uma lista com os anos considerados válidos dentro do período de análise, é possível utilizá-la para otimizar um intervalo amostral com o menor número de lacunas possível.

Neste caso, para fins de comparação entre estações diferentes (que podem ter períodos otimizados não coincidentes), deve-se tratar os dados dentro da hipótese segundo a qual as séries são estacionárias.

A ideia é definir inicialmente um longo período de análise (e.g., 1900 a 2019) e fazer o algoritmo percorrer toda a série de forma encontrar um período intermediário contínuo ou que obedeça aos seguintes critérios de lacunas:

- n_{ymin} : número mínimo de anos válidos (*minimoAnosValidos*);
- $n_{omitymax}$: máximo de anos contínuos ausentes (*maxAnosContinuosAusentes*);
- c : continuidade da série de dados (*continuidade*), sendo que $c \in \{\mathbb{R} | 0 < c \leq 1\}$.

Como resultado, o algoritmo deve informar qual o intervalo dentro do período de análise que apresenta a melhor amostra. Deste ponto em diante o programa redefine o período de análise para o novo intervalo otimizado para aquela estação específica.

Síntese do método:

- a) A partir do primeiro ano válido da série ($i = 1$) verifica-se a continuidade dos dados e o tamanho das lacunas, no intervalo $[i; i + n_{y\ min} - 1]$:

$$n_{valid\ years}|_i^{i+n_{y\ min}-1} \geq n_{y,\ min}; \quad (11)$$

$$n_{valid\ years}|_i^{i+n_{y\ min}-1} \geq \lceil c \cdot n_{years}|_i^{i+n_{y\ min}-1} \rceil \quad (12)$$

$$y_{j+1} - y_j \leq n_{omit\ y\ max} + 1, \forall j \in [i; i + n_{y\ min} - 2] \quad (13)$$

Onde $n_{valid\ years}$ é o número de anos válidos existentes no intervalo, n_{years} é o número de anos abrangido pelo intervalo, y é um determinado ano válido disponível na série de dados apresentada na matriz $[MaxAnuais]$.

Caso as Equações 11, 12 e 13 sejam verdadeiras, armazena-se a condição de validade na variável $valid$ para o intervalo analisado. Sendo $valid = 1$ para verdadeiro e $valid = 0$ para falso.

- b) Armazena-se o resultado em um vetor horizontal que resume as características da análise para uma subsérie, sendo que cada intervalo possível para série de dados, iniciada no ano y_i , compõe um vetor armazenado como uma linha da matriz $[s_w]$:

$$[s_w] = \begin{bmatrix} y_i & y_i + n_{y\ min} - 2 + k & n_{y\ min} - 2 + k & valid|_{y_i}^{y_i+n_{y\ min}-2+k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_i & y_{final} & y_{final} - y_i + 1 & valid|_{y_i}^{y_{final}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Onde y_i corresponde ao primeiro ano da subsérie, y_{final} é o último ano da série de dados e $k \in \{\mathbb{N} | 1 \leq k \leq y_{final} - y_i - n_{y\ min} + 1\}$, sendo o número inteiro correspondente às iterações para gerar todas as subséries de dados possíveis.

- c) Realiza-se o mesmo procedimento iniciando a subsérie nos anos seguintes, formando uma matriz $[S]$ pela concatenação das matrizes da etapa anterior $[s_w]$, que resumem as características de todos os intervalos (subséries) testados no interior da série de dados, no formato apresentado nas Equações 15 e 16.

$$[S] = \begin{bmatrix} [s_1] \\ [s_2] \\ \vdots \\ [s_w] \end{bmatrix}_{m_{max} \times 4} = \dots \quad (15)$$

$$\left[\begin{array}{cccc}
y_{inicial} & y_{inicial} + n_{y\ min} - 1 & n_{y\ min} & valid|_{y_{inicial}}^{y_{inicial} + n_{y\ min} - 1} \\
y_{inicial} & y_{inicial} + n_{y\ min} & n_{y\ min} + 1 & valid|_{y_{inicial}}^{y_{inicial} + n_{y\ min}} \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
y_{inicial} & y_{final} & y_{final} - y_{inicial} + 1 & valid|_{y_{inicial}}^{y_{final}} \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
y_{inicial} + w & y_{inicial} + n_{y\ min} - 1 + w & n_{y\ min} & valid|_{y_{inicial} + w}^{y_{inicial} + n_{y\ min} - 1 + w} \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
y_{inicial} + w & y_{final} & y_{final} - y_{inicial} + 1 + w & valid|_{y_{inicial} + w}^{y_{final}} \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
y_{final} - n_{y\ min} + 1 & y_{final} & n_{y\ min} & valid|_{y_{final} - n_{y\ min} + 1}^{y_{final}}
\end{array} \right] \quad (16)$$

Onde $y_{inicial}$ é o ano inicial da série, y_{final} é o ano final da série e a terceira coluna ($S_{-,3}$) é a amplitude temporal da subsérie (Δy) na linha $m \in \{\mathbb{N} | 1 \leq m \leq m_{max}\}$, dada por $S_{m,2} - S_{m,1} + 1$, e w é o número da interação em relação ao primeiro ano da subsérie ($w = 0$), sendo $w \in \{\mathbb{N} | 0 \leq w \leq n_{y\ min} + 1\}$.

- d) Escolhe-se o período mais representativo dentro da série, a partir da linha m da matriz $[S]$, que obedeça às condições de continuidade ($valid = 1$) e cuja amplitude temporal (Δy) seja máxima:

$$m \in \{\mathbb{N} | (S_{m,3} = \max(S_{-,3})) \wedge (S_{m,4} = 1)\} \quad (17)$$

Quanto existir mais de um período que obedeça aos critérios de seleção acima, adota-se o mais recente ($\max(S_{-,2})$).

4.1.2.3 Otimização da série de dados a partir da distribuição generalizada de valores extremos (GEVd) com menor intervalo de confiança

Uma opção fornecida pelo programa é a obtenção do intervalo da série de dados que apresenta menor variação em relação à função de distribuição acumulada (CDF), por meio da variável $GEVpeakOptimize = true$. A hipótese adotada é de que, na presença de dados de baixa qualidade, a melhor subsérie não é necessariamente aquela com o maior intervalo disponível (obtida pelo procedimento da [subseção 4.1.2.2](#)), então se escolhe aquela que apresente uma CDF com menor amplitude dentro do intervalo de confiança definido para o valor mais provável da variável na função de densidade de probabilidade (PDF).

Para análise estatística é utilizada a distribuição generalizada de valores extremos (*Generalized Extreme Value Distribution - GEVd*), aplicada aos valores de vazões diárias máximas anuais, que também será utilizada mais adiante para o cálculo de cenários hidrológicos em função do tempo de recorrência.

A GEVd, desenvolvida por [Jenkinson \(1955\)](#), é frequentemente empregada para análise de séries de cheias ([MORRISON; SMITH, 2002](#); [RAO; HAMED, 2019](#); [CALL](#)

et al., 2017), pois combina três distribuições assintóticas de valores extremos conhecidas (Gumbel, Fréchet e Weibull) numa só equação governada por três parâmetros: μ (posição), σ (escala) e ξ (forma). Suas funções densidade de probabilidade (PDF) e de distribuição acumulada (CDF) são definidas pelas Equações 18 e 19, respectivamente.

$$f(x | \xi, \mu, \sigma) = \begin{cases} \left[1 + \xi \frac{(x-\mu)}{\sigma}\right]^{(-\frac{1}{\xi}-1)} \exp \left\{ - \left[1 + \xi \frac{(x-\mu)}{\sigma}\right]^{-\frac{1}{\xi}} \right\} & , \forall \xi \neq 0 \\ \exp \left[-\frac{(x-\mu)}{\sigma} \right] \exp \left\{ - \exp \left[-\frac{(x-\mu)}{\sigma} \right] \right\} & , \forall \xi = 0 \end{cases} \quad (18)$$

$$F(x | \xi, \mu, \sigma) = \begin{cases} \exp \left\{ - \left[1 + \xi \frac{(x-\mu)}{\sigma}\right]^{-\frac{1}{\xi}} \right\} & , \forall \xi \neq 0 \\ \exp \left\{ - \exp \left[-\frac{(x-\mu)}{\sigma} \right] \right\} & , \forall \xi = 0 \end{cases} \quad (19)$$

Por meio do parâmetro de forma (ξ) é possível identificar qual distribuição de valores extremos é mais verossímil à série de dados:

- $\xi = 0$: tipo I ou Gumbel, com assíntotas para ambas as direções, permitindo modelar valores máximos e mínimos extremos;
- $\xi > 0$: tipo II ou Fréchet, com assíntota direcionada aos valores máximos extremos;
- $\xi < 0$: tipo III ou Weibull, com assíntota direcionada aos valores mínimos extremos.

O programa *matlab*, por meio da função `gevfit(...)`, fornece para uma série de dados um vetor (*GEV*) com os parâmetros da GEVd (Equação 21), acompanhada de uma matriz que fornece os valores inferiores e superiores desses parâmetros para o intervalo de confiança (Equação 22), para o qual se adotou o valor padrão de 95%.

$$[GEV ; GEV_{CI95\%}] = gevfit(x) \quad (20)$$

$$GEV = \begin{bmatrix} \xi & \mu & \sigma \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$GEV_{CI95\%} = \begin{bmatrix} GEV_{inf} \\ GEV_{sup} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_{inf} & \mu_{inf} & \sigma_{inf} \\ \xi_{sup} & \mu_{sup} & \sigma_{sup} \end{bmatrix} \quad (22)$$

Onde *GEV* é o vetor que armazena os parâmetros μ (posição), σ (escala) e ξ (forma) da distribuição generalizada de valores extremos (GEVd); *GEV_{CI95%}* é a matriz que armazena os vetores com os parâmetros μ , σ e ξ para os limites inferior (ξ_{inf} , μ_{inf} e σ_{inf}) e superior (ξ_{sup} , μ_{sup} e σ_{sup}) para o intervalo de confiança de 95% para a GEVd.

A partir da matriz [*S*] (Equação 16), que armazena todas os intervalos de subséries para a série de dados disponível, calcula-se para cada linha *m* o valor da amplitude do intervalo de confiança na CDF no ponto de máximo da PDF (x_{peak}):

$$\left[GEV \begin{matrix} S_{m,2} \\ S_{m,1} \end{matrix} ; GEV_{CI95\%} \begin{matrix} S_{m,2} \\ S_{m,1} \end{matrix} \right] = gevfit \left([MaxAnuais] \begin{matrix} S_{m,2} \\ S_{m,1} \end{matrix} \right) \quad (23)$$

$$x_{peak} = x|\{f(x, \xi, \mu, \sigma) = \max(f(x))\} \quad (24)$$

$$\Delta F \Big|_{S_{m,1}}^{S_{m,2}} = \|F(x_{peak}, \mu_{sup}, \sigma_{sup}, \xi_{sup}) - F(x_{peak}, \mu_{inf}, \sigma_{inf}, \xi_{inf})\| \quad (25)$$

O valor da amplitude do intervalo de confiança na CDF é armazenado como uma quinta coluna na matriz $[S]$:

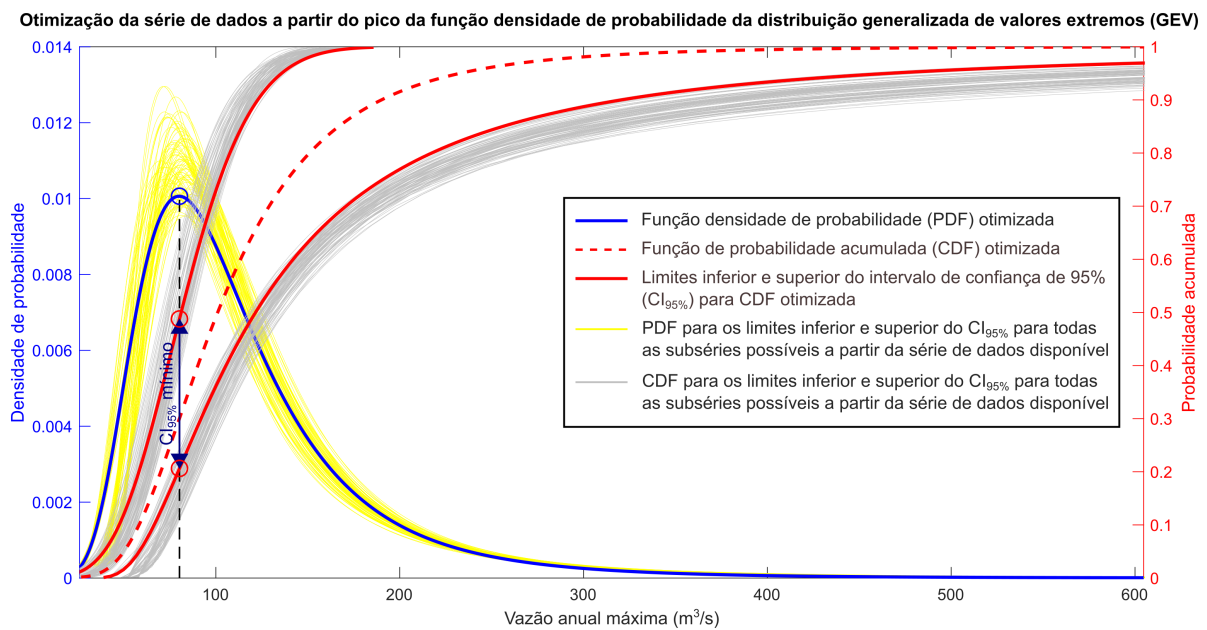
$$[S] = \begin{bmatrix} y_{inicial} & y_{inicial} + n_{y\ min} - 1 & n_{y\ min} & valid \Big|_{S_{1,1}}^{S_{1,2}} & \Delta F \Big|_{S_{1,1}}^{S_{1,2}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{final} - n_{y\ min} + 1 & y_{final} & n_{y\ min} & valid \Big|_{S_{m_{max},1}}^{S_{m_{max},2}} & \Delta F \Big|_{S_{m_{max},1}}^{S_{m_{max},2}} \end{bmatrix}_{m_{max} \times 5} \quad (26)$$

A partir da matriz $[S]$, escolhe-se o período da subsérie de dados, localizada na linha m , que obedeça às condições de continuidade ($valid = 1$) e com menor amplitude do intervalo de confiança na CDF:

$$m \in \{\mathbb{N} | (S_{m,4} = 1) \wedge (S_{m,5} = \min(S_{-,5}))\} \quad (27)$$

A Figura 54 sintetiza o método.

Figura 54 – Otimização da série de dados a partir do menor intervalo de confiança na função de probabilidade acumulada (CDF), no ponto de valor mais provável da variável (pico da função de densidade de probabilidade - PDF), para todas as subséries extraídas da série de dados, por meio da distribuição generalizada de valores extremos (GEVd).



Fonte: o autor.

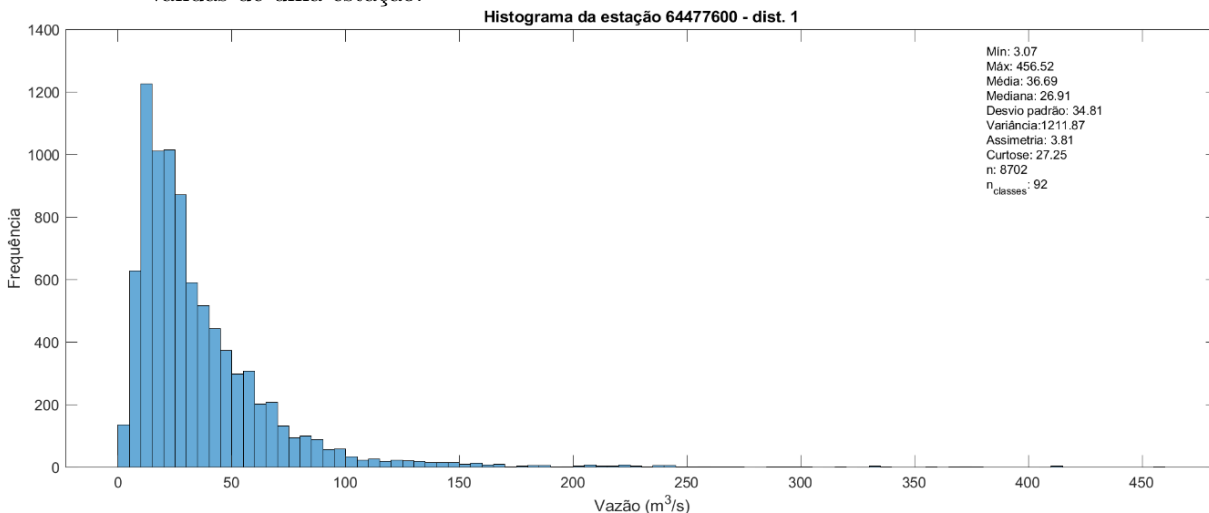
4.1.3 Análise exploratória da distribuição empírica de vazões

A distribuição empírica de vazões é submetida à análise exploratória por meio da função `distribuicaoEmpiricaArquivo(...)` que permite a avaliação de mais de uma série de dados ao mesmo tempo. Para isso, basta que o usuário forneça os vetores de dados numa célula ($1 \times n_{amostras}$). Utiliza-se o formato de `células`, pois cada amostra pode possuir número de dados diversos, o que impediria a concatenação dos vetores numa só matriz.

Atualmente, utiliza-se a rotina para analisar toda a série de dados de vazões válidas no período delimitado para análise. Mas no futuro a rotina pode ser útil para análises de trechos da série para fins comparativos.

Como resultado, para cada série de dados são gerados um histograma e colunas específicas na tabela de resultados, que apresentam a estatística descritiva de cada série com as seguintes variáveis: média, desvio padrão, variância, primeiro quartil, segundo quartil (mediana), terceiro quartil, amplitude, assimetria (*skew*) e curtose (Figura 55).

Figura 55 – Exemplo de histograma e tabela com resultados da estatística descritiva para série de vazões válidas de uma estação.



Estatística Descritiva:	
EstacaoCodigo	64477600
Média	36.69
Desvio padrão	34.81
Variância	1211.87
1º Quartil	16.12
2º Quartil (Mediana)	26.91
3º Quartil	46.08
Amplitude	453.46
Assimetria (skew)	3.81
Curtose	27.25

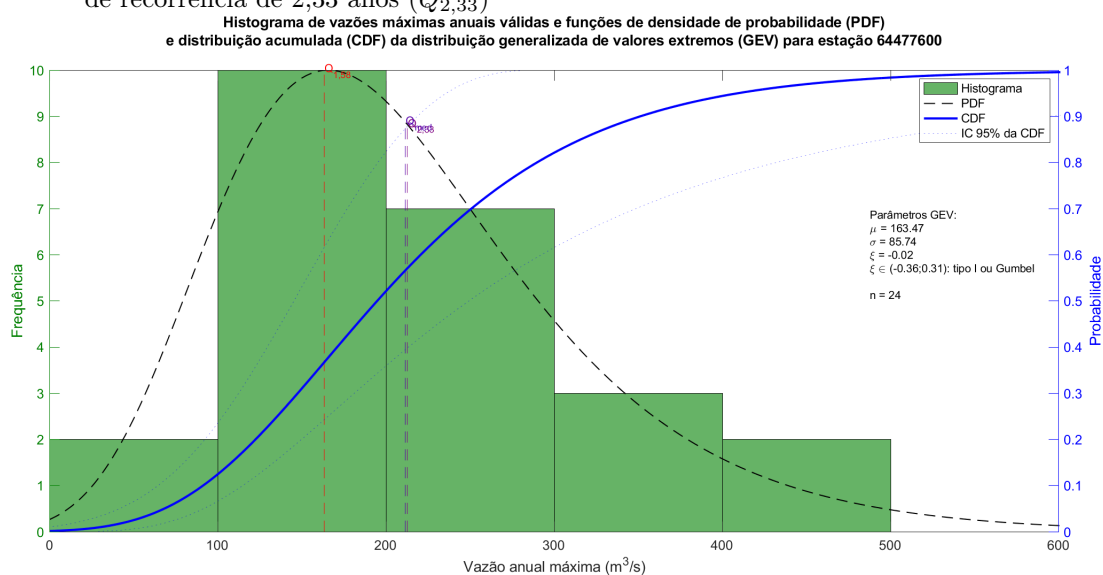
Fonte: o autor.

4.1.4 Análise estatística das vazões máximas anuais pela distribuição generalizada de valores extremos (GEVd)

A partir dos dados válidos de vazões máximas anuais, utiliza-se a distribuição generalizada de valores extremos (*Generalized Extreme Value Distribution - GEV*, já abordada na [subseção 4.1.2.3](#)) para o estabelecimento de cenários hidrológicos em função de tempos de recorrência (e.g., para vazão de margens plenas – $Q_{1,58}$), bem como para o cálculo de probabilidade de inundação integral das áreas protegidas nas margens de cursos d'água (cf. subseções [3.3.2](#) e [3.3.3](#)).

A [Figura 56](#) apresenta a aplicação da GEVd para os dados de vazões máximas anuais válidas para uma estação com as respectivas PDF, CDF e pontos de destaque, que podem ser customizados. Quando o usuário opta pela otimização da série de dados a partir do menor intervalo de confiança da GEVd ($GEV_{peakOptimize} = true$), essa será a distribuição retratada na figura.

Figura 56 – Histograma de vazões máximas anuais válidas e funções de densidade (PDF) e distribuição acumulada (CDF) da distribuição generalizada de valores extremos (GEVd) para uma estação. Pontos destacados para as vazões de margens plenas ($Q_{1,58}$), média anual (Q_{med}) e de tempo de recorrência de 2,33 anos ($Q_{2,33}$)



Fonte: o autor.

Conforme já exposto na [subseção 4.1.2.3](#), a GEVd combina três distribuições assintóticas de valores extremos conhecidas (Gumbel, Fréchet e Weibull) por meio de três parâmetros: μ (posição), σ (escala) e ξ (forma). O parâmetro de forma é de extrema importância para entender o comportamento dos dados, sendo que através dele se pode saber qual a distribuição mais verossímil para descrevê-los. Devido à baixa qualidade dos dados ou por fatores físicos singulares, ocorrem casos onde ξ apresenta valores que produzem curvas assintóticas absurdas para $\xi \leq -1$ (MORRISON; SMITH, 2002), o que também ocorre para $\xi \geq 1$, quando a média da distribuição passa a tender ao infinito. Por

esses motivos, são excluídas das análises as estações cujo parâmetro de forma da GEVd não obedece à seguinte condição:

$$\xi \in \{\mathbb{R} \mid -1 < \xi < 1\} \quad (28)$$

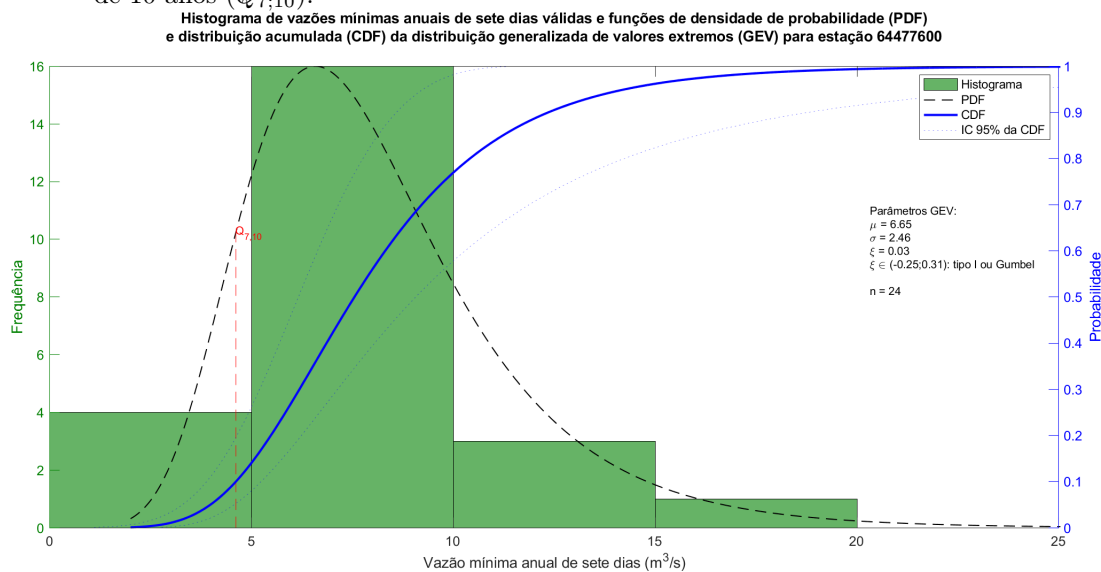
4.1.5 Análise estatística da média móvel de sete dias das vazões diárias (Q_7) pela distribuição generalizada de valores extremos (GEVd)

No Brasil, para fins de outorga de recursos hídricos, costuma-se utilizar como cenário hidrológico extremo para estiagens a vazão diária equivalente à média móvel de sete dias com tempo de recorrência de 10 anos ($Q_{7;10}$). O programa desenvolvido permite a utilização desse cenário, o qual é calculado por meio da distribuição generalizada de valores extremos (GEVd), permitindo que o usuário fixe qualquer valor para o tempo de recorrência.

O cálculo da média móvel da vazão de sete dias (Q_7) é realizado a partir da série histórica. Caso um dos sete dias sequenciais da amostra esteja ausente, é atribuído à Q_7 naquela data o valor vazio. Para fins de obtenção do valor mínimo de Q_7 para cada ano da série, os critérios de completude utilizados são os mesmos definidos na [subseção 4.1.2.1](#), inspirados nas condições definidas pela WMO para normais climáticas.

A [Figura 57](#) apresenta a aplicação da GEVd para os dados dos valores mínimos anuais válidos da média móvel de sete dias das vazões de uma estação, as respectivas PDF e CDF, com destaque ao ponto correspondente a $Q_{7;10}$.

Figura 57 – Histograma dos valores mínimos anuais válidos da média móvel de sete dias das vazões (Q_7) e funções de densidade (PDF) e distribuição acumulada (CDF) da distribuição generalizada de valores extremos (GEVd) de uma estação. Ponto destacado para o tempo de recorrência de 10 anos ($Q_{7;10}$).



Fonte: o autor.

4.1.6 Exclusão de estações situadas junto a pontes rodoviárias

Para a análise de probabilidade de cheias nas áreas de preservação permanente marginais aos rios, as seções transversais situadas junto a pontes rodoviárias não são interessantes, pois não retratam a planície de inundação. Ademais, são seções artificialmente estáticas e podem não representar os efeitos das alterações morfológicas do leito do rio sobre as cotas de cheias para um determinado tempo de recorrência (cf. SLATER; SINGER; KIRCHNER, 2015).

O banco de dados analisado (ANA, 2020) possui estações com coordenadas geográficas imprecisas, com variações de centenas de metros em alguns casos, o que torna necessário ler as anotações de cada estação para procurar informações quanto a sua eventual localização embaixo de uma ponte.

Para evitar o dispêndio de tempo considerável na pesquisa de estações localizadas em pontes, optou-se por desenvolver uma rotina que identifica todas as estações nas quais a palavra (*string*) “ponte” aparece nos campos “Nome”, “Descricao” e “Historico” da tabela *Estacao.csv*, que integra o banco de dados. O código-fonte pode ser acessado por meio do Quadro C.1.

Das 2337 estações disponíveis, que possuíam dados da série histórica de vazão, curva-chave, medições em campo e seção transversal, 549 foram identificadas com indícios de encontrarem-se sob pontes. Essas estações foram excluídas das análises por meio da adição de seus códigos na lista de estações banidas, que é uma funcionalidade incorporada no programa desenvolvido para evitar a análise de estações indesejadas ou com inconformidades. Desta forma, permaneceram para análise 1788 estações.

4.1.7 Seleção dos dados de entrada

Para cada estação, foram selecionados para análise somente os dados que obedeciam aos seguintes critérios:

- Somente dados homologados (*nivelConsistencia* = 2) de cota, vazão, curvas-chave, medições de campo e perfis das seções transversais;
- Valores reais de cota (*CotaStatus* = 1);
- Valores reais de vazão (*VazaoStatus* = 1);
- Disponibilidade de no mínimo de 10 medições de cota e vazão em campo (*minMedicoes* = 10);
- Tolerância de 5% ($t = \text{toleranciaMedicoes} = 0.05$) para os dados medidos em campo, obedecendo à equação (cf. SLATER; SINGER; KIRCHNER, 2015):

$$\frac{Q}{A_m \cdot \bar{v}} = 1 \pm t \quad (29)$$

Onde: Q é a vazão medida, A_m a área molhada medida, \bar{v} a velocidade média

medida e t o intervalo de tolerância (e.g., $t = 0,05$ para uma tolerância de $\pm 5\%$).

Além dos critérios acima, também são excluídos das análises os registros de perfis de seções transversais que não apresentam ponto de mínimo absoluto no talvegue e vazões não positivas ($Q \leq 0$).

4.1.8 Critérios para seleção das séries temporais

O programa desenvolvido no [Capítulo 3](#) permite o emprego de diversos critérios customizados para seleção da série temporal em cada estação. Inicialmente, optou-se por adotar os critérios definidos pela Organização Meteorológica Mundial ([WMO, 2007, 2011, 2017](#)), os quais, em síntese, definem que os dados de um ano são considerados válidos quando todos os seus meses forem válidos, sendo que um mês para ser válido não pode ter dados ausentes por mais de quatro dias consecutivos ou mais de dez dias aleatórios. Quanto ao período de análise da série, o critério exige que sejam consideradas três décadas de dados em intervalos padronizados (e.g., 1 jan. 1981 até 31 dez. 2010), com no máximo dois anos consecutivos ausentes e, pelo menos, 80% de continuidade, i.e., 24 anos válidos (cf. [subseção 4.1.2.1](#) e [Quadro 10](#)). Quando um determinado ano é considerado inválido, todos os dados diários de cota e vazão daquele ano são excluídos das análises.

Ao aplicar-se os critérios de análise estritos definidos pela [WMO \(2007, 2011, 2017\)](#), somente 81 estações são consideradas aptas para análise, reduzindo significativamente o tamanho da amostra.

Considerando que os critérios definidos pela WMO foram desenvolvidos para o estudo de normais climáticas, que exigem a comparação de períodos padronizados de três décadas, para a presente análise, onde se trabalha com a hipótese de estacionariedade da série e deseja-se tão somente obter períodos estatisticamente confiáveis para descrição de valores de vazões extremos, optou-se por flexibilizar o período de análise de cada estação por meio de uma técnica que procura identificar dentro dos dados disponíveis a série de vazões máximas anuais que apresenta maior precisão para o valor mais provável (pico da função densidade de probabilidade - PDF - da distribuição generalizada de valores extremos - GEVd), conforme metodologia descrita na [subseção 4.1.2.3](#).

A análise realizada pelos critérios estritos da WMO servirá de paradigma para validação do método de otimização da série de dados a partir da distribuição generalizada de valores extremos (GEVd) com menor intervalo de confiança.

O método desenvolvido para escolha da série a partir da otimização da GEVd, mostrou que o parâmetro que fixa a continuidade mínima da série é determinante para o tamanho da amostra, o que demonstra que os dados das séries de máximas anuais são consideravelmente lacunares ([Tabela 3](#)). Por isso, o programa desenvolvido foi executado para 11 análises diversas, sendo uma a paradigma e as outras 10 variando-se o critério de continuidade mínima entre 0,1 e 1, sem limites para o período de análise, desde que as

séries apresentassem no mínimo 15 anos válidos.

A partir dos resultados apresentados na [Tabela 3](#), adotou-se para as análises a continuidade mínima (c_{min}) de 0,7, pois permite maximizar o tamanho da amostra (número de estações) com uma continuidade mediana de 0,76, que é próximo ao valor definido pela WMO para normais climáticas (0,8), bem como apresenta para as séries uma mediana de 31 anos válidos.

A critério de informação, quanto ao desempenho do programa quando executado (*benchmark*), o tempo total para realização das 11 análises apresentadas na [Tabela 3](#) foi de 1019 minutos em um processador Intel i5-4670K a 4,2 GHz (*overclocking*) com os quatro núcleos físicos operando em paralelo.

Tabela 3 – Características das séries temporais para diferentes análises com variação da condição de continuidade mínima exigida (c_{min}) em comparação com a análise paradigma, que emprega os critérios estritos definidos pela [WMO \(2007, 2011, 2017\)](#).

ANOS VÁLIDOS E CONTINUIDADE NAS SÉRIES						
c_{min}	MENOR	MÉDIA	MEDIANA	MAIOR	DESVIO PADRÃO	$n_{estacoes}$
0,10	15 (0,24)	33,0 (0,67)	30,0 (0,68)	78 (1,00)	14,5 (0,14)	646
0,20	15 (0,24)	33,0 (0,67)	30,0 (0,68)	78 (1,00)	14,5 (0,14)	646
0,30	15 (0,30)	33,0 (0,67)	30,0 (0,68)	78 (1,00)	14,5 (0,14)	645
0,40	15 (0,40)	33,2 (0,68)	30,0 (0,68)	78 (1,00)	14,5 (0,14)	637
0,50	15 (0,50)	33,9 (0,70)	31,0 (0,69)	78 (1,00)	14,4 (0,12)	607
0,60	15 (0,60)	34,6 (0,73)	31,0 (0,71)	78 (1,00)	14,6 (0,10)	552
0,70	15 (0,70)	33,7 (0,78)	31,0 (0,76)	78 (1,00)	15,1 (0,07)	497
0,80	15 (0,80)	31,7 (0,85)	28,0 (0,83)	78 (1,00)	15,1 (0,05)	415
0,90	15 (0,90)	29,3 (0,92)	25,0 (0,91)	78 (1,00)	13,9 (0,03)	303
1,00	15 (1,00)	23,0 (1,00)	20,0 (1,00)	67 (1,00)	9,2 (0,00)	189
ANÁLISE PARADIGMA COM CRITÉRIOS ESTRITOS DA WMO						
0,80	25 (0,83)	26,7 (0,90)	27,0 (0,90)	30 (1,00)	1,4 (0,05)	79

Notas:

Para as séries temporais testadas foi estabelecido como condição o mínimo 15 anos válidos, variando-se a condição de continuidade mínima da série, que é obtida a partir da distribuição generalizada de valores extremos que apresenta menor variação no intervalo de confiança para o valor da probabilidade acumulada do pico da função de densidade de probabilidade, dentro de todas as subséries possíveis no período de 01 jan. 1900 a 28 set. 2020.

A análise paradigma segue os critérios estritos definidos pela [WMO \(2007, 2011, 2017\)](#) para normais climáticas: avaliação de um período de três décadas (no caso, 01 jan. 1981 a 31 dez. 2010), continuidade mínima (c_{min}) de 80%, o que representa o mínimo de 24 anos válidos, sendo admitida a ausência de no máximo dois anos consecutivos.

Para todas as análises, os anos somente são considerados válidos quando todos os meses forem válidos, cuja condição é a ausência de dados diários não superior a quatro dias consecutivos ou dez dias aleatórios.

Os resultados da estatística dos anos válidos são informados junto com a continuidade, entre parêntesis, e.g., 25 anos válidos com 83% de continuidade é expresso como 25 (0,83). Os valores mínimos e máximos para anos válidos e continuidade, não correspondem necessariamente a uma mesma série, são os extremos encontrados para as séries otimizadas obtidas.

Abreviaturas e símbolos:

c_{min} = continuidade mínima fixada para validade da série;

$n_{estacoes}$ = número de estações que apresentam séries de dados aptas para análise;

WMO = *World Meteorological Organization* (Organização Meteorológica Mundial).

Fonte: o autor.

4.1.9 Quadro síntese das variáveis de entrada do programa

As análises foram realizadas adotando o método de otimização da série temporal pela distribuição GEV mais confiável, sendo o critério estrito da WMO utilizado como paradigma para validação, cujas variáveis de entrada para o programa *HidroAPP* estão descritas na [Tabela 4](#).

Os métodos utilizados no programa para a obtenção das curvas-chave, perfis das seções transversais estendidos, cálculo de declividade do canal, entre outras variáveis de interesse hidrológicos encontram-se detalhados no [Capítulo 5](#), motivo pelo qual não serão reproduzidos no presente Capítulo, mas integram a análise.

Tabela 4 – Variáveis definidas para as análises dos dados por meio do programa *HidroAPP*.

VARIÁVEL [†]	MÉTODO	
	WMO ESTRITO	OTIMIZAÇÃO DA GEVd
<i>nivelConsistencia</i>	2	2
<i>CotaStatus</i>	1	1
<i>VazaoStatus</i>	1	1
<i>minMedicoes</i>	10	10
<i>toleranciaMedicoes</i>	0.05	0.05
<i>delta_H</i>	0.01	0.01
<i>maxDiasAusentesMes</i>	10	10
<i>maxDiasContinuosAusentesMes</i>	4	4
<i>minAnosAleatorios</i>	vazio	vazio
<i>maxAnosContinuosAusentes</i>	2	999
<i>minAnosValidos</i>	vazio	15
<i>continuidade</i>	0.8	0.7
<i>PeriodoAnalise</i>	1981-01-01 a 2010-12-31	1900-01-01 a 2020-09-28
<i>GEVpeakOptimize</i>	false	true

Nota: [†]Sobre o significado de cada variável, sugere-se consultar o [Quadro C.2](#) no [Apêndice C](#).

Abreviaturas:

WMO = *World Meteorological Organization* (Organização Meteorológica Mundial);

GEVd = *generalized extreme value distribution* (distribuição generalizada de valores extremos).

Fonte: o autor.

4.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

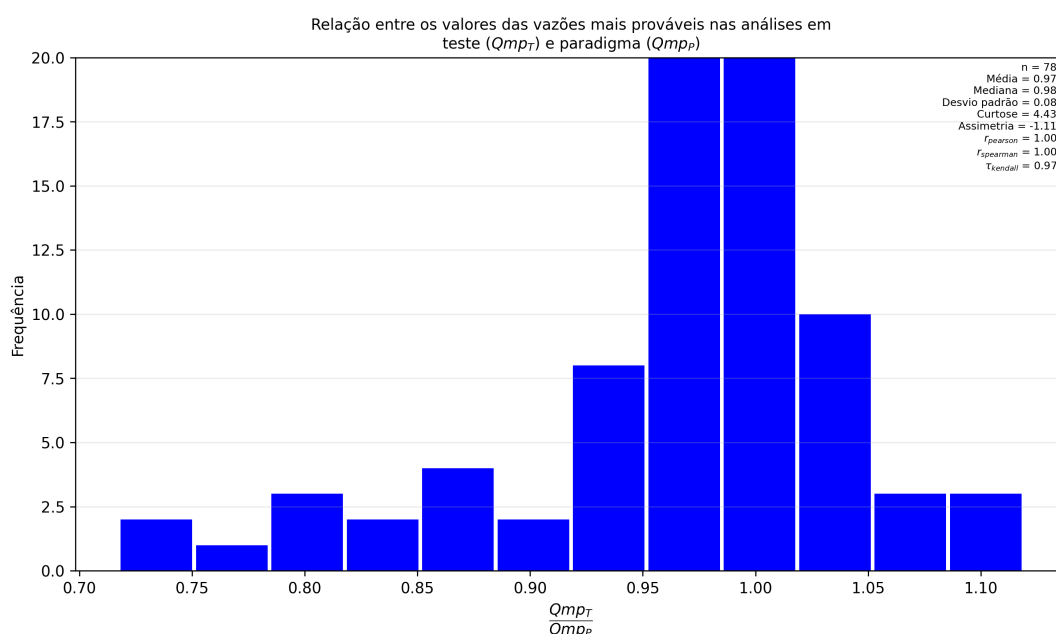
Antes de apresentar os resultados do presente trabalho para a quantificação das áreas de preservação permanente nos diversos cenários hidrológicos e legais simulados, é interessante abordar os resultados obtidos de interesse para análises hidrológicas.

4.2.1 Validação do método de otimização das séries temporais por meio da distribuição generalizada de valores extremos

Como foi abordado, para obter o maior número de estações (pontos amostrais) estatisticamente confiáveis, sem necessariamente utilizar todos os critérios estritos da WMO (2007, 2011, 2017), procurou-se relaxar as condições de continuidade e do período da amostra para os dados extremos anuais visando obter a distribuição GEV que apresenta menor intervalo de confiança no pico da sua PDF. Para isso, as estações que obedecem aos critérios estritos da WMO foram utilizadas como paradigma para verificar se, no ponto de pico da PDF (valor mais provável – Qmp_P), há divergência relevante com resultados do método de otimização desenvolvido (Qmp_T). Foram comparados os resultados de 78 estações que são comuns às duas análises (paradigma e testada).

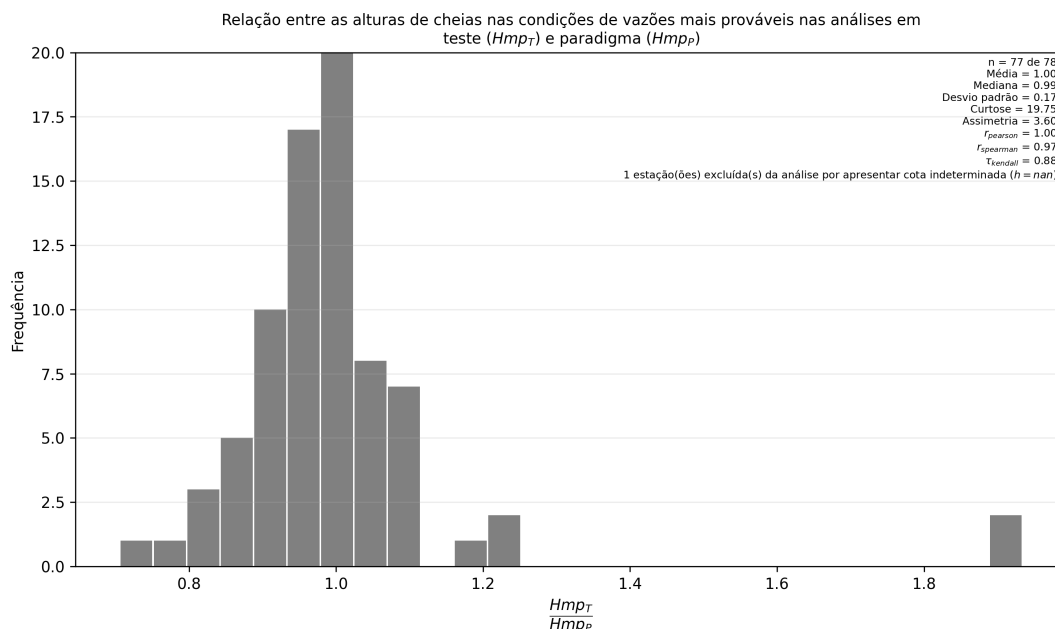
O histograma das relações $\frac{Qmp_T}{Qmp_P}$ apresentado na Figura 58 demonstra que há forte correlação entre os valores encontrados entre o método de otimização e o paradigma, o que também é observado quando se compara a relação das alturas de cheias relativas ao talvegue entre os dois métodos (Figura 59).

Figura 58 – Histograma apresentando a relação entre os valores encontrados para a vazão mais provável na distribuição generalizada de valores extremos - GEVd - nas análises pelo método de otimização (teste) e pelos critérios estritos da Organização Meteorológica Mundial (paradigma).



Fonte: o autor.

Figura 59 – Histograma apresentando a relação entre os valores encontrados para as alturas de cheias, para a vazão mais provável na distribuição generalizada de valores extremos – GEVd, nas análises pelo método de otimização (teste) e pelos critérios estritos da Organização Meteorológica Mundial (paradigma). Para fins de comparação, as alturas de cheias são relativas à cota do talvegue do rio.



Fonte: o autor.

As estações cujas relações entre os dois métodos se distanciam de 1,00 podem ser explicadas pelo fato que parte das séries de dados podem ter comportamento não estacionário, os quais não são objeto de investigação no presente trabalho, mas demonstra o potencial da ferramenta desenvolvida para investigações em trabalhos futuros.

4.2.2 Variação espacial do parâmetro de forma da distribuição generalizada de valores extremos

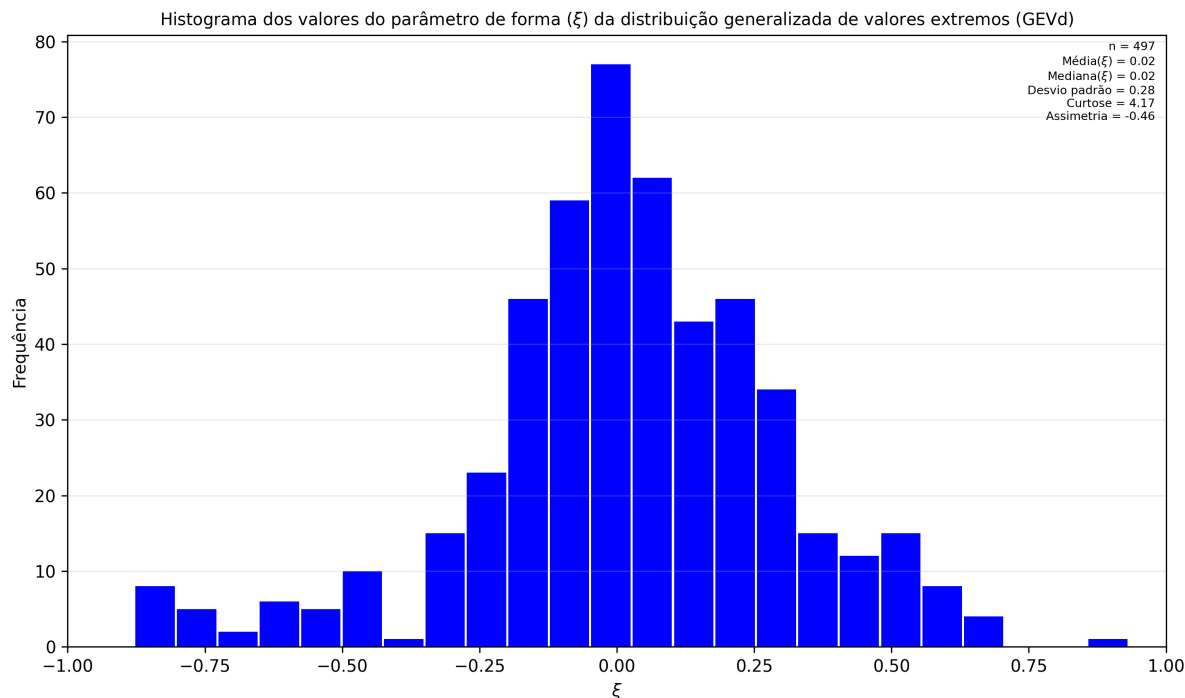
A distribuição generalizada de valores extremos (GEVd) combina três distribuições assintóticas de valores extremos conhecidas (Gumbel, Fréchet e Weibull) numa só equação governada por três parâmetros: μ (posição), σ (escala) e ξ (forma). Por meio do parâmetro ξ é possível identificar qual distribuição melhor descreve a série de dados de vazões máximas anuais (verossimilhança).

Tyralis, Papacharalampous e Tantane (2019) procuraram examinar a natureza do parâmetro de forma por meio da análise de suas relações com os atributos de 591 bacias dos Estados Unidos da América. A partir de informações sobre fluxos diários, índices climáticos, topográficos, cobertura do solo, tipo de solo e características geológicas verificaram que ξ apresenta um valor mediano de 0,19 e depende principalmente dos índices climáticos.

No presente trabalho, o valor encontrado para a mediana dos valores de ξ foi 0,02, indicando que a distribuição de Gumbel (tipo I) é comumente a mais verossímil às séries

de dados dos rios analisados, conforme se pode observar na [Figura 60](#).

Figura 60 – Histograma com os valores do parâmetro de forma (ξ) da distribuição generalizada de valores extremos encontrados para as séries de dados de cada estação selecionada para análise.



Fonte: o autor.

Para fins de classificação do tipo de distribuição de valor extremo que melhor descreve os dados de cada estação, optou-se por classificá-las considerando o intervalo de confiança de 95% em torno do valor de ξ da seguinte forma:

$$\xi_{inf} < 0 \wedge \xi_{sup} < 0 \longrightarrow \text{Weibull} \quad (30)$$

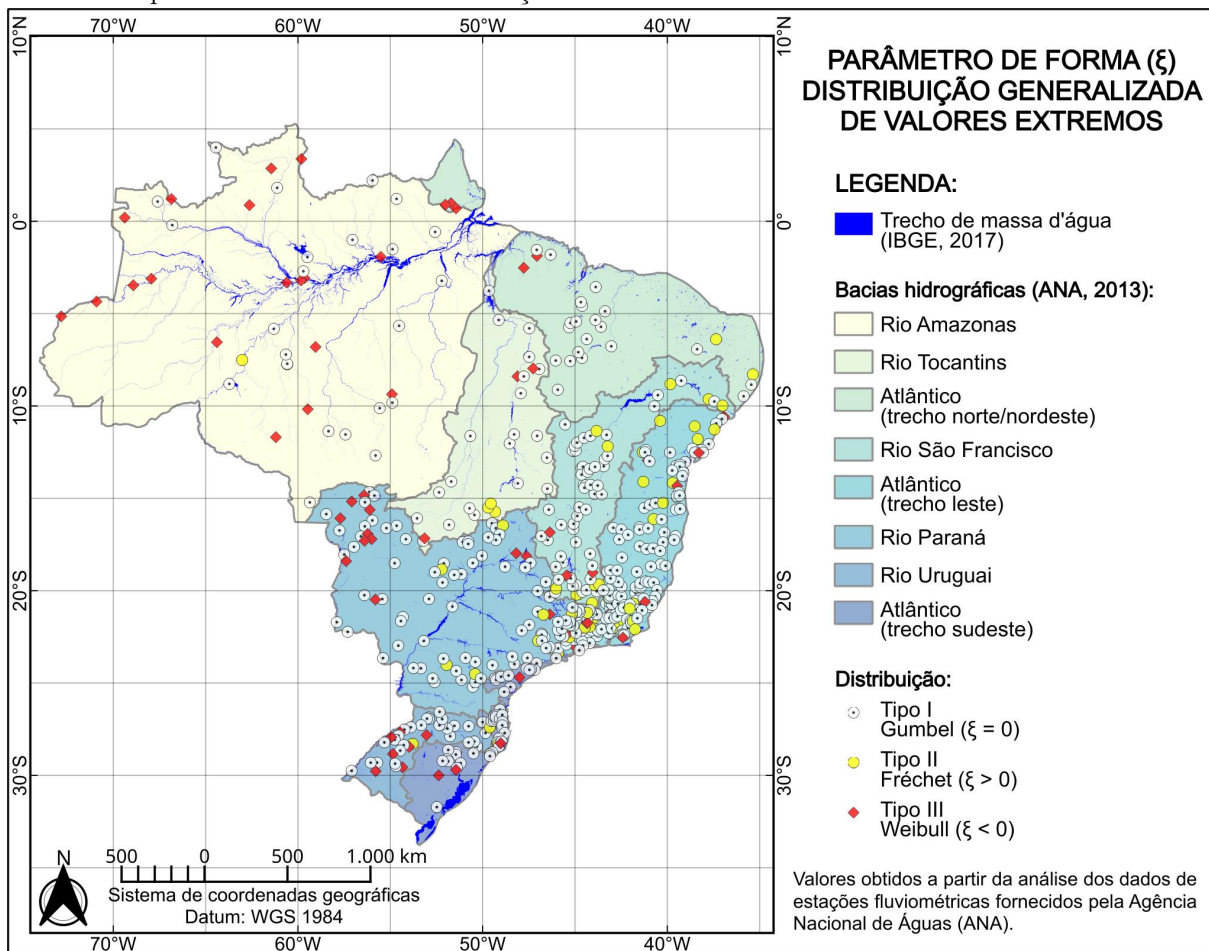
$$\xi_{inf} \leq 0 \wedge \xi_{sup} \geq 0 \longrightarrow \text{Gumbel} \quad (31)$$

$$\xi_{inf} > 0 \wedge \xi_{sup} > 0 \longrightarrow \text{Fréchet} \quad (32)$$

Onde ξ_{inf} e ξ_{sup} são, respectivamente, os limites inferior e superior do parâmetro de forma da distribuição generalizada de valores extremos (GEVd) para o intervalo de confiança de 95%.

As distribuições de valores extremos que melhor se ajustam aos dados de cada estação analisada podem ser observadas, espacialmente, no mapa apresentado na [Figura 61](#).

Figura 61 – Variação espacial do parâmetro de forma (ξ) da distribuição generalizada de valores extremos para as séries de dados das estações fluviométricas analisadas.



Fonte: o autor a partir de dados de ANA (2013, 2020) e IBGE (2017).

4.2.3 Tempo de recorrência para a vazão da cheia anual mais provável ou vazão dominante

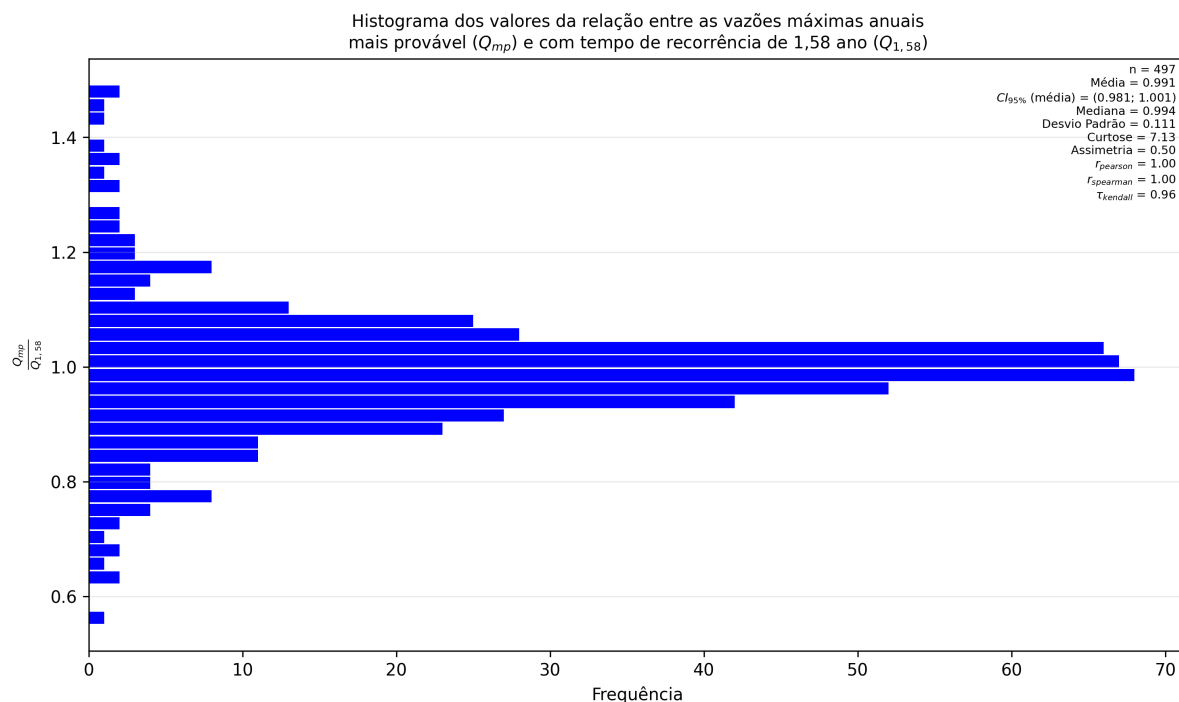
A vazão dominante ou de margens plenas, que modela o canal fluvial (GRISON; KOBAYAMA, 2011a), é uma definição estatística (PICKUP; WARNER, 1976) a partir dos valores máximos anuais, cujo valor mais provável corresponde a um tempo de recorrência de 1,58 ano ($Q_{1,58}$), o qual coincide com o pico da função de densidade de probabilidade (PDF) da distribuição de Gumbel.

Os resultados apresentados na subseção 4.2.2 (cf. Figuras 60 e 61) demonstram que a maior parte dos rios brasileiros podem ser descritos a partir da distribuição de Gumbel (Tipo I), que por sinal é a mais adotada no Brasil para cálculos hidrológicos. Contudo, há rios cujas séries são melhor definidas a partir da distribuição de valores extremos de Fréchet (Tipo II) ou Weibull (Tipo III).

Analisando-se a relação a vazão da cheia anual mais provável (Q_{mp}) e $Q_{1,58}$ para cada estação, observa-se que o valor esperado para relação $\frac{Q_{mp}}{Q_{1,58}}$ dentro de um intervalo

de confiança de 95% dá-se entre 0,981 e 1,001, de forma que há forte correlação entre elas (Pearson = 1,00; Spearman = 1,00; Kendall = 0,96), conforme pode ser observado na [Figura 62](#). Ao comparar-se as alturas de cheias nos mesmos cenários hidrológicos ([Figura 63](#)), a correlação permanece alta (Pearson = 0,99; Spearman = 0,99; Kendall = 0,93).

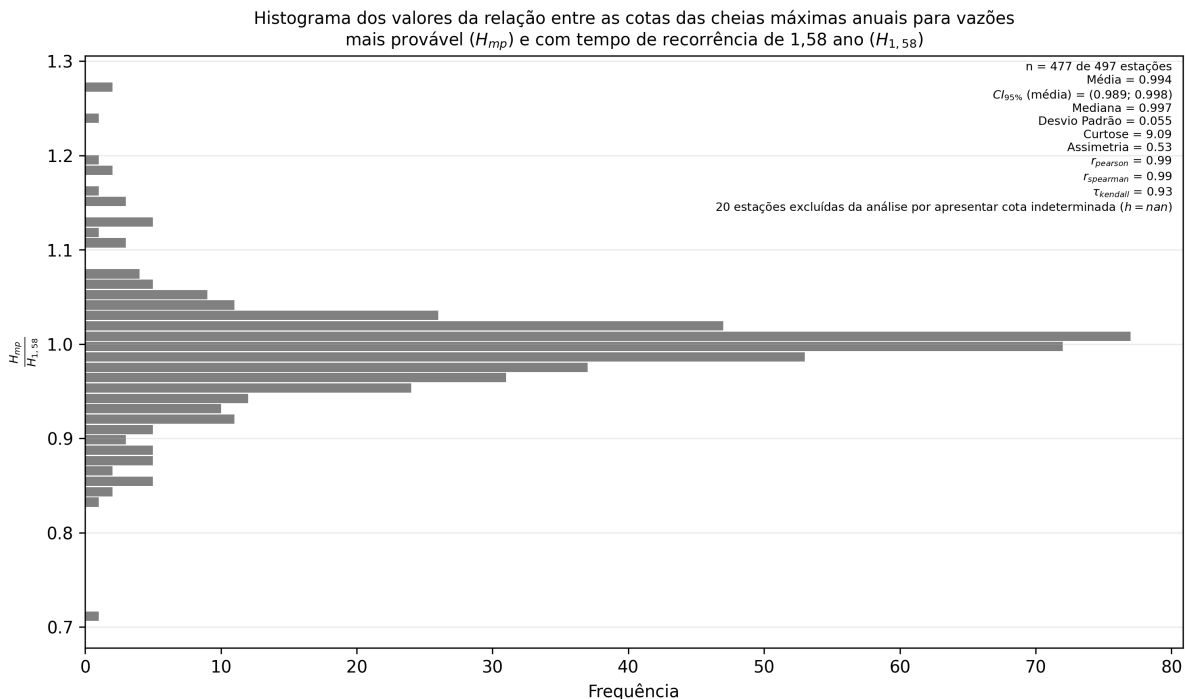
Figura 62 – Histograma apresentando a relação entre os valores das vazões da cheia anual mais provável (Q_{mp}) e com tempo de recorrência de 1,58 ano ($Q_{1,58}$) para as estações analisadas.



Fonte: o autor.

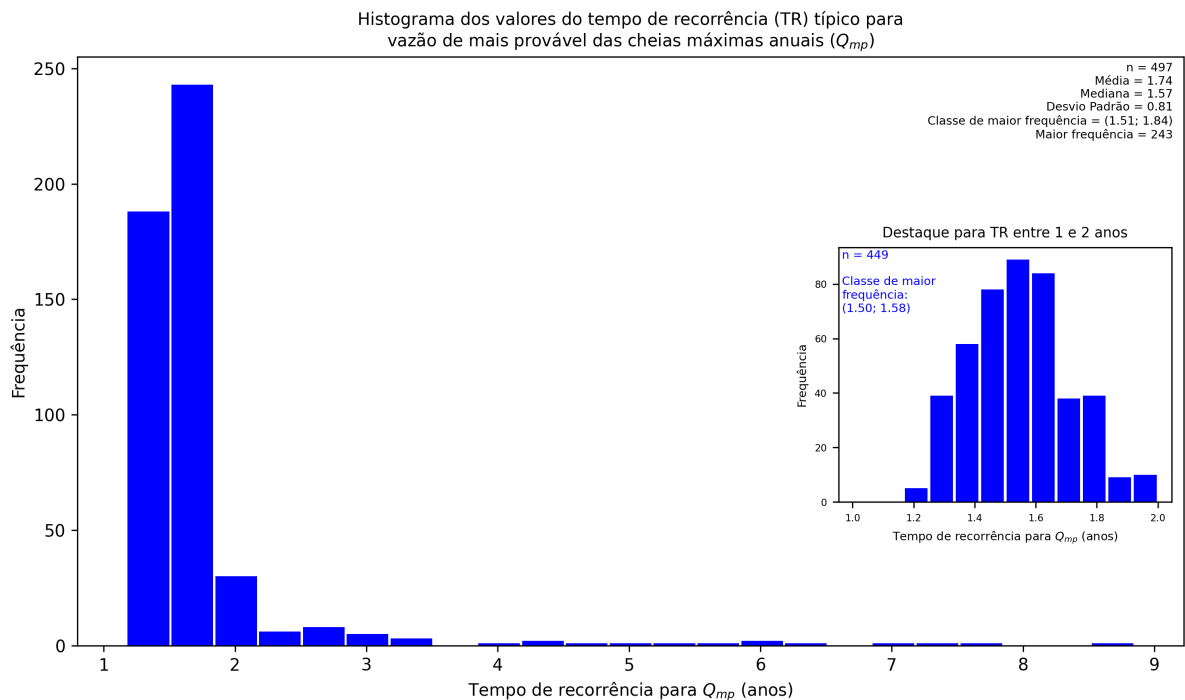
Os dados analisados indicam que os valores mais frequentes (pico do histograma) para o tempo de recorrência para a vazão de margens plenas encontram-se no intervalo entre 1,51 e 1,84 ano, apresentado uma mediana de 1,57 ano ([Figura 64](#)). Limitando-se o intervalo do histograma para tempos de recorrência entre 1 e 2 anos, a classe de maior frequência pelo método de Sturges ocorre entre 1,50 e 1,58 ano. Os resultados confirmam as informações disponíveis na literatura científica (cf. [Quadro 9](#)) e a escolha de $Q_{1,58}$ na [subseção 6.1.1](#) como o cenário hidrológico a ser considerado como critério científico para delimitação das áreas de preservação permanente.

Figura 63 – Histograma apresentando a relação entre os valores das cotas das cheias para as vazões da cheia anual mais provável (H_{mp}) e com tempo de recorrência de 1,58 ano ($H_{1,58}$) para as estações analisadas.



Fonte: o autor.

Figura 64 – Histograma com os valores encontrados para o tempo de recorrência das vazões para as cheias anuais mais prováveis (Q_{mp}) para as estações analisadas.



Fonte: o autor.

4.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Por meio da avaliação do tempo de recorrência esperado para a vazão dominante nos rios brasileiros, observou-se que a cheia anual mais provável corresponde a um período de retorno mediano de 1,57 ano, o que confirma a vazão da margens plenas mais adotada na literatura, $Q_{1,58}$ (cheia anual com tempo de recorrência de 1,58 ano), que corresponde ao valor mais provável na distribuição de Gumbel. Contudo, foi observado que existem rios cujas séries têm comportamentos verossímeis com outras distribuições, então, para análises realizadas em escala local, recomenda-se evitar a generalização e aplicar a vazão efetiva de margens plenas para aquele caso concreto (Q_{mp}), quando os dados disponíveis permitirem esse tipo de análise.

Para análise integrada dos cenários regulatórios para fins de definição de áreas de preservação permanente nas margens de rios brasileiros, adotar-se-á nos próximos capítulos a vazão da cheia anual mais provável correspondente ao tempo de recorrência de 1,58 ano ($Q_{1,58}$).

5 ANÁLISE DE SEÇÕES TRANSVERSAIS E CURVAS-CHAVE DE RIOS BRASILEIROS

Para o cálculo das áreas de preservação permanente (APP) nas margens de cursos d'água, as análises dos possíveis cenários regulatórios e as respectivas probabilidades de inundação dos respectivos espaços territoriais protegidos necessitam de dados confiáveis de cota e vazão, bem como de levantamentos de seções transversais que descrevam com precisão a topografia do leito do rio e de uma parcela significativa de suas margens.

O presente Capítulo tem por objetivo apresentar os métodos desenvolvidos para análise das seções transversais de rios brasileiros, considerando as séries de dados hidrológicos e variações na geometria dos canais fluviais, a identificação geométrica do leito fluvial em condição de margens plenas e a integração de dados de sensoriamento remoto com os registros de levantamentos *in situ* de seções transversais para obtenção das propriedades físicas geométricas de canais fluviais.

Em síntese, neste Capítulo são apresentados os métodos desenvolvidos para o programa *HidroAPP* para definição de curvas-chave entre cota e vazão, seleção de dados considerando a variação da geometria da seção transversal no tempo, o prolongamento dos perfis topográficos a partir de dados de modelos digitais de terreno, a obtenção de variáveis geométricas dos canais por meio de dados de sensoriamento remoto e a validação de uma técnica de identificação do leito fluvial em condição de margens plenas, somente com dados de geometria, para análises cotidianas em rios que não apresentam monitoramento regular.

5.1 METODOLOGIA

5.1.1 Exclusão de perfis transversais com depressões inferiores à cota do talvegue

O programa procura iniciar a análise de um perfil transversal a partir do ponto cuja cota é mínima (H_{min}), partindo-se da hipótese que o ponto de mínimo da seção coincide com o talvegue do rio.

Contudo, observa-se que as coordenadas de alguns perfis são informadas com cota inferior ao talvegue no início ou no final do perfil, provavelmente por erro de lançamento do registro. Tal fato gera no programa um *loop* infinito ao tentar calcular a geometria da seção transversal. Como não se deseja realizar a correção dos dados originais da ANA (2020), optou-se por excluir da análise os perfis transversais com essas características.

5.1.2 Exclusão de registros incoerentes nas medições em campo

Na filtragem preliminar de dados medidos em campo são removidos os registros que não obedecem a equação (SLATER; SINGER; KIRCHNER, 2015):

$$\frac{Q}{A_m \cdot \bar{v}} = 1 \pm t \quad (33)$$

Onde Q é a vazão medida, A_m a área molhada medida, \bar{v} a velocidade média medida e t o intervalo de tolerância (e.g., $t = 0,05$ para uma tolerância de $\pm 5\%$).

5.1.3 Análise dos critérios de seleção e consistência dos dados

Realizadas as etapas anteriores, para estação ser considerada apta para prosseguir nas fases posteriores de análise, seus dados devem observar as seguintes condições:

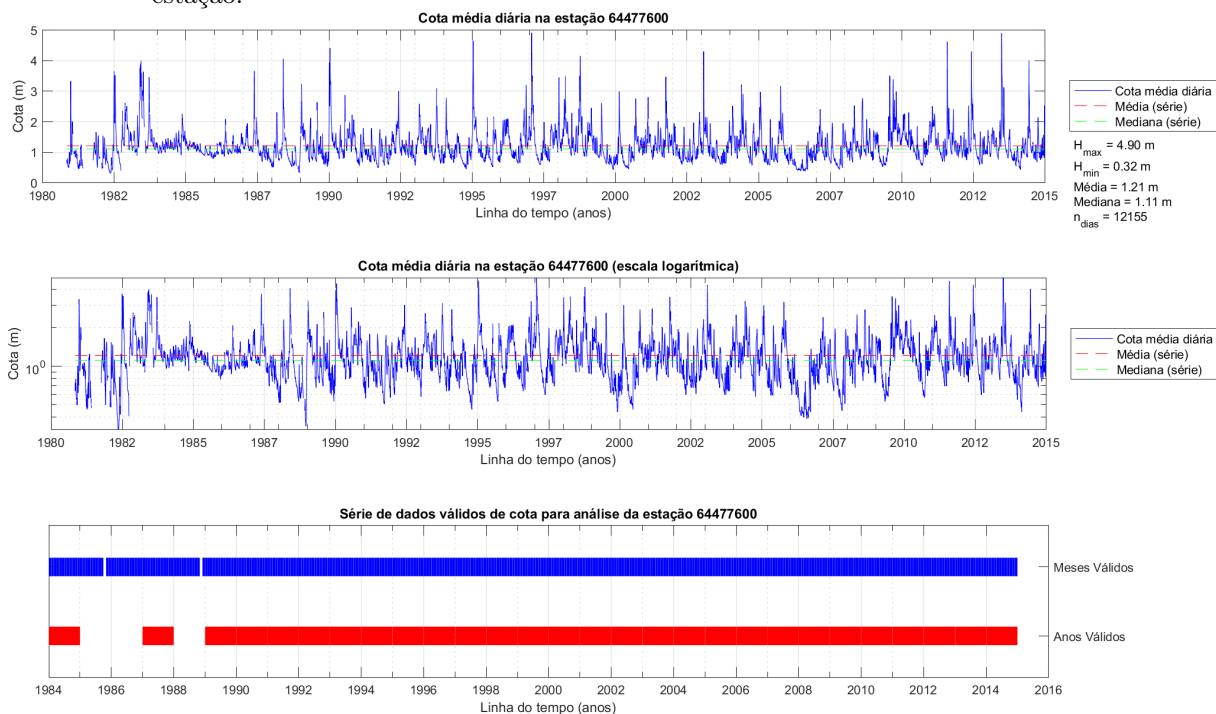
- Registros de cotas e vazões válidos de acordo com as condições estabelecidas para o nível de consistência, status e completude dos dados;
- Pelo menos um perfil transversal válido;
- Pelo menos uma curva-chave; e
- Número de medições em campo válidas maior que o número mínimo de medições válidas exigidas para análise (*minMedicoes*).

Caso uma destas condições não for satisfeita, a análise da estação é encerrada e seu código registrado na lista de estações excluídas da análise. Satisfeitas as condições para seleção e consistência dos dados, prossegue-se nas etapas a seguir.

5.1.4 Figuras das séries históricas de cotas e vazões selecionadas para análise

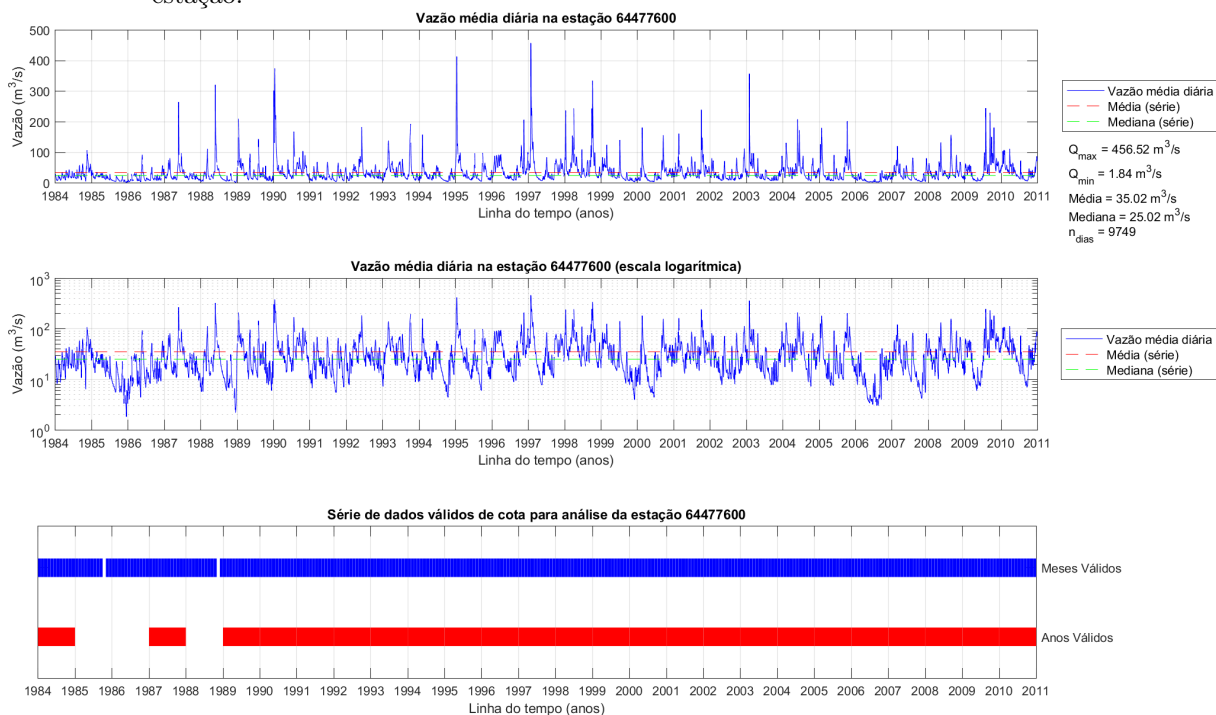
Para o período de análise delimitado são reunidas em uma só figura a série de dados válidos diários, mensais e anuais para cotas (Figura 65) e vazão (Figura 66). A partir das figuras produzidas o usuário pode conferir o comportamento da série temporal, para ter um panorama do período de análise delimitado (quando optar pela otimização) e as lacunas no interior da série de dados.

Figura 65 – Exemplo de série de dados diários, mensais e anuais válidos para os registros de cota de uma estação.



Fonte: o autor.

Figura 66 – Exemplo de série de dados diários, mensais e anuais válidos para os registros de vazão de uma estação.



Fonte: o autor.

5.1.5 Curva de permanência

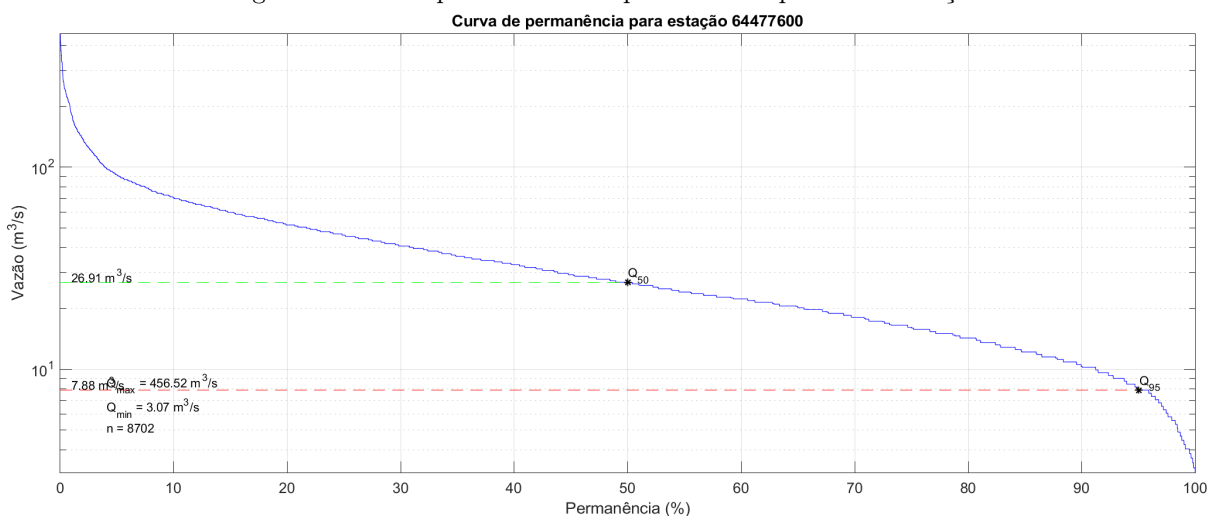
Para os meses e anos considerados inválidos na série, todos os registros diários de vazão são excluídos da análise para as etapas posteriores. A partir dos registros válidos remanescentes de vazões médias diárias é elaborada a curva de permanência na forma matricial e gráfica (Figura 67). Na representação gráfica são destacadas as localizações da mediana (Q_{50}) e da vazão de permanência (Q_{95}).

Numericamente, a curva de permanência é armazenada numa matriz (Equação 34) de duas colunas, correlacionando a probabilidade de ser excedida (p_i) determinada vazão (Q_i), que depois servirá para elaboração de cenários hidrológicos pelo usuário, se necessário.

$$CurvaPerm = \begin{bmatrix} p_i & Q_i \\ \vdots & \vdots \\ p_n & Q_n \end{bmatrix} \quad (34)$$

Onde p_i é a probabilidade da vazão Q_i ser excedida, sendo p_1 igual a um (100%) e $p_{i+1} < p_i$.

Figura 67 – Exemplo de curva de permanência para uma estação.



5.1.6 Figura das seções transversais disponíveis para análise

Neste ponto da análise os levantamentos de perfis transversais do rio já se encontram filtrados e os remanescentes são plotados numa figura que possibilita avaliar, subjetivamente, se existe variação considerável das seções transversais no período de análise (Figura 68).

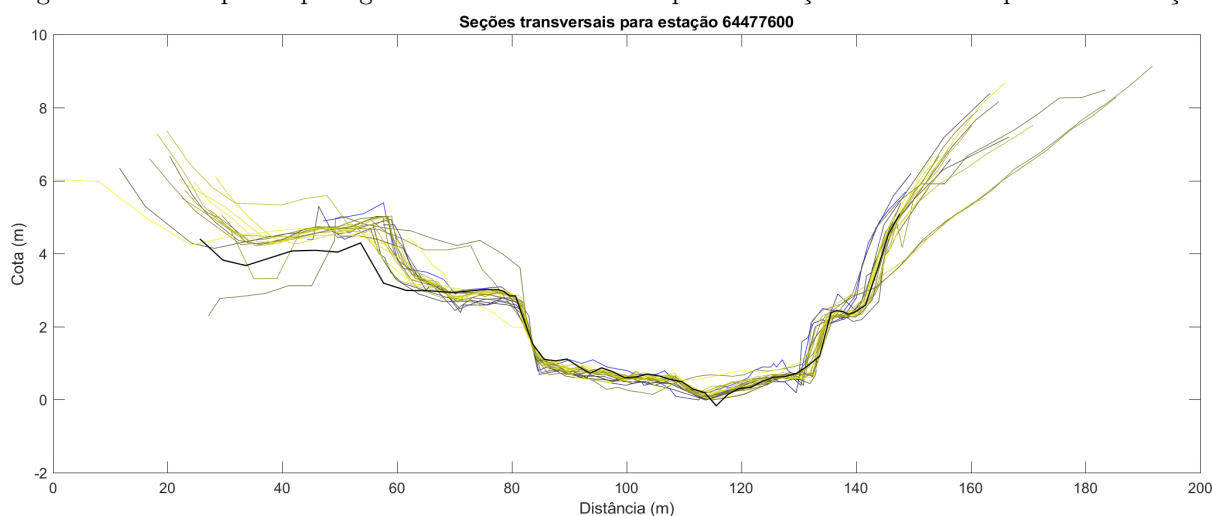
A função desenvolvida para gerar a plotagem dos levantamentos de perfis transversais retorna uma matriz que armazena o identificador no banco de dados (*Registro_ID*)

e a respectiva data de cada levantamento.

$$RegistroID_P = \begin{bmatrix} RegistroID_i & data_i \\ \vdots & \vdots \\ RegistroID_n & data_n \end{bmatrix} \quad (35)$$

Onde *Registro_ID* é o identificador do perfil transversal registrado no banco de dados e *data* é o dia no qual o levantamento foi realizado, armazenado no [formato numérico de data](#) do *matlab*.

Figura 68 – Exemplo de plotagem dos levantamentos de perfis de seções transversais para uma estação.



Fonte: o autor.

5.1.7 Cálculo da geometria da seção transversal

Para obtenção dos dados de geometria da seção transversal numa altura (*stage*) h foi desenvolvida uma função que exige como variáveis de entrada uma matriz com as coordenadas da seção transversal $([x_i \ y_i])$, a altura de cheia h e, opcionalmente, valores iniciais de área molhada (A_0) e perímetro molhado (P_0), os quais podem ser utilizados quando o perfil for extraído de um modelo digital de elevação (MDE) sem dados de batimetria, adotando-se uma área e perímetro molhados iniciais para a altura mínima do perfil (cota de cheia no momento da obtenção do MDE). A função retorna a área molhada ($A_m(h)$), o perímetro molhado ($P_m(h)$), coordenadas horizontais da borda do leito na margem esquerda ($X_a(h)$) e direita ($X_b(h)$) na altura h e uma matriz com as coordenadas da seção transversal molhada ($Secao|_{h_{min}}^h$).

```
[AmH, PmH, XaH, XbH, SecaoH] = GeometriaSecaoH(PERFIL, H, A0, P0);
```

Para encontrar o valor do perímetro molhado (P_m) e da área molhada (A_m) inicia-se o cálculo da seção transversal a partir do talvegue, que será o ponto de mínimo

absoluto da seção (h_{min}). Para seções de rios com fundo plano ou provenientes de um MDE, adota-se como coordenada do talvegue o primeiro ponto de mínimo da abscissa encontrado ($x = \min(y)$). O procedimento não gera problema para o cálculo, pois aqui o interesse é iniciar o rastreamento da seção a partir do ponto mais baixo com sucessivos incrementos na altura.

5.1.8 Método para prolongamento das seções transversais dos rios a partir de modelos digitais de elevação

O nível de detalhamento das características hidráulicas do canal do rio é uma necessidade para o desenvolvimento de modelos hidrológicos mais precisos (BJERKLIE et al., 2020). O progresso recente das tecnologias de sensoriamento remoto possibilitaram a criação de diversos modelos globais e continentais que buscam estimar a largura dos rios na condição de margens plenas (LEHNER; GRILL, 2013; ALLEN; PAVELSKY, 2018a,b; YAMAZAKI; IKESHIMA et al., 2019), mas ainda são necessários estudos que permitam estimar a profundidade dos canais fluviais e melhorar os modelos a partir das bases de dados de levantamento de campo disponíveis (LIN; PAN; ALLEN et al., 2020).

Os modelos globais e regionais fornecem seções transversais estimadas e com formato retangular (largura x profundidade). Menores erros no cálculo do nível de cheias são obtidos a partir da incorporação de dados de seções transversais medidas *in situ*, melhorando a discretização dos modelos (FLEISCHMANN; PAIVA; COLLISCHONN, 2019).

Os perfis das seções transversais disponíveis no banco de dados da ANA concentram-se na descrição dos leitos fluviais, normalmente, adentrando pouco nas planícies de inundação. Um dos objetivos do presente trabalho é avaliar a frequência de perturbações hidrológicas aos ecossistemas ripários, sendo necessário o cálculo dos tempos de recorrência de cheias nos limites externos das APPs em faixas marginais de rios, o que exige o emprego de métodos para ampliar os perfis topográficos das seções transversais.

Neste sentido, foi desenvolvido um método para estender as seções transversais dos levantamentos *in situ* da ANA a partir da topografia da planície de inundação, fornecida por modelos digitais de elevação. O método também pode ser utilizado, em outros trabalhos, para incorporação dos levantamentos *in situ* a modelos digitais de elevação regionais ou globais, visando aprimorar a modelagem hidrológica.

5.1.8.1 Extração de perfis de seções transversais a partir de modelos digitais de elevação

O método desenvolvido consiste em aproveitar modelos digitais que possuam base de dados descrevendo a rede hidrográfica (*stream*), a direção de fluxo (*flow direction*) e a elevação (*DEM*). É importante que essas três bases de dados possuam correlação espacial estrita, para permitir a extração de uma seção transversal ampla para cada estação

fluviométrica.

Os modelos globais de hidrografia *HydroSheds* (LEHNER; GRILL, 2013), *Global River Widths from Landsat - GRWL* (ALLEN; PAVELSKY, 2018a,b) e *MERIT Hydro* (YAMAZAKI; IKESHIMA et al., 2019) fornecem os dados necessários para o desenvolvimento de rotinas para extração dos perfis de seções transversais abrangendo as planícies de inundação nos locais das estações fluviométricas da ANA.

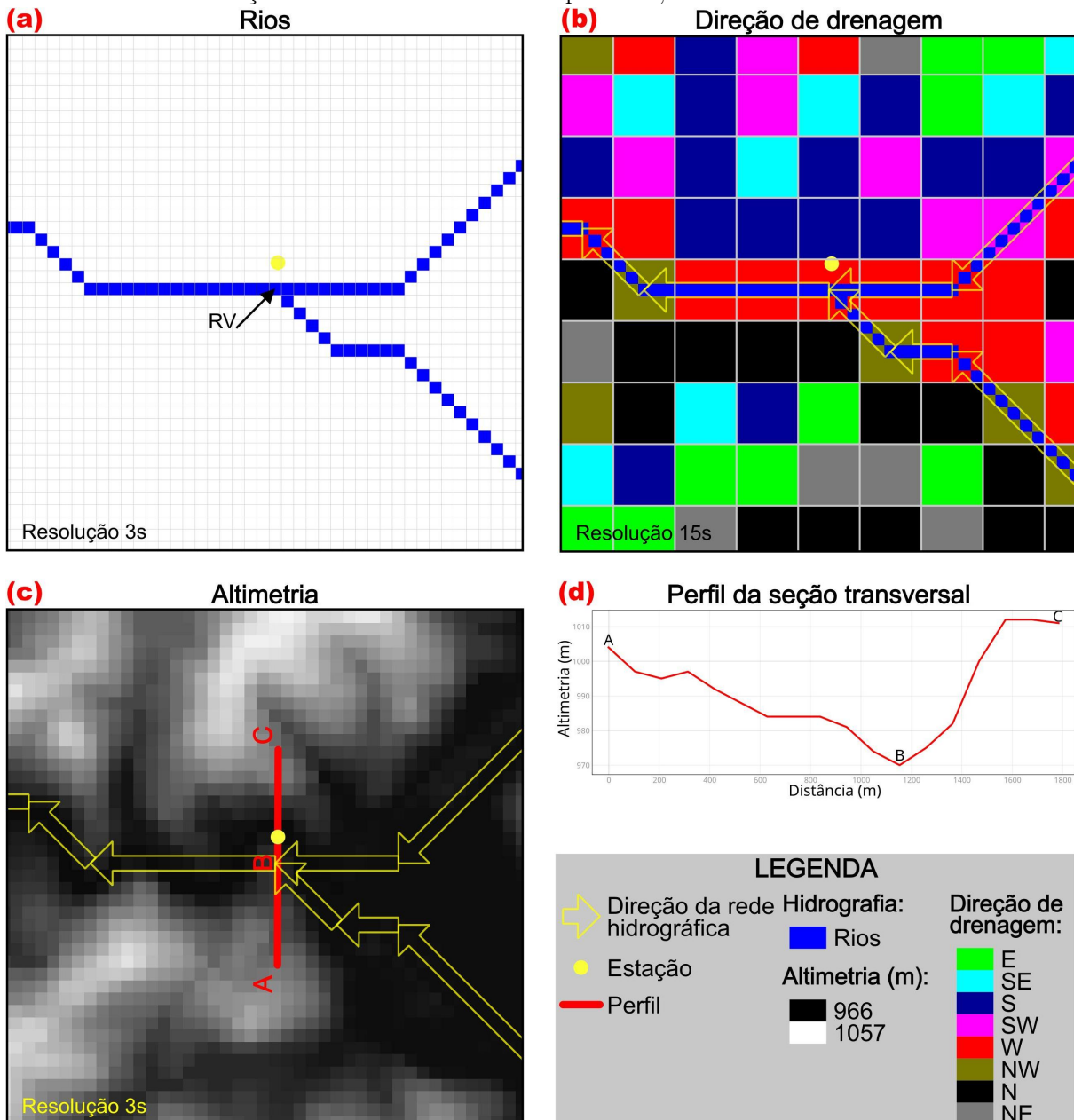
No caso, foi adotada a base de dados *HydroSheds* (LEHNER; GRILL, 2013), com os dados de largura dos rios do *banco de dados* desenvolvido por *Andreadis, Schumann e Pavelsky* (2013), pois tem sido empregada em estudos hidrológicos de larga escala na América do Sul (SIQUEIRA et al., 2018). Esse material tem a vantagem de apresentar a rede hidrográfica em formato vetorial completamente conectada, bem como fornece modelos matriciais de direção de fluxo e de elevação perfeitamente acoplados e hidrológicamente consistentes.

A base vetorial da rede hidrográfica de *Andreadis, Schumann e Pavelsky* (2013) é convertida para o formato matricial (*raster*) com resolução de 3 arcseg (aprox. 90 m), com o valor da largura esperada do rio armazenado no respectivo pixel (Figura 69a). Essa base vetorial é derivada da base de dados do *HydroSheds* com resolução de 15 arcseg, mas foi convertida para 3 arcseg para manter a mesma resolução do modelo digital de elevação (*DEM*) de melhor resolução disponível naquela base, no caso, o modelo de elevação hidrológicamente condicionado (*CON*) de 3 arcseg (Figura 69c). Para as direções de drenagem é conveniente utilizar a mesma base empregada para gerar a rede hidrográfica, por isso foi escolhida a base com resolução 15 arcseg (Figura 69b).

O procedimento para gerar os perfis das seções transversais consiste em procurar o ponto do leito do rio (*RV*) mais próximo das coordenadas da estação na rede hidrográfica. Uma vez identificado, *RV* será o ponto central da seção transversal, cuja amplitude horizontal é estimada a partir da largura do rio (ANDREADIS; SCHUMANN; PAVELSKY, 2013) mais oito vezes o valor esperado para área de preservação permanente (Figura 69d). A direção da seção transversal é obtida por meio da transformação algébrica da direção de drenagem (DIR_{river}) para o plano ortogonal mantendo a margem esquerda do rio no sentido montante para jusante. Calculadas as coordenadas inicial e final do perfil da seção transversal, a altimetria é extraída do modelo digital de elevação hidrológicamente condicionado (*CON*) com espaçamento definido pelo usuário, por média entre os pontos de intersecção. Recomenda-se que a resolução horizontal do perfil transversal seja pelo menos a metade da resolução do modelo de elevação (neste caso, 45 m) para permitir retratar melhor o terreno quando os pontos amostrados não coincidirem com o centro dos píxeis da base matricial.

Para implementação do método foram desenvolvidas rotinas para obter o perfil transversal para todas as estações previamente ao início das análises, que podem ser consultadas por meio do Quadro C.1 no Apêndice.

Figura 69 – Síntese do método para extração de perfis estendidos das seções transversais de rios a partir de modelos digitais de elevação. (a) Rede hidrográfica com indicação do ponto do rio (RV) mais próximo do local da estação fluviométrica. (b) Direção de drenagem. (c) Altimetria. (d) Perfil da seção transversal do rio entre os pontos A, B e C.



Fonte: o autor a partir de dados de [Lehner e Grill \(2013\)](#) e [Andreadis, Schumann e Pavelsky \(2013\)](#).

5.1.8.2 Acoplamento entre os perfis das seções transversais da ANA e os extraídos de modelos digitais de elevação

Uma vez definido o perfil da seção transversal a partir do modelo digital de elevação, o passo seguinte é procurar incorporá-lo às margens do levantamento topográfico de precisão disponível na base de dados da ANA e escolhido para as análises, que será o perfil paradigma (*Perfil ANA*).

$$[Perfil\ ANA] = \begin{bmatrix} x_i & y_i \\ \vdots & \vdots \\ x_n & y_n \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$[Perfil\ DEM] = \begin{bmatrix} \chi_i & z_i \\ \vdots & \vdots \\ \chi_n & z_n \end{bmatrix} \quad (37)$$

Onde *Perfil ANA* é a matriz cujas colunas armazenam as coordenadas horizontais (x) e verticais (y) do perfil topográfico da seção transversal disponível no banco de dados da ANA; *Perfil DEM* é a matriz cujas colunas armazenam a coordenada horizontal (χ) do perfil topográfico em relação ao início da seção transversal (ponto “A” na [Figura 69c,d](#)) e a elevação (z) em relação ao *datum* vertical do modelo digital de terreno.

O método consiste em extrair do perfil do levantamento de campo a maior seção molhada, i.e., aquela que possua a máxima altura com pontos homólogos em ambas as margens ($h_{max}|_{Perfil\ ANA}$). Em seguida, as coordenadas horizontais da seção são ajustadas de forma que o ponto central tenha valor nulo ($x = 0|_{centro\ Perfil\ ANA}$) e a amplitude horizontal do perfil corresponda à largura máxima, definida entre os pontos ($\frac{-w_{max}}{2}, h_{max}$) e ($\frac{+w_{max}}{2}, h_{max}$). O ponto central não é necessariamente o talvegue do rio.

Para ajuste horizontal do perfil extraído do DEM, procura-se identificar a seção transversal molhada com a mesma largura da seção paradigma, cuja elevação será posteriormente utilizada para junção das seções transversais:

$$w(z_{ajuste})|_{Perfil\ DEM} = w_{max}|_{Perfil\ ANA} \quad (38)$$

Uma vez conhecida a matriz *Perfil DEM*, realiza-se o ajuste das coordenadas horizontais pelo seu ponto central, para o qual será atribuído à coordenada $\chi = 0|_{centro\ Perfil\ DEM}$. Com isso, as coordenadas horizontais dos perfis das seções transversais da *Perfil ANA* e *Perfil DEM* ficam alinhadas ($x \equiv \chi$).

Descartam-se os pontos da matriz *Perfil DEM* compreendidos no intervalo $\chi \in \left[\frac{-w_{max}}{2}; \frac{+w_{max}}{2}\right]$, formando-se duas matrizes com as coordenadas dos perfis do relevo nas margens adjacentes ao leito fluvial:

$$[Perfil\ DEM_{dir}] = [Perfil\ DEM] \begin{cases} max(\chi) \\ \frac{w_{max}}{2} \end{cases} \quad (39)$$

$$[Perfil\ DEM_{esq}] = [Perfil\ DEM] \begin{cases} \frac{-w_{max}}{2} \\ min(\chi) \end{cases} \quad (40)$$

Onde $Perfil\ DEM_{esq}$ e $Perfil\ DEM_{dir}$ são as matrizes com os perfis dos terrenos adjacentes ao rio nas margens esquerda e direita, respectivamente.

Para acoplamento da seção transversal do levantamento da ANA, realiza-se o ajuste das elevações dos perfis extraídos do DEM por meio da diferença entre os valores de altura (h_{max}) e elevação (z_{ajuste}) nos pontos de junção:

$$H_{ajuste} = h_{max} - z_{ajuste} = h|_{Perfil\ ANA, x=(\frac{w}{2})} - z|_{Perfil\ DEM, x=(\frac{w}{2})} \quad (41)$$

$$[Perfil\ DEM_{esq\ ajustado}] = [Perfil\ DEM_{esq, (_,1)}; Perfil\ DEM_{esq, (_,2)} + H_{ajuste}] \quad (42)$$

$$[Perfil\ DEM_{dir\ ajustado}] = [Perfil\ DEM_{dir, (_,1)}; Perfil\ DEM_{dir, (_,2)} + H_{ajuste}] \quad (43)$$

Onde $Perfil\ DEM_{esq\ ajustado}$ e $Perfil\ DEM_{dir\ ajustado}$ são matrizes com os pares de pontos (x_i, y_i) com as coordenadas dos perfis adjacentes ao rio extraídos do DEM nas margens esquerda e direita, respectivamente, com as coordenadas horizontais e verticais ajustadas ao sistema de referência de $Perfil\ ANA$ ²¹.

Por fim, a seção transversal estendida do rio ([Figura 70](#)) é obtida por meio da concatenação das matrizes:

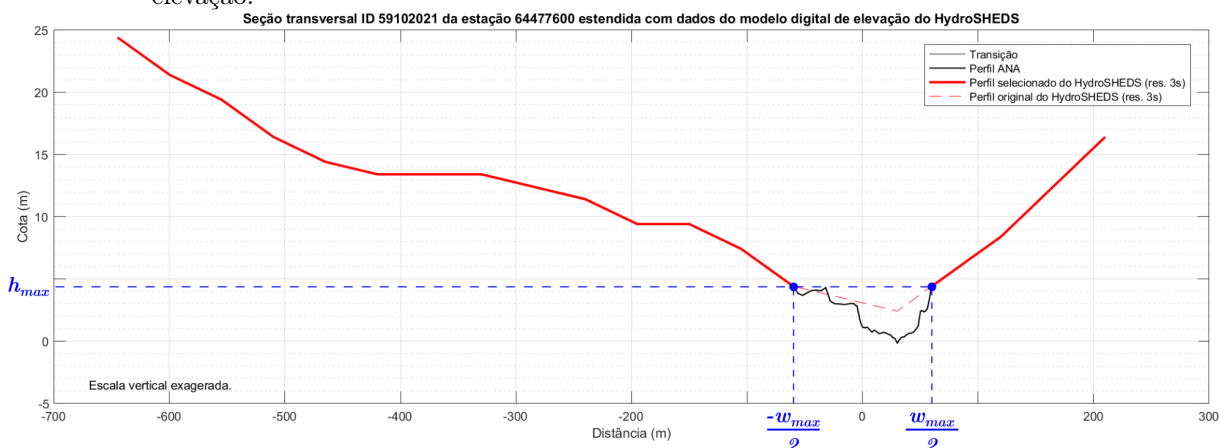
$$PERFIL_{estendido} = \begin{bmatrix} [Perfil\ DEM_{esq\ ajustado}] \\ [Perfil\ ANA] \\ [Perfil\ DEM_{dir\ ajustado}] \end{bmatrix}_{n_p \times 2} \quad (44)$$

Onde $PERFIL_{estendido}$ é uma matriz com os pares de pontos (x, y) com as coordenadas do perfil da seção transversal do levantamento da ANA estendida com o perfil do terreno fornecido a partir de modelo digital de elevação (DEM).

As rotinas desenvolvidas para implementação do método, em linguagem *matlab*, podem ser consultadas por meio do [Quadro C.3](#), na [subseção C.2.3](#) em Apêndice.

²¹ Note-se que é possível alterar as equações para que o perfil da seção transversal adote o sistema de referência vertical do modelo digital de elevação. Contudo, neste trabalho, optou-se por utilizar o sistema de coordenadas do perfil topográfico da ANA para permitir a aplicação das curvas-chave e demais dados da série histórica, que são referenciados a esse sistema de referência.

Figura 70 – Exemplo de perfil de seção transversal estendido a partir de dados de modelo digital de elevação.



Fonte: o autor.

5.1.9 Definição das curvas-chave

O programa desenvolvido permite correlacionar cotas (h) e vazões (Q) para uma determinada seção transversal por três formas:

- i. Curva-chave definida pela ANA:

Busca-se no banco de dados aquela cujo período de validade abrange a data de levantamento do perfil da seção transversal e, por exceção, a curva-chave com período de validade temporalmente mais próximo da data do levantamento;

- ii. Curva-chave uniforme para toda a série:

Gerada por regressão de todos os dados de medições em campo de cotas e vazões válidas disponíveis, sem considerar alterações na seção transversal;

- iii. Curva-chave otimizada para seção transversal em análise:

Gerada por regressão de dados de medições em campo previamente selecionados por meio de análise de levantamentos anteriores de perfil da seção transversal do rio. Somente são considerados os dados de cota e vazão do período no qual os levantamentos de perfis transversais não apresentam variação geométrica significativa.

Obtidas ou calculadas as curvas-chave pelos três métodos acima, o programa adotará a seguinte *ordem de prioridade*:

- 1º. Curva-chave otimizada para seção transversal em análise;
- 2º. Curva-chave definida pela ANA; ou
- 3º. Curva-chave uniforme para toda a série.

Se nenhum dos três métodos retornar uma curva-chave válida, a análise da estação é encerrada e seu código armazenado na lista de estações excluídas.

5.1.9.1 Estabelecimento de uma curva-chave cota vs. vazão por meio de regressão numérica dos dados medidos em campo considerando a variabilidade das seções transversais no tempo

Para estabelecer uma curva-chave que retrate com precisão a variação da vazão em função da cota numa determinada seção transversal é interessante utilizar os dados de medições de vazão em campo, que são apresentados pela ANA (2020) na tabela *ResumoDescarga*, e dos levantamentos de perfis das seções transversais, armazenados nas tabelas *PerfilTransversal* e *PerfilTransversalVert*.

As curvas-chave sofrem modificações com o tempo devido às alterações da seção transversal, principalmente quanto à forma e rugosidade. Para utilização dos dados de medições de vazão em campo é necessário definir qual o período da série é confiável para estabelecer a relação entre cota e vazão para a seção transversal desejada.

Partindo-se da data do levantamento da seção transversal escolhida (seção paradigma), realiza-se a comparação com seções de levantamentos anteriores até encontrar uma data cujas propriedades geométricas da seção divergem significativamente da seção paradigma, para então definir o período no qual os dados de medição de vazão podem ser utilizados para o estabelecimento de uma curva-chave customizada.

Em síntese, o método consiste em gerar para cada levantamento de seção transversal uma curva do raio hidráulico (R_h) em função da cota (h) e analisar a variação entre a curva da seção em análise com a seção paradigma (normalmente, a mais recente). Enquanto a variabilidade for aceitável, pode-se ir regredindo no tempo e aumentando o período a ser utilizado para amostra das medições de cota e vazão.

O usuário pode informar o código identificador (*PerfilRegistroID*) do levantamento da seção transversal paradigma e a data final para definir o intervalo de análise (*DataFinalAnalise*). Caso estes dois parâmetros de entrada da função não sejam informados, a rotina automaticamente utilizará como paradigma o levantamento mais recente do perfil da seção transversal e será adotada para o final do intervalo de análise a data do registro de vazão medida mais recente.

Método:

- a) A partir da seção transversal mais recente, gera-se uma curva em função de suas propriedades geométricas. Foi escolhido o raio hidráulico.

$$\gamma = R_h(h) = \left(\frac{A_m(h)}{P_m(h)} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (45)$$

Onde R_h é o raio hidráulico da seção transversal na cota h ; A_m é a área molhada da seção transversal na cota h ; e P_m é o perímetro molhado da seção transversal na cota h .

No lugar do raio hidráulico, pode-se utilizar uma equação que retrate o comporta-

mento esperado da vazão por meio do emprego da parte da fórmula de Manning que é função da geometria da seção transversal:

$$\varphi = A_m(h) \cdot \left(\frac{A_m(h)}{P_m(h)} \right)^{\frac{2}{3}} = \frac{A_m(h)^{\frac{5}{3}}}{P_m(h)^{\frac{2}{3}}} \quad (46)$$

Nos primeiros testes observou-se que a [Equação 45](#) é mais sensível às alterações na seção transversal do que a [Equação 46](#), motivo pelo qual se adotou a curva do raio hidráulico ([Equação 45](#)) para comparação entre as seções transversais.

- b) Para verificar se duas seções transversais são semelhantes, emprega-se dois testes estatísticos para comparar os dados gerados pela [Equação 45](#).

Foram escolhidos os testes t de Student e F de Fisher para comparação entre duas amostras, no caso, os pontos das curvas do R_h de cada seção transversal.

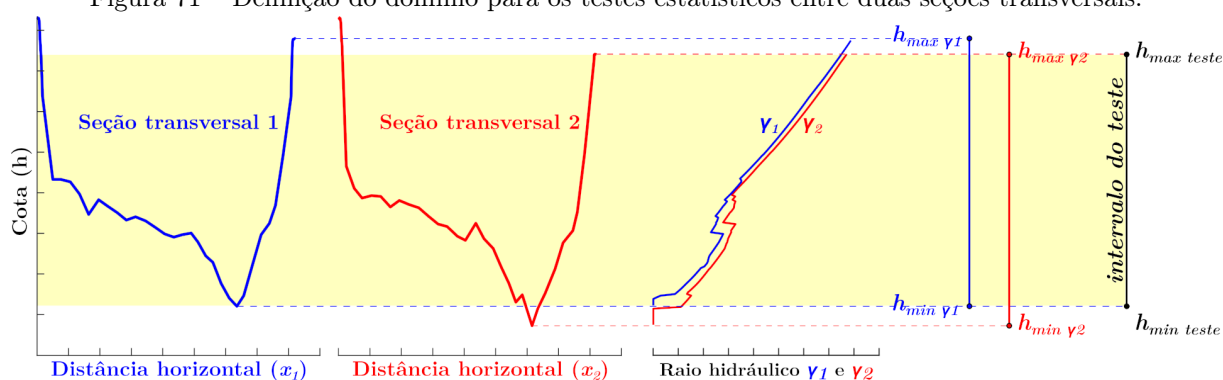
Para aumentar a precisão do teste, deve-se comparar somente os domínios das curvas que sejam coincidentes, pois os levantamentos topográficos podem ter amplitudes diferentes.

Domínio do teste:

Sejam γ_1 e γ_2 as curvas que descrevem a variação do raio hidráulico (R_h) em função da cota (h) da seção transversal, o domínio para análise compreenderá os pontos que se encontrarem no intervalo definido na [Equação 47](#) e na [Figura 71](#).

$$h \in [\max(h_{\min \gamma_2}, h_{\min \gamma_1}); \min(h_{\max \gamma_2}, h_{\max \gamma_1})] \quad (47)$$

Figura 71 – Definição do domínio para os testes estatísticos entre duas seções transversais.



Fonte: o autor.

Uma outra vantagem em comparar a variação entre as duas equações do raio hidráulico é a possibilidade de identificar alterações de *datum* entre séries temporais. Mesmo no caso de a seção ter permanecido praticamente sem alterações, a alteração de *datum* (modificação do “zero da régua”) vai gerar a rejeição da hipótese nula do teste estatístico ($hypothesis = 1$) devido à diferença de paralaxe entre as curvas γ_1 e γ_2 .

Testes empregados para comparação das duas amostras γ_1 e γ_2 :

Teste t de Student e o teste F de Fisher. Na linguagem *matlab* o código utilizado é o seguinte:

```
[httest, pttest, ci, stats] = ttest2(f1, f2, 'alpha', 0.01);
[hvartest, pvartest, ci, stats] = vartest2(f1, f2, 'alpha', 0.01);
```

Se um dos testes rejeitar a hipótese nula, a seção transversal é considerada como não semelhante à seção paradigma e tem-se o período de análise dos dados medidos definido como a data mais recente da série (ou arbitrada pelo usuário) até a data da seção mais antiga não rejeitada.

Definidos os dados de cotas e vazões medidas em campo, procede-se ao estabelecimento da equação da curva-chave (Q_r) mediante regressão numérica. As curvas-chave costumam ser descritas por equações potenciais do tipo $a \cdot (H - H_0)^n$. Slater, Singer e Kirchner (2015) empregou para dados hidrológicos e de geometria em seções transversais regressão polinomial local (*Locally Weighted Scatterplot Smoothing – Loess*). Neste trabalho, no desenvolvimento da rotina de cálculo optou-se por utilizar o modelo de regressão por curva *spline* suavizada (*smoothing spline*), pois descreve melhor o comportamento da curva nos trechos iniciais e final do intervalo (domínio) de regressão e possui similaridade com o método Loess.

A preocupação com o tratamento preciso do início e final da curva-chave deve-se ao fato que eventuais cenários hidrológicos a serem simulados podem estar em cotas superiores ou inferiores ao intervalo objeto de regressão, os quais serão extrapolados a partir da equação de Manning (cf. subseção 5.1.9.4).

5.1.9.2 Curva-chave definida pela ANA

Para permitir ao programa encontrar a curva-chave definida pela ANA para uma determinada seção transversal, é necessário encontrar o código identificador no registro em banco de dados (*ID*) para a curva-chave cujo período de validade compreenda a data de medição do perfil transversal ou, quando o levantamento não tiver sido executado durante o período de validade de alguma curva-chave, procurar a curva-chave mais próxima possível da data de levantamento do perfil. Encontrado o *ID* da curva-chave, faz-se necessário conferir o tipo de curva (1 = equação; 2 = tabela).

Considerando que as curvas-chave para correlação entre cota (*stage*) e vazão podem apresentarem-se na forma de tabela (matriz $[h Q]$) ou de equações, todas as funções de análise foram desenvolvidas para automaticamente identificar se *CurvaChave* é um vetor, representado os coeficientes da equação, ou uma matriz, com a curva discretizada.

Para os casos onde a curva-chave é definida por equação, optou-se por transformá-la para o formato de tabela (matriz) para uniformização. Neste caso, a interação da função

da curva-chave dá-se em intervalos δh .

$$CurvaChave = \begin{bmatrix} h_{min} & Q_1 \\ \vdots & \vdots \\ h_{max} & Q_n \end{bmatrix}_{\lceil \frac{h_{max}-h_{min}}{\delta h} \rceil + 1 \times 2} \quad (48)$$

Onde h_{min} e h_{max} são as cotas mínima e máxima de validade da equação, respectivamente; Q é a vazão correlata.

Existem quatro tipos de equações disponíveis:

a) Potencial:

$$Q = a \cdot (h - h_0)^n \quad (49)$$

b) Linear:

$$Q = a_0 + a_1 \cdot h \quad (50)$$

c) Parabólica:

$$Q = a_0 + a_1 \cdot h + a_2 \cdot h^2 \quad (51)$$

d) Cúbica:

$$Q = a_0 + a_1 \cdot h + a_2 \cdot h^2 + a_3 \cdot h^3 \quad (52)$$

Apesar de o manual do *HidroWeb* informar que as medidas de cotas são sempre em centímetros (cm), observou-se que os coeficientes a , h_0 e n da equação potencial (Equação 49) estão estimados para unidades em metros. Então, o valor informado de h_0 é em metro e a cota h deve ser informada nesta mesma unidade. Contudo, as informações quanto à cota mínima e máxima de validade da equação, informadas na tabela *CurvaDescarga* estão em centímetros.

No caso de equação, a partir dos índices é possível calcular a cota (h) para a vazão consultada (Q). No caso de utilizar-se tabela, há necessidade de prestar atenção no formato adotado pela ANA, que define três colunas na tabela *CurvaDescargaTabelaVazao*: “RegistroID”, “Vazao” e “Cota”.

A variável (coluna) *Cota* é informada com valores nulos (0), então para formar a curva-chave $Q = f(h)$ é necessário atribuir ao menor valor de vazão (Q_{min}) a cota mínima (h_{min} , obtida pela variável: *CotaMinima* da tabela *CurvaDescarga*) e de forma incremental gerar a cada passo $\delta_{h,RC}$ (obtido da variável: “TabelaPassoCota” da tabela *CurvaDescarga*) o valor da cota correspondente à vazão na etapa i :

$$h_i = h_{min} + \delta_{h,RC} \cdot i \quad (53)$$

5.1.9.3 Curva-chave uniforme para toda a série

Quando para uma estação não há curva-chave válida no banco de dados da ANA ou levantamentos de perfis não são suficientes para definir um período no qual as seções transversais permaneceram estáticas para gerar uma curva-chave otimizada, como última alternativa, pode-se adotar uma curva-chave uniforme para todo o período de análise, gerada a partir da regressão de todos os dados de levantamento em campo de cotas e vazões válidas disponíveis.

5.1.9.4 Extrapolação da curva-chave pela equação de Manning para abranger toda a seção transversal

Normalmente, as medições de cota e vazão em campo não ocorrem em cenários de grandes cheias ou estiagens extraordinárias e, por isso, formam uma curva-chave cujo intervalo de validade não abrange toda a variação altimétrica da seção transversal. Como o programa desenvolvido tem por objetivo permitir a simulação de cenários extremos, a solução adotada para extrapolação da curva chave para as cotas mais baixas (até a vazão nula) e para os locais mais elevados da planície de inundação foi a adoção da equação de Manning.

Procedimento similar foi adotado por [Zheng et al. \(2018\)](#), que extraiu as curvas-chave de rios a partir da geometria das seções transversais, definidas pelo modelo HAND²², utilizando a equação de Manning. Naquele estudo a rugosidade dos canais foi predefinida ($\eta = 0,05$), sendo a declividade (S) extraída do modelo descritivo do terreno, para depois ajustar-se η na fase de calibração dos resultados.

No presente trabalho, para aumentar a precisão das curvas-chave, isola-se os parâmetros de rugosidade (η) e declividade do fluxo hídrico (S) do canal fluvial na equação de Manning, formando-se a variável K :

$$Q = \frac{A_m(h)^{\frac{5}{3}}}{P_m(h)^{\frac{2}{3}}} \cdot \frac{\sqrt{S}}{\eta} \quad (54)$$

Onde:

$$K = \frac{\sqrt{S}}{\eta} \quad (55)$$

Os valores da área e perímetro molhados (A_m e P_m) são conhecidos e extraídos diretamente do perfil da seção transversal. Os valores de K podem ser obtidos diretamente dos pontos extremos da curva-chave gerada por meio de regressão numérica ou obtida do banco de dados da ANA (extremos do intervalo de validade da equação ou tabela).

²² Height Above the Nearest Drainage (altura acima da drenagem mais próxima).

Tal procedimento permite o emprego da equação de Manning a partir dos extremos da curva-chave, garantindo-se sua amplitude e continuidade para toda a seção transversal.

Para o trecho inicial da seção transversal, compreendido entre a cota do talvegue do rio (h_{min}) e o início da equação de regressão (h_{rmin}), para o cálculo das vazões (Q_1) em função da cota (h), sendo Q_r a equação da vazão no trecho submetido a regressão numérica e Q_{r1} o valor da vazão no ponto inicial da curva-chave onde $h = h_{rmin}$, tem-se:

$$Q_r = f(h), \forall h \in [h_{rmin}; h_{rmax}] \quad (56)$$

$$Q_{r1} = Q_r|_{h_{rmin}} \quad (57)$$

$$Q_{r1} = \frac{(A_m|_{h_{rmin}})^{\frac{5}{3}}}{(P_m|_{h_{rmin}})^{\frac{2}{3}}} \cdot K_1 \quad (58)$$

$$K_1 = \frac{Q_{r1} \cdot (P_m|_{h_{rmin}})^{\frac{2}{3}}}{(A_m|_{h_{rmin}})^{\frac{5}{3}}} \quad (59)$$

$$\therefore Q_1(h) = \frac{A_m(h)^{\frac{5}{3}}}{P_m(h)^{\frac{2}{3}}} \cdot K_1, \forall h \in [h_{min}; h_{rmin}] \quad (60)$$

Analogamente, para o trecho compreendido entre o final da equação de regressão (h_{rmax}) e a cota máxima do perfil da seção transversal com ponto homólogo na margem oposta (h_{max}), para o cálculo das vazões (Q_2) em função da cota (h), tem-se:

$$Q_{r2} = Q_r|_{h_{rmax}} \quad (61)$$

$$K_2 = \frac{Q_{r2} \cdot (P_m|_{h_{rmax}})^{\frac{2}{3}}}{(A_m|_{h_{rmax}})^{\frac{5}{3}}} \quad (62)$$

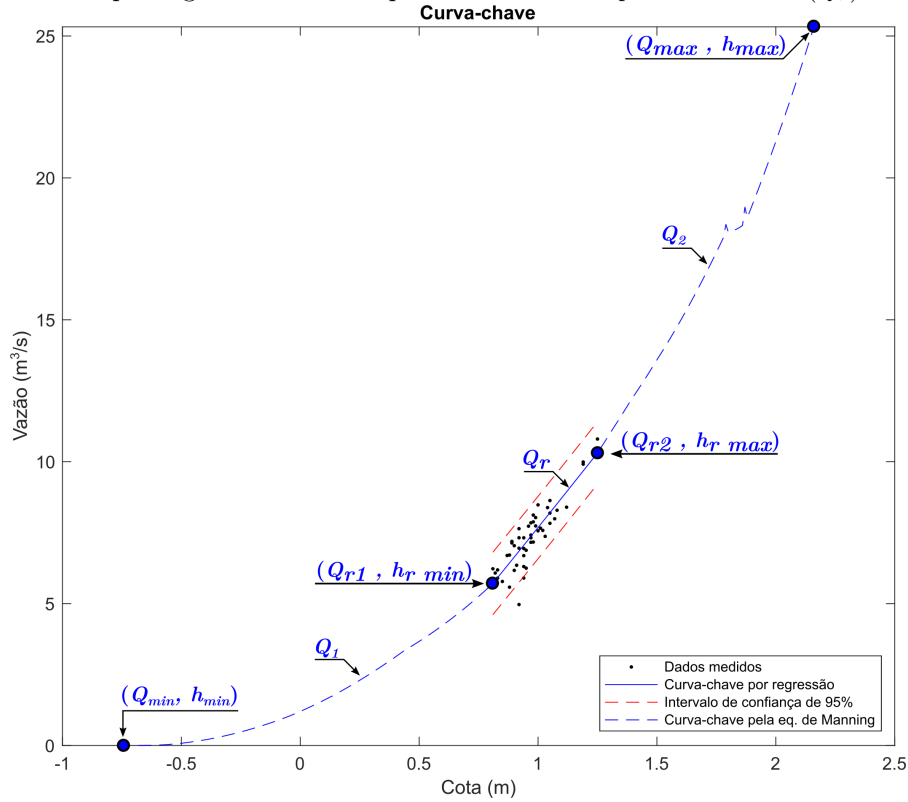
$$\therefore Q_2(h) = \frac{A_m(h)^{\frac{5}{3}}}{P_m(h)^{\frac{2}{3}}} \cdot K_2, \forall h \in [h_{rmax}; h_{max}] \quad (63)$$

Onde $h_{max} = \min(h_{amax}, h_{bmax})$, sendo h_{amax} a cota máxima do perfil da seção transversal na margem esquerda do curso d'água e h_{bmax} a cota máxima na margem direita.

Então, a relação entre cota (h) e vazão (Q) para seção transversal obedece a [Equação 64](#), retratada graficamente nas [Figuras 72 e 73](#).

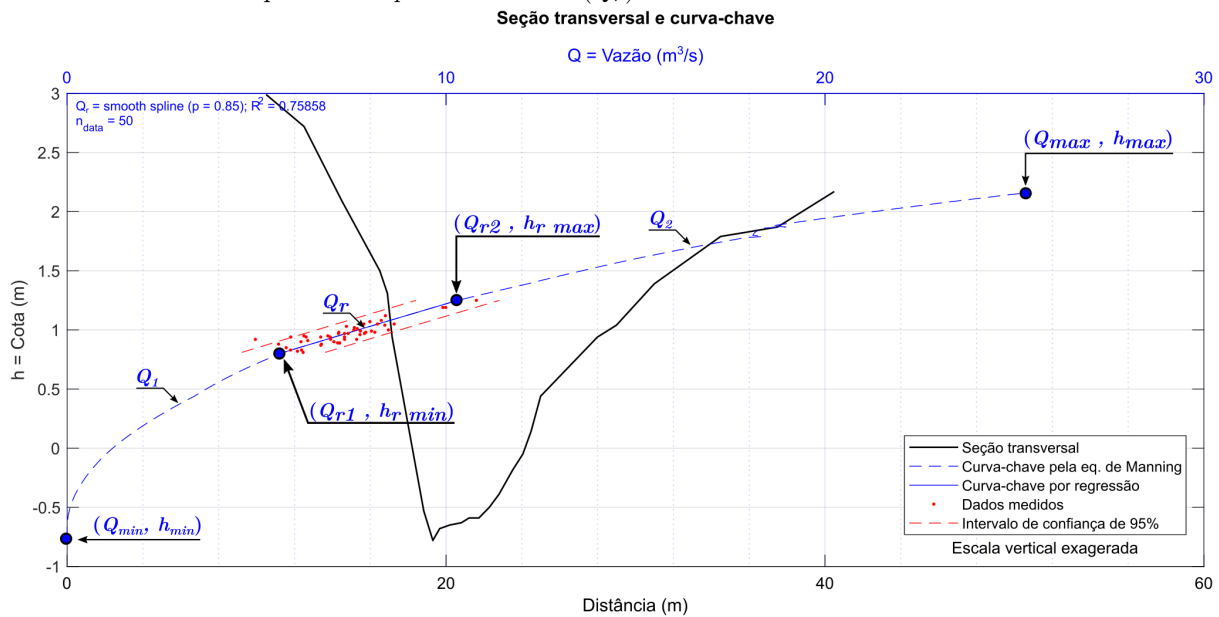
$$Q(h) = \begin{cases} \frac{A_m(h)^{\frac{5}{3}}}{P_m(h)^{\frac{2}{3}}} \cdot K_1 & , \forall h \in [h_{min}; h_{rmin}] \\ Q_r \text{ (regressão, equação ou tabela)} & , \forall h \in [h_{rmin}; h_{rmax}] \\ \frac{A_m(h)^{\frac{5}{3}}}{P_m(h)^{\frac{2}{3}}} \cdot K_2 & , \forall h \in [h_{rmax}; h_{max}] \end{cases} \quad (64)$$

Figura 72 – Curva-chave cota *vs.* vazão abrangendo toda a amplitude altimétrica da seção transversal. Trechos iniciais e finais calculados pela equação Manning (Q_1 e Q_2). Trecho intermediário calculado por regressão numérica por meio de curva *spline* suavizada (Q_r).



Fonte: o autor.

Figura 73 – Curva-chave cota *vs.* vazão sobreposta ao perfil da seção transversal. Trechos iniciais e finais calculados pela equação Manning (Q_1 e Q_2). Trecho intermediário calculado por regressão numérica por curva *spline* suavizada (Q_r).



Fonte: o autor.

É esperado que a curva-chave possua comportamento de função monótona estritamente crescente ($h_{i+1} > h_i \Rightarrow Q(h_{i+1}) > Q(h_i)$), entretanto, nos trechos gerados por meio da equação de Manning é comum aparecerem retrocessos em intervalos de incremento da altura nos quais o perímetro molhado da seção aumenta com uma taxa maior do que a área molhada. Para garantir que o valor da vazão sempre aumente em função da cota, esses pequenos trechos singulares de retrocesso são eliminados.

Nos testes realizados, foram observadas estações cujos valores de cota e vazão medidos em campo eram altamente dispersos ou, ainda, que formavam linhas de tendências distintas devido à mudança de referencial das réguas, sem a respectiva alteração nas coordenadas verticais das seções transversais medidas, o que prejudica a sua eliminação quando do emprego do método definido na [subseção 5.1.9.1](#), sintetizado na [Figura 71](#). Em tais situações é comum que K apresente valores altos e fisicamente inconsistentes.

Considerando o valor típico da rugosidade para rios em boas condições ($\eta = 0,033$) e as declividades típicas inferiores a 3% para o canal em locais de instalação das estações fluviométricas, observa-se que o valor limite esperado para K é de aproximadamente 5,25. Então, como condição complementar de consistência para as estações, adotou-se $K < 5$ para os trechos inicial (K_1) e final (K_2) da curva-chave.

5.1.10 Identificação geométrica do início da planície de inundação adjacente ao curso d'água

Considerando que se deseja analisar cenários de áreas de preservação permanente dos cursos d'água nas condições atuais, para cada estação selecionada o programa identifica os dados topográficos da seção transversal mais recente e procura identificar o início da planície de inundação (nível da vazão de margens plenas ou *bankfull stage*).

Existem vários métodos para determinação do nível da vazão de margens plenas a partir da geometria da seção transversal do canal fluvial (cf. [FERNANDEZ, 2010](#)), os quais procuram correlacionar o comportamento entre duas variáveis, sendo as mais utilizadas: vazão, largura, cota e profundidade. [Mersel et al. \(2013\)](#) propôs dois métodos para determinar a profundidade média das seções transversais de rios: linear e *slope-break*.

O método linear consiste em considerar que a profundidade do rio é linearmente proporcional à largura da seção transversal, sendo um método impreciso. Isso se deve ao fato que a maior parte dos rios tendem a exibir uma seção transversal parabólica entre as profundidades máximas e médias ([BJERKLIE et al., 2020](#)). Já o método *slope-break* considera a variação da largura do rio (w) em relação à altura do fluxo (h), de forma que o início da planície de inundação (condição de margens plenas) é identificado a partir da mudança de tendência da curva ($h \times w$), sendo considerado um método mais preciso ([DOMENEGHETTI, 2016](#)).

A ideia não é recente (cf. [FISRWG, 1988](#)) e consiste no seguinte procedimento:

conforme o nível de cheia for aumentando, quando a superfície hídrica se espriar para a planície de inundação ocasionará um ponto de inflexão ou uma assíntota na curva que correlaciona as variáveis de geometria do canal. Por exemplo, na relação entre vazão e cota espera-se que a taxa de variação da vazão aumente abruptamente a partir da cota do leito em condição de vazão de margens plenas.

Os métodos geométricos são úteis para determinar a seção transversal de um rio na condição de margens plenas quando não se tem dados hidrológicos de um determinado local em estudo ou, ainda, quando os modelos digitais de elevação produzidos por sensoriamento remoto retratarem o rio em condição de recessão. E isso é um fato a ser considerado, pois a maior parte dos modelos hidrológicos disponíveis tiveram a largura dos rios obtidas a partir da classificação de imagens de satélite.

Os métodos utilizados por [Mersel et al. \(2013\)](#) e [Domeneghetti \(2016\)](#) quando empregados a uma seção transversal produzida por levantamento *in situ* permitem visualmente identificar o ponto de inflexão da curva ($h \times w$) na altura da transição da margem interna do rio para planície de inundação. Contudo, é difícil automatizá-lo, pois em seções transversais muito discretizadas formam-se ao longo da seção transversal diversos pontos de inflexão, principalmente nas maiores profundidades.

Para permitir a automação de um método geométrico para detecção da cota (*stage*) que define a seção transversal na condição de margens plenas (*bankfull*), desenvolveu-se uma nova abordagem. Como nem todas as variáveis que governam a vazão são conhecidas, foram testadas diversas equações e, a partir de amostragem e análise visual, a utilização da curva (Υ), definida pela área molhada (A_m) unitária exponencial da seção transversal em função da cota de cheia (h), tem apresentado uma melhor interpretação da tendência da variação da seção transversal e resultados mais consistentes, pois o emprego da equação na forma exponencial minimiza o efeito dos pontos de inflexão não significantes, gerando uma curva monótona, suave e com dois trechos bem evidenciados.

$$\Upsilon = \left(\frac{A_m(h)}{\max(A_m)} \right)^e, \forall h \in [h_{min}; h_{max}] \quad (65)$$

$$h_{a\ max} = \max(h(x)), \forall x \in [X_{min}; X_{talvegue}] \quad (66)$$

$$h_{b\ max} = \max(h(x)), \forall x \in [X_{talvegue}; X_{max}] \quad (67)$$

$$h_{max} = \min(h_{a\ max}, h_{b\ max}) \quad (68)$$

$$\Delta h = h_{max} - h_{min} \quad (69)$$

Onde h_{min} é a cota mais baixa da seção transversal, i.e., a cota do talvegue do curso d'água; h_{max} é a cota máxima de inundação da seção transversal que permite formar um polígono fechado (área molhada máxima), que é definida como o valor mínimo entre as cotas máximas da seção nos seguimentos à esquerda ($h_{a\ max}$) e à direita ($h_{b\ max}$) do ponto de talvegue ($X_{talvegue}, h_{min}$); h_{min} e h_{max} definem a amplitude altimétrica máxima (Δh)

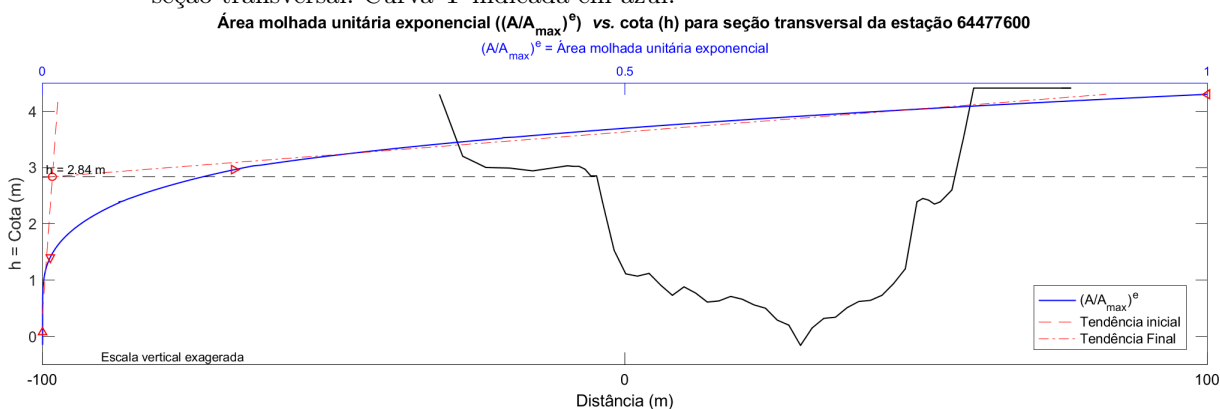
da seção transversal.

O motivo pelo qual se adotou uma curva Υ cujo valor máximo é um, deve-se ao fato que em rios muito largos a curva apresentava prematuramente uma assíntota. Com o uso da variação de área molhada unitária preserva-se a forma da curva independente dos valores absolutos da área da seção transversal do canal fluvial.

Diferente do que se observa na literatura e nos manuais técnicos, as curvas que relacionam variáveis da seção transversal não apresentam pontos de inflexão marcantes. Então, o método adotado para definir a cota do nível da seção em margens plenas foi considerar o ponto de intersecção das retas de tendência dos trechos inicial e final da curva Υ . As retas de tendência são formadas a partir da regressão linear de seguimentos situados respectivamente no início e no final da curva Υ .

A calibração do método dá-se por meio da definição dos intervalos que são utilizados para regressão linear. Na definição da reta do trecho inicial realiza-se a regressão linear dos pontos da curva Υ compreendidos no intervalo entre $0,05\Delta h$ e $0,35\Delta h$, desprezando-se o seguimento com os primeiros 5% de pontos da curva, pois geram desvios pelo efeito do fundo do canal. E para o trecho final é utilizado o intervalo entre $0,70\Delta h$ e $1,00\Delta h$ da curva Υ . A Figura 74 sintetiza o método.

Figura 74 – Exemplo de identificação da cota de cheia na condição da vazão de margens plenas (início da planície de inundação do rio) a partir da variação da área molhada unitária exponencial da seção transversal. Curva Υ indicada em azul.



Cabe observar que o método necessita que o perfil da seção transversal represente pelo menos uma parte da planície de inundação para haver correlação entre a tendência da assíntota do último trecho da curva e a borda do leito fluvial (e.g., não funciona em levantamento restrito às margens internas do rio ou quando inexistir planície de inundação nas margens externas).

5.1.11 Cálculo da relação entre declividade e rugosidade para equação de Manning

O conhecimento da declividade (S) e do coeficiente de rugosidade de Manning (η) é de extrema utilidade para análise de modelos hidrológicos. Por isso, foi criada uma função adicional que calcula o valor de $K (= \sqrt{S}/\eta)$ a partir do fornecimento da vazão, curva-chave, coordenadas da seção transversal e valores de área molhada e perímetro molhado iniciais (em regra, estes dois últimos parâmetros são nulos, mas podem ser necessários em alguns casos, e.g., quando a seção transversal ter sido extraída de um modelo digital de terreno).

De conhecimento dos valores de K , é possível ao usuário obter a declividade do canal fluvial por meio de medições diretas ou indiretas (e.g., modelos digitais de elevação) e obter o coeficiente de rugosidade de Manning (η) para aquele local e em condições hidrológicas (cenários) diversos.

5.1.12 Distribuição espacial do coeficiente de rugosidade de Manning

Na fase de análise individual o programa obtém os valores da relação entre a raiz quadrada da declividade do canal e a sua rugosidade, por meio da variável K , conforme abordado na [subseção 5.1.11](#).

Na análise integrada, procura-se obter a declividade do canal fluvial a partir de modelos hidrológicos para permitir a análise da distribuição espacial do coeficiente de rugosidade (η) entre os rios analisados.

Para estimar a declividade do curso d'água no local da estação fluviométrica utiliza-se o *Global distributed basin morphometric dataset* – GDBC – elaborado por [Shen, Vergara et al. \(2016\)](#), [Shen, Anagnostou et al. \(2017\)](#) e [Shen e Mei \(2017\)](#), que fornece uma base de dados para a América do Sul com nove variáveis, das quais serão utilizadas o número de ordem ([STRAHLER, 1952](#)) do curso d'água (SO), a diferença altimétrica entre o ponto mais alto da bacia e o local consultado (BR) e o comprimento do talvegue da cabeceira da bacia ao ponto amostrado (LV).

As referidas variáveis são fornecidas em matrizes no formato *geotiff* com resolução de 30 arcseg. Para o cálculo da declividade média do curso d'água num determinado trecho adota-se o procedimento descrito a seguir.

Como a coordenada da estação fluviométrica na maior parte dos casos não coincide com o leito do rio, adota-se uma grade de 2,5 arcmin (5x5 píxeis) para realizar a amostragem dos dados.

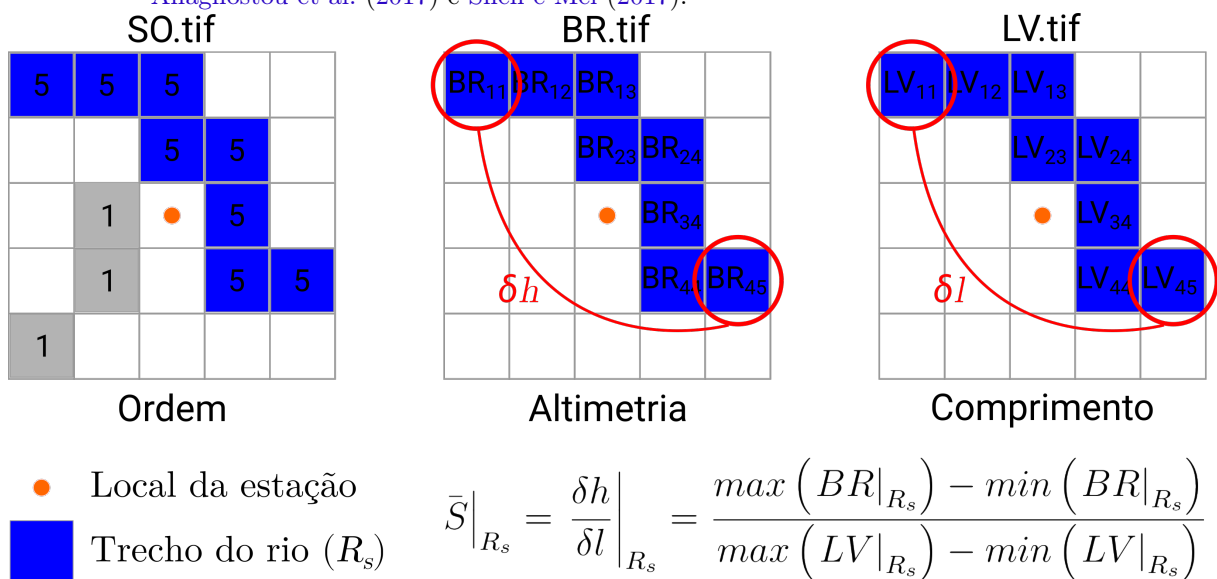
Primeiro, na área da amostra identifica-se os píxeis com maior número de ordem ($max(SO)$), adotando-se como hipótese que a estação está localizada no rio principal, de forma a eliminar-se da amostra os píxeis relativos a eventuais afluentes. Em seguida,

das matrizes BR e LV obtém-se os valores correspondentes aos píxeis do curso d'água principal.

A declividade média do trecho do rio (R_s) é obtida pela [Equação 70](#), cuja metodologia é sintetizada na [Figura 75](#).

$$\bar{S}|_{R_s} = \frac{\delta h}{\delta l}|_{R_s} = \frac{\max(BR|_{R_s}) - \min(BR|_{R_s})}{\max(LV|_{R_s}) - \min(LV|_{R_s})} \quad (70)$$

Figura 75 – Metodologia para obtenção da declividade média (\bar{S}) do trecho R_s do canal fluvial próximo ao local da estação fluviométrica a partir dos dados de [Shen, Vergara et al. \(2016\)](#), [Shen, Anagnostou et al. \(2017\)](#) e [Shen e Mei \(2017\)](#).



Fonte: o autor.

Os resultados são armazenados em tabela no formato *csv*, que permite a importação dos resultados em programas de visualização espacial e de geoprocessamento.

5.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.2.1 Identificação geométrica do leito do rio na condição de margens plenas (*bankfull stage*)

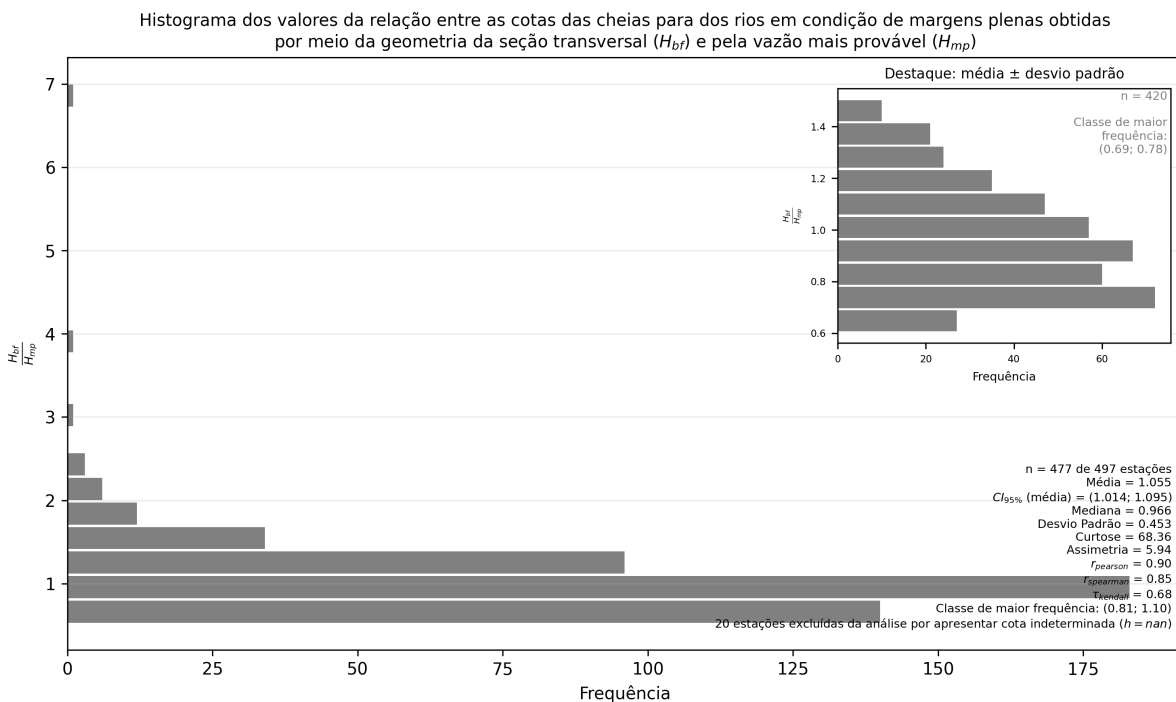
Na [subseção 5.1.10](#) foi apresentado um método gráfico que, a partir da geometria da seção transversal, procura identificar a borda do leito do rio na condição de margens plenas (*bankfull*), i.e., o início da planície de inundação.

A literatura científica indica que a vazão da cheia anual mais provável (Q_{mp}) corresponde à vazão de margens plenas (Q_{bf} ou *bankfull flow*), cujo tempo de recorrência típico é de 1,58 ano ($Q_{1,58}$). Então, para fins de avaliação da eficácia do método geométrico proposto, procurou-se correlacionar as cotas de cheias obtidas para a vazão mais provável ($H_{mp} = H|_{Q_{mp}}$) e pelo método geométrico (H_{bf} ou *bankfull stage*). O motivo para utilização

de Q_{mp} como paradigma é que se trata da cheia mais provável efetiva e mais verossímil à série de dados, pois nem todas as séries possuem a vazão mais provável em $Q_{1,58}$, pois este é o ponto de máximo da PDF da distribuição de Gumbel ($\xi = 0$ na GEVd) e foram identificadas algumas estações que são melhor descritas por Fréchet ou Weibull. As cotas de cheias, que adotam o referencial vertical da estação fluviométrica, foram referenciadas em relação à cota do talvegue do rio ($h_{talvegue} = 0$), permitindo comparar proporcionalmente as alturas relativas entre H_{mp} e H_{bf} .

Os resultados da relação $\frac{H_{bf}}{H_{mp}}$, sintetizados na Figura 76, demonstram que o método desenvolvido é válido, pois há forte correlação (Pearson = 0,90; Spearman = 0,85; Kendall = 0,68) entre a cota calculada pela vazão da cheia anual mais provável e aquela obtida pela geometria da seção transversal, bem como a relação apresenta média igual 1,055 (intervalo de 95% de confiança entre 1,014 e 1,095) e mediana igual a 0,966.

Figura 76 – Relação entre os valores das cotas dos rios na condição de margens plenas obtidas a partir da geometria da seção transversal (H_{bf} ou *bankfull stage*) e para vazões da cheia anual mais provável (H_{mp}).



Fonte: o autor.

Os resultados são muito sensíveis à discretização da seção transversal, bem como à abrangência do seu perfil, cuja largura deve incorporar, pelo menos, uma parte da planície de inundação, de forma a formar dois trechos bem evidenciados na curva da área molhada unitária exponencial da seção transversal (cf. Figura 74). Empiricamente, observando os resultados, para iniciar uma análise, recomenda-se que a largura do perfil transversal seja de, pelo menos, três vezes a do leito aparente do rio.

O método pode ser empregado para identificação do leito regular de rios para

os quais não há dados de medições de vazão que permitam uma análise estatística confiável da vazão dominante (Q_{mp} ou $Q_{1,58}$), quando estiverem disponíveis levantamentos topográficos ou modelos digitais de terreno que representem bem as margens internas dos rios (ribanceiras) e as planícies de inundação. No caso, empregar-se-ia o método para diversas seções transversais ao longo do rio de forma a delimitar espacialmente seu leito na condição de margens plenas.

5.2.2 Distribuição espacial da razão entre a raiz quadrada da declividade do canal e o coeficiente de rugosidade de Manning

Para realização de modelos hidrológicos o conhecimento da profundidade, forma da seção transversal e a própria rugosidade do leito fluvial são informações fundamentais, contudo dificilmente obtidas por meio de sensoriamento remoto (SAMPSON et al., 2015; GRIMALDI et al., 2018). LeFavour e Alsdorf (2005), em trabalho realizado na bacia do Rio Amazonas com o emprego de dados de elevação de corpos hídricos do SRTM, verificaram que, apesar da falta de medições de profundidade das seções transversais dos rios, valores precisos de vazão podem ser estimados a partir da detecção remota da inclinação da superfície da água e largura do canal, acompanhados de estimativas razoáveis do coeficiente de rugosidade de Manning (η).

Para o presente trabalho, procurou-se integrar os dados de sensoriamento remoto com os registros de levantamentos *in situ* de seções transversais para obtenção das propriedades geométricas do canal, cujo procedimento e resultados são descritos a seguir.

A equação de Manning pode ser dividida em duas partes, uma ligada exclusivamente à geometria da seção transversal e outra decorrente das propriedades físicas do canal:

$$Q = \underbrace{\frac{A_m^{\frac{5}{3}}}{P_m^{\frac{2}{3}}}}_{\text{Geometria da seção transversal}} \cdot \underbrace{\frac{\sqrt{S}}{\eta}}_{\text{Propriedades físicas do canal}} = \frac{A_m^{\frac{5}{3}}}{P_m^{\frac{2}{3}}} \cdot K \quad (71)$$

Onde Q é a vazão; A_m a área molhada; P_m o perímetro molhado; S a declividade longitudinal do fluxo hídrico; η a rugosidade do leito do canal; e K representa as propriedades físicas do canal por meio da razão entre a raiz quadrada da declividade do canal e o coeficiente de rugosidade de Manning ($K = \frac{\sqrt{S}}{\eta}$).

Os valores da área e perímetro molhados (A_m e P_m) são conhecidos e extraídos diretamente do perfil da seção transversal. Os valores de K podem ser obtidos diretamente da equação de Manning correlacionando a geometria de seção transversal com o valor correspondente da vazão, obtida a partir da curva-chave (cf. subseção 5.1.9.4).

Para fins de investigações futuras quanto às propriedades físicas de rios ou para

abastecer modelos hidrológicos, o programa desenvolvido apresenta os valores obtidos para K em duas situações típicas: na condição de estiagem, representada pela vazão de 95% de permanência ($K|_{Q_{95}}$), e na condição de margens plenas, por meio da vazão com tempo de recorrência de 1,58 ano ($K|_{Q_{1,58}}$).

Os resultados indicam que K não é constante (Figuras 77a,b e 78), apresentando variação em função da cota de cheia do rio. Isso pode ser devido à alteração na rugosidade do leito fluvial quando não é formado por material homogêneo. Contudo, deve-se considerar que, por uma questão de simplificação, costuma-se adotar a hipótese segundo a qual a declividade do fluxo hídrico é constante e paralela ao fundo do canal, mas se trata de propriedade que pode ser variável quando o canal não estiver em regime uniforme.

Por meio da comparação da relação $\frac{K|_{Q_{1,58}}}{K|_{Q_{95}}}$ para cada estação isoladamente, observa-se que existe uma tendência geral indicando que K é maior na vazão de margens plenas (mediana = 1,57), contudo no histograma da Figura 78, apesar dessa tendência ser intuitiva, a correlação é fraca (Pearson = 0,43; Spearman = 0,44; Kendall = 0,31), de forma que não é possível assumir um valor típico (característico) para essa relação, que deve ser sempre avaliada considerando as características do leito fluvial no caso concreto.

Assumindo-se como hipóteses que $K|_{Q_{1,58}} > K|_{Q_{95}}$ e $S|_{Q_{1,58}} = S|_{Q_{95}}$, então:

$$\frac{\sqrt{S}}{\eta|_{Q_{1,58}}} > \frac{\sqrt{S}}{\eta|_{Q_{95}}} \quad (72)$$

$$\eta|_{Q_{95}} > \eta|_{Q_{1,58}} \quad (73)$$

Desta forma, não é esperado que a rugosidade permaneça constante durante as variações da cota do rio, mas as simulações hidrológicas necessitam avaliar cuidadosamente os valores de rugosidade a serem utilizados nos modelos, de acordo com as características do leito do rio para o cenário hidrológico a ser simulado.

Os valores de K são confiáveis, pois são extraídos a partir de dados de cota, vazão e topografia da seção transversal medidos em campo. Para obtenção dos valores da rugosidade, é necessário conhecer a declividade longitudinal do canal fluvial, cuja precisão impacta consideravelmente nos valores de η .

Utilizando-se o método descrito na subseção 5.1.12, estimou-se a declividade do curso d'água no local da estação fluviométrica por meio do *Global distributed basin morphometric dataset* – GDBC (SHEN; VERGARA et al., 2016; SHEN; ANAGNOSTOU et al., 2017; SHEN; MEI, 2017), com resolução de 30 arcseg ($\approx 927,66$ m na linha do equador) e com amostras quadradas com lados de 9 pixels (270 arcseg $\approx 8348,95$ m), cf. Figura 79. Com os dados de declividade, calculou-se o coeficiente de rugosidade de Manning (η) para as condições de recessão ($\eta|_{Q_{95}}$) e margens plenas ($\eta|_{Q_{1,58}}$). Contudo, por não existirem dados de altimetria das superfícies hídricas em diferentes condições de

cheias, assumiu-se a hipótese segundo a qual elas permanecem paralelas ao fundo do canal (regime uniforme).

O valor de η obtido a partir do método aqui utilizado é muito sensível à qualidade do valor da declividade (S), que é extraída do GDBC, de forma que são esperados casos nos quais o valor da declividade possa divergir consideravelmente da topografia real e, conseqüentemente, o valor de η também será discrepante.

Na literatura, os valores comuns para rugosidade de leitos de rios variam entre 0,025 e 0,150. Os histogramas apresentados na [Figura 80a,b](#) permitem observar que os resultados são altamente dispersos e a maioria diverge dos valores típicos previstos na literatura, o que pode ser atribuído à baixa discretização do material utilizado, com resolução de 30 arcseg. Mesmo assim, é possível observar que os valores de η para a condição de estiagem (Q_{95}) são preponderantemente superiores àqueles calculados para vazão de margens plenas ($Q_{1,58}$).

Para o emprego dos resultados do programa desenvolvido para análises de canais, é recomendado que os valores obtidos para K sejam empregados diretamente. No caso de o usuário pretender calcular o valor do coeficiente de rugosidade (η), é recomendável que se obtenha a declividade do canal fluvial por meio de levantamentos de campo ou de modelos digitais de elevação altamente discretos e confiáveis.

O ideal, para trabalhos futuros, é reproduzir o método empregado por [Shen, Vergara et al. \(2016\)](#), [Shen, Anagnostou et al. \(2017\)](#) e [Shen e Mei \(2017\)](#) para modelos digitais de elevação com maior discretização, visando obter dados de declividade mais precisos para o cálculo dos coeficientes de rugosidade.

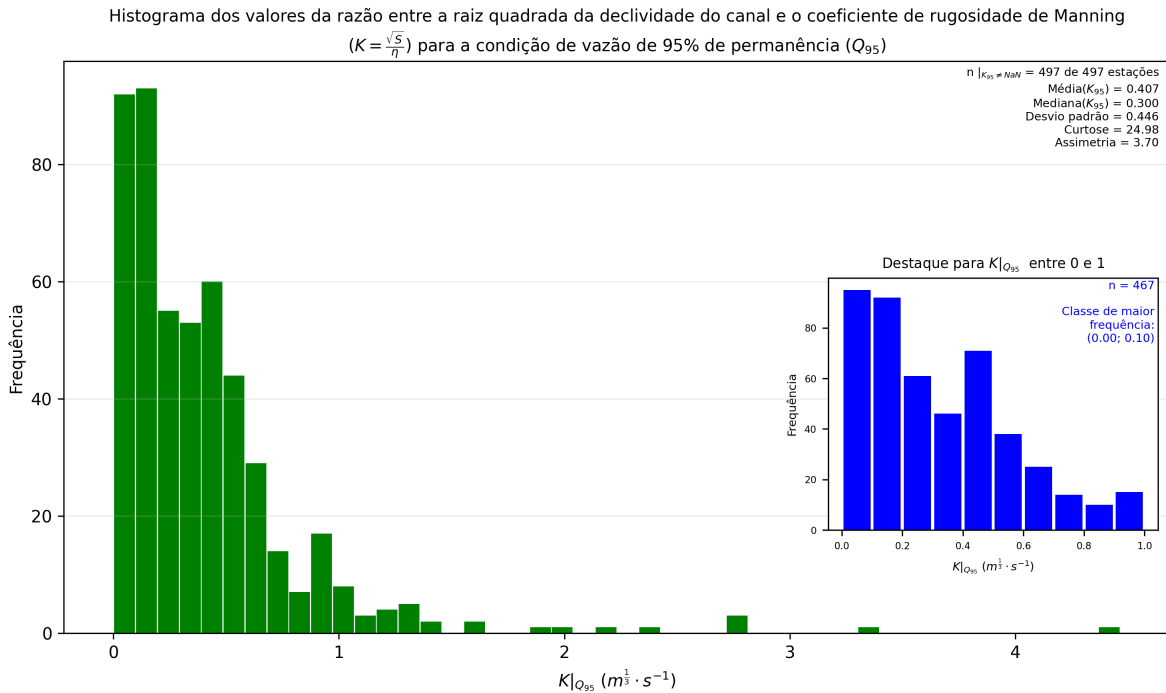
5.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

O programa *HidroAPP* permite fornecer dados confiáveis de para quantificação da área total protegida nas margens de rios e a probabilidade de sua inundação integral (perturbação). Isso se deve aos métodos incorporados ou desenvolvidos para elaboração de curvas-chave entre cota e vazão, seleção de dados considerando a variação da geometria da seção transversal no tempo, prolongamento dos perfis topográficos a partir de dados de modelos digitais de terreno e a obtenção de variáveis geométricas dos canais por meio de dados de sensoriamento remoto.

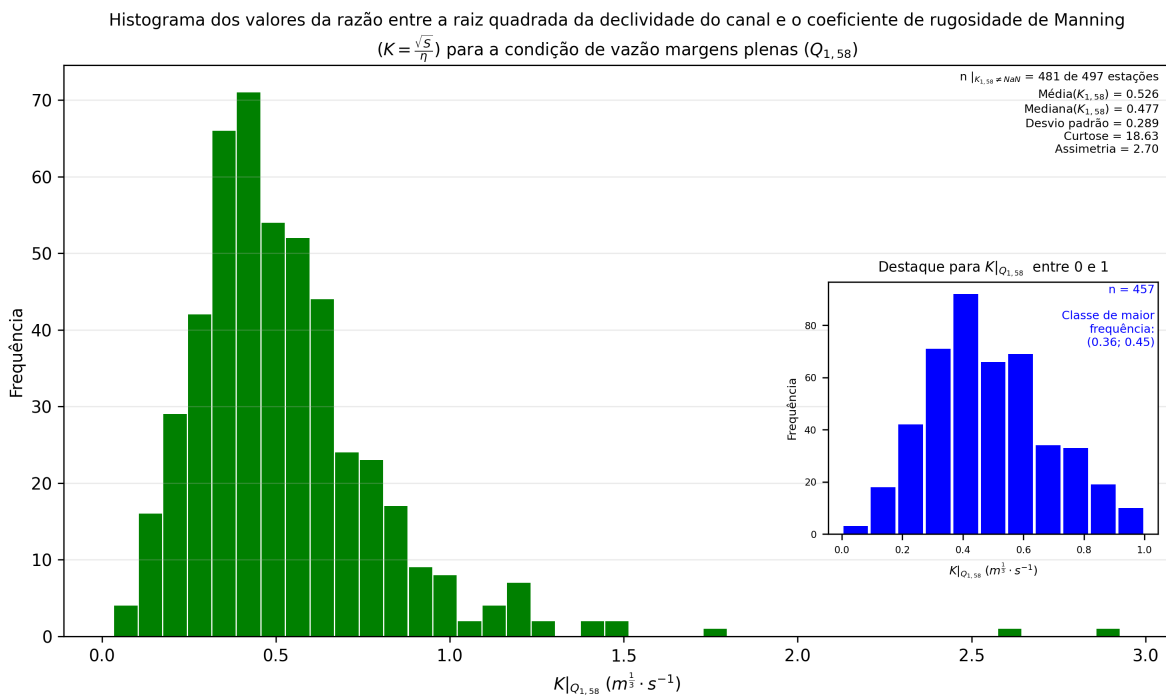
Para análises de rios que não apresentam monitoramento regular, os testes realizados demonstraram a viabilidade de uma técnica de identificação do leito fluvial em condição de margens plenas, somente com dados de geometria, a qual pode ser útil em análises cotidianas, como método de auxílio à determinação de APPs nas margens de trechos de cursos d'água situados em planícies.

Figura 77 – Histograma dos valores da razão entre a raiz quadrada da declividade do canal e o coeficiente de rugosidade de Manning ($K = \frac{\sqrt{S}}{\eta}$) para as condições de (a) vazão de 95% de permanência (Q_{95}), retratando a condição de estiagem, e (b) vazão com tempo de recorrência de 1,58 ano ($Q_{1,58}$), retratando a condição de margens plenas.

(a)

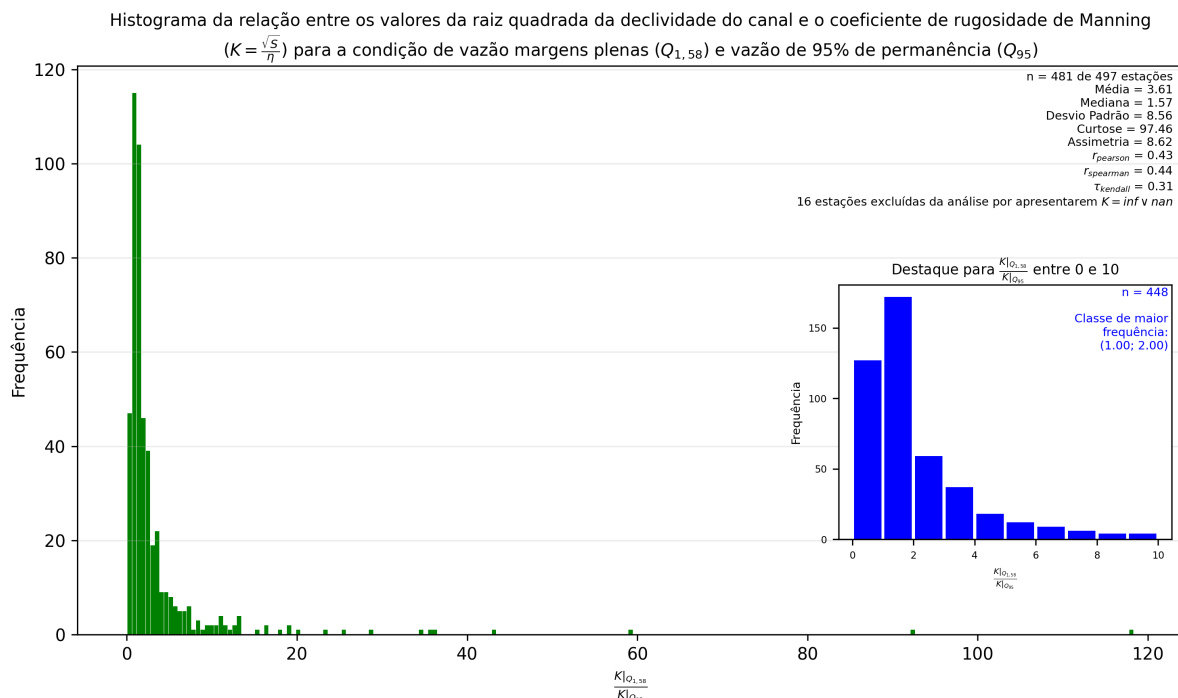


(b)



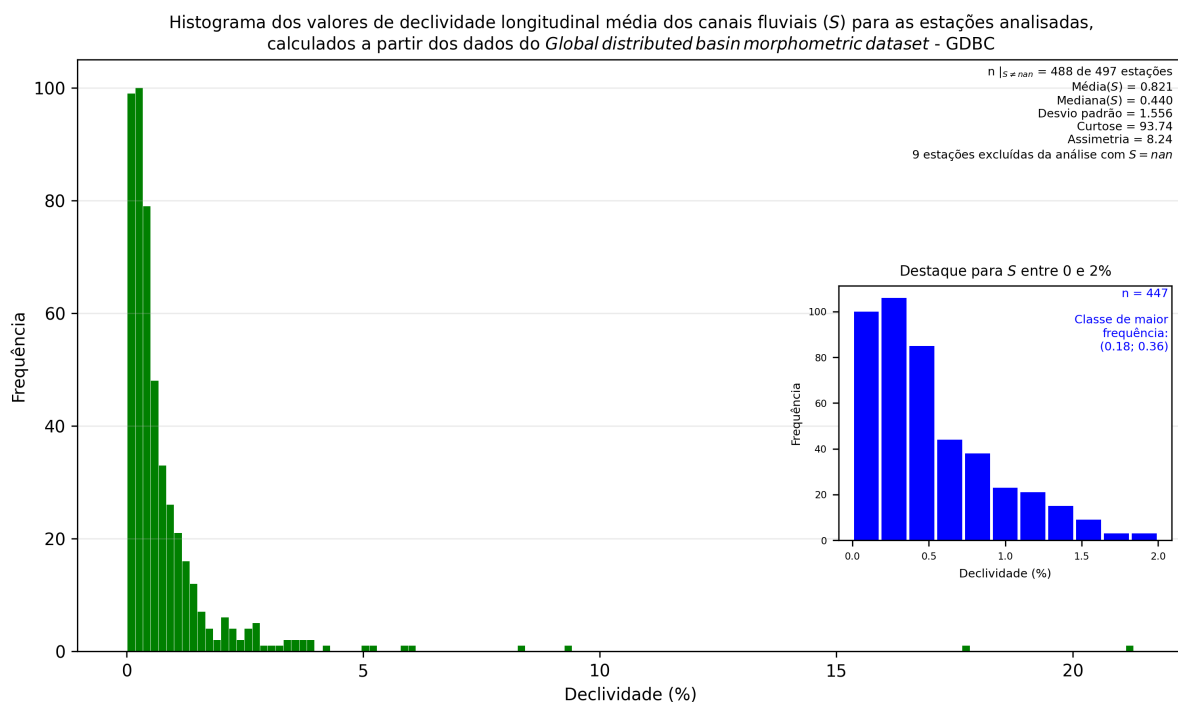
Fonte: o autor.

Figura 78 – Histograma com a relação da razão entre a raiz quadrada da declividade do canal e o coeficiente de rugosidade de Manning ($K = \frac{\sqrt{S}}{\eta}$) para condição de vazão com tempo de recorrência de 1,58 ano ($Q_{1,58}$), retratando a condição de margens plenas, e da vazão de 95% de permanência (Q_{95}), retratando a condição de estiagem.



Fonte: o autor.

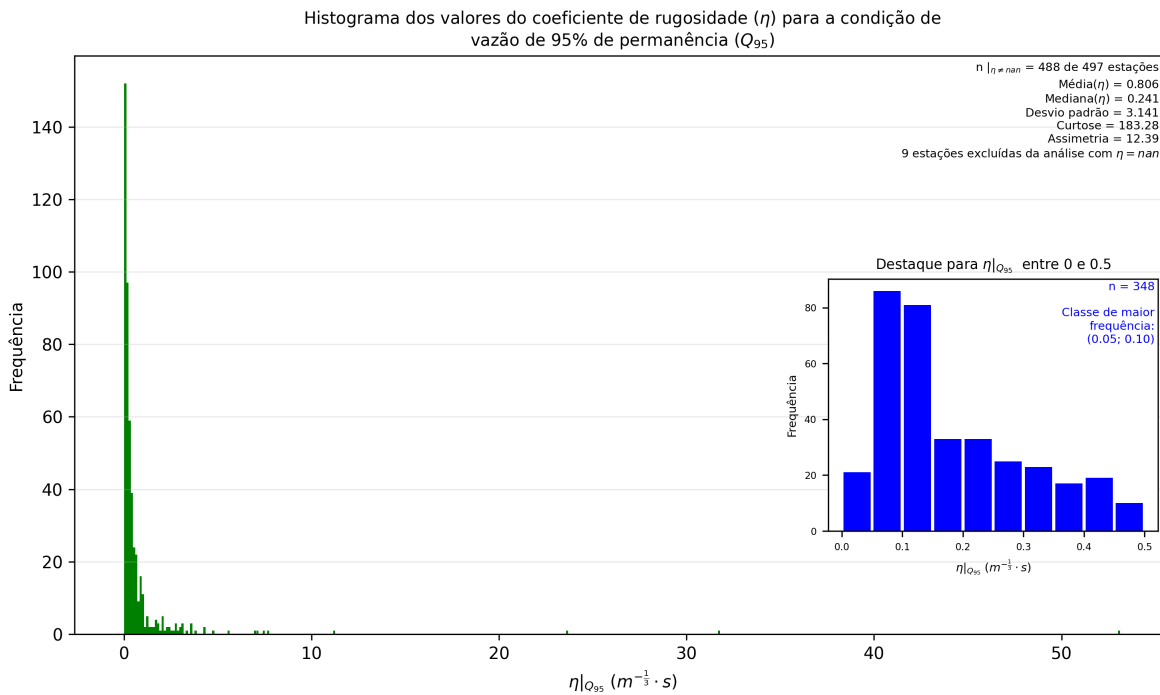
Figura 79 – Histograma dos valores de declividade longitudinal média dos canais fluviais (S) para as estações analisadas, calculados a partir dos dados do *Global distributed basin morphometric dataset – GDBC* (SHEN; VERGARA et al., 2016; SHEN; ANAGNOSTOU et al., 2017; SHEN; MEI, 2017).



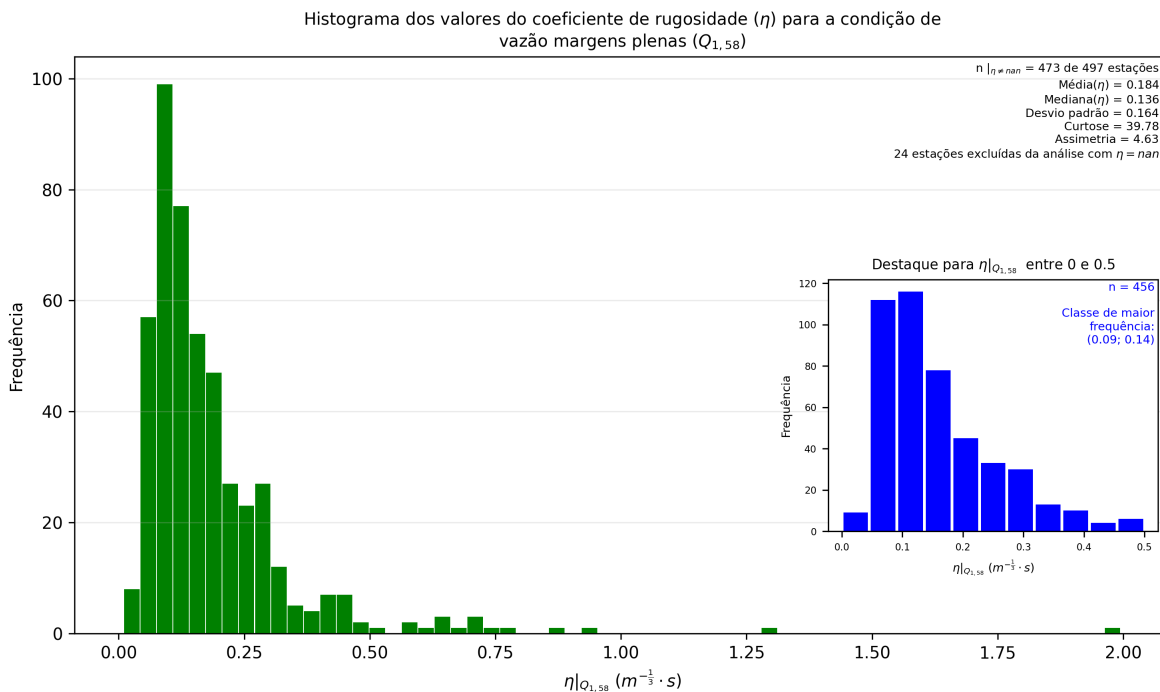
Fonte: o autor.

Figura 80 – Histograma com os valores do coeficiente de rugosidade de Manning (η) para as condições de (a) vazão de 95% de permanência (Q_{95}), retratando a condição de estiagem, e (b) vazão com tempo de recorrência de 1,58 ano ($Q_{1,58}$), retratando a condição de margens plenas.

(a)



(b)



Fonte: o autor.

6 AMBIGUIDADE NA LEGISLAÇÃO AMBIENTAL PODE REDUZIR 37% DAS ÁREAS PROTEGIDAS RIPÁRIAS NO BRASIL

As Nações Unidas definiram na Agenda 2030 como objetivos para o desenvolvimento sustentável (ODS) que os Estados assegurem a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos, adotem medidas urgentes para combater a mudança climática e para proteção, recuperação e promoção do uso sustentável dos ecossistemas terrestres (UN, 2015, ODS 6, 13 e 15). O estabelecimento de áreas protegidas possibilita, entre outros objetivos, garantir e recuperar os recursos hídricos. O planejamento das ações de conservação normalmente trata de forma separada os ambientes terrestres e aquáticos (ABELL; HARRISON, 2020). Para serem eficientes, as estratégias integradas de água doce terrestre precisam ser alinhadas ou incorporadas às políticas e leis ambientais atuais (LEAL; LENNOX et al., 2020). No Brasil, entre as áreas protegidas destacam-se as áreas de preservação permanente (APP) nas faixas marginais dos rios, verdadeiros ecótonos entre o ambiente aquático e o terrestre.

A ausência de detalhamento na legislação ambiental para diversas modalidades de APPs permite a ocorrência de divergências técnicas quanto a sua definição. Essas divergências prejudicam a proteção efetiva de recursos hídricos e seus ecossistemas associados, gerando conflitos no âmbito do planejamento territorial, do licenciamento ambiental, fiscalização e análises forenses. Apesar da preocupação em instituir e manter APP nas margens dos rios, a atual Lei de proteção da vegetação nativa (Lei nº 12.651/2012), conhecida como Código Florestal de 2012, apresenta uma importante lacuna técnico-científica que necessita ser regulamentada: *a delimitação precisa do ponto de início da APP ripária no sentido transversal dos leitos fluviais*. Essa lacuna na definição dos critérios hidrológicos para determinação do leito regular a partir do qual se mede a APP nas margens dos cursos d'água, provavelmente, tem o maior impacto para a quantificação de áreas protegidas no território brasileiro.

A legislação brasileira apresentou desde 1986 diversas definições para o leito fluvial a ser considerado para cálculo da largura do rio e projeção das APP nas margens: leito maior sazonal (1986-1989), o nível mais alto (1989-2012, sendo no período de 2002 a 2012 considerado como a cheia sazonal) e após 2012 como o *leito regular*, definido como “a calha por onde correm regularmente as águas do curso d'água durante o ano” (BRASIL, 2012b, art. 3º, inciso XIX).

Segundo Sousa, Fernandez Piedade e Candotti (2011), o nível de água “regular” é mal definido no Código Florestal de 2012, abrindo oportunidades para a destruição de áreas úmidas elevadas, marginais aos rios, principalmente nas planícies sujeitas a pulsos de inundação de alta amplitude na Amazônia.

A falta de definição regulamentar pode levar à interpretação que o leito regular é aquele na condição hidrológica mais provável de ser encontrada ao longo do ano, i.e.,

numa situação de baixa vazão ou de vazão de permanência (e.g., Q_{95} , que minimiza o espaço territorial protegido). Por outro lado, na doutrina jurídica, [Antunes \(2013\)](#) e [Machado \(2014\)](#) consideram que a faixa marginal da APP em curso d'água deve iniciar no mesmo ponto do terreno marginal, que corresponde à média das cheias ordinárias. E, cientificamente, para análise de rios adota-se a cheia capaz de fazer o transbordamento do curso d'água para a planície de inundação, que é definida como a vazão de margens plenas ([CHRISTOFOLETTI, 1976](#); [WATSON](#); [BIEDENHARN](#); [SCOTT, 1999](#); [GRISON](#); [KOBAYAMA, 2011b](#)).

A efetividade ecossistêmica da faixa marginal da APP nos rios é função da diversidade de sua biota, que é sensível à frequência das perturbações que incidem sobre aquele espaço, o que permite fundamentar uma metodologia para definição do leito regular de cursos d'água a partir dos postulados da *teoria da perturbação* ([CONNELL, 1978](#)), segundo a qual se espera maior diversidade ecológica em ambientes sujeitos a distúrbios intermediários, que permitem o desenvolvimento de ecossistemas complexos num estado não estático ou não uniforme. Assim, uma APP que seja inundada em curtos intervalos de recorrência seria menos efetiva, pois nesse cenário o ecossistema protegido é de baixa diversidade e, também, de baixa resiliência. Então, para fins de estabelecimento de cenários regulatórios, deve-se analisar a variação da área total protegida (leito e faixas marginais) e a probabilidade de inundação integral do espaço ripário a ser conservado (perturbação), considerando-se diversos cenários hidrológicos.

O presente Capítulo tem como objetivo a avaliação dos impactos ambientais à proteção dos ecossistemas ripários nos rios brasileiros para diferentes cenários hidrológicos para regulamentação da definição técnica e científica dos leitos fluviais regulares, considerando para cada cenário a área total protegida resultante e a probabilidade de sua inundação integral (perturbação).

6.1 METODOLOGIA

Para análise dos cenários regulatórios para o estabelecimento do nível a ser considerado para definir o leito regular de cursos d'água, foi utilizado o programa *HidroAPP*, desenvolvido para análise de séries temporais de dados de monitoramento hidrológico e seções transversais (cf. Capítulos 3, 4 e 5), abastecido com os registros disponíveis no banco de dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) por meio do Sistema de Informações Hidrológicas - *HidroWeb*, atualizado até 28.09.2020 ([ANA, 2020](#)).

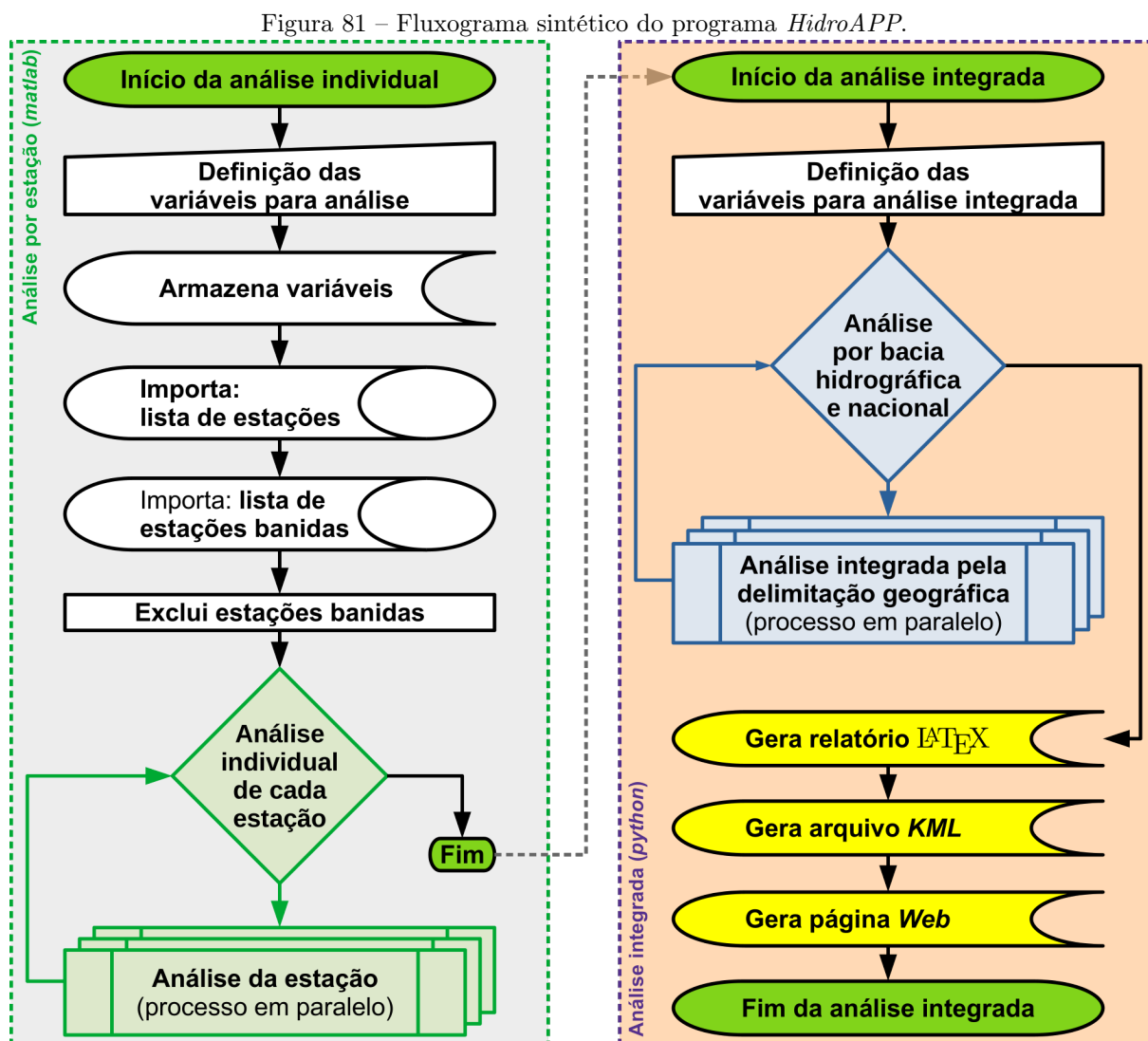
A análise dos dados foi dividida em duas etapas:

- Análise individual: na qual os dados de cada estação são avaliados de acordo com critérios preestabelecidos, tais como período de análise, completude dos dados, número mínimo de anos válidos, continuidade dos dados, número mínimo de medições em campo congruentes (necessárias para o estabelecimento de curvas-

chave) e cenários hidrológicos simulados (cf. Capítulos 4 e 5);

- Análise integrada: que concatena os resultados das análises individuais para análise dos cenários regulatórios por bacias hidrográficas e nacional, a qual permite avaliar o impacto ambiental de cada cenário para subsidiar a tomada de decisão.

A Figura 81 apresenta o fluxograma sintético da fase de análise de dados.



Fonte: o autor.

As variáveis definidas para seleção e otimização das séries de dados seguiram os mesmos critérios adotados nos Capítulos anteriores e estão sintetizadas na Tabela 5, sendo os cenários regulatórios e demais condições complementares para análise definidos nas subseções a seguir.

Tabela 5 – Variáveis estabelecidas para o programa *HidroAPP* para análise de cenários regulatórios para definição do leito regular de cursos d’água.

VARIÁVEL [†]	VALOR
<i>nivelConsistencia</i>	2
<i>CotaStatus</i>	1
<i>VazaoStatus</i>	1
<i>minMedicoes</i>	10
<i>toleranciaMedicoes</i>	0.05
<i>delta_H</i>	0.01
<i>maxDiasAusentesMes</i>	10
<i>maxDiasContinuosAusentesMes</i>	4
<i>minAnosAleatorios</i>	vazio
<i>maxAnosContinuosAusentes</i>	999
<i>minAnosValidos</i>	15
<i>continuidade</i>	0.7
<i>PeriodoAnalise</i>	1900-01-01 a 2020-09-28
<i>GEVpeakOptimize</i>	true

Nota: [†]Sobre o significado de cada variável, sugere-se consultar o [Quadro C.2](#) no [Apêndice C](#).
 Fonte: o autor.

6.1.1 Definição dos cenários hidrológicos

Para escolha dos cenários hidrológicos a serem simulados foram consideradas as aplicações cotidianas de dados obtidos por sensoriamento remoto, que normalmente retratam o rio numa condição de baixo fluxo ou recessão; as definições científicas preponderantes para vazão dominante de canais (cheia anual mais provável); e o histórico da tradição jurídica brasileira, que costuma vincular o limite de bens públicos nas margens de rios à média das cheias ordinárias anuais.

Nos estudos ambientais para o planejamento público e privado de uso do solo são comumente utilizados dados obtidos a partir de sensoriamento remoto, os quais fornecem a largura do rio na data da realização do levantamento, quando, normalmente, está-se diante de boa condição climática e em momento que o fluxo do rio encontra-se em recessão. Então, foi estabelecida para análise desse cenário a vazão Q_{95} , que é a vazão de permanência na qual há 95% de probabilidade de encontrar o rio com vazão igual ou superior a esta, também utilizada como vazão de referência para fins de outorga de recursos hídricos pela ANA (2017). Para o cálculo de Q_{95} é utilizada a curva de permanência formada a partir dos valores das médias diárias de vazão para os anos considerados válidos na análise estatística (cf. subseção 4.1.8).

Do ponto de vista geomorfológico, a legislação permite situar o local do leito regular a partir da análise dos conceitos de faixa de passagem e planície de inundação. A faixa de passagem de inundação é a “área de várzea ou planície de inundação adjacente a cursos d’água que permite o escoamento da enchente” (BRASIL, 2012b, art. 3º, inciso XXII),

enquanto a planície de inundação é formada por “*áreas marginais* a cursos d’água sujeitas a enchentes e inundações periódicas” (BRASIL, 2012b, art. 3º, inciso XXI, grifo nosso). Então, pode-se afirmar que *o leito regular termina onde inicia a planície de inundação*.

Leito regular não é uma expressão típica na literatura geomorfológica. Mesmo existindo algumas variações nas definições, as denominações típicas para classificar os tipos de leitos fluviais, segundo Christofolletti (1976), são: vazante, menor e maior (subdividido em periódico, sazonal e excepcional). Na geomorfologia fluvial diversos estudos indicam que acima de uma determinada vazão ocorre o transbordamento do curso d’água para a planície de inundação. Um parâmetro comumente adotado é a vazão com tempo de recorrência de 1,58 ano ($Q_{1,58}$), conhecida como vazão dominante e definida como aquela com capacidade “modificadora ou modeladora de um canal fluvial” (GRISON; KOBAYAMA, 2011a, p. 117).

A vazão da cheia anual mais provável ($Q_{1,58}$) é adotada como hipótese para definição de leito regular (critério científico), cujo valor pode ser obtido a partir da distribuição generalizada de valores extremos (GEV), e foi objeto de análise e validação no Capítulo 4 (cf. subseção 4.2.3).

E como cenário proveniente da tradição jurídica brasileira, foi também considerada a vazão da média das cheias ordinárias (Q_{med}), que é utilizada desde 1867 como parâmetro para definir os limites dos terrenos reservados, que são bens públicos nas margens de rios navegáveis e de que se fazem navegáveis, sem influência das marés (BRASIL, 1867). Machado (2014) considera que a faixa marginal da APP deve iniciar no mesmo ponto dos terrenos marginais, de forma a evitar a apropriação de bens públicos pelos particulares nos rios navegáveis. No mesmo sentido, Antunes (2013) considera que a alteração promovida pelo Código Florestal em 2012 afronta o domínio público dos terrenos marginais e a definição do leito regular corresponde ao leito médio do rio.

O Quadro 11 sintetiza os três cenários hidrológicos escolhidos para serem simulados.

Quadro 11 – Cenários hidrológicos simulados para cálculo de áreas de preservação permanente.

SÍMBOLO	CENÁRIO	DESCRIÇÃO
Q_{95}	Outorga de recursos hídricos e recessão hidrológica.	Vazão com probabilidade de 95% para ser excedida. É utilizada como vazão de referência para fins de outorga de recursos hídricos pela ANA (2017) e representa o cenário de recessão hidrológica do rio.
$Q_{1,58}$	Critério científico.	Vazão de margens plenas, também conhecida como vazão dominante, determinada pela cheia anual mais provável, definida estatisticamente como aquela com tempo de recorrência de 1,58 ano (cf. Quadro 9).
Q_{med}	Critério dominial (jurídico).	Vazão equivalente à média das cheias ordinárias anuais. É o critério utilizado para definição de terrenos reservados, bens públicos localizados nas margens de rios navegáveis sem influência das marés.

Fonte: o autor.

6.1.2 Faixas marginais simuladas: cenários legais

As faixas marginais simuladas decorrem da legislação brasileira que define APPs nas margens de cursos d'água, separadas em função dos cenários legais. A Lei nº 12.651/2012 define a dimensão da área protegida ripária em função da largura do leito regular dos rios perenes e intermitentes, i.e., não efêmeros. A rigor, essas áreas protegidas são destinadas à conservação perene, salvo quando eventual intervenção ou supressão for definida na legislação como hipótese de utilidade pública, interesse social ou de baixo impacto ambiental. Contudo, a legislação traz regras de transição que permitem ao proprietário preservar e recuperar somente uma parcela da APP, possibilitando a continuidade das atividades agrossilvipastoris, de ecoturismo e de turismo rural em áreas rurais consolidadas (ARC) até 22 de julho de 2008. A parcela a ser preservada não está necessariamente relacionada com a largura do rio, mas varia principalmente em função da área da propriedade rural em módulos fiscais, que é uma unidade de medida brasileira para fins tributários, cujo valor varia conforme a localização do imóvel rural.

Para áreas urbanas, a Lei nº 12.651/2012 também permite a regularização de núcleos urbanos informais, podendo, quando as características locais comportarem e não for um local considerado de risco, o poder público dispensar para ocupações de baixa renda (interesse social – REURB-S) a exigência de recuperação e conservação APP em sua totalidade (art. 64, caput). Para as demais ocupações, consideradas como de interesse específico (REURB-E), exige-se a conservação de uma faixa mínima de 15 m (art. 65, § 2º), independente das características físicas do rio.

É importante correlacionar a área total sujeita à conservação ambiental e a probabilidade de sua inundação integral (perturbação) em cada cenário legal com os diversos cenários hidrológicos para definição do leito regular dos rios para possibilitar a avaliação dos impactos ambientais de cada hipótese regulatória. Neste sentido, foram avaliados cinco cenários legais, descritos no [Quadro 12](#).

Quadro 12 – Cenários legais simulados para o cálculo da faixa mínima a ser conservada nas áreas de preservação permanente nas margens de rios.

SÍMBOLO	CENÁRIO	LARGURA MÍNIMA DA FAIXA A SER CONSERVADA
APP	Conservação integral da APP.	30 m, $\forall l_{rio} \leq 10$ m; 50 m, $\forall l_{rio} > 10$ m $\wedge l_{rio} \leq 50$ m; 100 m, $\forall l_{rio} > 50$ m $\wedge l_{rio} \leq 200$ m; 200 m, $\forall l_{rio} > 200$ m $\wedge l_{rio} \leq 600$ m; 500 m, $\forall l_{rio} > 600$ m.
MF_{01}	Conservação parcial da APP em imóveis com área até 1 MF em ARC.	5 m, independente da largura do rio.
MF_{12}	Conservação parcial da APP em imóveis com área de 1 MF até 2 MF em ARC.	8 m, independente da largura do rio.
MF_{24}	Conservação parcial da APP em imóveis com área de 2 MF até 4 MF em ARC. Aplicável também para simular casos de REURB-E.	15 m, independente da largura do rio.
MF_{4p}	Conservação parcial da APP em imóveis com área superior a 4 MF em ARC.	20 m, para imóveis com área de 4 MF até 10 MF e rios com largura até 10 m; Metade da largura do rio $\left(\frac{l_{rio}}{2}\right)$, nos demais casos, observado o mínimo de 30 m e o máximo de 100 m.

Notas: APP = área de preservação permanente; ARC = área rural consolidada; l_{rio} = largura do rio; MF = módulo fiscal, unidade de medida agrária brasileira (cf. BRASIL, 1964, 1979a); REURB-E = regularização fundiária de núcleos urbanos informais por interesse específico.

Fonte: organizado pelo autor a partir de Brasil (2012a,b).

6.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

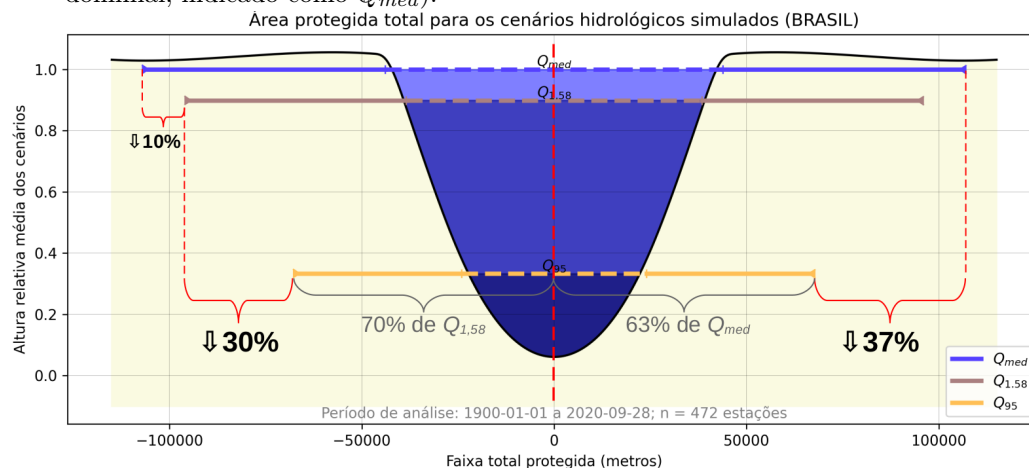
6.2.1 Área de preservação permanente

Todas as análises realizadas neste trabalho, até o presente momento, tiveram como objetivo final estimar, de forma confiável, o impacto ambiental sobre a área de preservação permanente (APP) nas faixas marginais dos principais rios brasileiros para diversos cenários hidrológicos para definição do leito regular, cujos resultados serão apresentados e discutidos nas próximas subseções.

6.2.1.1 Área total protegida por cenário hidrológico

A Figura 82 apresenta a diferença relativa do espaço territorial protegido entre os diversos cenários hidrológicos analisados. Observa-se que há uma perda aproximada de 37% da faixa total de proteção ambiental (leito e APPs) entre o nível médio das enchentes anuais (Q_{med}) e o cenário de vazão de permanência na condição de estiagem (Q_{95}). E entre os cenários delimitados por Q_{med} e a vazão de margens plenas ($Q_{1,58}$), a diferença é pequena, próxima a 10%. Entre $Q_{1,58}$ e Q_{95} há uma perda aproximada de 30%.

Figura 82 – Espaço territorial protegido formado pela soma das larguras dos leitos e áreas de preservação permanente em faixas marginais de rios em 472 pontos do território brasileiro para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), vazão de margens plenas (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}).



	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{APP}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{APP}$
Q_{med}	1.0	87821.39	61580.0	210981.39
$Q_{1,58}$	0.9	76934.7	55960.0	188854.7
Q_{95}	0.33	48012.13	42160.0	132332.13

Notas: APP = área de preservação permanente; H_{rel} = altura relativa média dos cenários em relação ao talvegue; Q_{med} = média das cheias anuais; $Q_{1,58}$ = cheia anual com tempo de recorrência de 1,58 ano (vazão dominante ou de margens plenas); Q_{95} = vazão média diária com 95% de probabilidade de ser excedida (vazão de permanência); $\sum Largura_{APP}$ = largura total das APPs em faixas marginais aos leitos fluviais; $\sum Largura_{rio}$ = largura total dos leitos fluviais; $\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{APP}$ = área total protegida.

Fonte: o autor.

Analisando-se as oito grandes bacias hidrográficas presentes no território continental do Brasil (Tabela 6 e Figura 83), observa-se que as perdas de espaços protegidos entre os cenários Q_{95} e Q_{med} variam entre 49% na bacia ATS (Atlântico – trecho sudeste) e 28% para bacia AMZ (Rio Amazonas).

A relação entre $Q_{1,58}$ e Q_{med} é menor na bacia do Rio Amazonas (5%), cf. Figura 83a, o que pode ser explicado pelo fato dos rios daquela bacia apresentarem grandes áreas de contribuição e regime hidrológico sazonal, cuja série histórica, predominantemente, apresenta verossimilhança com a distribuição de Weibull – Tipo III (Figura 61), onde os valores extremos médios e de 1,58 ano de recorrência costumam ser mais próximos do que na distribuição de Gumbel – Tipo I, predominante para os demais rios brasileiros. Por outro lado, na bacia ATS (Atlântico – trecho sudeste), onde predominam rios com áreas de contribuição pequenas e de comportamento extremamente correlacionado aos eventos singulares de precipitação, as diferenças entre os cenários Q_{95} e Q_{med} são maiores, cuja perda de área protegida é estimada em 49% (Figura 84a). Resultados semelhantes são observados quando se comparam os cenários Q_{95} e $Q_{1,58}$ (Figura 84b).

Tabela 6 – Extensão total das seções transversais formadas pelos leitos dos rios e as respectivas áreas de preservação permanente (APP) para as estações fluviométricas analisadas por bacia hidrográfica e cenário hidrológico simulado.

BACIA [†]	CENÁRIO	H_{rel}	$\sum l_{rio}$	$\sum l_{APP}$	ATP	$\frac{ATP Q_{cenário}}{ATP Q_{med}}$
AMZ	Q_{med}	1,00	22335,94	9800,00	41935,94	1,00
	$Q_{1,58}$	0,97	21148,86	9400,00	39948,86	0,95
	Q_{95}	0,46	15078,82	7550,00	30178,82	0,72
TOC	Q_{med}	1,00	9053,32	5350,00	19753,32	1,00
	$Q_{1,58}$	0,91	8343,24	4950,00	18243,24	0,92
	Q_{95}	0,37	5759,70	3800,00	13359,70	0,68
ATN	Q_{med}	1,00	3569,54	2850,00	9269,54	1,00
	$Q_{1,58}$	0,91	3262,70	2700,00	8662,70	0,93
	Q_{95}	0,38	1728,54	1780,00	5288,54	0,57
SFO	Q_{med}	1,00	13470,98	9600,00	32670,98	1,00
	$Q_{1,58}$	0,90	11477,02	8350,00	28177,02	0,86
	Q_{95}	0,39	8393,84	6540,00	21473,84	0,66
ATL	Q_{med}	1,00	14115,99	13330,00	40775,99	1,00
	$Q_{1,58}$	0,88	11002,93	11580,00	34162,93	0,84
	Q_{95}	0,29	5697,90	8950,00	23597,90	0,58
PRN	Q_{med}	1,00	12258,51	10850,00	33958,51	1,00
	$Q_{1,58}$	0,91	11011,61	9930,00	30871,61	0,91
	Q_{95}	0,35	5745,32	7510,00	20765,32	0,61
URU	Q_{med}	1,00	7264,81	4300,00	15864,81	1,00
	$Q_{1,58}$	0,88	5697,95	3900,00	13497,95	0,85
	Q_{95}	0,26	3291,41	2900,00	9091,41	0,57
ATS	Q_{med}	1,00	5752,29	5500,00	16752,29	1,00
	$Q_{1,58}$	0,89	4990,40	5150,00	15290,40	0,91
	Q_{95}	0,28	2316,59	3130,00	8576,59	0,51
BRASIL	Q_{med}	1,00	87821,39	61580,00	210981,39	1,00
	$Q_{1,58}$	0,90	76934,70	55960,00	188854,70	0,90
	Q_{95}	0,33	48012,13	42160,00	132332,13	0,63

Notas:

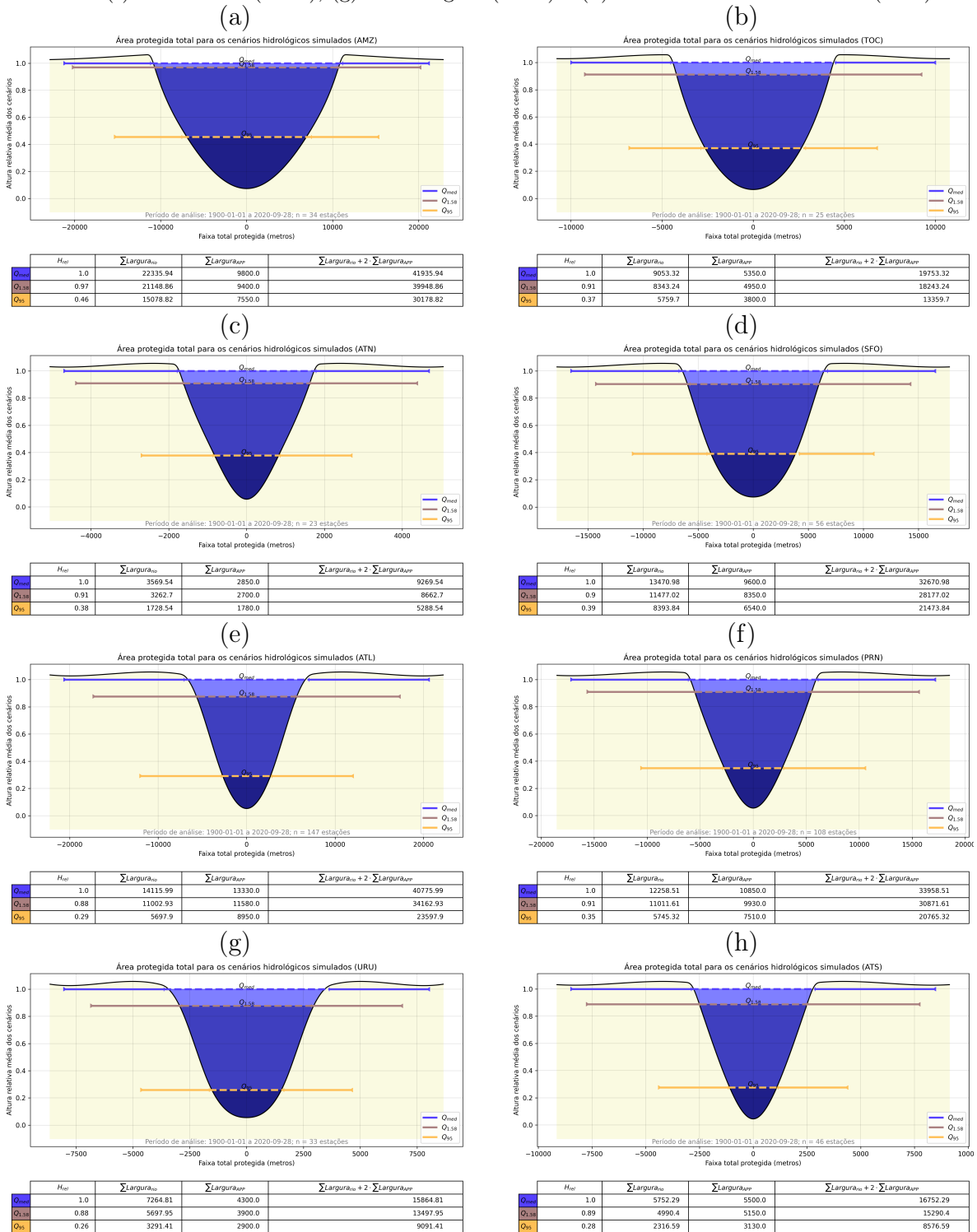
[†]Bacia hidrográfica, onde AMZ = Rio Amazonas; ATL = Atlântico, trecho leste; ATN = Atlântico, trecho norte / nordeste; ATS = Atlântico, trecho sudeste PRN = Rio Paraná; SFO = Rio São Francisco; TOC = Rio Tocantins; URU = Rio Uruguai; BRASIL = totalização dos resultados para o território continental brasileiro.

Abreviaturas e símbolos:

APP = área de preservação permanente; ATP = área total protegida, correspondente a $\sum l_{rio} + 2 \cdot \sum l_{APP}$; $\frac{ATP Q_{cenário}}{ATP Q_{med}}$ = área total protegida de um determinado cenário em relação ao cenário Q_{med} ; H_{rel} = altura relativa média dos cenários em relação ao talvegue; Q_{med} = média das cheias anuais; $Q_{1,58}$ = cheia anual com tempo de recorrência de 1,58 ano (vazão dominante ou de margens plenas); Q_{95} = vazão média diária com 95% de probabilidade de ser excedida (vazão de permanência); $\sum l_{APP}$ = largura total das APPs em faixas marginais aos leitos fluviais; $\sum l_{rio}$ = largura total dos leitos fluviais.

Fonte: o autor.

Figura 83 – Espaço territorial protegido formado pela soma das larguras dos leitos e áreas de preservação permanente em faixas marginais de rios para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), vazão de margens plenas (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}), para as bacias hidrográficas do (a) Rio Amazonas (AMZ), (b) Rio Tocantins (TOC), (c) Atlântico – trecho norte/nordeste (ATN), (d) Rio São Francisco (SFO), (e) Atlântico – trecho leste (ATL), (f) Rio Paraná (PRN), (g) Rio Uruguai (URU) e (h) Atlântico – trecho sudeste (ATS).



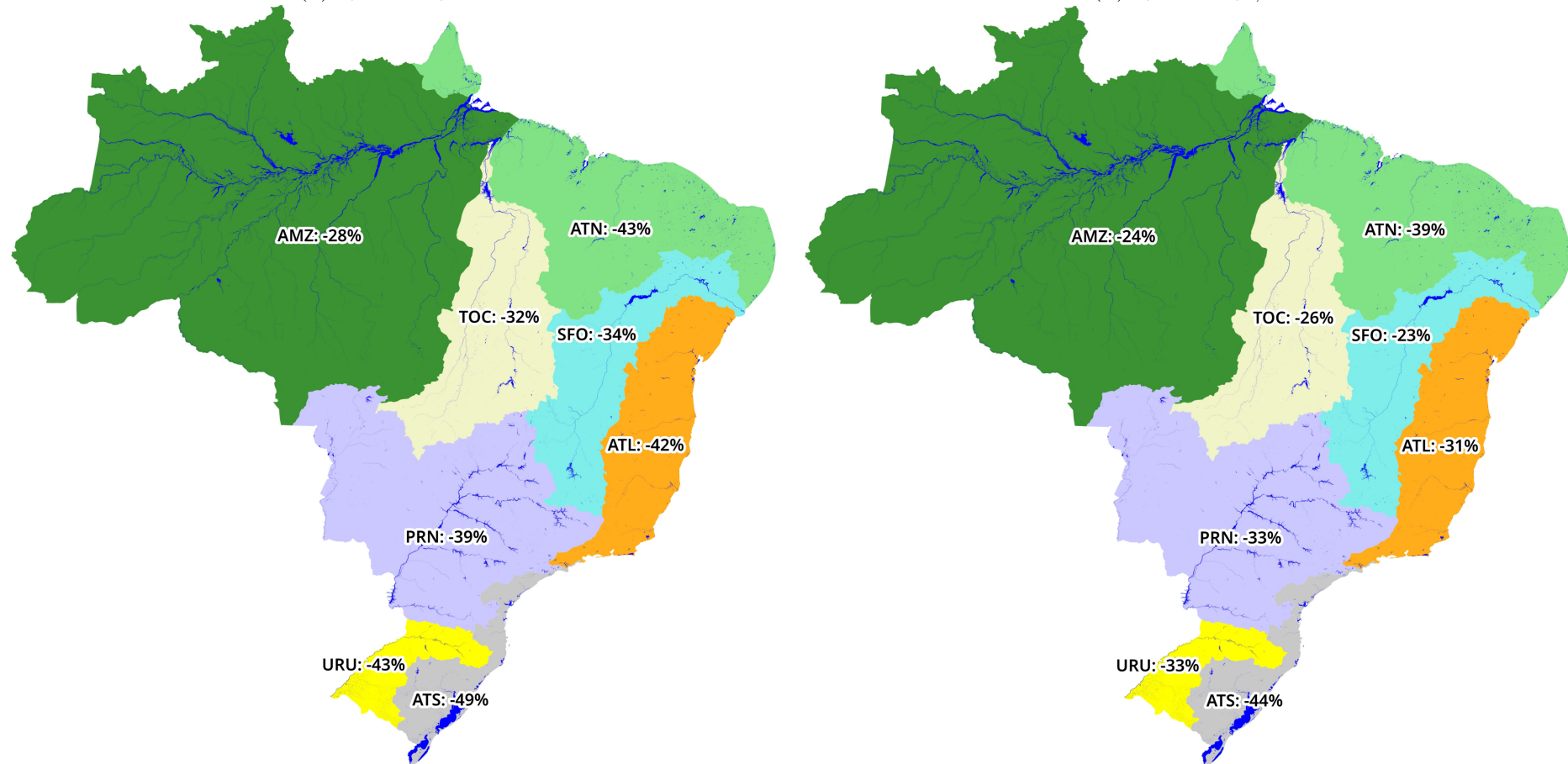
Notas: APP = área de preservação permanente; H_{rel} = altura relativa média dos cenários em relação ao talvegue; Q_{med} = média das cheias anuais; $Q_{1,58}$ = cheia anual com tempo de recorrência de 1,58 ano (vazão dominante ou de margens plenas); Q_{95} = vazão média diária com 95% de probabilidade de ser excedida (vazão de permanência); $\sum Largura_{APP}$ = largura total das APPs em faixas marginais aos leitos fluviais; $\sum Largura_{rio}$ = largura total dos leitos fluviais; $\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{APP}$ = área total protegida.

Fonte: o autor.

Figura 84 – Perdas estimadas de áreas protegidas ripárias em rios brasileiros por bacia hidrográfica considerando como hipótese para definição do leito regular o cenário hidrológico de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}) em comparação com (a) a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}) e (b) a vazão de margens plenas (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$).

(a) Q_{95} vs. Q_{med}

(b) Q_{95} vs. $Q_{1,58}$



Notas:
 Q_{med} = média das cheias anuais; $Q_{1,58}$ = cheia anual com tempo de recorrência de 1,58 ano (vazão dominante ou de margens plenas); Q_{95} = vazão média diária com 95% de probabilidade de ser excedida (vazão de permanência). Bacias hidrográficas: AMZ = Rio Amazonas; ATL = Atlântico, trecho leste; ATN = Atlântico, trecho norte / nordeste; ATS = Atlântico, trecho sudeste; PRN = Rio Paraná; SFO = Rio São Francisco; TOC = Rio Tocantins; URU = Rio Uruguai.

Fonte: o autor a partir de dados de ANA (2013, 2020) e IBGE (2017).

6.2.1.2 Perturbação das faixas marginais por cenário hidrológico

Como discutido anteriormente, a resiliência dos ecossistemas ripários está ligada à perturbação que esses espaços territoriais protegidos estão sujeitos. Os valores definidos na legislação brasileira para APP em faixa marginal aos rios são insuficientes para proteção do corpo hídrico e ecossistemas ripários (LEAL; BARLOW et al., 2017; DALA-CORTE et al., 2020). Portanto, é desejável que a APP do rio não seja inundada em curtos intervalos de recorrência, pois nesse cenário o ecossistema protegido é de baixa diversidade e, também, de baixa resiliência, minimizando as funções ecológicas do espaço protegido.

Se as larguras definidas na legislação para as APPs nas margens dos rios não são suficientes para proteção dos recursos hídricos e seus ecossistemas marginais, a discussão do nível a partir do qual se inicia a medição da APP torna-se de extrema importância, pois, conforme visto na subseção anterior, dependendo do cenário hidrológico, há perdas consideráveis de espaços territoriais protegidos. A legislação e a literatura não informam qual seria a probabilidade ideal para análise do risco de inundação de ecossistemas ripários. O Grupo de Trabalho Interinstitucional Federal do governo dos Estados Unidos da América para Restauração de cursos d'água indica que os projetos de recuperação de corredores ripários (*stream corridors*) devem considerar no longo prazo uma probabilidade de 1% de inundação em qualquer ano (FISRWG, 1988), i.e., um tempo de recorrência (TR) de 100 anos. Segundo Larentis et al. (2020), esse valor também é adotado para fins de planejamento de áreas de risco de inundação nos EUA, de forma que os autores o adotam para fins de zoneamento de planícies de inundação em áreas urbanas.

Então, para análise dos resultados, adotar-se-á neste trabalho o TR de 100 anos como critério de comparação dos cenários hidrológicos simulados.

Considerando que cada estação fluviométrica fornece duas amostras (uma para cada margem), quanto à probabilidade de perturbação das APPs para os rios analisados, observa-se nos resultados apresentados na Tabela 7 e nos histogramas da Figura 85 que, para 944 faixas marginais (n), no cenário Q_{95} há 438 casos nos quais a APP é integralmente inundada com uma probabilidade de até 1% ($n_{TR<100}$). Para os cenários $Q_{1,58}$ e Q_{med} a inundação integral alcança 270 e 215 casos, respectivamente. Ou seja, 51% das faixas marginais inundadas no cenário Q_{95} deixam de sê-lo ao adotar-se Q_{med} ou 38% para a hipótese de $Q_{1,58}$.

Tabela 7 – Probabilidade de perturbação por inundação integral das seções transversais formadas pelos leitos dos rios e as respectivas áreas de preservação permanente (APP) para as estações fluviométricas analisadas por bacia hidrográfica e cenário hidrológico simulado.

BACIA [†]	CEN	AMOSTRAS POR INTERVALOS DO TR (anos)*												IND	N
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	<100	≥100		
AMZ	Q_{med}	3	2	0	0	0	0	0	2	0	0	7	28	33	68
	$Q_{1.58}$	5	2	0	0	0	0	0	2	0	0	9	30	29	68
	Q_{95}	19	2	0	0	0	0	0	3	2	1	27	26	15	68
TOC	Q_{med}	8	1	3	1	0	0	0	0	0	0	13	20	17	50
	$Q_{1.58}$	12	2	2	0	0	0	0	0	0	0	16	20	14	50
	Q_{95}	16	2	2	0	0	0	0	0	0	0	20	21	9	50
ATN	Q_{med}	9	1	0	0	0	1	1	0	0	1	13	25	8	46
	$Q_{1.58}$	9	1	0	0	1	1	1	0	1	0	14	27	5	46
	Q_{95}	17	0	0	0	2	1	2	1	1	1	25	20	1	46
SFO	Q_{med}	2	5	5	5	2	5	5	2	1	3	35	41	36	112
	$Q_{1.58}$	8	7	5	4	2	4	5	3	4	1	43	41	28	112
	Q_{95}	27	9	4	6	1	6	6	1	1	1	62	34	16	112
ATL	Q_{med}	23	13	7	5	3	3	3	3	0	0	60	178	56	294
	$Q_{1.58}$	42	18	7	5	5	1	0	4	0	1	83	168	43	294
	Q_{95}	83	12	11	8	4	5	1	4	2	0	130	139	25	294
PRN	Q_{med}	21	14	5	5	1	0	7	2	1	2	58	104	54	216
	$Q_{1.58}$	26	14	5	6	2	3	6	0	1	2	65	101	50	216
	Q_{95}	52	17	7	6	6	1	4	3	3	2	101	88	27	216
URU	Q_{med}	4	2	1	2	0	0	0	0	0	0	9	30	27	66
	$Q_{1.58}$	10	2	1	2	0	0	0	0	0	1	16	28	22	66
	Q_{95}	24	2	1	2	0	0	0	0	2	0	31	25	10	66
ATS	Q_{med}	10	4	2	2	2	0	0	0	0	0	20	46	26	92
	$Q_{1.58}$	13	4	2	2	2	0	0	0	1	0	24	44	24	92
	Q_{95}	25	6	3	4	2	1	0	0	1	0	42	38	12	92
BRASIL	Q_{med}	80	42	23	20	8	9	16	9	2	6	215	472	257	944
	$Q_{1.58}$	125	50	22	19	12	9	12	9	7	5	270	459	215	944
	Q_{95}	263	50	28	26	15	14	13	12	12	5	438	391	115	944

Notas:

* Amostras divididas em classes espaçadas a cada 10 anos e com valores acumulados para tempos de recorrência inferior a 100 anos e igual ou superior a 100 anos;

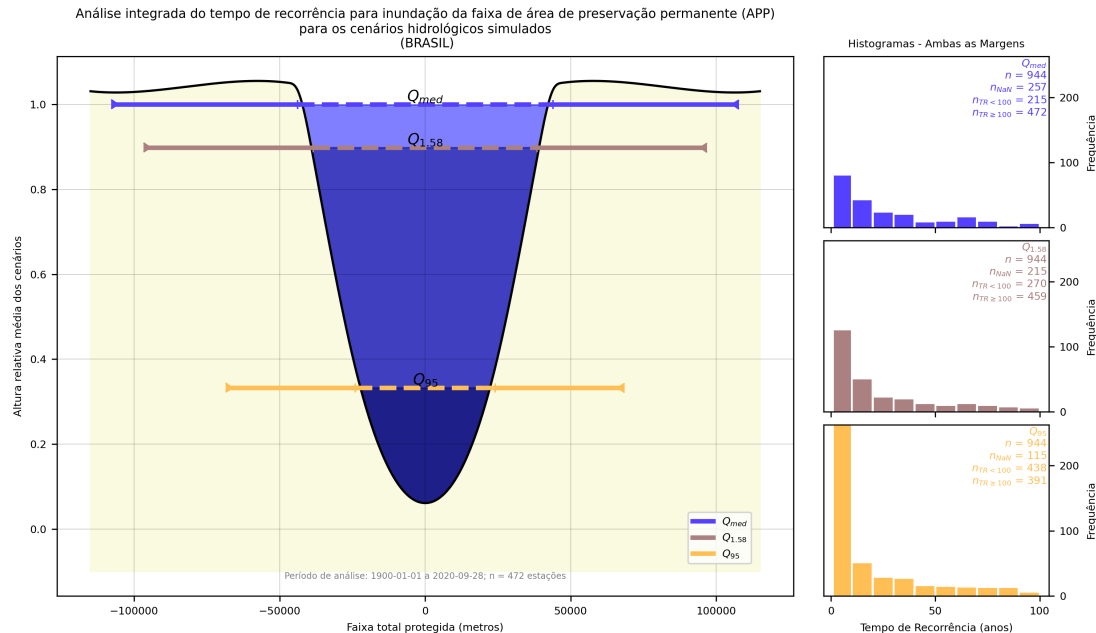
† Bacia hidrográfica, onde AMZ = Rio Amazonas; ATL = Atlântico, trecho leste; ATN = Atlântico, trecho norte / nordeste; ATS = Atlântico, trecho sudeste; PRN = Rio Paraná; SFO = Rio São Francisco; TOC = Rio Tocantins; URU = Rio Uruguai; BRASIL = totalização dos resultados para o território continental brasileiro.

Abreviaturas e símbolos:

APP = área de preservação permanente; CEN = cenário hidrológico; IND = número de amostras cujo tempo de recorrência para inundação da APP é indeterminado (normalmente devido às limitações da extensão do perfil da seção transversal do rio); N = número total de amostras por cenário, sendo duas por estação fluviométrica (uma para cada margem do rio); Q_{med} = média das cheias anuais; $Q_{1.58}$ = cheia anual com tempo de recorrência de 1,58 ano (vazão dominante ou de margens plenas); Q_{95} = vazão média diária com 95% de probabilidade de ser excedida (vazão de permanência); TR = tempo de recorrência ou período de retorno de um evento em anos.

Fonte: o autor.

Figura 85 – Análise integrada da probabilidade de perturbação (inundação integral) das áreas de preservação permanente (APP) em faixas marginais de rios em 472 pontos do território brasileiro para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), vazão de margens plenas (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}).



Notas: Os rios cujos perfis das seções transversais não possuem extensão suficiente para simular a inundação integral da APP são desconsiderados da análise e à probabilidade de inundação é atribuído o valor indeterminado (NaN).

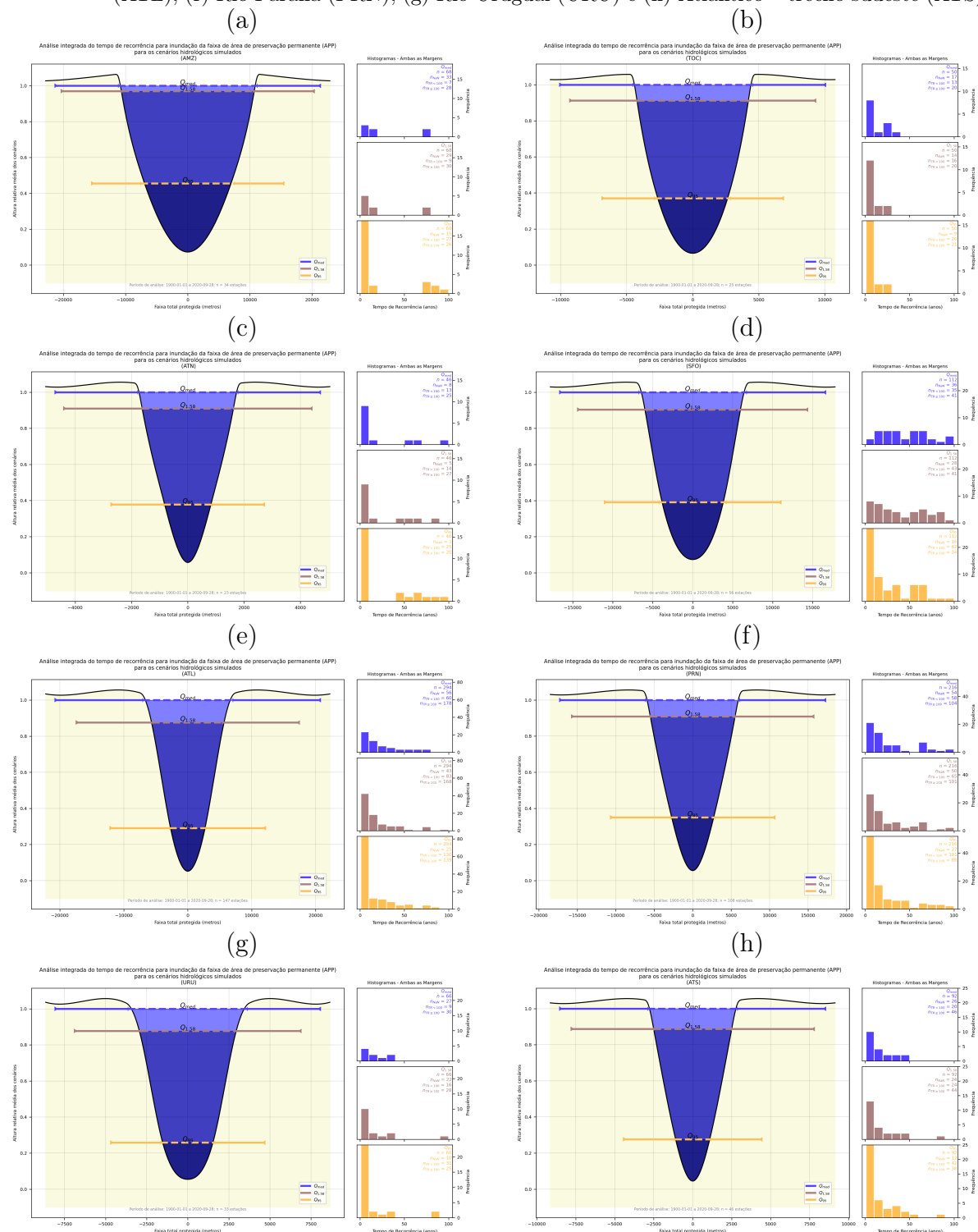
Símbolo: H_{rel} = altura relativa média dos cenários em relação ao talvegue.

Fonte: o autor.

Um mesmo padrão de comportamento é observado para cada bacia hidrográfica (Figura 86), no qual os cenários $Q_{1,58}$ e Q_{med} apresentam um número significativamente menor de amostras com margens integralmente inundadas, quando comparados ao cenário de estiagem (Q_{95}). Em outras palavras, a adoção do critério científico ($Q_{1,58}$) ou dominial (Q_{med}) possibilita a formação de ecossistemas ripários protegidos mais resilientes às perturbações por cheias, sendo também esperada maior diversidade ecológica.

Adotando-se o leito regular a partir da vazão de margens plenas ($Q_{1,58}$), observa-se que aproximadamente 29% das APPs nas margens dos rios brasileiros analisados são integralmente inundadas por cheias com TR inferior a 100 anos. Caso se utilize o critério dominial para definição das APPs (Q_{med}), estima-se que até 23% das faixas marginais das APPs são integralmente inundadas para o mesmo TR. Então, a adoção da probabilidade de inundação integral em 1% (TR = 100 anos) para definição do limite externo máximo das APPs, quando os limites mínimos legais não forem suficientes, possibilita garantir um ecossistema ripário sujeito a menor perturbação, principalmente naqueles cursos d'água com planícies de inundação adjacentes de baixa declividade e sujeitas a inundações frequentes, bem como previne a ocupação urbana em locais que, apesar de não serem atualmente considerados como APP, pelos limites mínimos legais, encontram-se dentro da faixa de passagem de inundação.

Figura 86 – Análise integrada da probabilidade de perturbação (inundação integral) das áreas de preservação permanente em faixas marginais de rios para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), vazão de margens plenas (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}), para as bacias hidrográficas do (a) Rio Amazonas (AMZ), (b) Rio Tocantins (TOC), (c) Atlântico – trecho norte / nordeste (ATN), (d) Rio São Francisco (SFO), (e) Atlântico – trecho leste (ATL), (f) Rio Paraná (PRN), (g) Rio Uruguai (URU) e (h) Atlântico – trecho sudeste (ATS).



Notas: Os rios cujos perfis das seções transversais não possuem extensão suficiente para simular a inundação integral da APP são desconsiderados da análise e à probabilidade de inundação é atribuído o valor indeterminado (NaN).

Abreviaturas e símbolos: APP = área de preservação permanente; H_{rel} = altura relativa média dos cenários em relação ao talvegue; Q_{med} = média das cheias anuais; $Q_{1,58}$ = cheia anual com tempo de recorrência de 1,58 ano (vazão dominante ou de margens plenas); Q_{95} = vazão média diária com 95% de probabilidade de ser excedida (vazão de permanência).

Fonte: o autor.

6.2.2 Áreas rurais consolidadas: faixa mínima sujeita à recuperação ambiental

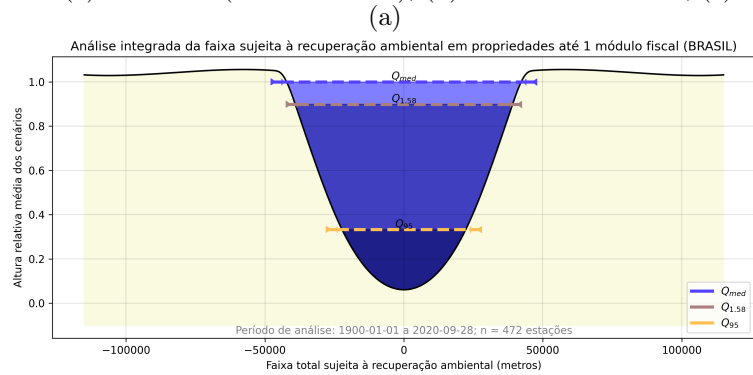
As áreas de preservação permanente não estão, necessariamente, sujeitas à conservação integral dos ecossistemas ripários, pois a Lei permitiu a “continuidade das atividades agrossilvipastoris, de ecoturismo e de turismo rural em áreas rurais consolidadas até 22 de julho de 2008” (BRASIL, 2012b, art. 61-A). No interior desses imóveis, a área protegida efetiva (APE) será aquela formada pelo leito e a faixa marginal mínima de APP sujeita à recuperação ambiental (para facilitar a leitura, essa faixa mínima será referenciada como l_{ARC}). Além da comparação entre a área protegida total entre os cenários hidrológicos simulados (subseção 6.2.1), um dado interessante de ser comparado é a efetividade dos ecossistemas ripários, considerando a resiliência da parcela da APP sujeita à recuperação ambiental de acordo com as regras de transição estabelecidas na Lei nº 12.651/2012 (cf. subseção 6.1.2). No caso, a resiliência aqui será considerada somente em função da probabilidade de perturbação hidrológica pela inundação do ecossistema ripário a ser mantido pelo proprietário em cada cenário legal, que é função do tamanho da propriedade e das dimensões do rio (Quadro 12).

6.2.2.1 Área protegida efetiva por cenário hidrológico

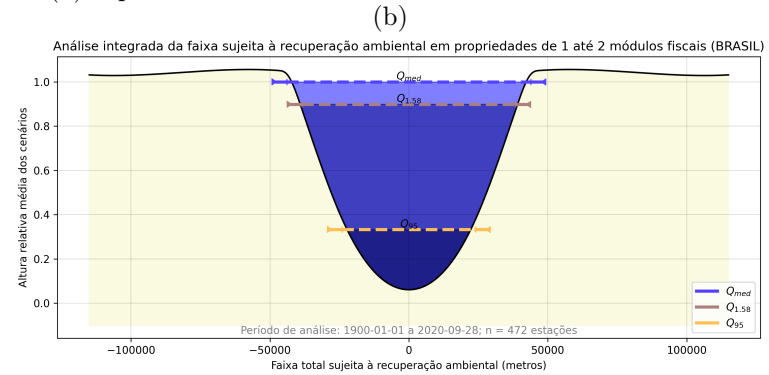
A Tabela 8 e a Figura 87 apresentam as diferenças relativas entre os espaços territoriais a serem recuperados para os diversos cenários hidrológicos analisados, considerando o tamanho do imóvel e as regras de transição para áreas rurais consolidadas. Para imóveis com área (A) superior a 4 MF, observa-se que entre o nível médio das enchentes anuais (Q_{med}) e o cenário de vazão de permanência na condição de estiagem (Q_{95}) há uma perda aproximada de 38% da faixa total de proteção ambiental (leito + $2 \cdot l_{ARC}$), resultado próximo àquele encontrado quando se considerou a proteção integral de toda as APPs na subseção 6.2.1.1.

Para imóveis rurais menores, nos quais a faixa mínima a ser preservada em área rural consolidada possui larguras inferiores, a perda entre os cenários Q_{med} e Q_{95} é mais elevada, sendo de 43% ($A \leq 1$ MF), 42% ($1 \text{ MF} < A \leq 2$ MF) e 39% ($2 \text{ MF} < A \leq 4$ MF). Considerando todas as classes de imóveis rurais e a relação entre os cenários delimitados pelo nível médio das enchentes (Q_{med}) e as cheias anuais mais prováveis ($Q_{1,58}$), a diferença é pequena, entre 11% e 12%. E entre $Q_{1,58}$ e Q_{95} as perdas variam entre 30% e 35%. Apesar de os valores relativos às perdas espaço efetivamente protegido entre os cenários serem próximos àqueles encontrados para área total legalmente protegida (cf. Tabela 6), existe uma perda significativa quando se comparam os valores absolutos da área sujeita à recuperação efetiva com as dimensões das APPs estabelecidas nas faixas marginais dos rios para cada cenário.

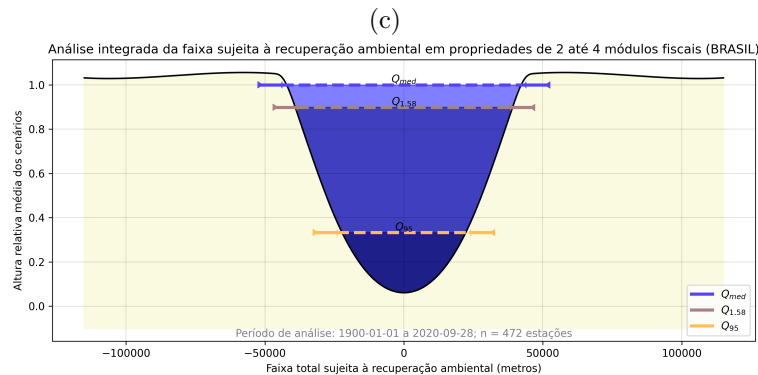
Figura 87 – Faixas mínimas sujeitas à recuperação ambiental para áreas de preservação permanente (APP) em faixas marginais de rios em 472 pontos do território brasileiro para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), vazão de margens plenas (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}), considerando imóveis em áreas rurais consolidadas (ARC) com (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 MF até 2 MF, (c) de 2 MF até 4 MF e (d) superior a 4 MF.



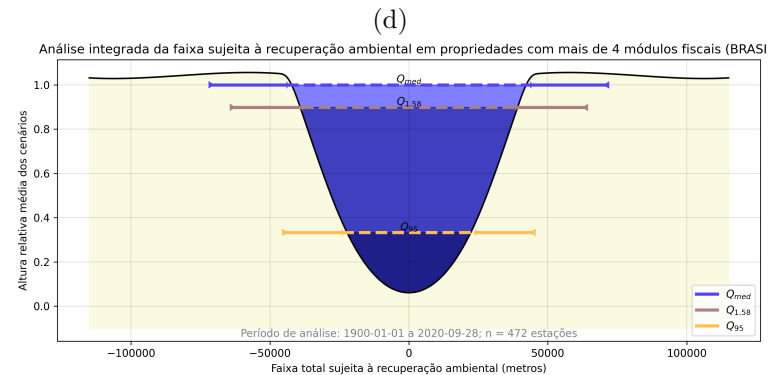
	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	87821.39	2360.0	92541.39
$Q_{1,58}$	0.9	76934.7	2360.0	81654.7
Q_{95}	0.33	48012.13	2360.0	52732.13



	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	87821.39	3776.0	95373.39
$Q_{1,58}$	0.9	76934.7	3776.0	84486.7
Q_{95}	0.33	48012.13	3776.0	55564.13



	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	87821.39	7080.0	101981.39
$Q_{1,58}$	0.9	76934.7	7080.0	91094.7
Q_{95}	0.33	48012.13	7080.0	62172.13



	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	87821.39	26465.86	140753.12
$Q_{1,58}$	0.9	76934.7	24315.33	125565.36
Q_{95}	0.33	48012.13	19896.1	87804.33

Notas: H_{rel} = altura relativa média dos cenários em relação ao talvegue; Q_{med} = média das cheias anuais; $Q_{1,58}$ = cheia anual com tempo de recorrência de 1,58 ano (vazão dominante ou de margens plenas); Q_{95} = vazão média diária com 95% de probabilidade de ser excedida (vazão de permanência); $\sum Largura_{ARC}$ = largura total das faixas marginais aos leitos fluviais sujeitas à recuperação ambiental em ARCs; $\sum Largura_{rio}$ = largura total dos leitos fluviais; $\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$ = área total sujeita à recuperação ambiental em ARC.

Fonte: o autor.

Tabela 8 – Extensão total das seções transversais formadas pelos leitos dos rios e as respectivas áreas de preservação permanente (APP) sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) em função do tamanho dos imóveis rurais e os cenários hidrológicos simulados, para todas as estações fluviométricas analisadas.

IMÓVEL [†]	CENÁRIO	H_{rel}	$\sum l_{rio}$	$\sum l_{ARC}$	APE	$\frac{APE_{Q_{cenário}}}{APE_{Q_{med}}}$
$A \leq 1$	Q_{med}	1,00	87821,39	2360,00	92541,39	1,00
	$Q_{1,58}$	0,90	76934,70	2360,00	81654,70	0,88
	Q_{95}	0,33	48012,13	2360,00	52732,13	0,57
$1 < A \leq 2$	Q_{med}	1,00	87821,39	3776,00	95373,39	1,00
	$Q_{1,58}$	0,90	76934,70	3776,00	84486,70	0,89
	Q_{95}	0,33	48012,13	3776,00	55564,13	0,58
$2 < A \leq 4$	Q_{med}	1,00	87821,39	7080,00	101981,39	1,00
	$Q_{1,58}$	0,90	76934,70	7080,00	91094,70	0,89
	Q_{95}	0,33	48012,13	7080,00	62172,13	0,61
$A > 4$	Q_{med}	1,00	87821,39	26465,86	140753,12	1,00
	$Q_{1,58}$	0,90	76934,70	24315,33	125565,36	0,89
	Q_{95}	0,33	48012,13	19896,10	87804,33	0,62

Notas:

[†]Imóveis rurais classificados em função de sua área (A), expressa em módulos fiscais (MF);

Abreviaturas e símbolos:

APP = área de preservação permanente; ARC = área rural consolidada, objeto de atividades agrosilvipastoris, de ecoturismo e de turismo rural até 22 de julho de 2008; APE = área protegida efetiva, correspondente a $\sum l_{rio} + 2 \cdot \sum l_{ARC}$; $\frac{APE_{Q_{cenário}}}{APE_{Q_{med}}}$ = área protegida efetiva de um determinado cenário em relação ao cenário Q_{med} ; H_{rel} = altura relativa média dos cenários em relação ao talvegue; MF = módulo fiscal, unidade de medida agrária brasileira (cf. BRASIL, 1964, 1979a); N = número total de amostras por cenário, sendo duas por estação fluviométrica (uma para cada margem do rio); Q_{med} = média das cheias anuais; $Q_{1,58}$ = cheia anual com tempo de recorrência de 1,58 ano (vazão dominante ou de margens plenas); Q_{95} = vazão média diária com 95% de probabilidade de ser excedida (vazão de permanência); $\sum l_{rio}$ = largura total dos leitos fluviais; $\sum l_{ARC}$ = largura total das faixas marginais aos leitos fluviais sujeitas à recuperação ambiental.

Fonte: o autor.

As APPs têm larguras que variam entre 30 m e 500 m em função da largura do leito fluvial, sendo que nas áreas rurais consolidadas a faixa mínima sujeita à recuperação ambiental possui valor fixo para imóveis com área (A) inferior a 4 MF, independente das dimensões da seção transversal do leito do rio: 5 m ($A \leq 1$ MF), 8 m ($1 \text{ MF} < A \leq 2$ MF) e 15 m ($2 \text{ MF} < A \leq 4$ MF). Simulando-se a existência de propriedades nessas classes de tamanho nas margens dos rios analisados, verifica-se que as regras de transição para ARC reduzem significativamente o ecossistema ripário protegido em todos os cenários hidrológicos analisados. Para o cenário Q_{med} , a redução chega a 96% para as APPs em imóveis rurais com até 1 MF, 94% para imóveis de 1 MF até 2 MF e 89% para aqueles com área de 2 MF até 4 MF, conforme apresentado na Tabela 9.

Cabe ressaltar que os resultados apresentados para imóveis rurais com área de 2 MF a 4 MF também são aplicáveis às regularizações fundiárias de interesse específico de núcleos urbanos informais – REURB-E, que permite a permanência de assentamentos nas APPs de rios urbanos, com o dever de recuperação de somente uma faixa marginal de 15 m de largura (art. 65, § 2º, Lei nº 12.651/2012). Para fins de estimativa, para os

três cenários hidrológicos simulados, são esperadas perdas do espaço territorial protegido de 83% (Q_{95}), 87% ($Q_{1,58}$) e 89% (Q_{med}). Para os imóveis rurais com área superior a 4 MF, observa-se na [Tabela 9](#) que as perdas de ecossistema ripário, apesar de significativas, são menores: entre 53% (Q_{95}) e 57% ($Q_{1,58}$ e Q_{med}). Esses resultados devem-se ao fato que, para essas propriedades, a faixa marginal a ser recuperada corresponde, em regra, a metade da largura do rio, salvo rios com larguras inferiores a 10 m em imóveis de 4 MF até 10 MF, quando a faixa é estabelecida em 20 m.

Tabela 9 – Relações entre a faixa mínima sujeita à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) e as respectivas áreas de preservação permanente (APP) em função do tamanho dos imóveis rurais e os cenários hidrológicos simulados, para todas as estações fluviométricas analisadas.

IMÓVEL [†]	CENÁRIO	H_{rel}	$\sum l_{rio}$	$\sum l_{ARC}$	$\sum l_{APP}$	$\frac{\sum l_{ARC}}{\sum l_{APP}}$
$A \leq 1$	Q_{med}	1,00	87821,39	2360,00	61580,00	0,04
	$Q_{1,58}$	0,90	76934,70	2360,00	55960,00	0,04
	Q_{95}	0,33	48012,13	2360,00	42160,00	0,06
$1 < A \leq 2$	Q_{med}	1,00	87821,39	3776,00	61580,00	0,06
	$Q_{1,58}$	0,90	76934,70	3776,00	55960,00	0,07
	Q_{95}	0,33	48012,13	3776,00	42160,00	0,09
$2 < A \leq 4$	Q_{med}	1,00	87821,39	7080,00	61580,00	0,11
	$Q_{1,58}$	0,90	76934,70	7080,00	55960,00	0,13
	Q_{95}	0,33	48012,13	7080,00	42160,00	0,17
$A > 4$	Q_{med}	1,00	87821,39	26465,86	61580,00	0,43
	$Q_{1,58}$	0,90	76934,70	24315,33	55960,00	0,43
	Q_{95}	0,33	48012,13	19896,10	42160,00	0,47

Notas:

[†]Imóveis rurais classificados em função de sua área (A), expressa em módulos fiscais (MF);

Abreviaturas e símbolos:

APP = área de preservação permanente; ARC = área rural consolidada, objeto de atividades agrossilvipastoris, de ecoturismo e de turismo rural até 22 de julho de 2008; H_{rel} = altura relativa média dos cenários em relação ao talvegue; MF = módulo fiscal, unidade de medida agrária brasileira (cf. [BRASIL, 1964, 1979a](#)); N = número total de amostras por cenário, sendo duas por estação fluviométrica (uma para cada margem do rio); Q_{med} = média das cheias anuais; $Q_{1,58}$ = cheia anual com tempo de recorrência de 1,58 ano (vazão dominante ou de margens plenas); Q_{95} = vazão média diária com 95% de probabilidade de ser excedida (vazão de permanência); $\sum l_{rio}$ = largura total dos leitos fluviais; $\sum l_{APP}$ = largura total das faixas marginais aos leitos fluviais consideradas APP; $\sum l_{ARC}$ = largura total das faixas marginais aos leitos fluviais sujeitas à recuperação ambiental; $\frac{\sum l_{ARC}}{\sum l_{APP}}$ = relação entre a largura total das faixas marginais sujeitas à recuperação ambiental nas margens dos rios em ARC e a largura total das respectivas faixas de APP.

Fonte: o autor.

O ideal, para trabalhos futuros, é procurar correlacionar espacialmente as APPs nas margens de rios de todo o território brasileiro, por meio de modelagem hidrológica, com os dados de uso do solo e limites dos imóveis rurais, que podem ser obtidos do Sistema Nacional de Cadastro Rural (SNCR) do Incra ou do Sistema do Cadastro Ambiental Rural (CAR) do Serviço Florestal Brasileiro.

O SNCR ainda se encontra com o prazo aberto para cadastramento para imóveis

com área superior a 50 ha até 30.12.2021. Para imóveis com área inferior a 50 ha, maiores beneficiados pelas regras de transição da Lei nº 12.651/2012, o prazo para os proprietários cadastrarem-se encerra em 30.12.2022 (BRASIL, 2020). Atualmente, o georreferenciamento preciso dos limites é exigido somente para imóveis rurais com área superior a 100 ha, sendo que a partir de 20.11.2025 será exigido para todos os imóveis rurais (cf. BRASIL, 2002a, art. 10). Para o CAR, o proprietário para ter direito às regras de transição para ARC deve cadastrar seu imóvel até 31.12.2020 (cf. BRASIL, 2012b, art. 29, § 4º). Sparovek et al. (2019) ao analisar os dados públicos disponíveis nos cadastros brasileiros, constataram que as sobreposições entre as categorias de posse de terra somam 50% do território registrado do Brasil. Por esses motivos, para realização de análises espaciais precisas em trabalhos futuros, sugere-se avaliar com cuidado os dados dos cadastros públicos disponíveis.

Os resultados por bacia hidrográfica seguem o mesmo comportamento observado nos dados consolidados para o todo o território nacional e, devido ao volume, encontram-se disponíveis no Apêndice D (Tabela D.1 e Figuras D.1 a D.8).

6.2.2.2 Perturbação das faixas marginais mínimas sujeitas à recuperação ambiental por cenário hidrológico

Conforme abordado na subseção 6.2.1.2, para análise do risco de inundação de ecossistemas ripários considerados como APP, foi adotado como referência o tempo de recorrência de 100 anos (probabilidade do evento ser excedido em qualquer ano de 1%). Contudo, devido à redução considerável da extensão da faixa marginal efetivamente protegida em áreas rurais consolidadas, apresentada na subseção anterior, observa-se nos resultados que a frequência de faixas marginais integralmente inundadas concentra-se, em sua maioria, em valores abaixo de 20 anos de recorrência (probabilidade de excedência em qualquer ano de 5%), por isso, para fins de apresentação de histogramas, tabelas e discussão dos resultados, unitizar-se-á nesta subseção como paradigma o TR de 20 anos.

Cada estação fluviométrica fornece duas amostras (uma para cada margem) para análise da probabilidade de perturbação das faixas marginais de APPs sujeitas à recuperação ambiental em ARC. Observando-se os resultados apresentados na Figura 88 e na Tabela 10 é possível notar que, para todas as classes de imóveis rurais e cenários hidrológicos analisados, uma parcela significativa dos ecossistemas ripários a serem recuperados serão inundados em intervalos inferiores a 20 anos, tendo como extremos 902 amostras (96%) para o cenário Q_{95} em imóveis até 1 MF e 198 amostras (21%) para o cenário Q_{med} para propriedades com área superior a 4 MF.

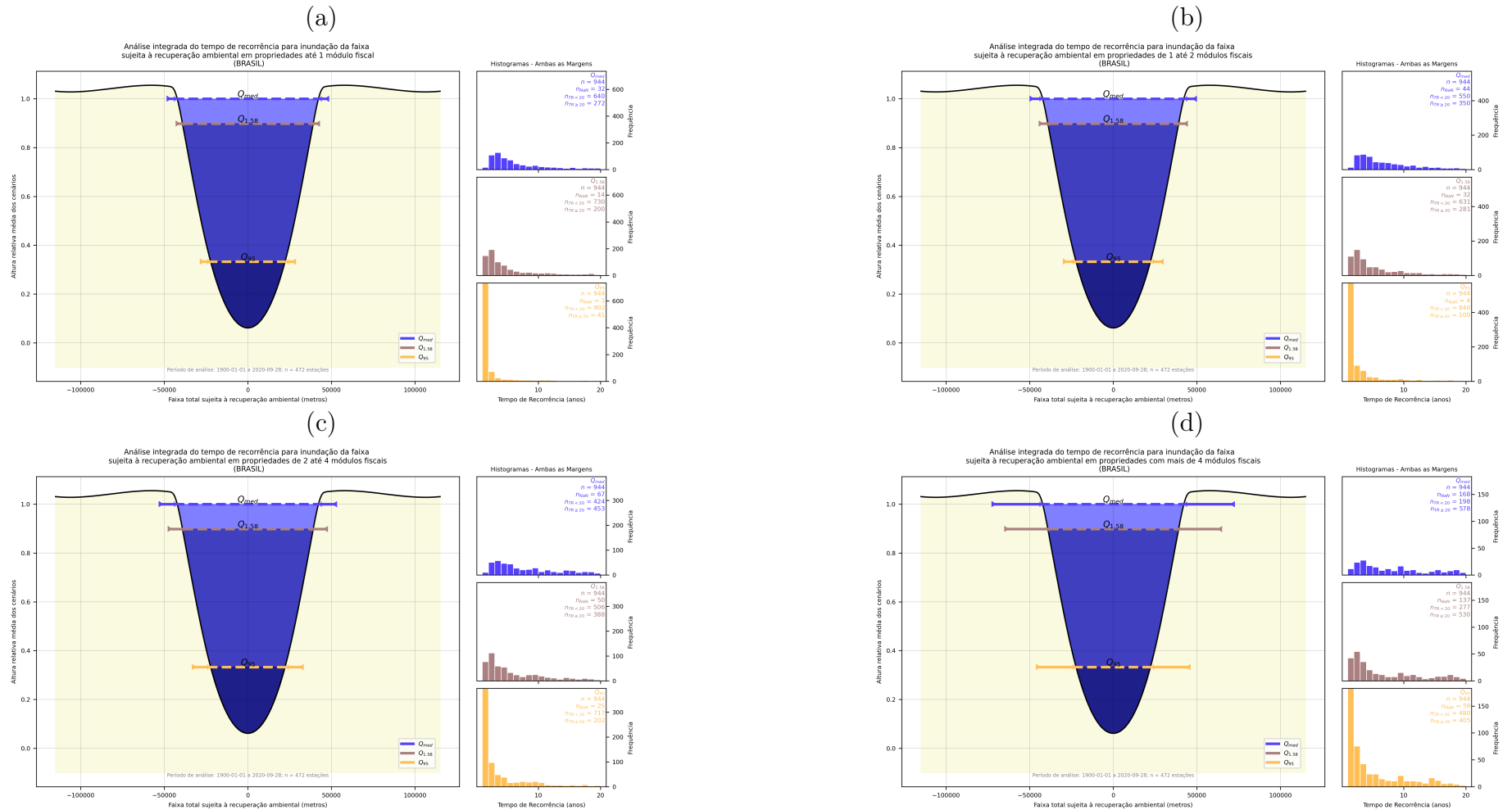
É importante destacar que, para todas as classes de tamanho do imóvel rural, o cenário de estiagem Q_{95} é o menos indicado para fins de definição do leito regular de cursos d'água. Para a probabilidade de excedência de 50% (TR = 2 anos) de inundação integral do ecossistema ripário remanescente, em imóveis com área até 4 MF, observam-se

os seguintes números de amostras integralmente inundadas: 735 (78%) para imóveis com área até 1 MF (Figura 88a), 571 (60%) naqueles de 1 MF até 2 MF (Figura 88b) e 396 (42%) quando a área for de 2 MF até 4 MF (Figura 88c). Mesmo nos imóveis com área superior a 4 MF, onde a faixa a ser recuperada é, em regra, equivalente a metade da largura do rio, o número de faixas marginais inundadas com frequência superior a 50% permanece elevado (183 amostras, eq. 19%), conforme Figura 88d.

Os resultados obtidos para imóveis rurais com área de 2 MF até 4 MF são aplicáveis para analisar, hipoteticamente, o cenário de regularização fundiária de núcleos urbanos informais por interesse específico (REURB-E). A possibilidade de ocupação da APP, com o mínimo de 15 m de faixa para conservação, prevista no art. 65, § 2º, da Lei nº 12.651/2012, coloca em risco as edificações ribeirinhas. Adotando-se como referência a probabilidade de excedência de 1% (TR = 100 anos), estabelecido por Larentis et al. (2020) para zoneamento de planícies de inundação em áreas urbanas, observa-se que no cenário Q_{95} em 804 (85%) amostras as faixas marginais de 15 m de largura a serem recuperadas são plenamente inundadas. Para o cenário hidrológico Q_{med} , os leitos fluviais são maiores, mas, mesmo assim, em 598 (63%) amostras as faixas marginais são completamente inundadas para um TR inferior a 100 anos. E para $Q_{1,58}$, 661 (70%) amostras são integralmente inundadas. Os demais resultados por bacia hidrográfica encontram-se disponíveis no Apêndice D, nas Figuras D.9 a D.16 e na Tabela D.2, e seguem o mesmo comportamento observado nos dados consolidados para todo o território nacional.

É importante observar que para os imóveis rurais nas margens de rios navegáveis uma parcela da APP e da faixa mínima sujeita à recuperação ambiental em ARC encontrar-se-ão no interior de bem público, no caso, terrenos marginais, quando o rio não sofrer influência de maré. O terreno marginal tem largura mínima de 15 m a partir da linha definida pela média das enchentes ordinárias (Q_{med}), de forma que aos proprietários de imóveis rurais com área inferior a 4 MF a faixa de APP a ser recuperada estará integralmente sobre bem público, independente do cenário hidrológico adotado para definir o leito regular do rio, pois naquelas classes de imóveis a faixa a ser recuperada é de no máximo 15 m.

Figura 88 – Análise integrada da probabilidade de perturbação (inundação integral) das áreas de preservação permanente (APP) sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) em faixas marginais de rios em 472 pontos do território brasileiro para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), vazão de margens plenas (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}), considerando imóveis (a) com até 1 Módulo Fiscal (MF), (b) de 1 MF até 2 MF, (c) de 2 MF até 4 MF e (d) superior a 4 MF.



Notas: Os rios cujos perfis das seções transversais não possuem extensão suficiente para simular a inundação integral da APP são desconsiderados da análise e à probabilidade de inundação é atribuído o valor indeterminado (*NaN*). Símbolo: H_{rel} = altura relativa média dos cenários em relação ao talvegue.

Fonte: o autor.

Tabela 10 – Probabilidade de perturbação por inundação integral das seções transversais formadas pelo leito dos rios e respectivas faixas mínimas das áreas de preservação permanente (APP) sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC), em função do cenário hidrológico simulado e do tamanho do imóvel rural, para todas as estações fluviométricas analisadas.

IMÓVEL [†]	CEN	AMOSTRAS POR INTERVALOS DO TR (anos) [*]												IND	N
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	<20	≥20		
$A \leq 1$	Q_{med}	15	232	154	73	52	35	26	20	16	17	640	272	32	944
	$Q_{1,58}$	145	289	115	48	36	31	21	15	15	15	730	200	14	944
	Q_{95}	735	94	23	15	11	13	6	1	4	0	902	41	1	944
$1 < A \leq 2$	Q_{med}	12	169	117	78	58	42	28	22	12	12	550	350	44	944
	$Q_{1,58}$	109	242	95	53	47	27	20	13	15	10	631	281	32	944
	Q_{95}	571	151	46	18	20	10	9	7	7	1	840	100	4	944
$2 < A \leq 4$	Q_{med}	10	107	89	46	48	31	21	34	21	17	424	453	67	944
	$Q_{1,58}$	76	169	86	38	47	31	15	21	14	9	506	388	50	944
	Q_{95}	396	143	52	35	36	21	10	9	10	5	717	202	25	944
$A > 4$	Q_{med}	11	50	31	19	23	17	7	15	12	13	198	578	168	944
	$Q_{1,58}$	42	89	33	18	22	20	10	13	19	11	277	530	137	944
	Q_{95}	183	117	46	25	30	20	15	27	11	6	480	405	59	944

Notas:

* Amostras divididas em classes espaçadas a cada dois anos e com valores acumulados para tempos de recorrência inferior a 20 anos e igual ou superior a 20 anos;

† Imóveis rurais classificados em função de sua área (A), expressa em módulos fiscais (MF);

Abreviaturas e símbolos:

APP = área de preservação permanente; ARC = área rural consolidada, objeto de atividades agrossilvipastoris, de ecoturismo e de turismo rural até 22 de julho de 2008; CEN = cenário hidrológico; IND = número de amostras cujo tempo de recorrência para inundação da APP é indeterminado (normalmente devido às limitações da extensão do perfil da seção transversal do rio); MF = módulo fiscal, unidade de medida agrária brasileira (cf. BRASIL, 1964, 1979a); N = número total de amostras por cenário, sendo duas por estação fluviométrica (uma para cada margem do rio); Q_{med} = média das cheias anuais; $Q_{1,58}$ = cheia anual com tempo de recorrência de 1,58 ano (vazão dominante ou de margens plenas); Q_{95} = vazão média diária com 95% de probabilidade de ser excedida (vazão de permanência); TR = tempo de recorrência ou período de retorno de um evento em anos.

Fonte: o autor.

6.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO: CENÁRIO IDEAL PARA REGULAMENTAÇÃO DO LEITO REGULAR DE CURSO D'ÁGUA

Para definição do cenário ideal para regulamentação do leito regular, a partir do qual se mede a área de preservação permanente nas margens de cursos d'água, é necessário considerar os resultados obtidos para cada cenário hidrológico simulado quanto ao quantitativo de áreas protegidas e à frequência que as faixas marginais de preservação estão sujeitas a perturbações por inundações, bem como o impacto regulatório para as áreas efetivamente protegidas em áreas rurais consolidadas, conforme as regras de transição definidas pela Lei nº 12.651/2012. Adicionalmente, faz-se necessário resguardar o domínio público das margens dos rios e garantir a manutenção de ecossistemas ripários resilientes.

Considerando as variáveis acima, os resultados obtidos no presente Capítulo indicam que o melhor cenário hidrológico para definição dos leitos regulares fluviais é a *média das cheias ordinárias* (Q_{med}), pois propicia um menor grau de perturbação hidrológica para as áreas protegidas ripárias e garante uniformidade com os critérios dominiais aplicados aos rios desde o período imperial brasileiro.

Na falta de regulamentação, adota-se o método científico preponderantemente empregado para definição de leitos fluviais: vazão dominante, também conhecida como vazão de margens plenas ou da cheia anual mais provável, padronizada em $Q_{1,58}$, que corresponde ao valor mais provável na distribuição de Gumbel. Contudo, devido ao fato de existirem rios cujas séries têm comportamentos verossímeis com outras distribuições, para análises realizadas em escala local recomenda-se evitar a generalização e aplicar a vazão efetiva de margens plenas para aquele caso concreto (Q_{mp}), quando os dados disponíveis permitirem esse tipo de análise. De qualquer forma, o critério científico apresenta resultados muito próximos com Q_{med} e retrata o estado atual da arte para fins de estudos hidrológicos.

Os resultados detalhados para cada estação e para a análise integrada podem ser acessados por meio da ferramenta *web* para visualização espacial disponível em: <<http://www.labhidro.ufsc.br/hidroapp/>>.

7 CONCLUSÃO

A legislação ambiental não apresenta todos os conceitos e critérios necessários para definição espacial precisa de áreas de preservação permanente com função de proteção de recursos hídricos. A solução para integrar a norma e garantir a efetividade daqueles espaços territoriais protegidos reside na análise interdisciplinar, correlacionando os conceitos e métodos definidos nas ciências jurídicas e naturais.

Durante a avaliação das lacunas para delimitação das áreas de preservação de permanente, objeto desta tese, foi observado que o caráter dinâmico (não estático) dos corpos hídricos é o principal fator a ser considerado no estabelecimento dos critérios para definição precisa dos espaços protegidos. As análises e resultados obtidos para olhos d'água, nascentes, cursos d'água e reservatórios naturais sujeitos a variações hidrológicas é a adoção da cheia anual mais provável para definição do início dos espaços protegidos ripários.

A identificação de áreas protegidas nas encostas e nos topos de elevações é extremamente sensível à resolução do material cartográfico adotado para as análises, de forma que é recomendado a adoção do material com maior discretização disponível, sendo observado que abaixo da resolução de 5 m não há ganho considerável na quantificação das áreas protegidas, podendo esse valor de resolução ser adotado como padrão para análises técnicas envolvendo áreas de preservação permanente em função do relevo.

Quanto às APPs no topo de morros, montes, montanhas e serras, merece atenção especial a definição da cota da base a partir da qual se mede a altura das elevações. A base será medida a partir do ponto de sela (relevo ondulado) somente quando não existirem espelhos d'água ou planícies adjacentes às vertentes da elevação. A regra é o estabelecimento da base a partir de uma concepção hidrológica partindo do cume e passando pelas vertentes em direção ao sopé da elevação.

Entre as demais lacunas analisadas no presente trabalho, a definição dos critérios hidrológicos para determinação do leito regular, provavelmente, tem o maior impacto para a quantificação de áreas protegidas no território brasileiro. Por isso, foi dada a essa lacuna tratamento especial por meio do desenvolvimento de um programa computacional específico para analisar as seções transversais dos principais rios brasileiros, o qual possibilitou realizar diversas análises de interesse hidrológico e avaliar os impactos ambientais de cada uma das hipóteses regulatórias estudadas para definição do leito regular de cursos d'água.

O cenário ideal para regulamentação do nível a partir do qual se mede a APP é aquele que minimize a quantidade de amostras sujeitas a perturbações frequentes (baixo tempo de recorrência), para maximizar a resiliência e a biodiversidade do espaço territorial protegido.

Os resultados obtidos indicam que o melhor cenário hidrológico para definição dos leitos regulares fluviais é a *média das cheias ordinárias* (Q_{med}), pois propicia um menor

grau de perturbação hidrológica para as áreas protegidas ripárias e garante uniformidade com os critérios dominiais aplicados aos rios desde o período imperial brasileiro.

Enquanto não existir regulamentação, adota-se o método científico preponderantemente empregado para definição de leitos fluviais: vazão dominante, também conhecida como vazão de margens plenas ou da cheia anual mais provável. Por meio da avaliação do tempo de recorrência esperado para a vazão dominante nos rios brasileiros, observou-se que a cheia mais provável corresponde a um período de retorno mediano de 1,57 ano, o que confirma a vazão da margens plenas mais adotada na literatura, $Q_{1,58}$ (cheia anual com tempo de recorrência de 1,58 ano), que corresponde ao valor mais provável na distribuição de Gumbel. Contudo, foi observado que existem rios cujas séries têm comportamentos verossímeis com outras distribuições, então, para análises realizadas em escala local, recomenda-se evitar a generalização e aplicar a vazão efetiva de margens plenas para aquele caso concreto (Q_{mp}), quando os dados disponíveis permitirem esse tipo de análise. De qualquer forma, o critério científico apresenta resultados muito próximos com Q_{med} e retrata o estado atual da arte para fins de estudos hidrológicos.

Os diferentes cenários hidrológicos analisados para definição das APPs nas margens de cursos d'água apresentam impactos consideráveis na quantificação daqueles espaços territoriais protegidos. Observa-se que, para os rios analisados, há uma perda aproximada de 37% da faixa total de proteção ambiental (leitos e APPs) entre o nível médio das enchentes anuais (Q_{med}) e o cenário de vazão de permanência na condição de estiagem (Q_{95}). E entre os cenários delimitados por Q_{med} e a vazão de margens plenas ($Q_{1,58}$), a diferença é pequena, próxima a 10%. Entre $Q_{1,58}$ e Q_{95} há uma perda aproximada de 30%.

Para rios que não apresentam monitoramento regular, ao analisar-se as propriedades geométricas das seções transversais de rios brasileiros, os testes realizados demonstraram a viabilidade de uma técnica de identificação do leito fluvial em condição de margens plenas, somente com dados de geometria, a qual pode ser útil em análises cotidianas, como método de auxílio à determinação de APPs nas margens de trechos de cursos d'água situados em planícies.

Outros resultados relevantes obtidos na presente tese para integração ou regulamentação das lacunas para delimitação de áreas de preservação permanente com função de proteção aos recursos hídricos naturais, objeto de análise no presente trabalho, encontram-se sintetizados no [Quadro A.1 \(Apêndice A\)](#). Independente da expedição de ato regulamentar, os parâmetros propostos, quando refletem os métodos científicos preponderantemente aceitos para determinado objeto de análise, podem ser incorporados imediatamente em termos de referência para estudos ou em outros procedimentos ambientais.

Por fim, espera-se que trabalhos futuros prossigam na investigação de soluções para delimitação de áreas protegidas, servindo o conhecimento científico produzido como instrumento para fundamentar decisões envolvendo políticas públicas ambientais.

REFERÊNCIAS

ABELL, Robin; HARRISON, Ian J. A boost for freshwater conservation. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 370, n. 6512, p. 38–39, 2020. ISSN 0036-8075. DOI: [10.1126/science.abe3887](https://doi.org/10.1126/science.abe3887).

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas 2013**. 2013. Disponível em: <<http://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/metadata.show?id=267&currTab=distribution>>. Acesso em: 7 abr. 2018.

_____. Resolução nº 1938, de 30 de outubro de 2017. Dispõe sobre procedimentos para solicitações e critérios de avaliação das outorgas preventivas e direito de uso de recursos hídricos. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, p. 120–122, 6 nov. 2017. ISSN 1677-7042. Disponível em: <<http://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-1-938-de-30-de-outubro-de-2017-19396098>>. Acesso em: 28 fev. 2020.

_____. **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos - Portal HidroWeb**. 2020. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb>>. Acesso em: 28 set. 2020.

ALLEN, George H.; PAVELSKY, Tamlin M. Global extent of rivers and streams. **Science**, American Association for the Advancement of Science (AAAS), v. 361, n. 6402, p. 585–588, jun. 2018. ISSN 1095-9203. DOI: [10.1126/science.aat0636](https://doi.org/10.1126/science.aat0636).

_____. **Global River Widths from Landsat (GRWL) Database**. Zenodo, 2018. DOI: [10.5281/ZENODO.1297434](https://doi.org/10.5281/ZENODO.1297434).

ANDREADIS, Konstantinos M.; SCHUMANN, Guy J.-P.; PAVELSKY, Tamlin. A simple global river bankfull width and depth database. **Water Resources Research**, American Geophysical Union (AGU), v. 49, n. 10, p. 7164–7168, out. 2013. ISSN 0043-1397. DOI: [10.1002/wrcr.20440](https://doi.org/10.1002/wrcr.20440).

ANTUNES, Paulo Bessa de. **Comentários ao novo código florestal**: atualizado de acordo com a Lei nº 12.727/12. São Paulo: Atlas, 2013. ISBN 978-85-224-7582-7.

ARAGÃO, Alexandra. Desenvolvimento sustentável em tempo de crise e em maré de simplificação. Fundamento e limites da proibição de retrocesso ambiental. In: CORREIA, Fernando Alves; MACHADO, Jónatas E. M.; LOUREIRO, João Carlos (Org.). **Estudos em homenagem ao Prof. Doutor José Joaquim Gomes Canotilho**. Coimbra: Faculdade de Direito da Universidade de Coimbra, 2012. v. IV. P. 43–90. ISBN 978-97-23-22051-3. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10316/25568>>. Acesso em: 29 jul. 2020.

AZEVEDO-SANTOS, Valter M. et al. Removing the abyss between conservation science and policy decisions in Brazil. **Biodiversity and Conservation**, Springer Science e Business Media LLC, v. 26, n. 7, p. 1745–1752, fev. 2017. ISSN 1572-9710. DOI: [10.1007/s10531-017-1316-x](https://doi.org/10.1007/s10531-017-1316-x).

BENJAMIN, Antonio Herman. Hermenêutica do novo Código Florestal. In: **Doutrina: edição comemorativa, 25 anos**. Brasília: Superior Tribunal de Justiça, 2014. P. 161–174. ISBN 978-85-7248-159-5. Disponível em: <<https://ww2.stj.jus.br/publicacaoinstitutional/index.php/Dout25anos/issue/view/30/showToc>>. Acesso em: 27 jul. 2020.

_____. O princípio da proibição de retrocesso ambiental. In: COLÓQUIO INTERNACIONAL SOBRE O PRINCÍPIO DA PROIBIÇÃO DE RETROCESSO AMBIENTAL, 2012. **O princípio da proibição de retrocesso ambiental**. Brasília, DF: Brasil. Congresso Nacional. Senado Federal. Comissão de Meio Ambiente, Defesa do Consumidor e Fiscalização e Controle (CMA), 2012. P. 55–72. Disponível em: <<https://www2.senado.leg.br/bdsf/bitstream/handle/id/242559/000940398.pdf>>. Acesso em: 28 jul. 2020.

BIGGS, Jeremy et al. 15 years of pond assessment in Britain: results and lessons learned from the work of Pond Conservation. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, Wiley, v. 15, n. 6, p. 693–714, 2005. ISSN 1099-0755. DOI: [10.1002/aqc.745](https://doi.org/10.1002/aqc.745).

BJERKLIE, David M. et al. Fundamental Hydraulics of Cross-sections in Natural Rivers: Preliminary Analysis of a Large Data Set of Acoustic Doppler Flow Measurements. **Water Resources Research**, American Geophysical Union (AGU), mar. 2020. ISSN 1944-7973. DOI: [10.1029/2019wr025986](https://doi.org/10.1029/2019wr025986).

BOGGIONE, Giovanni Araujo de. **Avaliação da resolução espacial de sensores ópticos orbitais**. 2014. 159 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3FTJFGE>>. Acesso em: 17 dez. 2020.

BOGGIONE, Giovanni de Araujo et al. Definição da escala em imagens de sensoriamento remoto: uma abordagem alternativa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 14., abr. 2009, Natal, Brasil. **Anais ...** São José dos Campos: INPE, 2009. P. 1739–1746. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.18.03.28/doc/1739-1746.pdf>>. Acesso em: 25 jan. 2017.

BOUWMAN, A. F. et al. Nutrient dynamics, transfer and retention along the aquatic continuum from land to ocean: towards integration of ecological and biogeochemical models. **Biogeosciences**, Copernicus GmbH, v. 10, n. 1, p. 1–22, jan. 2013. DOI: [10.5194/bg-10-1-2013](https://doi.org/10.5194/bg-10-1-2013).

BRANCALION, Pedro H.S. et al. A critical analysis of the Native Vegetation Protection Law of Brazil (2012): updates and ongoing initiatives. **Natureza & Conservação**, Elsevier BV, v. 14, p. 1–15, abr. 2016. ISSN 1679-0073. DOI: [10.1016/j.ncon.2016.03.003](https://doi.org/10.1016/j.ncon.2016.03.003).

BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil (1988). **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 5 out. 1988. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm>. Acesso em: 25 abr. 2020.

_____. Constituição dos Estados Unidos do Brasil. **Diário Oficial [da] República dos Estados Unidos do Brasil**, Brasília, DF, 19 set. 1946. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao46.htm>. Acesso em: 24 mar. 2021.

_____. Decreto nº 23.793, de 23 de janeiro de 1934. Approva o Código Florestal que com este baixa. **Diário Oficial [da] República dos Estados Unidos do Brasil**, Rio de Janeiro, RJ, 21 mar. 1934. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1930-1949/D23793impresao.htm>. Acesso em: 25 abr. 2020.

_____. Decreto nº 24.643, de 10 de julho de 1934. Decreta o Código de Águas. **Diário Oficial [da] República dos Estados Unidos do Brasil**, Rio de Janeiro, RJ, 27 jul. 1934. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/D24643compilado.htm>. Acesso em: 3 dez. 2016.

_____. Decreto nº 4.105, de 22 de fevereiro de 1868. Regula a concessão dos terrenos de marinha, dos reservados nas margens dos rios e dos accrescidos natural ou artificialmente. **Coletânea das Leis do Império do Brasil**, Typographia Nacional, Rio de Janeiro, I, pt. II, p. 92–100, 1868. Disponível em: <https://bd.camara.leg.br/bd/bitstream/handle/bdcamara/18541/collecao_leis_1868_parte2.pdf>. Acesso em: 2 set. 2020.

_____. Decreto nº 4.421, de 28 de dezembro de 1921. Crêa o Serviço Florestal do Brasil. **Diário Oficial [da] União**, Rio de Janeiro, RJ, 12 jan. 1922. ISSN 1677-7042. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1920-1929/decreto-4421-28-dezembro-1921-567912-publicacaooriginal-91264-pl.html>>. Acesso em: 24 mar. 2021.

_____. Decreto nº 4.449, de 31 de outubro de 2002. Regulamenta a Lei nº 10.267, de 28 de agosto de 2001, que altera dispositivos das Leis nºs 4.947, de 6 de abril de 1966; 5.868, de 12 de dezembro de 1972; 6.015, de 31 de dezembro de 1973; 6.739, de 5 de dezembro de 1979; e 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 31 out. 2002. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/CCivil_03/decreto/2002/D4449.htm>. Acesso em: 21 nov. 2020.

_____. Decreto nº 5.300 de 7 de dezembro de 2004. Regulamenta a Lei nº 7.661, de 16 de maio de 1988, que institui o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro - PNGC, dispõe sobre regras de uso e ocupação da zona costeira e estabelece critérios de gestão da orla marítima, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 8 dez. 2004. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/CCivil_03/decreto/2004/D5300.htm>.

[//www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/D5300.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/D5300.htm)>. Acesso em: 25 fev. 2017.

BRASIL. Decreto nº 7.830, de 17 de outubro de 2012. Dispõe sobre o Sistema de Cadastro Ambiental Rural, o Cadastro Ambiental Rural, estabelece normas de caráter geral aos Programas de Regularização Ambiental, de que trata a Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 18 out. 2012. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/CCIVIL_03/_Ato2011-2014/2012/Decreto/D7830.htm>. Acesso em: 25 fev. 2017.

_____. Decreto nº 88.351, de 1º de junho de 1983. Regulamenta a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, e a Lei nº 6.902, de 27 de abril de 1981, que dispõem, respectivamente, sobre a Política Nacional do Meio Ambiente e sobre a criação de Estações Ecológicas e Áreas de Proteção Ambiental, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 3 jun. 1983. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D88351impressao.htm>. Acesso em: 6 jul. 2020.

_____. Decreto nº 89.336, de 31 de janeiro de 1984. Dispõe sobre as Reservas Econômicas e Áreas de Relevante Interesse Ecológico, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 1 fev. 1984. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D89336.htm>. Acesso em: 7 dez. 2020.

_____. Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 22 jul. 1984. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1990-1994/D750impressao.htm>. Acesso em: 6 nov. 2017.

_____. Decreto-Lei nº 1.631, de 27 de Setembro de 1939. Dispõe sobre a aplicação de multas previstas no Código de Pesca e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República dos Estados Unidos do Brasil**, Rio de Janeiro, RJ, p. 23245, 29 set. 1939. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/1937-1946/del1631.htm>. Acesso em: 1 set. 2020.

_____. Decreto-Lei nº 2.281, de 5 de junho de 1940. Dispõe sobre a tributação das empresas de energia elétrica, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República dos Estados Unidos do Brasil**, Rio de Janeiro, RJ, 7 jun. 1940. ISSN 1677-7042. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/declei/1940-1949/decreto-lei-2281-5-junho-1940-412337-norma-pe.html>>. Acesso em: 24 mar. 2021.

_____. Decreto-Lei nº 3.689, de 3 de outubro de 1941. Código de Processo Penal. **Diário Oficial [da] República dos Estados Unidos do Brasil**, Rio de Janeiro, RJ, 13 out. 1941. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/del3689compilado.htm>. Acesso em: 25 nov. 2020.

_____. Decreto-Lei nº 4.657, de 4 de setembro de 1942. Lei de Introdução às normas do Direito Brasileiro. **Diário Oficial [da] República dos Estados Unidos do Brasil**, Rio de Janeiro, RJ, 9 set. 1942. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/Del4657compilado.htm>. Acesso em: 22 nov. 2017.

_____. Decreto-Lei nº 9.760, de 5 de setembro de 1946. Dispõe sobre os bens imóveis da União e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República dos Estados Unidos do Brasil**, Rio de Janeiro, RJ, 6 set. 1946. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/Del9760compilado.htm>. Acesso em: 26 fev. 2017.

_____. Lei Complementar nº 95, de 26 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre a elaboração, a redação, a alteração e a consolidação das leis, conforme determina o parágrafo único do art. 59 da Constituição Federal, e estabelece normas para a consolidação dos atos normativos que menciona. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 27 fev. 1998. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/LCP/Lcp95.htm>. Acesso em: 7 set. 2020.

_____. Lei de 15 de novembro de 1831. Orça a receita e fixa a despesa para o ano financeiro de 1832 - 1833. **Coletânea das Leis do Império do Brasil**, Rio de Janeiro, 1831. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei_sn/1824-1899/lei-37687-15-novembro-1831-564851-publicacaooriginal-88758-pl.html>. Acesso em: 31 ago. 2020.

_____. Lei nº 1.507, de 26 de setembro de 1867. Fixa a despesa e orça a receita geral do Império para os exercícios de 1867 - 68 e 1868 - 69, e dá outras providências. **Coletânea das Leis do Império do Brasil**, Typographia Nacional, Rio de Janeiro, 1867. Disponível em: <http://bd.camara.gov.br/bd/bitstream/handle/bdcamara/18540/collecao_leis_1867_parte1.pdf>. Acesso em: 24 fev. 2017.

_____. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 28 mai. 2012. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm>. Acesso em: 25 abr. 2020.

_____. Lei nº 12.727, de 17 de outubro de 2012. Altera a Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; e revoga as Leis nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001, o item 22 do inciso II do art. 167 da Lei nº 6.015, de 31 de dezembro de 1973, e o § 2º do art. 4º da Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 18 out. 2012. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12727.htm>. Acesso em: 24 fev. 2017.

BRASIL. Lei nº 13.105, de 16 de março de 2015. Código de Processo Civil. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 17 mar. 2015. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2015/lei/l13105.htm>. Acesso em: 12 jan. 2020.

_____. Lei nº 13.874, de 20 de setembro de 2019. Institui a Declaração de Direitos de Liberdade Econômica; estabelece garantias de livre mercado; altera as Leis nº 10.406, de 10 de janeiro de 2002 (Código Civil), 6.404, de 15 de dezembro de 1976, 11.598, de 3 de dezembro de 2007, 12.682, de 9 de julho de 2012, 6.015, de 31 de dezembro de 1973, 10.522, de 19 de julho de 2002, 8.934, de 18 de novembro 1994, o Decreto-Lei nº 9.760, de 5 de setembro de 1946 e a Consolidação das Leis do Trabalho, aprovada pelo Decreto-Lei nº 5.452, de 1º de maio de 1943; revoga a Lei Delegada nº 4, de 26 de setembro de 1962, a Lei nº 11.887, de 24 de dezembro de 2008, e dispositivos do Decreto-Lei nº 73, de 21 de novembro de 1966; e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 20 set. 2019. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2019/lei/L13874.htm>. Acesso em: 12 jan. 2020.

_____. Lei nº 4.504, de 30 de novembro de 1964. Dispõe sobre o Estatuto da Terra, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República dos Estados Unidos do Brasil**, Brasília, DF, 30 nov. 1964. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l4504.htm>. Acesso em: 25 abr. 2020.

_____. Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965. Institui o novo Código Florestal. **Diário Oficial [da] República dos Estados Unidos do Brasil**, Brasília, DF, 16 set. 1965. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L4771impresao.htm>. Acesso em: 25 abr. 2020.

_____. Lei nº 6.746, de 10 de dezembro de 1979. Altera o disposto nos arts. 49 e 50 da Lei n. 4504, de 30 de novembro de 1964 (Estatuto da Terra), e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 11 dez. 1979. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/1970-1979/L6746.htm>. Acesso em: 12 out. 2017.

_____. Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979. Dispõe sobre o Parcelamento do Solo Urbano e dá outras Providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 20 dez. 1979. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6766.htm>. Acesso em: 12 out. 2017.

_____. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2 set. 1981. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L6938compilada.htm>. Acesso em: 24 fev. 2017.

_____. Lei nº 7.511, de 7 de julho de 1986. Altera dispositivos da Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, que institui o novo Código Florestal. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 8 jul. 1986. ISSN 1677-7042. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L7511imprensa.htm>. Acesso em: 25 abr. 2020.

_____. Lei nº 7.754, de 14 de abril de 1989. Estabelece medidas para proteção das florestas existentes nas nascentes dos rios e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 18 abr. 1989. ISSN 1677-7042. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L7511imprensa.htm>. Acesso em: 24 fev. 2017.

_____. Lei nº 7.803, de 18 de julho de 1989. Altera a redação da Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, e revoga as Leis nº 6.535, de 15 de junho de 1978, e 7.511, de 7 de julho de 1986. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, p. 139–160, 20 jul. 1989. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L7803.htm>. Acesso em: 25 abr. 2020.

_____. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 9 jan. 1997. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm>. Acesso em: 20 set. 2017.

_____. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 19 jul. 2000. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9985.htm>. Acesso em: 20 set. 2017.

_____. Medida Provisória nº 1.956-50, de 26 de maio de 2000. Altera os arts. 1º, 4º, 14, 16 e 44, e acresce dispositivos à Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, que institui o Código Florestal, bem como altera o art. 10 da Lei nº 9.393, de 19 de dezembro de 1996, que dispõe sobre o Imposto sobre a Propriedade Territorial Rural - ITR, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 28 mai. 2000. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/mpv/Antigas/1956-50.htm>. Acesso em: 7 dez. 2020.

_____. Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001. Altera os arts. 1º, 4º, 14, 16 e 44, e acresce dispositivos à Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, que institui o Código Florestal, bem como altera o art. 10 da Lei nº 9.393, de 19 de dezembro de 1996, que dispõe sobre o Imposto sobre a Propriedade Territorial Rural - ITR, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 25 ago. 2001. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/MPV/2166-67.htm>. Acesso em: 7 dez. 2020.

BRASIL. Medida Provisória nº 571, de 25 de maio de 2012. Altera a Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; e revoga as Leis nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 28 mai. 2012. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/mpv/571.htm>. Acesso em: 24 fev. 2017.

_____. Ministério da Economia. Secretaria Especial da Receita Federal do Brasil; INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA (INCRA). Instrução Normativa Conjunta nº 1.968, de 22 de julho de 2020. Dispõe sobre a obrigatoriedade de vinculação de imóveis inscritos no Sistema Nacional de Cadastro Rural (SNCR) e no Cadastro de Imóveis Rurais (Cafir) para fins de estruturação do Cadastro Nacional de Imóveis Rurais (CNIR). **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, p. 45–46, 23 jul. 2020. ISSN 1677-7042. Disponível em: <<https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=23/07/2020&jornal=515&pagina=45>>. Acesso em: 21 nov. 2020.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 302, de 20 de março de 2002. Dispõe sobre os parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente de reservatórios artificiais e o regime de uso do entorno. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, p. 67–68, 13 mai. 2002. ISSN 1677-7042. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=298>>. Acesso em: 17 out. 2017.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 303, de 20 de março de 2002. Dispõe sobre parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, p. 68, 13 mai. 2002. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legislacao/CONAMA_RES_CONS_2002_303.pdf>. Acesso em: 24 fev. 2017.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 396, de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, p. 64–68, 7 abr. 2008. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legislacao/CONAMA_RES_CONS_2008_396.pdf>. Acesso em: 24 fev. 2017.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 4, de 18 de setembro de 1985. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, p. 1095–1096, 20 jan. 1986. ISSN 1677-7042. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=21>>. Acesso em: 5 out. 2017.

_____. Supremo Tribunal Federal. Partido Progressista – PP e outros. Ação Direta de Constitucionalidade nº 42/DF. Relator: Min. Luiz Fux. **Diário da Justiça Eletrônico**, Brasília, DF, n. 42, p. 95–96, 6 mar. 2018. Disponível em: <<http://portal.stf.jus.br/processos/downloadPeca.asp?id=15340792543>>. Acesso em: 5 dez. 2020.

_____. Supremo Tribunal Federal. Partido Socialismo e Liberdade – PSOL e outros. Ação Direta de Inconstitucionalidade nº 4.937/DF. Relator: Min. Luiz Fux. **Diário da Justiça Eletrônico**, Brasília, DF, n. 42, p. 98–99, 6 mar. 2018. Disponível em: <<http://portal.stf.jus.br/processos/downloadPeca.asp?id=15340791719>>. Acesso em: 5 dez. 2020.

_____. Supremo Tribunal Federal. Procurador Geral da República e outros. Ação Direta de Inconstitucionalidade nº 3.540/DF. Relator: Min. Celso de Mello. **Diário da Justiça**, Brasília, DF, n. 176, 13 set. 2005. Disponível em: <<http://redir.stf.jus.br/paginadorpub/paginador.jsp?docTP=AC&docID=387260>>. Acesso em: 28 jun. 2020.

_____. Supremo Tribunal Federal. Procurador Geral da República e outros. Ação Direta de Inconstitucionalidade nº 4.901/DF. Relator: Min. Luiz Fux. **Diário da Justiça Eletrônico**, Brasília, DF, n. 42, p. 96–97, 6 mar. 2018. Disponível em: <<http://portal.stf.jus.br/processos/downloadPeca.asp?id=15340792363>>. Acesso em: 5 dez. 2020.

_____. Supremo Tribunal Federal. Procurador Geral da República e outros. Ação Direta de Inconstitucionalidade nº 4.902/DF. Relator: Min. Luiz Fux. **Diário da Justiça Eletrônico**, Brasília, DF, n. 42, p. 97–98, 6 mar. 2018. Disponível em: <<http://portal.stf.jus.br/processos/downloadPeca.asp?id=15340792405>>. Acesso em: 5 dez. 2020.

_____. Supremo Tribunal Federal. Procurador Geral da República e outros. Ação Direta de Inconstitucionalidade nº 4.903/DF. Relator: Min. Luiz Fux. **Diário da Justiça Eletrônico**, Brasília, DF, n. 42, p. 98, 6 mar. 2018. Disponível em: <<http://portal.stf.jus.br/processos/downloadPeca.asp?id=15340792260>>. Acesso em: 28 jun. 2020.

BRASIL. EXÉRCITO BRASILEIRO. **Levantamento aerofotogramétrico de 1964 a 1966 - Projeto AF-63-32**. 1966. Escala 1:60.000. Fotografia aérea nº 66358.

BRUNS, Brian et al. **MDB tools version 0.7.1**. 2013. Disponível em: <<https://github.com/brianb/mdbtools>>. Acesso em: 5 abr. 2018.

CALL, B. C. et al. Changes in floodplain inundation under nonstationary hydrology for an adjustable, alluvial river channel. **Water Resources Research**, American Geophysical Union (AGU), v. 53, n. 5, p. 3811–3834, mai. 2017. ISSN 0043-1397. DOI: [10.1002/2016wr020277](https://doi.org/10.1002/2016wr020277).

CARMO, Laila Gonçalves do; FELIPPE, Miguel Fernandes; MAGALHÃES JUNIOR, Antônio Pereira. Áreas de preservação permanente no entorno de nascentes: conflitos, lacunas e alternativas da legislação ambiental brasileira. **Boletim Goiano de Geografia**, Universidade Federal de Goiás, v. 34, n. 2, set. 2014. DOI: [10.5216/bgg.v34i2.31733](https://doi.org/10.5216/bgg.v34i2.31733).

CAROL, Eleonora S. et al. Determination of heterogeneities in the hydraulic properties of a phreatic aquifer from tidal level fluctuations: a case in Argentina. **Hydrogeology Journal**, Springer Nature, v. 17, n. 7, p. 1727–1732, mai. 2009. DOI: [10.1007/s10040-009-0478-3](https://doi.org/10.1007/s10040-009-0478-3).

CASTRO, Janine M.; JACKSON, Philip L. BANKFULL DISCHARGE RECURRENCE INTERVALS AND REGIONAL HYDRAULIC GEOMETRY RELATIONSHIPS: PATTERNS IN THE PACIFIC NORTHWEST, USA. **Journal of the American Water Resources Association**, Wiley, v. 37, n. 5, p. 1249–1262, out. 2001. ISSN 1752-1688. DOI: [10.1111/j.1752-1688.2001.tb03636.x](https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb03636.x).

CHRISTOFOLETTI, Antônio. Geometria hidráulica. **Notícia geomorfológica**, Campinas, v. 16, n. 32, p. 3–36, dez. 1976.

CONNELL, J. H. Diversity in tropical rain forests and coral reefs. **Science**, American Association for the Advancement of Science (AAAS), v. 199, n. 4335, p. 1302–1310, mar. 1978. DOI: [10.1126/science.199.4335.1302](https://doi.org/10.1126/science.199.4335.1302).

CREED, Irena F. et al. Enhancing protection for vulnerable waters. **Nature Geoscience**, Springer Science e Business Media LLC, v. 10, n. 11, p. 809–815, out. 2017. ISSN 1752-0908. DOI: [10.1038/ngeo3041](https://doi.org/10.1038/ngeo3041).

DALA-CORTE, Renato B. et al. Thresholds of freshwater biodiversity in response to riparian vegetation loss in the Neotropical region. Edição: Rafael Editor Zenni. **Journal of Applied Ecology**, Wiley, v. 57, n. 7, p. 1391–1402, mai. 2020. ISSN 1365-2664. DOI: [10.1111/1365-2664.13657](https://doi.org/10.1111/1365-2664.13657).

DE ROSE, Ronald C.; STEWARDSON, Michael J.; HARMAN, Ciaran. Downstream hydraulic geometry of rivers in Victoria, Australia. **Geomorphology**, Elsevier BV, v. 99, n. 1-4, p. 302–316, jul. 2008. ISSN 0169-555X. DOI: [10.1016/j.geomorph.2007.11.008](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.11.008).

DOMENEGHETTI, Alessio. On the use of SRTM and altimetry data for flood modeling in data-sparse regions. **Water Resources Research**, American Geophysical Union (AGU), v. 52, n. 4, p. 2901–2918, abr. 2016. ISSN 0043-1397. DOI: [10.1002/2015wr017967](https://doi.org/10.1002/2015wr017967).

DUNNE, Thomas; LEOPOLD, Luna B. **Water in environmental planning**. New York: Freeman, 1978. ISBN 9780716700791.

DURY, G. H. Discharge prediction, present and former, from channel dimensions. **Journal of Hydrology**, Elsevier BV, v. 30, n. 3, p. 219–245, jul. 1976. ISSN 0022-1694. DOI: [10.1016/0022-1694\(76\)90102-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(76)90102-5).

_____. Magnitude-frequency analysis and channel morphology. **Fluvial geomorphology**, Allen & Unwin, p. 91–121, 1973.

DURY, G. H.; HAILS, J. R.; ROBBIE, H. B. Bankfull discharge and the magnitude frequency series. **Australian Journal of Science**, v. 26, p. 123–124, 1963.

EHLSCHLAEGER, C. R. Using the A^T Search Algorithm to Develop Hydrologic Models from Digital Elevation Data. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM (IGIS) SYMPOSIUM, 1989, p. 275–281.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Súmula da 10. Reunião técnica de levantamento de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa, 1979. 83 p. EMBRAPA-SNLCS. Micelânea, 1. Disponível em: <http://library.wur.nl/isric/fulltext/isricu_i00006739_001.pdf>. Acesso em: 1 out. 2017.

FASSONI-ANDRADE, Alice César; PAIVA, Rodrigo Cauduro Dias; FLEISCHMANN, Ayan Santos. Lake Topography and Active Storage From Satellite Observations of Flood Frequency. **Water Resources Research**, American Geophysical Union (AGU), v. 56, n. 7, jun. 2020. ISSN 1944-7973. DOI: [10.1029/2019wr026362](https://doi.org/10.1029/2019wr026362).

FEDERAL INTERAGENCY STREAM RESTORATION WORKING GROUP (FISRWG). **Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, Practices**. Washington, DC: Natl Technical Info Svc, 1988. GPO Item No. 0120-A; SuDocs No. A 57.6/2:EN 3/PT.653. ISBN 0-934213-59-3. Disponível em: <<http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/null/?cid=stelprdb1043244>>. Acesso em: 12 abr. 2019.

FELIPPE, Miguel Fernandes. **Gênese e dinâmica de nascentes**: Contribuições a partir da investigação hidrogeomorfológica em região tropical. 2013. 254 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1843/IGCC-9GQJDJ>>. Acesso em: 18 jan. 2018.

FELIPPE, Miguel Fernandes; MAGALHÃES JUNIOR, Antônio Pereira. Conflitos conceituais sobre nascentes de cursos d'água e propostas de especialistas. **Geografias**, v. 9, n. 1, 2013. ISSN 2237-549X. Disponível em: <<https://periodicos.ufmg.br/index.php/geografias/article/view/13354>>. Acesso em: 26 jun. 2020.

_____. Desenvolvimento de uma tipologia hidrogeomorfológica de nascentes baseada em estatística nebulosa multivariada. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 15, n. 3, set. 2014. DOI: [10.20502/rbg.v15i3.463](https://doi.org/10.20502/rbg.v15i3.463).

FERNANDEZ, Oscar Vicente Quinonez. DETERMINAÇÃO DA DESCARGA DOMINANTE EM ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DAS REGIÕES OESTE E SUDOESTE DO PARANÁ. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 11, n. 1, set. 2010. DOI: [10.20502/rbg.v11i1.143](https://doi.org/10.20502/rbg.v11i1.143).

FINN, Debra S. et al. Small but mighty: headwaters are vital to stream network biodiversity at two levels of organization. **Journal of the North American Benthological Society**, University of Chicago Press, v. 30, n. 4, p. 963–980, dez. 2011. ISSN 1937-237X. DOI: [10.1899/11-012.1](https://doi.org/10.1899/11-012.1).

FIORILLO, Celso Antônio Pacheco. **Curso de direito ambiental brasileiro**. 9. ed. São Paulo: Saraiva, 2008. 580 p. ISBN 978-85-02-06703-5.

FLEISCHMANN, Ayan; PAIVA, Rodrigo; COLLISCHONN, Walter. Can regional to continental river hydrodynamic models be locally relevant? A cross-scale comparison. **Journal of Hydrology X**, Elsevier BV, v. 3, p. 100027, abr. 2019. ISSN 2589-9155. DOI: [10.1016/j.hydroa.2019.100027](https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2019.100027).

FLORES, Bernardo M. et al. Floodplains as an achilles' heel of amazonian forest resilience. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, National Academy of Sciences, v. 114, n. 17, p. 4442–4446, abr. 2017. DOI: [10.1073/pnas.1617988114](https://doi.org/10.1073/pnas.1617988114).

GLEASON, Colin J. Hydraulic geometry of natural rivers. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, SAGE Publications, v. 39, n. 3, p. 337–360, fev. 2015. ISSN 1477-0296. DOI: [10.1177/0309133314567584](https://doi.org/10.1177/0309133314567584).

GRAF, William L. Geomorphology and Policy for Restoration of Impounded American Rivers: What is "Natural"? In: RHOADS, B.L.; THORN, C.E. (Ed.). **The Scientific Nature of Geomorphology**: Proceedings of the 27th Binghamton Symposium in Geomorphology, Held 27-29 September, 1996. Wiley, 1996. (Binghamton Symposia in Geomorphology: International series). P. 443–473. ISBN 978-04-71-96811-5.

GRASEL, Daniel; FEARNSSIDE, Philip Martin; ROVAI, André Scarlate et al. Brazil's Native Vegetation Protection Law Jeopardizes Wetland Conservation: A Comment on Maltchik et al. **Environmental Conservation**, Cambridge University Press (CUP), v. 46, n. 02, p. 121–123, jan. 2019. ISSN 1469-4387. DOI: [10.1017/s0376892918000474](https://doi.org/10.1017/s0376892918000474).

GRASEL, Daniel; FEARNSSIDE, Philip Martin; VITULE, Jean Ricardo Simões et al. Brazilian wetlands on the brink. **Biodiversity and Conservation**, Springer Science e Business Media LLC, v. 28, n. 1, p. 255–257, nov. 2018. ISSN 1572-9710. DOI: [10.1007/s10531-018-1666-z](https://doi.org/10.1007/s10531-018-1666-z).

GRASEL, Daniel; MORMUL, Roger Paulo et al. Brazil's Native Vegetation Protection Law threatens to collapse pond functions. **Perspectives in Ecology and Conservation**, Elsevier BV, v. 16, n. 4, p. 234–237, out. 2018. ISSN 2530-0644. DOI: [10.1016/j.pecon.2018.08.003](https://doi.org/10.1016/j.pecon.2018.08.003).

GRASS DEVELOPMENT TEAM. **Geographic Resources Analysis Support System (GRASS GIS) Software, Version 7.8**. 2020. Disponível em: <<http://grass.osgeo.org>>. Acesso em: 20 ago. 2020.

GRIMALDI, S. et al. Effective Representation of River Geometry in Hydraulic Flood Forecast Models. **Water Resources Research**, American Geophysical Union (AGU), v. 54, n. 2, p. 1031–1057, fev. 2018. ISSN 0043-1397. DOI: [10.1002/2017wr021765](https://doi.org/10.1002/2017wr021765).

GRISON, Fernando; KOBIYAMA, Masato. Geometria hidráulica em bacias hidrográficas paranaenses. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRHidro, v. 16, n. 2, p. 111–131, 2011. DOI: [10.21168/rbrh.v16n2.p111-131](https://doi.org/10.21168/rbrh.v16n2.p111-131).

_____. Teoria e aplicação da geometria hidráulica: revisão. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 12, n. 2, dez. 2011. DOI: [10.20502/rbg.v12i2.232](https://doi.org/10.20502/rbg.v12i2.232).

GUERRA, Antonio Teixeira. **Dicionário geológico-geomorfológico**. 8. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1993. 446 p. ISBN 85-240-0458-4. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv23450.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2020.

HAMERLÍK, Ladislav et al. Local, among-site, and regional diversity patterns of benthic macroinvertebrates in high altitude waterbodies: do ponds differ from lakes? **Hydrobiologia**, Springer Science e Business Media LLC, v. 723, n. 1, p. 41–52, ago. 2013. ISSN 1573-5117. DOI: [10.1007/s10750-013-1621-7](https://doi.org/10.1007/s10750-013-1621-7).

HICKIN, Edward J. Channel morphology, bankfull stage and bankfull discharge of streams near Sydney. **Australian Journal of Science**, v. 30, p. 274–275, 1968.

HOTT, Marcos Cicarini; GUIMARÃES, Marcelo; MIRANDA, Evaristo Eduardo de. Um método para a determinação automática de áreas de preservação permanente em topos de morros para o Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 12., 2005, Goiânia, Brasil. **Anais ...** São José dos Campos: INPE, 2005. P. 3061–3068. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/106823/1/1786.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2017.

HUET, M. Biologie, profils en long et en travers des eaux courantes. **Bulletin Français de Pisciculture**, EDP Sciences, n. 175, p. 41–53, 1954. DOI: [10.1051/kmae:1954001](https://doi.org/10.1051/kmae:1954001).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Base Cartográfica Contínua do Brasil, 1:250.000 – BC250**: versão 2017. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Escala 1:250.000. Disponível em: ftp://geoftp.ibge.gov.br/cartas_e_mapas/bases_cartograficas_continuas/bc250/versao2017. Acesso em: 6 abr. 2018.

_____. **Carta topográfica SH-22-X-B-V-I (Lagoa de Garopaba do Sul)**. Rio de Janeiro: IBGE, 1976. Escala 1:50.000. Disponível em: ftp://geoftp.ibge.gov.br/cartas_e_mapas/folhas_topograficas/vetoriais/escala_50mil/projeto_conv_digital/lagoa_de_garopaba_do_sul29411/. Acesso em: 7 abr. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Vocabulário básico de recursos naturais e meio ambiente**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2004. 332 p. ISBN 85-240-3769-5. Disponível em: <<http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv4730.pdf>>. Acesso em: 28 jun. 2020.

INSTITUTO DE PLANEJAMENTO URBANO DE FLORIANÓPOLIS (IPUF). **Levantamento aerofotogramétrico de 2002**: ortofotografias aéreas. 2002. Digital. Escala 1:5.000.

_____. **Mosaico de fotografias áreas de 1994**. 1994. Digital. Escala 1:35.000.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Imagem orbital do satélite Landsat 5 de 10 jun. 1986, órbita 220, ponto 79**. 1986. Digital. Composição com as bandas 3 (B), 2 (G) e 1 (R). Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/catalogo/>>. Acesso em: 11 mai. 2015.

_____. **Imagem orbital do satélite Landsat 5 de 14 mai. 1989, órbita 220, ponto 79**. 1989. Digital. Composição com as bandas 3 (B), 2 (G) e 1 (R). Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/catalogo/>>. Acesso em: 11 mai. 2015.

_____. **Imagem orbital do satélite sino-brasileiro de recursos terrestres (C B E R S - 2) de 10 abr. 2005, órbita 155, ponto 131**. 2005. Digital. Composição com as bandas 1, 2 e 3. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso em: 28 jan. 2018.

_____. **Imagem orbital do satélite sino-brasileiro de recursos terrestres (C B E R S - 4) de 18 out. 2017, órbita 155, ponto 131**. 2017. Digital. Composição com as bandas 2 (B), 3 (G) e 4 (R). Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/catalogo/>>. Acesso em: 16 abr. 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 772:2011**: Hydrometry – Vocabulary and symbols. Geneva, CH, 2011.

JACKSON, C. R. et al. Reconstruction of multi-decadal groundwater level time-series using a lumped conceptual model. **Hydrological Processes**, Wiley, v. 30, n. 18, p. 3107–3125, abr. 2016. DOI: [10.1002/hyp.10850](https://doi.org/10.1002/hyp.10850).

JASIEWICZ, Jarosław; STEPINSKI, Tomasz F. Geomorphons — a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. **Geomorphology**, Elsevier BV, v. 182, p. 147–156, jan. 2013. ISSN 0169-555X. DOI: [10.1016/j.geomorph.2012.11.005](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.11.005).

JENG, D.-S. et al. Spring-neap tide-induced beach water table fluctuations in a sloping coastal aquifer. **Water Resources Research**, American Geophysical Union (AGU), v. 41, n. 7, jul. 2005. ISSN 0043-1397. DOI: [10.1029/2005wr003945](https://doi.org/10.1029/2005wr003945).

JENKINSON, A. F. The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Wiley, v. 81, n. 348, p. 158–171, abr. 1955. DOI: [10.1002/qj.49708134804](https://doi.org/10.1002/qj.49708134804).

JUNK, W. J. et al. Brazilian wetlands: their definition, delineation, and classification for research, sustainable management, and protection. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, Wiley, v. 24, n. 1, p. 5–22, ago. 2013. ISSN 1052-7613. DOI: [10.1002/aqc.2386](https://doi.org/10.1002/aqc.2386).

KARAM-GEMAEL, Manoela et al. Poor alignment of priorities between scientists and policymakers highlights the need for evidence-informed conservation in Brazil. **Perspectives in Ecology and Conservation**, Elsevier BV, v. 16, n. 3, p. 125–132, jul. 2018. ISSN 2530-0644. DOI: [10.1016/j.pecon.2018.06.002](https://doi.org/10.1016/j.pecon.2018.06.002).

KONG, Jun et al. Effects of vadose zone on groundwater table fluctuations in unconfined aquifers. **Journal of Hydrology**, Elsevier BV, v. 528, p. 397–407, set. 2015. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2015.06.045](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.045).

KUGLEROVÁ, Lenka et al. Cutting Edge: A Comparison of Contemporary Practices of Riparian Buffer Retention Around Small Streams in Canada, Finland, and Sweden. **Water Resources Research**, v. 56, n. 9, 2020. DOI: [10.1029/2019WR026381](https://doi.org/10.1029/2019WR026381).

LANE, Charles R. et al. Hydrological, Physical, and Chemical Functions and Connectivity of Non-Floodplain Wetlands to Downstream Waters: A Review. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, Wiley, v. 54, n. 2, p. 346–371, mar. 2018. ISSN 1093-474X. DOI: [10.1111/1752-1688.12633](https://doi.org/10.1111/1752-1688.12633).

LARENTIS, Dante et al. Procedimentos e critérios para zoneamento de planícies de inundação em áreas urbanas. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, v. 17, n. 1, p. 13–, jul. 2020. ISSN 2359-1919. DOI: [10.21168/rega.v17e13](https://doi.org/10.21168/rega.v17e13).

LAURANCE, Susan G; LAURANCE, William F. Tropical wildlife corridors: use of linear rainforest remnants by arboreal mammals. **Biological Conservation**, Elsevier BV, v. 91, n. 2-3, p. 231–239, dez. 1999. ISSN 0006-3207. DOI: [10.1016/s0006-3207\(99\)00077-4](https://doi.org/10.1016/s0006-3207(99)00077-4).

LEAL, Cecília G.; BARLOW, Jos et al. Is environmental legislation conserving tropical stream faunas? A large-scale assessment of local, riparian and catchment-scale influences on Amazonian fish. **Journal of Applied Ecology**, Wiley-Blackwell, nov. 2017. DOI: [10.1111/1365-2664.13028](https://doi.org/10.1111/1365-2664.13028).

LEAL, Cecília G.; LENNOX, Gareth D. et al. Integrated terrestrial-freshwater planning doubles conservation of tropical aquatic species. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 370, n. 6512, p. 117–121, 2020. ISSN 0036-8075. DOI: [10.1126/science.aba7580](https://doi.org/10.1126/science.aba7580).

LEES, Alexander C.; PERES, Carlos A. Conservation Value of Remnant Riparian Forest Corridors of Varying Quality for Amazonian Birds and Mammals. **Conservation Biology**, Wiley, v. 22, n. 2, p. 439–449, jan. 2008. ISSN 0888-8892. DOI: [10.1111/j.1523-1739.2007.00870.x](https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2007.00870.x).

LEFAVOUR, Gina; ALSDORF, Doug. Water slope and discharge in the Amazon River estimated using the shuttle radar topography mission digital elevation model. **Geophysical Research Letters**, American Geophysical Union (AGU), v. 32, n. 17, set. 2005. ISSN 0094-8276. DOI: [10.1029/2005g1023836](https://doi.org/10.1029/2005g1023836).

LEHNER, Bernhard; GRILL, Günther. Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems. **Hydrological Processes**, Wiley, v. 27, n. 15, p. 2171–2186, abr. 2013. DOI: [10.1002/hyp.9740](https://doi.org/10.1002/hyp.9740).

LEITE, José Rubens Morato. **Dano ambiental: do Individual ao coletivo extrapatrimonial**. 2. ed. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2003. 776 p. ISBN 85-203-2371-5.

_____ (Coord.). **Manual de direito ambiental**. São Paulo: Saraiva, 2015. 776 p. ISBN 978-85-02-62250-0.

LEOPOLD, L.B.; MILLER, J.P. **Ephemeral Streams: Hydraulic Factors and Their Relation to the Drainage Net**. Washington D.C.: U.S. Government Printing Office, 1956. (Geological Survey professional paper). Disponível em: <<https://pubs.er.usgs.gov/publication/pp282A>>. Acesso em: 28 jun. 2020.

LEOPOLD, Luna B. **A View of the River**. Massachusetts: Harvard University Press, 1994. ISBN 9780674937321.

LEOPOLD, Luna B.; WOLMAN, M. Gordon; MILLER, John P. **Fluvial Processes in Geomorphology**. New York: Dover Publications, 1992. ISBN 0-486-68588-8.

LEVIS, Carolina; CLEMENT, Charles R. et al. Forest conservation: Humans' handprints. **Science**, American Association for the Advancement of Science (AAAS), v. 355, n. 6324, p. 466–467, fev. 2017. ISSN 1095-9203. DOI: [10.1126/science.aal2175](https://doi.org/10.1126/science.aal2175).

LEVIS, Carolina; COSTA, F. R. C. et al. Persistent effects of pre-Columbian plant domestication on Amazonian forest composition. **Science**, American Association for the Advancement of Science (AAAS), v. 355, n. 6328, p. 925–931, mar. 2017. ISSN 1095-9203. DOI: [10.1126/science.aal0157](https://doi.org/10.1126/science.aal0157).

LIN, Peirong; PAN, Ming; ALLEN, George H. et al. Global Estimates of Reach-Level Bankfull River Width Leveraging Big Data Geospatial Analysis. **Geophysical Research Letters**, American Geophysical Union (AGU), v. 47, n. 7, abr. 2020. ISSN 1944-8007. DOI: [10.1029/2019g1086405](https://doi.org/10.1029/2019g1086405).

LIN, Peirong; PAN, Ming; BECK, Hylke E. et al. Global Reconstruction of Naturalized River Flows at 2.94 Million Reaches. **Water Resources Research**, American Geophysical Union (AGU), v. 55, n. 8, p. 6499–6516, ago. 2019. ISSN 1944-7973. DOI: [10.1029/2019wr025287](https://doi.org/10.1029/2019wr025287).

LOMBARDO, Umberto et al. Early Holocene crop cultivation and landscape modification in Amazonia. **Nature**, Springer Science e Business Media LLC, v. 581, n. 7807, p. 190–193, abr. 2020. ISSN 1476-4687. DOI: [10.1038/s41586-020-2162-7](https://doi.org/10.1038/s41586-020-2162-7).

MACHADO, Paulo Affonso Leme. **Direito ambiental brasileiro**. 10. ed. São Paulo: Malheiros Editores, 2002. 1038 p. ISBN 85-7420-332-7.

_____. _____. 22. ed. São Paulo: Malheiros Editores, 2014. 1344 p. ISBN 978-85-392-0214-0.

MALTCHIK, LEONARDO et al. Legislation for wetland conservation in Brazil: Are existing terms and definitions sufficient? **Environmental Conservation**, Cambridge University Press (CUP), v. 45, n. 3, p. 301–305, dez. 2017. ISSN 1469-4387. DOI: [10.1017/s0376892917000522](https://doi.org/10.1017/s0376892917000522).

MANZIONE, Rodrigo Lilla; TANIKAWA, Diego Hiroshi; SOLDERA, Bruna Camargo. Relação entre a resposta espectral da vegetação em diferentes cultivos e níveis freáticos em área de recarga do sistema aquífero Guarani. **Águas Subterrâneas**, v. 28, n. 1, fev. 2014. DOI: [10.14295/ras.v28i1.27381](https://doi.org/10.14295/ras.v28i1.27381).

MEIRELLES, Hely Lopes. **Direito de construir**. 6. ed. São Paulo: Malheiros Editores, 1994. 469 p.

MERSEL, Matthew K. et al. Estimation of river depth from remotely sensed hydraulic relationships. **Water Resources Research**, American Geophysical Union (AGU), v. 49, n. 6, p. 3165–3179, jun. 2013. ISSN 0043-1397. DOI: [10.1002/wrcr.20176](https://doi.org/10.1002/wrcr.20176).

METZ, M.; MITASOVA, H.; HARMON, R. S. Efficient extraction of drainage networks from massive, radar-based elevation models with least cost path search. **Hydrology and Earth System Sciences**, Copernicus GmbH, v. 15, n. 2, p. 667–678, fev. 2011. ISSN 1607-7938. DOI: [10.5194/hess-15-667-2011](https://doi.org/10.5194/hess-15-667-2011).

METZGER, Jean Paul. O Código Florestal Tem Base Científica? **Natureza & Conservação**, Elsevier BV, v. 08, n. 01, p. 92–99, 2010. ISSN 1679-0073. DOI: [10.4322/natcon.00801017](https://doi.org/10.4322/natcon.00801017).

METZGER, Jean Paul; BERNACCI, Luis Carlos; GOLDENBERG, Renato. Pattern of tree species diversity in riparian forest fragments of different widths (SE Brazil). **Plant Ecology**, Springer Science e Business Media LLC, v. 133, n. 2, p. 135–152, 1997. ISSN 1385-0237. DOI: [10.1023/a:1009791831294](https://doi.org/10.1023/a:1009791831294).

MEYER, Aline et al. Empirical assessment of flood wave celerity–discharge relationships at local and reach scales. **Hydrological Sciences Journal**, Informa UK Limited, v. 63, n. 15-16, p. 2035–2047, dez. 2018. ISSN 2150-3435. DOI: [10.1080/02626667.2018.1557336](https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1557336).

MILARÉ, Édís. **Direito do ambiente: a gestão ambiental em foco**. 7. ed. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2011. 1647 p. ISBN 978-85-203-3918-3.

MONTALTO, Franco A.; PARLANGE, Jean-Yves; STEENHUIS, Tammo S. A simple model for predicting water table fluctuations in a tidal marsh. **Water Resources Research**, American Geophysical Union (AGU), v. 43, n. 3, mar. 2007. ISSN 0043-1397. DOI: [10.1029/2004wr003913](https://doi.org/10.1029/2004wr003913).

MORAES, Ricardo Boelter. **Espécies vegetais de restinga herbácea/subarbustiva como indicadoras dos limites de proteção dos olhos d' água em baixadas úmidas caracterizadas como paleolagoas: estudo de caso em Florianópolis/SC**. 2020. 154 f. Dissertação (Mestrado profissional) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Disponível em: <<http://www.bu.ufsc.br/teses/PPCA0050-D.pdf>>. Acesso em: 11 dez. 2020.

MORAMARCO, Tommaso et al. An entropy-based method for determining the flow depth distribution in natural channels. **Journal of Hydrology**, Elsevier BV, v. 497, p. 176–188, ago. 2013. ISSN 0022-1694. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2013.06.002](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.002).

MORRISON, Julia E.; SMITH, James A. Stochastic modeling of flood peaks using the generalized extreme value distribution. **Water Resources Research**, American Geophysical Union (AGU), v. 38, n. 12, 41–1–41–12, dez. 2002. ISSN 0043-1397. DOI: [10.1029/2001wr000502](https://doi.org/10.1029/2001wr000502).

NASA JPL. **NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second**. NASA LP DAAC, 2013. DOI: [10.5067/measures/srtm/srtmgl1.003](https://doi.org/10.5067/measures/srtm/srtmgl1.003).

NASA/METI/AIST/JAPAN SPACESYSTEMS. **ASTER Global Digital Elevation Model V003**. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2019. DOI: [10.5067/ASTER/ASTGTM.003](https://doi.org/10.5067/ASTER/ASTGTM.003). Disponível em: <<https://lpdaac.usgs.gov/products/astgtmv003>>. Acesso em: 15 dez. 2020.

NEVES, Eurico Trindade. **Curso de Hidráulica**. 8. ed. Rio de Janeiro: Editora Globo, 1986. 577 p.

NEWSON, Malcolm. D.; LARGE, Andrew R. G. 'Natural' rivers, 'hydromorphological quality' and river restoration: a challenging new agenda for applied fluvial geomorphology. **Earth Surface Processes and Landforms**, Wiley-Blackwell, v. 31, n. 13, p. 1606–1624, 2006. DOI: [10.1002/esp.1430](https://doi.org/10.1002/esp.1430).

NUNES, Antônio de Pádua. **Do terreno reservado de 1867 à faixa florestal de 1965**. São Paulo: Revista dos Tribunais, 1977. 93 p.

OLIVEIRA, Guilherme de Castro; FERNANDES FILHO, Elpidio Inacio. Automated mapping of permanent preservation areas on hilltops. **CERNE**, FapUNIFESP (SciELO), v. 22, n. 1, p. 111–120, mar. 2016. DOI: [10.1590/01047760201622012100](https://doi.org/10.1590/01047760201622012100).

OPEN GEOSPATIAL CONSORTIUM (OGC). **OGC KML 2.3**. Wayland, MA, USA, 2015. Disponível em: <<http://www.opengis.net/doc/IS/kml/2.3>>. Acesso em: 20 dez. 2020.

OSTERKAMP, W. R. Processes of fluvial island formation, with examples from Plum Creek, Colorado and Snake River, Idaho. **Wetlands**, Springer Nature, v. 18, n. 4, p. 530–545, dez. 1998. DOI: [10.1007/bf03161670](https://doi.org/10.1007/bf03161670).

PEKEL, Jean-François et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. **Nature**, Springer Science e Business Media LLC, v. 540, n. 7633, p. 418–422, dez. 2016. ISSN 1476-4687. DOI: [10.1038/nature20584](https://doi.org/10.1038/nature20584).

PEREZ, Alondra B. A. et al. Connectivity of Ephemeral and Intermittent Streams in a Subtropical Atlantic Forest Headwater Catchment. **Water**, MDPI AG, v. 12, n. 6, p. 1526, mai. 2020. ISSN 2073-4441. DOI: [10.3390/w12061526](https://doi.org/10.3390/w12061526).

PHILIPPOPOULOS-MIHALOPOULOS, Andreas. Critical environmental law as method in the Anthropocene. In: PHILIPPOPOULOS-MIHALOPOULOS, Andreas; BROOKS, Victoria (Ed.). **Research Methods in Environmental Law**. Cheltenham, UK: Edward Elgar Publishing, 2017. cap. 6, p. 131–156. ISBN 978-17-84-71257-0. DOI: [10.4337/9781784712570.00012](https://doi.org/10.4337/9781784712570.00012).

PICKUP, G.; WARNER, R.F. Effects of hydrologic regime on magnitude and frequency of dominant discharge. **Journal of Hydrology**, Elsevier BV, v. 29, n. 1-2, p. 51–75, mar. 1976. ISSN 0022-1694. DOI: [10.1016/0022-1694\(76\)90005-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(76)90005-6).

POEHLS, D.J.; SMITH, Gregory J. **Encyclopedic dictionary of hydrogeology**. Burlington, MA: Academic Press, 2009. 517 p. ISBN 978-0-12-558690-0.

PRIEUR, Michel. O princípio da proibição de retrocesso ambiental. In: COLÓQUIO INTERNACIONAL SOBRE O PRINCÍPIO DA PROIBIÇÃO DE RETROCESSO AMBIENTAL, 2012. **O princípio da proibição de retrocesso ambiental**. Brasília, DF: Brasil. Congresso Nacional. Senado Federal. Comissão de Meio Ambiente, Defesa do Consumidor e Fiscalização e Controle (CMA), 2012. P. 11–54. Disponível em: <<https://www2.senado.leg.br/bdsf/bitstream/handle/id/242559/000940398.pdf>>. Acesso em: 28 jul. 2020.

QUEIROZ, Pedro Henrique Balduino et al. Caracterização multitemporal de barras e ilhas fluviais no baixo curso do rio Jaguaribe, Ceará-Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 19, n. 1, jan. 2018. DOI: [10.20502/rbg.v19i1.1282](https://doi.org/10.20502/rbg.v19i1.1282).

RAO, A. Ramachandra; HAMED, Khaled H. **Flood Frequency Analysis**. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2019. (New directions in civil engineering). ISBN 978-0-8493-0083-7.

RILEY, S.J. A comparison of morphometric measures of bankfull. **Journal of Hydrology**, Elsevier BV, v. 17, n. 1-2, p. 23–31, out. 1972. ISSN 0022-1694. DOI: [10.1016/0022-1694\(72\)90064-9](https://doi.org/10.1016/0022-1694(72)90064-9).

SAMPSON, Christopher C. et al. A high-resolution global flood hazard model. **Water Resources Research**, American Geophysical Union (AGU), v. 51, n. 9, p. 7358–7381, set. 2015. ISSN 0043-1397. DOI: [10.1002/2015wr016954](https://doi.org/10.1002/2015wr016954).

SANTA CATARINA (SC). **Levantamento aerofotogramétrico de 2010 a 2012: Ortofotomosaico RGB**. 2014. Digital. Composição com espectro visível (vermelho, verde e azul). Escala 1:2.000. Disponível em: <<http://www.sigsc.sds.sc.gov.br>>. Acesso em: 28 jun. 2020.

_____. **Levantamento aerofotogramétrico de 2010 a 2012: Restituição de hidrografia**. 2014. Digital. Escala 1:5.000. Disponível em: <<http://www.sigsc.sds.sc.gov.br>>. Acesso em: 28 jun. 2020.

_____. **Levantamento aerofotogramétrico de 2010 a 2012: Modelo Digital de Terreno**. 2014. Digital. Escala 1:5.000. Disponível em: <<http://www.sigsc.sds.sc.gov.br>>. Acesso em: 28 jun. 2020.

_____. **Levantamento aerofotogramétrico do Estado de Santa Catarina de 1938**. 1938. Escala 1:37.000. Fotografia aérea, faixa 25, n^o 201.

_____. **Levantamento aerofotogramétrico do Estado de Santa Catarina de 1957**. 1957. Escala 1:25.000. Fotografias aéreas n^o 1153, 1137 e 1173.

_____. **Levantamento aerofotogramétrico do Estado de Santa Catarina de 1977**. 1977. Escala 1:25.000. Fotografia aérea n^o 19968.

SANTOS, Milton. **Metamorfoses do espaço habitado**. São Paulo: HUCITEC, 1988. 124 p. (Geografia: teoria e realidade). ISBN 85-271-0068-1.

SCHOFIELD, Kate A. et al. Biota Connect Aquatic Habitats throughout Freshwater Ecosystem Mosaics. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, Wiley, v. 54, n. 2, p. 372–399, mar. 2018. ISSN 1093-474X. DOI: [10.1111/1752-1688.12634](https://doi.org/10.1111/1752-1688.12634).

SHEN, P.; ZHANG, L.M. et al. Role of vegetation restoration in mitigating hillslope erosion and debris flows. **Engineering Geology**, Elsevier BV, v. 216, p. 122–133, jan. 2017. ISSN 0013-7952. DOI: [10.1016/j.enggeo.2016.11.019](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.11.019).

SHEN, Xinyi; ANAGNOSTOU, Emmanouil N. et al. A global distributed basin morphometric dataset. **Scientific Data**, Springer Science e Business Media LLC, v. 4, n. 1, jan. 2017. DOI: [10.1038/sdata.2016.124](https://doi.org/10.1038/sdata.2016.124).

SHEN, Xinyi; MEI, Yiwen. **Basin characteristics in South America**. figshare, jan. 2017. DOI: [10.6084/m9.figshare.c.3302111_D79.v1](https://doi.org/10.6084/m9.figshare.c.3302111_D79.v1).

SHEN, Xinyi; VERGARA, Humberto J. et al. GDBC: A tool for generating global-scale distributed basin morphometry. **Environmental Modelling & Software**, Elsevier BV, v. 83, p. 212–223, set. 2016. DOI: [10.1016/j.envsoft.2016.05.012](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.05.012).

SILVA, José Afonso da. **Direito ambiental constitucional**. 5. ed. São Paulo: Malheiros Editores, 2004. 349 p. ISBN 85-7420-609-1.

SIMON, Andrew; DICKERSON, Wendy; HEINS, Amanda. Suspended-sediment transport rates at the 1.5-year recurrence interval for ecoregions of the United States: transport conditions at the bankfull and effective discharge? **Geomorphology**, Elsevier BV, v. 58, n. 1-4, p. 243–262, mar. 2004. ISSN 0169-555X. DOI: [10.1016/j.geomorph.2003.07.003](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2003.07.003).

SIQUEIRA, Vinícius A. et al. Toward continental hydrologic-hydrodynamic modeling in South America. **Hydrology and Earth System Sciences**, Copernicus GmbH, v. 22, n. 9, p. 4815–4842, set. 2018. DOI: [10.5194/hess-22-4815-2018](https://doi.org/10.5194/hess-22-4815-2018).

SLATER, Louise J.; SINGER, Michael Bliss; KIRCHNER, James W. Hydrologic versus geomorphic drivers of trends in flood hazard. **Geophysical Research Letters**, American Geophysical Union (AGU), v. 42, n. 2, p. 370–376, jan. 2015. DOI: [10.1002/2014gl062482](https://doi.org/10.1002/2014gl062482).

SNYDER, Daniel T. **Estimated depth to ground water and configuration of the water table in the Portland, Oregon area**: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2008–5059. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2008. 40 p. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/sir/2008/5059/>>. Acesso em: 28 jun. 2020.

SOARES-FILHO, B. et al. Cracking Brazil's Forest Code. **Science**, American Association for the Advancement of Science (AAAS), v. 344, n. 6182, p. 363–364, abr. 2014. DOI: [10.1126/science.1246663](https://doi.org/10.1126/science.1246663).

SØNDERGAARD, Martin; JEPPESEN, Erik; JENSEN, Jens Peder. Pond or lake: does it make any difference? **Archiv für Hydrobiologie**, Schweizerbart, v. 162, n. 2, p. 143–165, fev. 2005. ISSN 0003-9136. DOI: [10.1127/0003-9136/2005/0162-0143](https://doi.org/10.1127/0003-9136/2005/0162-0143).

SOUSA, Paulo Teixeira de; FERNANDEZ PIEDADE, Maria Teresa; CANDOTTI, Ennio. Brazil's forest code puts wetlands at risk. **Nature**, Springer Science e Business Media LLC, v. 478, n. 7370, p. 458–458, out. 2011. ISSN 1476-4687. DOI: [10.1038/478458b](https://doi.org/10.1038/478458b).

SOUZA, Kleber Isaac Silva de. **Limitações ambientais ao direito de construir**. 2003. 191 f. Monografia (Especialização em Legislação Ambiental e Meio Ambiente) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Florianópolis.

SOUZA, Kleber Isaac Silva de; CHAFFE, Pedro Luiz Borges; PINTO, Cátia Regina Silva Carvalho de. Cartografia para análises ambientais: definição de áreas de preservação permanente de corpos hídricos naturais. In: LEITE, José Rubens Morato; BORATTI, Larissa Verri; CAVEDON-CAPDEVILLE, Fernanda Salles (Org.). **Direito ambiental e geografia: relação entre geoinformação, marcos legais, políticas públicas e processos decisórios**. Rio de Janeiro: Lumen Juris, 2020. P. 151–199. ISBN 978-65-5510-434-9.

_____. Delimitação de área de preservação permanente em faixa marginal de cursos d'água: histórico e lacunas técnicas atuais. In: XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, nov. 2019, Foz do Iguaçu, Brasil. **Anais ...** Porto Alegre: ABRHidro, 2019. Disponível em: <<http://anais.abrh.org.br/works/4875>>. Acesso em: 31 ago. 2020.

_____. Um software para a análise de seções transversais e de leitos fluviais regulares de rios do Brasil. In: XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, nov. 2019, Foz do Iguaçu, Brasil. **Anais ...** Porto Alegre: ABRHidro, 2019. Disponível em: <<http://anais.abrh.org.br/works/5170>>. Acesso em: 28 jun. 2020.

SOUZA, Kleber Isaac Silva de; CHAFFE, Pedro Luiz Borges; PINTO, Cátia Regina Silva Carvalho de; NOGUEIRA, Tadeu Maia Portela. Proteção ambiental de nascentes e afloramentos de água subterrânea no Brasil: histórico e lacunas técnicas atuais. **Águas Subterrâneas**, v. 33, n. 1, p. 76–86, mar. 2019. DOI: [10.14295/ras.v33i1.29254](https://doi.org/10.14295/ras.v33i1.29254).

SPACKMAN, Susan C.; HUGHES, Jeffrey W. Assessment of minimum stream corridor width for biological conservation: Species richness and distribution along mid-order streams in Vermont, USA. **Biological Conservation**, Elsevier BV, v. 71, n. 3, p. 325–332, 1995. DOI: [10.1016/0006-3207\(94\)00055-u](https://doi.org/10.1016/0006-3207(94)00055-u).

SPAROVEK, Gerd et al. Who owns Brazilian lands? **Land Use Policy**, Elsevier BV, v. 87, p. 104062, set. 2019. ISSN 0264-8377. DOI: [10.1016/j.landusepol.2019.104062](https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104062).

STRAHLER, Arthur N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. **Geological Society of America Bulletin**, Geological Society of America, v. 63, n. 11, p. 1117, 1952. DOI: [10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:haoet\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:haoet]2.0.co;2).

SUGUIO, Kenitiro. **Dicionário de geologia marinha: com termos correspondentes em inglês, francês e espanhol**. São Paulo: T.A. Queiroz, 1992. ISBN 85-718-2001-5.

_____. **Dicionário de geologia sedimentar e áreas afins**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. 1222 p. ISBN 85-286-0673-2.

SULLIVAN, S. Mažeika P.; RAINS, Mark C.; RODEWALD, Amanda D. Opinion: The proposed change to the definition of “waters of the United States” flouts sound science. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 116, n. 24, p. 11558–11561, jun. 2019. ISSN 1091-6490. DOI: [10.1073/pnas.1907489116](https://doi.org/10.1073/pnas.1907489116).

SULLIVAN, S. Mažeika Patricio; RAINS, Mark C.; RODEWALD, Amanda D. et al. Distorting science, putting water at risk. **Science**, American Association for the Advancement of Science (AAAS), v. 369, n. 6505, p. 766–768, ago. 2020. ISSN 1095-9203. DOI: [10.1126/science.abb6899](https://doi.org/10.1126/science.abb6899).

TANIWAKI, Ricardo H. et al. The Native Vegetation Protection Law of Brazil and the challenge for first-order stream conservation. **Perspectives in Ecology and Conservation**, Elsevier BV, v. 16, n. 1, p. 49–53, jan. 2018. ISSN 2530-0644. DOI: [10.1016/j.pecon.2017.08.007](https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.08.007).

THE MATHWORKS, Inc. **MATLAB version 9.2.0.538062 (R2017a)**. Natick, Massachusetts, 2017.

TYRALIS, Hristos; PAPACHARALAMPOUS, Georgia; TANTANEE, Sarintip. How to explain and predict the shape parameter of the generalized extreme value distribution of streamflow extremes using a big dataset. **Journal of Hydrology**, Elsevier BV, v. 574, p. 628–645, jul. 2019. DOI: [10.1016/j.jhydro.2019.04.070](https://doi.org/10.1016/j.jhydro.2019.04.070).

UNITED NATIONS. **Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development**. 21 out. 2015. Resolution A/RES/70/1. Disponível em: <<http://www.refworld.org/docid/57b6e3e44.html>>. Acesso em: 10 jul. 2018.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Convention on Biological Diversity**. Rio de Janeiro: UNEP, 1992. Disponível em: <https://treaties.un.org/doc/Treaties/1992/06/19920605%2008-44%20PM/Ch_XXVII_08p.pdf>. Acesso em: 7 dez. 2020.

_____. **Declaration of the United Nations Conference on the Human Environment**. Stockholm: UNEP, 1972. Disponível em: <<http://www.un-documents.net/acconf48-14r1.pdf>>. Acesso em: 7 dez. 2020.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Watershed academy web: introduction to watershed ecology**. 2007. Disponível em: <<https://cfpub.epa.gov/watertrain/pdf/modules/watershedecology.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2017.

VALLADÃO, Alfredo. **Direito das águas**. São Paulo: Revista dos Tribunaes, 1931. 442 p.

_____. Exposição de motivos do anteprojeto do Código de Águas. **Diário Oficial [da] República dos Estados Unidos do Brasil**, Rio de Janeiro, RJ, 28 ago. 1933.

VANNOTE, Robin L. et al. The river continuum concept. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, Canadian Science Publishing, v. 37, n. 1, p. 130–137, jan. 1980. DOI: [10.1139/f80-017](https://doi.org/10.1139/f80-017).

VICTORIA, Daniel Castro de. Influência da escala em uma metodologia de delimitação automática de áreas de preservação permanente em topo de morro e montanha e adaptação do método para escalas detalhadas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 62, n. 3, 2010. ISSN 1808-0936. Disponível em: <<http://www.rbc.lsie.unb.br/index.php/rbc/article/view/249>>. Acesso em: 24 jan. 2017.

WANG, Xuejing et al. Loading effect of water table variation and density effect on tidal head fluctuations in a coastal aquifer system. **Water Resources Research**, American Geophysical Union (AGU), v. 48, n. 9, set. 2012. ISSN 0043-1397. DOI: [10.1029/2011wr011600](https://doi.org/10.1029/2011wr011600).

WATSON, Chester C.; BIEDENHARN, David S.; SCOTT, Stephen H. **Channel rehabilitation: processes, design, and implementation**. Vicksburg, Mississippi: U.S. Army Engineering Research, Development Center Coastal e Hydraulics Laboratory Waterways Experiment Station, 1999. 312 p. Disponível em: <<https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a423260.pdf>>. Acesso em: 28 jun. 2020.

WILBY, Robert L. et al. The “dirty dozen” of freshwater science: detecting then reconciling hydrological data biases and errors. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, Wiley, v. 4, n. 3, e1209, mar. 2017. ISSN 2049-1948. DOI: [10.1002/wat2.1209](https://doi.org/10.1002/wat2.1209).

WILKERSON, Gregory V. Improved Bankfull Discharge Prediction Using 2-Year Recurrence-Period Discharge1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, Wiley, v. 44, n. 1, p. 243–257, fev. 2008. ISSN 1752-1688. DOI: [10.1111/j.1752-1688.2007.00151.x](https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2007.00151.x).

WILLIAMS, Garnett P. Bank-full discharge of rivers. **Water Resources Research**, American Geophysical Union (AGU), v. 14, n. 6, p. 1141–1154, dez. 1978. ISSN 0043-1397. DOI: [10.1029/wr014i006p01141](https://doi.org/10.1029/wr014i006p01141).

WOHL, Ellen; MERRITTS, Dorothy J. What Is a Natural River? **Geography Compass**, Wiley-Blackwell, v. 1, n. 4, p. 871–900, jul. 2007. DOI: [10.1111/j.1749-8198.2007.00049.x](https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2007.00049.x).

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **Guide to Climatological Practices**. Geneva 2, Switzerland: WMO, 2011. 117 p. WMO-No. 100. ISBN 978-92-63-10100-6. Disponível em: <https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_100_en.pdf>. Acesso em: 1 ago. 2019.

_____. **International glossary of hydrology**. Switzerland, Geneva: WMO, 2012. 469 p. English, French, Spanish, Russian Plurilingual. ISBN 978-92-3-001154-3. Disponível em: <<http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002218/221862m.pdf>>. Acesso em: 28 jun. 2020.

_____. **The role of climatological normals in a changing climate**. Geneva, Switzerland: WMO, 2007. 130 p. WCDMP-No. 61; WMO-TD No. 1377. Disponível em: <https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4546>. Acesso em: 31 jul. 2019.

_____. **WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals**. Geneva 2, Switzerland: WMO, 2017. 29 p. WMO-No. 1203. ISBN 978-92-63-11203-3. Disponível em: <https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4166>. Acesso em: 31 jul. 2019.

YAMAZAKI, Dai; IKESHIMA, Daiki et al. MERIT Hydro: A high-resolution global hydrography map based on latest topography datasets. **Water Resources Research**, American Geophysical Union (AGU), mai. 2019. ISSN 1944-7973. DOI: [10.1029/2019wr024873](https://doi.org/10.1029/2019wr024873).

YAMAZAKI, Dai; O'LOUGHLIN, Fiachra et al. Development of the Global Width Database for Large Rivers. **Water Resources Research**, American Geophysical Union (AGU), v. 50, n. 4, p. 3467–3480, abr. 2014. ISSN 0043-1397. DOI: [10.1002/2013wr014664](https://doi.org/10.1002/2013wr014664).

ZHAO, Qinghe et al. Relationships between Riparian Vegetation Pattern and the Hydraulic Characteristics of Upslope Runoff. **Sustainability**, MDPI AG, v. 11, n. 10, p. 2966, mai. 2019. ISSN 2071-1050. DOI: [10.3390/su11102966](https://doi.org/10.3390/su11102966).

ZHENG, Xing et al. River Channel Geometry and Rating Curve Estimation Using Height above the Nearest Drainage. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, Wiley, v. 54, n. 4, p. 785–806, jun. 2018. ISSN 1093-474X. DOI: [10.1111/1752-1688.12661](https://doi.org/10.1111/1752-1688.12661).

ZIMMER, Margaret A.; KAISER, Kendra E. et al. Zero or not? Causes and consequences of zero-flow stream gage readings. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, Wiley, e1436, abr. 2020. ISSN 2049-1948. DOI: [10.1002/wat2.1436](https://doi.org/10.1002/wat2.1436).

ZIMMER, Margaret A.; MCGLYNN, Brian L. Ephemeral and intermittent runoff generation processes in a low relief, highly weathered catchment. **Water Resources Research**, American Geophysical Union (AGU), v. 53, n. 8, p. 7055–7077, ago. 2017. ISSN 0043-1397. DOI: [10.1002/2016wr019742](https://doi.org/10.1002/2016wr019742).

APÊNDICES

APÊNDICE A – Quadro síntese com os resultados para integração das lacunas técnico-normativas para delimitação de áreas de preservação permanente com função de proteção aos recursos hídricos naturais

Quadro A.1 – Síntese dos resultados para integração das lacunas técnico-normativas para definição precisa das áreas de preservação permanente (APPs) ao redor de olhos d'água e nascentes, em faixa marginal aos cursos d'água naturais, no entorno de reservatórios naturais, nas encostas e em topo de elevações.

(continua)

TIPOLOGIA	LACUNA	SOLUÇÕES E PROPOSTAS
Nascente móvel e curso d'água intermitente	A1 = C3: Definição do ponto de montante a ser considerado como início da nascente móvel, final do curso d'água efêmero e início do intermitente.	Ponto de montante com maior probabilidade de ocorrência do afloramento do lençol freático, caracterizado como o local mais elevado onde a nascente começa a correr sobre o solo (art. 95, do Código de Águas). A APP abrange uma faixa mínima de 50 m de todo o trecho pelo qual há ocorrência de deslocamento da nascente, podendo ser maior, de acordo com a largura do rio.
Nascente e olho d'água	A2: Delimitação da extensão do entorno de nascentes e olhos d'água em função da flutuação sazonal do lençol freático.	A APP é medida a partir do <i>nível máximo sazonal do afloramento</i> (SOUZA; CHAFFE; PINTO; NOGUEIRA, 2019), sendo necessário que o perito pesquise registros documentais, indicações físicas e elementos bióticos que permitam delimitar a extensão sazonal da área úmida.
Curso d'água natural	C1: Definição de curso d'água natural, inclusive antropizado.	<i>Curso d'água natural</i> consiste no (a) canal claramente definido que concentra o fluxo natural da água superficial ou produto de afloramento da água subterrânea em uma bacia hidrográfica, podendo ser contínuo, descontínuo ou subterrâneo e, quanto ao regime hidrológico, ser efêmero, intermitente ou perene; (b) o canal que conecta dois corpos hídricos naturais permitindo o fluxo natural das águas; e (c) o canal implantado ou alterado pela ação humana que, mesmo em situação diversa da primitiva, conserva a função de concentrar ou propiciar o fluxo natural das águas em uma bacia hidrográfica.
Curso d'água artificial	C2: Definição de cursos d'água artificial.	<i>Curso d'água artificial</i> , por exclusão, consiste no (a) canal criado exclusivamente para drenagem de uma superfície originalmente enxuta; (b) o canal criado exclusivamente para conduzir a água entre um corpo hídrico artificial e outro (natural ou artificial); e (c) o canal que não interfere no fluxo natural das águas.

Quadro A.1 – Síntese dos resultados para integração das lacunas técnico-normativas para definição precisa das áreas de preservação permanente (APPs) ao redor de olhos d'água e nascentes, em faixa marginal aos cursos d'água naturais, no entorno de reservatórios naturais, nas encostas e em topo de elevações.
(continuação)

TIPOLOGIA	LACUNA	SOLUÇÕES E PROPOSTAS
Curso d'água intermitente com nascente móvel	C3 = A1: Definição do ponto de montante a ser considerado como início da nascente móvel, final do curso d'água efêmero e início do intermitente.	Ponto de montante com maior probabilidade de ocorrência do afloramento do lençol freático, caracterizado como o local mais elevado onde a nascente começa a correr sobre o solo (art. 95, do Código de Águas). A APP abrange uma faixa mínima de 50 m de todo o trecho pelo qual há ocorrência de deslocamento da nascente, podendo ser maior, de acordo com a largura do rio.
Curso d'água natural	C4: Ponto de início da APP ripária no sentido transversal do rio. Definição espacial do leito regular.	<p>1. Método predominantemente aceito para delimitação científica das margens plenas de rios (<i>critério científico</i>): <i>cheia anual mais provável</i>, também conhecida como vazão de margens plenas ou dominante, a partir da qual o leito transborda para a planície de inundação.</p> <p>A vazão de margens plenas é padronizada em $Q_{1,58}$ (vazão com tempo de recorrência de 1,58 ano), que corresponde ao valor mais provável na distribuição de Gumbel. Contudo, devido ao fato de existirem rios cujas séries têm comportamentos verossímeis com outras distribuições, para análises realizadas em escala local recomenda-se evitar a generalização e aplicar a vazão efetiva de margens plenas para aquele caso concreto (Q_{mp}), quando os dados disponíveis permitirem esse tipo de análise.</p> <p>2. Proposta para regulamentação futura: os resultados obtidos indicam que o melhor cenário hidrológico para definição dos leitos regulares fluviais é o <i>critério dominial</i>, definido pela <i>média das cheias ordinárias</i> (Q_{med}), pois propicia um menor grau de perturbação hidrológica para as áreas protegidas ripárias e garante uniformidade com os critérios dominiais aplicados aos rios desde o período imperial brasileiro.</p> <p>Observação: para efeitos práticos, o critério científico apresenta resultados muito próximos com Q_{med} e retrata o estado atual da arte para fins de estudos hidrológicos.</p>
Curso d'água natural	C5: Transição das faixas marginais em função da variação da largura do leito fluvial.	A largura da faixa de preservação permanente projeta-se para as margens no entorno (<i>buffer</i>) ao ponto limite do leito regular.

Quadro A.1 – Síntese dos resultados para integração das lacunas técnico-normativas para definição precisa das áreas de preservação permanente (APPs) ao redor de olhos d’água e nascentes, em faixa marginal aos cursos d’água naturais, no entorno de reservatórios naturais, nas encostas e em topo de elevações.
(continuação)

TIPOLOGIA	LACUNA	SOLUÇÕES E PROPOSTAS
Curso d’água natural com ilha fluvial	C6: APP no interior de ilha fluvial.	Há APP sobre o terreno insular, pois o perímetro das ilhas fluviais coincide com a borda da calha do leito regular, conforme conceito de álveo (leito) definido no art. 9º, do Código de Águas (BRASIL, 1934b).
Curso d’água natural com ilha fluvial	C7: Definição da largura do leito regular em seções transversais de rios com presença de ilhas fluviais.	A largura do rio é definida pela distância entre suas margens externas, hipótese na qual a presença de ilhas não interfere no dimensionamento da APP (cf. YAMAZAKI; O’LOUGHLIN et al., 2014; YAMAZAKI; IKESHIMA et al., 2019).
Cursos d’água divagantes	C9: Definição da APP quando há migração natural dos canais fluviais.	<ol style="list-style-type: none"> 1. A faixa marginal da APP acompanha o deslocamento (migração) do leito regular do curso d’água; 2. Quando a área inundada na condição de vazão que define o leito de regular de um rio meandrante alcançar toda a planície ou, pelo menos, todo o espaço por onde o leito do rio translada, a APP será definida como qualquer outro rio, i.e., em função da largura do leito regular e a partir de sua borda; 3. Quando nesta mesma condição a área inundada não incorporar todo o espaço por onde o meandro livre pode mover-se, considerando que a APP acompanha o deslocamento do álveo no tempo e no espaço para migrações não cíclicas do leito, deve-se adotar as posições do leito regular nas condições mais extremas em relação ao domínio do espaço pelo qual costuma deslocar-se, como forma de garantir a efetividade das funções ambientais do espaço territorial protegido.
Cursos d’água naturais antropizados	C8: Translação da faixa de APP por alterações naturais e antrópicas de leitos fluviais.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Canais fluviais que tiveram seus leitos deslocados devem ter seus novos álveos considerados como cursos d’água naturais; 2. Deve-se estabelecer compensações ambientais quando, por ação humana, as alterações no leito do rio gerarem uma nova faixa marginal de preservação permanente com área menor do que a anterior, bem como quando gerarem limitações para propriedades não alcançadas pela APP original (desapropriação ou instituição de servidão administrativa).

Quadro A.1 – Síntese dos resultados para integração das lacunas técnico-normativas para definição precisa das áreas de preservação permanente (APPs) ao redor de olhos d’água e nascentes, em faixa marginal aos cursos d’água naturais, no entorno de reservatórios naturais, nas encostas e em topo de elevações.
(continuação)

TIPOLOGIA	LACUNA	SOLUÇÕES E PROPOSTAS
Curso d’água natural	C10: Estabelecimento da largura máxima da área de preservação permanente para proteção de ecossistemas ripários.	Lacuna cuja eficácia necessita de regulamentação, a qual deve ter como objetivo a garantia de um ambiente resiliente para APP, de forma que sempre exista uma parcela não sujeita a perturbações de alta frequência por inundações. A legislação e a literatura não informam qual seria a probabilidade ideal para análise do risco de inundação de ecossistemas ripários. O Grupo de Trabalho Interinstitucional Federal para Restauração de cursos d’água do governo dos Estados Unidos da América indica que o projeto deve considerar no longo prazo o tempo de recorrência (TR) de 100 anos (FISRWG, 1988). Segundo Larentis et al. (2020), esse valor também é adotado para fins de planejamento de áreas de risco de inundação nos EUA, de forma que os autores o adotam para fins de zoneamento de planícies de inundação em áreas urbanas. Método sugerido: estabelecer o tempo de recorrência de 100 anos (probabilidade de 1% de inundação em qualquer ano) para definir o <i>limite externo máximo</i> da APP, de fora a garantir que sempre exista uma parcela do ecossistema ripário que não esteja sujeita a perturbações de alta frequência (cf. Figura 17).
Lago, lagoa e laguna	L1: Conceitos de lago, lagoa e laguna para fins de proteção ambiental.	Para fins de aplicação da legislação ambiental de proteção, todas as modalidades de reservatórios naturais (e.g., lagos, lagoas e lagunas) devem ser tratadas como sinônimos.
Lago, lagoa e laguna	L2: Nível a partir do qual se inicia a APP no entorno dos reservatórios naturais.	Para fins de delimitação da APP ao redor de reservatórios naturais, o mais coerente é adotar o nível da cheia anual mais provável, para uniformização com o critério proposto para os rios (C4).

Quadro A.1 – Síntese dos resultados para integração das lacunas técnico-normativas para definição precisa das áreas de preservação permanente (APPs) ao redor de olhos d’água e nascentes, em faixa marginal aos cursos d’água naturais, no entorno de reservatórios naturais, nas encostas e em topo de elevações.

(continuação)

TIPOLOGIA	LACUNA	SOLUÇÕES E PROPOSTAS
Lago, lagoa e lagoa	L3: Estabelecimento da largura máxima da APP para proteção de ecossistemas no entorno de reservatórios naturais.	Lacuna cuja eficácia necessita de regulamentação, a qual deve ter como objetivo a garantia de um ambiente resiliente para APP, de forma que sempre exista uma parcela não sujeita a perturbações de alta frequência por inundações. Método sugerido: a exemplo do que foi proposto para a faixa marginal de proteção aos rios (C10), visando constituir um espaço territorial resiliente com diversidade maximizada no entorno de reservatórios naturais, sugere-se definir a largura máxima da APP para uma cheia de referência com período de retorno de 100 anos (probabilidade de 1% de inundação em qualquer ano).
Lago, lagoa e lagoa	L4: Transição das faixas marginais em função da alteração do zoneamento das margens entre rural e urbano.	A transição da largura da APP ao redor do reservatório acompanhará os limites do zoneamento da área urbana definida na legislação municipal.
Lago, lagoa e lagoa com ilha lacustre	L5: APP no interior de ilha lacustre.	Para os reservatórios artificiais o CONAMA foi expresso ao definir que a APP incide sobre as ilhas (art. 2º, inciso II, da Resolução nº 302/2002), o que permite seu emprego às formações naturais por analogia.
Lago, lagoa e lagoa com ilha lacustre	L6: Definição da superfície do corpo hídrico lacustre quando possuir ilhas.	Considerar no cálculo da área do corpo hídrico lacustre toda a superfície circundada pelas margens externas, inclusive a área das ilhas.

Quadro A.1 – Síntese dos resultados para integração das lacunas técnico-normativas para definição precisa das áreas de preservação permanente (APPs) ao redor de olhos d’água e nascentes, em faixa marginal aos cursos d’água naturais, no entorno de reservatórios naturais, nas encostas e em topo de elevações.
(continuação)

TIPOLOGIA	LACUNA	SOLUÇÕES E PROPOSTAS
Estuários – Cursos d’água naturais, lagos e lagoas	CL: APP em estuários, quando o nível de referência implicar junção de corpos hídricos de diversas tipologias.	Dependendo do nível da superfície hídrica a ser considerado para definição da área de preservação permanente nas margens dos cursos d’água (braços de maré, canais fluviais e de maré) e no entorno dos lagos e lagoas, pode-se encontrar uma grande superfície hídrica, dotada de algumas ilhas, onde é difícil definir quais trechos ou setores da superfície hídrica podem ser tratados como cursos d’água ou reservatórios naturais. Aos ambientes com comportamento lótico adota-se a APP aplicável aos cursos d’água e, naqueles preponderantemente lênticos, considera-se toda a superfície como um reservatório natural para definição da APP no seu entorno. Na última hipótese, quando o nível da água estiver abaixo da cheia anual de referência, todas as áreas emersas serão consideradas como margens internas dos corpos hídricos estuarinos e, conseqüentemente, bens de uso comum do povo (cf. Figura 11).
Encostas	E1: Resolução adequada para definição de APP por declividade e tratamento da fragmentação.	Para resoluções inferiores a 5 m o número de fragmentos aumenta consideravelmente (Figura 21), sem que isso implique ganho significativo de área protegida (Figura 22), de forma que a resolução de 5 m pode ser adotada como padrão para análises técnicas envolvendo áreas protegidas em função da declividade. Obs.: método também aplicável para identificação de áreas de uso restrito (art. 11, Lei nº 12.651/2012).
Morro, monte, montanha e serra	M1: Definição da base da elevação: espelho d’água, planície adjacente ou ponto de sela.	A base será definida pelo “plano horizontal determinado por planície ou espelho d’água adjacente” (art. 4º, inciso IX, da Lei nº 12.651/2012) devendo esse ser considerado o critério preponderante a ser adotado. Subsidiariamente, por exceção, utilizar-se-á o critério definido para relevos ondulados (ponto de sela) quando no entorno da elevação não existirem espelhos d’água ou planícies adjacentes.
Morro, monte, montanha e serra	M2: Altura de elevações com espelho d’água adjacente.	Adota-se para base da elevação a cota do nível de referência do corpo hídrico (e.g., o nível médio dos mares para elevações em contato com o oceano).

Quadro A.1 – Síntese dos resultados para integração das lacunas técnico-normativas para definição precisa das áreas de preservação permanente (APPs) ao redor de olhos d’água e nascentes, em faixa marginal aos cursos d’água naturais, no entorno de reservatórios naturais, nas encostas e em topo de elevações. (conclusão)

TIPOLOGIA	LACUNA	SOLUÇÕES E PROPOSTAS
Morro, monte, montanha e serra	M3: Altura de elevações com planície adjacente.	Inicialmente, deve-se definir o contorno da elevação a partir da sua base hidrológica, adotando-se como planície as áreas contínuas com declividade até 10% (dez por cento), a qual consiste no critério historicamente fixado pelo CONAMA para feições de topografia plana (BRASIL, 1986b, 2002c). Para o cálculo da altura da elevação, considera-se sua base no ponto de transição entre as vertentes da elevação e a planície adjacente.
Morro, monte, montanha e serra	M4: Altura de elevações em relevos ondulados (<i>ponto de sela</i>).	Quanto não existir contato das vertentes do morro ou montanha com espelho d’água ou planície adjacente, a altura da elevação será calculada a partir do ponto de sela, o qual consiste no ponto de mínimo absoluto (i.e., de declividade nula) localizado na linha de cumeada entre duas elevações sucessivas ou no ponto de máximo absoluto na linha de contorno da base hidrológica de uma elevação (OLIVEIRA; FERNANDES FILHO, 2016). O ponto de sela sempre será um ponto estacionário localizado na linha de cumeada e no contorno comum das bases hidrológicas entre elevações vizinhas. As metodologias empregadas por Soares-Filho et al. (2014) e Oliveira e Fernandes Filho (2016) são suficientes para identificação de APPs em topos de elevações nos relevos ondulados.
Morro, monte, montanha e serra	M5: Resolução adequada para o cálculo da declividade média das elevações.	Como critério para discretização do relevo, visando garantir maior efetividade na identificação e proteção de espaços territoriais protegidos, sugere-se adotar a escala <i>mínima</i> de 1:10.000 (eq. 0,0001) ou a resolução matricial <i>máxima</i> de 5 m. <i>Observação:</i> lacuna conexa com o cálculo de declividade de APP nas encostas (E1).
Morro, monte, montanha e serra	M6: Resolução ou escala adequada para análise de APP em topos de morro.	A quantificação das APPs por topo de morro é muito sensível às alterações nas escalas e resolução do material topográfico. Com base nos resultados disponíveis na literatura (cf. HOTT; GUIMARÃES; MIRANDA, 2005; VICTORIA, 2010; SOARES-FILHO et al., 2014), deve-se adotar a escala mínima de 1:10.000 ou a resolução máxima de 5 m para modelos digitais de elevação.

Fonte: o autor.

APÊNDICE B – Métodos para delimitação da área de preservação permanente no topo de elevações

Em complemento à [subseção 2.7](#), neste Apêndice serão apresentados de forma sintática os métodos para delimitação da área de preservação permanente (APP) em topo de elevação. Considerando que o STJ não tem admitido a aplicação das disposições de legislação superveniente menos protetiva a fatos pretéritos, que devem observar a legislação vigente na época do evento danoso (cf. [subseção 2.1](#)), eventualmente pode ser necessário avaliar um determinado local em face da APP em topo de elevação definida na Lei nº 4.771/1965, regulamentada pelas Resoluções do CONAMA 4/1985 e 303/2002, sucessivamente. Nesse sentido, apresentar-se-á a forma de cálculo da APP de acordo com os parâmetros definidos na Lei nº 12.651/2012 (atual) e na legislação anterior.

B.1 ELEVAÇÕES COM BASE EM ESPELHO D'ÁGUA OU PLANÍCIE ADJACENTE

O conjunto de elevações ilustrado na [Figura B.1](#) servirão de estudo de caso para aplicação dos métodos para definição da APP em topo de elevações.

Uma elevação que possui uma planície adjacente não tem sua base definida por um rompimento nítido e constante do relevo, pois existe uma transição entre a planície e a encosta com curvas de nível com declividades transversais variáveis.

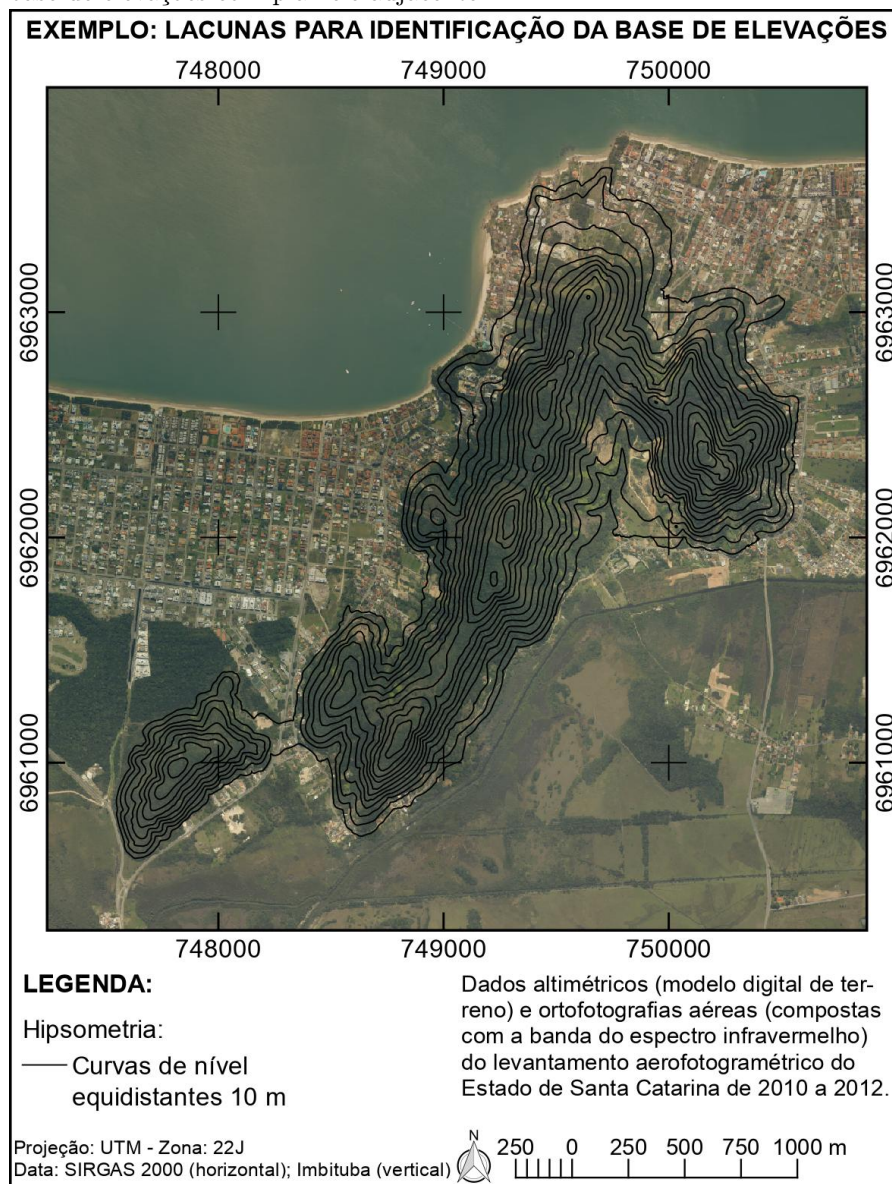
[Soares-Filho et al. \(2014\)](#) adota o método ilustrado na [Figura B.2](#) para delimitar as áreas de preservação permanente em topo de morro (*hilltop*), sendo informado no material suplementar os seguintes procedimentos:

They comprise the following steps [[Figura B.2](#)]: First, the elevation map is quantized into hypsometric slices. Contiguous slices are labeled as individual elevation patches. For each elevation patch, the algorithm calculates the mean elevation, slope, area, and neighboring patches. Each patch consists of a node that is inserted into a computer graph algorithm, which orders all nodes from local minima to local maxima, forming a tree graph. The algorithm then uses the CalcHillTop operator to analyze this graph and outputs tables of hilltops, hill heights, hill slopes, plateaus, and local minima and maxima. The CalcHillTop operator was designed by Leandro Lima for use in the Dinamica EGO software platform. Visual inspections of the three-dimensional (3D) digital terrain models indicated an accuracy of 80% for the mapping algorithm. Because of the high complexity of this algorithm and its sensitivity to spatial resolution and slicing threshold of the elevation map, we only calculated the relative impact (percent of reduction) of the new definition of HPAs. ([SOARES-FILHO et al., 2014](#), material suplementar, p. 8).

Conforme os arquivos de entrada do modelo definido para uso no programa *Dinamica EGO*, disponível com o material suplementar do artigo, observa-se que o critério

utilizado para definir a base das elevações perante a legislação atual²³ e anterior²⁴ é o ponto com declividade de $5,73^\circ$, equivalente a 10%.

Figura B.1 – Elevações situadas na zona costeira. Exemplo para fins de análise da definição da cota da base de elevações com planície adjacente.



Fonte: o autor com dados de [SC \(2014a,c\)](#).

Considerando que o CONAMA define a paisagem de topografia plana como aquela com declividade média inferior a dez por cento ([BRASIL, 2002c](#), art. 2º, inciso XI), valor também utilizado por [Soares-Filho et al. \(2014\)](#), pode-se adotá-lo para fins de definição do contorno da base de elevações com planície adjacente.

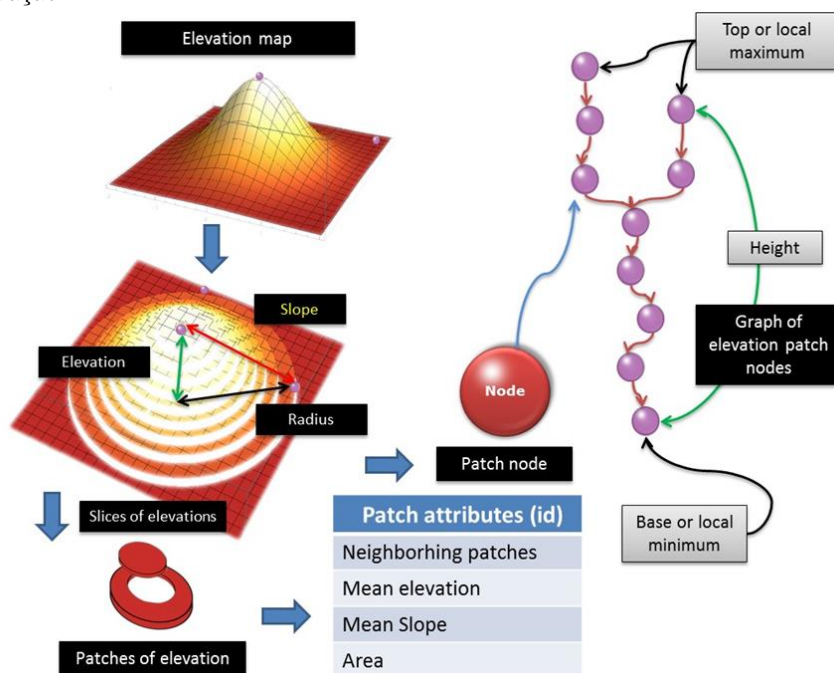
A partir dos métodos definidos por [Hott, Guimarães e Miranda \(2005\)](#) e [Oliveira e](#)

²³ Cf. [Soares-Filho et al. \(2014, material suplementar\)](#), arquivo: [2_brasil_hill_top_new_code_per_watershed_5.ego](#), linha 221.

²⁴ Cf. [Soares-Filho et al. \(2014, material suplementar\)](#), arquivo: [1_brasil_hill_top_old_code_per_watershed_5.ego](#), linha 221.

Fernandes Filho (2016), é possível estabelecer um procedimento para cálculo das APPs em topo de elevações com planícies adjacentes, utilizando-se como exemplo o caso retratado na Figura B.1.

Figura B.2 – Fluxograma do algoritmo desenvolvido por Soares-Filho et al. (2014) para mapear topo de elevação.



Fonte: Soares-Filho et al. (2014, material suplementar, Fig. S10).

B.1.1 Delimitação da base hidrológica das elevações

Inicialmente, deve-se identificar os espelhos d'água e planícies adjacentes às elevações. Para os espelhos d'água a tarefa é simples, mas no caso das planícies é necessário que as formas com declividade inferior a 10% sejam identificadas manualmente ou com assistência de alguma rotina geomorfológica. No caso, sugere-se utilizar a rotina *r.geomorphon* (JASIEWICZ; STEPINSKI, 2013), que integra o programa *GRASS GIS*, por meio da qual é possível classificar o relevo dentro de 10 formas (Figura B.3), sendo de interesse neste momento a forma plana (*flat*), definindo sua declividade limite como 5,71° (Figura B.4).

O próximo passo consiste em gerar a *base hidrológica* das elevações. Com a utilização de ferramentas de geoprocessamento, pode-se inverter o modelo digital de terreno (MDT) e empregá-lo em rotinas para gerar bacias hidrográficas:

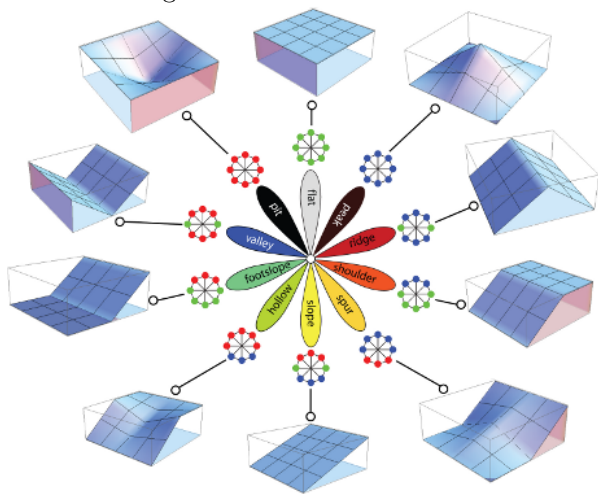
$$MDT_{inv} = -1 \cdot MDT \quad (B.1)$$

Como o MDT está invertido, a tendência é que o programa identifique cada vertente da elevação como uma bacia de contribuição (depressão com ponto de mínimo no cume). O resultado pode ser observado na Figura B.5 produzida no *GRASS GIS* por meio

da rotina *r.watershed* (EHLSCHLAEGER, 1989; METZ; MITASOVA; HARMON, 2011) já com o recorte do espelho d'água (oceano) e planície adjacente.

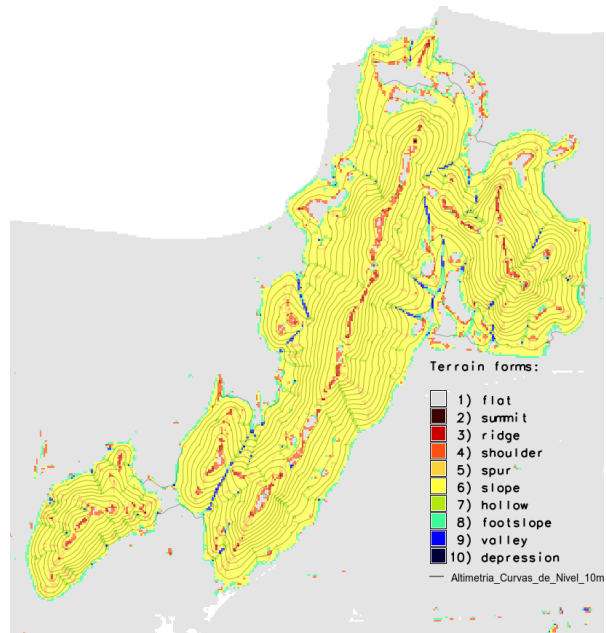
Posteriormente, realiza-se a fusão dos polígonos em torno de cada um dos cumes das elevações (*summit*) permitindo individualizá-las por meio das suas bases hidrológicas (linhas de contorno de cada polígono), conforme Figura B.6. É importante observar que o método é muito sensível à resolução do MDT e ao tamanho mínimo (*threshold*) atribuído às bacias de contribuição, podendo ser necessária a intervenção manual para ajuste das bases hidrológicas (cf. círculo branco pontilhado na Figura B.6).

Figura B.3 – Formas do relevo representadas pela rotina *r.geomorphon* disponível no programa GRASS GIS.



Fonte: Jasiewicz e Stepinski (2013) e GRASS Development Team (2020).

Figura B.4 – Definição da planície adjacente a elevações costeiras para valores de declividade até 10%.



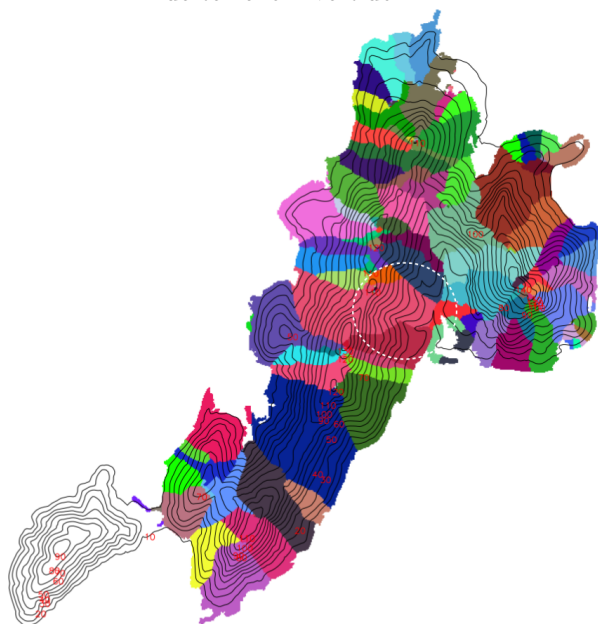
Fonte: o autor com dados de SC (2014c).

B.1.2 Cálculo da área de preservação permanente de acordo com a Lei nº 12.651/2012

Definida a base hidrológica de cada elevação, selecionam-se aquelas cuja altura mínima de 100 m entre o cume e a borda da planície (Figura B.7). Por meio da análise estatística do relevo no interior de cada elevação (Figura B.8), verifica-se se a condição de declividade é atendida: $\bar{\phi} > 25^\circ$ ($\approx 46,6\%$).

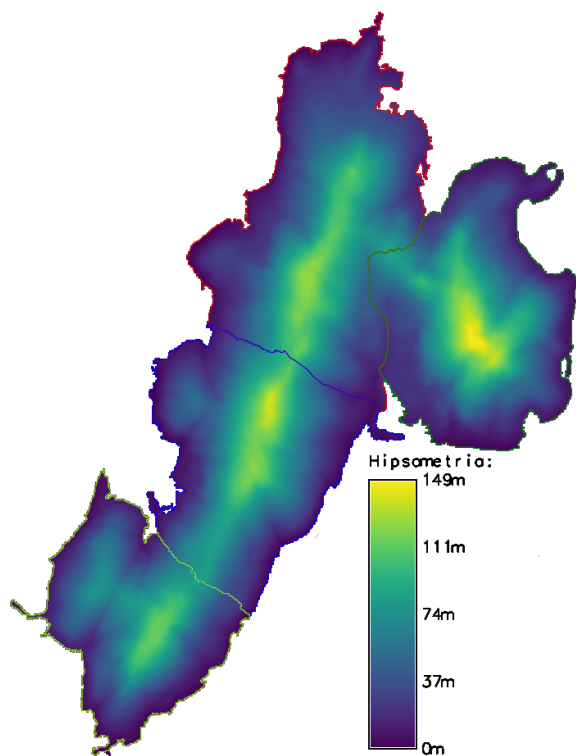
Para o caso das quatro elevações em análise, verifica-se que nenhuma obedece à condição de declividade mínima de 25° estabelecida no art. 4º, inciso IX, da Lei nº 12.651/2012, motivo pelo qual não possuem área de preservação permanente no topo de suas elevações (cf. Figura B.9).

Figura B.5 – Vertentes identificadas para as elevações por meio das bacias de contribuição obtidas a partir do modelo digital de terreno invertido.



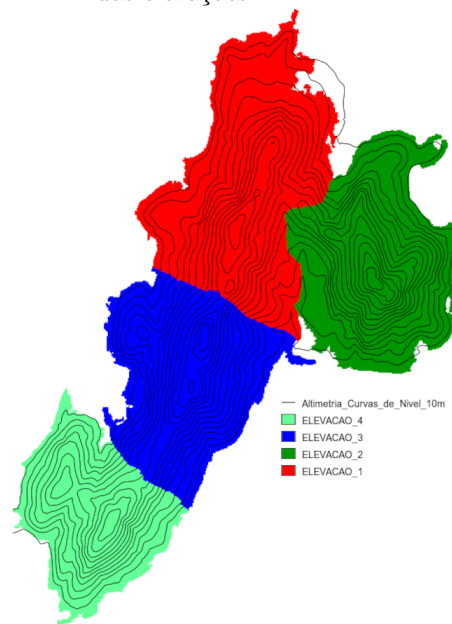
Fonte: o autor.

Figura B.7 – Hipsometria das elevações.



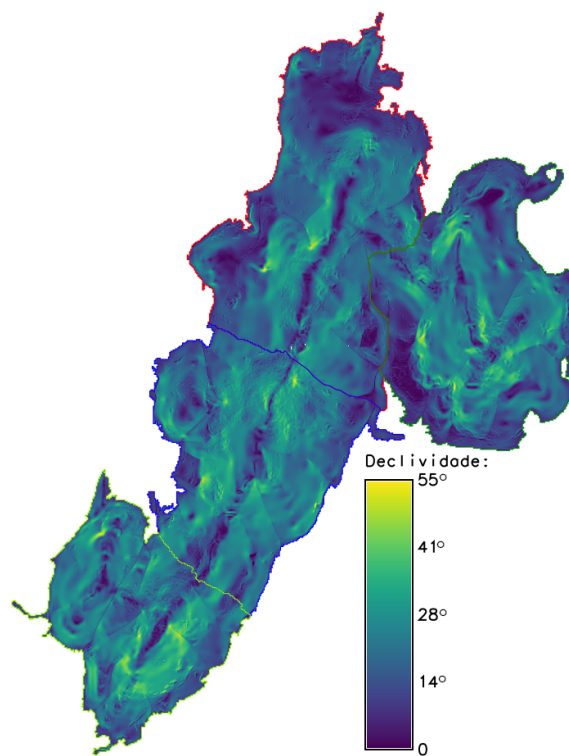
Fonte: o autor com dados de SC (2014c).

Figura B.6 – Base hidrológica das elevações, geradas a partir da fusão dos polígonos das vertentes formadas a partir dos cumes das elevações.



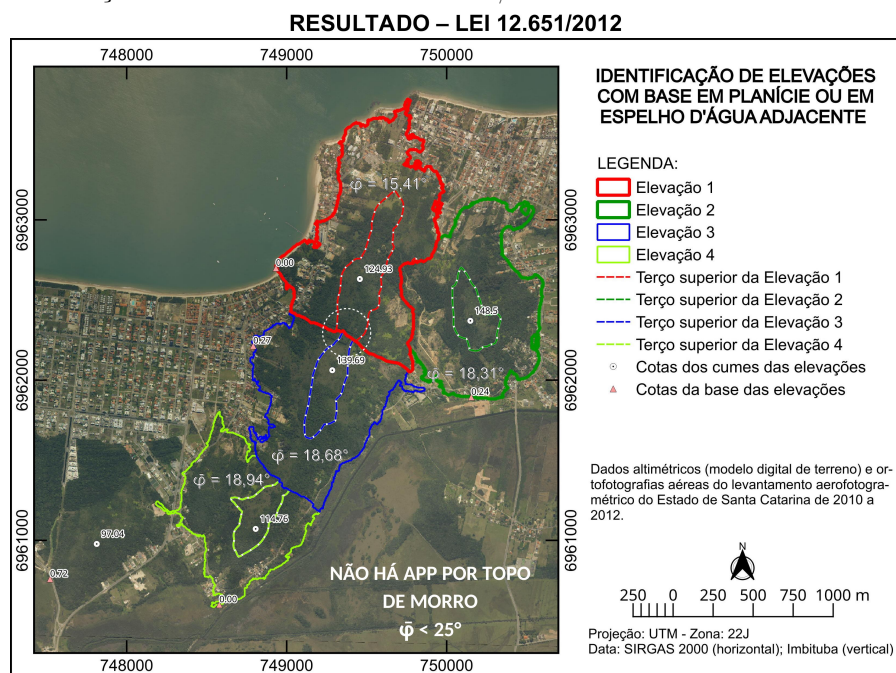
Fonte: o autor.

Figura B.8 – Declividade das elevações.



Fonte: o autor a partir dos dados de SC (2014c).

Figura B.9 – Resultado da aplicação dos critérios definidores da área de preservação permanente por topo de elevação estabelecidos na Lei nº 12.651/2012.



Fonte: o autor com dados de SC (2014a,c).

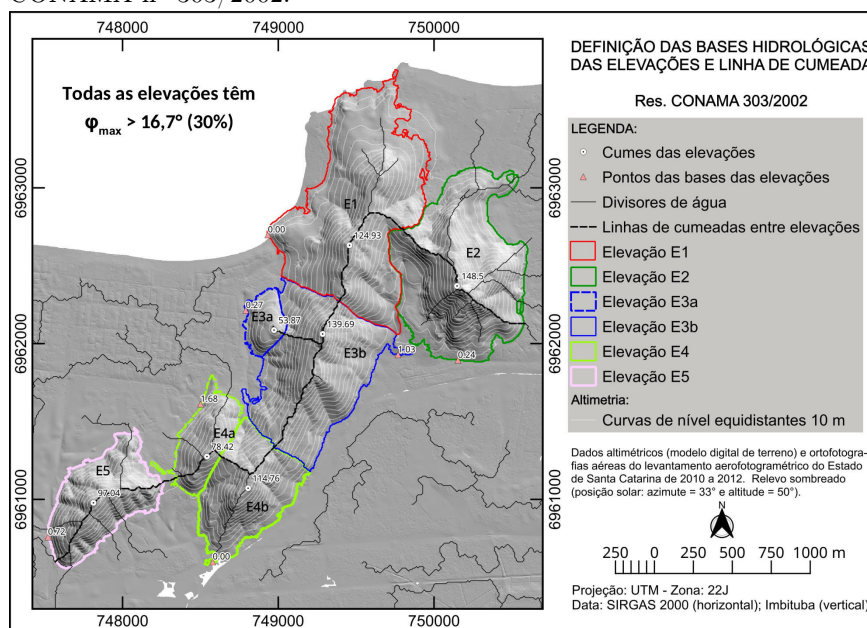
B.1.3 Cálculo da área de preservação permanente de acordo com a Lei nº 4.771/1965 e Resoluções do CONAMA nº 4/1985 e 303/2002: topo de elevações, conjunção de morros e linhas de cumeada

Considerando que o STJ não tem admitido a aplicação das disposições de legislação superveniente menos protetiva a fatos pretéritos, que devem observar a legislação vigente na época do evento danoso (cf. subseção 2.1), eventualmente pode ser necessário avaliar um determinado local em face da APP em topo de elevação definida na Lei nº 4.771/1965, regulamentada pelas Resoluções do CONAMA 4/1985 e 303/2002, sucessivamente.

Nesse sentido, utilizar-se-á o exemplo anterior (Figuras B.4 a B.9) para apresentar o procedimento para o cálculo das APPs em topo de elevações, linha de cumeada e conjunção de morros definidas pela legislação ambiental vigente até a publicação do Código Florestal de 2012.

O procedimento para obter a base hidrológica de cada elevação é o mesmo que foi representado nas Figuras B.4 a B.6, com a diferença que são selecionadas para análise na fase posterior aquelas elevações com altura igual ou superior a 50 m. Para morros com altura entre 50 e 300 m é exigido que a encosta possua declividade maior do que 30% na *linha de maior declividade* ($\phi_{max} > 30\% \approx 16,7^\circ$). Aplicando-se as condições de altimetria e declividade, são identificados sete morros com APP em seus terços superiores (Figura B.10).

Figura B.10 – Base hidrológica e linha de cumeada (divisores de águas) de elevações sujeitas à área de preservação permanente no terço superior conforme critérios definidos pela Resolução do CONAMA n^o 303/2002.



Fonte: o autor com dados de SC (2014c).

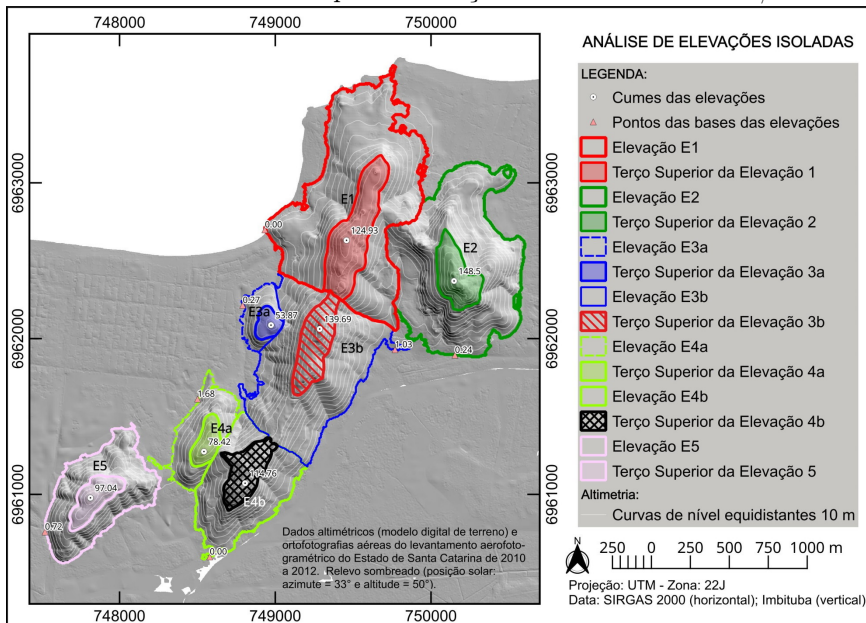
Quando são geradas as vertentes das elevações por rotinas de identificação de bacias hidrográficas (cf. Figura B.5), aproveita-se para gerar a rede de fluxo (*stream*) dessas bacias. Como o MDT encontra-se invertido, a rede gerada coincide com os divisores de água entre as vertentes, o que auxilia na elaboração das linhas de cumeada que unem o cume de elevações sucessivas, também representadas na Figura B.10.

As áreas de preservação permanente no terço superior das *elevações isoladas* são apresentadas na Figura B.11. Contudo, nas Resoluções do CONAMA n^o 4/1985 e 303/2002, existia o critério da *conjunção de morros ou montanhas*, por meio do qual o espaço protegido era calculado pela elevação de menor altura quando seus cumes estivessem a menos de 500 m de distância um do outro. O procedimento consistia em analisar a vizinhança de cada elevação para identificar agrupamentos e depois traçar a APP pela cota equivalente a 2/3 (dois terços) da altura em relação à base da menor elevação (Figura B.12).

E, por último, para definir a APP em *linha de cumeada*, deve-se identificar a elevação com cume mais baixo, cuja curva de nível correspondente à 2/3 da altura em relação à sua base definirá o contorno do espaço protegido numa extensão de até 1000 m a partir daquele cume, medido seguindo a linha do divisor de águas. No exemplo em análise, a menor elevação é E3a, cujo cume é identificado como ponto C na Figura B.13. Note-se que a linha de cumeada ao chegar no cume do morro E3b bifurca-se em direção às elevações E1 e E4b. Neste caso, o comprimento da cumeada é medido de forma independente para cada seguimento a partir do ponto C, formando a APP na linha de cumeada C1 (cf. Figura B.13). O fechamento do espaço protegido ao final do seguimento de 1000 m da linha de cumeada é realizado considerando o caminho natural da drenagem para cada

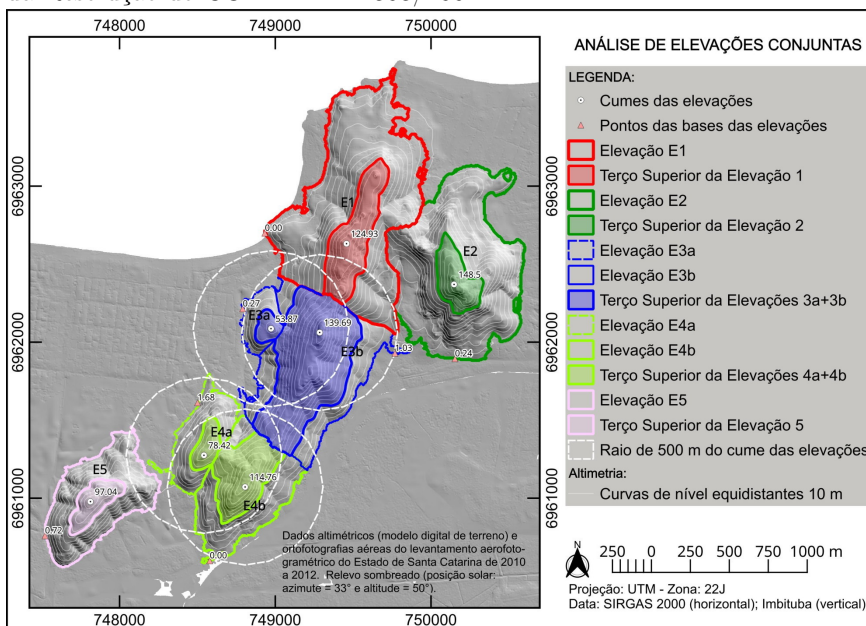
vertente em direção à base em cada lado da elevação a partir do ponto final da linha de cumeadas, i.e., não se utiliza um reta transversal à cumeadas, mas se define o limite dentro de uma concepção hidrológica.

Figura B.11 – Área de preservação permanente no terço superior de elevações identificadas individualmente, conforme critérios definidos pela Resolução do CONAMA nº 303/2002.



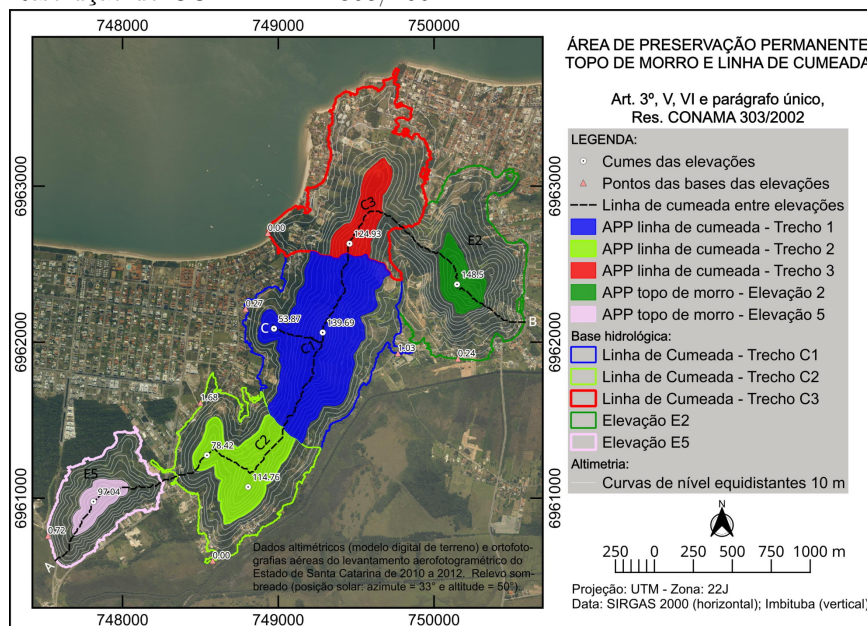
Fonte: o autor com dados de SC (2014c).

Figura B.12 – Área de preservação permanente no terço superior de elevações conjuntas com cume separados por distâncias inferiores a 500 m, conforme definido no art. 3º, parágrafo único, da Resolução do CONAMA nº 303/2002.



Fonte: o autor com dados de SC (2014c).

Figura B.13 – Área de preservação permanente no terço superior de elevações ($E2$ e $E5$) e em linhas de cumeada ($C1$, $C2$ e $C3$), conforme definido no art. 3º, incisos V e VI e parágrafo único, da Resolução do CONAMA nº 303/2002.



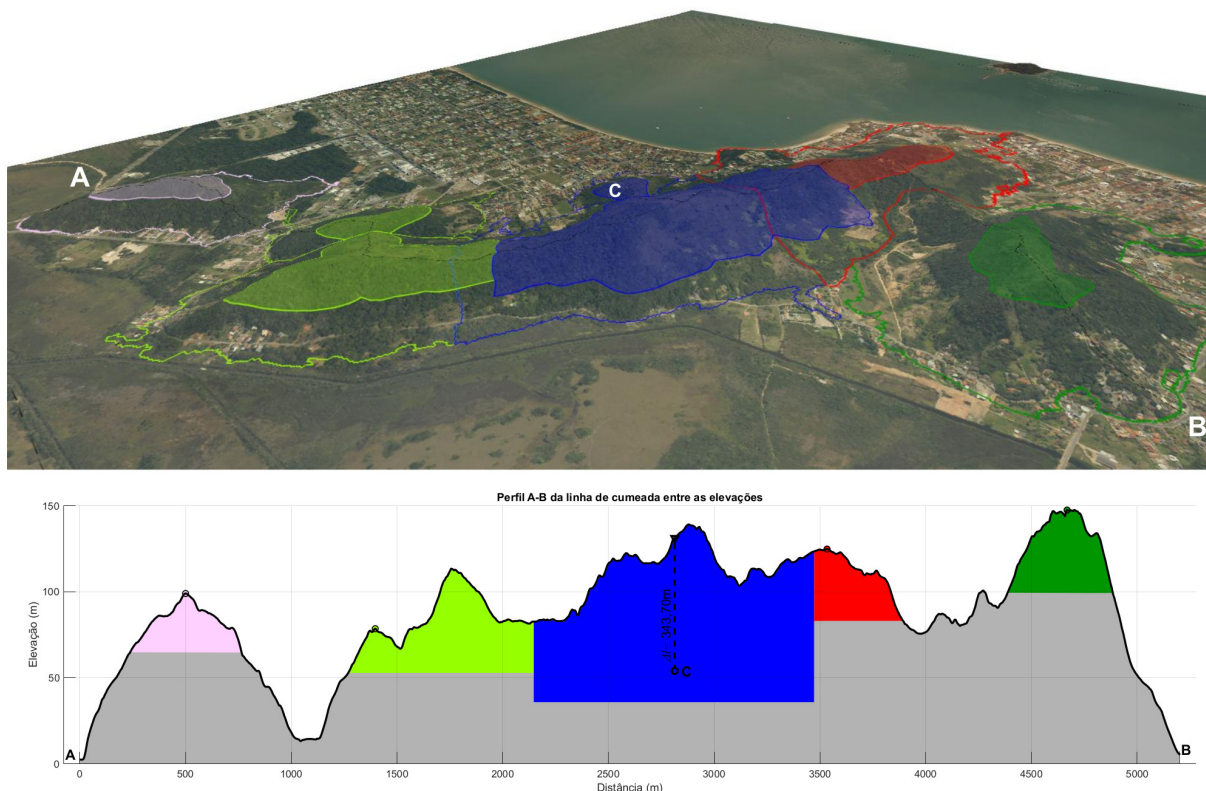
Fonte: o autor com dados de [SC \(2014c\)](#).

Definido o final do primeiro seguimento de 1000 m da cumeada, o próximo passo é seguir para cada área vizinha adotando-se como contorno do espaço protegido a curva de nível correspondente à APP da elevação mais próxima. Não necessariamente será o cume mais próximo, pois se entre esse e o subsequente a distância for inferior a 500 m, deve-se adotar para cálculo da APP o mais baixo, devido ao critério de junção de morros (cf. [Figura B.12](#)). No exemplo em análise, ao sul da linha de cumeada $C1$ o cume do morro $E4b$ está mais próximo do que o cume de $E4a$, contudo eles distam um do outro menos de 500 m, de forma que a APP é definida pela altura de $E4a$, por tratar-se da elevação mais baixa no seguimento da cumeada $C2$ (cf. [Figura B.13](#)).

Observe-se que o divisor de águas entre os cumes dos morros $E4a$ e $E5$ forma uma sela com altimetria inferior à cota da APP de cada uma das elevações isoladas. O mesmo ocorre entre os cumes dos morros $E1$ e $E2$. Nesse caso, a APP de linha de cumeada é interrompida, sendo a próxima cadeia de elevações tratada de forma independente ([Figura B.14](#)). No exemplo em análise, os morros $E2$ e $E5$ têm suas APPs definidas como elevações individuais, enquanto a APP da linha de cumeada $C3$ é definida pela cota do terço superior da elevação $E1$.

O método definido nas Resoluções do CONAMA nº 4/1985 e 303/2002 para definição da APP em topo de elevações era aplicável para qualquer tipo de relevo. Atualmente, a Lei nº 12.651/2012 instituiu o método do ponto de sela para elevações que não possuem base em espelho d'água ou planície adjacente, o qual será objeto de análise a seguir.

Figura B.14 – Visualização tridimensional e perfil da área de preservação permanente no terço superior de elevações (*E2* e *E5*) e em linhas de cumeadas (*C1*, *C2* e *C3*), conforme definido no art. 3º, incisos V e VI e parágrafo único, da Resolução do CONAMA nº 303/2002.



Fonte: o autor com dados de [SC \(2014a,c\)](#).

B.2 ELEVAÇÕES COM BASE EM RELEVO ONDULADO

Na legislação anterior a 2012, o CONAMA estabelecia a base nos relevos ondulados como a cota da *depressão mais baixa ao redor da elevação* e a Lei nº 12.651/2012 estabelece a cota do ponto de sela mais próximo da elevação. A aplicação do critério do ponto de sela para definição da base de elevações em relevo ondulados é aplicável somente para casos em análise perante a Lei nº 12.651/2012. Para os casos regidos pela legislação anterior, os critérios para definir a APP no topo de elevações são uniformes para qualquer tipo de relevo e foram abordados na [subseção B.1.3](#).

Especificamente, o art. 4º, inciso IX, da Lei nº 12.651/2012, foi expresso ao prever que a base será definida pelo “plano horizontal determinado por planície ou espelho d’água adjacente” devendo esse ser considerado o critério preponderante a ser adotado. Subsidiariamente, por exceção, utilizar-se-á o critério definido para relevos ondulados (ponto de sela) *quando no entorno da elevação não existirem espelhos d’água ou planícies adjacentes*.

Na literatura, há dois métodos que se destacam para o cálculo de APP em relevos ondulados. Apesar do material complementar de [Soares-Filho et al. \(2014\)](#) não fornecer o código fonte da rotina desenvolvida para o cálculo das APP em topo de elevação, observa-se, a partir da descrição da metodologia ([Figura B.2](#)), que ao identificar ao redor de cada cume

polígonos circunvizinhos em “fatias” hipsométricas contínuas, é esperado que os pontos de sela sejam reconhecidos quando a rotina tentar gerar “fatias” para cotas inferiores ao ponto estacionário verticalmente mais próximo do cume, que ficarão descontínuas.

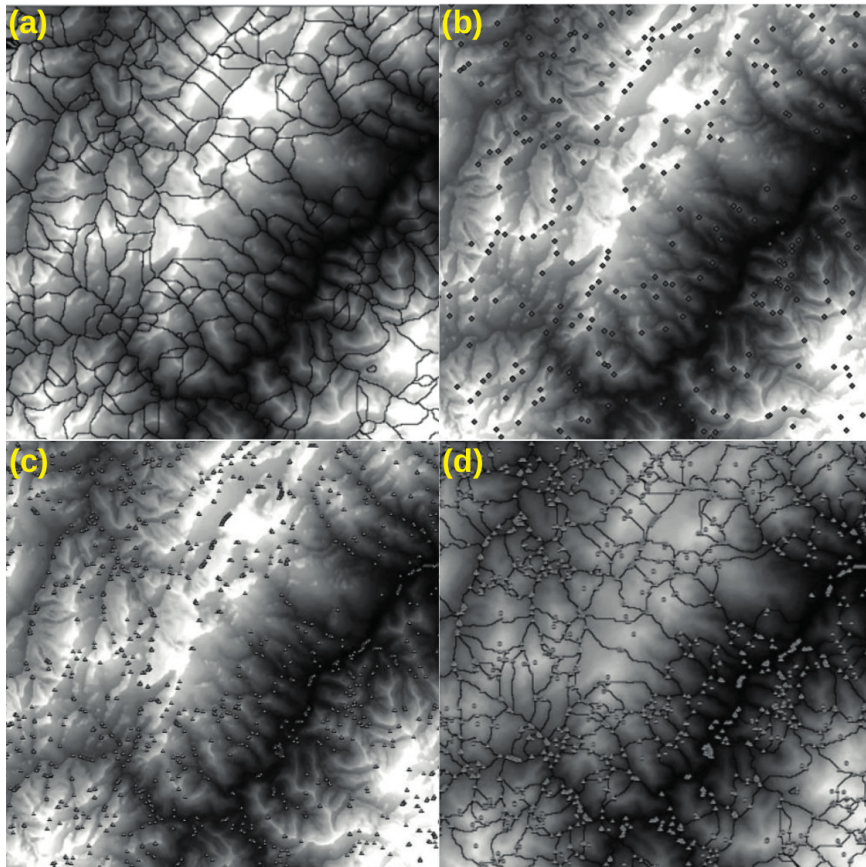
Oliveira e Fernandes Filho (2016) para relevos ondulados utilizam uma outra abordagem, que separa as elevações a partir de uma concepção hidrológica (fluxo das vertentes derivado dos cumes) similar ao método de Hott, Guimarães e Miranda (2005), para no momento seguinte realizar uma série de análises até obter os pontos de sela e os polígonos das áreas de preservação permanente. O método pode ser resumido nas seguintes etapas:

- 1^a. A partir da análise hidrológica da superfície define-se os *limites de cada elevação* (i.e., seu domínio), cujo contorno é a *base hidrológica* da elevação (Figura B.15a);
- 2^a. Para cada elevação o ponto de máximo absoluto dentro do seu domínio corresponde ao *cume* (Figura B.15b);
- 3^a. O *ponto de sela* é identificado como o ponto de máximo altimétrico nos limites do contorno da elevação (Figura B.15c). Neste método considera-se a proximidade na direção vertical (Δh) para definição do ponto de sela;
- 4^a. De conhecimento da cota do cume (C_{CUME}) e do ponto de sela (C_{SELA}), pode-se calcular a *altura* (h) de cada elevação (Figura B.15d);
- 5^a. Delimita-se a parcela da elevação de altura h , ou seja, o terreno com altimetria superior à cota do ponto de sela (C_{SELA}), que constituirá um subdomínio da elevação definida na primeira etapa (Figura B.16a, p. 273);
- 6^a. Encontrados os subdomínios com as elevações definidas pelo ponto de sela, realiza-se a análise estatística do terreno para selecionar (filtrar) somente aquelas elevações cuja *declividade média* ($\bar{\phi}$) da superfície seja maior que 25° ou 46,6% (Figura B.16b, p. 273);
- 7^a. Uma vez selecionadas as elevações que obedecem à condição de declividade ($\bar{\phi} > 25^\circ$), aplica-se o *requisito de altura mínima* ($h > 100$ m) e seleciona-se somente as elevações cuja altura seja superior a 100 m (Figura B.16c, p. 273);
- 8^a. As elevações remanescentes das etapas anteriores estão sujeitas à proteção ambiental de seus topos, então se calcula a cota da *área de preservação permanente* (terço superior) para o topo de cada elevação (C_{APP}) e delimita-se dentro de cada subdomínio o espaço territorial especialmente protegido (Figura B.16d, p. 273);

$$C_{APP} = C_{CUME} - \frac{C_{CUME} - C_{SELA}}{3} \quad (\text{B.2})$$

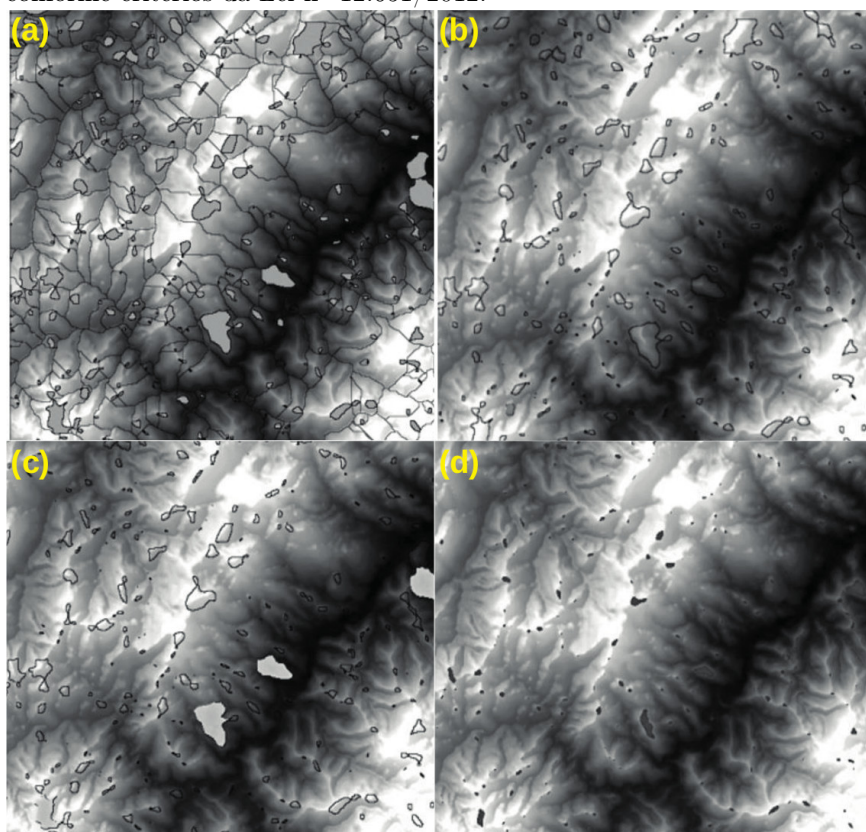
Os métodos empregados por Soares-Filho et al. (2014) e Oliveira e Fernandes Filho (2016) são suficientes para fins de identificação de área de preservação permanente no topo de elevação que não possua vertente com sopé em espelho d’água ou planície adjacente.

Figura B.15 – Método para identificação de áreas de preservação permanente no topo de elevações desenvolvido por [Oliveira e Fernandes Filho \(2016\)](#). Etapas 1 a 4. (a) Limite da base hidrológica de cada elevação. (b) Definição do cume de cada elevação. (c) Identificação dos pontos de sela. (d) Concatenação dos dados das etapas anteriores para cálculo da altura (h) de cada elevação.



Fonte: adaptado de [Oliveira e Fernandes Filho \(2016\)](#).

Figura B.16 – Método para identificação de áreas de preservação permanente no topo de elevações desenvolvido por [Oliveira e Fernandes Filho \(2016\)](#). Etapas 5 a 8. (a) Delimitação da parcela de cada elevação com altimetria superior à cota do ponto de sela. (b) Filtragem das elevações com declividade média superior a 25° . (c) Seleção das elevações com altura igual ou superior a 100 m. (d) Áreas de preservação permanente nos topos das elevações conforme critérios da Lei nº 12.651/2012.



Fonte: adaptado de [Oliveira e Fernandes Filho \(2016\)](#).

APÊNDICE C – Rotinas desenvolvidas para análise de seções transversais

C.1 PREPARAÇÃO DOS DADOS

C.1.1 Estrutura dos diretórios com o banco de dados individualizado por estações

Os dados do Sistema de Informações Hidrológicas (*HIDROWEB*), fornecidos pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), necessitam ser convertidos e filtrados para formar o banco de dados do programa *HidroAPP*.

Na fase de preparação de dados, os perfis topográficos das seções transversais são estendidos a partir de modelos digitais de elevação (MDE), os quais durante o processamento individuais das estações são acoplados às margens das seções transversais medidas pela ANA (cf. [subseção 5.1.8](#)).

A [Figura C.1](#) apresenta a estrutura típica do diretório com o banco de dados individualizado por estações após a fase de preparação de dados.

O ambiente de desenvolvimento é organizado a partir do diretório raiz (*HIDROAPP/*) formado pela estrutura de subdiretórios de primeira ordem representada na [Figura C.1](#).

C.1.2 Fluxograma da fase de preparação dos dados

As [Figuras C.2](#) a [C.4](#) apresentam o fluxograma dos procedimentos e rotinas empregadas para preparação dos dados, cujas localizações (*hiperlinks*) dos códigos-fonte das rotinas desenvolvidas estão informadas no [Quadro C.1](#).

C.1.3 Códigos-fonte das rotinas desenvolvidas para preparação dos dados

O [Quadro C.1](#) apresenta as rotinas desenvolvidas para a fase de preparação de dados, acompanhadas de descrição sucinta e *hiperlink* para acessá-las. No preâmbulo do código-fonte de cada função desenvolvida há uma seção de ajuda com o detalhamento do objetivo da função, suas variáveis de entrada e saída, bem como comentários úteis para o seu uso.

Figura C.1 – Estrutura do diretório raiz do ambiente de desenvolvimento do programa para análise de seções transversais.

```

HIDROAPP/
|-- ANA_-_PREPARACAO_DOS_DADOS_BACIAS_SEPARADAS
|
|-- HIDROAPP_2019_BC_1a3
|   |-- ANA_BD_HIDROWEB
|   |   Banco de dados original fornecido pela ANA no formato MDB
|   |   para as bacias 1 a 3
|   |-- ANA_BD_HIDROWEB_CSV
|   |   Banco de dados original fornecido pela ANA separado por
|   |   tabelas no formato CSV para as bacias 1 a 3
|   |-- ANA_BD_HIDROWEB_FILTRADO
|   |   Banco de dados com variáveis filtradas
|   |   para as bacias 1 a 3
|   |-- DADOS_ESTACOES
|   |   Banco de dados filtrado com tabelas em arquivos individuais
|   |   por estação para as bacias 1 a 3
|
|-- HIDROAPP_2019_BC_4a5
|   |-- ANA_BD_HIDROWEB
|   |   Banco de dados original fornecido pela ANA no formato MDB
|   |   para as bacias 4 a 5
|   |-- ANA_BD_HIDROWEB_CSV
|   |   Banco de dados original fornecido pela ANA separado por
|   |   tabelas no formato CSV para as bacias 4 a 5
|   |-- ANA_BD_HIDROWEB_FILTRADO
|   |   Banco de dados com variáveis filtradas
|   |   para as bacias 4 a 5
|   |-- DADOS_ESTACOES
|   |   Banco de dados filtrado com tabelas em arquivos individuais
|   |   por estação para as bacias 4 a 5
|
|-- HIDROAPP_2019_BC_6a9
|   |-- ANA_BD_HIDROWEB
|   |   Banco de dados original fornecido pela ANA no formato MDB
|   |   para as bacias 6 a 9
|   |-- ANA_BD_HIDROWEB_CSV
|   |   Banco de dados original fornecido pela ANA separado por
|   |   tabelas no formato CSV para as bacias 6 a 9
|   |-- ANA_BD_HIDROWEB_FILTRADO
|   |   Banco de dados com variáveis filtradas
|   |   para as bacias 6 a 9
|   |-- DADOS_ESTACOES
|   |   Banco de dados filtrado com tabelas em arquivos individuais
|   |   por estação para as bacias 6 a 9
|
|-- DADOS_ESTACOES
|   Banco de dados filtrado com tabelas em arquivos individuais
|   por estação para todas as bacias
|
|-- INFORMACOES/
|   Informações e anotações produzidas
|
|-- src/
|   Códigos-fonte produzidos

```

Fonte: o autor.

Figura C.2 – Fluxograma da fase de preparação dos dados fornecidos pela ANA. Parte 1 de 3.

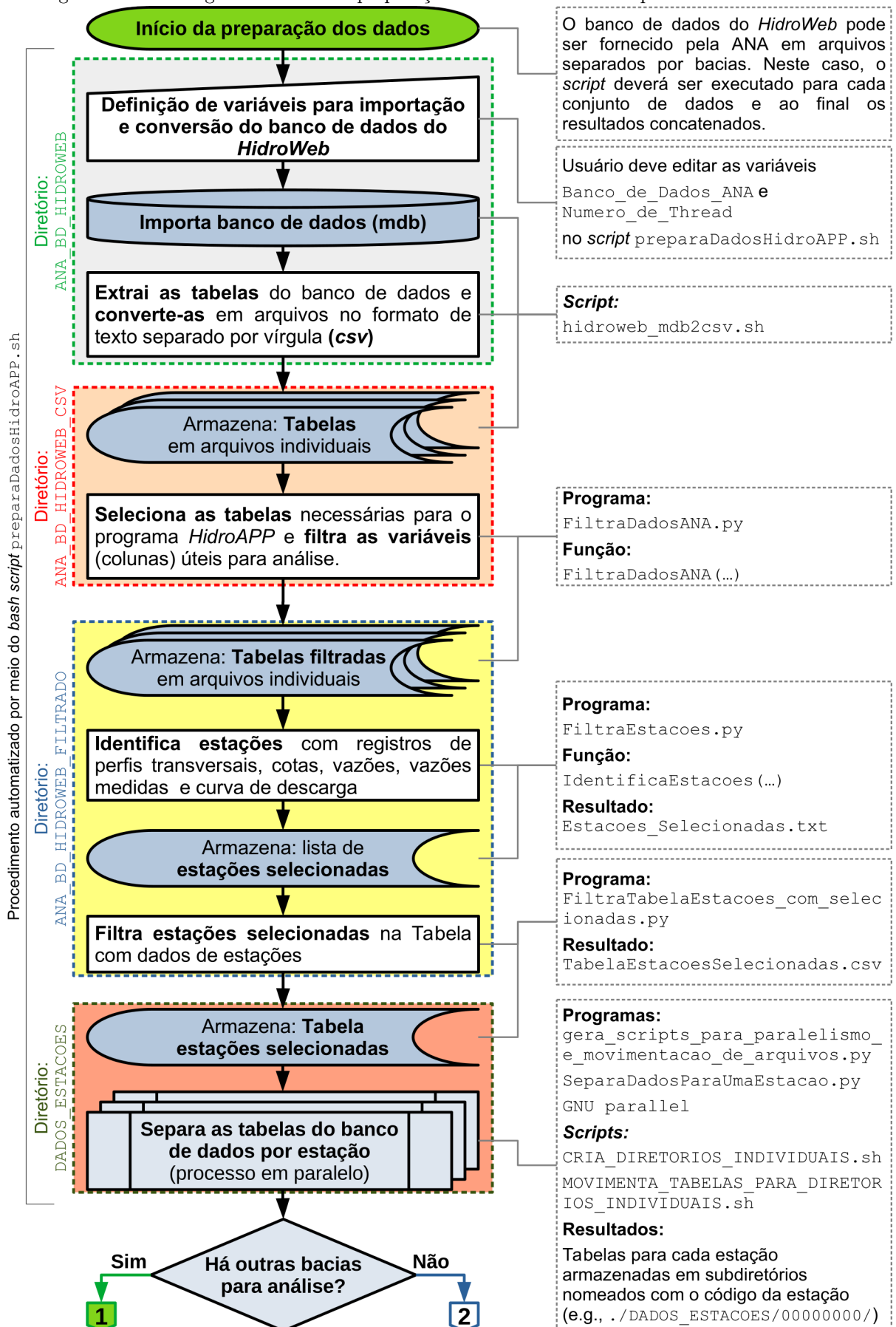


Figura C.3 – Fluxograma da fase de preparação dos dados fornecidos pela ANA. Parte 2 de 3.

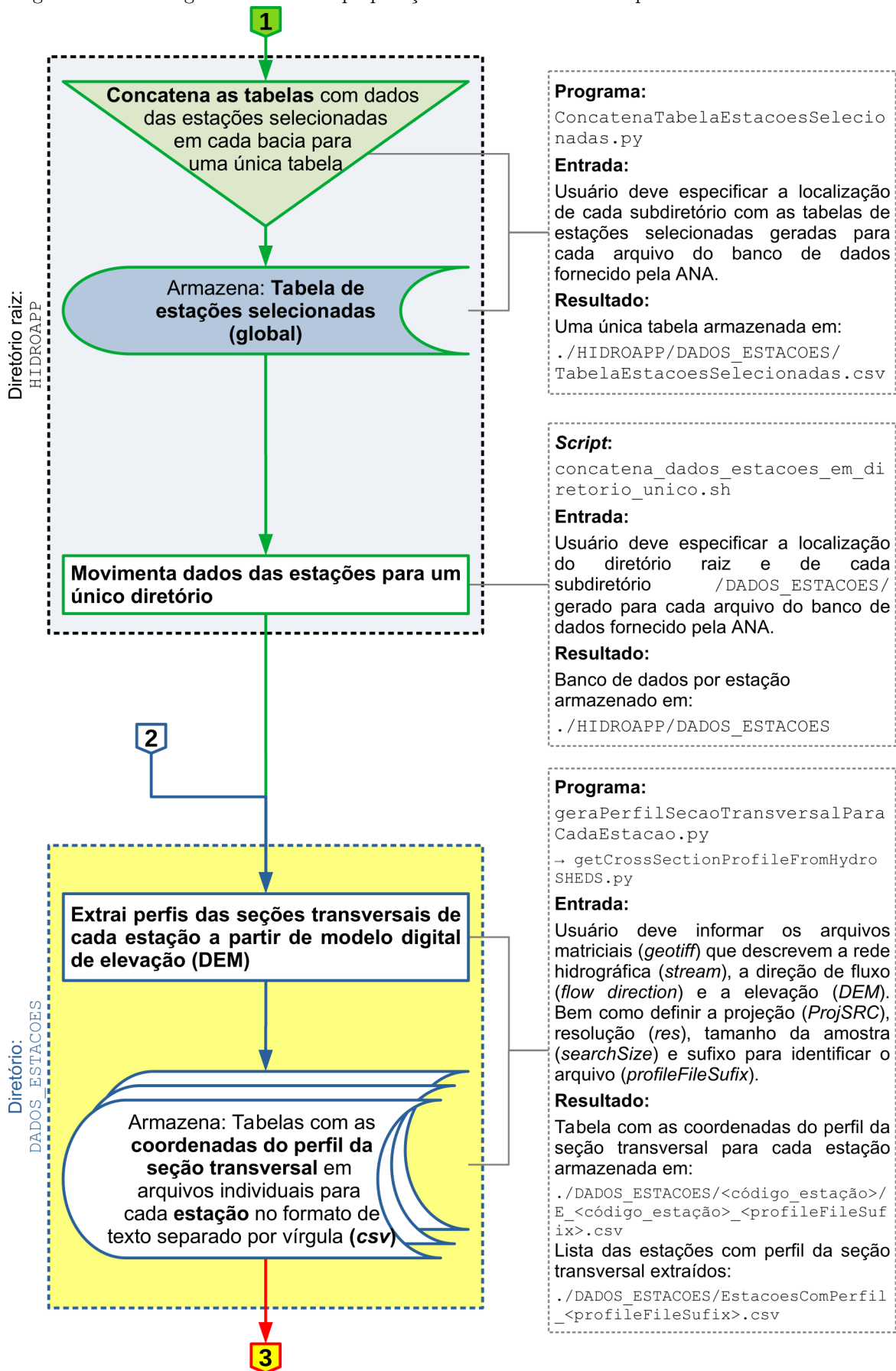
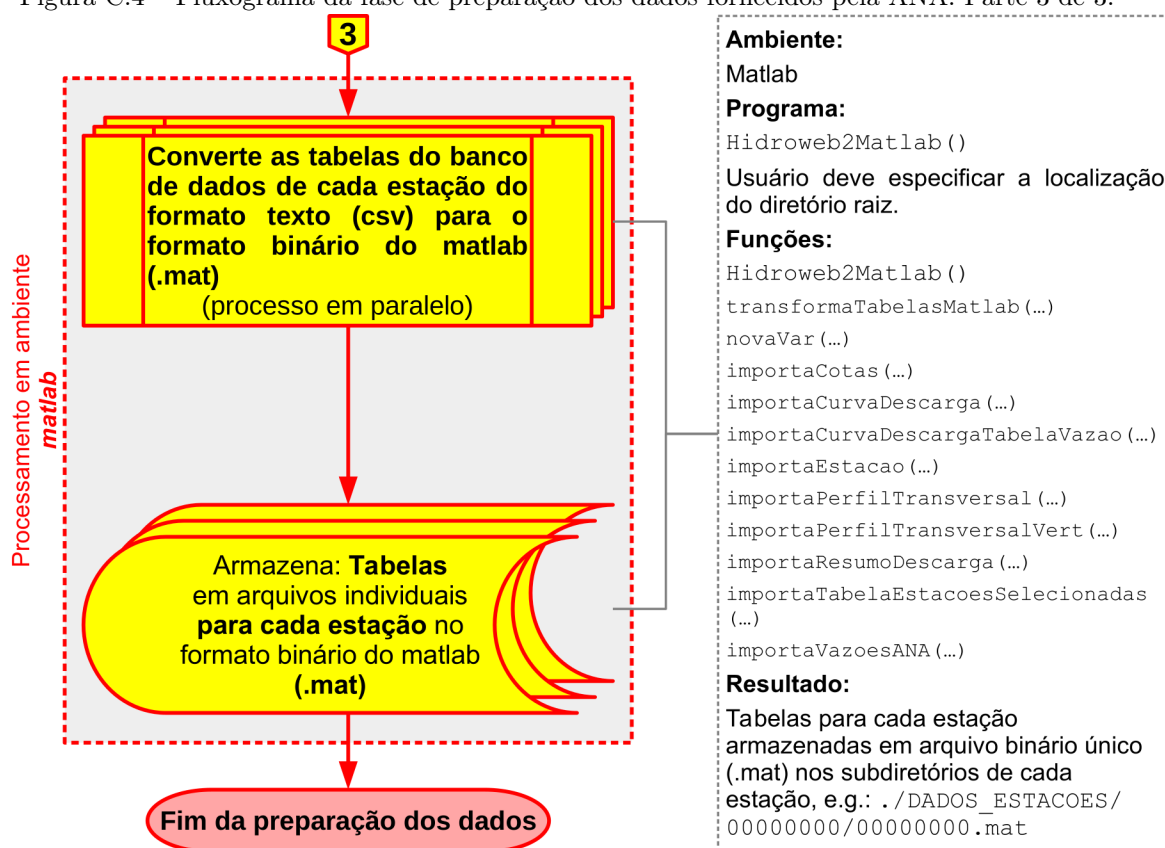


Figura C.4 – Fluxograma da fase de preparação dos dados fornecidos pela ANA. Parte 3 de 3.



Fonte: o autor.

Quadro C.1 – Programas e funções desenvolvidas para fase de preparação dos dados.

ARQUIVO / <i>HIPERLINK</i>	DESCRIÇÃO
preparaDadosHidroAPP.sh	<i>Script</i> para preparação dos dados do <i>HidroWeb</i> para análise no programa <i>HidroAPP</i> .
hidroweb_mdb2csv.sh	<i>Script</i> para extração de tabelas do banco de dados do <i>HidroWeb</i> .
FiltraDadosANA.py	Filtragem das tabelas do <i>HidroWeb</i> úteis para o programa <i>HidroAPP</i> .
FiltraEstacoes.py	Identificação de estações com registros de perfis transversais, cotas, vazões, vazões medidas e curva de descarga.
FiltraTabelaEstacoes_com_selecionadas.py	Filtragem das estações selecionadas na Tabela com dados de estações.
gera_scripts_para_paralelismo_e_movimentacao_de_arquivos.py	Identificação de estações com registros de perfis transversais, cotas, vazões, vazões medidas e curva de descarga.
ConcatenaTabelaEstacoesSelecionadas.py	Concatenação das tabelas com dados das estações selecionadas em cada bacia para uma única tabela.
concatena_dados_estacoes_em_diretorio_unico.sh	Movimenta dados das estações para um único diretório.
geraPerfilSecaoTransversaParaCadaEstacao.py	Rotina para extrair os perfis das seções transversais de cada estação a partir de modelos digitais de terreno.
getCrossSectionProfileFromHydroSHEDS.py	Rotina para obter a seção transversal de um rio a partir dos dados de hidrografia em formato matricial.
Hidroweb2Matlab.m	Conversão das tabelas do banco de dados para o formato binário do <i>matlab</i> (.mat).
transformaTabelasMatlab.m	Conversão das tabelas do banco de dados para o formato binário do <i>matlab</i> (.mat) para uma única estação.
importaCotas.m	Importa a tabela de cotas no formato .csv para o ambiente <i>matlab</i> *.
importaCurvaDescarga.m	Importa a tabela geral de curvas-chave no formato .csv para o ambiente <i>matlab</i> *.
importaCurvaDescargaTabelaVazao.m	Importa tabela, com as curvas-chave declaradas matricialmente, no formato .csv para o ambiente <i>matlab</i> *.
importaEstacao.m	Importa tabela, com as características gerais das estações, no formato .csv para o ambiente <i>matlab</i> *.
importaPerfilTransversal.m	Importa tabela, com os registros de levantamento de perfis transversais, no formato .csv para o ambiente <i>matlab</i> *.
importaPerfilTransversalVert.m	Importa tabela, com as coordenadas de cada registro de levantamento de perfis transversais, no formato .csv para o ambiente <i>matlab</i> *.
importaResumoDescarga.m	Importa tabela, com os registros de levantamentos de campo de cotas e vazões, no formato .csv para o ambiente <i>matlab</i> *.
importaTabelaEstacoesSelecionadas.m	Importa tabela, com as estações selecionadas para análise a partir da primeira filtragem do banco de dados, no formato .csv para o ambiente <i>matlab</i> *.
importaVazoesANA.m	Importa a tabela de vazões no formato .csv para o ambiente <i>matlab</i> *.
identificaEstacoesEmPontes.py	Identifica a partir da tabela <i>Estacao.csv</i> , extraída do <i>HidroWeb</i> , os registros de estações cuja palavra (<i>string</i>) "ponte" aparece nos campos (colunas) <i>Nome</i> , <i>Descricao</i> e <i>Historico</i> . É utilizado para excluir essas estações das análises realizadas (cf. subseção 4.1.6).

Nota: *Função desenvolvida com o auxílio da ferramenta *import tool* do *matlab*.

Fonte: o autor.

C.2 ANÁLISE INDIVIDUAL DE CADA ESTAÇÃO

C.2.1 Fluxograma da fase de análise individual

O fluxograma representando o procedimento detalhado de análise individual das estações podem ser observados nas figuras [C.5](#) e [C.13](#).

C.2.2 Variáveis para definição dos critérios de análise dos dados

A análise individual dos dados das estações é gerenciada por meio do programa *HidroAPP*, onde o usuário define os critérios para análise por meio das variáveis apresentadas no [Quadro C.2](#).

C.2.3 Códigos-fonte das rotinas desenvolvidas para fase de análise individual

Os códigos-fonte das rotinas desenvolvidas para fase de análise individual dos dados das estações fluviométricas, representadas nos fluxogramas das Figuras [C.5](#) a [C.13](#), podem ser acessados por meio dos *hiperlinks* informados no [Quadro C.3](#).

Figura C.5 – Fluxograma da fase de análise individual dos dados para cada estação. Parte 1 de 9.

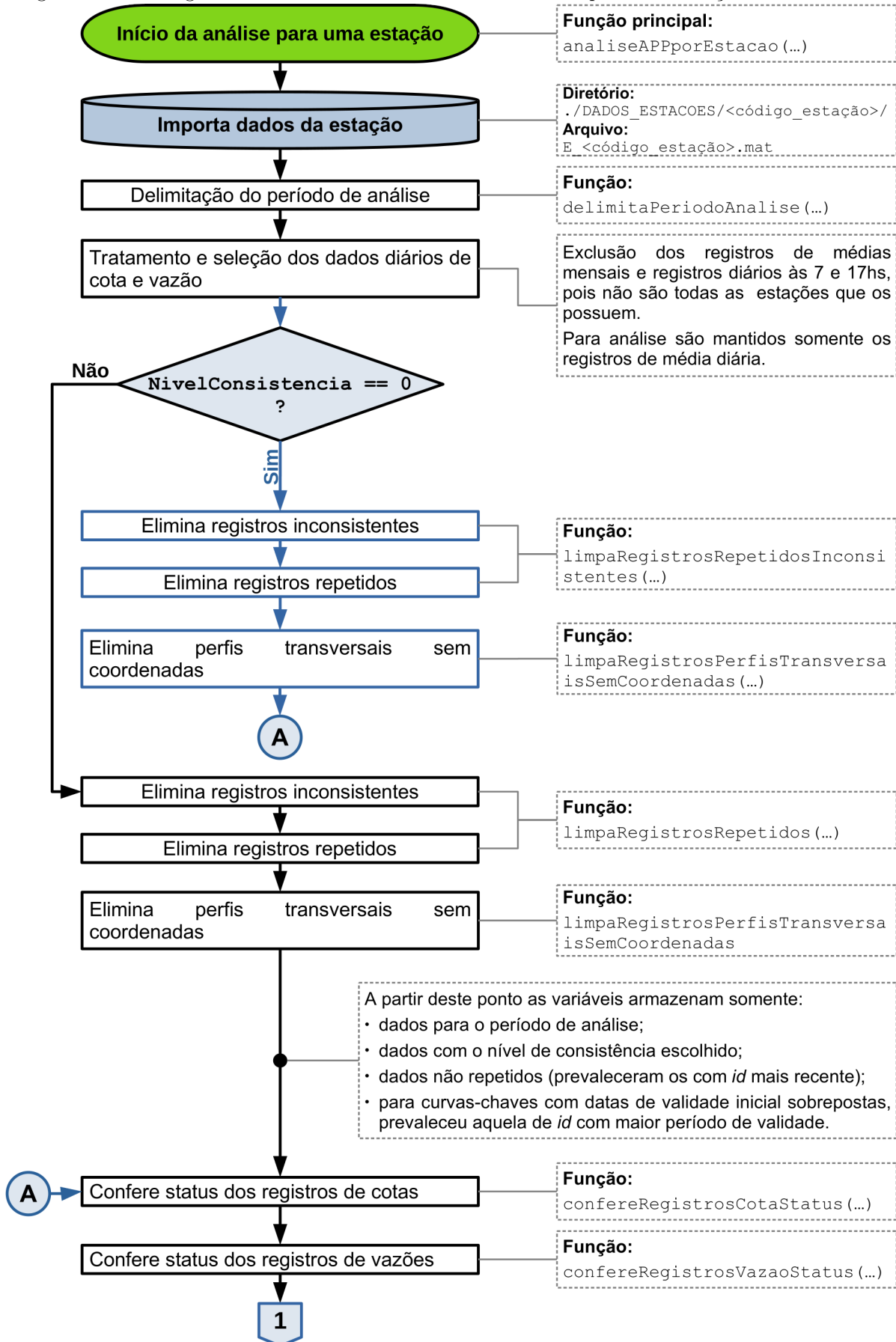
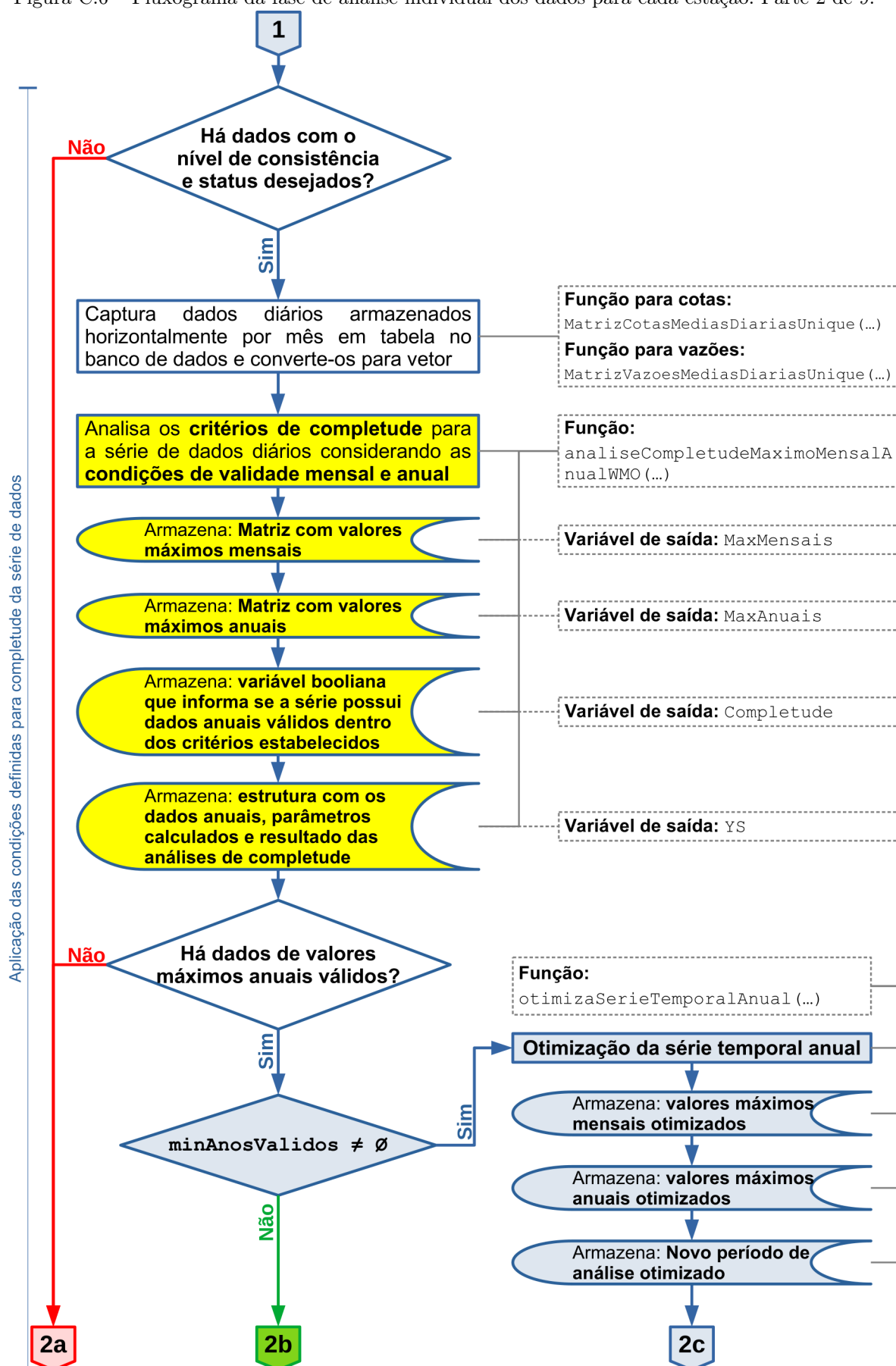


Figura C.6 – Fluxograma da fase de análise individual dos dados para cada estação. Parte 2 de 9.



Fonte: o autor.

Figura C.7 – Fluxograma da fase de análise individual dos dados para cada estação. Parte 3 de 9.

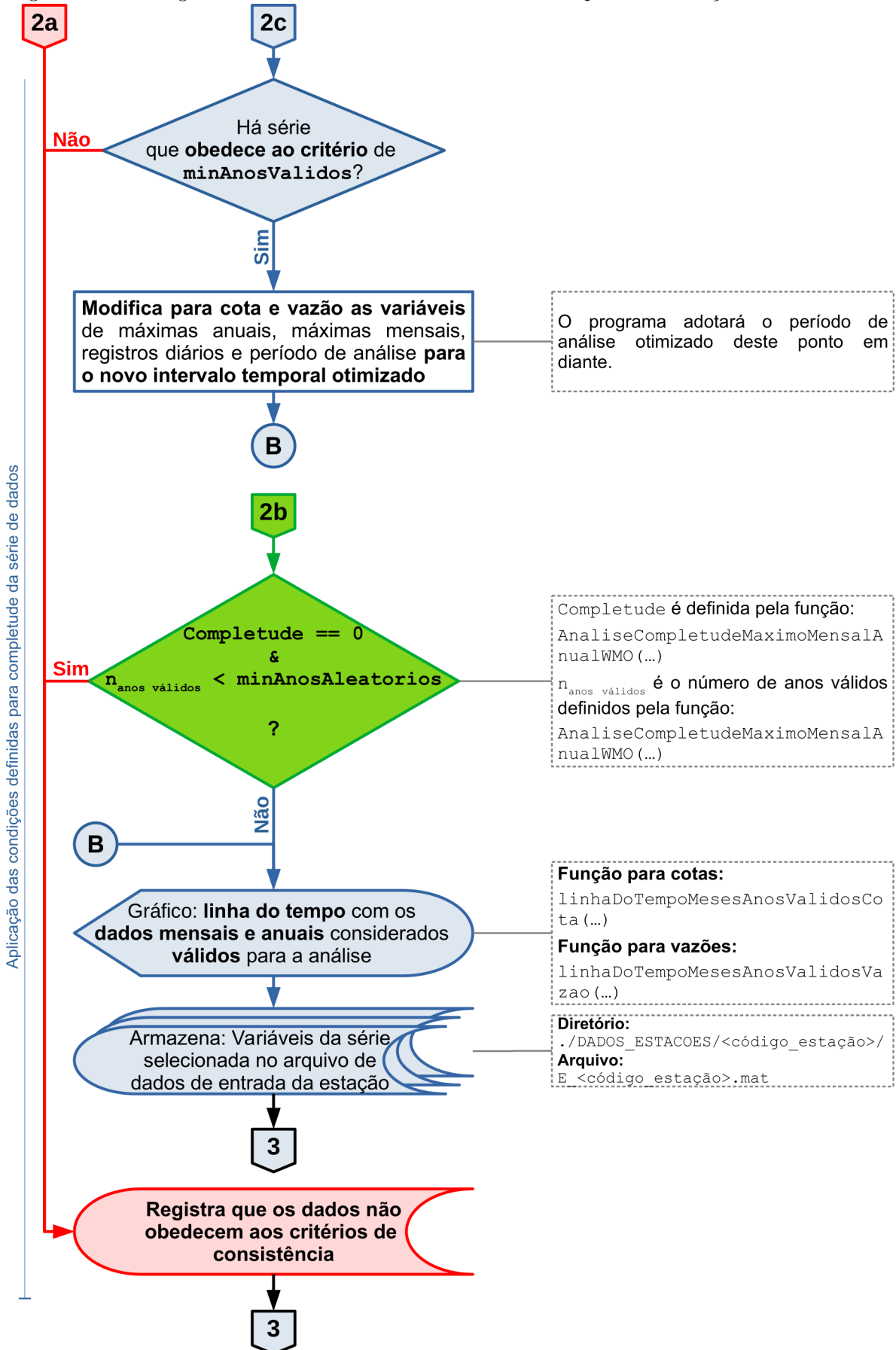
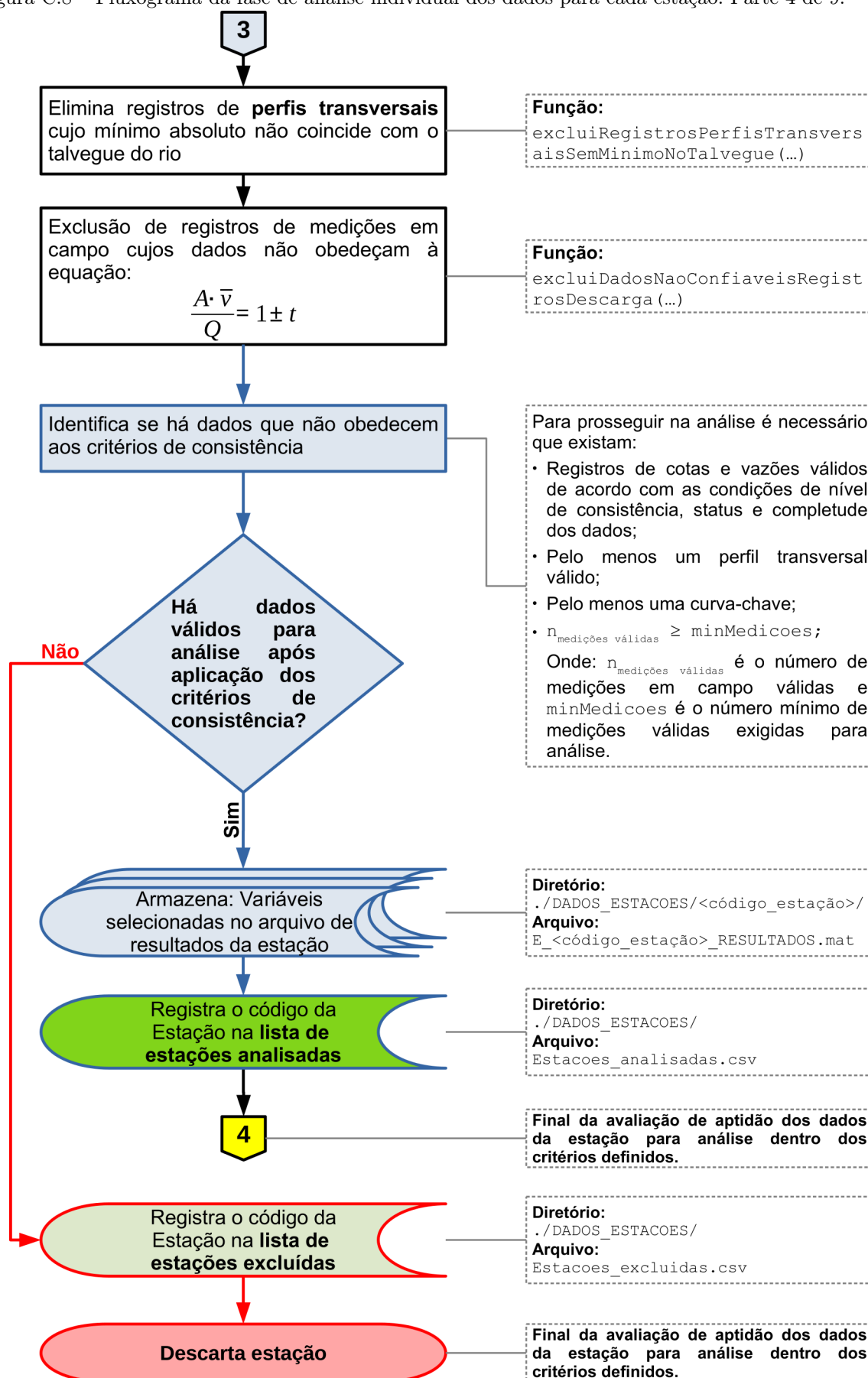


Figura C.8 – Fluxograma da fase de análise individual dos dados para cada estação. Parte 4 de 9.



Fonte: o autor.

Figura C.9 – Fluxograma da fase de análise individual dos dados para cada estação. Parte 5 de 9.

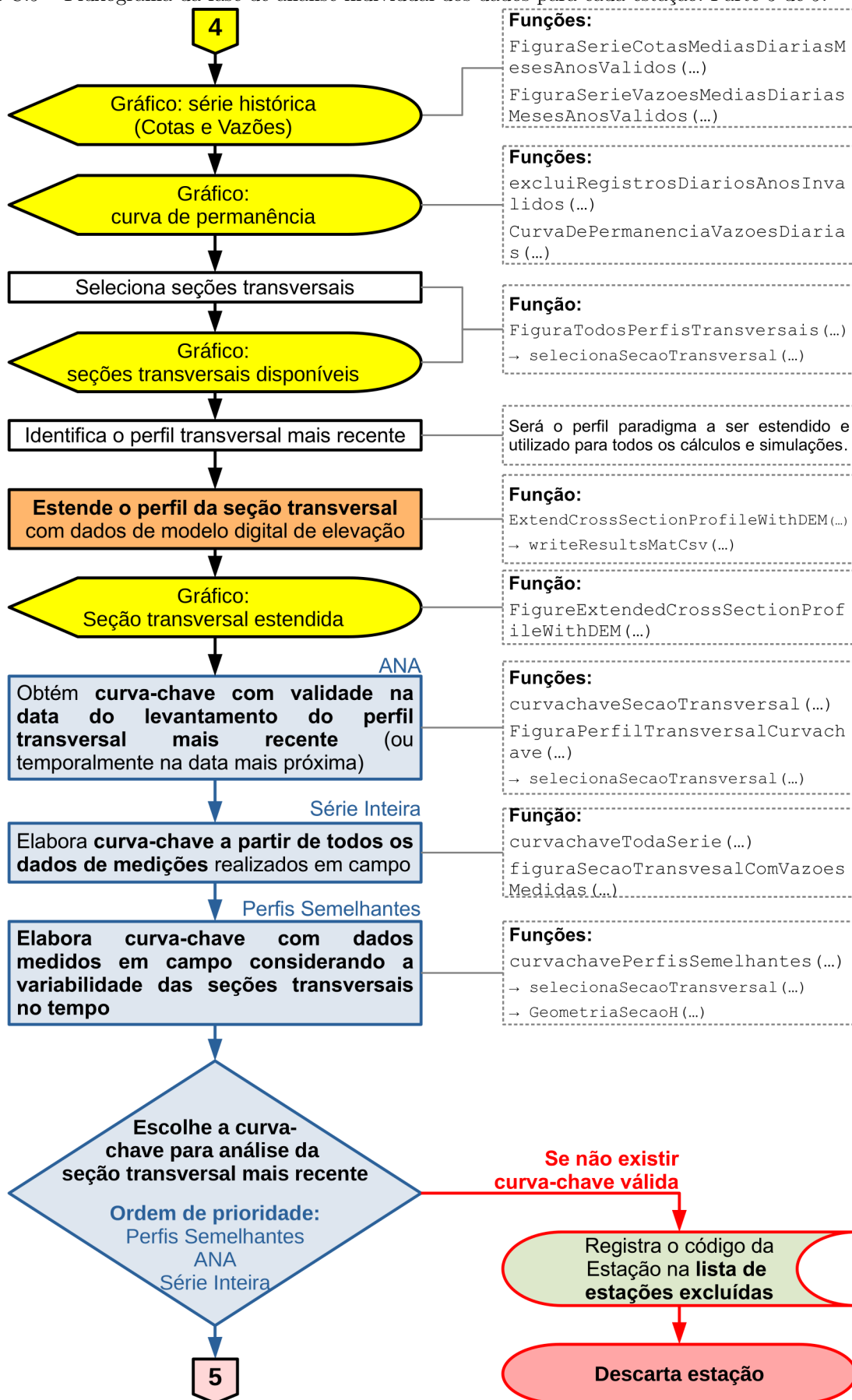
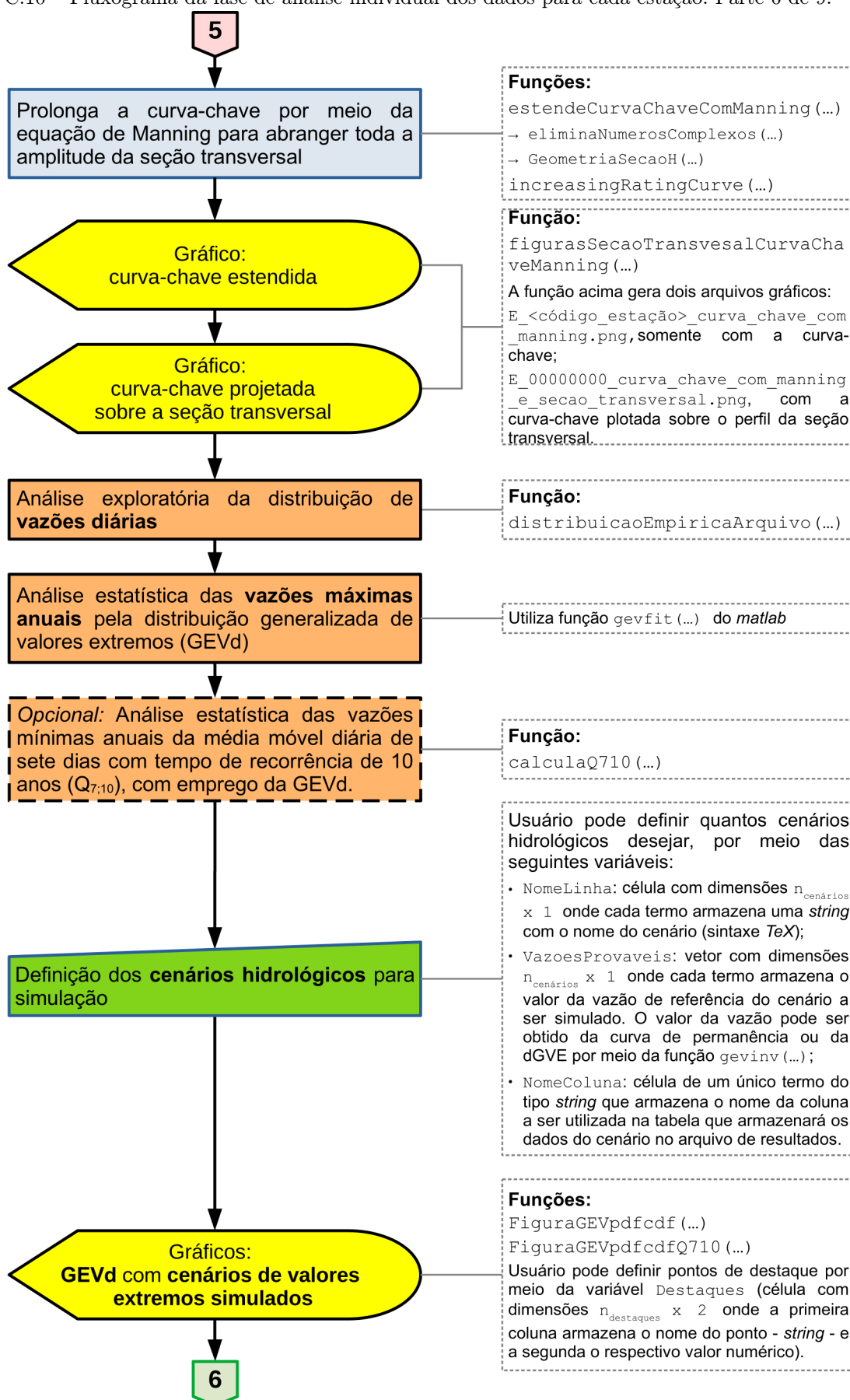


Figura C.10 – Fluxograma da fase de análise individual dos dados para cada estação. Parte 6 de 9.



Fonte: o autor.

Figura C.11 – Fluxograma da fase de análise individual dos dados para cada estação. Parte 7 de 9.

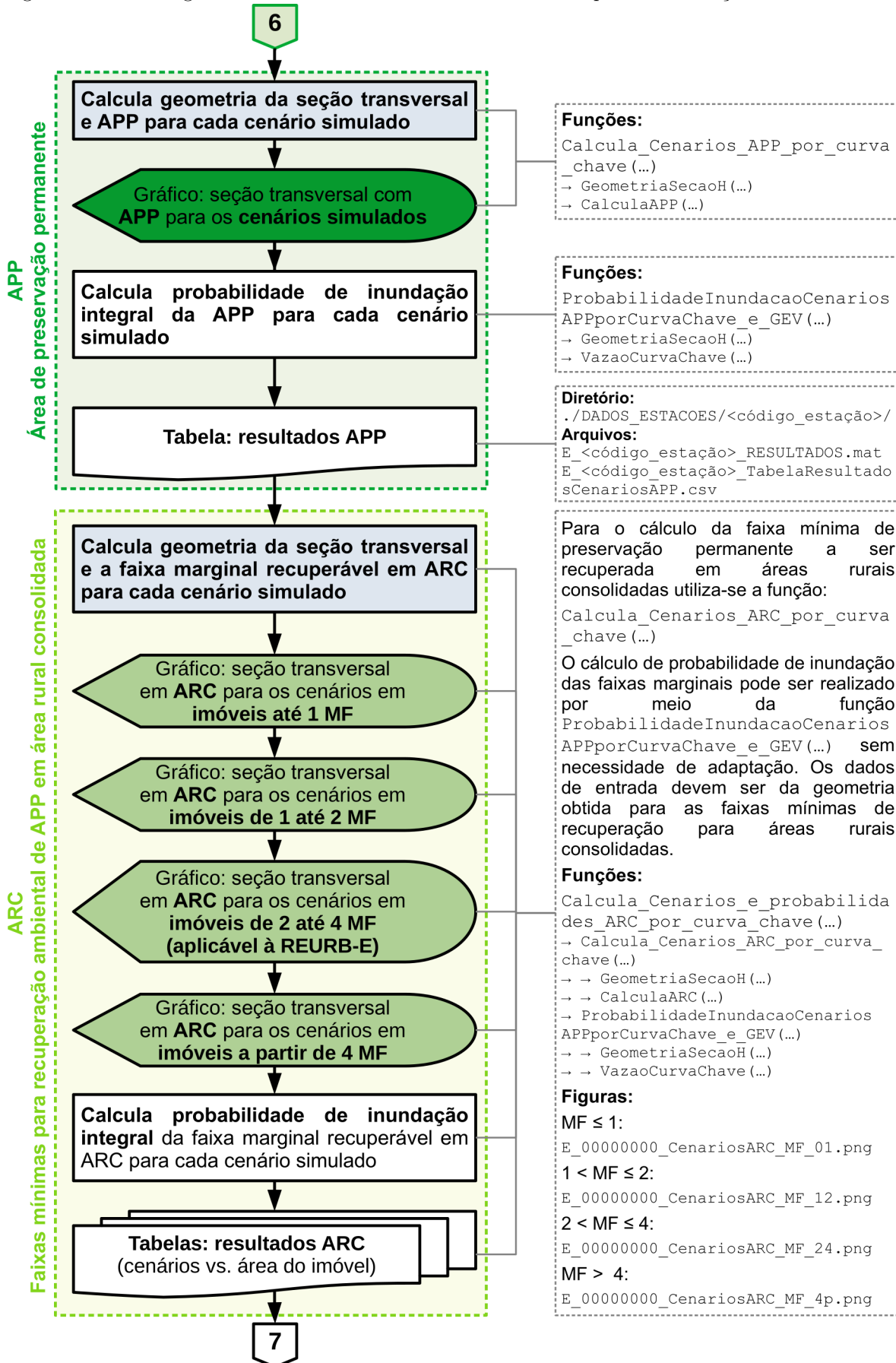
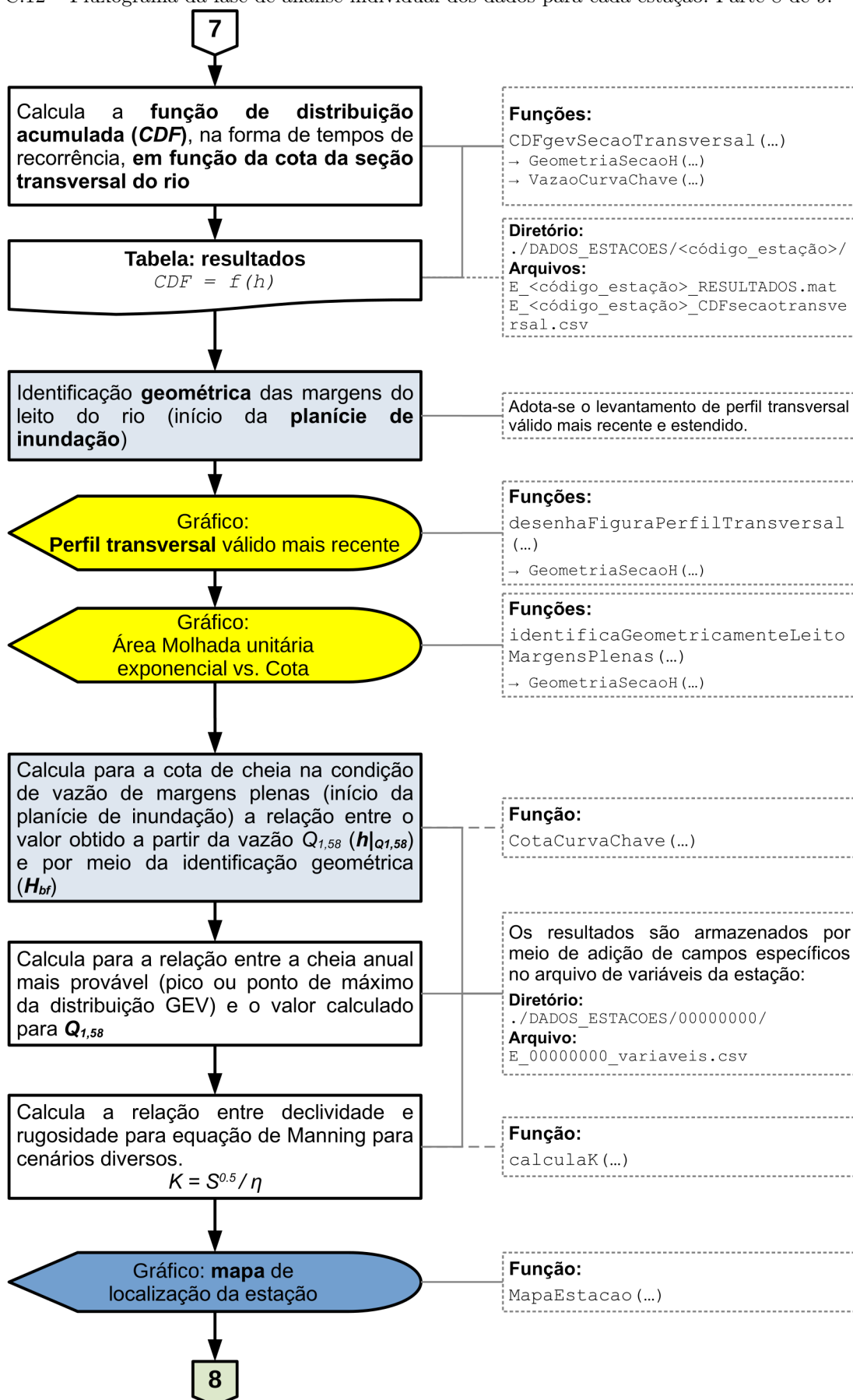
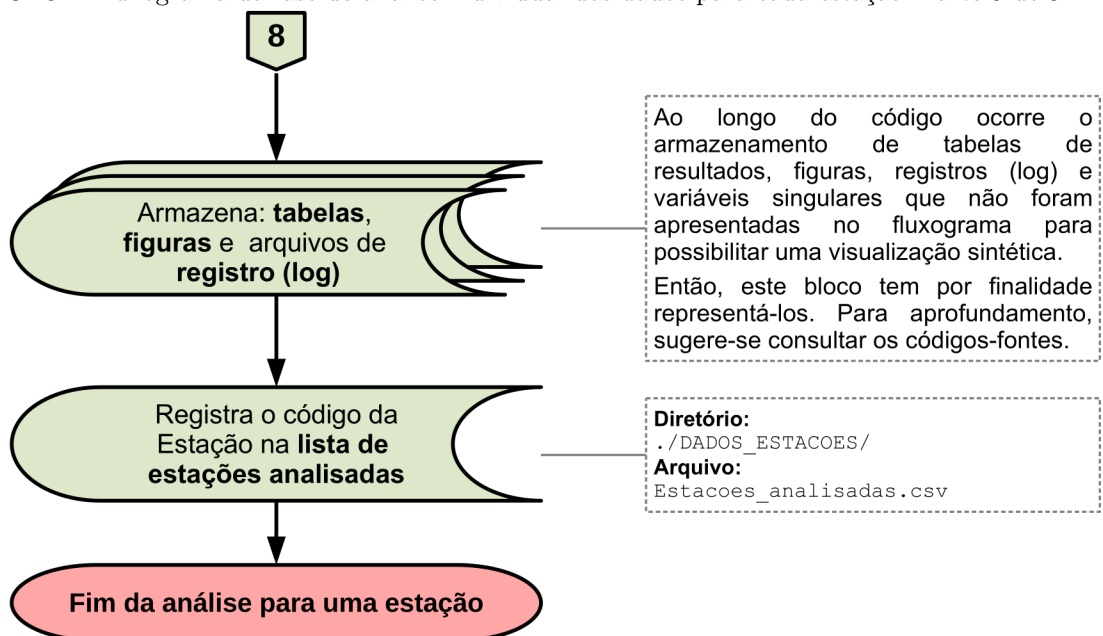


Figura C.12 – Fluxograma da fase de análise individual dos dados para cada estação. Parte 8 de 9.



Fonte: o autor.

Figura C.13 – Fluxograma da fase de análise individual dos dados para cada estação. Parte 9 de 9.



Fonte: o autor.

Quadro C.2 – Variáveis para definição dos critérios de análise dos dados.

(continua)

VARIÁVEL	DESCRIÇÃO	VALORES
<i>nívelConsistencia</i>	Nível de consistência dos dados a serem considerados na análise.	1 para dados não consistidos; 2 para dados consistidos (homologados); 0 (zero) para utilizar todos os dados, preponderando os homologados quando houver sobreposição com dados não consistidos.
<i>CotaStatus</i>	Status da medição de cotas diárias.	1 para valor real; 2 para estimado; 0 (zero) para utilizar todos os dados, preponderando os valores reais homologados quando houver sobreposição com dados estimados.
<i>VazaoStatus</i>	Status da medição de vazões diárias.	1 para valor real; 2 para estimado; 0 (zero) para utilizar todos os dados, preponderando os valores reais homologados quando houver sobreposição com dados estimados.
<i>minMedicoes</i>	Número mínimo de dados de medições em campo.	Valor inteiro.
<i>t</i>	Tolerância das medições em campo. Fração admissível de divergência da razão entre o produto da velocidade média (\bar{v}) da corrente e a área molhada da seção transversal (A_m), pela vazão medida Q : $\frac{Q}{A_m \cdot \bar{v}} = 1 \pm t$	Valor de ponto flutuante de 0 até 1. $t \in [0; 1)$

Quadro C.2 – Variáveis para definição dos critérios de análise dos dados.

(continuação)

VARIÁVEL	DESCRIÇÃO	VALORES
<i>delta_H</i>	Espaçamento de iteração vertical (δ_h) utilizado para o cálculo iterativo em função da geometria da seção transversal.	Valor positivo de ponto flutuante. $\delta_h > 0$
<i>PeriodoAnalise</i>	Vetor que fornece a data inicial e final do período a ser considerado para análise das séries históricas. As datas devem ser apresentadas na forma de valor numérico do <i>matlab</i> . E.g., $PeriodoAnalise = [datetime('1981-01-01', 'yyyy-mm-dd') \quad datetime('2010-12-31', 'yyyy-mm-dd')]$	Vetor 2x1 Valor de ponto flutuante Data em formato numérico
<i>continuidade</i>	Condição de continuidade. Define o período mínimo de dados sem lacunas na série histórica. E.g., a WMO exige como condição para análise de normais climáticas o mínimo de 24 anos válidos para uma série de 30 anos, de forma que a condição de continuidade neste caso é 0,8.	Valor positivo de ponto flutuante. $continuidade \in (0; 1]$
<i>maxDiasAusentesMes</i>	Máximo de dias aleatórios com registros ausentes em um mês para considerá-lo válido. Valor padrão: 10.	Valor inteiro. $maxDiasAusentesMes \in [0; 31]$
<i>maxDiasContinuosAusentesMes</i>	Máximo de dias contínuos com registros ausentes em um mês para considerá-lo válido. Valor padrão: quatro.	Valor inteiro. $maxDiasContinuosAusentesMes \in [0; 31]$
<i>maxAnosContinuosAusentes</i>	Máximo de anos contínuos inválidos no período de análise. Considera-se inválido o valor anual de uma variável quando um dos meses do ano for considerado inválido. E.g., se o número de dias com registros ausentes em um mês for considerado inválido, os valores anuais esperados (e.g., média anual) ou de extremos (e.g., máxima anual) serão considerados inválidos e excluídos da análise. Valor padrão: dois, para um período de análise de 30 anos.	Valor inteiro não negativo. $maxAnosContinuosAusentes \geq 0$

Quadro C.2 – Variáveis para definição dos critérios de análise dos dados.

(conclusão)

VARIÁVEL	DESCRIÇÃO	VALORES
<i>minAnosAleatorios</i>	Mínimo de anos aleatórios válidos no período de análise. É um critério alternativo à análise de lacunas na série de dados anuais válidos. Quando a variável é utilizada pode-se filtrar séries de dados com um número mínimo de dados anuais válidos aleatórios, independente da ocorrência de lacunas em anos consecutivos. Quando a variável <i>minAnosAleatorios</i> é utilizada, os critérios <i>continuidade</i> e <i>maxAnosContinuosAusentes</i> são ignorados. Caso o usuário não deseje utilizar deste critério, deve atribuí-lo um valor maior do que o período de análise (em anos) ou vazio, e.g., <i>minAnosAleatorios</i> = [].	Valor inteiro positivo ou vazio. <i>minAnosAleatorios</i> > 0 ∨ ∅
<i>minAnosValidos</i>	Mínimo de anos válidos para o período de referência. Quando utilizado em conjunto com critérios relaxados para as variáveis <i>continuidade</i> e <i>maxAnosContinuosAusentes</i> permite customizar a análise para encontrar a maior série temporal que atenda aos três critérios dentro do período de análise. Para não empregar o critério, o usuário deve atribuir-lhe valor vazio (<i>minAnosValidos</i> = [])	Valor inteiro positivo ou vazio. <i>minAnosValidos</i> > 0 ∨ ∅
<i>LANG</i> (global)	Variável global que define o idioma dos títulos, rótulos e legendas das figuras.	As opções são “EN” para inglês e “PT_BR” para português. Caso a variável não seja atribuída ou constitua uma <i>string</i> diferente de “EN”, por padrão, adota-se o idioma português.

Nota: o programa foi inspirado pelos critérios da WMO para definição de normais climáticas, por tratarem-se de critérios estatísticos restritivos. Os dados de um determinado ano somente são considerados válidos para análise se todos os meses que o integram também sejam válidos.

Fonte: o autor.

Quadro C.3 – Programas e funções desenvolvidas para fase de análise individual dos dados das estações fluviométricas.

(continua)

ARQUIVO / <i>HIPERLINK</i>	DESCRIÇÃO
HidroAPP.m	Programa para gerenciamento da análise individual de dados das estações.
analiseAPPporEstacao.m	Análise de áreas de preservação permanente em função de cenários hidrológicos para uma estação fluviométrica.
delimitaPeriodoAnalise.m	Delimitação do período de análise.
limpaRegistrosRepetidosInconsistentes.m	Exclui registros inconsistentes, quando a análise envolver todos os dados, independente do nível de consistência (<i>nivelConsistencia</i> = 0).
limpaRegistrosPerfisTransversaisSemCoordenadas.m	Exclusão de levantamentos de seções transversais sem coordenadas.
limpaRegistrosRepetidos.m	Exclui registros inconsistentes, quando a análise envolver um nível de consistência específico (<i>nivelConsistencia</i> = 1 ∨ 2).
confereRegistrosCotaStatus.m	Confere status dos registros de cotas.
confereRegistrosVazaoStatus.m	Confere status dos registros de vazões.
MatrizCotasMediasDiariasUnique.m	Captura de dados diários de cota armazenados horizontalmente por mês em tabela no banco de dados e conversão para vetor.
MatrizVazoesMediasDiariasUnique.m	Captura de dados diários de vazão armazenados horizontalmente por mês em tabela no banco de dados e conversão para vetor.
analiseCompleitudeMaximoMensalAnualWMO.m	Aplicação das condições definidas para completude da série de dados.
otimizaSerieTemporalAnual.m	Otimização do período de análise de dados.
linhaDoTempoMesesAnosValidosCota.m	Gráfico da linha do tempo com os dados mensais e anuais de cotas consideradas válidas para a análise.
linhaDoTempoMesesAnosValidosVazao.m	Gráfico da linha do tempo com os dados mensais e anuais de vazões consideradas válidas para a análise.
excluiRegistrosPerfisTransversaisSemMinimoNoTalvegue.m	Exclusão dos registros de perfis transversais cujo mínimo absoluto não coincide com o talvegue do rio.
excluiDadosNaoConfiaveisRegistrosDescarga.m	Exclusão de registros incoerentes nas medições em campo, que não obedecem a equação: $\frac{Q}{A_m \cdot \bar{v}} = 1 \pm t$, onde Q é a vazão medida, A_m a área molhada medida, \bar{v} a velocidade média medida e t o intervalo de tolerância, sendo que $t \in [0; 1)$.

Quadro C.3 – Programas e funções desenvolvidas para fase de análise individual dos dados das estações fluviométricas.

(continuação)

ARQUIVO / <i>HIPERLINK</i>	DESCRIÇÃO
FiguraSerieCotasMediasDiariasMesesAnosValidos.m	Elaboração de figura com a série histórica de dados diários, mensais e anuais de cotas válidas.
FiguraSerieVazoesMediasDiariasMesesAnosValidos.m	Elaboração de figura com a série histórica de dados diários, mensais e anuais de vazões válidas.
excluiRegistrosDiariosAnosInvalidos.m	Exclusão de registros diários de anos considerados inválidos.
CurvaDePermanenciaVazoesDiarias.m	Elaboração da curva de permanência.
FiguraTodosPerfisTransversais.m	Elaboração de figura com a sobreposição de todos os levantamentos de seções transversais.
selecionaSecaoTransversal.m	Extração de coordenadas do perfil da seção transversal.
extendCrossSectionProfileWithDEM.m	Permite obter o perfil da seção transversal ampliada em direção às margens por meio dos dados de modelo digital de elevação.
writeResultsMatCsv.m	Armazena matriz no arquivo <i>E_0000000_RESULTADOS.mat</i> no formato de tabela com a denominação <i>E_ <EstacaoCodigo>_VarMatrix</i> . Gera arquivo com a variável <i>VarMatrix</i> no formato de texto separado por vírgula com a seguinte denominação <i>E_ <EstacaoCodigo>_VarMatrix.csv</i> .
FigureExtendedCrossSectionProfileWithDEM.m	Gera uma figura com o resultado do acoplamento entre os perfis de seção transversal do levantamento topográfico da ANA e extraídos de modelo digital de elevação.
curvachaveSecaoTransversal.m	Rotina para encontrar a curva-chave definida pela ANA com data mais próxima da medição de um perfil transversal.
FiguraPerfilTransversalCurvachave.m	Plotagem da curva-chave definida pela ANA sobreposta ao perfil da seção transversal.
curvachaveTodaSerie.m	Definição de curva-chave cota <i>vs.</i> vazão com toda a série de dados medidos em campo.
figuraSecaoTransvesalComVazoesMedidas.m	Plota pontos com a cota (<i>stage</i>) e valor de vazões medidas em campo sobre o perfil da seção transversal.
curvachavePerfisSemelhantes.m	Definição de curva-chave com dados medidos em campo considerando a variabilidade das seções transversais no tempo.

Quadro C.3 – Programas e funções desenvolvidas para fase de análise individual dos dados das estações fluviométricas.

(continuação)

ARQUIVO / <i>HIPERLINK</i>	DESCRIÇÃO
GeometriaSecaoH.m	Cálculo da geometria de uma seção transversal em função da cota de inundação.
estendeCurvaChaveComManning.m	Estende a curva-chave vazão vs. cota para toda a seção transversal utilizando-se da equação de Manning para os trechos do domínio vertical não abrangidos pela curva-chave original.
eliminaNumerosComplexos.m	Elimina linhas com números complexos em arrays.
increasingRatingCurve.m	Define a curva-chave como uma função monótona estritamente crescente, eliminando trechos de retrocessos, muito comuns quando se utiliza a equação de Manning em intervalos de incremento da altura nos quais o perímetro molhado da seção aumenta com uma taxa maior do que a área molhada.
figurasSecaoTransvesalCurvaChaveManning.m	Plota a curva-chave principal, acrescida dos intervalos inferior e superior estendidos por meio da equação de Manning. Como resultado, são geradas duas figuras: uma somente com a curva-chave e outra com a curva-chave plotada sobre o perfil da seção transversal.
distribuicaoEmpiricaArquivo.m	Análise exploratória da distribuições empíricas.
calculaQ710.m	Calcula a média móvel das vazões diárias de sete dias com tempo de recorrência de 10 anos ($Q_{7;10}$). Utiliza distribuição genérica de valores extremos (GEVd).
FiguraGEVpdfcdf.m	Plotagem do histograma de valores extremos máximos e das funções de densidade de probabilidade (PDF) e cumulativa (CDF) para distribuição genérica de valores extremos (GEVd).
FiguraGEVpdfcdfQ710.m	Plotagem do histograma de valores extremos mínimos e das funções de densidade de probabilidade (PDF) e cumulativa (CDF) para distribuição genérica de valores extremos (GEVd).
Calcula_Cenarios_APP_por_curva_chave.m	Estabelecimento da geometria da seção transversal e área de preservação permanente (APP) para diversos cenários hidrológicos.
CalculaAPP.m	Cálculo da faixa marginal da área de preservação permanente em função da largura do rio.
ProbabilidadeInundacaoCenariosAPPporCurvaChave_e_GEV.m	Cálculo da probabilidade de inundação integral de faixa marginal ao leito fluvial para cenários hidrológicos diversos.

Quadro C.3 – Programas e funções desenvolvidas para fase de análise individual dos dados das estações fluviométricas.

(conclusão)

ARQUIVO / <i>HIPERLINK</i>	DESCRIÇÃO
VazaoCurvaChave.m	Cálcula a vazão a partir de curva-chave.
Calcula_Cenarios_e_probabilidades_ARC_por_curva_chave.m	Concentra rotinas para: 1. Calcular a geometria da seção transversal e faixa mínima de área de preservação permanente (APP) a ser recuperada em área rural consolidada (ARC) para diversos cenários hidrológicos. 2. Calcular a probabilidade de inundação integral de cada margem da faixa marginal de área de preservação permanente do rio para cada cenário hidrológico considerado. Utiliza distribuição generalizada de valores extremos (GEVd) para o cálculo dos tempos de recorrência.
Calcula_Cenarios_ARC_por_curva_chave.m	Estabelecimento da geometria da seção transversal e faixa mínima para recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) para cenários hidrológicos diversos.
CalculaARC.m	Calcula a largura mínima para recuperação ambiental da faixa marginal da área de preservação permanente em área rural consolidada (ARC) em função da área da propriedade em módulos fiscais, conforme limites definidos pelo art. 61-A, §§ 1º ao 4º, da Lei nº 12.651/2012, regulamentado pelo Decreto nº 7.830/2012.
CDFgevSecaoTransversal.m	Função distribuição acumulada (CDF) em função da cota da seção transversal do rio.
desenhaFiguraPerfilTransversal.m	Plota o perfil transversal.
identificaGeometricamenteLeitoMargensPlenas.m	Estabelecimento da curva Área Molhada (A_m) unitária exponencial vs. Cota (H) para identificação da margem do leito e início da planície de inundação.
CotaCurvaChave.m	Encontra o valor da cota H para a vazão Q na curva-chave.
calculaK.m	Cálculo da relação entre declividade e rugosidade para equação de Manning. $K = \frac{\sqrt{S}}{\eta}$
MapaEstacao.m	Mapa de localização da estação.

Fonte: o autor.

C.3 ANÁLISE INTEGRADA

C.3.1 Fluxograma da fase de análise integrada

O procedimento para análise integrada encontra-se descrito nos fluxogramas apresentados nas Figuras C.14 a C.17.

C.3.2 Variáveis para análise integrada dos resultados

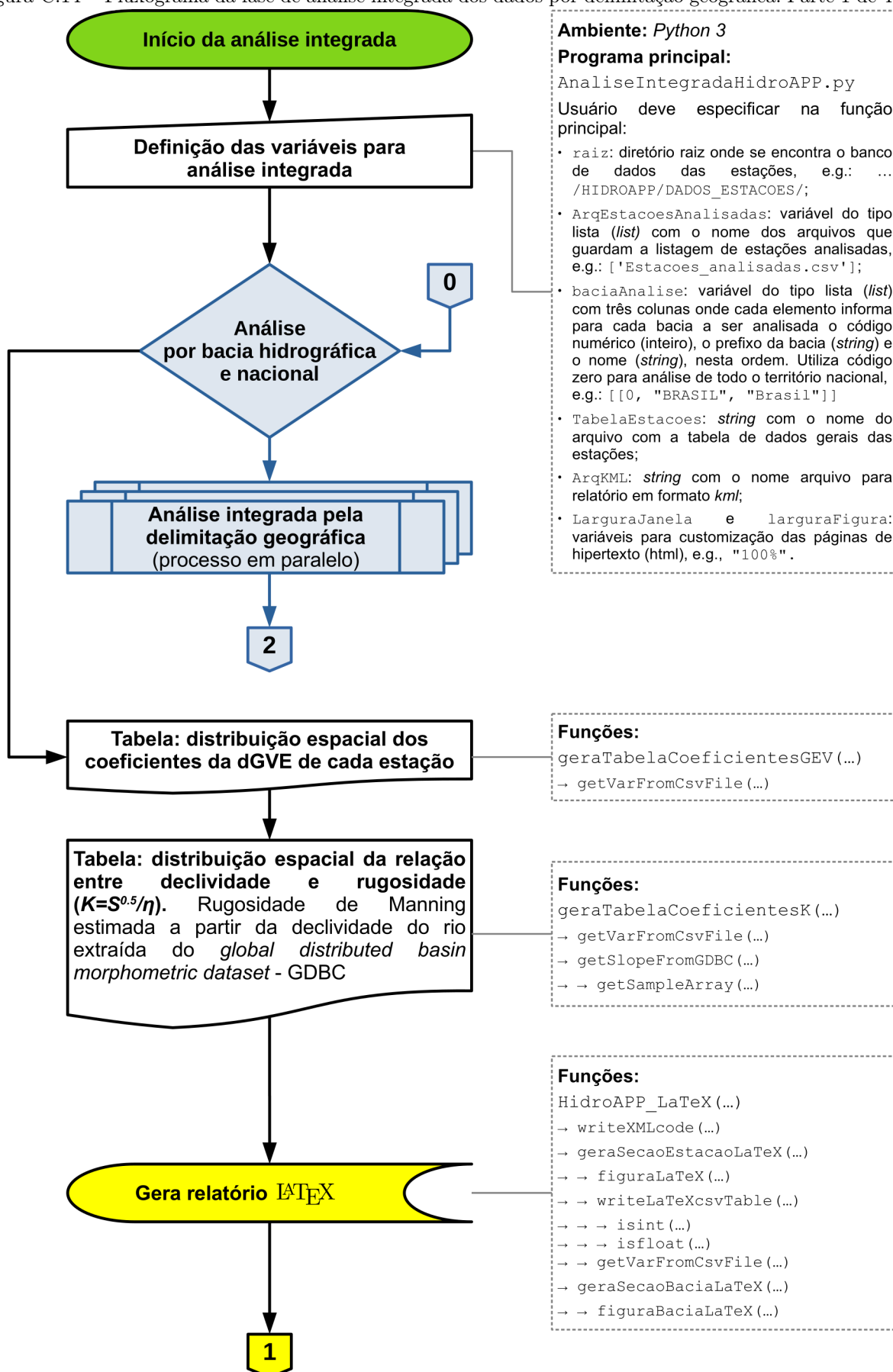
A análise integrada dos resultados das análises individuais dos dados das estações é gerenciada por meio do programa `AnaliseIntegradaHidroAPP.py`, desenvolvido em linguagem *python*, onde o usuário deve especificar as seguintes variáveis para análise:

- *raiz*: diretório raiz onde se encontra o banco de dados das estações, e.g.:
`... /HIDROAPP/DADOS_ESTACOES/`
- *ArqEstacoesAnalisadas*: variável do tipo lista (*list*) com o nome dos arquivos que guardam a listagem de estações analisadas, e.g.: `['Estacoes_analisadas.csv']`
- *baciaAnalise*: variável do tipo lista (*list*) com três colunas onde cada elemento informa para cada bacia a ser analisada o código numérico (inteiro), o prefixo da bacia (*string*) e o nome (*string*), nesta ordem. Utiliza código zero para análise de todo o território nacional, e.g.: `[[0, "BRASIL", "Brasil"]]`
- *TabelaEstacoes*: *string* com o nome do arquivo com a tabela de dados gerais das estações;
- *ArqKML*: *string* com o nome arquivo para relatório em formato *kml*;
- *LarguraJanela* e *larguraFigura*: variáveis para customização das páginas de hipertexto (*html*), e.g., `"100%"`.

C.3.3 Códigos-fonte das rotinas desenvolvidas para fase de análise integrada

Os códigos-fonte das rotinas desenvolvidas para fase de análise integrada dos resultados das análises individuais das estações fluviométricas, representadas nos fluxogramas das Figuras C.14 a C.17, podem ser acessados por meio dos *hiperlinks* informados no Quadro C.4.

Figura C.14 – Fluxograma da fase de análise integrada dos dados por delimitação geográfica. Parte 1 de 4.



Fonte: o autor.

Figura C.15 – Fluxograma da fase de análise integrada dos dados por delimitação geográfica. Parte 2 de 4.

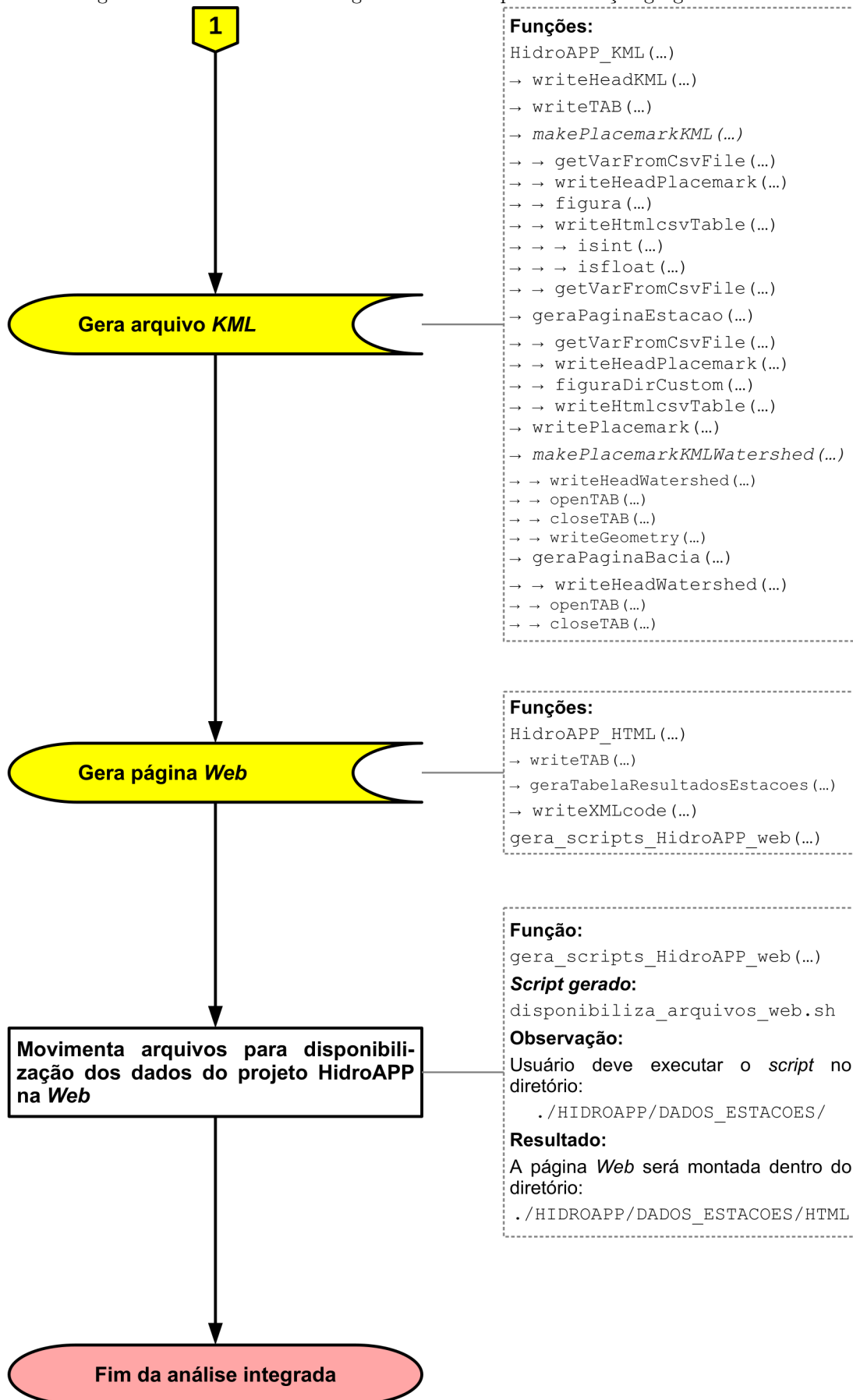
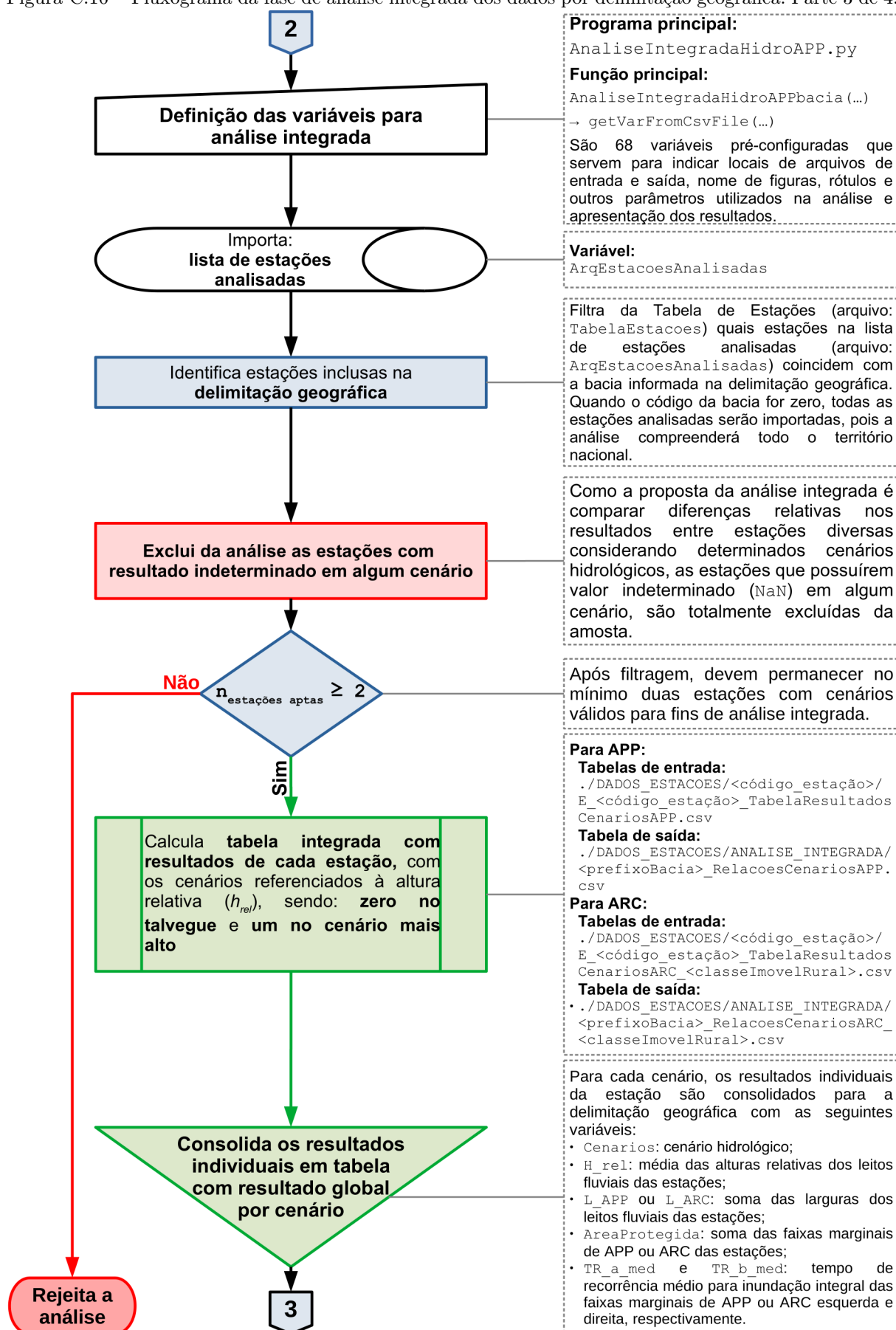
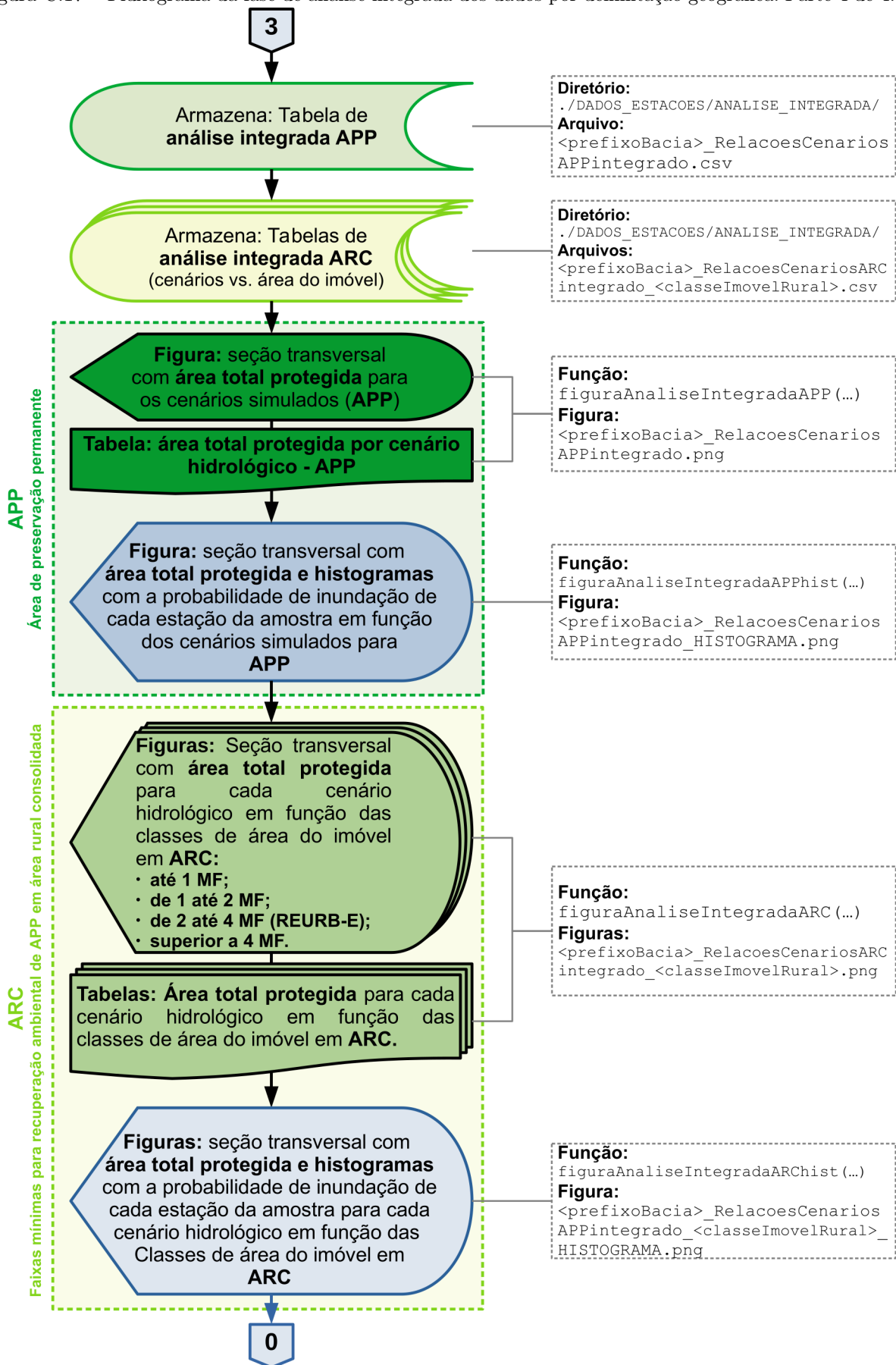


Figura C.16 – Fluxograma da fase de análise integrada dos dados por delimitação geográfica. Parte 3 de 4.



Fonte: o autor.

Figura C.17 – Fluxograma da fase de análise integrada dos dados por delimitação geográfica. Parte 4 de 4.



Fonte: o autor.

Quadro C.4 – Programas e funções desenvolvidas para fase de análise integrada dos dados das estações fluviométricas.

(continua)

ARQUIVO / <i>HIPERLINK</i>	DESCRIÇÃO
AnaliseIntegradaHidroAPP.py	Programa para gerenciamento da análise integrada de dados das estações.
AnaliseIntegradaHidroAPPbacia.py	Análise integrada dos resultados por delimitação geográfica.
getVarFromCsvFile.py	Extração de variável a partir de tabela em texto separado por vírgula (csv).
figuraAnaliseIntegradaAPP.py	Figura para análise integrada de áreas de preservação permanente.
figuraAnaliseIntegradaAPPhist.py	Figura para análise integrada da perturbação de áreas de preservação permanente (histogramas de probabilidade de inundação por cenários hidrológicos).
figuraAnaliseIntegradaARC.py	Figura para análise integrada da faixa mínima sujeita à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC).
figuraAnaliseIntegradaARChist.py	Figura para análise integrada da perturbação da faixa mínima sujeita à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (histogramas de probabilidade de inundação por cenários hidrológicos).
geraTabelaCoeficientesGEV.py	Elaboração da tabela para análise da variabilidade espacial dos coeficientes da distribuição generalizada de valores extremos (GEVd) de cada estação.
geraTabelaCoeficientesK.py	Elaboração da tabela de distribuição espacial da relação \sqrt{S}/η da equação de Manning (relação entre declividade e rugosidade) de cada estação.
getSlopeFromGDBC.py	Rotina para estimar a declividade média do curso d'água no local de uma estação fluviométrica utilizando o Global distributed basin morphometric dataset - GDBC.
getSampleArray.py	Rotina para obter uma amostra quadrada com aresta em pixels (valor ímpar) de uma matriz raster em torno de um ponto central de coordenadas X, Y .
HidroAPP_KML.py	Relatório em <i>kml</i> (visualização espacial dos resultados).
writeHeadKML.py	Grava cabeçalho <i>xml/css</i> no arquivo <i>kml</i> .
writeTAB.py	Grava conteúdo de uma aba a partir de um arquivo <i>xml</i> .
makePlacemarkKML.py	Gravação de um marcador no arquivo <i>kml</i> .
writeHeadPlacemark.py	Grava cabeçalho <i>xml/css</i> para marcador de uma estação no arquivo <i>kml</i> .

Quadro C.4 – Programas e funções desenvolvidas para fase de análise integrada dos dados das estações fluviométricas.

(continuação)

ARQUIVO / <i>HIPERLINK</i>	DESCRIÇÃO
figura.py	Grava declaração de figura em arquivo no formato hipertexto (<i>html</i>). Nesse arquivo há três funções disponíveis: - <code>figura(...)</code> - <code>figurasSufixoEstacao(...)</code> - <code>figuraDirCustom(...)</code>
writeHtmlcsvTable.py	Conversão de tabela em texto separado por vírgula (<i>csv</i>) para hipertexto (<i>html</i>).
rotinasUteis.py	Rotinas complementares diversas. - <code>isreal(value)</code> : Verifica se um determinado valor é real (<i>true</i>) ou complexo (<i>false</i>); - <code>isint(value)</code> : Verifica se um determinado valor é inteiro; - <code>isfloat(value)</code> : Verifica se um determinado valor é de ponto flutuante.
geraPaginaEstacao.py	Gera página <i>html</i> com os resultados do programa HidroAPP para uma estação.
writePlacemark.py	Grava conteúdo de um marcador para uma estação a partir de um arquivo <i>xml</i> .
makePlacemarkKMLWatershed.py	Grava conteúdo de um marcador para uma bacia.
writeHeadWatershed.py	Grava cabeçalho <i>xml/css</i> para marcador de uma bacia no arquivo <i>kml</i> .
openTAB.py	Grava hipertexto (<i>html</i>) para abertura de aba.
closeTAB.py	Grava hipertexto (<i>html</i>) para fechamento de aba.
writeGeometry.py	Grava a geometria de uma feição para um arquivo <i>kml</i> .
geraPaginaEstacao.py	Gera página <i>html</i> com os resultados da análise integrada do programa HidroAPP para uma delimitação geográfica (e.g., bacia hidrográfica).
HidroAPP_LaTeX.py	Gera relatório em \LaTeX , para posterior conversão em <i>PDF/A</i> .
writeXMLcode.py	Transcreve código <i>xml</i> para arquivo <i>html</i> .
geraSecaoEstacaoLaTeX.py	Rotina para gerar seção com os resultados do programa HidroAPP para uma estação, em formato \LaTeX .
figuraLaTeX.py	Gera código \LaTeX , para exibição de figura do HidroAPP. Nesse arquivo há duas funções disponíveis: - <code>figuraLaTeX(...)</code> ; - <code>figuraBaciaLaTeX(...)</code> .
writeLaTeXcsvTable.py	Converte uma tabela <i>csv</i> para o formato \LaTeX .

Quadro C.4 – Programas e funções desenvolvidas para fase de análise integrada dos dados das estações fluviométricas.

(conclusão)

ARQUIVO / <i>HIPERLINK</i>	DESCRIÇÃO
geraSecaoBaciaLaTeX.py	Rotina para gerar seção com os resultados da análise integrada do programa HidroAPP para uma delimitação geográfica (e.g., bacia hidrográfica), em formato $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$.
HidroAPP_HTML.py	Gera ferramenta para visualização espacial dos resultados por meio de navegadores de rede (<i>web</i>).
geraTabelaResultadosEstacoes.py	Rotina para gerar tabela html com os dados e links para os resultados das estações.
gera_scripts_HidroAPP_web.py	Rotina para gerar <i>scripts</i> para movimentação e disponibilização dos dados do projeto HidroAPP na <i>web</i> .

Fonte: o autor.

APÊNDICE D – Resultados das análises por bacia hidrográfica das faixas mínimas sujeitas à recuperação ambiental nas margens de rios em áreas rurais consolidadas

Tabela D.1 – Extensão total das seções transversais formadas pelos leitos dos rios e as respectivas áreas de preservação permanente (APP) sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) para as estações fluviométricas analisadas, considerando o tamanho dos imóveis rurais e os cenários hidrológicos simulados, por bacia hidrográfica.

(continua)

IMÓVEL[†]	CENÁRIO	H_{rel}	$\sum l_{rio}$	$\sum l_{ARC}$	APE	APE $Q_{cenário}/Q_{med}$
AMZ – Rio Amazonas						
$A \leq 1$	Q_{med}	1,00	22335,94	170,00	22675,94	1,00
	$Q_{1,58}$	0,97	21148,86	170,00	21488,86	0,95
	Q_{95}	0,46	15078,82	170,00	15418,82	0,68
$1 < A \leq 2$	Q_{med}	1,00	22335,94	272,00	22879,94	1,00
	$Q_{1,58}$	0,97	21148,86	272,00	21692,86	0,95
	Q_{95}	0,46	15078,82	272,00	15622,82	0,68
$2 < A \leq 4$	Q_{med}	1,00	22335,94	510,00	23355,94	1,00
	$Q_{1,58}$	0,97	21148,86	510,00	22168,86	0,95
	Q_{95}	0,46	15078,82	510,00	16098,82	0,69
$A > 4$	Q_{med}	1,00	22335,94	3092,24	28520,42	1,00
	$Q_{1,58}$	0,97	21148,86	3009,71	27168,27	0,95
	Q_{95}	0,46	15078,82	2565,80	20210,42	0,71
ATL – Atlântico, trecho leste						
$A \leq 1$	Q_{med}	1,00	14115,99	735,00	15585,99	1,00
	$Q_{1,58}$	0,88	11002,93	735,00	12472,93	0,80
	Q_{95}	0,29	5697,90	735,00	7167,90	0,46
$1 < A \leq 2$	Q_{med}	1,00	14115,99	1176,00	16467,99	1,00
	$Q_{1,58}$	0,88	11002,93	1176,00	13354,93	0,81
	Q_{95}	0,29	5697,90	1176,00	8049,90	0,49
$2 < A \leq 4$	Q_{med}	1,00	14115,99	2205,00	18525,99	1,00
	$Q_{1,58}$	0,88	11002,93	2205,00	15412,93	0,83
	Q_{95}	0,29	5697,90	2205,00	10107,90	0,55
$A > 4$	Q_{med}	1,00	14115,99	6897,18	27910,35	1,00
	$Q_{1,58}$	0,88	11002,93	6056,68	23116,29	0,83
	Q_{95}	0,29	5697,90	5019,92	15737,75	0,56

Tabela D.1 – Extensão total das seções transversais formadas pelos leitos dos rios e as respectivas áreas de preservação permanente (APP) sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) para as estações fluviométricas analisadas, considerando o tamanho dos imóveis rurais e os cenários hidrológicos simulados, por bacia hidrográfica.

(continuação)

IMÓVEL [†]	CENÁRIO	H_{rel}	$\sum l_{rio}$	$\sum l_{ARC}$	APE	APE $Q_{cenário}/Q_{med}$
ATN – Atlântico, trecho norte / nordeste						
$A \leq 1$	Q_{med}	1,00	3569,54	115,00	3799,54	1,00
	$Q_{1,58}$	0,91	3262,70	115,00	3492,70	0,92
	Q_{95}	0,38	1728,54	115,00	1958,54	0,52
$1 < A \leq 2$	Q_{med}	1,00	3569,54	184,00	3937,54	1,00
	$Q_{1,58}$	0,91	3262,70	184,00	3630,70	0,92
	Q_{95}	0,38	1728,54	184,00	2096,54	0,53
$2 < A \leq 4$	Q_{med}	1,00	3569,54	345,00	4259,54	1,00
	$Q_{1,58}$	0,91	3262,70	345,00	3952,70	0,93
	Q_{95}	0,38	1728,54	345,00	2418,54	0,57
$A > 4$	Q_{med}	1,00	3569,54	1362,46	6294,45	1,00
	$Q_{1,58}$	0,91	3262,70	1342,08	5946,86	0,94
	Q_{95}	0,38	1728,54	1043,52	3815,58	0,61
ATS – Atlântico, trecho sudeste						
$A \leq 1$	Q_{med}	1,00	5752,29	230,00	6212,29	1,00
	$Q_{1,58}$	0,89	4990,40	230,00	5450,40	0,88
	Q_{95}	0,28	2316,59	230,00	2776,59	0,45
$1 < A \leq 2$	Q_{med}	1,00	5752,29	368,00	6488,29	1,00
	$Q_{1,58}$	0,89	4990,40	368,00	5726,40	0,88
	Q_{95}	0,28	2316,59	368,00	3052,59	0,47
$2 < A \leq 4$	Q_{med}	1,00	5752,29	690,00	7132,29	1,00
	$Q_{1,58}$	0,89	4990,40	690,00	6370,40	0,89
	Q_{95}	0,28	2316,59	690,00	3696,59	0,52
$A > 4$	Q_{med}	1,00	5752,29	2326,47	10405,24	1,00
	$Q_{1,58}$	0,89	4990,40	2121,07	9232,54	0,89
	Q_{95}	0,28	2316,59	1639,55	5595,69	0,54

Tabela D.1 – Extensão total das seções transversais formadas pelos leitos dos rios e as respectivas áreas de preservação permanente (APP) sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) para as estações fluviométricas analisadas, considerando o tamanho dos imóveis rurais e os cenários hidrológicos simulados, por bacia hidrográfica.

(continuação)

IMÓVEL [†]	CENÁRIO	H_{rel}	$\sum l_{rio}$	$\sum l_{ARC}$	APE	APE $Q_{cenário}/Q_{med}$
PRN – Rio Paraná						
$A \leq 1$	Q_{med}	1,00	12258,51	540,00	13338,51	1,00
	$Q_{1,58}$	0,91	11011,61	540,00	12091,61	0,91
	Q_{95}	0,35	5745,32	540,00	6825,32	0,51
$1 < A \leq 2$	Q_{med}	1,00	12258,51	864,00	13986,51	1,00
	$Q_{1,58}$	0,91	11011,61	864,00	12739,61	0,91
	Q_{95}	0,35	5745,32	864,00	7473,32	0,53
$2 < A \leq 4$	Q_{med}	1,00	12258,51	1620,00	15498,51	1,00
	$Q_{1,58}$	0,91	11011,61	1620,00	14251,61	0,92
	Q_{95}	0,35	5745,32	1620,00	8985,32	0,58
$A > 4$	Q_{med}	1,00	12258,51	5491,05	23240,60	1,00
	$Q_{1,58}$	0,91	11011,61	5254,18	21519,97	0,93
	Q_{95}	0,35	5745,32	4184,83	14114,98	0,61
SFO – Rio São Francisco						
$A \leq 1$	Q_{med}	1,00	13470,98	280,00	14030,98	1,00
	$Q_{1,58}$	0,90	11477,02	280,00	12037,02	0,86
	Q_{95}	0,39	8393,84	280,00	8953,84	0,64
$1 < A \leq 2$	Q_{med}	1,00	13470,98	448,00	14366,98	1,00
	$Q_{1,58}$	0,90	11477,02	448,00	12373,02	0,86
	Q_{95}	0,39	8393,84	448,00	9289,84	0,65
$2 < A \leq 4$	Q_{med}	1,00	13470,98	840,00	15150,98	1,00
	$Q_{1,58}$	0,90	11477,02	840,00	13157,02	0,87
	Q_{95}	0,39	8393,84	840,00	10073,84	0,66
$A > 4$	Q_{med}	1,00	13470,98	3495,89	20462,76	1,00
	$Q_{1,58}$	0,90	11477,02	3131,32	17739,67	0,87
	Q_{95}	0,39	8393,84	2734,11	13862,06	0,68

Tabela D.1 – Extensão total das seções transversais formadas pelos leitos dos rios e as respectivas áreas de preservação permanente (APP) sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) para as estações fluviométricas analisadas, considerando o tamanho dos imóveis rurais e os cenários hidrológicos simulados, por bacia hidrográfica.

(continuação)

IMÓVEL [†]	CENÁRIO	H_{rel}	$\sum l_{rio}$	$\sum l_{ARC}$	APE	APE $Q_{cenário}/Q_{med}$
TOC – Rio Tocantins						
$A \leq 1$	Q_{med}	1,00	9053,32	125,00	9303,32	1,00
	$Q_{1,58}$	0,91	8343,24	125,00	8593,24	0,92
	Q_{95}	0,37	5759,70	125,00	6009,70	0,65
$1 < A \leq 2$	Q_{med}	1,00	9053,32	200,00	9453,32	1,00
	$Q_{1,58}$	0,91	8343,24	200,00	8743,24	0,92
	Q_{95}	0,37	5759,70	200,00	6159,70	0,65
$2 < A \leq 4$	Q_{med}	1,00	9053,32	375,00	9803,32	1,00
	$Q_{1,58}$	0,91	8343,24	375,00	9093,24	0,93
	Q_{95}	0,37	5759,70	375,00	6509,70	0,66
$A > 4$	Q_{med}	1,00	9053,32	1696,16	12445,64	1,00
	$Q_{1,58}$	0,91	8343,24	1570,43	11484,10	0,92
	Q_{95}	0,37	5759,70	1367,10	8493,89	0,68
URU – Rio Uruguai						
$A \leq 1$	Q_{med}	1,00	7264,81	165,00	7594,81	1,00
	$Q_{1,58}$	0,88	5697,95	165,00	6027,95	0,79
	Q_{95}	0,26	3291,41	165,00	3621,41	0,48
$1 < A \leq 2$	Q_{med}	1,00	7264,81	264,00	7792,81	1,00
	$Q_{1,58}$	0,88	5697,95	264,00	6225,95	0,80
	Q_{95}	0,26	3291,41	264,00	3819,41	0,49
$2 < A \leq 4$	Q_{med}	1,00	7264,81	495,00	8254,81	1,00
	$Q_{1,58}$	0,88	5697,95	495,00	6687,95	0,81
	Q_{95}	0,26	3291,41	495,00	4281,41	0,52
$A > 4$	Q_{med}	1,00	7264,81	2104,42	11473,66	1,00
	$Q_{1,58}$	0,88	5697,95	1829,85	9357,66	0,82
	Q_{95}	0,26	3291,41	1341,27	5973,96	0,52

Tabela D.1 – Extensão total das seções transversais formadas pelos leitos dos rios e as respectivas áreas de preservação permanente (APP) sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) para as estações fluviométricas analisadas, considerando o tamanho dos imóveis rurais e os cenários hidrológicos simulados, por bacia hidrográfica.

(conclusão)

IMÓVEL [†]	CENÁRIO	H_{rel}	$\sum l_{rio}$	$\sum l_{ARC}$	APE	APE $Q_{cenário}/Q_{med}$
BRASIL						
$A \leq 1$	Q_{med}	1,00	87821,39	2360,00	92541,39	1,00
	$Q_{1,58}$	0,90	76934,70	2360,00	81654,70	0,88
	Q_{95}	0,33	48012,13	2360,00	52732,13	0,57
$1 < A \leq 2$	Q_{med}	1,00	87821,39	3776,00	95373,39	1,00
	$Q_{1,58}$	0,90	76934,70	3776,00	84486,70	0,89
	Q_{95}	0,33	48012,13	3776,00	55564,13	0,58
$2 < A \leq 4$	Q_{med}	1,00	87821,39	7080,00	101981,39	1,00
	$Q_{1,58}$	0,90	76934,70	7080,00	91094,70	0,89
	Q_{95}	0,33	48012,13	7080,00	62172,13	0,61
$A > 4$	Q_{med}	1,00	87821,39	26465,86	140753,12	1,00
	$Q_{1,58}$	0,90	76934,70	24315,33	125565,36	0,89
	Q_{95}	0,33	48012,13	19896,10	87804,33	0,62

Notas:

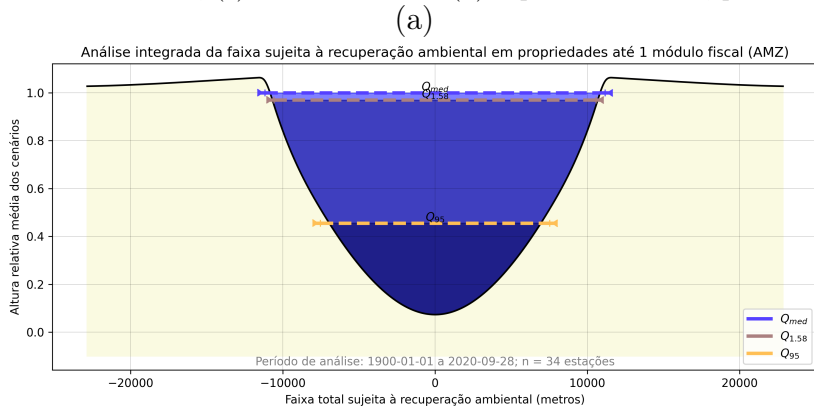
[†]Imóveis rurais classificados em função de sua área (A), expressa em módulos fiscais (MF);

Abreviaturas e símbolos:

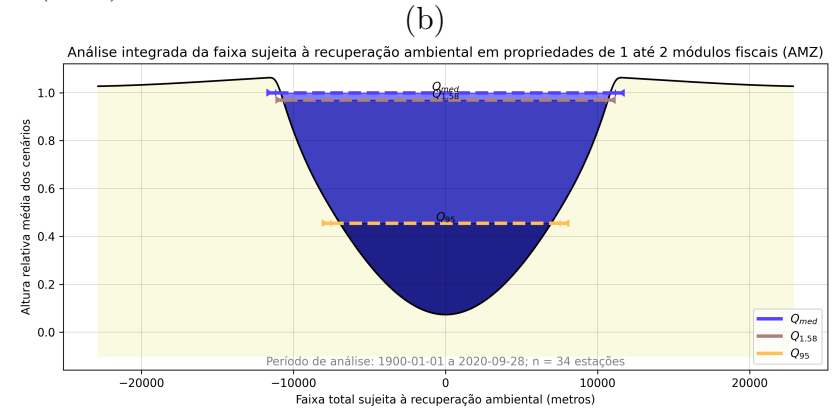
APP = área de preservação permanente; ARC = área rural consolidada, objeto de atividades agrosilvipastoris, de ecoturismo e de turismo rural até 22 de julho de 2008; APE = área protegida efetiva, correspondente a $\sum l_{rio} + 2 \cdot \sum l_{ARC}$; APE $Q_{cenário}/Q_{med}$ = área protegida efetiva de um determinado cenário em relação ao cenário Q_{med} ; H_{rel} = altura relativa média dos cenários; MF = módulo fiscal, unidade de medida agrária brasileira (cf. BRASIL, 1964, 1979a); N = número total de amostras por cenário, sendo duas por estação fluviométrica (uma para cada margem do rio); Q_{med} = média das cheias anuais; $Q_{1,58}$ = cheia anual com tempo de recorrência de 1,58 ano (cheia anual mais provável ou vazão dominante); Q_{95} = vazão média diária com 95% de probabilidade de ser excedida (vazão de permanência); $\sum l_{rio}$ = largura total dos leitos fluviais; $\sum l_{ARC}$ = largura total da faixa marginal aos leitos fluviais sujeita à recuperação ambiental.

Fonte: o autor.

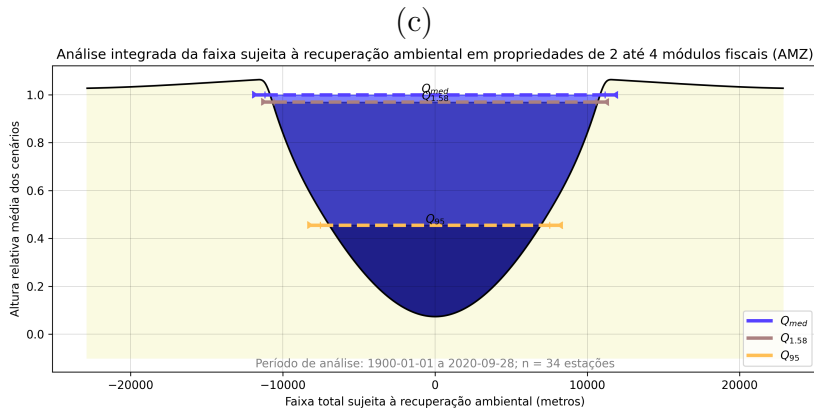
Figura D.1 – Faixas mínimas sujeitas à recuperação ambiental para áreas de preservação permanente (APP) nas margens de rios para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}) para áreas rurais consolidadas (ARC) em imóveis (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 até 2 MF, (c) de 2 até 4 MF e (d) superiores a 4 MF, para bacia do Rio Amazonas (AMZ).



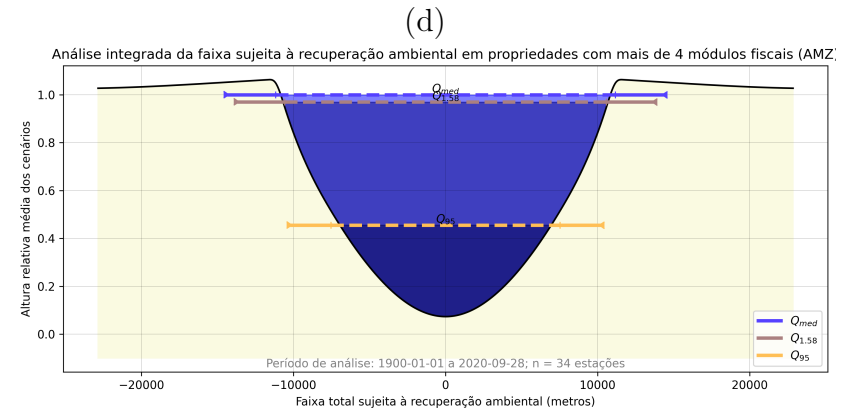
	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	22335.94	170.0	22675.94
$Q_{1,58}$	0.97	21148.86	170.0	21488.86
Q_{95}	0.46	15078.82	170.0	15418.82



	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	22335.94	272.0	22879.94
$Q_{1,58}$	0.97	21148.86	272.0	21692.86
Q_{95}	0.46	15078.82	272.0	15622.82



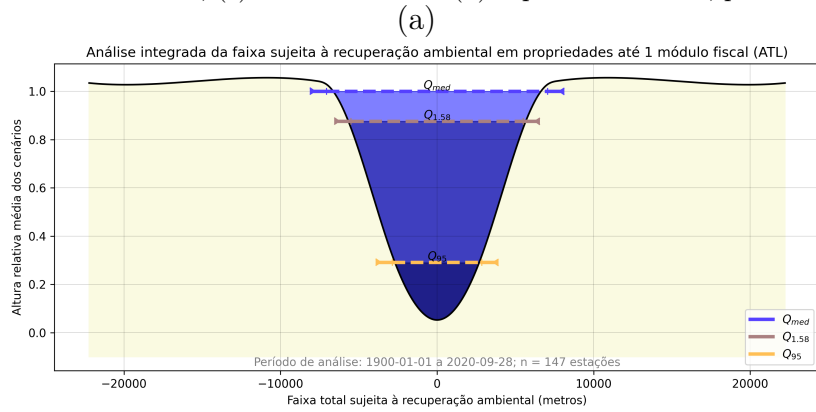
	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	22335.94	510.0	23355.94
$Q_{1,58}$	0.97	21148.86	510.0	22168.86
Q_{95}	0.46	15078.82	510.0	16098.82



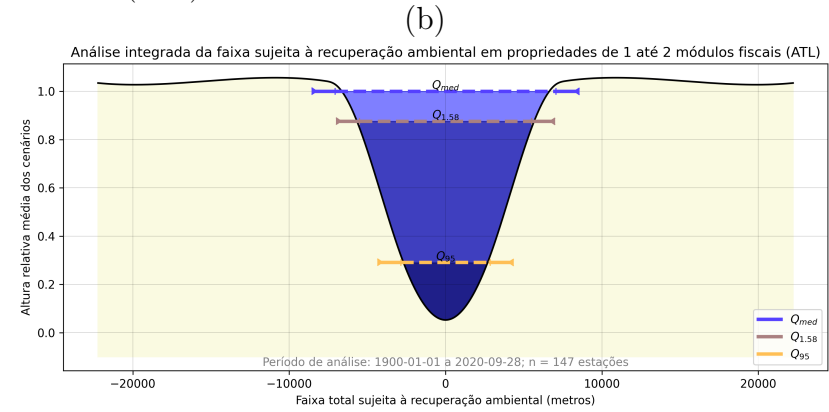
	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	22335.94	3092.24	28520.42
$Q_{1,58}$	0.97	21148.86	3009.71	27168.27
Q_{95}	0.46	15078.82	2565.8	20210.42

Fonte: o autor.

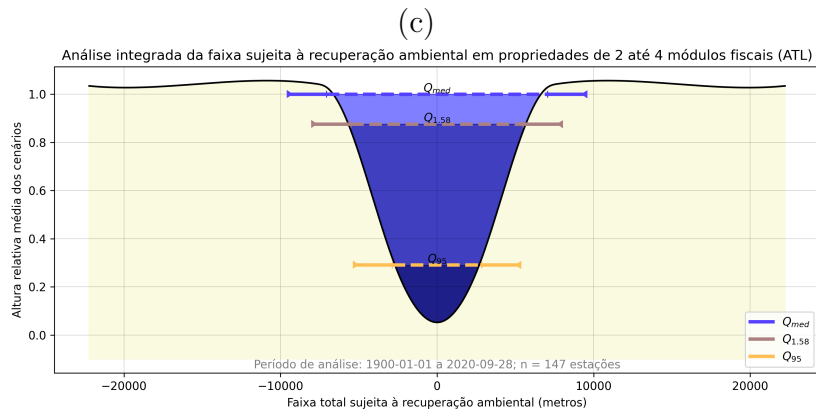
Figura D.2 – Faixas mínimas sujeitas à recuperação ambiental para áreas de preservação permanente (APP) nas margens de rios para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}) para áreas rurais consolidadas (ARC) em imóveis (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 até 2 MF, (c) de 2 até 4 MF e (d) superiores a 4 MF, para bacia do Atlântico, trecho leste (ATL).



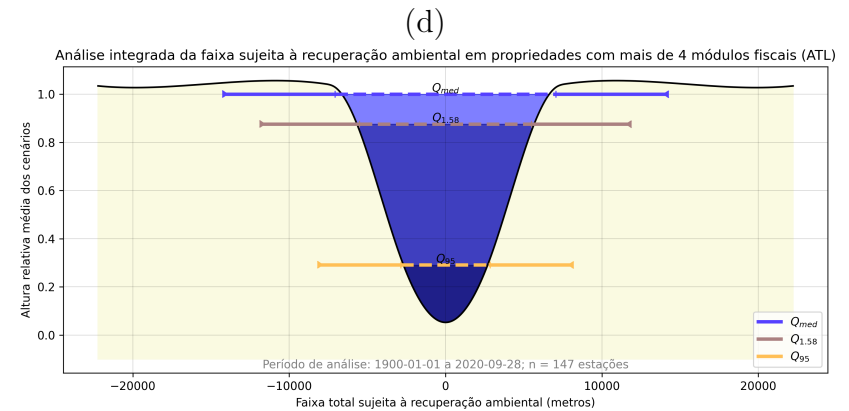
	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	14115.99	735.0	15585.99
$Q_{1,58}$	0.88	11002.93	735.0	12472.93
Q_{95}	0.29	5697.9	735.0	7167.9



	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	14115.99	1176.0	16467.99
$Q_{1,58}$	0.88	11002.93	1176.0	13354.93
Q_{95}	0.29	5697.9	1176.0	8049.9



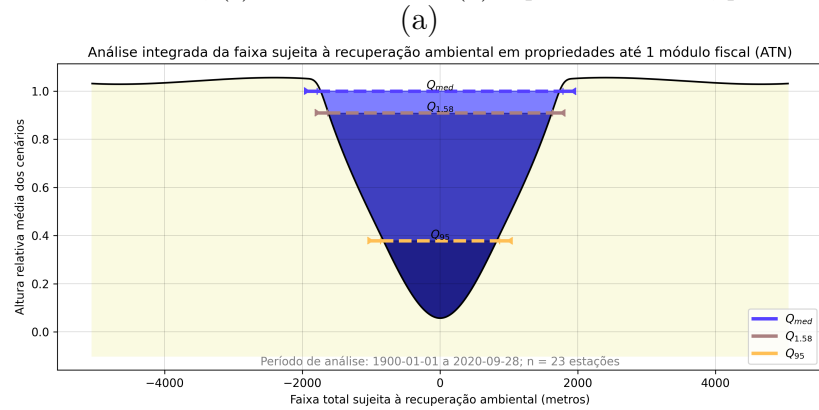
	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	14115.99	2205.0	18525.99
$Q_{1,58}$	0.88	11002.93	2205.0	15412.93
Q_{95}	0.29	5697.9	2205.0	10107.9



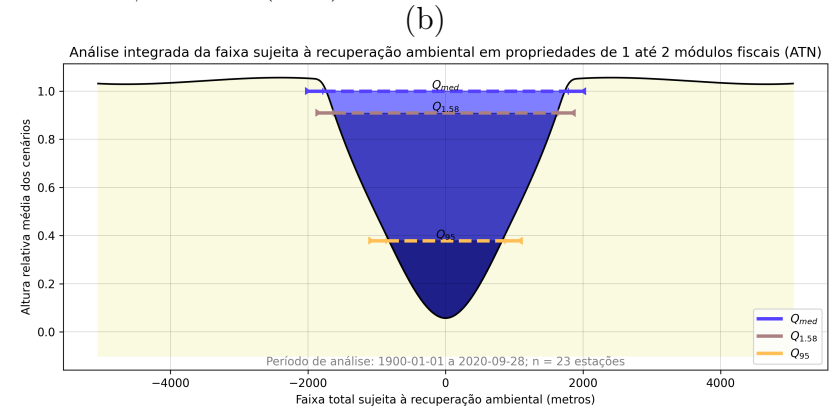
	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	14115.99	6897.18	27910.35
$Q_{1,58}$	0.88	11002.93	6056.68	23116.29
Q_{95}	0.29	5697.9	5019.92	15737.75

Fonte: o autor.

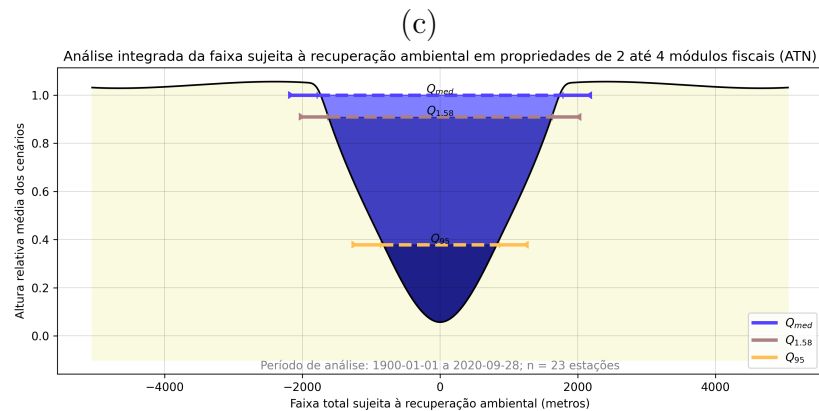
Figura D.3 – Faixas mínimas sujeitas à recuperação ambiental para áreas de preservação permanente (APP) nas margens de rios para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}) para áreas rurais consolidadas (ARC) em imóveis (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 até 2 MF, (c) de 2 até 4 MF e (d) superiores a 4 MF, para bacia do Atlântico, trecho norte / nordeste (ATN).



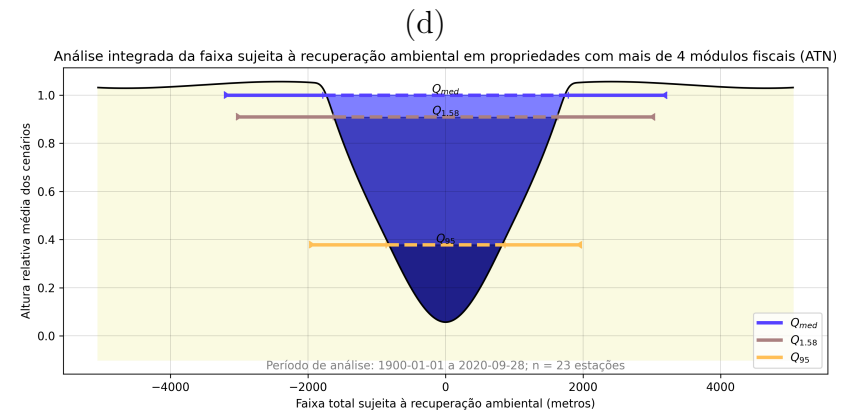
	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	3569.54	115.0	3799.54
$Q_{1,58}$	0.91	3262.7	115.0	3492.7
Q_{95}	0.38	1728.54	115.0	1958.54



	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	3569.54	184.0	3937.54
$Q_{1,58}$	0.91	3262.7	184.0	3630.7
Q_{95}	0.38	1728.54	184.0	2096.54



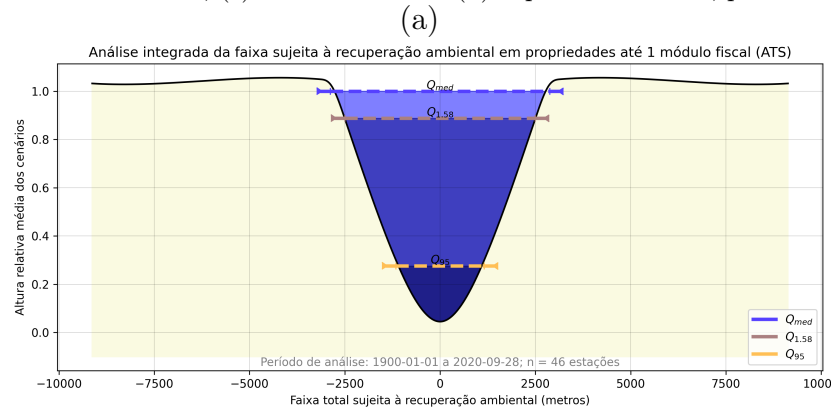
	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	3569.54	345.0	4259.54
$Q_{1,58}$	0.91	3262.7	345.0	3952.7
Q_{95}	0.38	1728.54	345.0	2418.54



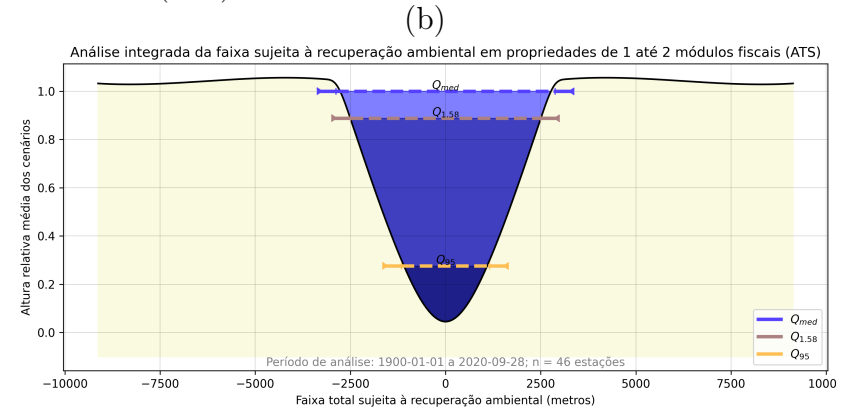
	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	3569.54	1362.46	6294.45
$Q_{1,58}$	0.91	3262.7	1342.08	5946.86
Q_{95}	0.38	1728.54	1043.52	3815.58

Fonte: o autor.

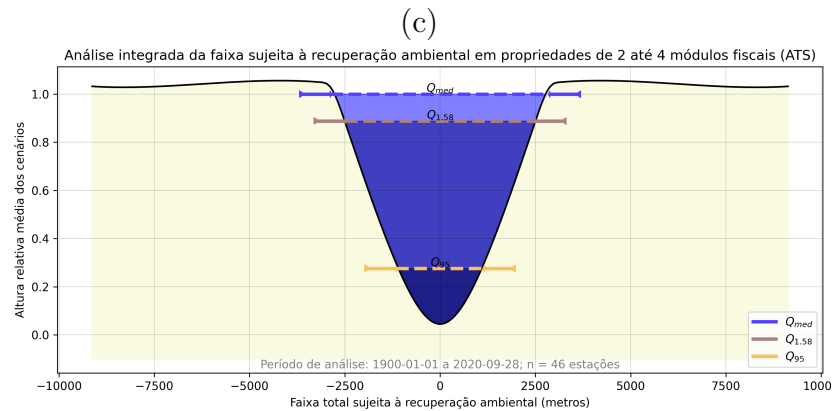
Figura D.4 – Faixas mínimas sujeitas à recuperação ambiental para áreas de preservação permanente (APP) nas margens de rios para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}) para áreas rurais consolidadas (ARC) em imóveis (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 até 2 MF, (c) de 2 até 4 MF e (d) superiores a 4 MF, para bacia do Atlântico, trecho sudeste (ATS).



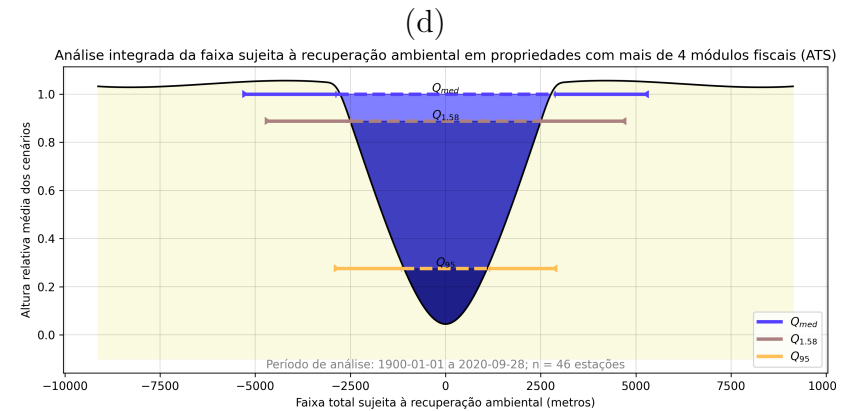
	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	5752.29	230.0	6212.29
$Q_{1,58}$	0.89	4990.4	230.0	5450.4
Q_{95}	0.28	2316.59	230.0	2776.59



	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	5752.29	368.0	6488.29
$Q_{1,58}$	0.89	4990.4	368.0	5726.4
Q_{95}	0.28	2316.59	368.0	3052.59



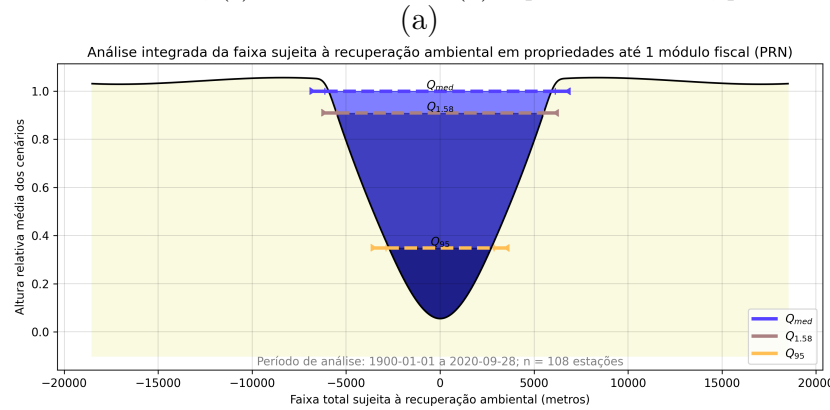
	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	5752.29	690.0	7132.29
$Q_{1,58}$	0.89	4990.4	690.0	6370.4
Q_{95}	0.28	2316.59	690.0	3696.59



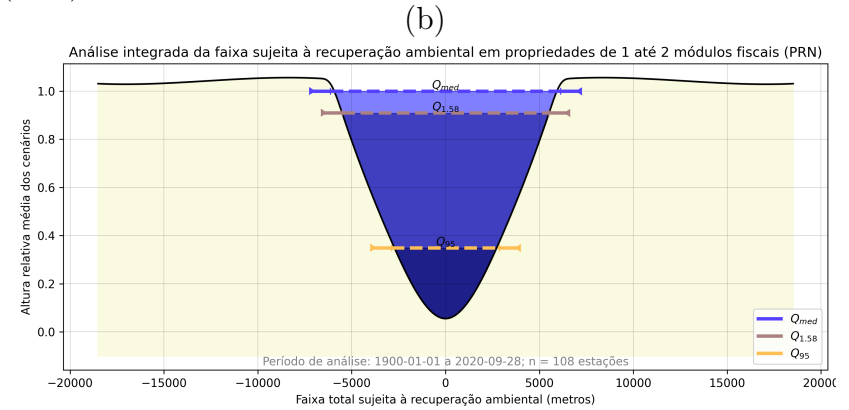
	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	5752.29	2326.47	10405.24
$Q_{1,58}$	0.89	4990.4	2121.07	9232.54
Q_{95}	0.28	2316.59	1639.55	5595.69

Fonte: o autor.

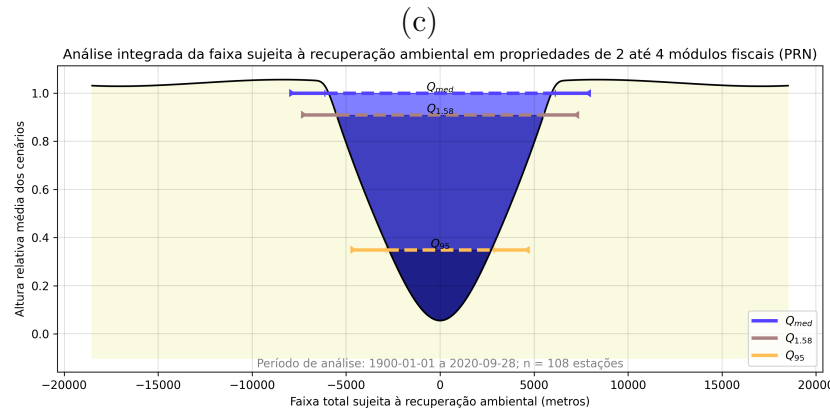
Figura D.5 – Faixas mínimas sujeitas à recuperação ambiental para áreas de preservação permanente (APP) nas margens de rios para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}) para áreas rurais consolidadas (ARC) em imóveis (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 até 2 MF, (c) de 2 até 4 MF e (d) superiores a 4 MF, para bacia do Rio Paraná (PRN).



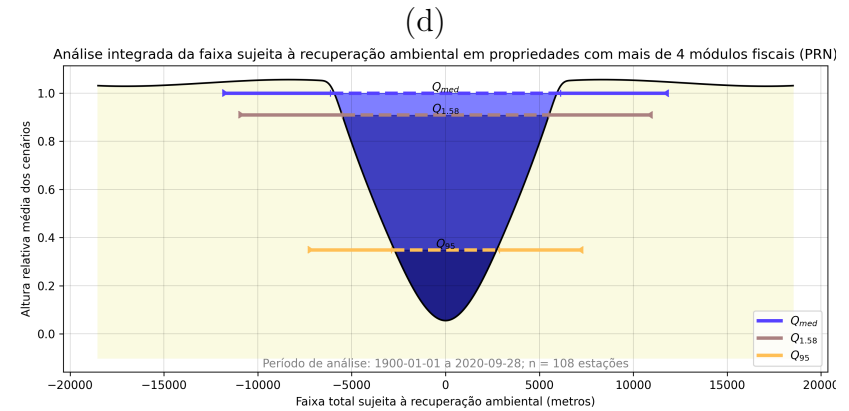
	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	12258.51	540.0	13338.51
$Q_{1,58}$	0.91	11011.61	540.0	12091.61
Q_{95}	0.35	5745.32	540.0	6825.32



	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	12258.51	864.0	13986.51
$Q_{1,58}$	0.91	11011.61	864.0	12739.61
Q_{95}	0.35	5745.32	864.0	7473.32



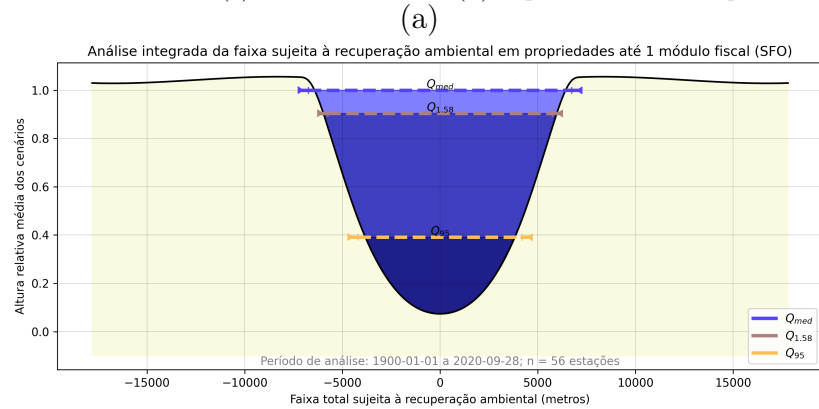
	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	12258.51	1620.0	15498.51
$Q_{1,58}$	0.91	11011.61	1620.0	14251.61
Q_{95}	0.35	5745.32	1620.0	8985.32



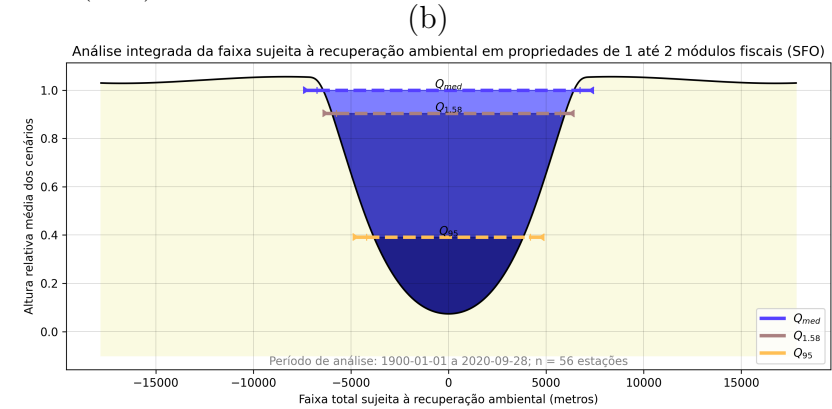
	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	12258.51	5491.05	23240.6
$Q_{1,58}$	0.91	11011.61	5254.18	21519.97
Q_{95}	0.35	5745.32	4184.83	14114.98

Fonte: o autor.

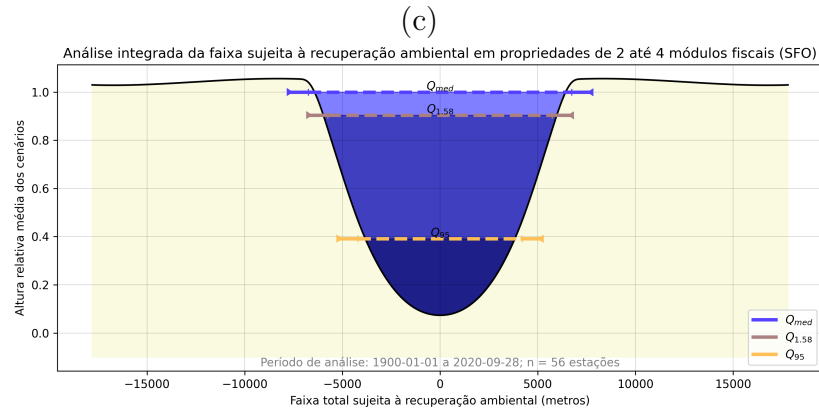
Figura D.6 – Faixas mínimas sujeitas à recuperação ambiental para áreas de preservação permanente (APP) nas margens de rios para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}) para áreas rurais consolidadas (ARC) em imóveis (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 até 2 MF, (c) de 2 até 4 MF e (d) superiores a 4 MF, para bacia do Rio São Francisco (SFO).



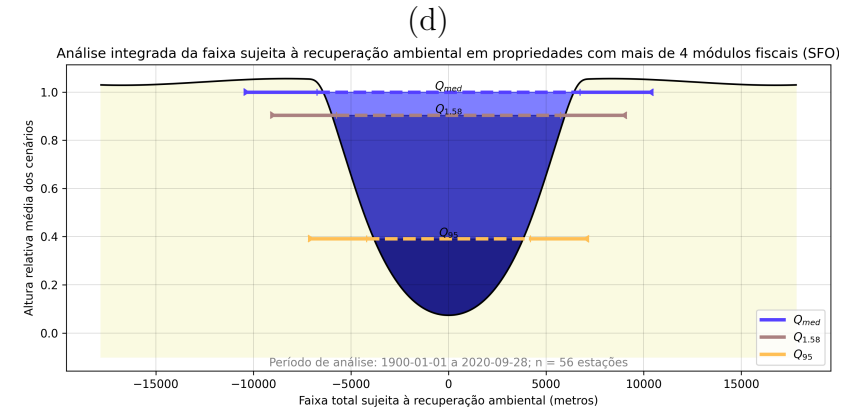
	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	13470.98	280.0	14030.98
$Q_{1,58}$	0.9	11477.02	280.0	12037.02
Q_{95}	0.39	8393.84	280.0	8953.84



	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	13470.98	448.0	14366.98
$Q_{1,58}$	0.9	11477.02	448.0	12373.02
Q_{95}	0.39	8393.84	448.0	9289.84



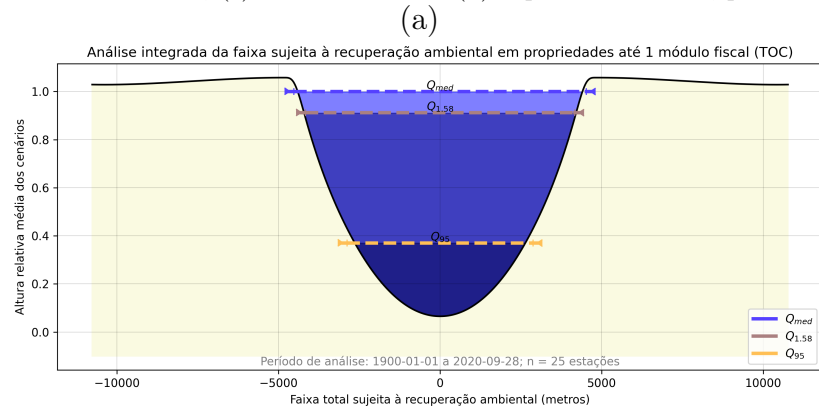
	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	13470.98	840.0	15150.98
$Q_{1,58}$	0.9	11477.02	840.0	13157.02
Q_{95}	0.39	8393.84	840.0	10073.84



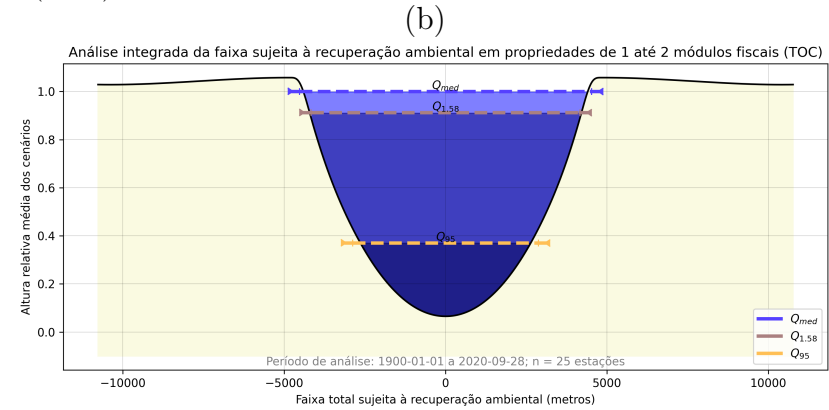
	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	13470.98	3495.89	20462.76
$Q_{1,58}$	0.9	11477.02	3131.32	17739.67
Q_{95}	0.39	8393.84	2734.11	13862.06

Fonte: o autor.

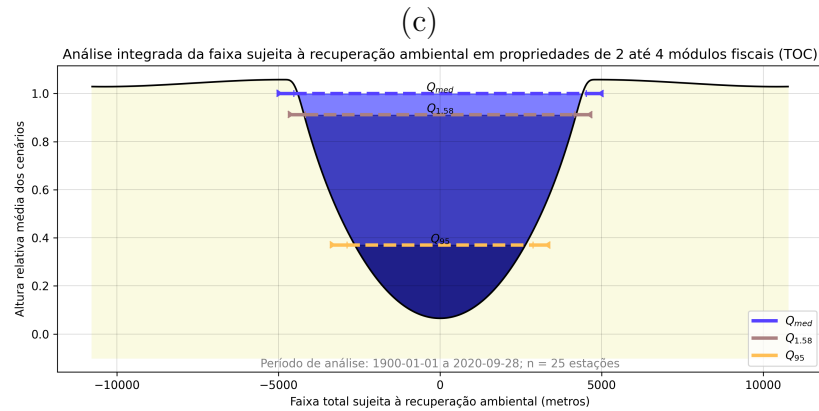
Figura D.7 – Faixas mínimas sujeitas à recuperação ambiental para áreas de preservação permanente (APP) nas margens de rios para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}) para áreas rurais consolidadas (ARC) em imóveis (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 até 2 MF, (c) de 2 até 4 MF e (d) superiores a 4 MF, para bacia do Rio Tocantins (TOC).



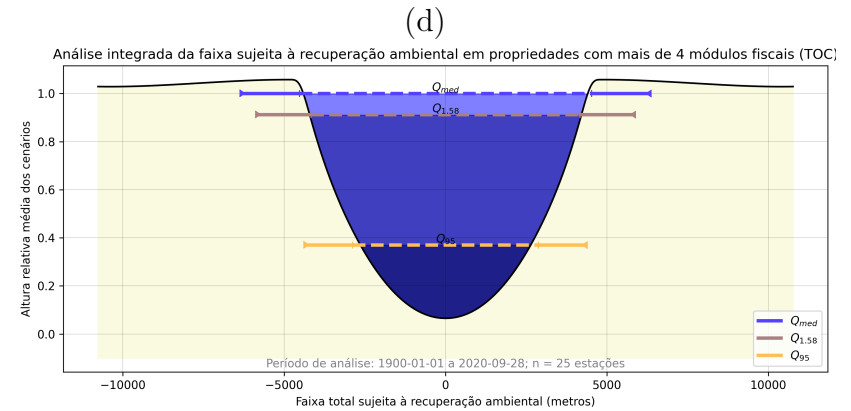
	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	9053.32	125.0	9303.32
$Q_{1,58}$	0.91	8343.24	125.0	8593.24
Q_{95}	0.37	5759.7	125.0	6009.7



	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	9053.32	200.0	9453.32
$Q_{1,58}$	0.91	8343.24	200.0	8743.24
Q_{95}	0.37	5759.7	200.0	6159.7



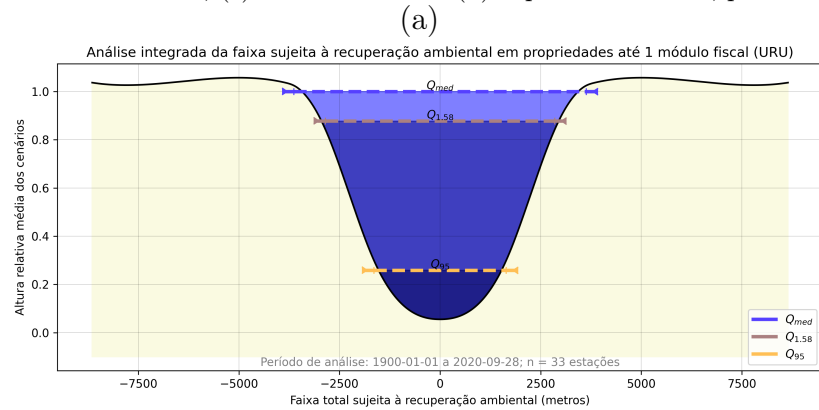
	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	9053.32	375.0	9803.32
$Q_{1,58}$	0.91	8343.24	375.0	9093.24
Q_{95}	0.37	5759.7	375.0	6509.7



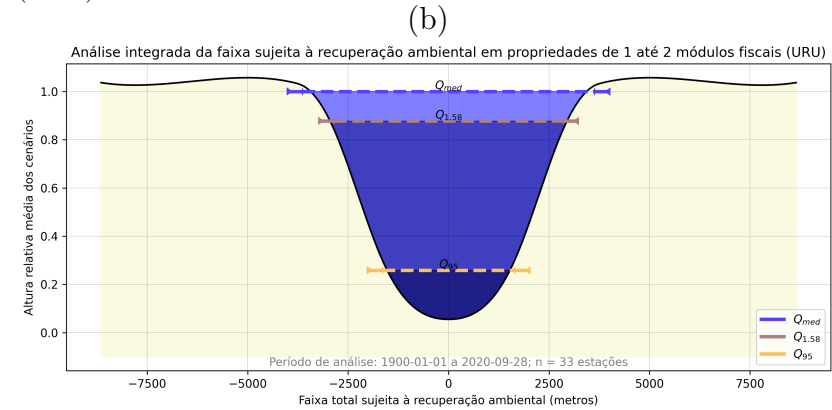
	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	9053.32	1696.16	12445.64
$Q_{1,58}$	0.91	8343.24	1570.43	11484.1
Q_{95}	0.37	5759.7	1367.1	8493.89

Fonte: o autor.

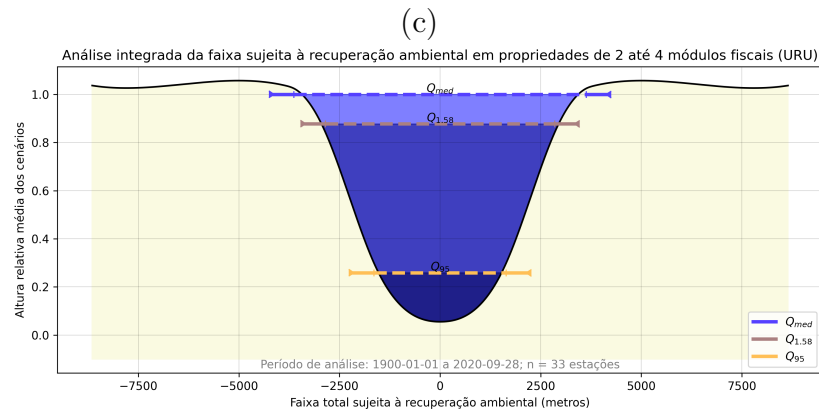
Figura D.8 – Faixas mínimas sujeitas à recuperação ambiental para áreas de preservação permanente (APP) nas margens de rios para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}) para áreas rurais consolidadas (ARC) em imóveis (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 até 2 MF, (c) de 2 até 4 MF e (d) superiores a 4 MF, para bacia do Rio Uruguai (URU).



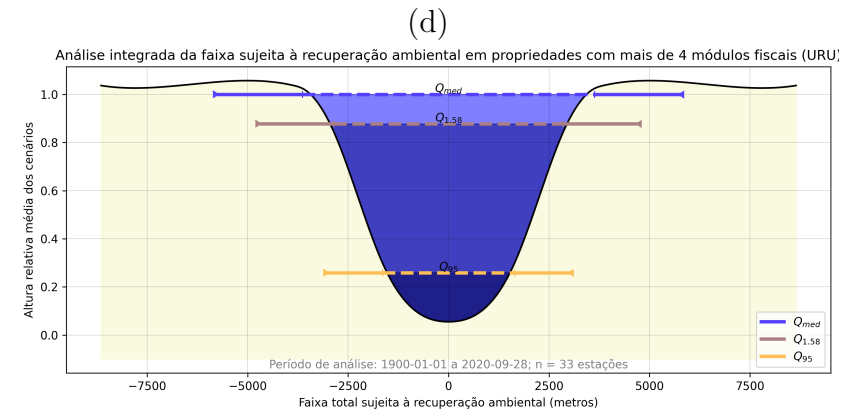
	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	7264.81	165.0	7594.81
$Q_{1,58}$	0.88	5697.95	165.0	6027.95
Q_{95}	0.26	3291.41	165.0	3621.41



	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	7264.81	264.0	7792.81
$Q_{1,58}$	0.88	5697.95	264.0	6225.95
Q_{95}	0.26	3291.41	264.0	3819.41



	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	7264.81	495.0	8254.81
$Q_{1,58}$	0.88	5697.95	495.0	6687.95
Q_{95}	0.26	3291.41	495.0	4281.41



	H_{rel}	$\sum Largura_{rio}$	$\sum Largura_{ARC}$	$\sum Largura_{rio} + 2 \cdot \sum Largura_{ARC}$
Q_{med}	1.0	7264.81	2104.42	11473.66
$Q_{1,58}$	0.88	5697.95	1829.85	9357.66
Q_{95}	0.26	3291.41	1341.27	5973.96

Fonte: o autor.

Tabela D.2 – Probabilidade de perturbação por inundação integral das seções transversais formadas pelo leito dos rios e respectivas faixas mínimas das áreas de preservação permanente (APP) sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC), em função do cenário hidrológico simulado e do tamanho do imóvel rural, por bacia hidrográfica.

(continua)

IMÓVEL [†]	CEN	AMOSTRAS POR INTERVALOS DO TR (anos)*												IND	N
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	<20	≥20		
AMZ – Rio Amazonas															
$A \leq 1$	Q_{med}	2	21	13	2	4	2	0	1	2	1	48	17	3	68
	$Q_{1,58}$	20	15	13	2	0	2	1	1	0	1	55	12	1	68
	Q_{95}	65	0	2	0	0	1	0	0	0	0	68	0	0	68
$1 < A \leq 2$	Q_{med}	0	16	8	9	2	0	3	1	0	2	41	23	4	68
	$Q_{1,58}$	11	15	9	6	2	0	3	0	1	2	49	16	3	68
	Q_{95}	63	0	1	0	0	0	0	0	0	0	64	3	1	68
$2 < A \leq 4$	Q_{med}	0	6	11	2	4	1	1	4	1	3	33	30	5	68
	$Q_{1,58}$	6	11	7	2	2	5	1	0	0	3	37	26	5	68
	Q_{95}	59	2	0	1	0	0	0	0	0	1	63	4	1	68
$A > 4$	Q_{med}	2	4	0	0	0	0	0	0	1	2	9	45	14	68
	$Q_{1,58}$	5	4	0	0	0	1	1	1	0	2	14	41	13	68
	Q_{95}	25	6	2	1	1	0	0	0	0	1	36	30	2	68
ATL – Atlântico, trecho leste															
$A \leq 1$	Q_{med}	3	63	38	19	13	9	9	10	5	4	173	115	6	294
	$Q_{1,58}$	32	88	25	19	8	8	5	5	7	9	206	88	0	294
	Q_{95}	202	41	9	7	2	5	2	1	2	0	271	23	0	294
$1 < A \leq 2$	Q_{med}	1	58	21	18	17	9	4	7	6	3	144	141	9	294
	$Q_{1,58}$	25	79	21	12	8	7	5	4	8	3	172	115	7	294
	Q_{95}	145	56	14	9	2	4	3	3	2	0	238	56	0	294
$2 < A \leq 4$	Q_{med}	2	38	18	13	14	4	5	5	6	9	114	163	17	294
	$Q_{1,58}$	19	57	21	11	14	4	3	7	5	2	143	141	10	294
	Q_{95}	89	56	10	13	10	3	4	3	2	3	193	95	6	294
$A > 4$	Q_{med}	1	19	9	2	13	3	3	3	2	6	61	198	35	294
	$Q_{1,58}$	13	41	7	2	10	3	3	1	4	6	90	176	28	294
	Q_{95}	41	52	8	5	6	4	7	6	4	2	135	144	15	294

Tabela D.2 – Probabilidade de perturbação por inundação integral das seções transversais formadas pelo leito dos rios e respectivas faixas mínimas das áreas de preservação permanente (APP) sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC), em função do cenário hidrológico simulado e do tamanho do imóvel rural, por bacia hidrográfica.

(continuação)

IMÓVEL [†]	CEN	AMOSTRAS POR INTERVALOS DO TR (anos)*												IND	N
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	<20	≥20		
ATN – Atlântico, trecho norte / nordeste															
$A \leq 1$	Q_{med}	0	14	6	4	5	2	1	0	0	1	33	12	1	46
	$Q_{1,58}$	7	16	4	3	5	0	1	1	0	0	37	8	1	46
	Q_{95}	37	4	1	1	1	0	0	0	0	0	44	2	0	46
$1 < A \leq 2$	Q_{med}	0	7	6	7	6	1	0	0	0	1	28	17	1	46
	$Q_{1,58}$	4	16	3	4	4	0	0	1	0	0	32	13	1	46
	Q_{95}	27	7	5	0	3	0	0	1	1	0	44	2	0	46
$2 < A \leq 4$	Q_{med}	0	2	5	6	5	0	0	1	0	0	19	26	1	46
	$Q_{1,58}$	4	6	4	5	5	0	0	1	0	0	25	20	1	46
	Q_{95}	21	4	4	3	4	0	0	0	0	0	36	10	0	46
$A > 4$	Q_{med}	0	0	4	4	3	1	0	0	0	0	12	31	3	46
	$Q_{1,58}$	0	0	4	4	4	0	1	0	0	0	13	30	3	46
	Q_{95}	8	1	5	6	4	0	0	0	0	0	24	22	0	46
ATS – Atlântico, trecho sudeste															
$A \leq 1$	Q_{med}	3	22	20	4	4	4	2	2	2	2	65	24	3	92
	$Q_{1,58}$	11	37	11	3	4	4	2	3	2	1	78	13	1	92
	Q_{95}	75	9	1	1	0	4	0	0	0	0	90	2	0	92
$1 < A \leq 2$	Q_{med}	3	13	17	7	4	6	2	2	2	2	58	28	6	92
	$Q_{1,58}$	7	27	11	7	3	5	1	1	2	1	65	23	4	92
	Q_{95}	58	16	2	2	3	1	2	0	1	1	86	6	0	92
$2 < A \leq 4$	Q_{med}	2	13	6	2	8	1	3	5	2	0	42	42	8	92
	$Q_{1,58}$	5	17	9	1	7	4	2	2	2	1	50	35	7	92
	Q_{95}	36	15	5	6	3	5	0	0	4	0	74	17	1	92
$A > 4$	Q_{med}	1	8	2	2	2	3	0	2	2	1	23	48	21	92
	$Q_{1,58}$	3	10	5	0	2	4	0	0	4	0	28	46	18	92
	Q_{95}	19	11	7	1	7	0	0	4	2	0	51	34	7	92

Tabela D.2 – Probabilidade de perturbação por inundação integral das seções transversais formadas pelo leito dos rios e respectivas faixas mínimas das áreas de preservação permanente (APP) sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC), em função do cenário hidrológico simulado e do tamanho do imóvel rural, por bacia hidrográfica.

(continuação)

IMÓVEL [†]	CEN	AMOSTRAS POR INTERVALOS DO TR (anos)*												IND	N
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	<20	≥20		
PRN – Rio Paraná															
$A \leq 1$	Q_{med}	3	57	34	16	12	6	5	3	4	5	145	62	9	216
	$Q_{1,58}$	22	64	27	12	10	8	9	1	3	3	159	50	7	216
	Q_{95}	154	29	9	3	7	0	3	0	1	0	206	9	1	216
$1 < A \leq 2$	Q_{med}	4	37	31	14	15	14	7	4	1	1	128	75	13	216
	$Q_{1,58}$	17	55	22	7	20	7	6	3	1	0	138	66	12	216
	Q_{95}	105	46	15	6	10	2	2	1	2	0	189	24	3	216
$2 < A \leq 4$	Q_{med}	3	23	24	12	8	12	8	7	8	3	108	93	15	216
	$Q_{1,58}$	10	40	19	10	14	12	5	3	3	1	117	85	14	216
	Q_{95}	66	38	15	7	14	9	3	2	0	0	154	50	12	216
$A > 4$	Q_{med}	3	11	9	5	3	7	3	7	1	2	51	124	41	216
	$Q_{1,58}$	4	17	10	6	3	8	5	6	2	2	63	114	39	216
	Q_{95}	30	22	12	6	5	11	4	8	2	1	101	96	19	216
SFO – Rio São Francisco															
$A \leq 1$	Q_{med}	1	21	21	16	7	7	5	2	2	4	86	22	4	112
	$Q_{1,58}$	27	29	17	3	7	5	3	0	3	1	95	17	0	112
	Q_{95}	92	6	1	2	1	3	1	0	1	0	107	5	0	112
$1 < A \leq 2$	Q_{med}	1	12	17	10	8	8	9	1	3	3	72	36	4	112
	$Q_{1,58}$	25	19	15	7	6	3	3	1	3	2	84	28	0	112
	Q_{95}	80	11	5	1	2	3	1	0	0	0	103	9	0	112
$2 < A \leq 4$	Q_{med}	1	10	8	6	4	9	3	5	4	1	51	55	6	112
	$Q_{1,58}$	20	11	14	2	4	4	3	2	2	2	64	47	1	112
	Q_{95}	56	10	9	3	5	3	1	1	4	0	92	19	1	112
$A > 4$	Q_{med}	2	1	3	3	1	2	1	3	6	1	23	70	19	112
	$Q_{1,58}$	9	5	3	3	1	3	0	3	6	0	33	67	12	112
	Q_{95}	27	7	6	2	3	3	2	7	2	1	60	47	5	112

Tabela D.2 – Probabilidade de perturbação por inundação integral das seções transversais formadas pelo leito dos rios e respectivas faixas mínimas das áreas de preservação permanente (APP) sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC), em função do cenário hidrológico simulado e do tamanho do imóvel rural, por bacia hidrográfica.

(continuação)

IMÓVEL [†]	CEN	AMOSTRAS POR INTERVALOS DO TR (anos)*												IND	N
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	<20	≥20		
TOC – Rio Tocantins															
$A \leq 1$	Q_{med}	3	8	8	6	4	4	3	2	1	0	39	7	4	50
	$Q_{1,58}$	10	13	10	3	0	3	0	4	0	0	43	5	2	50
	Q_{95}	49	0	0	1	0	0	0	0	0	0	50	0	0	50
$1 < A \leq 2$	Q_{med}	3	8	4	6	1	2	3	5	0	0	32	13	5	50
	$Q_{1,58}$	7	9	6	4	2	3	2	3	0	1	37	10	3	50
	Q_{95}	36	9	2	0	0	0	1	2	0	0	50	0	0	50
$2 < A \leq 4$	Q_{med}	2	4	6	3	3	0	1	6	0	1	26	16	8	50
	$Q_{1,58}$	4	8	3	5	0	0	1	6	1	0	28	15	7	50
	Q_{95}	26	8	3	2	0	1	2	3	0	0	45	4	1	50
$A > 4$	Q_{med}	2	3	1	3	0	0	0	0	0	1	10	26	14	50
	$Q_{1,58}$	4	5	1	3	0	0	0	0	1	0	14	26	10	50
	Q_{95}	14	5	1	3	1	0	0	1	1	1	27	16	7	50
URU – Rio Uruguai															
$A \leq 1$	Q_{med}	0	26	14	6	3	1	1	0	0	0	51	13	2	66
	$Q_{1,58}$	16	27	8	3	2	1	0	0	0	0	57	7	2	66
	Q_{95}	61	5	0	0	0	0	0	0	0	0	66	0	0	66
$1 < A \leq 2$	Q_{med}	0	18	13	7	5	2	0	2	0	0	47	17	2	66
	$Q_{1,58}$	13	22	8	6	2	2	0	0	0	1	54	10	2	66
	Q_{95}	57	6	2	0	0	0	0	0	1	0	66	0	0	66
$2 < A \leq 4$	Q_{med}	0	11	11	2	2	4	0	1	0	0	31	28	7	66
	$Q_{1,58}$	8	19	9	2	1	2	0	0	1	0	42	19	5	66
	Q_{95}	43	10	6	0	0	0	0	0	0	1	60	3	3	66
$A > 4$	Q_{med}	0	4	3	0	1	1	0	0	0	0	9	36	21	66
	$Q_{1,58}$	4	7	3	0	2	1	0	2	2	1	22	30	14	66
	Q_{95}	19	13	5	1	3	2	2	1	0	0	46	16	4	66

Tabela D.2 – Probabilidade de perturbação por inundação integral das seções transversais formadas pelo leito dos rios e respectivas faixas mínimas das áreas de preservação permanente (APP) sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC), em função do cenário hidrológico simulado e do tamanho do imóvel rural, por bacia hidrográfica.

(conclusão)

IMÓVEL [†]	CEN	AMOSTRAS POR INTERVALOS DO TR (anos)*												IND	N
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	<20	≥20		
BRASIL															
$A \leq 1$	Q_{med}	15	232	154	73	52	35	26	20	16	17	640	272	32	944
	$Q_{1,58}$	145	289	115	48	36	31	21	15	15	15	730	200	14	944
	Q_{95}	735	94	23	15	11	13	6	1	4	0	902	41	1	944
$1 < A \leq 2$	Q_{med}	12	169	117	78	58	42	28	22	12	12	550	350	44	944
	$Q_{1,58}$	109	242	95	53	47	27	20	13	15	10	631	281	32	944
	Q_{95}	571	151	46	18	20	10	9	7	7	1	840	100	4	944
$2 < A \leq 4$	Q_{med}	10	107	89	46	48	31	21	34	21	17	424	453	67	944
	$Q_{1,58}$	76	169	86	38	47	31	15	21	14	9	506	388	50	944
	Q_{95}	396	143	52	35	36	21	10	9	10	5	717	202	25	944
$A > 4$	Q_{med}	11	50	31	19	23	17	7	15	12	13	198	578	168	944
	$Q_{1,58}$	42	89	33	18	22	20	10	13	19	11	277	530	137	944
	Q_{95}	183	117	46	25	30	20	15	27	11	6	480	405	59	944

Notas:

* Amostras divididas em classes espaçadas a cada dois anos e com valores acumulados para tempos de recorrência inferior a 20 anos e igual ou superior a 20 anos;

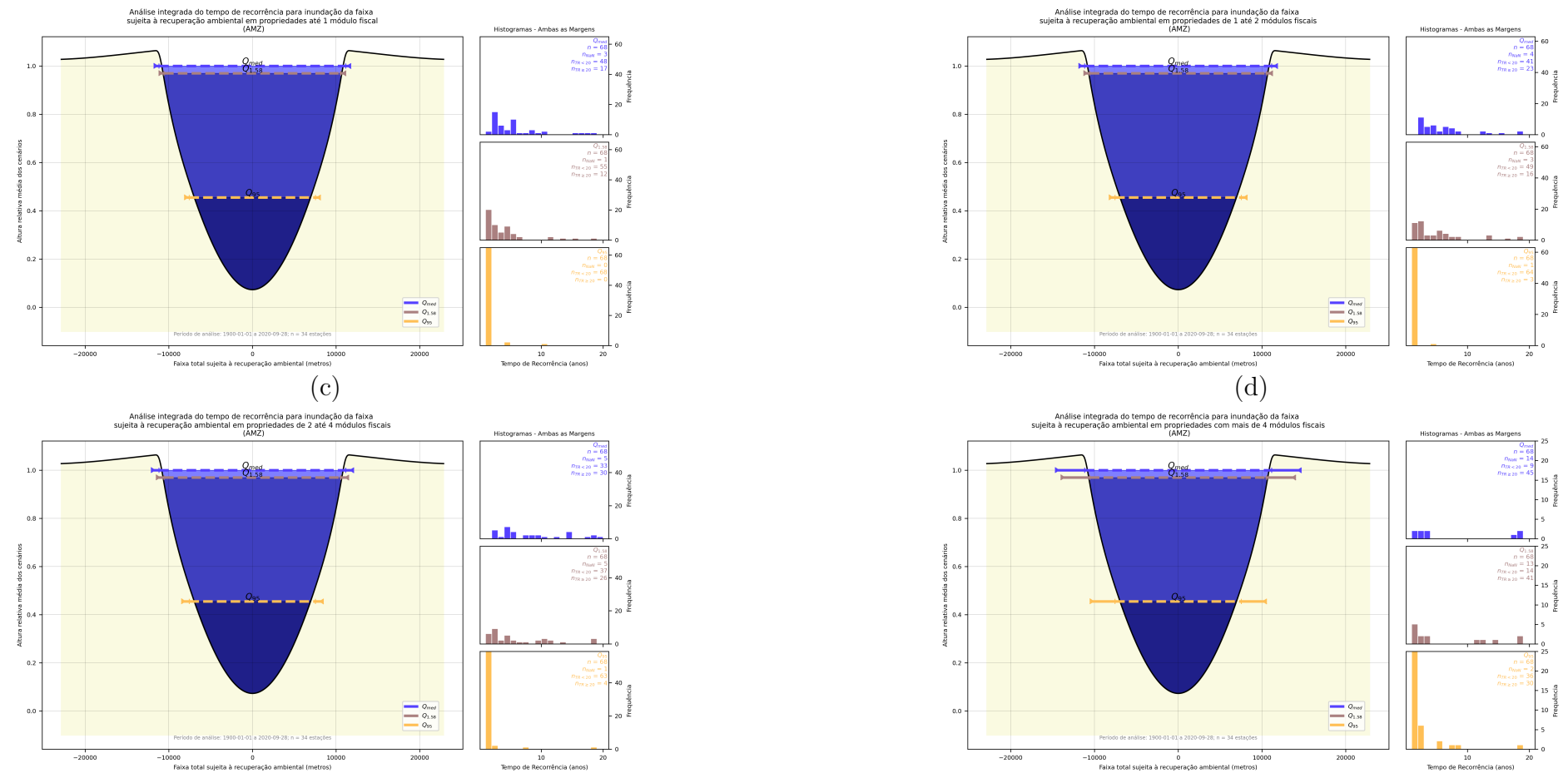
† Imóveis rurais classificados em função de sua área (A), expressa em módulos fiscais (MF);

Abreviaturas e símbolos:

APP = área de preservação permanente; ARC = área rural consolidada, objeto de atividades agrossilvipastoris, de ecoturismo e de turismo rural até 22 de julho de 2008; CEN = cenário hidrológico; IND = número de amostras cujo tempo de recorrência para inundação da APP é indeterminado (normalmente devido às limitações da extensão do perfil da seção transversal do rio); MF = módulo fiscal, unidade de medida agrária brasileira (cf. BRASIL, 1964, 1979a); N = número total de amostras por cenário, sendo duas por estação fluviométrica (uma para cada margem do rio); Q_{med} = média das cheias anuais; $Q_{1,58}$ = cheia anual com tempo de recorrência de 1,58 ano (vazão dominante ou de margens plenas); Q_{95} = vazão média diária com 95% de probabilidade de ser excedida (vazão de permanência); TR = tempo de recorrência ou período de retorno de um evento em anos.

Fonte: o autor.

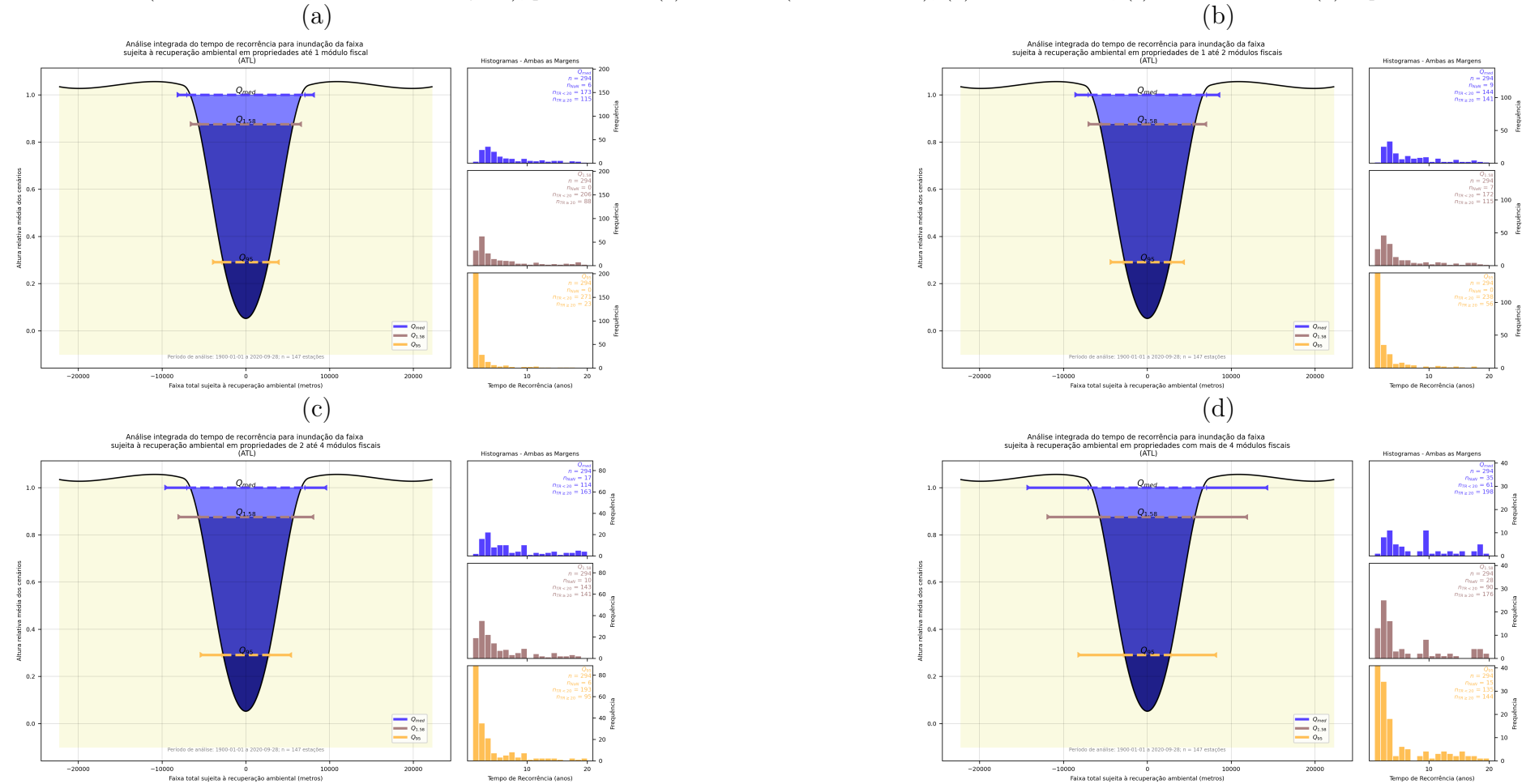
Figura D.9 – Análise integrada da probabilidade de perturbação (inundação integral) das áreas de preservação permanente sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) em faixas marginais de rios na bacia do Rio Amazonas (AMZ) para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}) para imóveis (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 até 2 MF, (c) de 2 até 4 MF e (d) superiores a 4 MF.



Notas: Cada rio fornece duas amostras de áreas protegidas, uma em cada margem. Aos rios cujos perfis das seções transversais não possuem extensão suficiente para simular a probabilidade de inundação integral da área de preservação permanente é atribuído o valor indeterminado (*NaN*) e desconsiderados da análise.

Fonte: o autor.

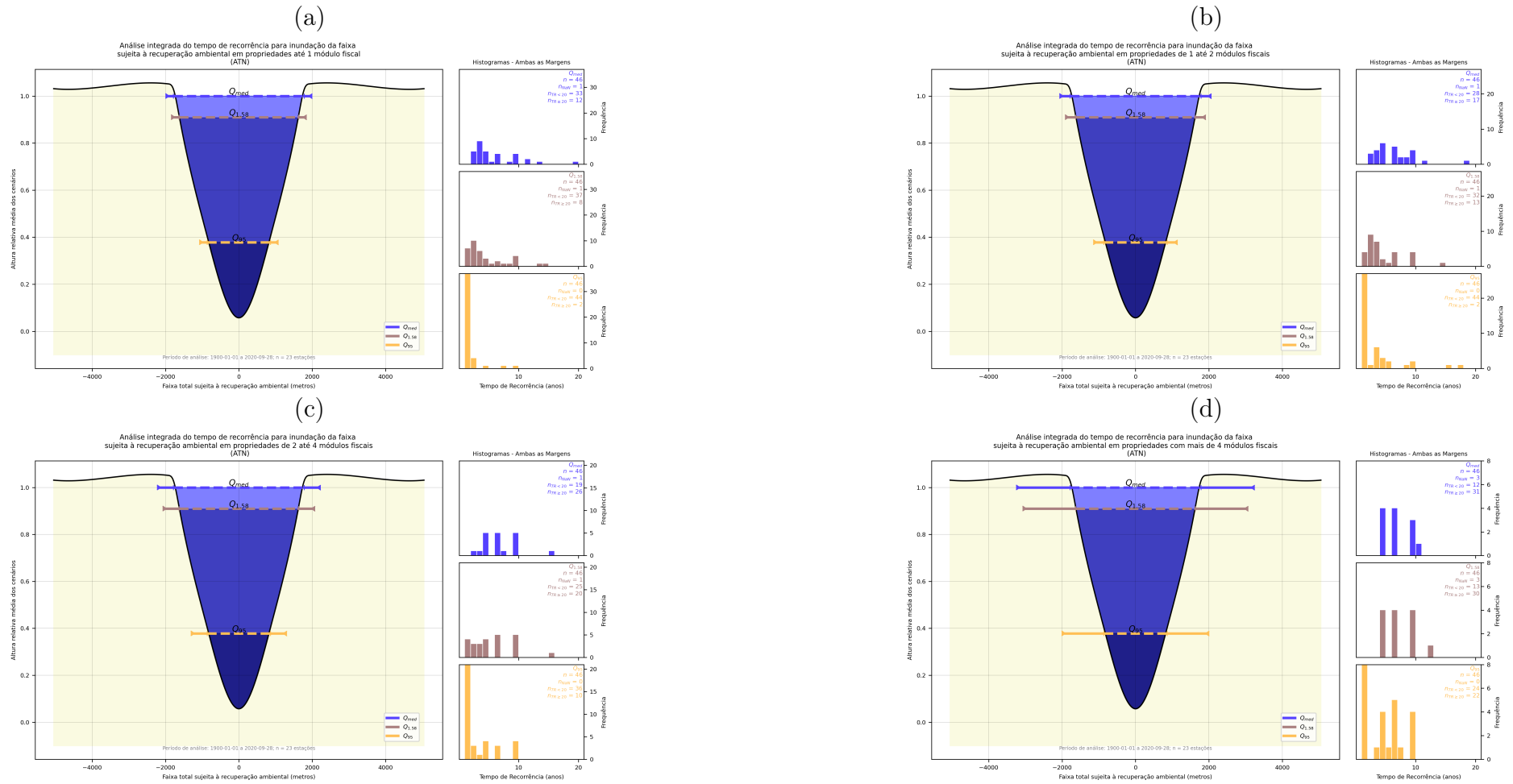
Figura D.10 – Análise integrada da probabilidade de perturbação (inundação integral) das áreas de preservação permanente sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) em faixas marginais de rios na bacia do Atlântico, trecho leste (ATL), para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}), para imóveis (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 até 2 MF, (c) de 2 até 4 MF e (d) superiores a 4 MF.



Notas: Cada rio fornece duas amostras de áreas protegidas, uma em cada margem. Aos rios cujos perfis das seções transversais não possuem extensão suficiente para simular a probabilidade de inundação integral da área de preservação permanente é atribuído o valor indeterminado (NaN) e desconsiderados da análise.

Fonte: o autor.

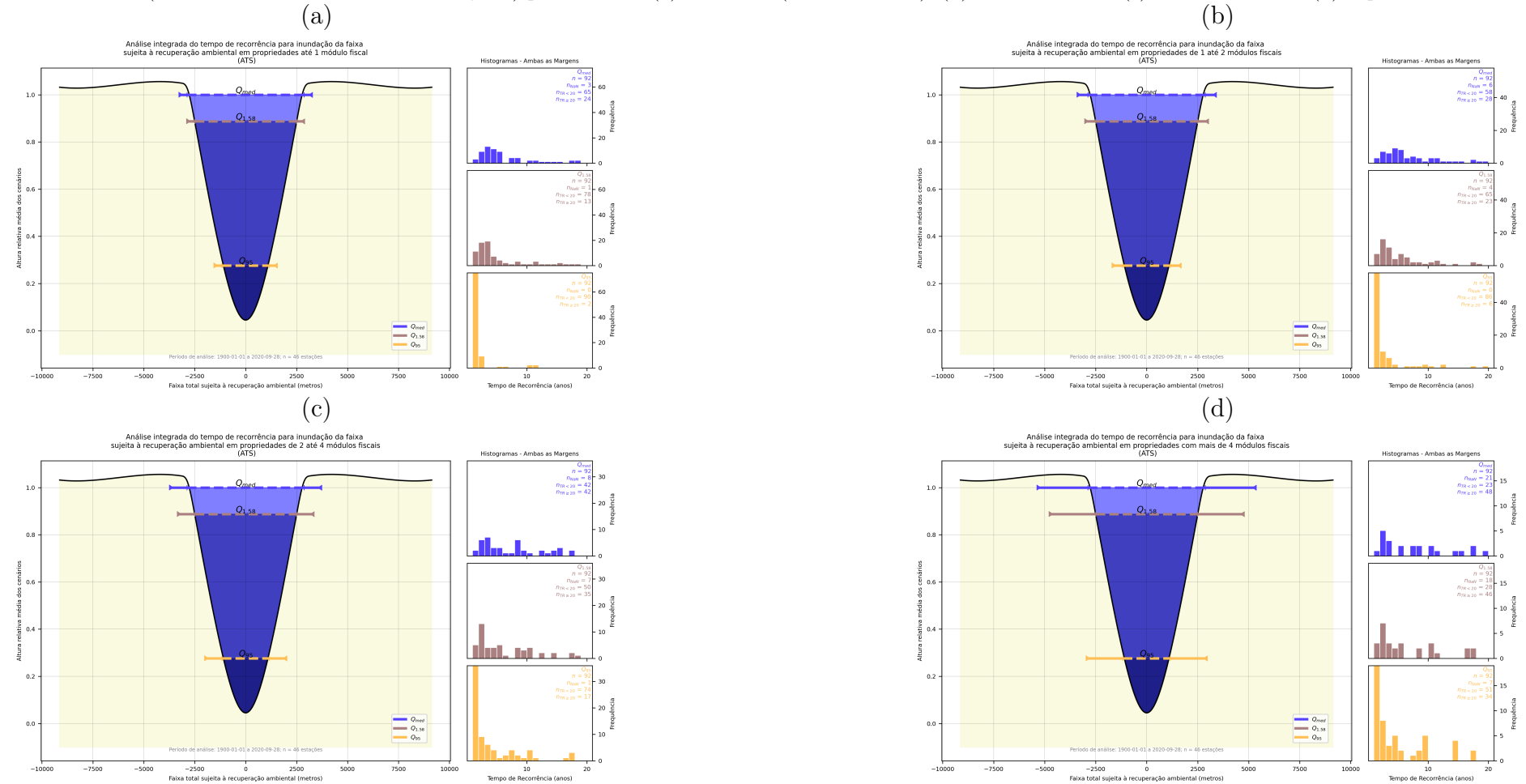
Figura D.11 – Análise integrada da probabilidade de perturbação (inundação integral) das áreas de preservação permanente sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) em faixas marginais de rios na bacia do Atlântico, trecho norte / nordeste (ATN), para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}) para imóveis (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 até 2 MF, (c) de 2 até 4 MF e (d) superiores a 4 MF.



Notas: Cada rio fornece duas amostras de áreas protegidas, uma em cada margem. Aos rios cujos perfis das seções transversais não possuem extensão suficiente para simular a probabilidade de inundação integral da área de preservação permanente é atribuído o valor indeterminado (NaN) e desconsiderados da análise.

Fonte: o autor.

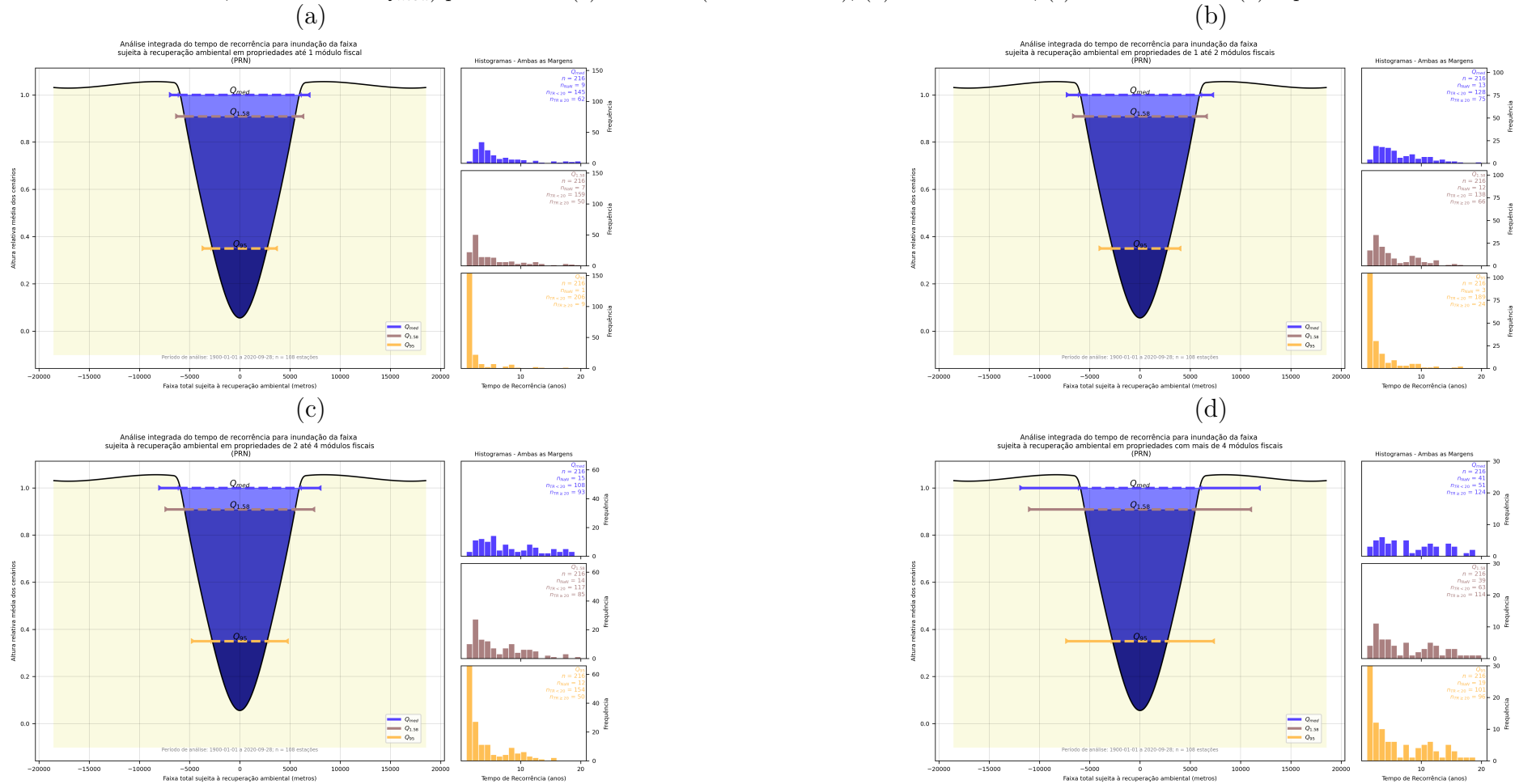
Figura D.12 – Análise integrada da probabilidade de perturbação (inundação integral) das áreas de preservação permanente sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) em faixas marginais de rios na bacia do Atlântico, trecho sudeste (ATS), para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}) para imóveis (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 até 2 MF, (c) de 2 até 4 MF e (d) superiores a 4 MF.



Notas: Cada rio fornece duas amostras de áreas protegidas, uma em cada margem. Aos rios cujos perfis das seções transversais não possuem extensão suficiente para simular a probabilidade de inundação integral da área de preservação permanente é atribuído o valor indeterminado (NaN) e desconsiderados da análise.

Fonte: o autor.

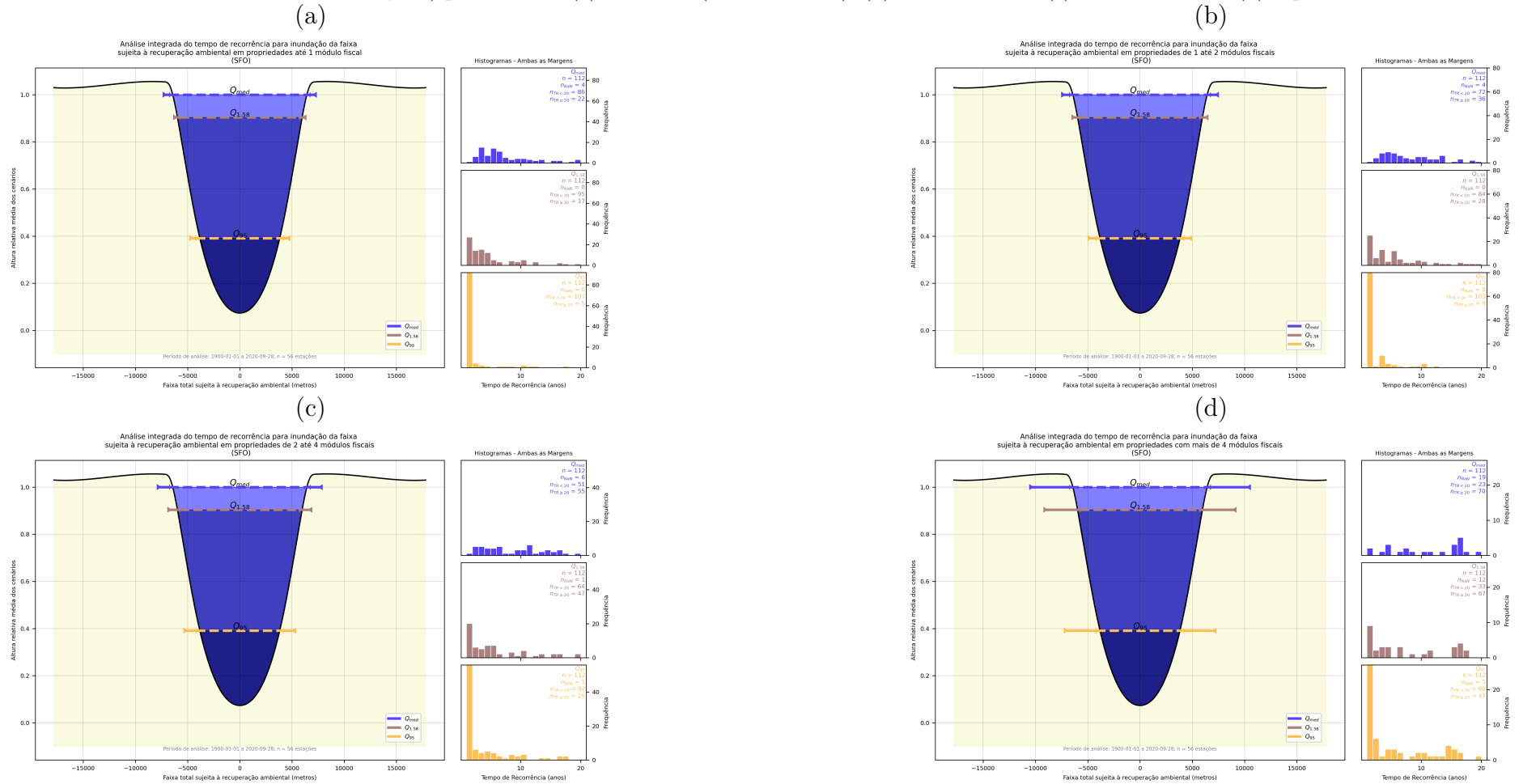
Figura D.13 – Análise integrada da probabilidade de perturbação (inundação integral) das áreas de preservação permanente sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) em faixas marginais de rios na bacia do Rio Paraná (PRN), para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}) para imóveis (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 até 2 MF, (c) de 2 até 4 MF e (d) superiores a 4 MF.



Notas: Cada rio fornece duas amostras de áreas protegidas, uma em cada margem. Aos rios cujos perfis das seções transversais não possuem extensão suficiente para simular a probabilidade de inundação integral da área de preservação permanente é atribuído o valor indeterminado (*NaN*) e desconsiderados da análise.

Fonte: o autor.

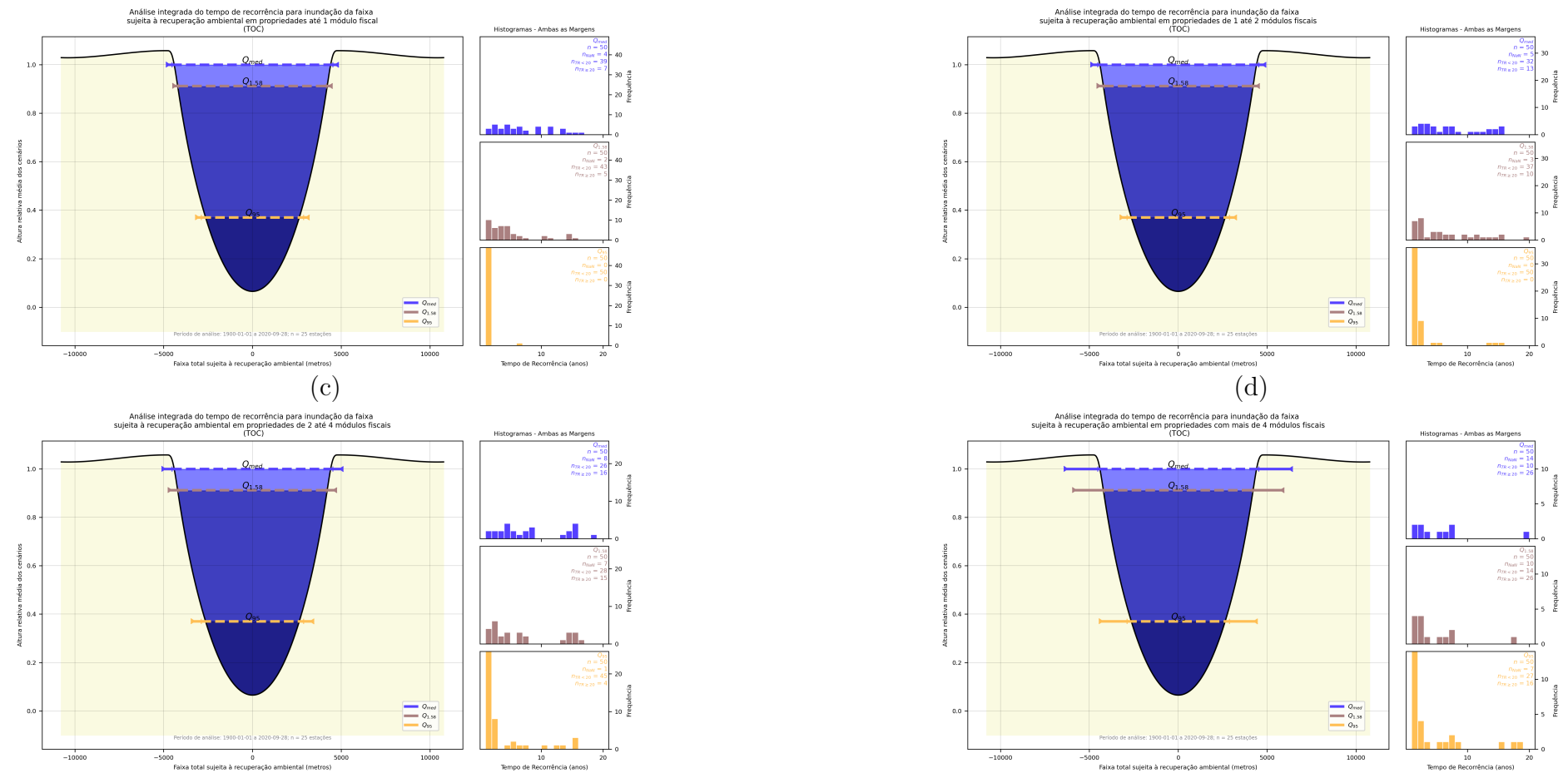
Figura D.14 – Análise integrada da probabilidade de perturbação (inundação integral) das áreas de preservação permanente sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) em faixas marginais de rios na bacia do Rio São Francisco (SFO) para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}) para imóveis (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 até 2 MF, (c) de 2 até 4 MF e (d) superiores a 4 MF.



Notas: Cada rio fornece duas amostras de áreas protegidas, uma em cada margem. Aos rios cujos perfis das seções transversais não possuem extensão suficiente para simular a probabilidade de inundação integral da área de preservação permanente é atribuído o valor indeterminado (NaN) e desconsiderados da análise.

Fonte: o autor.

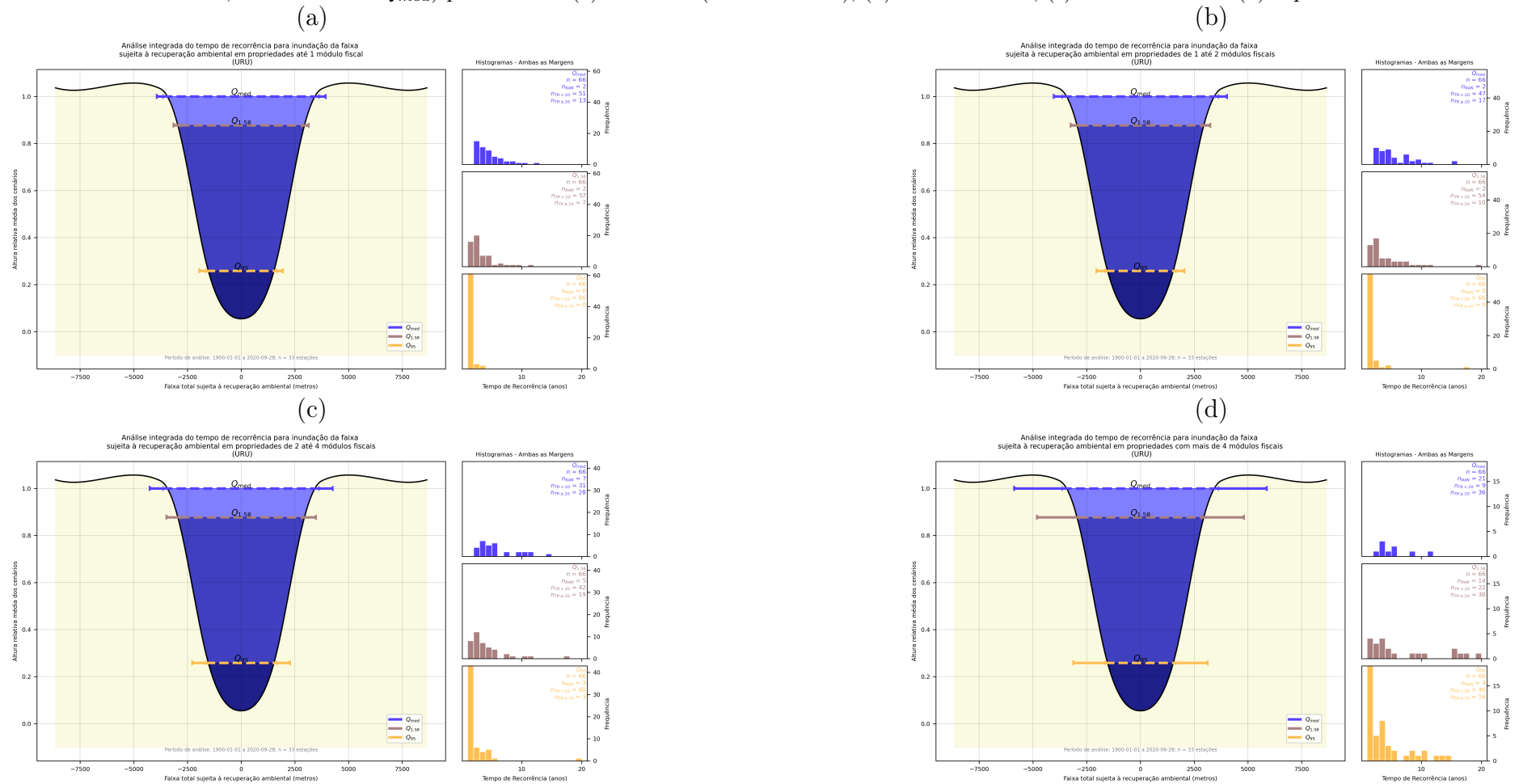
Figura D.15 – Análise integrada da probabilidade de perturbação (inundação integral) das áreas de preservação permanente sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) em faixas marginais de rios na bacia do Rio Tocantins (TOC) para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}) para imóveis (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 até 2 MF, (c) de 2 até 4 MF e (d) superiores a 4 MF.



Notas: Cada rio fornece duas amostras de áreas protegidas, uma em cada margem. Aos rios cujos perfis das seções transversais não possuem extensão suficiente para simular a probabilidade de inundação integral da área de preservação permanente é atribuído o valor indeterminado (*NaN*) e desconsiderados da análise.

Fonte: o autor.

Figura D.16 – Análise integrada da probabilidade de perturbação (inundação integral) das áreas de preservação permanente sujeitas à recuperação ambiental em áreas rurais consolidadas (ARC) em faixas marginais de rios na bacia do Rio Uruguai (URU) para os cenários hidrológicos de estiagem (vazão de permanência, indicada como Q_{95}), cheia anual mais provável (critério científico, indicado como $Q_{1,58}$) e a média das enchentes ordinárias (critério dominial, indicado como Q_{med}) para imóveis (a) até 1 MF (Módulo Fiscal), (b) de 1 até 2 MF, (c) de 2 até 4 MF e (d) superiores a 4 MF.



Notas: Cada rio fornece duas amostras de áreas protegidas, uma em cada margem. Aos rios cujos perfis das seções transversais não possuem extensão suficiente para simular a probabilidade de inundação integral da área de preservação permanente é atribuído o valor indeterminado (NaN) e desconsiderados da análise.

Fonte: o autor.