SÉRIE PEIXE VIVO

BASES CONCEITUAIS PARA CONSERVAÇÃO E MANEJO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

CAPÍTULO 4

ÍNDICES MULTIMÉTRICOS PARA AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE BIÓTICA

MARCOS CALLISTO, DÉBORAH R.O. SILVA, DÉBORA R. CARVALHO, DIEGO R. MACEDO, DIEGO M.P. CASTRO, PAULO S. POMPEU, BÁRBARA BECKER, BÁRBARA SANCHES, GILMAR B. SANTOS & CARLOS BERNARDO M. ALVES

Callisto M., Silva D.R.O., Carvalho D.R., Macedo D.R., Castro D.M.P., Pompeu P.S., Becker B., Sanches B., Santos G.B. & Alves C.B.M. (2019). Índices Multimétricos para Avaliação de Integridade Biótica. In: Marcos Callisto, Diego Rodrigues Macedo, Diego Marcel Parreira de Castro & Carlos Bernardo Mascarenhas Alves (orgs.) Bases Conceituais para Conservação e Manejo de Bacias Hidrográficas. Belo Horizonte: Companhia Energética de Minas Gerais, pp. 131-158 (Série Peixe Vivo, 7). DOI: 10.17648/bacias-hidrograficas-4

4 - ÍNDICES MULTIMÉTRICOS PARA AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE BIÓTICA

A avaliação de integridade biótica de ecossistemas aquáticos considera diferentes usos e cobertura natural da terra, características de habitats físicos, qualidade de águas, além de características de assembleias de organismos aquáticos. Dentre as abordagens para avaliar condições ecológicas em ecossistemas aquáticos, os índices multimétricos elaborados com diferentes indicadores biológicos têm sido largamente utilizados. Esses índices integram, em uma única medida, vários componentes de assembleias de organismos residentes (p. ex. número de espécies, dominância, composição taxonômica, grupos tróficos, mobilidade, tolerância à poluição, etc.) em resposta a variações ambientais naturais e a pressões antrópicas (Karr 1998, Terra *et al.* 2013, Macedo *et al.* 2016, Carvalho *et al.* 2017, Silva *et al.* 2017).

Abordagens em múltiplas escalas espaciais contribuem efetivamente para o desenvolvimento de alternativas sustentáveis para a gestão ambiental de bacias hidrográficas, principalmente em cenários de degradação devido a atividades antrópicas (Omernik *et al.* 2011). Assim, os estudos sobre integridade biótica também devem considerar fatores regionais como geologia, solo, relevo, clima e vegetação (Johnson *et al.* 2003, Kaufmann & Hughes 2006). Os índices de integridade biótica são, portanto, uma ferramenta de avaliação de condições ecológicas em unidades hidrológicas em geral e, também, em microbacias de empreendimentos hidrelétricos (Macedo *et al.* 2014, Macedo *et al.* 2016, Carvalho *et al.* 2017, Silva *et al.* 2017).

4.1- Índice de Integridade Biótica como Ferramenta de Avaliação de Condições Ecológicas: Histórico e Abordagens

O termo integridade biótica surgiu em 1972 com a lei federal dos Estados Unidos chamada *Clean Water Act*, que estabelecia a necessidade de restauração e manutenção da integridade química, física e biológica de recursos hídricos

nos EUA. O termo foi definido por Frey (1977) como sendo a capacidade de manutenção e suporte de comunidades biológicas, preservando sua composição, diversidade e estrutura funcional de forma comparável às características naturais em uma dada região. O *Clean Water Act* estabeleceu nos EUA até 1983 a meta de “descarga zero” de poluentes em águas para pesca e natação, e até 1985 para áreas navegáveis, estabelecendo o compromisso nacional de restaurar e manter a integridade química, física e biológica de ecossistemas aquáticos. Naquela época, dois terços dos corpos d’água naquele país eram impróprios ao contato primário, situação similar à do Brasil atual.

Karr (1981) propôs o Índice de Integridade Biótica (do inglês *Index of Biotic Integrity*, IBI) visando desenvolver metodologias eficazes para quantificar e avaliar a integridade biótica de ecossistemas aquáticos. Um IBI, ou um Índice Multimétrico (MMI – do inglês *Multimetric Index*), propõe em um único índice a síntese de atributos ou métricas biológicas que reflita distúrbios antrópicos em ecossistemas aquáticos ao longo de um gradiente de condições ambientais (Karr *et al.* 1986). Nessa abordagem, as métricas recebem um escore de acordo com o que seria esperado em situações onde sejam mínimos os distúrbios por atividades humanas, e as condições ecológicas são descritas em classes qualitativas que variam em um gradiente de excelente (condição de referência) a muito pobre (severamente degradado). Essa abordagem permite avaliação estatística das métricas (Fore *et al.* 1994), conferindo uma confiabilidade nas informações e avaliações comparativas em escalas espacial e temporal.

O primeiro IBI foi desenvolvido utilizando 12 métricas que descreviam características de composição e riqueza de espécies, composição trófica, comportamento reprodutivo e condições específicas de assembleias de peixes nos estados norte-americanos de Indiana e Illinois (Karr 1981). Esse trabalho pioneiro de Karr tornou-se referência histórica como ferramenta de avaliação de integridade biótica (Ruaro & Gubiani 2013). Nos últimos anos, adaptações e novos índices foram desenvolvidos e aplicados em avaliação ecológica, conservação e manejo de ecossistemas em bacias hidrográficas (Klemm *et al.* 2003, Prudente *et al.* 2018). Gradativamente foram incorporados critérios estatísticos de seleção

de métricas (Hering *et al.* 2006, Stoddard *et al.* 2008), definição de sítios de referência (Johnson 2005, Whittier *et al.* 2007b, Herlihy *et al.* 2008, Ligeiro *et al.* 2013, Martins *et al.* 2018), avaliação de métodos de ranqueamento por escores (Blocksom 2003), uso de desenho amostral probabilístico (Herlihy *et al.* 2000, Silva *et al.* 2018) e correção de métricas para variações ambientais naturais (Chen *et al.* 2014, Macedo *et al.* 2016, Pereira *et al.* 2016, Carvalho *et al.* 2017, Silva *et al.* 2017).

Além do desenvolvimento de IBI com assembleias de peixes (p. ex. Hughes *et al.* 1998, Casatti *et al.* 2009, Pont *et al.* 2009, Terra *et al.* 2013, Carvalho *et al.* 2017), foram também desenvolvidos índices com algas diatomáceas (p. ex. Fore 2002, Feio *et al.* 2009, Delgado *et al.* 2010), aves (p. ex. Bryce *et al.* 2002, Bryce 2006), anfíbios (p. ex. Stapanian *et al.* 2015), macrófitas aquáticas (p. ex. Beck *et al.* 2010, Kuhar *et al.* 2011, Feio *et al.* 2012, Radomski & Perleberg 2012) e macroinvertebrados (p. ex. Kerans & Karr 1994, Moya *et al.* 2011, Lunde & Resh 2012, Macedo *et al.* 2016, Pereira *et al.* 2016, Silva *et al.* 2017). Dentre as assembleias de organismos aquáticos, peixes e bentos são as mais utilizadas (Ruaro & Gubiani 2013). A utilização de assembleias de macroinvertebrados bentônicos como ferramenta para o desenvolvimento de índices multimétricos baseia-se em sua capacidade de resposta a mudanças ambientais (Karr & Chu 1999). Os macroinvertebrados exibem preferências quanto à utilização de recursos alimentares (Graça 2001, Tomanova *et al.* 2006, Ferreira *et al.* 2017), habitats físicos (Maddock 1999, Nerbonne & Vondracek 2001, Kaufmann *et al.* 2014, Macedo *et al.* 2016, Silva *et al.* 2016) e qualidade de água (Lenat 1988, Cao *et al.* 1996), respondendo a distúrbios em ecossistemas aquáticos através de alterações em sua estrutura e composição (McCabe & Gotelli 2000). Diversos parâmetros podem ser utilizados para testar as diferenças entre métricas biológicas em áreas de referência e impactadas. Portanto, além das métricas biológicas, um Índice de Integridade Biótica deve incluir métricas de usos do solo, habitats físicos e qualidade de água (Figura 28).

FIGURA 28 – Síntese de grupos de métricas utilizadas para testar métricas biológicas e índices de integridade biótica utilizando macroinvertebrados bentônicos bioindicadores de qualidade de água.

Apesar de abrigarem elevada biodiversidade aquática, países tropicais estão entre os que apresentam menor número de estudos de avaliação de condição ecológica de ecossistemas aquáticos (Ruaro & Gubiani 2013). Parte disso se justifica pela falta de financiamento à pesquisa (Bozzetti & Schulz 2004), baixo conhecimento ecológico e taxonômico de espécies indicadoras e dificuldade em encontrar áreas de referência (Casatti *et al.* 2009), além da falta de legislação específica para avaliações biológicas de qualidade de água (Ruaro & Gubiani

2013, Buss *et al.* 2016, Macedo *et al.* 2016). No Brasil, a maior parte dos artigos publicados visando o desenvolvimento e aplicação de IBI utilizam como indicador biológico assembleias de peixes (Araújo *et al.* 2003, Bozzetti & Schulz 2004, Casatti *et al.* 2009, Terra *et al.* 2013, Carvalho *et al.* 2017) ou macroinvertebrados bentônicos (Baptista *et al.* 2007, Oliveira *et al.* 2011, Couceiro *et al.* 2012, Baptista *et al.* 2013, Macedo *et al.* 2016, Pereira *et al.* 2016, Silva *et al.* 2017). Esses estudos foram realizados nos biomas Mata Atlântica, Cerrado e Amazônia. No entanto, ainda há importantes lacunas no Brasil quanto à padronização de métodos, limitações quanto à aplicabilidade em larga escala e na definição de critérios para estabelecimento de áreas de referência (Ruaro & Gubiani 2013). Em relação aos MMIs com peixes no Brasil, Ticiani *et al.* (2018) apontam dificuldades de sua aplicação relacionadas à seleção de aspectos para a caracterização prévia de condições ecológicas de habitats, à falta de métricas padronizadas e à negligência de aplicação de características funcionais. Na prática, a não incorporação dessas ferramentas na avaliação, monitoramento e gestão de recursos hídricos como diretrizes pelos órgãos gestores federais (ANA, IBAMA e ICMBio) e estaduais (FEAM, IGAM em Minas Gerais, por exemplo) restringe esta abordagem apenas a fins de pesquisa acadêmica.

4.2 - Condições de Referência

O estabelecimento de critérios para determinação de condições de referência é um componente fundamental em estudos de diagnóstico de qualidade ambiental em bacias hidrográficas, na avaliação de integridade biótica e no desenvolvimento de IBIs ou MMIs (Whittier *et al.* 2007a, Feio *et al.* 2014, Elias *et al.* 2016). Os sítios de referência são locais minimamente alterados por atividades antrópicas e com características próximas à condição natural (Figura 29). A variabilidade de sítios em condições de referência é avaliada considerando condições abióticas que incluem aspectos geológicos, geomorfológicos, climáticos, características químicas da água, aspectos hidromorfológicos e características da vegetação ripária (p. ex. Martins *et al.* 2018). É importante que sítios de referência estejam

no "melhor cenário" em uma dada região, onde a cobertura vegetal seja predominantemente natural e as alterações nos usos do solo devido a atividades humanas sejam mínimas. Ao longo de um gradiente de condições ambientais em uma bacia hidrográfica, as amostragens devem ser realizadas em sítios em condições de referência (chamados de "o melhor cenário ambiental"), sítios em níveis intermediários de alteração e sítios severamente impactados por atividades humanas ("o pior cenário ambiental"). Em cada condição de qualidade ambiental, as assembleias de organismos aquáticos refletirão as condições ecológicas quanto à sua composição taxonômica, estrutura de comunidades e atributos funcionais (Figura 30). Porém, em muitas bacias hidrográficas no Brasil, é raro encontrar riachos em condições de referência devido a intensas atividades humanas, incluindo pastagens, agricultura e áreas urbanas, que resultam em desflorestamento e retirada de vegetação ripária.

Nos locais onde alterações ecológicas devido a atividades humanas ocorrem há décadas, não é possível identificar sítios minimamente alterados que possam ser considerados como em condições de referência (Stoddard *et al.* 2006, Whittier *et al.* 2007b). Para contornar esse problema são selecionados sítios em condições menos alteradas ("*least disturbed*"), que podem ser identificados dentro de um gradiente de distúrbio (p. ex. Terra *et al.* 2013, Macedo *et al.* 2016, Carvalho *et al.* 2017, Fierro *et al.* 2018) ou através de vários filtros ambientais representados por valores máximos de estressores (p. ex. Waite *et al.* 2000, Klemm *et al.* 2003, Herlihy *et al.* 2008, Silva *et al.* 2017). Em regiões onde não há disponibilidade de sítios em condições de referência, uma alternativa de abordagem é estimar a condição de referência com base em dados históricos, como utilizado por Hughes (1994), Hughes *et al.* (1998) e Mebane *et al.* (2003). Aqui no Brasil, poucas bacias poderiam lançar mão dessa abordagem, pois são raras as regiões que possuem registros de estudos padronizados em épocas passadas.

FIGURA 29 – Exemplos de riachos em condições de referência, abordagem importante no estudo ecológico de qualidade ambiental em bacias hidrográficas (Fotos de Isabela Martins no Parque Nacional da Serra da Canastra e na Serra do Salitre, MG).

FIGURA 30 – Ecossistemas em condições de referência, alterados e impactados ao longo de um gradiente de condições ambientais.

4.3 - Aplicações de Índices de Integridade Biótica no Brasil

No Brasil, o primeiro estudo sobre a aplicação de um Índice Multimétrico para avaliação ecológica foi realizado com peixes por Araújo (1998). Os índices desenvolvidos para avaliação da integridade biótica em riachos consideraram apenas regiões relativamente pequenas ou uma única bacia (Bozzetti & Schulz 2004, Ferreira & Casatti 2006, Casatti *et al.* 2009, Terra *et al.* 2013, Macedo *et al.* 2016). Entretanto, os artigos recentes têm abrangido unidades hidrológicas mais amplas (p. ex. biomas), propondo índices mais robustos (p. ex. Carvalho *et al.* 2017, Silva *et al.* 2017), multitaxa (p. ex. Chen *et al.* 2017), utilizando grupos de métricas biológicas que são associadas a métricas de usos do solo, habitats físicos e qualidade de água (Figura 31). Nesses artigos recentes, foram aplicados protocolos traduzidos do US-EPA, testados, adaptados e validados para condições tropicais, fruto do trabalho de pesquisadores apoiados pela Cemig (Projeto Peixe Vivo), disponíveis em Callisto *et al.* (2014).

FIGURA 31 – Exemplos de métricas biológicas utilizadas no desenvolvimento de índices de integridade biótica utilizando peixes.

O desenvolvimento de índices para avaliar a integridade ecológica de ecossistemas lóticos brasileiros é importante e deve ser incentivado, uma vez que esses ambientes permanecem mal estudados (Reis *et al.* 2016) e sob pressão crescente de atividades antrópicas, como a expansão da agricultura (De Fries & Rosenzweig 2010, Leal *et al.* 2016) e urbanização. Apesar da relevância de utilização de indicadores biológicos de integridade para uma avaliação de condição ecológica de ecossistemas de água doce (Casatti *et al.* 2006, Karr 1981), as regulamentações ambientais no Brasil são ainda incipientes. A legislação ambiental estabelece o monitoramento de corpos d'água em termos de variáveis de qualidade da água consideradas importantes para o consumo humano (Brasil 1997), que sofrem pressões de atividades de aquicultura e pesca (Brasil 2009), ou consideram que a preservação da vegetação ripária em terras privadas é suficiente para proteger a biodiversidade aquática e fornecer outros serviços ecossistêmicos (Brasil 2012). A Resolução CONAMA n.º 357, de 17 de março de 2005 (Brasil 2005), que dispõe

sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, aponta a importância de indicadores biológicos como ferramentas do enquadramento da qualidade de corpos d'água. No Estado de Minas Gerais, a Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG n.º 1, de 5 de maio de 2008 (Minas Gerais 2008), estabelece em seu Art. 6º que a qualidade dos ambientes aquáticos deverá ser avaliada por indicadores biológicos, com determinação de áreas de referência, métodos de avaliação e grupos bioindicadores, entre estes, os peixes e invertebrados bentônicos. Portanto, o desenvolvimento de um protocolo de aplicação de índices bióticos é uma ferramenta importante e estratégica para monitorar e gerenciar ecossistemas aquáticos de forma rápida e econômica (Hughes & Noss 1992).

Na experiência de projetos de pesquisa P&D ANEEL-Cemig sobre o tema IBI (p. ex. GT-487, da UFMG, e CRA 3147 CEMIG/FAPEMIG, da UFLA), as etapas de planejamento, trabalho de campo, processamento de amostras em laboratório, interpretação e discussão de diferentes abordagens científicas foram intensivamente realizadas por professores, pesquisadores, pós-graduandos e alunos de iniciação científica (Figura 32). Em síntese, a abordagem IBI representa importante avanço técnico-científico para: (i) diagnóstico de qualidade ambiental, permitindo avaliar condições ecológicas em bacias hidrográficas; (ii) detectar áreas potenciais para práticas de manejo e conservação de recursos hídricos; (iii) identificar os principais estressores que alteram a integridade ecológica; (iv) proporcionar base ecológica para a gestão de bacias hidrográficas; e (v) oferecer bases científicas para o desenvolvimento de políticas e programas de monitoramento para melhor avaliar os recursos hídricos e subsidiar a gestão ambiental em áreas sob influência de empreendimentos hidrelétricos e identificação de áreas com fragilidade ambiental.

Legenda

PLANEJAMENTO	EXECUÇÃO CIENTÍFICA	Execução técnica	TOMADA DE DECISÃO CIENTÍFICA	Tomada de decisão técnica
--------------	---------------------	------------------	------------------------------	---------------------------

FIGURA 32 – Fluxograma de atividades em campo, laboratório e técnico-científicas para o desenvolvimento de Índices de Integridade Biótica realizadas no Projeto P&D ANEEL-Cemig GT-487.

4.4 - Índice de Ictiofauna em Reservatórios

O desenvolvimento de ferramentas para avaliação ecológica em reservatórios hidrelétricos é fundamental para o acompanhamento do processo de transformação das comunidades de peixes que vivem nesses ambientes, incluindo a manutenção de recursos pesqueiros. O uso de atributos de comunidades de peixes para avaliações ecológicas de reservatórios de hidrelétricas proporciona uma visão integrada do ecossistema aquático, uma vez que alguns organismos são indicadores da saúde dos locais que habitam e de toda a bacia em seu entorno (Fausch *et al.* 1990, Petesse *et al.* 2007, Launois *et al.* 2011). A avaliação do status ecológico de reservatórios e a aplicação de estudos da ictiofauna são recomendadas pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US-EPA; United States Environmental Protection Agency 2013) e pela União Europeia (European Union 2000), que incluem essa abordagem em seus programas de biomonitoramento da qualidade da água.

Poucos estudos adaptaram a abordagem IBI para lagos e, ainda em menor escala, para reservatórios de usinas hidrelétricas (Terra & Araújo 2011). Jennings *et al.* (1995) foram os primeiros a proporem um índice que incorpora os princípios ecológicos nos quais o IBI é baseado, com adaptações aos aspectos particulares de reservatórios, o *Reservoir Fish Assemblage Index* (RFAI). Neste item, o termo integridade biótica é considerado impróprio para o estudo de comunidades de peixes em rios barrados, devido ao seu barramento artificial e inexistência de áreas não alteradas (áreas de referência).

O RFAI estabelece um critério para definir áreas mais sensíveis e que demandam investigações mais detalhadas em relação às condições ecológicas (Jennings *et al.* 1995), além de ser um índice quantitativo. Petesse *et al.* (2007) desenvolveram e aplicaram o RFAI em reservatórios no alto rio Paraná. Terra & Araújo (2011) adaptaram esse índice para 4 locais de amostragem, a fim de verificar a influência do reservatório de Funil em trechos lóticos (bacia do rio Paraíba do Sul, no estado do Rio de Janeiro). A equipe do laboratório de ictiologia da PUC Minas desenvolveu essa abordagem no projeto P&D Aneel-Cemig GT-477 (2014-2018)

na bacia do rio Grande (Alto Paraná), onde se localizam os reservatórios de Volta Grande e Nova Ponte.

A construção do RFAI é semelhante à do IBI e tem como primeiro passo a seleção de métricas bióticas candidatas, que são atributos das assembleias de peixes afetados negativa ou positivamente pelo impacto antrópico (p. ex. abundância de peixes migradores, riqueza de espécies nativas, abundância de indivíduos exóticos, abundância de onívoros, percentual de espécies exóticas) (Figura 33). A definição de grupos de métricas (p. ex. categorias tróficas, composição e riqueza, abundância) é realizada através de filtros estatísticos que consideram influências de atividades humanas, redundância e escore (Figura 34).

FIGURA 33 – Alterações na comunidade de peixes em função da transformação de ecossistemas lóticos (rios) em ecossistemas lênticos (reservatórios de usinas hidrelétricas).

FIGURA 34 – Métricas biológicas e diferentes atributos da integridade biótica das assembleias de peixes utilizados no desenvolvimento do RFAI.

4.5 - Implicações na Gestão de Recursos Hídricos

Um dos desafios em relação ao desenvolvimento de índices como o RFAI, e também IBI, é torná-los uma ferramenta disseminada além dos limites acadêmicos. A obtenção das informações em campo, análises em laboratório, cálculos de métricas e interpretações estatísticas são etapas longas até chegar aos índices, de mais fácil aplicação.

No Brasil, a Lei Nº 9.433 (de 8 de janeiro de 1997), conhecida como “Lei das Águas” (Brasil 1997), que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e regulamenta dispositivos da Constituição Federal sobre o assunto, é um marco na gestão de recursos hídricos no Brasil. A partir dessa lei, foi criado o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos, com objetivos de: (i) coordenar a gestão integrada das águas; (ii) arbitrar administrativamente os conflitos relacionados com os recursos hídricos; (iii) implementar a Política Nacional de Recursos Hídricos; (iv) planejar, regular e controlar o uso, a preservação e a recuperação dos

recursos hídricos; e (v) promover a cobrança pelo uso de recursos hídricos. Entre as entidades participantes desse sistema estão os Comitês de Bacia Hidrográfica (CBH), que possuem, entre outras, a atribuição de aprovar e acompanhar a execução do Plano de Recursos Hídricos da bacia. Assim, ferramentas como RFAI e/ou IBI para o biomonitoramento e gestão de recursos hídricos, para biomas brasileiros ou regiões (bacias hidrográficas), são fundamentais para o fornecimento de informações padronizadas e comparáveis. Os comitês devem se apropriar dos índices disponíveis (Araújo *et al.* 2003, Petesse *et al.* 2007, Carvalho *et al.* 2017, Silva *et al.* 2017) e aplicá-los de forma sistemática, além de sugerir que empresas (concessionárias de energia elétrica e saneamento, mineradoras e indústrias) e outros órgãos públicos de gestão e pesquisa também o façam.

4.6 - Mensagem dos Autores

Em síntese, neste capítulo abordamos a importância de índices multimétricos em estudos ecológicos de bacias hidrográficas, bem como os aspectos históricos desde sua proposição inicial nos Estados Unidos, e descrevemos o crescimento dessa abordagem no Brasil. Especial ênfase foi dada à importância de seleção de condições de referência, desde sua definição, e desafios para a aplicação de IBIs no Brasil. Descrevemos a aplicação de índices com ictiofauna em reservatórios e as implicações da abordagem IBI para a gestão de recursos hídricos no país.

4.7 - Referências

Araújo, F.G. 1998. Uso da taxocenose de peixes como indicadora de degradação ambiental no rio Paraíba do Sul, Rio de Janeiro, Brasil. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 41(3).

Araújo, F.G., Fichberg, I., Pinto, B.C.T. & Peixoto, M.G. 2003. A preliminary index of biotic integrity for monitoring the condition of the rio Paraíba do Sul, Southeast Brazil. *Environmental Management* 32(4): 516–526.

Baptista, D.F., Buss, D.F., Egler, M., Giovanelli, A., Silveira, M.P. & Nessimian, J.L.

2007. A multimetric index based on benthic macroinvertebrates for evaluation of Atlantic Forest streams at Rio de Janeiro State, Brazil. *Hydrobiologia* 575(1): 83–94.

Baptista, D.F., Henriques-Oliveira, A., Oliveira, R.B.S., Mugnai, R., Nessimian, J. & Buss, D.F. 2013. Development of a benthic multimetric index for the Serra da Bocaina bioregion in Southeast Brazil. *Brazilian Journal of Biology* 73(3): 573–583.

Beck, M.W., Hatch, L.K., Vondracek, B. & Valley, R.D. 2010. Development of a macrophyte-based index of biotic integrity for Minnesota lakes. *Ecological Indicators* 10(5): 968–979.

Blocksom, K.A. 2003. A performance comparison of metric scoring methods for a multimetric index for Mid-Atlantic Highlands streams. *Environmental Management* 31(5): 670–682.

Bozzetti, M. & Schulz, U.H. 2004. An index of biotic integrity based on fish assemblages for subtropical streams in Southern Brazil. *Hydrobiologia* 529(1): 133–144.

Brasil 1997. 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*. Brasília, Brasil.

Brasil 2005. Resolução nº 357 de 17 de março de 2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências*. Brasília, Brasil.

Brasil 2009. Lei nº 11.959, de 29 de junho de 2009. *Dispõe sobre a Política Nacional de Desenvolvimento Sustentável da Aquicultura e da Pesca, regula as atividades*

pesqueiras, revoga a Lei nº 7.679, de 23 de novembro de 1988, e dispositivos do Decreto-Lei nº 221, de 28 de fevereiro de 1967, e dá outras providências. Brasília, Brasil.

Brasil 2012. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. *Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 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 nos 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.* Brasília, Brasil.

Bryce, S.A. 2006. Development of a bird integrity index: measuring avian response to disturbance in the Blue Mountains of Oregon, USA. *Environmental Management* 38(3): 470–486.

Bryce, S.A., Hughes, R.M. & Kaufmann, P.R. 2002. Development of a bird integrity index: using bird assemblages as indicators of riparian condition. *Environmental Management* 30(2): 294–310.

Buss, D.F., Roque, F.O., Sonoda, K.C., Medina, P.B., Stefanes, M., Imbimbo, H.R.V., Kuhlmann, M.L., Lamparelli, M.C., Oliveira, L.G., Molozzi, J., Campos, M.C.S., Junqueira, M.V., Ligeiro, R., Moulton, T.P., Hamada, N., Mugnai, R. & Baptista, D.F. 2016. Macroinvertebrados aquáticos como bioindicadores no processo de licenciamento ambiental no Brasil. *Biodiversidade Brasileira* 6(1): 100–113.

Callisto, M., Hughes, R.M., Lopes, J.M. & Castro, M.A. 2014. *Ecological Conditions in Hydropower Basins. Série Peixe Vivo 3*. Belo Horizonte, Brasil: Companhia Energética de Minas Gerais.

Cao, Y., Bark, A.W. & Williams, W.P. 1996. Measuring the responses of macroinvertebrate communities to water pollution: a comparison of multivariate approaches, biotic and diversity indices. *Hydrobiologia* 341(1): 1–19.

Carvalho, D.R., Leal, C.G., Junqueira, N.T., Castro, M.A., Fagundes, D.C., Alves, C.B.M., Hughes, R.M. & Pompeu, P.S. 2017. A fish-based multimetric index for

Brazilian Savanna streams. *Ecological Indicators* 77: 386–396.

Casatti, L., Ferreira, C.P. & Langeani, F. 2009. A fish-based biotic integrity index for assessment of lowland streams in Southeastern Brazil. *Hydrobiologia* 623(1): 173–189.

Casatti, L., Langeani, F., Silva, A.M. & Castro, R.M.C. 2006. Stream fish, water and habitat quality in a pasture dominated basin, Southeastern Brazil. *Brazilian Journal of Biology* 66(2b): 681–696.

Chen, K., Hughes, R.M., Brito, J.G., Leal, C.G., Leitão, R.P., de Oliveira-Júnior, J.M.B., de Oliveira, V.C., Dias-Silva, K., Ferraz, S.F.B., Ferreira, J., Hamada, N., Juen, L., Nessimian, J., Pompeu, P.S. & Zuanon, J. 2017. A multi-assembly, multi-metric biological condition index for eastern Amazonia streams. *Ecological Indicators* 78: 48–61.

Chen, K., Hughes, R.M., Xu, S., Zhang, J., Cai, D. & Wang, B. 2014. Evaluating performance of macroinvertebrate-based adjusted and unadjusted multi-metric indices (MMI) using multi-season and multi-year samples. *Ecological Indicators* 36: 142–151.

Couceiro, S.R.M., Hamada, N., Forsberg, B.R., Pimentel, T.P. & Luz, S.L.B. 2012. A macroinvertebrate multimetric index to evaluate the biological condition of streams in the Central Amazon region of Brazil. *Ecological Indicators* 18: 118–125.

De Fries, R. & Rosenzweig, C. 2010. Toward a whole-landscape approach for sustainable land use in the tropics. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107(46): 19627–19632.

Delgado, C., Pardo, I. & García, L. 2010. A multimetric diatom index to assess the ecological status of coastal Galician rivers (NW Spain). *Hydrobiologia* 644(1): 371–384.

Elias, C.L., Calapez, A.R., Almeida, S.F.P., Chessman, B., Simões, N. & Feio, M.J. 2016. Predicting reference conditions for river bioassessment by incorporating

boosted trees in the environmental filters method. *Ecological Indicators* 69: 239–251.

European Union 2000. *Directive 2000/60/EC of the european parliament and the council establishing a framework for community action in the field of water policy*. Official Journal of the European Community (L327).

Fausch, K.D., Lyons, J., Karr, J.R. & Angermeier, P.L. 1990. Fish Communities as indicators of environmental degradation. *American Fisheries Society Symposium* 8: 123–144.

Feio, M.J., Aguiar, F.C., Almeida, S.F.P., Ferreira, J., Ferreira, M.T., Elias, C., Serra, S.R.Q., Buffagni, A., Cambra, J., Chauvin, C., Delmas, F., Dörflinger, G., Erba, S., Flor, N., Ferréol, M., Germ, M., Mancini, L., Manolaki, P., Marcheggiani, S., Minciardi, M.R., Munné, A., Papastergiadou, E., Prat, N., Puccinelli, C., Rosebery, J., Sabater, S., Ciadamidaro, S., Tornés, E., Tziortzis, I., Urbanič, G. & Vieira, C. 2014. Least disturbed condition for European Mediterranean rivers. *Science of The Total Environment* 476–477: 745–756.

Feio, M.J., Aguiar, F.C., Almeida, S.F.P. & Ferreira, M.T. 2012. AQUAFLOA: A predictive model based on diatoms and macrophytes for streams water quality assessment. *Ecological Indicators* 18: 586–598.

Feio, M.J., Almeida, S.F.P., Craveiro, S.C. & Calado, A.J. 2009. A comparison between biotic indices and predictive models in stream water quality assessment based on benthic diatom communities. *Ecological Indicators* 9(3): 497–507.

Ferreira, C.P. & Casatti, L. 2006. Integridade biótica de um córrego na bacia do alto rio Paraná avaliada por meio da comunidade de peixes. *Biota Neotropica* 6(3).

Ferreira, W.R., Hepp, L.U., Ligeiro, R., Macedo, D.R., Hughes, R.M., Kaufmann, P.R. & Callisto, M. 2017. Partitioning taxonomic diversity of aquatic insect assemblages and functional feeding groups in Neotropical Savanna headwater

streams. *Ecological Indicators* 72: 365–373.

Fierro, P., Arismendi, I., Hughes, R.M., Valdovinos, C. & Jara-Flores, A. 2018. A benthic macroinvertebrate multimetric index for Chilean Mediterranean streams. *Ecological Indicators* 91: 13–23.

Fore, L. 2002. Response of diatom assemblages to human disturbance: development and testing of a multimetric index for the Mid-Atlantic Region (USA). In: Simon, T.P. (ed.). *Biological Response Signatures: Indicator Patterns Using Aquatic Communities*. Boca Raton, FL: CRC Press, 445–480.

Fore, L.S., Karr, J.W. & Conquest, L.L. 1994. Statistical properties of an index of biological integrity used to evaluate water resources. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 51(5): 1077–1087.

Frey, D.G. 1977. Biological integrity of water—a historical approach. In: Ballentine, R.K. & Guarria, L.J. (eds.). *The Integrity of Water*. Washington, DC: Proceedings of a symposium. U.S. Environmental Protection Agency, 127–140.

Graça, M.A.S. 2001. The role of invertebrates on leaf litter decomposition in streams—a review. *International Review of Hydrobiology* 86(4–5): 383–393.

Hering, D., Feld, C.K., Moog, O. & Ofenböck, T. 2006. Cook book for the development of a multimetric index for biological condition of aquatic ecosystems: experiences from the European AQEM and STAR projects and related initiatives. *Hydrobiologia* 566(1): 311–324.

Herlihy, A.T., Larsen, D.P., Paulsen, S.G., Urquhart, N.S. & Rosenbaum, B.J. 2000. Designing a spatially balanced, randomized site selection process for regional stream surveys: the EMAP mid-Atlantic pilot study. *Environmental Monitoring and Assessment* 63(1): 95–113.

Herlihy, A.T., Paulsen, S.G., Sickie, J. Van, Stoddard, J.L., Hawkins, C.P. & Yuan, L.L. 2008. Striving for consistency in a national assessment: the challenges of applying a reference-condition approach at a continental scale. *Journal of the*

North American Benthological Society 27(4): 860–877.

Hughes, R.M. 1994. Defining biological status by comparing with reference conditions. In: Davis, W.S. & Simon, T.P. (eds.). *Biological Assessment Criteria, Tools for Water Resource Planning and Decision Making*.

Hughes, R.M., Kaufmann, P.R., Herlihy, A.T., Kincaid, T.M., Reynolds, L. & Larsen, D.P. 1998. A process for developing and evaluating indices of fish assemblage integrity. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 55(7): 1618–1631.

Hughes, R.M. & Noss, R.F. 1992. Biological diversity and biological integrity: current concerns for lakes and streams. *Fisheries* 17(3): 11–19.

Jennings, M.J., Fore, L.S. & Karr, J.R. 1995. Biological monitoring of fish assemblages in Tennessee Valley reservoirs. *Regulated Rivers: Research & Management* 11: 263–274.

Johnson, L.B., Breneman, D.H. & Richards, C. 2003. Macroinvertebrate community structure and function associated with large wood in low gradient streams. *River Research and Applications* 19(3): 199–218.

Johnson, R.K. 2005. Bioassessment of freshwater ecosystems: using the reference condition approach. *Freshwater Biology* 50(1): 199–199.

Karr, J. 1998. Rivers as sentinels: using the biology of rivers to guide landscape management. In: Naiman, R. & Bilby, R. (eds.). *River Ecology and Management: Lessons from the Pacific Coastal Ecoregion*. New York: Springer-Verlag, 502–528.

Karr, J.R. 1981. Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries* 6(6): 21–27.

Karr, J.R. & Chu, E.W. 1999. *Restoring Life in Running Waters: Better Biological Monitoring*. Washington, DC: Island Press.

Karr, J.R., Fausch, K.D., Angermeier, P.L., Yant, P.R. & Schlosser, I.J. 1986.

Assessing of Biological Integrity in Running Waters: A method and its Rationale.
Champaign: Illinois Natural History Survey.

Kaufmann, P.R. & Hughes, R.M. 2006. Geomorphic and anthropogenic influences on fish and amphibians in Pacific Northwest Coastal streams. *American Fisheries Society Symposium* 48: 429–455.

Kaufmann, P.R., Peck, D. V., Paulsen, S.G., Seeliger, C.W., Hughes, R.M., Whittier, T.R. & Kamman, N.C. 2014. Lakeshore and littoral physical habitat structure in a national lakes assessment. *Lake and Reservoir Management* 30(2): 192–215.

Kerans, B.L. & Karr, J.R. 1994. A benthic index of biotic integrity (B-IBI) for rivers of the Tennessee Valley. *Ecological Applications* 4(4): 768–785.

Klemm, D.J., Blocksom, K.A., Fulk, F.A., Herlihy, A.T., Hughes, R.M., Kaufmann, P.R., Peck, D. V, Stoddard, J.L., Thoeny, W.T., Griffith, M.B. & Davis, W.S. 2003. Development and evaluation of a macroinvertebrate biotic integrity index (MBII) for regionally assessing mid-Atlantic highlands streams. *Environmental Management* 31(5): 656–69.

Kuhar, U., Germ, M., Gaberščik, A. & Urbanič, G. 2011. Development of a river macrophyte index (RMI) for assessing river ecological status. *Limnologica* 41(3): 235–243.

Launois, L., Veslot, J., Irz, P. & Argillier, C. 2011. Development of a fish-based index (FBI) of biotic integrity for French lakes using the hindcasting approach. *Ecological Indicators* 11(6): 1572–1583.

Leal, C.G., Pompeu, P.S., Gardner, T.A., Leitão, R.P., Hughes, R.M., Kaufmann, P.R., Zuanon, J., Paula, F.R., Ferraz, S.F.B., Thomson, J.R., Mac Nally, R., Ferreira, J. & Barlow, J. 2016. Multi-scale assessment of human-induced changes to Amazonian instream habitats. *Landscape Ecology* 31(8): 1725–1745.

Lenat, D.R. 2011. Macroinvertebrates Water quality assessment of streams using

a qualitative collection method for benthic macroinvertebrates. *Journal of the North American Benthological Society* 7(3): 222–233.

Ligeiro, R., Hughes, R.M., Kaufmann, P.R., Macedo, D.R., Firmiano, K.R., Ferreira, W.R., Oliveira, D., Melo, A.S. & Callisto, M. 2013. Defining quantitative stream disturbance gradients and the additive role of habitat variation to explain macroinvertebrate taxa richness. *Ecological Indicators* 25: 45–57.

Lunde, K.B. & Resh, V.H. 2012. Development and validation of a macroinvertebrate index of biotic integrity (IBI) for assessing urban impacts to Northern California freshwater wetlands. *Environmental Monitoring and Assessment* 184(6): 3653–3674.

Macedo, D.R., Hughes, R.M., Ferreira, W.R., Firmiano, K.R., Silva, D.R.O., Ligeiro, R., Kaufmann, P.R. & Callisto, M. 2016. Development of a benthic macroinvertebrate multimetric index (MMI) for Neotropical Savanna headwater streams. *Ecological Indicators* 64: 132–141.

Macedo, D.R., Hughes, R.M., Ligeiro, R., Ferreira, W.R., Castro, M.A., Junqueira, N.T., Oliveira, D.R., Firmiano, K.R., Kaufmann, P.R., Pompeu, P.S. & Callisto, M. 2014. The relative influence of catchment and site variables on fish and macroinvertebrate richness in Cerrado biome streams. *Landscape Ecology* 29(6): 1001–1016.

Maddock, I. 1999. The importance of physical habitat assessment for evaluating river health. *Freshwater Biology* 41(2): 373–391.

Martins, I., Ligeiro, R., Hughes, R.M., Macedo, D.R. & Callisto, M. 2018. Regionalisation is key to establishing reference conditions for neotropical savanna streams. *Marine and Freshwater Research* 69(1): 82–94.

McCabe, D.J. & Gotelli, N.J. 2000. Effects of disturbance frequency, intensity, and area on assemblages of stream macroinvertebrates. *Ecology* 120(2): 270–279.

Mebane, C.A., Maret, T.R. & Hughes, R.M. 2003. An index of biological integrity

(IBI) for Pacific Northwest rivers. *Transactions of the American Fisheries Society* 132(2): 239–261.

Minas Gerais. 2008. Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG no 1, de 05 de maio de 2008. *Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências*. Belo Horizonte, Brasil.

Moya, N., Hughes, R.M., Domínguez, E., Gibon, F.M., Goitia, E. & Oberdorff, T. 2011. Macroinvertebrate-based multimetric predictive models for evaluating the human impact on biotic condition of Bolivian streams. *Ecological Indicators* 11(3): 840–847.

Nerbonne, B.A. & Vondracek, B. 2001. Effects of local land use on physical habitat, benthic macroinvertebrates, and fish in the Whitewater river, Minnesota, USA. *Environmental Management* 28(1): 87–99.

Oliveira, R.B.S., Baptista, D.F., Mugnai, R., Castro, C.M. & Hughes, R.M. 2011. Towards rapid bioassessment of wadeable streams in Brazil: development of the Guapiaçu-Macau Multimetric Index (GMMI) based on benthic macroinvertebrates. *Ecological Indicators* 11(6): 1584–1593.

Omernik, J., Hughes, R., Griffith, G. & Hellyer, G. 2011. Common geographic frameworks. In: *Landscape and Predictive Tools: A Guide to Spatial Analysis for Environmental Assessment*. Washington, DC: EPA/100/R-11/002. U.S. Environmental Protection Agency, 1–46.

Pereira, P.S., Souza, N.F., Baptista, D.F., Oliveira, J.L.M. & Buss, D.F. 2016. Incorporating natural variability in the bioassessment of stream condition in the Atlantic Forest biome, Brazil. *Ecological Indicators* 69: 606–616.

Pettesse, M.L., Petrere, M. & Spigolon, R.J. 2007. Adaptation of the Reservoir Fish Assemblage Index (RFAI) for assessing the Barra Bonita reservoir (São Paulo, Brazil). *River Research and Applications* 23(6): 595–612.

Pont, D., Hughes, R.M., Whittier, T.R. & Schmutz, S. 2009. A predictive index of biotic integrity model for aquatic-vertebrate assemblages of Western U.S. streams. *Transactions of the American Fisheries Society* 138(2): 292–305.

Prudente, B.S., Pompeu, P.S. & Montag, L. 2018. Using multimetric indices to assess the effect of reduced impact logging on ecological integrity of Amazonian streams. *Ecological Indicators* 91: 315–323.

Radomski, P. & Perleberg, D. 2012. Application of a versatile aquatic macrophyte integrity index for Minnesota lakes. *Ecological Indicators* 20: 252–268.

Reis, R.E., Albert, J.S., Di Dario, F., Mincarone, M.M., Petry, P. & Rocha, L.A. 2016. Fish biodiversity and conservation in South America. *Journal of Fish Biology* 89(1): 12–47.

Ruaro, R. & Gubiani, É.A. 2013. A scientometric assessment of 30 years of the Index of Biotic Integrity in aquatic ecosystems: applications and main flaws. *Ecological Indicators* 29: 105–110.

Silva, D.R.O., Herlihy, A.T., Hughes, R.M. & Callisto, M. 2017. An improved macroinvertebrate multimetric index for the assessment of wadeable streams in the Neotropical Savanna. *Ecological Indicators* 81: 514–525.

Silva, D.R.O., Herlihy, A.T., Hughes, R.M., Macedo, D.R. & Callisto, M. 2018. Assessing the extent and relative risk of aquatic stressors on stream macroinvertebrate assemblages in the Neotropical Savanna. *Science of The Total Environment* 633: 179–188.

Silva, D.R.O., Ligeiro, R., Hughes, R.M. & Callisto, M. 2016. The role of physical habitat and sampling effort on estimates of benthic macroinvertebrate taxonomic richness at basin and site scales. *Environmental Monitoring and Assessment* 188: 340.

Stapanian, M.A., Micacchion, M. & Adams, J.V. 2015. Wetland habitat disturbance best predicts metrics of an amphibian index of biotic integrity. *Ecological*

Indicators 56: 237–242.

Stoddard, J.L., Herlihy, A.T., Peck, D. V., Hughes, R.M., Whittier, T.R. & Tarquinio, E. 2008. A process for creating multimetric indices for large-scale aquatic surveys. *Journal of the North American Benthological Society* 27(4): 878–891.

Stoddard, J.L., Larsen, D.P., Hawkins, C.P., Johnson, R.K. & Norris, R.H. 2006. Setting expectations for the ecological condition of streams: the concept of reference condition. *Ecological Applications* 16(4): 1267–1276.

Terra, B.D.F. & Araújo, F.G. 2011. A preliminary fish assemblage index for a transitional river–reservoir system in Southeastern Brazil. *Ecological Indicators* 11(3): 874–881.

Terra, B.D.F., Hughes, R.M., Francelino, M.R. & Araújo, F.G. 2013. Assessment of biotic condition of Atlantic Rain Forest streams: A fish-based multimetric approach. *Ecological Indicators* 34: 136–148.

Ticiani, D., Bogoni, R.F., Eichelberger, A.C.A., Berlatto, A.F., Medeiros, G. & Delariva, R.L. 2018. Trends in the application of multimetric indexes in Brazil: scienciomtric analyses related to fish fauna. *Ciência e Natura* 40: 18.

Tomanova, S., Goitia, E. & Helešić, J. 2006. Trophic levels and functional feeding groups of macroinvertebrates in neotropical streams. *Hydrobiologia* 556(1): 251–264.

United States Environmental Protection Agency 2013. *National Rivers and Streams Assessment 2013-2014: Field Operations Manual – Wadeable*. EPA-841-B-12-009b. Washington, DC.

Waite, I.R., Herlihy, A.T., Larsen, D.P. & Klemm, D.J. 2000. Comparing strengths of geographic and nongeographic classifications of stream benthic macroinvertebrates in the Mid-Atlantic Highlands, USA. *Journal of the North American Benthological Society* 19(3): 429–441.

Whittier, T.R., Hughes, R.M., Stoddard, J.L., Lomnický, G.A., Peck, D. V. & Herlihy, A.T. 2007a. A structured approach for developing indices of biotic integrity: three examples from streams and rivers in the Western USA. *Transactions of the American Fisheries Society* 136(3): 718–735.

Whittier, T.R., Stoddard, J.L., Larsen, D.P. & Herlihy, A.T. 2007b. Selecting reference sites for stream biological assessments: best professional judgment or objective criteria. *Journal of the North American Benthological Society* 26(2): 349–360.