

Sustentabilidade de Bacias Hidrográficas e Índices Compostos: Aplicação e Desafios

Watershed Sustainability and Composite Index: Application and Challenges

Bruna Angela Branchi¹ 

Palavras-chave:

Índices de sustentabilidade
Indicadores
Recursos Hídricos

Resumo

A necessidade de uma gestão eficiente dos recursos hídricos ressalta a importância de estudos que tratam da sustentabilidade de bacia hidrográficas. Ao mesmo tempo, a complexidade do assunto justifica a escolha de indicadores sintéticos multidimensionais. O objetivo do artigo é discutir a avaliação da sustentabilidade de bacias hidrográficas por meio de índices compostos visando identificar pontos fortes e fracos desse instrumento estatístico. Trata-se de uma pesquisa exploratória, descritiva, aplicada e com abordagem quantitativa. Por meio de uma revisão da literatura dos índices de sustentabilidade e de sua aplicação em bacias hidrográficas, foi selecionado um índice da sustentabilidade de bacias hidrográficas (WSI). A escolha dos quinze indicadores que o compõem foi orientada por uma dupla abordagem que associa os critérios do modelo Pressão-Estado-Resposta (PER) às dimensões do modelo Hidrologia-Ambiente-Vida-Política (Hidrology-Environment-Life-Policy ou modelo HELP da Unesco). O WSI foi aplicado para avaliar o grau de sustentabilidade das bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiáí, em dois intervalos da década de 2010. A análise dos resultados permite observar uma leve redução do valor do índice, imputável às dimensões Hidrologia e Política que registraram um retrocesso na segunda metade da década em análise. O resultado não foi pior pelo notável avanço registrado na dimensão Vida. Esta compensação de variações é um exemplo de fraqueza do índice que implicitamente se baseia no conceito de sustentabilidade fraca. Por outro lado, a seleção de indicadores orientados pela dupla abordagem demonstra-se particularmente interessante e desafiadora na busca de associar os critérios PER às dimensões da sustentabilidade bem resumidas no modelo HELP.

Keywords:

Sustainability Indexes
Indicators
Water Resources

Abstract

The need for efficient water resources management highlights the importance of discussing the watershed sustainability issue. This is a complex subject, which justifies the choice for multidimensional indexes. The aim of this paper is to discuss the assessment of watersheds' sustainability through composite indices to detect this statistical instrument's strengths and weaknesses. This is a descriptive, exploratory, and quantitative research. The literature review on sustainability indices and their application in hydrographic basins guided the selection of a watershed sustainability index (WSI). The dual approach that combines the criteria of the Pressure-State-Response (PER) model with the dimensions of the Hydrology-Environment-Life-Policy model (UNESCO HELP model) guided the selection of the fifteen indicators that were chosen. The WSI was used to assess the degree of sustainability of the Piracicaba, Capivari and Jundiáí river basins during two periods in the 2010s. The analysis of the results detected a minor decrease in the index's value, due to the Hydrology and Politics dimensions that recorded a setback in the second half of the decade under analysis. The result was not worse because of the remarkable improvement recorded in the Life dimension. This compensation is a weakness of the WSI that implicitly promotes the concept of weak sustainability. On the other hand, the selection of indicators guided by the dual approach is particularly interesting and challenging by connecting the PER criteria with the dimensions of sustainability well summarized in the HELP model.

INTRODUÇÃO

A gestão de recursos hídricos fundamentada e orientada por evidências atualizadas e resumidas se beneficia da disponibilidade de instrumentos estatísticos acurados e de fácil interpretação. Pela complexidade do problema é necessário dispor de índices compostos ou multidimensionais. A literatura acadêmica apresenta vários índices que tratam dos desafios da gestão da água, quais Índice de Pobreza Hídrica (SULLIVAN, 2002), Índice de Sustentabilidade de bacias hidrográficas (CHAVES; ALIPAZ, 2007), Pegada Hídrica (HOEKSTRA; CHAPAGAIN, 2007), entre outros.

Neste artigo apresenta-se uma revisão da literatura e uma aplicação do Índice de Sustentabilidade de bacias hidrográficas (*Watershed Sustainability Index* -WSI) na versão elaborada por Chaves e Alipaz em 2007. O índice escolhido se destaca por reunir dois marcos conceituais relevantes que orientam a escolha dos indicadores, os modelos PER (Pressão-Estado-Repota) e HELP (*Hidrology-Environment-Life-Policy*). O índice foi aplicado às bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (PCJ) em dois períodos na década de 2010.

Este artigo é o resultado de uma pesquisa orientada por duas perguntas: a) como medir e avaliar a sustentabilidade de bacias hidrográficas?; b) o instrumento escolhido atende às necessidades de informação para a gestão de recursos hídricos?

Trata-se de uma pesquisa exploratória e descritiva, com abordagem quantitativa, cuja metodologia é descrita com maior detalhe na seção 2, após a revisão da literatura sobre indicadores e índices de sustentabilidade. Na terceira seção encontram-se os resultados da avaliação da sustentabilidade das bacias PCJ. A aplicação e avaliação do índice escolhido é a oportunidade para discutir os pontos fortes e as limitações do instrumento estatístico selecionado.

REVISÃO DA LITERATURA

O modelo de desenvolvimento focado no crescimento econômico vem sendo criticado desde os anos 70 do século passado quando se constatou a impossibilidade de garantir o bem-estar econômico para todos sem ameaçar os recursos naturais. Na reunião das Nações Unidas de 1972 em Estocolmo ressaltava-se a necessidade de mudança de paradigma de

desenvolvimento pois o tradicional não garantia igualdade social nem respeito do meio ambiente. Mas foi só em 1987 que aparece no Relatório Brundtland a definição de desenvolvimento sustentável (BARBIERI, 2020).

Outros dois eventos realizados sob a égide das Nações Unidas são especialmente relevantes quando se estudam os indicadores de sustentabilidade: a Conferência de Rio de Janeiro em 1992 com a elaboração do documento “Agenda 21”, e a Reunião de Nova Iorque em 2015 com a elaboração da “Agenda 2030”.

No capítulo 40 “Informação para a tomada de decisão” da Agenda 21 é ressaltada a necessidade de melhorar a disponibilidade da informação assim como de reduzir as diferenças de acesso aos dados.

É preciso desenvolver indicadores do desenvolvimento sustentável que sirvam de base sólida para a tomada de decisões em todos os níveis e que contribuam para uma sustentabilidade autorregulada dos sistemas integrados de meio ambiente e desenvolvimento (UNCED, 1992, s.p.).

O reconhecimento dos indicadores como elementos fundamentais na tomada de decisão implica que eles estejam disponíveis para todos os *stakeholders*, permitindo uma participação ativa na formulação e no acompanhamento de ações rumo ao desenvolvimento sustentável (BARBOSA; CÂNDIDO, 2018; BELLEN, 2006; MALHEIROS; COUTINHO; PHILIPPI, 2012a; 2012c; VEIGA, 2010).

A Agenda 2030 (UN, 2015), por sua vez, define os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) que devem direcionar as ações rumo a um desenvolvimento que abrange as dimensões econômica, social, ambiental. Entre os recursos naturais, a água é um recurso essencial para a vida e para o desenvolvimento de uma sociedade, tanto em termos econômicos quanto ambientais. A sustentabilidade na gestão dos recursos hídricos implica em ações relacionadas com uso e proteção dos recursos hídricos, seguindo a legislação vigente, assim como o monitoramento dessas ações. O ODS 6 visa “Assegurar a disponibilidade e a gestão sustentável da água e saneamento para todas e todos”.

A formulação de políticas de desenvolvimento assim como o monitoramento dos seus resultados se beneficia de instrumentos objetivos e preferencialmente quantitativos quais os indicadores de sustentabilidade (BOULANGER, 2008; 2018; GUIMARÃES; FEICHAS, 2009).

Um indicador pode ser definido como

... uma medida que resume informações importantes sobre determinado fenômeno. A ideia é que aquilo que está sendo efetivamente medido tenha significado maior do que simplesmente o valor associado a essa medição (MALHEIROS; COUTINHO; PHILIPPI Jr, 2012b, p. 35).

Os indicadores são abstrações da realidade, podendo ser representações incompletas ou parciais dela, e são interpretados de acordo com um conjunto de hipótese que refletem os valores de quem está escolhendo os indicadores e que determinam o que deve ser medido. Portanto a escolha de indicadores é uma etapa do processo de avaliação de extrema importância pois através da informação coletada há a possibilidade de influenciar a formulação de políticas públicas já que ações são tomadas quando há diferenças entre os objetivos e o estado do sistema percebido (medido pelos indicadores) (BELL; MORSE, 2008; 2018; JANNUZZI, 2017; MEADOWS, 1998).

Nesse sentido os indicadores de sustentabilidade são instrumentos úteis na mensuração de fenômenos complexos como o desenvolvimento sustentável, facilitando o monitoramento das suas componentes econômicas, sociais e ambientais, identificando relações entre as partes e favorecendo a identificação de entraves (MAYNARD; CRUZ; GOMES, 2017). A representação da realidade através de indicadores numéricos apresenta ganhos quando consegue dar visibilidade a relações de outra forma invisíveis (ROTTENBURG; MERRY, 2015, p. 7-8). Por outro lado, a capacidade de síntese de fenômenos complexos pode representar uma limitação no uso de indicadores se significar uma excessiva simplificação da realidade (WITULSKI; DIAS, 2020).

Em resumo, indicadores que sejam instrumentos de avaliação da sustentabilidade devem permitir aferir diferentes dimensões dos complexos fenômenos sociais, ter uma boa base na teoria e ser sensíveis para capturar adequadamente as mudanças do objeto de estudo. Além de ser de fácil entendimento para comunicar os resultados também para o público não especializado. Devem também gozar da propriedade da replicabilidade, permitindo a construção de séries históricas, essenciais para o monitoramento da evolução do objeto de avaliação (CARVALHO; BARCELLOS, 2010; GUIMARÃES; FEICHAS, 2009; HARDI; ZDAN, 1997; PINTÉR et al., 2011).

Sustentabilidade em bacias hidrográficas

Na literatura encontram-se diferentes índices que visam incluir a contribuição dos recursos hídricos no desenvolvimento sustentável. De acordo com Silva et al. (2020) o Índice de Sustentabilidade de bacias hidrográficas (*Watershed Sustainability Index* -WSI) proposto por Chaves e Alipaz é o mais usado para avaliar a sustentabilidade das bacias. A sua escolha nesta pesquisa se justifica por dois motivos: recorte espacial e visão integradora.

Com relação ao primeiro motivo, a escolha do recorte relacionado com o espaço da bacia hidrográfica se justifica pelo fato que a Lei Federal 9.433 de 1997 e a Resolução 001 de 1986 do Conselho Nacional de Meio Ambiente, que definem a política nacional brasileira dos recursos hídricos elegeram a bacia hidrográfica como a unidade territorial de planejamento.

“...[E]ntre seus objetivos destacam-se: a manutenção da quantidade e da qualidade dos diversos usos ao longo do tempo, o uso racional e integrado dos recursos hídricos visando à sustentabilidade e à prevenção de eventos hidrológicos críticos tanto de origem natural quanto devido a interferências antrópicas” (LACERDA; CÂNDIDO, 2013, p. 19).

Os Comitês de Bacias Hidrográficas são órgãos colegiados compostos por representantes do poder executivo, dos usuários de água e da sociedade civil que, entre outras atividades, são encarregados da gestão coordenada dos recursos hídricos para atender o bem-estar social e econômico e proteger o meio ambiente. Os diferentes representantes gozam de conhecimento desigual e se beneficiam de avaliações da sustentabilidade que sejam facilmente interpretáveis e replicáveis.

O segundo motivo que orientou a escolha do WSI está associado à necessidade de dispor de uma visão integrada dos meios físico, biótico e antrópico quando se definem o planejamento e a gestão de bacias hidrográficas.

Como comentado no fim da seção anterior, em presença de fenômenos complexos é preciso dispor de sistemas de informação, ou marcos ordenadores, que orientem na escolha dos indicadores (MEADOWS, 1998). Entre estes sistemas ou marcos ordenadores que tratam da questão ambiental e do desenvolvimento sustentável propostos por Quiroga (2005) encontra-se o modelo Pressão-Estado-Resposta (PER).

A classe de modelos Pressão-Estado-Resposta tem sua origem no relatório do

Instituto Oficial de Estatística do Canadá, elaborado por Rapport e Friend em 1979, para elaborar um sistema de contabilidade ambiental a partir do Sistema de Estatística Ambiental Estresse – Resposta (Stress-Response Environmental Statistical System, S-RESS). Trata-se de um modelo pensado para descrever o estado do meio ambiente e os processos dinâmicos (forças estressantes) que o modificam, assim como a dinâmica das respostas. Os autores definem como Estresse-Resposta (ou Pressão-Resposta) a abordagem que examina os impactos das atividades humanas sobre o meio ambiente.

O modelo Pressão-Resposta inspirou algumas abordagens para a seleção de indicadores ambientais adotadas por organizações internacionais, entre as quais: o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) que em 1995 elaborou a abordagem Pressão-Estado-Impacto-Resposta (PEIR) para o projeto Global Environment Outlook-Cidade (GEO-Cidade, PNUMA, 2004); a Comissão das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável que de 1996 até 2001 utilizou o modelo Força Motriz-Estado-Resposta (UN, 2007); a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD, 2003) com o modelo Pressão-Estado-Resposta (PER) e a European Environment Agency (EEA, 1999) que desenvolveu o modelo Força Motriz-Pressão-Estado-Impacto-Resposta (FPEIR).

Em síntese, a classe de modelos Pressão-Estado-Resposta sintetiza as relações de causalidade entre as ações humanas e os recursos naturais. Portanto, orienta na seleção de indicadores de Pressão, ou seja, daqueles que descrevem a influência da ação antrópica no meio ambiente. Tais atividades alteram a qualidade e quantidade de recursos naturais (medidos pelos indicadores de Estado) e provocam reações que visam a limitar os efeitos das ações humanas (resumidas pelos indicadores de Resposta).

Numa pesquisa recente das publicações disponíveis na Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações foram encontrados onze trabalhos entre teses e dissertações defendidas no período 2006-2018 que aplicavam o método FPEIR nos estudos de bacias hidrográficas brasileiras (BRANCHI; FERREIRA, 2020). Vollmer, Regan e Adelman (2016) numa pesquisa bibliográfica internacional da literatura acadêmica e publicações de entidades dedicadas ao tema da gestão da água revisaram a metodologia de 95 índices. Destes, 14 se fundamentavam nos modelos PER e/ou FPEIR.

Diferentemente do modelo PER, o modelo HELP proposto pelo Programa Hidrológico Internacional (IHP) da Unesco e a *World Meteorological Organization* (WMO) (UNESCO, 2001). O modelo HELP, pensado especificamente para gestão integrada das bacias hidrográficas, permite identificar indicadores ligados aos temas de hidrologia (H), ambiente (*environment* – E), vida (*life* – L) e política (P). Trata-se, portanto, de um modelo mais próximos a uma visão de desenvolvimento sustentável visto como multidimensional (JUWANA et al., 2012).

A aplicação conjunta dos modelos PER e HELP resulta particularmente interessante na sistematização dos indicadores de sustentabilidade, especialmente quando usados na avaliação do desenvolvimento sustentável pois este conceito é usualmente definido identificando múltiplas dimensões.

Índices de avaliação da sustentabilidade de bacias hidrográficas

Um exemplo do uso integrado do modelo HELP para classificação dos indicadores e do modelo PER na definição dos parâmetros, inspirado na metodologia proposta por Chaves e Alipaz (2007) encontra-se no Quadro 1.

Quadro 1 - Exemplo de Indicadores selecionados para a avaliação da sustentabilidade de bacias hidrográficas seguindo os modelos PER e HELP

	Pressão	Estado	Resposta
<i>Indicadores</i>	<i>Parâmetros</i>		
Hidrológicos (Hydrology)	Variação da disponibilidade de água per capita Variação do Índice da qualidade da água na bacia	Disponibilidade de água per capita Média anual do Índice de qualidade da água na bacia	Evolução na eficiência do uso da água Evolução do tratamento de esgoto
Ambientais (Environment)	Índice de pressão antrópica na bacia	% da área da bacia com vegetação natural	Evolução das áreas de conservação na Bacia
Sociais (Life)	Variação do Índice de desenvolvimento humano-Renda	Índice de desenvolvimento humano (IDH) na bacia	Evolução do IDH na bacia
Políticos (Policy)	Variação do Índice de desenvolvimento humano-Educação	Capacidade institucional e legal em Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos na bacia	Evolução dos gastos com Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos na bacia

Fonte: Adaptado de Maynard, Cruz e Gomez (2017), p. 212.

No trabalho pioneiro de Chaves e Alipaz (2007) foi avaliada a sustentabilidade da bacia hidrográfica do São Francisco Verdadeiro nos anos entre 1996 e 2000. Na opinião dos autores o índice proposto contribui no planejamento e na gestão dos recursos hídricos. Ao mesmo tempo tem potencial para direcionar a gestão dos recursos hídricos numa visão de desenvolvimento sustentável identificando os pontos de estrangulamento.

Em 2008 o WSI foi aplicado à Bacia Hidrográfica do Canal de Panamá (UNESCO, 2008). Desde então esta metodologia foi aplicada em vários países, entre os quais: bacia do rio Reventazón na Costa Rica (CATANO et al., 2009); bacia do rio Elqui no Chile (CORTÉS et al., 2012); bacia do rio Chhattisgarh na Índia (CHANDNIHA; KANSAL; ANVESH, 2014); bacia do rio Japarutuba (MAYNARD; CRUZ; GOMES, 2017) e bacia do rio Piranha-Açu no Brasil (COSTA e SILVA et al., 2020). Trata-se então de uma metodologia que adquiriu relevância na literatura acadêmica. Em todos os artigos citados o índice de sustentabilidade foi aplicado em um único período, optando eventualmente pela comparação dos resultados de bacias diferentes. Neste artigo está sendo avaliada a sustentabilidade das bacias PCJ em

dois períodos da década de 2010, visando avaliar a capacidade deste índice em monitorar a evolução da sustentabilidade ao longo do tempo.

METODOLOGIA

Trata-se de uma pesquisa descritiva e explicativa, aplicada, de tipo quantitativo. Os dados usados na elaboração dos indicadores de sustentabilidade estão disponíveis bases públicas detalhadas no Quadro 2, acessíveis via internet. Por este motivo, salvo casos particulares não está sendo incluído o ano.

O índice foi aplicado às bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá ao longo de dois períodos: 2011-2015 e 2015-2019.

Para cada uma das quatro dimensões do modelo HELP foram calculados os indicadores de Pressão, Estado e Resposta. No caso da dimensão Hidrologia foram consideradas variáveis relacionadas tanto à quantidade quanto à qualidade da água. Nos Quadros 2a-2d encontram-se os indicadores, suas definições e fontes dos dados usados na avaliação da sustentabilidade nas bacias PCJ.

Quadro 2a - Hidrologia (*Hidrology*): Indicadores selecionados, definição e fontes dos dados

	Indicador	Definições	Fontes(*)
Pressão	Variação da disponibilidade de água per capita	Variação da disponibilidade de água per capita (m ³ /hab./ano).	◦ AGÊNCIA PCJ (2021a)
	Variação do Índice da qualidade da água na bacia	Variação da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO).	◦ CETESB (2021)
Estado	Disponibilidade de água per capita	Disponibilidade média de água per capita (m ³ /hab. Ano).	◦ AGÊNCIA PCJ (2021a)
	Média anual do Índice de qualidade da água na bacia	Média de longo prazo do DBO para a Bacia (mg/l)	◦ CETESB (2021)
Resposta	Evolução na eficiência do uso da água	Variação da Média dos quocientes do Valor Adicionado Bruto setorial com relação ao volume de demanda hídrica de retirado do mesmo setor (R\$/m ³).	◦ ANA (2019a) ◦ IBGE (2021)
	Evolução do tratamento de esgoto	Proporção de efluentes domésticos tratados em relação ao total gerado – variação.	◦ CETESB (2021)

Elaborado pela autora (2022).

Quadro 2b - Meio Ambiente (*Environment*): Indicadores selecionados, definição e fontes dos dados

	Indicador	Definições	Fontes(*)
Pressão	Índice de Pressão Ambiental	Média da variação percentual da área agrícola e da variação percentual da população urbana	◦ IBGE (2021) ◦ SEADE (2021a) ◦ FJP (2021a)
Estado	Percentual da área da bacia com vegetação natural	Percentual da área da bacia com vegetação natural	◦ AGÊNCIA PCJ (2021b)
Resposta	Variação das áreas protegidas	Variação % das área protegidas no período	◦ AGÊNCIA PCJ (2021b)

Elaborado pela autora (2022).

Quadro 2c - Vida (*Life*): Indicadores selecionados, definição e fontes dos dados

	Indicador	Definições	Fontes(*)
Pressão	Variação da renda per capita na bacia	Variação do PIB real per capita municipal	◦ IBGE (2021)
Estado	Índice de Desenvolvimento Humano ponderado pela população	Índice de Responsabilidade Social ponderado pela população	◦ SEADE (2021b) ◦ FJP (2021b)
Resposta	Variação do índice de desenvolvimento	Variação do Índice de Responsabilidade Social	◦ SEADE (2021b) ◦ FJP (2021b)

Elaborado pela autora (2022).

Quadro 2d - Política (*Policy*): Indicadores selecionados, definição e fontes dos dados

	Indicador	Definições	Fontes(*)
Pressão	Variação do índice de escolaridade no período corrente, relativamente ao período anterior	Variação do Índice de Responsabilidade Social – componente Educação	◦ SEADE (2021b) ◦ FJP (2021b)
Estado	Capacidade institucional da gestão integrada dos recursos hídricos na bacia	Nível de estrutura legal e institucional e de participação na gestão	Avaliação subjetiva da existência de Agência de bacias e implementação da lei
Resposta	Evolução do gasto com a gestão integrada de recursos hídricos na bacia	Gasto com políticas de recuperação, conservação e proteção de mananciais	◦ AGÊNCIA PCJ (2021b)

Elaborado pela autora (2022).

Os indicadores selecionados são na quase totalidade quantitativos, com exceção para o indicador de Estado relacionado à dimensão Política.

Para monitorar os elementos de Pressão e Respostas de cada dimensão, as variações dos indicadores foram calculadas nos intervalos selecionados: 2011-2015 e 2015-2019. Nos indicadores de Estado foram usados os valores relativos ao último ano do período em análise. Quando faltou a informação do ano escolhido foi selecionada aquela do ano disponível mais próximo.

Na maioria das vezes os indicadores selecionados estavam disponíveis nas fontes citadas, com pouca elaboração adicional. Mas a eficiência no uso da água foi estimada de acordo com a metodologia proposta pela Agência

Nacional das Águas (ANA, 2019b) para o indicador 6.4.1. O indicador é calculado dividindo o valor adicionado bruto de um setor pelo volume de demanda hídrica de retirada do mesmo setor. Aqui foi usado a média da eficiência hídrica dos três grandes setores: agrícola, industrial e de serviços de cada município das bacias PCJ. Os valores monetários do valor adicionado foram deflacionados usando o deflator implícito do Produto Interno Bruto a preços de 2015.

Na construção do índice, todos os indicadores foram transformados em modo que aos valores observados pudesse ser atribuído um valor, entre 0 e 1 (Tabela 1). A transformação é essencial dada a heterogeneidade das unidades de medidas dos indicadores.

Tabela 1 Correspondência entre valores e escores dos indicadores selecionados

	Valores			Escores
	Pressão	Estado	Resposta	
(H1) Hidrologia-Quantidade	< -20%	< 1700	< 0	0,00
	[-20%, -10%)	[1770, 3400)	[0, 5%)	0,25
	[-10%, 0)	[3400, 5100)	[5%, 10)	0,50
	[0, +10%)	[5100, 6800)	[10%, 15)	0,75
	≥ 10%	≥ 6800	≥ 15%	1,00
(H2) Hidrologia-Qualidade	≥ 20%	≥ 10	Muito fraco	0,00
	[10%, 20%)	[10, 5)	Fraco	0,25
	[0, 10%)	[5, 3)	Médio	0,50
	[-10%, 0)	[3, 1)	Bom	0,75
	< -10%	< 1	Ótimo	1,00
(E) Ambiente	≥ 20%	< 5	< -10%	0,00
	[10%, 20%)	[5, 10)	[-10%, 0)	0,25
	[5%, 10%)	[10, 25)	[0, 10%)	0,50
	[0, 5%)	[25, 40)	[10%, 20%)	0,75
	< 0%	≥ 40	≥ 20%	1,00
(L) Vida	< -20%	< 0.5	< -10%	0,00
	[-20%, -10%)	[0.5, 0.6)	[-10%, 0)	0,25
	[-10%, 0)	[0.6, 0.75)	[0, 10%)	0,50
	[0, +10%)	[0.75, 0.9)	[10%, 20%)	0,75
	≥ 10%	≥ 0.9	≥ 20%	1,00
(P) Política	< -20%	Muito fraco	< -10%	0,00
	[-20%, -10%)	Fraco	[-10%, 0)	0,25
	[-10%, 0)	Médio	[0, 10%)	0,50
	[0, +10%)	Bom	[10%, 20%)	0,75
	≥ 10%	Ótimo	≥ 20%	1,00

Fonte: Adaptado de Chaves e Alipaz (2007).

O cálculo do índice de sustentabilidade ocorre em duas etapas. Na primeira etapa são calculados os subíndices das dimensões HELP partindo dos indicadores PER de cada dimensão com a fórmula seguinte:

$$\text{Subíndice}_i = \frac{P_i + E_i + R_i}{3}$$

Onde $\text{Subíndice}_i = H$ se a dimensão é hidrologia, E se é a ambiental, L se a dimensão é vida e P se a dimensão é política.

Na segunda etapa o índice de sustentabilidade (*Watershed Sustainability Index* - WSI) é calculado como média aritmética dos subíndices:

$$\text{WSI} = \frac{H + E + L + P}{4}$$

A interpretação do resultado final usada na literatura é: sustentabilidade baixa se $\text{WSI} <$

0,5; média se $0,5 \leq \text{WSI} \leq 0,8$ e elevada se $\text{WSI} > 0,8$.

É implícita nessa metodologia a opção de substituíbilidade perfeita entre os subíndices. Isso significa aceitar o conceito de sustentabilidade fraca ou de compensação entre as alterações medidas pelo subíndices, onde a redução em uma das dimensões é compensada pelo aumento na(s) outra(s) (NARDO et al., 2005).

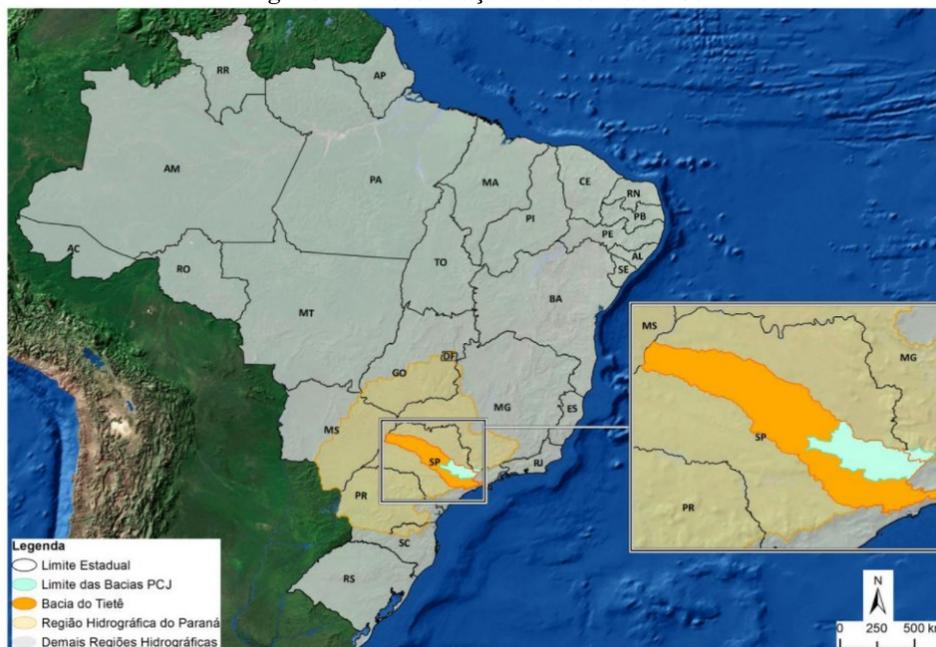
RESULTADOS E DISCUSSÃO

As bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (PCJ) pertencem à bacia do rio Tietê, na região hidrográfica do rio Paraná, com uma área de aproximadamente 15mil km², dos quais 92,5% encontram-se no estado de São Paulo e o restante em Minas Gerais (Figura 1). A área das bacias PCJ é destinada prevalentemente a:

campo (25%), mata nativa (20%), cana-de-açúcar (19%) e espaço urbano (12%). Nela encontram-se 44 Unidades de Conservação das quais 25% são

de proteção integral e o restante de uso sustentável (CONSÓRCIO PROFILL-RHAMA, 2020).

Figura 1 - Localização das bacias PCJ.



Fonte: Consórcio Profill-Rhama (2020), p. 41.

Nas bacias PCJ estão localizados 76 municípios, dos quais 71 no Estado de São Paulo. Vivem nesta área aproximadamente 5,8 milhões de habitantes, com uma taxa de urbanização de 96% (CONSÓRCIO PROFILL-RHAMA, 2020). As principais atividades econômicas são agropecuária e indústria. Trata-se de uma área economicamente importante, responsável por 7% do PIB nacional. As condições de educação, saúde e renda são bastante elevadas, com a quase totalidade dos municípios na faixa de Desenvolvimento Humano muito alto.

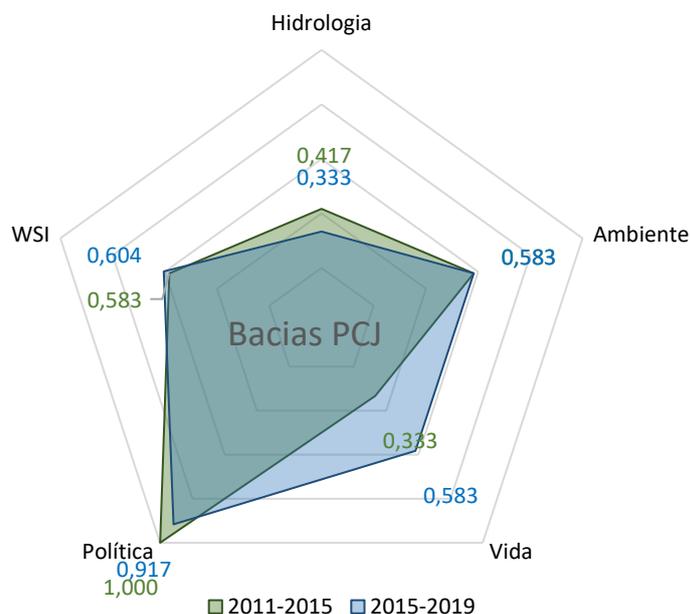
Segundo o Relatório Síntese do Plano de Bacia 2020-2035, 94% da população total têm abastecimento de água, 90% têm coleta de

esgoto e 83% do esgoto coletado são tratados (CONSÓRCIO PROFILL-RHAMA, 2020).

Sempre segundo este relatório as bacias PCJ se encontram em uma situação de estresse hídrico, com uma disponibilidade hídrica inferior aos 1000 metros cúbicos por habitante/ano. O crescimento populacional e as atividades econômicas representam fatores de pressão sobre a demanda de água e sua qualidade.

Seguindo a metodologia detalhada na seção anterior foram calculados os indicadores, os subíndices e o índice de sustentabilidade (WSI) das bacias PCJ nos dois períodos 2011-2015 e 2015-2019 (Tabelas 2 e 3).

Figura 2 - Índice de sustentabilidade das bacias PCJ, WSI, e suas componentes, 2011-2015 e 2015-2019.



Fonte: A autora (2022).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A elaboração do índice de sustentabilidade WSI inspirado nos modelos PER e HELP aproxima a análise da sustentabilidade das bacias hidrográficas às dimensões usuais do desenvolvimento sustentável, facilitando a análise, interpretação e comunicação dos resultados.

O WSI exhibe os típicos problemas dos índices compostos e evidencia que a hipótese de sustentabilidade fraca presente na agregação pela média simples é uma limitação bastante evidente quando o índice for usado em comparações intertemporais. Portanto a análise conjunta dos subíndices resulta ser necessária. No caso das bacias PCJ na segunda metade da década de 2010 houve um menor desequilíbrio entre as dimensões HELP pelos avanços no subíndice Vida. A melhora do WSI não foi maior por causa dos retrocessos registrados nos subíndices Hidrologia e Política.

Enfim, se o WSI for usado como instrumento para orientar a gestão eficiente dos recursos hídricos é urgente acelerar a disponibilidade das estatísticas oficiais, necessárias para sua elaboração, especialmente estatísticas georreferenciadas relativas às variáveis das quatro dimensões do modelo HELP.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA PCJ - Fundação Agência das bacias PCJ. **Informações das bacias**. Disponível em: <http://www.agencia.baciaspcj.org.br/novo/politica-de-mananciais-pcj/projeto-luisa>. Acesso em: 14 Novembro, 2020.
- AGÊNCIA PCJ – Fundação Agência das bacias PCJ. Banco de indicadores. 2021a. Disponível em: <https://agencia.baciaspcj.org.br/instrumento-de-gesto/relatorios-de-situacoes/>. Acesso em: 30 Junho, 2021.
- AGÊNCIA PCJ – Fundação Agência das bacias PCJ. Instrumentos de gestão: Plano de recursos hídricos e Relatórios de Situações. 2021b. Disponível em: <https://agencia.baciaspcj.org.br/instrumentos-de-gestao/>. Acesso em: 30 Junho, 2021.
- AGÊNCIA PCJ – Fundação Agência das bacias PCJ. Execução Orçamentária. 2021c. Disponível em: <https://agencia.baciaspcj.org.br/transparencia/execucao-orcamentaria/>. Acesso em: 30 Junho, 2021.
- ANA -Agência Nacional das Águas. Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil. Brasília: ANA, 2019a. Disponível em: <http://snirh.gov.br/usos-da-agua/>. Acesso em: 10 Julho, 2021.

- ANA – Agência Nacional das Águas. **ODS 6 no Brasil: visão da ANA sobre os indicadores**. Brasília: ANA, 2019b.
- BARBIERI, J.C. Desenvolvimento sustentável: das origens à Agenda 2030. Petrópolis: Vozes, 2020.
- BARBOSA, A. P. A.; CÂNDIDO, G. A. Sustentabilidade municipal e empreendimentos eólicos: uma análise comparativa de municípios com investimentos na geração de energia eólica no estado da Paraíba. **Sociedade & Natureza**, v. 30, n. 2, p. 68-95, 2018. <https://doi.org/10.14393/SN-v30n2-2018-4>
- BELL, S.; MORSE, S. **Sustainability indicators: Measuring the unmeasurable?** 2ª ed. London: Earthscan, 2008.
- BELL, S.; MORSE, S. **Routledge Handbook of Sustainability Indicators**. London e New York: Routledge, 2018. <https://doi.org/10.4324/9781315561103>
- BELLEN, H.M. van. **Indicadores de sustentabilidade: uma análise comparativa**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2006.
- BOULANGER, P.M. Sustainable development indicators: a scientific challenge, a democratic issue. **Surveys and Perspectives Integrating Environment and Society**, v. 1, n. 1, p. 59–73, 2008. <https://doi.org/10.5194/sapiens-1-59-2008>
- BOULANGER, P.M. A systems-theoretical perspective on sustainable development and indicators. In: BELL, S.; MORSE, S. (ed.) **Routledge Handbook of Sustainability Indicators**. London e New York: Routledge, 2018. p. 124-141. <https://doi.org/10.4324/9781315561103-8>
- BRANCHI, B. A.; FERREIRA, D. H. L. A contribuição do Modelo FPEIR nos estudos das bacias hidrográficas brasileiras. **Periódicos Eletrônicos do Fórum da Alta Paulista**, v. 16, n. 4, p. 76-86, 2020. <https://doi.org/10.17271/1980082716420202442>
- CARVALHO, P.G.M.; BARCELLOS, F.C. Mensurando a sustentabilidade. Em MAY, P. H. (org.) **Economia do Meio Ambiente: Teoria e Prática**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. p. 99-126.
- CATANO, N.; MARCHAND, M.; STALEY, S.; WANG, Y. **Development and Validation of the Watershed Sustainability Index (WSI) for the Watershed of the Reventazón River**. 2009. Disponível em: <https://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Diposnível/em/E-project-121609-171302/unrestricted/UNESCO-COMCURE.pdf>. Acesso em: 23 Outubro, 2020.
- CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Relatório de Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo. 2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/publicacoes-e-relatorios/>. Acesso em: 10 Julho, 2021.
- CHANDNIHA, S. K.; KANSAL, L.; ANVESH, G. Watershed Sustainability Index Assessment of a Watershed in Chhattisgarh, India. **Current World Environment**, v. 9, n. 2, p. 403–411, 2014. <https://doi.org/10.12944/CWE.9.2.22>
- CHAVES, H. M. L.; ALIPAZ, S. An integrated indicator based on basin hydrology, environment, life, and policy: The watershed sustainability index. **Water Resources Management**, v. 21, n. 5, p. 883–895, May 2007. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9107-2>
- CONSÓRCIO PROFILL-RHAMA - Profill Engenharia e Ambiente S.A. e Rhama Consultoria, Pesquisa e Treinamento. **Relatório Síntese - Plano de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá, 2020 a 2035**. Piracicaba, 2020.
- CORTÉS, A.E.; OYARZÚN, R.; KRETSCHMER, N.; CHAVES, H.; SOTO, G.; SOTO, M.; AMÉZAGA, J.; OYARZÚN, J.; RÖTTING, T.; SEÑORET, M.; MATURANA, H. Application of the Watershed Sustainability Index to the Elqui River Basin. **Obras y Proyectos**, v. 12, p. 57–69, 2012. <https://doi.org/10.4067/S0718-28132012000200005>
- COSTA e SILVA, D.D.; CHAVES, H. M. L.; CURTI, W.F.; BARACUHY, J. G.V.; CUNHA, T. P. S. Application of the watershed sustainability index in the Piranhas-Açu watershed. **Water Policy**, n.22, p. 622-640, 2020. <https://doi.org/10.2166/wp.2020.011>
- EEA – European Environment Agency. **Environmental indicators: Typology and overview**. Technical report n. 25, 1999.
- FJP – Fundação João Pinheiro. Estatística e Informações. 2021a. Disponível em: <http://fjp.mg.gov.br/estatistica-e-informacoes/>. Acesso em: 15 Julho, 2021.
- FJP – Fundação João Pinheiro. Índice Mineiro de Responsabilidade Social. 2021b. Disponível em: <http://imrs.fjp.mg.gov.br/>. Acesso em: 15 Julho, 2021.
- GUIMARÃES, R. P.; FEICHAS, S. A. Q. Desafios na Construção de Indicadores de Sustentabilidade. **Ambiente & Sociedade**, v. XII, n. 2, p. 307–323, Jul.-Dec. 2009. <https://doi.org/10.1590/S1414-753X2009000200007>
- HARDI, P.; ZDAN, T. **Assessing sustainable development: Principles in Practice**. Winnipeg, Manitoba, Canada: International Institute for Sustainable Development, 1997.
- HOEKSTRA, A.Y.; CHAPAGAIN, A. K. Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. **Water Resources Management**. V. 21, n.1, p. 35-48, 2007. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9039-x>
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. SIDRA Sistema IBGE de Recuperação Automática. 2021. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/>. Acesso em: 15 Julho, 2021.
- JANNUZZI, P. de M. (2017). **Indicadores sociais no Brasil**. 6 ed. revisada. Campinas: Alínea.

- JUWANA, I.; MUTTIL, N.; PERERA, B. J. C. Indicator-based water sustainability assessment — A review. **Science of the Total Environment**, n. 438, p. 357-371, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.093>
- LACERDA, C.S.; CÂNDIDO, G.A. Modelos de indicadores de sustentabilidade para gestão de recursos hídricos. In: LIRA, W.S.; CÂNDIDO, G.A. (orgs.) **Gestão sustentável dos recursos naturais: uma abordagem participativa** [online]. Campinas Grande: EDUEPB, 2013. <https://doi.org/10.7476/9788578792824.0001>
- MALHEIROS, T.F.; COUTINHO, S.M.V.; PHILIPPI Jr, A. Desafios do uso de indicadores na avaliação da sustentabilidade. In: PHILIPPI Jr., A.; MALHEIROS, T.F. (ed.) **Indicadores de sustentabilidade e gestão ambiental**. Barueri, SP: Manole, 2012a. p. 1-29.
- MALHEIROS, T.F.; COUTINHO, S.M.V.; PHILIPPI Jr, A. Indicadores de sustentabilidade: uma abordagem conceitual. In: PHILIPPI Jr., A.; MALHEIROS, T.F. (ed.) **Indicadores de sustentabilidade e gestão ambiental**. Barueri, SP: Manole, 2012b. p. 31-76.
- MALHEIROS, T.F.; COUTINHO, S.M.V.; PHILIPPI Jr, A. Construção de indicadores de sustentabilidade. In: PHILIPPI Jr., A.; MALHEIROS, T.F. (ed.) **Indicadores de sustentabilidade e gestão ambiental**. Barueri, SP: Manole, 2012c. p. 77-87.
- MAYNARD, I. F. N.; CRUZ, M. A. S.; GOMES, L. J. Aplicação de um índice de sustentabilidade na bacia hidrográfica do rio Japarutuba em Sergipe. **Ambiente & Sociedade**, v. 20, n. 2, 2017. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc0057r1v2022017>
- MEADOWS, D. **Indicators and Information Systems for Sustainable: A Report to the Balaton Group**. The Sustainable Institute, 1998. Disponível em: <https://www.donellameadows.org/wp-content/userfiles/IndicatorsInformation.pdf>. Acesso em: 15 Junho, 2021.
- NARDO, M.; SAISANA, M.; SALTELLI, A.; TARANTOLA, S.; HOFFMAN, A.; GIOVANNINI, E. **Handbook on constructing composite indicators: methodology and user guide**. Ispra, Italy: OECD Statistics Working Paper, 2005.
- OECD – Organization for Economic Cooperation and Development. **OECD environmental indicators: development, measurement, and use**. Reference Paper. Paris, 2003. Disponível em: <http://www.oecd.org/environment/indicators-modelling-outlooks/24993546.pdf>. Acesso em: 13 Novembro, 2020.
- PINTÉR, L.; HARDI, P.; MARTINUZZI, A.; HALL, J. Bellagio STAMP: Principles for sustainability assessment and measurement. **Ecological Indicators**, v. 17, p. 20–28, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.07.001>
- PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. **Metodologia para a elaboração de Relatórios GEO Cidades**. Manual de Aplicação. Versão 2. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente Escritório Regional para a América Latina e o Caribe. Rio de Janeiro: PNUMA, 2004.
- QUIROGA, R. M. Estadísticas del medio ambiente en América Latina y el Caribe: avances y perspectivas. **CEPAL SERIE Manuales**. Santiago de Chile, 2005.
- RAPPORT, D.; FRIEND, A. **Towards a Comprehensive Framework for Environmental Statistics: A stress-response approach**. Vol. 11, edição 510 de Catalogue (Statistics Canada). Ottawa: Minister of Supply and Services Canada, 1979.
- ROTTENBURG, R.; MERRY, S.E. A world of indicators: the making of governmental knowledge through quantification. Cap. 1. In: ROTTENBURG, R.; MERRY, S.E.; PARK, S.J.; MUGLER, J. (Ed.) **The World of Indicators: The Making of Governmental Knowledge through Quantification**. Cambridge University Press, 2015. <https://doi.org/10.1017/CBO9781316091265>
- SEADE – Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados. SEADE População. 2021a. Disponível em: <https://populacao.seade.gov.br/>. Acesso em: 15 Julho, 2021.
- SEADE – Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados. Índice Paulista de Responsabilidade Social. 2021b. Disponível em: <https://iprs.seade.gov.br/>. Acesso em: 15 Julho, 2021.
- SILVA, J.; FERNANDES, V.; LIMONT, M.; DZIEDZIC, M.; ANDREOLI, C. V.; RAUEN, W. B. Water sustainability assessment from the perspective of sustainable development capitals: Conceptual model and index based on literature review. **Journal of Environmental Management**, n. 254, 109750, 2020. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109750>
- SULLIVAN, C. Calculating a water poverty index. **World Development**, v. 30, n.7, p. 1195–1210, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0305-750X\(02\)00035-9](https://doi.org/10.1016/S0305-750X(02)00035-9)
- UN – United Nations. **Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies**. 3 ed., New York: United Nations, 2007. Disponível em: <https://www.un.org/esa/sustdev/natlinfo/indicators/guidelines.pdf>. Acesso em: 28 Fevereiro, 2021.
- UN – United Nations. **Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development**. New York: United Nations, 2015. Disponível em: <https://sdgs.un.org/sites/default/files/publication/s/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>. Acesso em: 15 Abril, 2020.

- UNCED - United Nations Conference on Environment and Development. **Agenda 21**. Rio de Janeiro 3-14 junho de 1992. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/Agenda21.pdf>. Acesso em: 15 Julho, 2021.
- UNESCO - United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. The Design and implementation strategy of the HELP initiative. **Technical documents in hydrology**. Vol. 44, 2001. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000122948?posInSet=9&queryId=c2c0c4d3-5017-4465-99c3-29d6f30d6e67>. Acesso em: 13 Novembro, 2020.
- UNESCO - United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. **2 PHI-VII / Documento Técnico N° Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe**. [S.l: s.n.], 2008. Disponível em: <http://www.unesco.org.uy/phi>. Acesso em: November 15, 2020.
- VEIGA, J. E. da. Indicadores de sustentabilidade. **Estudos Avançados**, v. 24, n. 68, p. 39–52, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142010000100006>
- VOLLMER, D.; REGAN, H. M.; ANDELMAN, S. J. Assessing the sustainability of freshwater systems: A critical review of composite indicators. **Ambio**, v. 45, n. 7, p. 765–780, 2016. <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0792-7>
- WITULSKI, N.; DIAS, J. G. The Sustainable Society Index: Its reliability and validity. **Ecological Indicators**, n. 114, 106190, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106190>

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Bruna A. Branchi concebeu o estudo, coletou, analisou os dados e redigiu o texto.



Este é um artigo de acesso aberto distribuído nos termos da Licença de Atribuição Creative Commons, que permite o uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que o trabalho original seja devidamente citado.