Encontro Técnico AESABESP
35º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente

# MODELO CONCEITUAL DE AVALIAÇÃO EMERGÉTICA PARA DESPOLUIÇÃO DE RIOS URBANOS

**Fabio Richard Flausino** [(1)]
Doutor em Engenharia de Produção, Mestre em Gestão Ambiental e Sustentabilidade, Engenheiro Ambiental. Técnico em sistemas de saneamento na Sabesp com trabalhos realizados na área de despoluição de córregos urbanos na cidade de São Paulo, coordenador da célula de operação de esgotos no departamento de gestão e apoio à operação e clientes (ODG) na SABESP.
**Carlos Alexandre Trindade Pinheiro Menuchi** [(2)]
Doutorando no Programa Ambiente, Saúde e Sustentabilidade e Mestre em Ciências pela Faculdade de Saúde Pública/USP, MBA em Gestão e Tecnologias Ambientais pelo PECE na Escola Politécnica/USP. Tecnólogo em Saneamento Ambiental pela Faculdade de Tecnologia da Unicamp com atuação na Sabesp na Superintendência de PD&I (EI) pelo Departamento de Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico.

**Endereço[(1)]:** Rua Costa Carvalho, 300 - Pinheiros – São Paulo - SP - CEP: 05429-900 - País - Tel: +55 (11) 98685-3212 - e-mail: fflausino@sabesp.com.br

## RESUMO

O processo de despoluição de rios urbanos está diretamente conectado as relações de sustentabilidade, pela disposição de recursos financeiros, melhoria da qualidade de vida das pessoas que vivem em grandes cidades e fundamentalmente pela necessidade cada vez mais pungente no que tange a disponibilidade de água limpa em grandes centros urbanos. A partir destas observações, a análise emergética apresenta um procedimento de avaliação que visa contemplar todos os aspectos relacionados à energia aplicada em processos de despoluição de rios urbanos para efetiva sustentabilidade em ações socioambientais. A revisão bibliométrica e sistemática realizada neste trabalho verificou o uso do procedimento emergético em estudos relacionados as questões hídricas, identificando como lacuna a ausência de um procedimento de avaliação emergético em processos de despoluição de rios urbanos. A partir desta lacuna este estudo realiza uma revisão bibliométrica e sistemática propondo um modelo conceitual para avaliação do processo de despoluição de rios urbanos que permite a melhoria na disposição de recursos, além do aprimoramento das ações realizadas com o objetivo de manutenção da revitalização do corpo de água e disponibilização de serviços ecossistêmicos observados pela sociedade, contribuindo com o arcabouço acadêmico na introdução de novos indicadores para a análise de processos similares..

**PALAVRAS-CHAVE:** revitalização de rios urbanos, emergia, sustentabilidade

## 1 - Introdução

O avanço das grandes metrópoles sobre a natureza sem o devido cuidado social e urbanístico causam a degradação dos recursos naturais que afetam seriamente o valor dos serviços ecossistêmicos (SE) em rios e córregos. Essas mudanças podem ser observadas pelo aumento da frequência e intensidade da poluição em corpos de água urbanos (Surya, Syafi, Sakti, 2020).
A partir desta constatação é cada vez mais importante identificar e avaliar os fatores determinantes que levam as causas destas mudanças nos corpos hídricos a partir de indicadores que possam apresentar os impactos e resultados de ações para melhoria da sustentabilidade em processos de recuperação. (Lv, Ling, Gui, Di & Zhou, 2018; Liu, Zhan, Zhao, Yan, Zhang & Wei, 2019).
Foram identificados dentre os indicadores de sustentabilidade existentes aplicações em questões relacionadas a rios: Análise de entrada e saída (IOA) - Environmental efficiency analysis of the Yangtze River Economic Zone using super efficiency data envelopment analysis (SEDEA) and tobit models (Chen, Xu, Chen, 2019); Health assessment for urban rivers based on the pressure, state and response framework— A case study of the Shiwuli River (Zhao, Zhou, Dong, Dai, 2019); Gray water and environmental externalities: International patterns of water pollution through a structural decomposition analysis (Incera, Avelino, Solis, 2017);
Avaliação do ciclo de vida (LCA) In search of key: Protecting human health and the ecosystem from water pollution in China (Chen, Wang, Duan, et.al., 2019); Optimizing the integration of pollution control and water transfer for contaminated river remediation considering life-cycle concept (Zhang, Fang, Li, et. al., 2019); Are stormwater

pollution impacts significant in life cycle assessment? A new methodology for quantifying embedded urban stormwater impacts (Phillips, Jeswani, Azapagic, Apul, 2018);
Pegada ecológica (EF) - Ecosystem service valuation method through grey water footprint in partially-monitored subtropical watersheds (Taffarello, Bittar, Sass, et. al., 2020); Assessment of the water resource carrying capacity based on the ecological footprint: a case study in Zhangjiakou City, North China (Dai, Sun, Xu, Lei, 2019); A comprehensive insight into water pollution and driving forces in Western Chinadcase study of Qinghai (Fan, Fang, 2020).
Pegada de carbono (CF) - Relationships between ecosystem services and human well-being changes based on carbon flow — A case study of the Manas River Basin, Xinjiang, China (Xu, Wei, Fan, et.al., 2019); Relationships between ecosystem services and human well-being changes based on carbon flow—A case study of the Manas River Basin, Xinjiang, China (2019); Particulate matter-attributable mortality and relationships with carbon dioxide in 250 urban áreas worldwide (Anenberg, Achakulwisut, Brauer, et. al., 2019);
Análise custo-benefício (ACB) - Impacto da Mudança de Uso / Cobertura da Terra no Delta do Rio Yangtze Valor dos Serviços do Ecossistema de Aglomeração Urbana:
Padrões Temporais-Espaciais e Pontos Frios / Quentes Mudança do Valor dos Serviços do Ecossistema trazida pela Urbanização (Li, Sun, Tian, et.al., 2019); Cost–benefit analysis of full and partial river restoration: the Kishon River in Israel (Becker, Greenfeld, Shamir, 2018); How much is an urban stream worth? Using land senses and economic assessment of an urban stream restoration (Yaacovi, Gasith, Becker, 2021)
Neste contexto, a diversidade de parâmetros incorporados ao processo de despoluição de rios urbanos (econômico, técnico e social), exige maior complexidade para desenvolvimento de indicadores de sustentabilidade, sendo que a análise emergética reflete tanto a contribuição do sistema econômico como a do meio ambiente (BROWN e ULGIATI, 2002).
A emergia pode ser definida como a energia disponível usada anteriormente, direta ou indiretamente, para produzir um produto ou serviço (Odum, 1996). A teoria emergética permite uma avaliação mais abrangente, convertendo as diferentes forças atuantes em uma unidade comum, que pode ser expressa em (sej) - joules equivalentes solares (Liu, et.al, 2019; Song, Su, Zhu, Li, Li & Sun, 2019).
A utilização de emergia é considerada adequada para avaliação de sistemas híbridos, naturais e econômicos, para avaliar o grau de sustentabilidade em sistemas antrópicos, como bacias hidrográficas (Zhan, Zhang, Chu, Liu & Zhang, 2018).
Neste contexto, anteriormente estudos apresentaram a utilização dos indicadores emergéticos em avaliações ambientais relacionadas as questões hídricas. observando aspectos como a restauração de áreas pantanosas e hidrovias a partir de índices emergéticos anteriores e posteriores a restauração (Sun, Yuan, Liu & Tian, 2019; Di, Wang, Wu & He, 2019).
Outros estudos demonstram a evolução do ecossistema e o investimento que a natureza realiza no processo a partir de cálculos dos custos para restauração da ecologia em bacias hidrográficas (Sun, Yuan, Liu & Liu, 2021; Zhong, Geng, Kong, Liu, Tian, Chen & Ulgiati, 2018).
A avaliação emergética e a qualidade da água foi utilizada como referência para medir o desenvolvimento econômico e a contribuição da emergia inserida no processo de restauração de bacias hidrográficas nos estudos de Zhang, et.al., 2017 e Lv, et.al, 2018.
Outras pesquisas relacionam os indicadores emergéticos ao nível de desenvolvimento econômico regional, a taxa de urbanização e ao uso racional dos recursos em zonas úmidas e urbanas (Zeng, Zhao & Yang, 2010; Su, Fath, Yang, Chen & Liu, 2013).
A análise das relações e influências entre os recursos hídricos, a economia social e o meio ambiente ecológico para promoção de sustentabilidade e manutenção da integridade e saúde do ecossistema foram identificadas nos estudos de Di, et.al, 2019 e Song, et.al, 2021.
Estudos demonstraram que a utilização dos indicadores emergéticos são uma ferramenta eficaz, para avaliar o valor natural dos recursos em rios e no desenvolvimento sustentável urbano, a partir de uma gestão racional de recursos (Chen, Chen, Luo & Lv, 2009; Pulselli, Patrizi & Focardi, 2011).
A redução na entrada de recursos adquiridos e aumento na disponibilização de recursos naturais, que afetam diretamente os serviços ecossistêmicos em corpos de água foi demonstrada nos estudos de Zhan, et.al., 2018; Song, et.al, 2019.
Além disso, outros aspectos verificados em estudos anteriores apresentaram indicadores de emergia em corpos d'água, pântanos e florestas contribuindo para melhorar os serviços ecossistêmicos. O conceito de serviços ecossistêmicos demonstrou-se útil para facilitar a comunicação entre as partes interessadas e os formuladores de políticas (Liu, Zhan, Zhao, Yan, Zhang & Wei, 2019; Lv, et.al, 2020).
Melhorar os serviços ecossistêmicos em florestas, pântanos, bacias hidrográficas, águas subterrâneas e áreas agrícolas a partir de avaliação econômica baseados em emergia e compreender o verdadeiro valor dos serviços ecossistêmicos

pode promover a manutenção e conservação do serviço ecossistêmico regional, fornecer base científica para a formulação de planos regionais de construção de civilizações ecológicas, planos de desenvolvimento sustentável e políticas de compensação ecológica. (Wang, Li, Yu & Wang, 2019; Li, Lv, Ling, Gu, Li, Wu & Yan, 2021).
Com isso, após desenvolver a base da revisão bibliométrica e sistemática de trabalhos que utilizaram a metodologia emergética em sistemas hídricos, não foi identificado trabalhos que utilizassem a avaliação emergética e seus indicadores para melhorar a sustentabilidade do processo de recuperação de córregos e rios urbanos. Diante desta constatação, este trabalho apresenta indicadores de emergia utilizados em ações similares: intervenções em pântanos (Liu, et.al., 2019), bacias hidrográficas e florestas (Zhan, et.al., 2018; Liu, et.al., 2019), que sustentam a aplicação da emergia em processos de revitalização de rios urbanos (Lv, et.al., 2018).
Com base nessa lacuna de pesquisa buscar-se-á responder a seguinte pergunta de pesquisa: "Como propor um procedimento de avaliação emergética para o processo de despoluição de rios urbanos?".
Diante deste contexto, o objetivo deste trabalho é: propor um procedimento de avaliação emergética para avaliação do processo de despoluição de rios urbanos.
A contribuição teórica deste estudo é o desenvolvimento de novas análises científicas aplicadas em processos de revitalização urbano e de preservação da natureza, apresentado novos indicadores sustentáveis.
A utilização de indicadores emergéticos por prestadores de serviços de saneamento e/ou pelo poder concedente, propõe a sustentabilidade de processos de reurbanização, além da otimização na destinação de recursos.
Dentre as perspectivas da efetiva aplicação dos indicadores emergéticos a melhoria dos aspectos relacionados a controle de revitalização urbano e na distribuição dos recursos, permite a sociedade aumento na integração com áreas urbanas e na percepção dos serviços ecossistêmicos observados.
A concepção deste artigo por meio de análise bibliográfica, bibliométrica e sistemática relacionada a indicadores emergéticos, corrobora a afirmação de que a Emergia pode ser utilizada para melhorar a sustentabilidade em um processo de despoluição de um rio ou córrego urbano (Liu, et.al., 2019).
O artigo está estruturado da seguinte forma: Materiais e Métodos, Resultados, Proposta de aplicação e Conclusão.

## 2 - Metodologia de pesquisa

A revisão bibliométrica e sistemática contribui para o exame de um conjunto de publicações de modo quantitativo e objetivo, identificando através de gráficos e dados os perfis das pesquisas relevantes sobre o tema proposto. Como resultado, os pesquisadores diminuem os vieses associados a outras revisões qualitativas (Montechi, Plangger, West, 2021).
A utilização de gráficos e dados quantitativos auxilia na identificação de perfis de diversas publicações, assim como o desenvolvimento de uma análise de conteúdo contribui para categorizar e codificar os dados levantados (Bardin 1986). A construção da revisão sistemática, desenvolve-se a partir de método replicável, científico e transparente (Moher et al. 2009).
A revisão bibliométrica e sistemática realizada neste trabalho analisou as pesquisas científicas sobre a utilização da avaliação emergética para adoção de indicadores em processos de despoluição de rios ou córregos urbanos, com a finalidade de contribuir para a melhoria destes processos.
A pesquisa bibliométrica foi realizada a partir das seguintes palavras chave: emergia, revitalização de rios urbanos, serviços ecossistêmicos e indicadores de sustentabilidade utilizadas no título ou resumo, nas principais plataformas científicas que abrangem o assunto pesquisado: Elsevier, Google Scholar, Web of Sciences, Springer, Proquest.
A pesquisa identificou 726 artigos, que foram filtrados com base no método PRISMA para identificar os resultados que se enquadram no escopo da pesquisa (Moher et al. 2009), conforme mostrado na Figura 1. A revisão bibliométrica e sistemática teve como critério de data inicial a pesquisa anterior realizada por He, et.al (2020) sobre estudos que aplicaram a teoria emergética e observou que, muito embora as pesquisas sobre o tema tenham significativo aumento desde sua criação por Odum em 1996, no que tange a estudos realizados sobre rios urbanos e sua despoluição, o assunto ainda é incipiente.

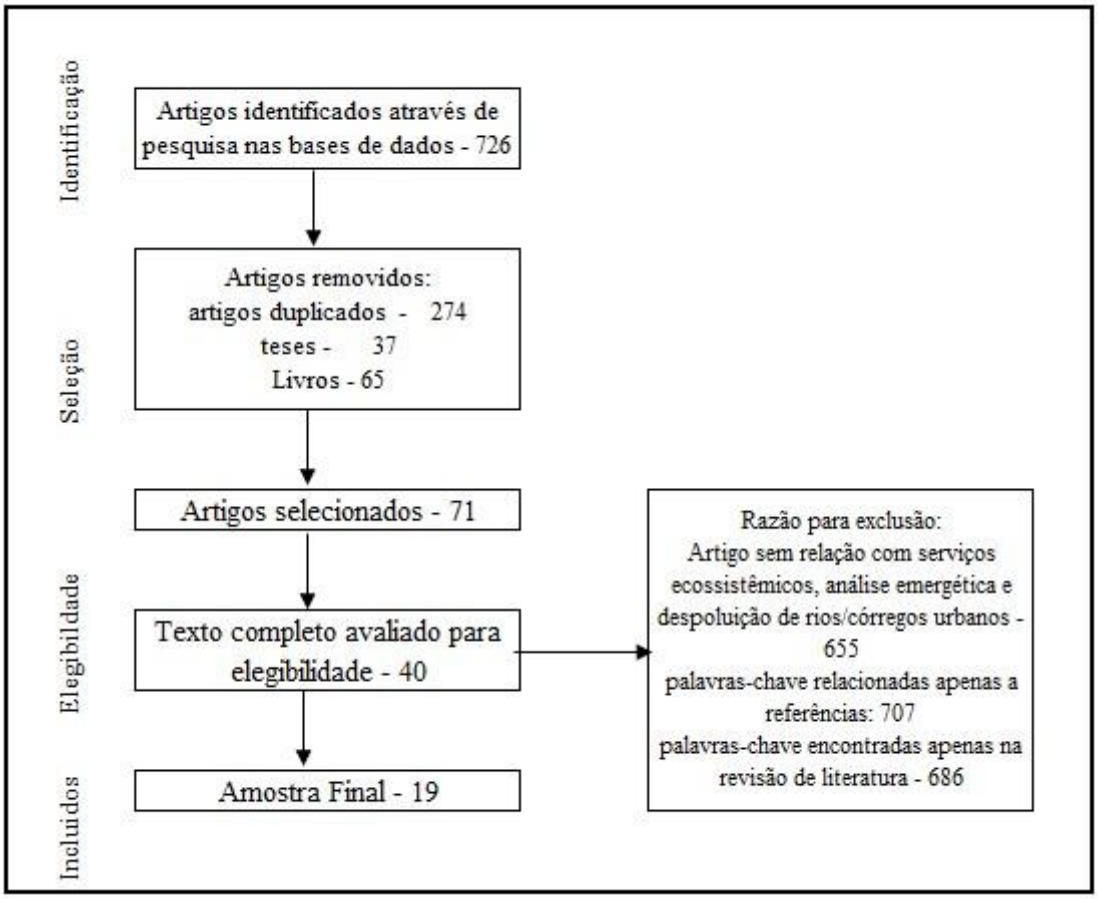



Figura 01 – Seleção e avaliação das pesquisas (fonte: o autor, adaptado de Moher, et.al., 2009).

O levantamento bibliométrico realizado identificou que a maioria dos artigos possuem relação com emergia e serviços ecossistêmicos, porém sem citar diretamente intervenção em rios urbanos nem aferir indicadores na despoluição ou revitalização de rios urbanos. Foram identificados 40 artigos em que a avaliação emergética foi utilizada para desenvolver indicadores em processos de intervenção ambiental, portanto sendo relevantes para o desenvolvimento da teoria aplicada.

A análise de conteúdo dos 40 artigos selecionados identificou 19 artigos que apresentam correlação direta com o tema proposto, pois utilizaram a avaliação emergética em questões de revitalização de bacias hidrográficas, pântanos ou estão inseridos em questões hídricas.

A revisão bibliométrica realizada determinou quantitativamente o desenvolvimento de um novo campo de conhecimento, demonstrando a relevância teórica e prática do estudo para o tema proposto, de acordo com o número de publicações por ano. Além disso, avaliou-se o número de publicações por periódico para mensurar quais periódicos publicam o maior número de artigos sobre avaliação emergética, processos de revitalização e indicadores de sustentabilidade, concluindo que a análise do número de publicações por periódico é essencial para pesquisadores entenderem e posicionar seu trabalho em um jornal apropriado (Oliveira Neto et.al. 2020).

Por fim, as metodologias de pesquisas utilizadas nos estudos selecionados durante a revisão sistemática foram analisadas para verificar a aplicação da avaliação emergética bem como sugerir a utilização deste método em pesquisas futuras, devido à pouca utilização em estudos atuais sobre rios urbanos e assuntos correlatos (Oliveira Neto et al., 2018).

A análise de todos os 19 artigos selecionados pela revisão sistemática, identificou práticas similares a avaliação emergética para desenvolvimento de indicadores em serviços ecossistêmicos e questões hídricas respondendo as questões levantadas por esse estudo, com o intuito de preencher a lacuna de pesquisa.

A revisão sistemática realizada neste estudo a partir da bibliometria contribui com as análises de conteúdo, auxiliando na replicabilidade científica e na transparência dos resultados obtidos (Oliveira Neto, et.al, 2021).

Assim sendo, a utilização da avaliação emergética em processos de despoluição de rios urbanos é proposta por esta pesquisa, a partir da realização de um modelo teórico para apreciação da viabilidade de introdução dos conceitos de emergia na despoluição de rios urbanos, adotando os indicadores propostos por Odum (2001).
Conforme mostrado na Figura 1, 19 artigos que abordaram a avaliação emergética em corpos hídricos foram identificados. As publicações relacionadas com o assunto começaram em 1988, porém não identificamos a utilização de emergia em trabalhos sobre revitalização e/ou restauração de corpos hídricos, anteriores a 2010 (He, et.al., 2020).

## 3 – Revisão bibliométrica sobre avaliação emergética na despoluição de rios urbanos

A Figura 2 apresenta o número de publicações a partir de 2010 no contexto deste artigo, demonstrando aumento ano a ano, com uma ligeira queda entre 2015 e 2016 e posterior aumento de publicações desde então.




Figura 2 - Número de publicações por ano.

A revisão bibliométrica buscou artigos de avaliação emergética em questões hidrológicas e o recente aumento de publicações reforça a visão da necessidade de revitalização de corpos hídricos e a busca pela sustentabilidade nas questões hidrológicas (Li, et.al. 2021; Guo, et.al. 2020).

A Figura 3 mostra que a revista Journal of Cleaner Production publicou a maioria das pesquisas (com ênfase em avaliação emergética) devido ao seu escopo relacionado à gestão de operações sustentáveis, outra revista que também colaborou com a publicação de 22 artigos relacionados ao tema pesquisado foi a Ecological Indicators. Esses artigos focam em análise de bacias hidrográficas a partir da avaliação emergética do sistema.




Figura 3 - Número de artigos publicados pelos periódicos selecionados.

A figura 4 demonstra as metodologias utilizadas nos artigos que foram inseridos na revisão sistemática deste trabalho. A concepção do modelo teórico apresentado neste artigo utilizou estudos que aplicaram a metodologia de avaliação emergética (68%) em situações de engenharia hidráulica, porém sem aferir resultados em regiões urbanas, ou processos urbanos de despoluição de córregos, sendo que indicadores de sustentabilidade emergéticos são utilizados para melhoria e desenvolvimento de regiões onde são necessárias disponibilização ou restauração dos serviços ecossistêmicos.

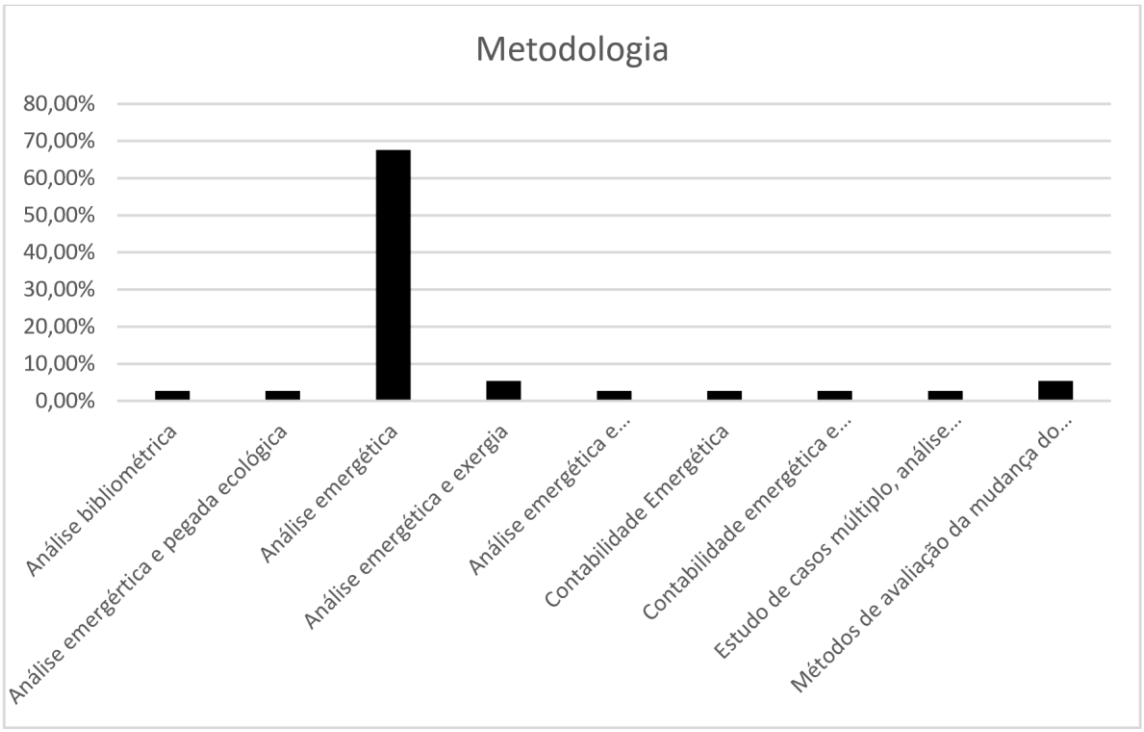



Figura 4 - Publicações por metodologia utilizada.

Os estudos de avaliação emergética identificados na revisão bibliométrica e sistemática relacionam-se com áreas de conhecimento que estão diretamente conectadas a questões hídricas (figura 5) e apresentam a facilidade de utilização e potencial desta avaliação para desenvolvimento de indicadores emergéticos e sua aplicação em ações similares a despoluição de rios urbanos.

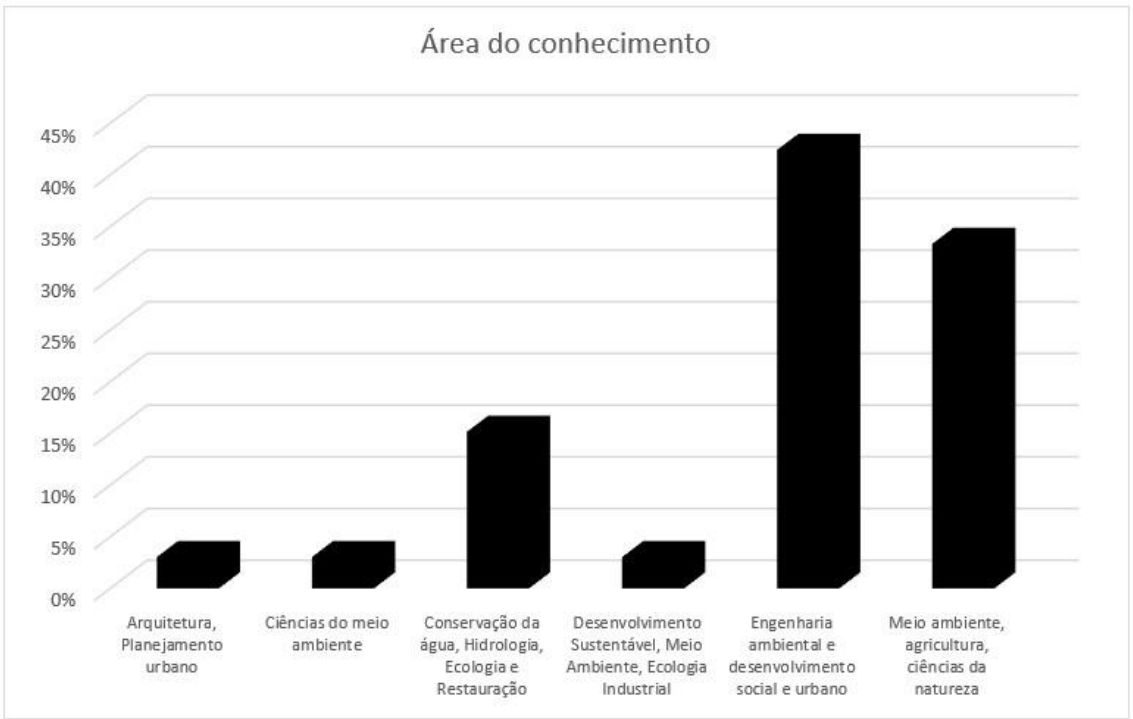



Figura 05 – Relação de estudos e área do conhecimento.

A revisão bibliométrica e sistemática apresenta aspectos relevantes inseridos no contexto de revitalização hídrica a partir de análises emergéticas, porém não identificou diretamente indicadores emergéticos em processos de despoluição de rios urbanos. Assim sendo, este trabalho apresenta um modelo para aplicação da teoria na despoluição de rios ou córregos urbanos.

## 4 – Revisão sistemática para proposição de modelo conceitual para avaliação da despoluição de rios urbanos

Este estudo foi realizado com o objetivo de apresentar um modelo teórico para implantação de indicadores emergéticos em processos de despoluição de corpos de água, utilizando os princípios da Emergia e a concepção de um diagrama de energia a ser utilizado em sua implantação como método de avaliação, a partir da revisão bibliométrica e sistemática realizada.
A partir da revisão sistemática identificamos que a avaliação emergética permite a análise da qualidade do fluxo de energia e permite fazer comparações entre formas distintas de energia (sol, água) com outros sistemas (recursos financeiros e humanos) (Song, et.al., 2021).
A avaliação emergética contribui com a maior sustentabilidade de sistemas complexos e a sua sobrevivência (caso de rios e córregos urbanos) pela adoção de indicadores que relacionam toda a emergia usada com os recursos naturais (Sun, et.al., 2019).
O cálculo de rendimento da emergia incorporada pelo sistema propicia um ganho em energia primária disponibilizada para a economia que consumirá o produto, ou seja, permite observar os ganhos econômicos adquiridos durante e após o processo (Song, et.al., 2021).
A implantação de indicadores emergéticos, além das análises econômicas são importantes porque avaliam o significado que o sistema produtivo possui no ecossistema, indicando se existe maior pressão do sistema econômico sobre o ecossistema, assim como, verificar se os impactos ambientais causados podem ser absorvidos pelo sistema (Lv, et.al., 2020, Li, et.al., 2021).
Os estudos verificados na revisão sistemática aplicaram a avaliação emergética e demonstraram resultados que estão diretamente conectados a proposta de modelo para avaliação emergética na despoluição de rios urbanos a partir da utilização dos procedimentos elaborados por Odum (2001).
O modelo apresentado neste estudo observou a utilização da avaliação emergética em casos similares a proposta demonstrada, visando a adaptação dos procedimentos metodológicos de emergia para efetiva implantação em processos de despoluição.

### *4.1 – Proposta de modelo teórico para aplicação de avaliação emergética na despoluição de rios urbanos*

A construção do modelo teórico deste trabalho propõe a introdução da metodologia emergética elaborada por ODUM (2001) propondo a criação de novos indicadores que possam fomentar a despoluição de rios urbanos, otimizando a utilização de recursos e melhorando os processos implícitos (saneamento básico, urbanização, recursos públicos, meio ambiente.
As análises propostas pela teoria emergética identificadas pela revisão sistemática, mostram que o desenvolvimento socioambiental deve caminhar lado a lado ao empreendedorismo para construir um futuro próspero e sustentável, permitindo condições básicas as gerações futuras (Odum, 2001).
A estrutura para avaliação emergética apresenta os problemas existentes (poluição dos rios) e os indicadores emergéticos, observando que os aspectos a serem desenvolvidos por essa pesquisa estão diretamente correlacionados a produção de conhecimento e utilização prática para melhoria no processo de despoluição de rios urbanos e avaliação dos serviços ecossistêmicos.
Na revitalização de áreas úmidas, os indicadores emergéticos demonstram as melhorias ecológicas e a sua utilização em processos de revitalização de rios urbanos contribui com a disponibilização de SE, aprimoramento das ações e desenvolvimento de um processo mais sustentável (Sun, et.al., 2021).
A construção do modelo teórico (figura 06) para análise emergética da despoluição de rios e córregos urbanos foi desenvolvido a partir da revisão sistemática e está dividido em quatro etapas (recursos naturais, revitalização, dados coletados e indicadores emergéticos), de acordo com pesquisas que adotaram a avaliação emergética em situações similares e diretamente relacionadas a recursos hídricos.

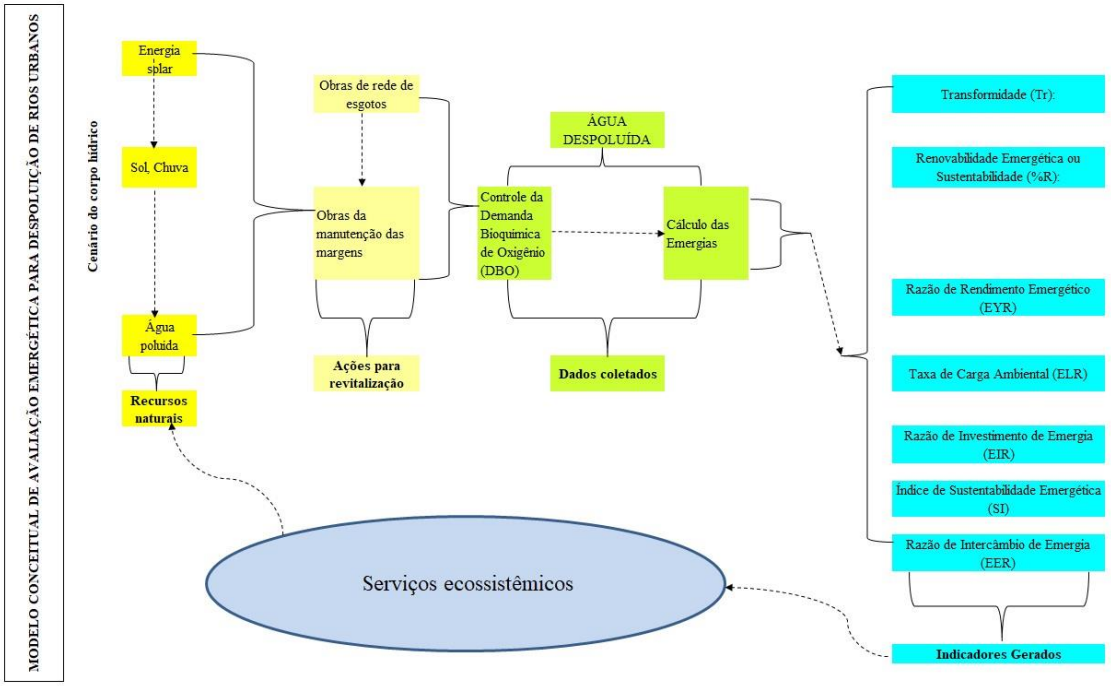



Figura 06 – Modelo teórico para avaliação emergética em rios urbanos

A construção do modelo teórico para análise emergética da despoluição de rios e córregos urbanos foi desenvolvido a partir da revisão sistemática e está dividido em quatro etapas (recursos naturais, revitalização, dados coletados e indicadores emergéticos), de acordo com pesquisas que adotaram a avaliação emergética em situações similares e diretamente relacionadas a recursos hídricos.

As etapas que formam o modelo teórico adotado neste artigo foram adaptadas do modelo de avaliação emergética, a partir dos componentes que constituem o diagrama de sistema de energias inseridos no sistema a ser estudado (Chen, et.al., 2009). A tabela 01, apresenta as etapas que constituem o modelo a partir dos conceitos de avaliação emergética utilizados em estudos que utilizaram a teoria com indicadores em análises de sistemas hidrográficos.

Os parâmetros que compõe as etapas de análise e posteriormente os indicadores emergéticos são diretamente relacionados a concepção do diagrama de energia de acordo com o fluxo de energia natural (renovável e não renovável), material e serviços que ocorrem dentro do sistema estudado (Lv, et.al. 2018).

Tabela 01 – Etapas da análise emergética

| ETAPAS | INDICADORES EMERGÉTICOS | CONCEITO | REFERÊNCIA |
|---|---|---|---|
| RECURSOS NATURAIS | Tr; %R; EYR; ELR EIR; SI; EER | Medir a taxa de contribuição hídrica em emergia, assim como a contribuição para a economia a partir da verificação dos recursos naturais inseridos no sistema hídrico | Lv, et.al. (2018); Chen, et.al. (2009); Zeng, et.al. (2010) |
| AÇÕES PARA REVITALIZAÇÃO | Tr; %R; EYR; ELR EIR; SI; EER | Análise das obras realizadas para revitalização de corpos hídricos, a partir da introdução nas equações de atividades e insumos utilizados | Lv, et.al. (2018); Pulselli, et.al. (2011) |
| DADOS COLETADOS | Tr; %R; EYR; ELR EIR; SI; EER | Coleta de dados de análise da qualidade da água foram introduzidos nas equações de indicadores emergéticos para avaliação de regiões afetadas pelo crescimento econômico | Sun, et.al. 2019); Di, et.al. (2019) |
| INDICADORES GERADOS | Tr; %R; EYR; ELR EIR; SI; EER | Os indicadores gerados possibilitam a análise dos processos de deterioração e restauração em ações de revitalização, permitindo as partes interessadas desenvolverem políticas para o desenvolvimento sustentável. | Lv, et.al. (2018); Chen, et.al. (2009); Zeng, et.al. (2010); Sun, et.al. 2019); Di, et.al. (2019) |

*Etapa 1 – Recursos Naturais*

Os recursos naturais adotados no modelo apresentado, determinam parâmetros fundamentais incorporados no cálculo das transformidades e emergias em um processo de despoluição de um rio urbano (tabelas 01 e 02). A energia solar, o índice pluviométrico, e a qualidade da água (DBO) fazem parte da contribuição natural na avaliação emergética para o desenvolvimento econômico e social humano (Lv, et.al., 2018).

Zeng et.al. (2010) demonstrou as contribuições dos recursos naturais inseridos em um contexto de bacias hidrográficas a partir da avaliação emergética, como o fluxo e qualidade de água dos rios diretamente relacionadas a saúde do ecossistema, sendo fundamentais para preservação e disposição de serviços ecossistêmicos (provisão, regulação, suporte e cultural) essenciais à manutenção da vida.

As avaliações emergéticas realizadas na bacia do rio Amarelo na China demonstraram que o volume, assim como a qualidade do corpo de água (DBO) após retirada de sedimentos, interferem diretamente nos indicadores de emergia e transformidade utilizados para mensurar os recursos eco econômicos utilizados na região da bacia do rio Amarelo na China (Di, et.al., 2019).

Estudos identificaram que a falta de gestão e planejamento dos recursos hídricos têm efeitos potencialmente negativos e consequências que podem acarretar trade-offs entre alguns serviços ecossistêmicos. No entanto, demonstrou-se que as bacias hidrográficas devem possuir programas de conservação e esforço integrado para melhorar a eficiência global da água (Liu, et.al., 2019, Zhong, et.al, 2018).

A partir de análise realizada para verificar a deterioração de Zengchang, China, demonstrou-se que avaliação emergética possui viabilidade técnica e validade científica, características necessárias para avaliar os danos ecológicos, fornecendo parâmetros para desenvolvimento de ações que visam a proteção e avaliam ações tomadas para mensurar a revitalização do rio (Zhang, et.al., 2017).

*Etapa 2 – Ações de Revitalização*

Uma pesquisa realizada em uma bacia hidrográfica na Itália apresentou indicadores emergéticos utilizados para potencializar e avaliar processos produtivos de forma eficaz, viabilizando a medição das contribuições de ações humanas realizadas durante o processo de revitalização de corpos de água, refletindo diretamente valores relacionados (tabelas, 1 e 2) a atividades humanas durante e após a revitalização (Pulselli, et.al, 2011).
A avaliação emergética é um método de análise técnica e econômica que pode medir a contribuição da natureza para o desenvolvimento econômico e social humano. A taxa de contribuição dos recursos hídricos calculados pelo método emergético é benéfico para avaliar os reais benefícios e contribuições da revitalização de recursos hídricos como constatado por (Lv, et.al.,2018).
O estudo de Sun et.al., (2019) identificou que os resultados verificados em locais onde foi realizada a avaliação emergética demonstram a medição de aspectos complexos (qualidade da água, investimento e custos em obras) em zonas úmidas que após a restauração apresentam dependência de recursos renováveis e melhoria na sustentabilidade.
As ações de revitalização inseridas na construção de indicadores emergéticos contribuem para determinação de parâmetros de controle que avaliam eficiências operacionais (purificação, distribuição de água), investimentos e o impacto que a infraestrutura construída (redes de esgoto e água pluvial) possui no meio ambiente ecológico revitalizado, conforme foi avaliado por (Wu, et.al., 2019).

*Etapa 3 – Coleta de Dados*

O levantamento de dados realizado por (Sun, et.al., 2019) e apresentado nas tabelas 01 e 02 demonstram que após as ações de revitalização apresentam a avaliação da sustentabilidade, de acordo com análises realizadas para verificar qualidade da água, coleta de esgotos e aspectos relacionados a investimentos que diretamente impactam na despoluição do corpo de água.
A avaliação emergética realizada para descrever a revitalização de um curso de água ao longo de uma bacia hidrográfica, refletiu a capacidade e eficiência, em termos de quantidade de recursos necessário por unidade de produto desses locais para revitalizar o rio ou córrego a partir da incorporação nas equações emergéticas da energia e dos materiais necessários a ação de despoluição (Pulselli, et.al., 2011).
A emergia pode ser usada para entender o quanto a infraestrutura influencia os indicadores operacionais e gerenciais, como o estado e a contribuição do ambiente circundante. Mais especificamente, a análise do investimento em emergia avalia aspectos como a significância dos benefícios eco ambientais fluviais e esclarece a composição dos benefícios eco ambientais fluviais de ambos os locais, dentro (qualidade da água) e fora do rio (margens do rio, vizinhança) (Wu, et.al., 2019).
A avaliação emergética têm sido utilizadas em estudos que realizam a quantificação de fluxos naturais e antropogênicos (material e energia) suportando a presença e/ou a produção de água para apreciar o papel da energia e da matéria necessários ao fornecimento de água em diferentes condições contextuais (Pulselli, et.al.,2011).
Os resultados dos cálculos a partir dos dados coletados sobre a qualidade da água demonstram que o valor do índice de sustentabilidade para zonas úmidas após a restauração vai muito além do valor apresentado antes da restauração, demonstrando o impacto das ações de revitalização e avaliando a partir de indicadores emergéticos o
conjunto de atividades realizadas (Sun, et. al., 2019).

*Etapa 4 – Conjunto de Indicadores*

O conjunto de indicadores emergéticos adotado em ações de revitalização em corpos de água estabeleceu o limite do ecossistema urbano com base sobre divisões administrativas e disponibilidade de informações, coletando dados para vários fluxos internos e externos do sistema através de investigações de campo (dados secundários) compilados pelo poder concedente e prestadores de serviços de saneamento, desenhando o diagrama de sistemas de energia e calculando a emergia (Su, et.al., 2013).

Os diferentes indicadores emergéticos (tabela 01 e 02) apresentados por (Pulselli, et.al.,2011) podem ser utilizados em estudos semelhantes como valores de referência, pois refletem as características dos sistemas naturais que avaliam a emergia da água em rio ou córregos. Os valores apresentados podem mudar de acordo com as infraestruturas construídas pelo homem, como redes de esgoto, redes de água pluviais, desvios que estão localizados ao longo do curso de água.

O estudo de (Su, et.al., 2019) demonstrou que os indicadores emergéticos permitem o monitoramento de longo prazo, avaliando os efeitos de projetos de restauração de zonas úmidas no futuro, a partir da determinação da viabilidade técnica e da validade científica necessárias para aliviar danos ecológicos e fornecer dados para a avaliação da saúde do rio.

A aplicação de um método de avaliação científica baseado em emergia contorna as principais barreiras que impedem a gestão sustentável das bacias hidrográficas, avaliando a sustentabilidade e indicando um padrão sustentável com aumento de cargas ambientais a longo prazo (Zhong, et.al., 2018).

A avaliação emergética identificou que os serviços ecossistêmicos em regiões de bacias hidrográficas que sofreram impactos negativos apresentam melhorias após ações humanas para revitalização. Os indicadores emergéticos adotados permitem a medição dos serviços ecossistêmicos nessas intervenções e demonstram aumento nos índices de emergia calculados (Song, et.al., 2021).

A proposta de utilização dos indicadores emergéticos adotada neste estudo foi desenvolvida a partir de estudos que utilizaram a teoria da emergia em estudos similares, conforme demonstrado na tabela 02, a partir do desenvolvimento de uma avaliação emergética no processo de despoluição de rios urbanos.

Tabela 02 – Indicadores emergéticos

| Indicadores | Emergias (fórmulas) | Unidade | Conceito | Referência |
|---|---|---|---|---|
| Transformidade (Tr): | Tr = Y / Ep | sej/J | Avalia a qualidade do fluxo de energia e permite fazer comparações com outras formas de energia e com outros sistemas. | Chen, et.al (2009); Lv, et.al (2018) |
| Renovabilidade Emergética ou Sustentabilidade (%R): | %R = R / Y | % | Renovabilidade é a razão entre a emergia dos recursos renováveis e a emergia total usada. Sistemas com maiores índices de sustentabilidade têm maiores chances de sobrevivência | Sun, et.al. (2019) |
| Razão de Rendimento Emergético (EYR) | EYR=Y/F | - | Indica o rendimento emergético do sistema, ou, o ganho em energia primária disponibilizada para a economia que consumirá o produto. Se o seu valor for próximo de um, o sistema consome tanta energia quanto a que disponibiliza para a economia | Song, et.al. (2021) |
| Taxa de Carga Ambiental (ELR) | ELR = (N+F) / R | - | É um índice importante porque avalia a pressão que o sistema produtivo causa no ecossistema. Índices altos de ELR indicam maior pressão do sistema econômico no ecossistema | Lv, et.al (2020) |
| Razão de Investimento de Emergia (EIR) | EIR=F / (N+R) | - | Esta razão indica o grau de economia ao usar os investimentos da economia em comparação com uma alternativa. Para ser econômico, o processo deve ter um valor de Razão de Investimento de Emergia similar ao valor médio das atividades da região. | Pan, et.al. (2020) |
| Índice de Sustentabilidade Emergética (SI) | SI = EYR / ELR | - | Indica se o sistema contribui com energia em detrimento ao equilíbrio ambiental ou se os impactos podem ser absorvidos pelo sistema. | Li, et.al. (2021) |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Razão de Intercâmbio de Emergia (EER) | EER = Y / [produção unitária x preço x (emergia / dólar)] | - | Os produtos provenientes do trabalho da natureza tendem a ter um valor maior de EER que os produtos provenientes do trabalho humano. | Zhan, et.al, (2018) |

Os indicadores emergéticos propostos (tabela 02) contribuem para compreender a revitalização completa de uma bacia, fornecendo informações técnicas, sociais e políticas valiosas para tomadores de decisão, de modo que políticas mais adequadas para a sustentabilidade e gestão da bacia hidrográfica possam ser levantadas considerando as realidades locais.

## 5 – Conclusão

Os resultados apurados e a proposta de aplicação da avaliação emergética demonstram o potencial existente para aplicação da metodologia de indicadores emergéticos para análise dos serviços ecossistêmicos em processos de despoluição de rios urbanos, pois a metodologia possui aplicações similares, Zhong, et.al., (2018); Pulselli, et.al., (2011), muito embora estes trabalhos não tenham tratado diretamente de despoluição de rios urbanos.

A adoção de uma avaliação emergética de sustentabilidade para demonstração dos serviços ecossistêmicos em processos de despoluição de rios urbanos, não foi identificado por esse estudo.

Os resultados deste estudo contribuem com a teoria ao apresentar a utilização de emergia em processos de despoluição de rios urbanos, além de demonstrar a aplicabilidade da avaliação emergética em processos de revitalização a partir de estudos complexos que envolvem engenharia, questões climáticas e a sociedade.

No que tange as contribuições para a sociedade propriamente dita, o estudo apresentado demonstra que a melhoria dos investimentos para revitalização de rios urbanos auxilia na disposição correta dos investimentos, sustentabilidade e na melhoria da relação entre o meio ambiente e os seres humanos.

A contribuição deste estudo para as práticas organizacionais que promovem a revitalização de rios urbanos está relacionada com a aplicação simultânea das seguintes cinco ações:

i) Analisar todo o fluxo de energia inserido em um processo de despoluição, desde a qualidade da água (antes e depois da despoluição) até os custos para ampliação das redes de esgotos;

ii) Avaliar a renovabilidade do sistema e a sustentabilidade do processo a partir das emergias calculadas;

iii) Identificar economicamente se o processo está consumindo ou disponibilizando energia para o meio ambiente, ou seja, identificar a pressão econômica sobre o ecossistema;

iv) Avaliar se os investimentos realizados são sustentáveis,

v) Indicar se o sistema contribui com equilíbrio ambiental ou se os impactos podem ser absorvidos pelo sistema;

A aferição destes resultados permite a identificação de lacunas de pesquisa a serem preenchidas por estudos posteriores, tais como:

i) Introdução da teoria emergética no processo de despoluição e revitalização de rios urbanos.

ii) Identificação dos indicadores emergéticos em processos de despoluição de rios urbanos.

iii) Aplicação dos indicadores emergéticos em serviços ecossistêmicos associados a despoluição de rios urbanos.

Tais lacunas de pesquisa, podem contribuir com a melhoria dos processos de revitalização de rios urbanos, aumentando o controle dos custos envolvidos e complementando o processo pela associação dos indicadores de serviços ecossistêmicos para o desenvolvimento sustentável do processo.

A proposta de aplicação dos indicadores emergéticos em processos de despoluição de rios e córregos urbanos observa os aspectos estudados na revisão sistemática e sua efetiva utilização em um sistema hidrológico urbano.

Novos trabalhos devem aplicar o modelo em um local onde houve o processo de despoluição para validação da teoria e desenvolvimento da avaliação emergética como ferramenta de sustentabilidade em restauração de rios urbanos.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

BULLER, L.S. (2016) - DIAGNÓSTICO EMERGÉTICO DAS MUDANÇAS DE USO DA TERRA E PROPOSTA DE RECUPERAÇÃO DE UMA ÁREA DO CERRADO. Tese de Doutorado apresentado na UNICAMP, CAMPINAS, SP, BRASIL.

CHEN, D., CHEN, J., LUO, Z., & LV, Z. (2009). Emergy Evaluation of the Natural Value of Water Resources in Chinese Rivers. Environmental Management, 44(2), 288–297. Disponível em: doi:10.1007/s00267-009-9320. Acesso em 30 out 2021.

CORDOBA, C. SANTOS JUNIOR, C.F., BOFF, M.I.C. & BOFF, P. (2020) – Estudo bibliométrico sobre sustentabilidade: Metodologia de análise Emergética em pesquisa brasileira 2000 a 2018. Cadernos de Agroecologia. Anais do XI Congresso Brasileiro de Agroecologia, São Cristóvão – SE. v15. n.02.

COSTANZA, R., d'ARGE, R., GROOT, R., FARBER, S., GRASSO, M., HANNON, B., LIMBURG, K., NAEEM, S., O'NEILL, R.V., PARUELO, J., RASKIN, R.G., SUTTON, P. & BELT, M.V.D. (1997) - The value of the world's ecosystems services and natural capital. Nature, v. 387, p. 253-260

DI, D., WU, Z., GUO, X., LV, C., & WANG, H. (2019). Value Stream Analysis and Emergy Evaluation of the Water Resource Eco-Economic System in the Yellow River Basin. Water, 11(4), 710. Disponível em: doi:10.3390/w11040710. Acesso em 30 out 2021.

HE, S., ZHU, D., CHEN, Y., LIU, X., CHEN, Y. & WANG, X. (2020) - Application and problems of emergy evaluation: A systemic review based on bibliometric and content analysis methods. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106304. Acesso em: 10/02/2020.

LI, H., LV, C., LING, M., GU, C., LI, Y., WU, Z., & YAN, D. (2021). Emergy Analysis and Ecological Spillover as Tools to Quantify Ecological Compensation in Xuchang City, Qingyi River Basin, China. Water, 13(4), 414. Disponível em: doi:10.3390/w13040414. Acesso em 30 out 2021.

LV, H., GUAN, X., & MENG, Y. (2020). Study on economic value of urban land resources based on emergy and econometric theories. Environment, Development and Sustainability. Disponível em: doi:10.1007/s10668-019-00573-4. Acesso em 10 nov 2021.

LV, C., LING, M., GUO, X., DI, D. & ZHOU, H. (2018). Evaluation Method of Water Resource Contribution Rate in Terms of Emergy. In Proceedings of the International Workshop on Environmental Management, Science and Engineering (IWEMSE 2018), pages 34-41. ISBN: 978-989-758-344-5.

MOHER, D., A. LIBERATI, J. TETZLAFF, and D. G. ALTMAN. (2009). Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. PLoS Medicine 6 (7): e1000097. Disponível em: https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097. Acesso em 24 aug 2022.

MONTECCHI, M., PLANGGER K. & WEST, D.C. (2021) - Supply chain transparency: A bibliometric review and research agenda. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108152. Acesso em 20 aug 2022.

OLIVEIRA NETO, G. C., PINTO, F.R.; AMORIM, M., GIANNETTI, B. F. & ALMEIDA, C. M. V. B. 2018 - A framework of actions for strong sustainability. JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, v. 196, p. 1629-1643.

ODUM, H.T. 1996 - Environmental Accounting, EMERGY and Decision Making. John Wiley, New York, 370 pp. 1996.

ODUM, H.T. & ODUM, E.C. 2001 Prosperous way down: Principles and policies. 1ª edição, Brasil, Editora Vozes. 2012. 405 p.

ONU. Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Traduzido pelo Centro de Informação das Nações Unidas para o Brasil. UNIC Rio, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-09/agenda2030-pt-br.pdf> Acesso em: 26, julho de 2024.

PAN, Y., ZHANG, B., WU, Y., & TIAN, Y. (2020). Sustainability assessment of urban ecological-economic systems based on emergy analysis: A case study in Simao, China. Disponível em https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107157. Acesso em 30 out 2021.

PULSELLI, F. M., PATRIZI, N., & FOCARDI, S. (2011). Calculation of the unit emergy value of water in an Italian watershed. Ecological Modelling, 222(16), 2929–2938. Disponível em: doi:10.1016/j.ecolmodel.2011.04.021. Acesso em 30 out 2021.

SANTAGATAA, R., ZUCAROB, A., VIGLIA, A, S. RIPAD, M., TIANE, X. & ULGIATI.S. (2020) - Assessing the sustainability of urban eco-systems through Emergy-based circular economy indicators. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105859. Acesso em 09 jan 2021.

SONG, F., SU, F., ZHU, D., LI, L., LI, H., & SUN, D. (2019). Evaluation and driving factors of sustainable development of the wetland ecosystem in Northeast China:
An emergy approach. Journal of Cleaner Production, 119236. Disponível em doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119236. Acesso em 30 out 2021.

SONG, F., SU, F., MI, C., & SUN, D. (2020). Analysis of driving forces on wetland ecosystem services value change: A case in Northeast China. Science of The Total Environment. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141778. Acesso em 30 out 2021.

SOUZA FILHO, B.A.B & STRUCHINER, C.J. Uma proposta teórico-metodológica para elaboração de modelos teóricos. Cad Saúde Colet, 2021;29(1):86-97. https://doi.org/10.1590/1414-462X20212901018. Acesso em 23 abr 2022.

SU, M., FATH, B. D., YANG, Z., CHEN, B., & LIU, G. (2013). Ecosystem health pattern analysis of urban clusters based on emergy synthesis: Results and implication for management. Energy Policy, 59, 600–613. Disponível em: doi:10.1016/j.enpol.2013.04.015. Acesso em 30 out 2021.

SUN, J., YUAN, X., LIU, H., & LIU, G. (2021). Emergy and eco-exergy evaluation of wetland reconstruction based on ecological engineering approaches in the three Gorges Reservoir, China. Disponível em ttps://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107278. Acesso em 30 out 2021.

SUN, J., YUAN, X., LIU, G., & TIAN, K. (2019). Emergy and eco-exergy evaluation of wetland restoration based on the construction of a wetland landscape in the northwest Yunnan Plateau, China. Journal of Environmental Management, 252, 109499. Disponível em: doi:10.1016/j.jenvman.2019.109499. Acesso em 30 out 2021.

TAN, P.Y., ZHANG, J., MASOUDI, M., ALEMU, J.B., EDWARDS, P.J., REGAMEY, A.G., RICHARDS, D.R., SAUNDERS, J., SONG, X.P. & WONG, L.W. (2020) - A conceptual framework to untangle the concept of urban ecosystem services. Landscape and Urban Planning. V. 200, 103837. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103837. Acesso em 25 aug 2022.

TORRICO, J., & JANSSENS, M. (2012). Environmental impact assessment of land use systems using emergy in Teresópolis-Brazil. Journal of Natural Resources and Development, 2, 06–14. Disponível em: https://doi.org/10.5027/jnrd.v2i0.02. Acesso em 30 out 2021.

WANG, C., LI, X., YU, H., & WANG, Y. (2019). Tracing the spatial variation and value change of ecosystem services in Yellow River Delta, China. Ecological Indicators, 96, 270–277. Disponível em doi:10.1016/j.ecolind.2018.09.015. Acesso em 30 out 2021.

WANG, K. & XU, M. (2017) - The evaluation of the Coordination Degree Between
Resource-Environment and Economic Development in the Yellow River Delta-a Case Study on Dongying City. IOP Conference Series: Earth and Environmetal Science 64. Recuperado em 30 de setembro de 2017 de http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/64/1/012044.

WU, Z., DI, D., WANG, H., WU, M., & HE, C. (2019). Análise e avaliação emergética dos benefícios ecoambientais dos rios. Ecological Indicators, 106, 105472. Disponível em doi: 10.1016 / j. ecolind.2019.105472. Acesso em 30 out 2021.

WU, Z., GUO, X., GUAN, X., LV, C., WANG, H. & DI, D. (2018) - Study on the quantification method of water pollution ecological compensation standard based on emergy theory. Disponível em https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.09.052. Acesso em 22 mai 2021.

WU, M., GE, W., WU, Z., GUO, X., DI, D., & HUANG, S. (2020) - Evaluation of the Benefits of Urban Water Resource Utilization Based on the Catastrophe and Emergy Methods. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11269-020-02530-7. Acesso em 10/02/2021.

ZENG, R., ZHAO, Y., & YANG, Z. (2010). Emergy-based Health Assessment of Baiyangdian Watershed Ecosystem in Temporal and Spatial Scales. Procedia Environmental Sciences, 2, 359–371. Disponível em: doi:10.1016/j.proenv.2010.10.041. Acesso em 30 out 2021.

ZHANG, F., CHU, X., LIU, W., & ZHANG, Y. (2018). Ecosystem services assessment based on emergy accounting in Chongming Island, Eastern China. Ecological Indicators. Disponível em: doi:10.1016/j.ecolind.2018.04.015. Acesso em 30 out 2021.
ZHANG, J., FU, Y.-C., SHI, W.L., & GUO, W.X. (2017). A method for estimating watershed restoration feasibility under different treatment levels. Water Science and Technology: Water Supply, 17(5), 1232–1240. Disponível em doi:10.2166/ws.2017.017. Acesso em 30 out 2021.

ZHONG, S., GENG, Y., KONG, H., LIU, B., TIAN, X., CHEN, W., ULGIATI, S.
(2018). Emergy-based sustainability evaluation of Erhai Lake Basin in China. Journal of Cleaner Production, 178, 142–153. Disponível em doi:10.1016/j.jclepro.2018.01.019. Acesso em 30 out 2021.