

Universidade Estadual Paulista

Erik Geraldo da Silva Souza

ELABORAÇÃO DE UM ÍNDICE PARA
AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO
AMBIENTAL DA INDÚSTRIA
SUCROENERGÉTICA

Jaboticabal

2022

ERIK GERALDO DA SILVA SOUZA

ELABORAÇÃO DE UM ÍNDICE PARA
AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO
AMBIENTAL DA INDÚSTRIA
SUCROENERGÉTICA

Dissertação apresentada à Universidade Estadual
Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como
exigência parcial para obtenção do grau de
Mestre em Administração.

Área de Concentração: Gestão de Organizações
Agroindustriais

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Giroto Rebelato

Jaboticabal

2022

S729e Souza, Erik Geraldo da Silva
Elaboração de um índice para avaliação de desempenho ambiental da indústria sucroenergética / Erik Geraldo da Silva Souza. -- Jaboticabal, 2022
82 p. : il., tabs., fotos, mapas + software

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Marcelo Giroto Rebelato

1. Avaliação de desempenho Ambiental. 2. ReCiPe 2016. 3. Índice ambiental. 4. Resíduos. 5. Setor sucroenergético. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ELABORAÇÃO DE UM ÍNDICE PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AMBIENTAL DA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA

AUTOR: ÉRIK GERALDO DA SILVA SOUZA

ORIENTADOR: MARCELO GIROTTI REBELATO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ADMINISTRAÇÃO, área: Gestão de Organizações Agroindustriais pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MARCELO GIROTTI REBELATO (Participação Virtual)
Departamento de Economia Administração e Educação / FCAV UNESP Jaboticabal

Prof. Dr. RONDINELI PAVEZZI BARBERO (Participação Virtual)
Departamento de Produção Animal / Universidade Federal Rural - Rio de Janeiro/RJ

Prof. Dr. ADRIANO DOS REIS LUCENTE (Participação Virtual)
Departamento de Economia Administração e Educação / FCAV UNESP Jaboticabal

Jaboticabal, 12 de janeiro de 2022

Aos meus pais, que sempre serão merecedores de toda minha dedicação e empenho, à minha namorada e companheira, por partilhar essa trajetória comigo e ao meu professor e orientador por todo o apoio e paciência dada a esse projeto.

AGRADECIMENTOS

Muitos esforços foram dados a este trabalho, muitos dias de angústia foram necessários e muitos foram os pensamentos em desistir. Mas graças a Deus, segui em frente e fui capaz de chegar ao fim desta estrada, e por isso sou grato.

Algumas pessoas foram extremamente importantes para que isto acontecesse e sou imensamente agradecido por elas. Meus pais amados, Izailda e Maurílio, obrigado por tudo, amo muito vocês. Minha namorada, Mariana, a pessoa que mais me apoiou, me corrigiu e me empurrou rumo a glória desta pesquisa, obrigado, meu amor. Meu orientador, Prof. Dr. Marcelo Giroto Rebelato, pelos conselhos, acompanhamento e direcionamento, pelas revisões e indicações de melhorias, pela paciência e persistência ao aluno que não se comunicava e demorava para dar as caras, meu muito obrigado.

Às pessoas citadas, eu não tenho como dizer o quão honrado me sinto por terminar esta pesquisa e ofereço minha conquista e sucesso a vocês.

Não posso me esquecer dos meus colegas de curso por toda a trajetória que seguimos juntos, mesmo em boa parte do tempo distantes fisicamente, mas sempre trocando experiências e compartilhando informações, foi um enorme prazer dividir com todos vocês esse curso tão especial e desejado por mim.

Obrigado a todos, que Deus sempre ilumine nossos caminhos.

“A natureza criou o tapete sem fim que recobre a superfície da terra. Dentro da pelagem desse tapete vivem todos os animais, respeitadamente nenhum o estraga, nenhum o róí, exceto o homem”.

(Monteiro Lobato)

ELABORAÇÃO DE UM ÍNDICE PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AMBIENTAL DA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA

RESUMO - A poluição gerada pelas indústrias sucroenergéticas de produção de Etanol, Açúcar e Bioenergia (EAB) a partir da cana-de-açúcar, provocam pensamentos e reflexões referentes às ações antrópicas ao meio ambiente, fazendo com que essa temática seja um problema ambiental. A partir disso, torna-se necessário mensurar o desempenho ambiental dessas instituições, tendo a Avaliação de Desempenho Ambiental (ADA) como ferramenta para tal finalidade. Para tanto, essa pesquisa de natureza aplicada, caráter exploratório e finalidade metodológica, descreve o processo industrial de EAB, define os resíduos e efluentes gerados com destinação ao solo e apresenta um índice de ADA. De tal modo, foram realizados cálculos para determinar os potenciais de impactos ambientais para cada substância em cada categoria, esses potenciais foram normalizados e ponderados, bem como foi determinado a dispersão geográfica, através da estrutura metodológica do ReCiPe 2016. Além do mais, foi definido o fator de fragilidade ambiental da bacia hidrográfica por meio da geotecnologia onde são dispostos os resíduos e efluentes. Após a estruturação, desenvolvimento da fórmula e cálculo do índice, o mesmo foi testado em dados de uma empresa. Os resultados obtidos são referentes a cinco resíduos e efluentes – vinhaça $3,28E-04$ kg.yr/km².p; torta de filtro $3,66E-04$ kg.yr/km².p; cinzas $4,61E-00$ kg.yr/km².p; águas residuais $6,30E-03$ kg.yr/km².p; lodo de esgoto $1,12E-02$ kg.yr/km².p. Em conclusão, a utilização da metodologia proposta permite a avaliação do impacto ambiental quanto utilização desses resíduos e efluentes para a fertilização e fertirrigação no solo agrícola de cultivo da cana-de-açúcar, a relação com a fragilidade da bacia hidrográfica e o acompanhamento do desempenho ambiental da unidade industrial. Sendo uma metodologia para ADA do setor de produção de EAB, sua utilização tem capacidade de fazer com que as empresas deste setor consigam enxergar sua gestão ambiental, aumentar seus esforços quanto a preservação do meio ambiente e aperfeiçoar sua imagem perante a seus clientes e sociedade.

Palavras-chaves: Setor Sucroenergético; Avaliação de Desempenho Ambiental; Índice de Desempenho Ambiental; Resíduos e Efluentes; ReCiPe 2016.

ELABORATION AN INDEX TO ENVIRONMENTAL PERFORMANCE ASSESSMENT OF SUGARCANE INDUSTRY

ABSTRACT - The pollution generated by the sugar-energy industries that produce Ethanol, Sugar and Bioenergy (EAB) from sugarcane, provoke thoughts and reflections regarding anthropic actions to the environment, making this issue an environmental problem. From this, it becomes necessary to measure the environmental performance of these institutions, having the Environmental Performance Assessment (ADA) as a tool for this purpose. Therefore, this research of applied nature, exploratory character, and methodological purpose, describes the EAB industrial process, defines the residues and effluents generated with destination to the soil and presents an ADA index. In this way, calculations were carried out to determine the potential environmental impacts for each substance in each category, these potentials were normalized and weighted, as well as the geographic dispersion was determined, through the methodological structure of ReCiPe 2016. In addition, it was defined the environmental fragility factor of the hydrographic basin through geotechnology where waste and effluents are disposed. After structuring, developing the formula and calculating the index, it was tested on data from a company. The results obtained refer to five residues and effluents – vinasse $3.28E-04$ kg.yr/km².p; filter cake $3.66E-04$ kg.yr/km².p; ash $4.61E-00$ kg.yr/km².p; wastewater $6.30E-03$ kg.yr/km².p; sewage sludge $1.12E-02$ kg.yr/km².p. In conclusion, the use of the proposed methodology allows the evaluation of the environmental impact regarding the use of these residues and effluents for fertilization and fertigation in the agricultural soil of sugarcane cultivation, the relationship with the fragility of the watershed and the monitoring of the performance environment of the industrial unit. As a methodology for ADA in the EAB production sector, its use has the capacity to make companies in this sector able to see their environmental management, increase their efforts regarding the preservation of the environment and improve their image before their customers and society.

Keywords: Sugarcane Industry; Environmental Performance Assessment; Environmental Performance Index; Residues and Effluents; ReCiPe 2016.

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADA	Avaliação de Desempenho Ambiental
ANA	Agência Nacional de Águas
ATR	Açúcares Totais Recuperáveis
BHBM	Bacia Hidrográfica do Baixo Mogi
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
EAB	Etanol, Açúcar e Bioenergia
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FAO	Food and Agriculture Organization
FIESP	Federação e Centro das Indústrias do Estado de São Paulo
GA	Gestão Ambiental
GRI	Global Reporting Initiative
IAC	Instituto Agronômico de Campinas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICA	Índice de Condição Ambiental
IDA	Índice de Desempenho Ambiental
IDG	Índice de Desempenho Gerencial
IDO	Índice de Desempenho Operacional
IEAB	Índice de Avaliação de Desempenho Ambiental da Indústria de EAB
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISO	International Organization for Standardization
KPI	Keys Performance Indicators
MapBiomas	Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil
NBR	Norma Técnica Brasileira
PCTS	Pagamento de Cana por Teor de Sacarose

PDCA	Plan Do Check Act
PI	Plano de Informação
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
P+L	Produção Mais Limpa
RIVM	Rijksinstituut Voor Volksgezondheid En Milieu
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
SGA	Sistema de Gerenciamento Ambiental
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SRC	Sistema de Referência de Coordenadas
UTM	Universal Transversa de Mercator
VHP	Very High Polarization

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma simples dos processos industriais de EAB	32
Figura 2 - Guincho Hilo e mesas alimentadoras	33
Figura 3 - Moenda de seis ternos em operação	34
Figura 4 – Decantador de caldo	36
Figura 5 - Evaporadores	37
Figura 6 - Cozedores	38
Figura 7 - Cristalizadores	38
Figura 8 - Centrifugas de açúcar.....	38
Figura 9 - Secadores rotativos	39
Figura 10 - Fermentação e destilaria	40
Figura 11 - Tanques de etanol	41
Figura 12 – Caldeira de geração de vapor	42
Figura 13 - Definição dos limites de estudo	45
Figura 14 - Fluxograma de cálculos	47
Figura 15 – Dispersão categórica de impacto ambiental.....	52
Figura 16 - Plano de Informação de Declividade	54
Figura 17 - Plano de Informação de Pluviometria.....	54
Figura 18 - Plano de Informação de Pedologia	55
Figura 19 - Plano de Informação de Uso e Ocupação do Solo.....	55
Figura 20 - Algoritmo Calculadora Raster	58
Figura 21 - Mapa de fragilidade ambiental a erosão da BHBM.....	59

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resíduos destinados a aplicação no solo gerados pela indústria de EAB.....	48
Quadro 2 - Categorias "midpoint" do ReCiPe 2016.....	49
Quadro 3 - Resíduos destinados ao solo de EAB e suas características.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de normalização do ReCiPe 2016	51
Tabela 2 - Pesos de Ponderação do ReCiPe 2016	51
Tabela 3 - Classificação de declividade por nível de fragilidade	56
Tabela 4 - Classificação pedológica por nível de fragilidade.....	56
Tabela 5 - Classificação pluviométrica por nível de fragilidade	57
Tabela 6 - Classificação de uso e ocupação do solo por nível de fragilidade	57
Tabela 7 - Área por nível de fragilidade ambiental da BHBM	59
Tabela 8 - Quantidade e área de aplicação dos resíduos gerados	60
Tabela 9 - Potenciais de impacto da indústria EAB com destinação ao solo.....	64
Tabela 10 - Potenciais de impacto normalizados	65
Tabela 11 - Valor relativo do potencial de impacto ponderado	66
Tabela 12 - Resultados para a empresa de EAB teste	67

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. PROBLEMA DE PESQUISA	19
1.2. OBJETIVO GERAL	20
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
1.4. JUSTIFICATIVA	21
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AMBIENTAL.....	23
2.2. INDICADORES DE DESEMPENHO AMBIENTAL.....	27
3. PROCESSOS INDUSTRIAIS EAB.....	31
3.1. RECEPÇÃO, PREPARO E MOAGEM DA CANA.....	32
3.2. TRATAMENTO DE CALDO	35
3.3. FABRICAÇÃO DE AÇÚCAR.....	37
3.4. FABRICAÇÃO DE ETANOL.....	40
3.5. GERAÇÃO DE VAPOR E ENERGIA	42
4. MÉTODO DE PESQUISA	44
4.1. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	45
4.1.1. ÍNDICE DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AMBIENTAL.....	46
4.1.2. ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	46
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
5.1. AQUISIÇÃO DOS DADOS E TESTE DO ÍNDICE.....	61
5.1.1. Cenário de aquisição dos dados.....	61
5.2. CÁLCULO DOS POTENCIAIS DE IMPACTO AMBIENTAL NO SOLO	62
5.3. NORMALIZAÇÃO DOS POTENCIAIS DE IMPACTO AMBIENTAL	65
5.4. PONDERAÇÃO DOS POTENCIAIS DE IMPACTO AMBIENTAL	66
5.5. CÁLCULO DO IEAB DE RESÍDUOS DESTINADOS AO SOLO	66
6. CONCLUSÕES	70

6.1. LIMITAÇÕES DA PESQUISA E SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	71
6.2. IMPLICAÇÕES GERENCIAIS.....	72
REFERÊNCIAS	73

1. INTRODUÇÃO

Os rejeitos e resíduos, a exploração dos recursos naturais e a atenuação do meio ambiente, os quais são gerados pelas indústrias, provocam pensamentos e reflexões referentes às ações antrópicas ao meio ambiente (SOUZA; REBELATO, 2021). Atualmente as temáticas ambientais estão sendo cada vez mais estudadas, discutidas e aparentemente as discussões se prolongarão, visto que muitas pessoas se preocupam com as ações que geram impactos negativos ao meio ambiente e, desse modo, pressionam as empresas a tomarem medidas cabíveis, além de ter se tornado um tema de grande relevância para estudiosos, entidades privadas e órgãos públicos. A preocupação está relacionada ao problema que causa ao meio ambiente e à saúde humana, o crescente desenvolvimento e avanço tecnológico dos processos industriais, por emitir cada vez mais substâncias tóxicas e por aumentar a utilização de recursos naturais (SONG et al., 2016; ZUO et al., 2017).

Considerada como um avanço para a preservação ambiental, em 2010, foi decretada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305, que objetiva a criação do princípio da responsabilidade compartilhada entre as empresas, o governo e a população, o sistema da logística reversa e a exigência de gerenciamento dos resíduos através do poder público. Sendo assim, as empresas serão obrigadas a criar e adotar tecnologias limpas a fim de diminuir ao máximo os impactos ambientais originados por seus processos (JABBOUR et al., 2013).

A chamada economia verde é essencial para garantir a sustentabilidade a longo prazo (GARCÍA-ALVAREZ; MORENO, 2018). A preocupação econômica de empresas produtoras de vários segmentos incentiva a adoção de técnicas de melhoria voltada para a preservação ambiental. Estudos tecnoeconômicos viabilizam a economia se os processos produtivos oferecerem benefícios em determinado intervalo de tempo, desse modo, o benefício econômico não reflete a sustentabilidade a longo prazo (NIMMANTERDWONG et al., 2017).

Neste contexto, se torna necessário mensurar o desempenho ambiental das instituições. As intensas pressões sofridas pelas operações empresariais fazem com que tais organizações busquem por uma ferramenta eficaz para gerenciar os problemas ambientais. O desenvolvimento de uma metodologia composta com base em indicadores relevantes pode assegurar o cumprimento de objetivos ambientais. Conforme Yang et al. (2011), as estruturas de indicadores existentes fornecem poucas informações sobre como as empresas podem atualizar seus índices com maior precisão para medir o desempenho ambiental. Carvalho et

al., (2014), argumentam ser necessário continuar as pesquisas sobre esse tema, desenvolvendo índices que possam indicar melhorias em ações ambientais. Sendo assim possível facilitar a Avaliação de Desempenho Ambiental (ADA), em todas as empresas produtoras por meio de benchmarking (BALEŽENTIS et al., 2016).

A utilização de um Sistema de Gerenciamento Ambiental (SGA), é capaz de controlar sistematicamente todas as operações fabris que provocam impactos ambientais (YANG et al., 2011). Os atuais SGA, como a ISO 14001:2015, e a ISO 14004:2018, são os mais importantes para implantação. Além desses, a ISO 14031:2015, tem maior criticidade para a Gestão Ambiental (GA), essa norma trata da ADA como uma ferramenta que cede informações válidas para apurar a performance ambiental de uma determinada organização e indicar se o resultado é satisfatório (ABNT, 2015). A ADA é de extrema importância para monitorar as melhorias que os SGA trazem para os processos produtivos.

Portanto, a ADA é um método que procura auxiliar os processos de tomadas de decisões a respeito do desempenho ambiental de determinada organização por meio da aquisição e análise de informações, avaliação de dados em conformidade com os padrões de desempenho ambiental, exposição, verificação e aprimoramento desse processo (ABNT, 2015).

Desse modo, para que as empresas consigam atingir os objetivos produtivos em conjunto com os cuidados sobre impactos ao meio ambiente, se torna importante a utilização das alternativas de mensuração do desempenho ambiental, sendo necessário a criação de itens de controle para monitorá-lo e para expor os efeitos negativos ao ambiente causados pelos processos industriais (REBELATO; MADALENO; RODRIGUES, 2016).

Tendo em vista que as maiores empresas poluidoras, as do setor de mineração, químico, siderurgia, petróleo, papel e celulose, transportes e geração de energia, estão aderindo a planos para atenuação do risco de degradação ambiental (EPELBAUM, 2013), as indústrias do setor sucroenergético, responsáveis pela produção Etanol, Açúcar e Bioenergia (EAB), também tem alto poder de poluição do meio ambiente. Essas indústrias geram resíduos, efluentes, emissões gasosas e subprodutos com impacto ambiental negativo. Por isso, as empresas do setor de produção de EAB procuram implantar estratégias ambientais de maneira integrada e preventiva aos processos, produtos e serviços, com o objetivo de aperfeiçoar a eficiência produtiva e reduzir a poluição (CASTILLO-VERGARA et al., 2015).

A ciência auxilia outras temáticas que envolvem a concepção de estruturas metodológicas para avaliação ambiental aplicadas a indústria de EAB. Levando em conta que as indústrias brasileiras deste ramo dominam o mercado mundial em seu processamento,

sendo de grande importância para a economia global, este estudo compreende uma aplicação metodológica elaborada para a avaliação de desempenho ambiental de quaisquer companhias ou pesquisas que têm a intenção ou necessidade de implantar ou analisar atividades relacionadas a avaliação do desempenho ambiental e gestão ambiental.

1.1. Problema de pesquisa

A poluição gerada pelas indústrias sucroenergéticas de produção de EAB, é um grande problema ambiental. O descarte de resíduos e efluentes, como vinhaça, torta de filtro, cinzas e fuligens das caldeiras, lodo de esgoto e águas residuais, são direcionados para a aplicação em solos de produção agrícola da cana-de-açúcar. Outros resíduos, tais como, sucata, embalagens, lixo orgânico, entre outros, são encaminhados às empresas de reciclagem e aterros sanitários autorizados pelo governo. Já os gases emitidos por esse tipo de indústria, são regularmente avaliados por órgão público, como por exemplo, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), os quais devem estar de acordo com os créditos de emissão de carbono. Embora, aparentemente todos os resíduos e efluentes sejam descartados da melhor forma possível na atualidade, ainda não é o suficiente.

Para o correto gerenciamento desses resíduos, segundo Ríos e Picazo-Tadeo (2021), os pesquisadores devem fornecer informações sólidas como base para a criação de políticas ambientais e os legisladores dessas políticas têm o desafio de promover a gestão de resíduos. Com isso, as pesquisas em torno desse problema devem objetivar a criação de métodos, ferramentas, e índices para a avaliação de desempenho ambiental e o seu correto gerenciamento. Portanto, torna-se necessário a busca por tal propósito, de forma a promover a qualidade do meio ambiente e diminuição da poluição ambiental.

Em qualquer ramo ou área de negócio em que uma empresa esteja inserida, é necessário desenvolver formas de produção ambientalmente eficientes. No agronegócio, especialmente referindo-se ao setor sucroenergético, não é diferente. As organizações que atuam nesse ramo devem procurar atender a requisitos para garantir um bom desempenho ambiental. Benites e Polo (2013) afirmam que a sobrevivência e a competitividade das empresas dependem das questões ambientais, devendo ser entendida como uma estratégia corporativa, que por meio de melhores resultados ambientais e sociais, gera valor econômico para a empresa.

De tal modo, quando o tema discutido é sobre ADA, Todorov e Marinova (2011), garantem que é preciso medir e quantificar o grau ou qualidade do processo. Indicadores ou

índices podem ser utilizados para tal quantificação e mensuração (MOLDAN et al., 2012; SINGH et al., 2012). A operacionalização mediante indicadores ou índices, fornece resultados quantitativos, permitindo assim, que seja definido, as metas e os objetivos a serem atingidos (FEIL; SCHREIBER, 2017b). A partir disso, a tomada de decisão das organizações se torna mais viável, sendo indispensável mensurar e quantificar a sustentabilidade, uma vez que, os indicadores são excelentes bases, possibilitando a identificação de possíveis falhas no processo, e permitindo assim, que os gestores possam se antecipar e tomar precauções a eventos futuros.

Várias pesquisas foram realizadas com a finalidade de se obter índices de ADA de inúmeros tipos de processos industriais. Porém, existe uma grande dificuldade para a produção desse tipo de mecanismo, uma vez que cada estudo traz uma abordagem distinta, utilização de métodos diferentes, avaliam resíduos específicos, trabalham com dimensões múltiplas. Além do mais, há diversos indicadores para ADA, criados por vários estudiosos e instituições, mas poucos são os associados aos impactos causados pela indústria de EAB, em relação a geração e descarte de seus resíduos e efluentes, aos seus efeitos ao meio ambiente e a boa condição de vida da sociedade.

Quando se trata principalmente de resíduos e efluentes, os quais são depositados diretamente no solo, o impacto causado está diretamente relacionado à fragilidade ambiental da bacia hidrográfica onde esses materiais são descartados. Nesse sentido, existem menos índices que abordam esse problema, o impacto ao meio ambiente causado por resíduos gerados pela indústria de EAB com destinação ao solo de produção agrícola da cana-de-açúcar. Sendo menos ainda, os que levam em consideração a condição da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica onde pertence tal terreno de cultivo.

Posto isso, essa dissertação objetiva responder a seguinte pergunta: como desenvolver um índice para avaliar o desempenho ambiental das indústrias sucroenergéticas de produção de EAB, baseando-se na destinação dos resíduos e efluentes gerados, nos impactos ao meio ambiente, à bacia hidrográfica de destinação e ao ser humano?

1.2. Objetivo geral

O objetivo geral desta dissertação é a elaboração de um índice eficiente para a avaliação de desempenho ambiental aplicado em empresas de produção de EAB, com fundamento nas informações relacionadas aos impactos ao meio ambiente, a bacia hidrográfica e ao ser humano.

1.3. Objetivos específicos

- a) caracterizar o processo produtivo da indústria de EAB;
- b) identificar os resíduos e efluentes com destinação ao solo provindos dos processos produtivos da indústria de EAB;
- c) pesquisar as ferramentas metodológicas disponíveis para avaliação de desempenho ambiental;
- f) definir a estrutura para avaliação de desempenho ambiental a ser desenvolvida;
- g) testar o índice de avaliação de desempenho ambiental em uma indústria de EAB;
- h) apresentar os resultados do teste;

1.4. Justificativa

Os impactos ambientais causados pelas indústrias em geral, trazem grandes preocupações para estudiosos, a sociedade acadêmica vem cada vez mais buscando respostas para resolver problemas ambientais. Grande parte da literatura sobre ADA aborda o tema indicadores de desempenho ambiental, sendo ferramenta fundamental para o planejamento estratégico de quaisquer empresas produtoras, assim como a seleção de indicadores adequados para considerar uma estratégia ambiental confiável (LIM; BISWAS, 2015; LIM; BISWAS, 2017; MANDAL; DAS; HOQUE, 2018; HOQUE et al., 2019).

Durante os processos produtivos para a fabricação de EAB são gerados diversos resíduos e subprodutos, os quais tem impactos ao meio ambiente e efeitos nocivos à saúde do ser humano (THOMAZ, 2017). As atividades das indústrias de EAB, necessitam de alta demanda de mão-de-obra, matéria prima e infraestrutura, sendo indispensável um planejamento que beneficie a todos, ou seja, que objetiva a sustentabilidade em todos os estágios de suas atividades (OLIVEIRA et al., 2012). Para tanto, são necessários mecanismos para avaliação ambiental destas indústrias, em âmbito social, econômico e ambiental.

Eykelbosh et al. (2014), afirmam que as indústrias EAB produzem vários tipos de resíduos pirolisáveis, sendo eles o bagaço, a palha da cana e a torta de filtro. A palha e o bagaço, são usados para cogeração de energia em forma de calor e eletricidade, sendo o bagaço um subproduto muito valioso. A torta de filtro passa a se tornar fertilizante para a cultura da cana-de-açúcar, o que também é o caso de um outro resíduo, a vinhaça. Em um estudo feito por Marinho et al. (2014), os autores sugerem que o uso da vinhaça na fertirrigação deve ser avaliada e outras opções para substituir seu uso como fertilizante devem

ser estudadas, pois atingem o ambiente aquático e podem trazer graves efeitos negativos na fauna, sendo que esta aplicação causa contaminação do solo e das bacias hidrográficas. Embora não tragam um possível destino para tal subproduto, outros autores como Rebelato, Madaleno e Rodrigues (2014) e Silalertruksa, Pongpat e Gheewala (2017), contestam que a fertirrigação é autossustentável, sendo uma inovação ambiental associada a irrigação das áreas cultivadas reduzindo severamente os impactos ambientais.

Assim, esse estudo contribui para a comunidade científica buscando, através do índice desenvolvido, apontar uma estrutura metodológica que possibilite a compreensão e desenvolvimento acadêmico a respeito da ADA. Dessa forma, outras pesquisas poderão se nortear a propósitos de gestão de resíduos das indústrias de EAB por meio de índices de avaliação ambiental e promoverem resultados verdadeiros e satisfatórios.

Em âmbito mercadológico, é correto afirmar que a seguinte pesquisa proporciona conhecimento e uma ferramenta capaz de promover o gerenciamento do desempenho ambiental da indústria de EAB. O índice aponta o nível de eficiência da empresa no quesito descarte de resíduos, sendo importante a compreensão e aptidão da organização quanto ao meio ambiente. Dessa maneira, o índice desenvolvido por essa pesquisa traz a possibilidade de ADA para o setor de produção de EAB, proporcionando a qualquer empresa do ramo gerenciar seu desempenho ambiental e apontar, a partir dos resultados obtidos pelo índice, planos de ação para melhorar sua performance ambiental frente aos seus “stakeholders” e a comunidade.

Para a sociedade, o índice de ADA produzido neste trabalho oferece uma visão clara e analítica de desempenho ambiental das organizações produtoras de EAB. Isso permite a validade e transparência das informações publicadas e expostas nos relatórios de performance e resultados das indústrias de EAB. Logo, a comunidade se apodera de uma ferramenta útil que traz consigo entendimento da gestão de resíduos e poluição que as usinas de cana-de-açúcar produzem e dispõem para o meio ambiente.

O índice de ADA desenvolvido nesse trabalho tem muito a agregar em todas as esferas, acadêmica, mercadológica e social. Sendo um objeto indispensável para avaliação ambiental das indústrias de EAB, justificando-se assim, seu desenvolvimento por sua importância e contribuição para a preservação do meio ambiente.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção são apresentados conceitos de avaliação de desempenho ambiental (ADA), índices de desempenho ambiental e o conceito sobre o assunto de acordo com a norma NBR ISO 14.031:2015. Assim como o apontamento de métodos e ferramentas utilizadas para pesquisas sobre ADA e índices já desenvolvidos por outros estudos.

De tal modo, é tratado a relevância da avaliação de práticas que alteram ou agridem o meio ambiente, sendo necessário medir sua abrangência e intensidade, bem como determinar índices de desempenho ambientais, de modo a serem mostrados nessa seção.

2.1. Avaliação de desempenho ambiental

Cada vez mais comuns e considerados uns dos mais relevantes da atualidade, temas ambientais são utilizados como ferramenta de estudo nas áreas acadêmicas e organizacionais. Nesse contexto, a ADA tornou-se objeto de grande valia em pesquisas, sendo assunto em evidência, o qual abordam-se processos produtivos que possam gerar resíduos em pequena ou grande escala. A competitividade obriga as organizações a desenvolverem estratégias para aprimorar seu desempenho quanto empresa, atingindo seus objetivos e assegurando uma vantagem competitiva. Para tanto, as companhias aderiram tomadas de decisões nos processos de gerenciamento, analisando e aperfeiçoando sua performance e integrando processos de planejamento (HAYES; UPTON, 1998; ENSSLIN et al., 2008).

As companhias de todos os seguimentos, especialmente as de âmbito industrial de EAB, possuem grandes preocupações e uma delas, em termos de preservação ambiental, é o conhecimento de como averiguar e acompanhar a eficiência de métodos adotados para tal finalidade. Sendo assim, é necessário utilizar de uma ADA que, para Cunha, Ritter e Ferreira (2020), o significado do sistema de avaliação de desempenho ambiental de determinada atividade é durante um determinado período de tempo, acompanhar o atingimento de metas determinadas através de índices de controle e averiguar constantemente a diferença entre os objetivos idealizados e os resultados reais alcançados através das ações tomadas. Reis e Sellitto (2015), afirmam que a avaliação ambiental, quando se refere ao desempenho ambiental de uma empresa, compõe-se da apuração de índices, obtenção e análise de dados, confrontação com as teorias de desempenho e divulgação dos resultados. A norma ISO 14031:2015, indica a ADA como um processo que tem como propósito simplificar as decisões de gerenciamento do desempenho ambiental de uma companhia através da escolha

de índices, coleta e análise de informações, avaliação de dados com base nos parâmetros de desempenho ambiental, publicação, verificação e melhoria desse processo (ABNT, 2015). Assim, o objetivo da ADA é avaliar o desempenho de uma companhia de maneira constante.

A ADA pode ser definida como um processo de gerenciamento interno que utiliza de “Keys Performance Indicators” (KPI) para a obtenção de informações confiáveis e de fácil verificação, de forma continuada, para a determinação do desempenho ambiental organizacional, verificando o seu alinhamento às regras estabelecidas pela gerência da empresa (SILVA, 2011). Dessa maneira, a ADA constitui-se como um método de mensuração da eficiência dos procedimentos de conservação do meio ambiente, do uso de recursos naturais e das medidas de controle de degradação ambiental utilizadas por uma companhia.

A temática sobre ADA, quanto a definição conceitual de avaliação de desempenho segundo Bortoluzzi et al. (2013), passa por uma evolução, uma vez que não há um consenso de como agir sistematicamente. Devendo-se considerar uma visão holística da companhia (KAPLAN; NORTON, 2001), isto é, a ADA precisa incluir todos os níveis e processos organizacionais de forma a não ser um esquema isolado (YEO, 2003). A ADA, segundo Bortoluzzi, Ensslin e Ensslin (2011), é um método de gerenciamento que propaga conhecimento organizando, identificando, aferindo e integrando as condições de um tema de forma a gerir as metas propostas.

A Avaliação de Desempenho Ambiental equivale a um procedimento de coleta e análise de dados contínuos que dão aporte as empresas para darem prioridade aos aspectos ambientais e seus impactos relevantes, colaborando com fases de implantação, avaliação, planejamento e análise crítica do processo de gerenciamento. O uso da ADA, aumenta a viabilidade de melhorias quanto ao desempenho ambiental (SEIFFERT, 2010). A ADA é conhecida também como uma ferramenta de administração interna que tende a melhorar o gerenciamento com dados fidedignos e verificáveis (ABNT, 2015).

As empresas estão buscando entender e avaliar seu desempenho ambiental por meio da ADA, devido ao avanço tecnológico, a competitividade, às cobranças por proteções ambientais e a procura por processos produtivos mais limpos (NADRUZ et al., 2017). Os métodos de avaliação ambiental e a utilização de ferramentas de gestão ambiental são necessários para as organizações e companhias determinarem a eficiência e eficácia de sua dedicação aos aspectos de conservação ambiental e para demonstrar seu desempenho quanto a preservação do meio ambiente (GONZÁLEZ-ARTEAGA; CALLE; MARTÍNEZ, 2018). Para isso, uma maneira utilizada pelas organizações para melhorem seu desempenho ambiental é a adoção de um Sistema de Gestão Ambiental (SGA). Este sistema de gestão estabelece a

necessidade de meios de mensuração de desempenho ambiental por meio de indicadores qualitativos e quantitativos (RAMALHO; SELITTO, 2013). Os índices qualitativos buscam definir as áreas críticas e vulneráveis ao ato previsto, tendo como exemplo regiões de degradação ambiental, mudanças nas formas de ocupações agrícolas, redução de zonas originárias, atividades extrativas e mineração. Já a forma quantitativa, verifica valores e indicadores dos elementos pertencentes e de formação do ambiente, permitindo entender a grandeza dos impactos sobre as causas anteriormente qualificadas e até mesmo prever quais os valores das modificações correspondentes a instalação do projeto.

De acordo com Soledade et al. (2007), uma das formas de se efetivar a ADA, é o estudo da série ISO 14000, pois apesar haver um elevado nível de subjetividade e de não estabelecer quesitos plenos para o desempenho ambiental e para o domínio dos impactos das operações realizadas pelas companhias, compõem uma valiosa diretriz no desenvolvimento de suas políticas e metas ambientais.

Os parâmetros de desempenho são essenciais para um bom gerenciamento por possibilitarem a exposição das expectativas de performance empresarial entre os funcionários e a entrega de “feedback” aos mesmos, o reconhecimento das áreas mais e menos eficientes e tomada de decisões transparentes e claras. De tal modo, a ADA possibilita o direcionamento de esforços e atribuição de valor naquilo que a empresa julga importante.

A avaliação de desempenho ambiental tem de se fundamentar no Ciclo “Plan Do Check Act” (PDCA). Na primeira etapa, a de planejamento, índices são escolhidos de forma que demonstrem de maneira clara, informações complexas sobre o envolvimento da gestão. A orientação da norma indica que os índices sejam em número satisfatório para explicar todos as questões importantes. Na etapa do fazer, há a possibilidade de reexaminar os aspectos ambientais e distinguir os relevantes e prover a eficácia dos serviços da companhia. Resumidamente, a utilização das informações pode ser realizada em quatro fases: (1) coleta de informações, (2) análise e conversão das informações, (3) avaliação dos dados, (4) descrição e comunicação.

A averiguação constante da ADA é fundamental para não tornar o sistema de Avaliação de Desempenho da Gestão obsoleto, bem como manter atualizados os pontos a serem controlados. Essa é a fase de análise crítica, onde objetiva-se avaliar melhorias no uso de índices de ADA (ABNT, 2015).

De acordo com a NBR ISO 14031:2015, são quatro os princípios que sustentam a Avaliação de Desempenho Ambiental, o princípio da integralidade, da relevância, da consistência e precisão e da transparência. Essa norma explana especificamente as diretrizes

para a ADA por meio da adoção de índices. A norma propõe duas categorias gerais de índices, o Índice de Condição Ambiental (ICA) e o Índice de Desempenho Ambiental (IDA) (MOURA, 2014). Os ICA apresentam dados que auxiliam a companhia a melhor entender o impacto ambiental da ótica potencial e de aferição, desse modo auxiliando no planejamento de suas ações (SILVA, 2011). Já os IDA concedem dados sobre o desempenho ambiental de uma companhia, podendo ser categorizados em Índice de Desempenho Gerencial (IDG) e Índice de Desempenho Operacional (IDO) (SILVA, 2011). Os IDG revelam as informações referentes a todos os esforços de gerenciamento da empresa, que age positivamente em seu desempenho ambiental, enquanto os IDO evidenciam dados relacionados às operações produtivas da organização com reflexos em seu desempenho ambiental, como o consumo de energia elétrica, água e matéria-prima. (MOURA, 2014).

Assim sendo, as metodologias para ADA baseiam-se na avaliação de índices de desempenho ambiental, através de análises estatísticas de dados. Os índices de controle são características de mensuração, pelos quais se objetiva adquirir dados relevantes que concedam a possibilidade de definição e classificação de alterações no estado ambiental (HEINK; KOWARIK, 2010), o qual as companhias têm tido maior empenho para elaborar indicadores descomplicados para serem implantados com maior facilidade, de forma a não prejudicar a qualidade da ótica das informações existentes no ambiente (FREITAS et al., 2013). De tal forma, em uma expressiva quantidade de ecossistemas, os índices devem ser empregados, sendo eles de averiguação simples e clara e que permitam a participação dos indivíduos locais, carecem de retratarem modelos de sustentabilidade, serem suscetíveis às alterações do processo e permitir a interface com outros índices (MARQUES; SKORUPA; FERRAZ, 2003).

A determinação dos índices de desempenho ambiental pode ser de acordo com as metas estabelecidas pelas empresas, uma vez que elas têm a liberdade de escolher os indicadores adequados de acordo com sua área de atuação, assim como determina a norma ISO 14031:2015. Portanto, a escolha dos KPIs mais adequados é de grande relevância e não menos importante, deve-se manter a atenção quanto aos parâmetros utilizados para a seleção e maneiras de aquisição de cada índice, e indicado de forma que a ADA satisfaça os objetivos ambientais almejados pela organização (FAGUNDES et al., 2016).

O uso de indicadores adequados possibilita o baixo custo de acompanhamento, a capacidade de verificação em escala temporal e espacial de processos, o reconhecimento simples de motivos eventuais de degradação ambiental e o aumento da capacidade da sustentabilidade do ecossistema (SARADÓN; FLORES, 2009). Portanto, torna-se necessário

que as organizações selecionem e monitorem constantemente seus índices de desempenho ambiental para obter sucesso e maior competitividade no mercado. Cunha, Ritter e Ferreira (2020), argumentam que a seleção de KPI e índices de controle para medir a sustentabilidade ou qualidade ambiental de processos poluidores forma uma estratégia eficiente de gestão ambiental para qualquer tipo de organização e entidades governamentais. Esses autores ainda complementam que o uso de índices de fato auxilia o processo de gestão ambiental, porém a escolha destes indicadores e de seus critérios deve ser cautelosa, para não obter resultados subjetivos, ou seja, exige critérios viáveis e verificáveis que expliquem a sua escolha. Os índices e indicadores devem retratar o significado dos dados, atendendo a relevância e precisão dos resultados, sendo preciso desenvolver práticas de gerenciamento, planejamento e gestão ambiental para o acompanhamento da qualidade do meio ambiente e manutenção da sustentabilidade (CUNHA; RITTER; FERREIRA, 2020).

A ADA permite ainda focos de cunho mais preventivos, como por exemplo a Produção Mais Limpa (P+L), a qual apresenta uma perspectiva de maior complexibilidade, pois tem como objetivo reduzir os impactos ambientais através da análise das causas da geração de resíduos e a modificação dos processos produtores destes (SENAI.RS, 2003). A caracterização de P+L abrange um outro ponto de vista para o gerenciamento ambiental, com o propósito de produzir com menor impacto possível.

Consequentemente, a ADA proporciona uma contínua avaliação do desempenho da estrutura ambiental. O processo de avaliação acontece de maneira respectiva e cíclica, por meio da escolha de índices, da aquisição e análise de informações, da comparação dos dados com os padrões de desempenho ambiental preestabelecidos, da divulgação dos resultados, da revisão recorrente e melhoria contínua dos processos.

No contexto de ADA, deve-se dar atenção aos anseios, expectativas e preocupações de todos os “stakeholders”, em consequência dos processos desenvolvidos pela companhia, isto é, é necessário criar um processo abrangente e colaborativo para avaliação de impactos ambientais e preservação do meio ambiente.

2.2. Indicadores de desempenho ambiental

Analisando os conceitos de IDA, é correto afirmar que resumidamente, eles proporcionam a explanação das informações ambientais de quaisquer processos produtivos geradores de resíduos. Ou seja, por meio desta ferramenta de gerenciamento é possível calcular alterações em um procedimento, adquirindo forma estratégica na avaliação do

desempenho ambiental e fornecendo dados relevantes na análise organizacional (SILVA; SELIG; MORALES, 2012).

De acordo com Carvalho e Barcellos (2010, p. 1), índices de desempenho ambiental conseguem aferir a degradação ambiental, ainda que “pelo atual estado da arte, a sustentabilidade é imensurável. [...] não existe uma definição universalmente aceita sobre sustentabilidade, que pudesse ser aplicada a todas as situações e que não seja excessivamente genérica e pouco precisa”.

Isto significa que o IDA é um instrumento utilizado para tomada de decisões e ações, atuando como um sinalizador para mostrar a real situação da sustentabilidade de um sistema avaliado (CUNHA; RITTER; FERREIRA, 2020), partindo do intuito de que é necessário transformar em algarismos e estatísticas o desempenho ambiental de uma empresa conforme sua atuação com a sustentabilidade. Desse modo, esses KPI são instrumentos úteis e utilizados por diversas companhias para medir e planejar seu método de gerenciamento, tal qual para informar seu desempenho aos seus “stakeholders”.

O levantamento e determinação dos Índices de Desempenho Ambiental é um enorme desafio, pois não existe conformidade sobre as grandezas a serem levantadas para a aferição do impacto ao meio ambiente causado pela companhia, uma vez que os IDA são de grande importância para as organizações. Os IDA servem como referências para avaliar se o fim dado aos resíduos está condizente com os parâmetros e normas determinadas por meio de um plano com metas e objetivos, ou para o acompanhamento da sociedade sobre o desempenho ambiental da organização (SEIFFERT, 2010; GALLOPÍN, 1997; SENAI.RS, 2003).

Sendo assim, é necessário escolher de maneira adequada os IDA. Um bom método para isso é a identificação e esquematização das práticas poluidoras principais, definindo as entradas, processos e saídas que podem gerar emissões gasosas, efluentes, consumo de matéria-prima, de água e de energia, entre outros fatores. As Diretrizes da “Global Reporting Initiative” (GRI) sugerem que, em relação aos indicadores ambientais, a companhia deve expor seus desempenhos relativos a consumo de insumos e os aspectos de emissões atmosféricas derivadas de seus processos produtivos (AMSTERDAM, 2006).

Masera, Astier e López-Ridaura (2000), apontam, no entanto, alguns aspectos negativos do uso deste tipo de procedimento para avaliação ambiental. Os autores argumentam a respeito da limitação espacial dos indicadores. De acordo com eles, alguns indicadores foram configurados para utilização em escala nacional, tendo sua implantação local e regional prejudicada, ao passo que em outras pesquisas foram sugeridos indicadores para eventos específicos, delimitando sua reprodução. Os autores ainda alegam que os índices

separados não avaliam a sustentabilidade do local tendo apenas a função de identificar a área potencialmente poluidora. As informações vindas por meio dos índices devem ser coerentes e economicamente acessíveis. Conforme Sperling e Sperling (2013), índices de desempenho são bastante empregados como sendo uma “medida quantitativa da eficiência e da eficácia de uma entidade gestora”.

Em seu trabalho, Langford (2007), aborda alguns diferentes tipos de IDA, para diferentes cenários de aplicação de gestão ambiental e impactos ambientais – emissões gasosas que contribuem para o aquecimento global; uso de águas e descartes fluviais; geração de resíduos e descarte; uso de energia; materiais, uso de recursos e reciclagem. De modo detalhado, o autor explica cada um dos itens citados anteriormente, o que vale a leitura e reflexão de seu texto na íntegra.

Para eleger os indicadores ideais para uma organização, a Cartilha de Indicadores Ambientais da Federação e Centro Das Indústrias Do Estado De São Paulo (FIESP), sugere que certas condições devem amparar a seleção dos índices de desempenho a serem empregados por uma determinada companhia. (FIESP, 2003). Através delas, as metas da avaliação, a amplitude de suas operações, produtos e serviços, o estado do meio ambiente regional e local, as perspectivas ambientais significantes, os requisitos legais e outras questões sociais e o volume de recursos financeiros, humanos e materiais para a elaboração do dispositivo de averiguação.

Os IDA devem ser tecnicamente coerentes, isto é, de possível conferência, replicável e igualável. As informações apresentadas pelos IDA precisam retratar a situação do problema ao todo. Um IDA adequado deve mostrar alterações de ações em curto espaço de tempo, indicar alertas com antecedência de mudanças porvir, as quais esse índice deve aferir. O IDA tem de ser suficiente de comparação a um objetivo, permitindo que seus clientes consigam analisar e compreender seu sentido. Ele deve também ser de custo mínimo, no que se diz respeito a aquisição e uso de informações, confrontado com seu valor (TIBOR; FELDMAN, 1996).

Conforme Lavorato (2009), durante a escolha dos KPIs, é necessário se atentar a alguns critérios dos quais eles devem ter, tendo de garantir: fundamentação científica; fonte de informações; modelo adequado; compreensão e aceitabilidade; temas prioritários; facilidade de acompanhamento; sensibilidade adequada; enfoque preventivo; periodicidade adequada; trabalhar com padrões; grupo de índices com papel de aplicação.

Outro elemento importante é a função dos índices, eles são moldados para averiguar o nível de sucesso da aplicação de uma estratégia com relação ao atingimento da meta

estipulada. No entanto, é primordial que seja avaliado a verdade de que um índice complicado ou de averiguação confusa não é apropriado, uma vez que a despesa para sua aquisição é suficiente de fazer com que sua prática seja inviável (CAMPOS; MELO; MEURER, 2007).

Tibor e Feldman (1996), declaram que algumas observações têm de ser realizadas durante a seleção dos IDA adequados. Os autores argumentam que os IDA escolhidos sejam básicos, claros e em número mínimo para prover dados fundamentais. Os IDA precisam ser quantitativos para as operações e processo físicos, devem possibilitar medições financeiras com o intuito de estimar a economia e o resultado das iniciativas ambientais sobre a companhia. Em suma, é necessário utilizar de IDA qualitativos no caso de os quantitativos serem inviáveis.

Segundo a norma ISO 14031:2015, quanto a seleção dos ICA, os índices devem proporcionar dados do estado ambiente local, tendo em vista que este pode ser alterado ao longo do tempo ou com acontecimentos distintos. Dessa forma, os ICA permitem dados convenientes acerca da relação entre a situação do ambiente e as operações, produtos e serviços de uma companhia.

Para escolha dos IDG, a ISO 14031:2015, atesta que é necessário que os mesmos gerem dados sobre o desempenho da organização em gerir temas como treinamento, destino e uso eficiente de recursos, gerenciamento de custos com o meio ambiente, requisitos legais, aquisições, concepção de produtos, fundamentação e ações corretivas, submetido ao modo de avaliação que se deseja fazer.

Para triagem dos IDO, a norma diz ser necessário e oportuno que eles garantam à gestão de dados pertinentes ao desempenho ambiental das operações realizadas pela companhia.

Lavorato (2009), argumenta que um KPI bom é mais que uma estatística. Ele simboliza uma concepção lógica-conceitual que possibilita a correta compreensão da realidade e fornece recursos para as tomadas de decisões, sejam elas na esfera das políticas públicas ou julgamentos gerenciais das divisões corporativas ou organizacionais.

3. PROCESSOS INDUSTRIAIS EAB

O setor de produção de Etanol, Açúcar e Bioenergia (EAB) brasileiro está em constante crescimento e seus propósitos apresentam padrões de alta aplicação de conhecimento científico. Com isso, um dos objetivos desse campo do agronegócio (e de qualquer setor econômico) é a constante procura por fatores que assegurem maior competitividade no mercado (SANTOS; FREITAS, 2016). O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do planeta, com produção total de 752.895.389 toneladas na safra 2019/2020, correspondente a 37% da produção mundial (FAO, 2020). O processamento é feito pelas usinas e destilarias, que conseguem atingir os menores custos na produção de EAB, sendo um segmento bastante competitivo no mercado internacional (GONÇALVES, 2005).

Tendo isso em vista, o fluxo gerencial de processamento da cana-de-açúcar acontece em etapas: cultivo e entrega; processamento industrial; gestão de insumos, resíduos, subprodutos e “mix” de produção; armazenamento e comercialização. Sendo ainda necessário, de acordo com Alcarde (2015), que essas fases sejam executadas utilizando ferramentas administrativas eficientes.

Desse modo, antes da indústria existem algumas fases – preparo do solo, plantio, tratamentos culturais, colheita e transporte – que são partes fundamentais da cadeia produtiva e de processamento da cana-de-açúcar. O processo industrial inicia-se com a chegada da matéria-prima, a cana-de-açúcar, que pode ter três destinos: etanol e ou açúcar e ou bioenergia. As primeiras etapas são similares, tendo em determinado momento operações diferentes para a produção de cada um dos dois produtos.

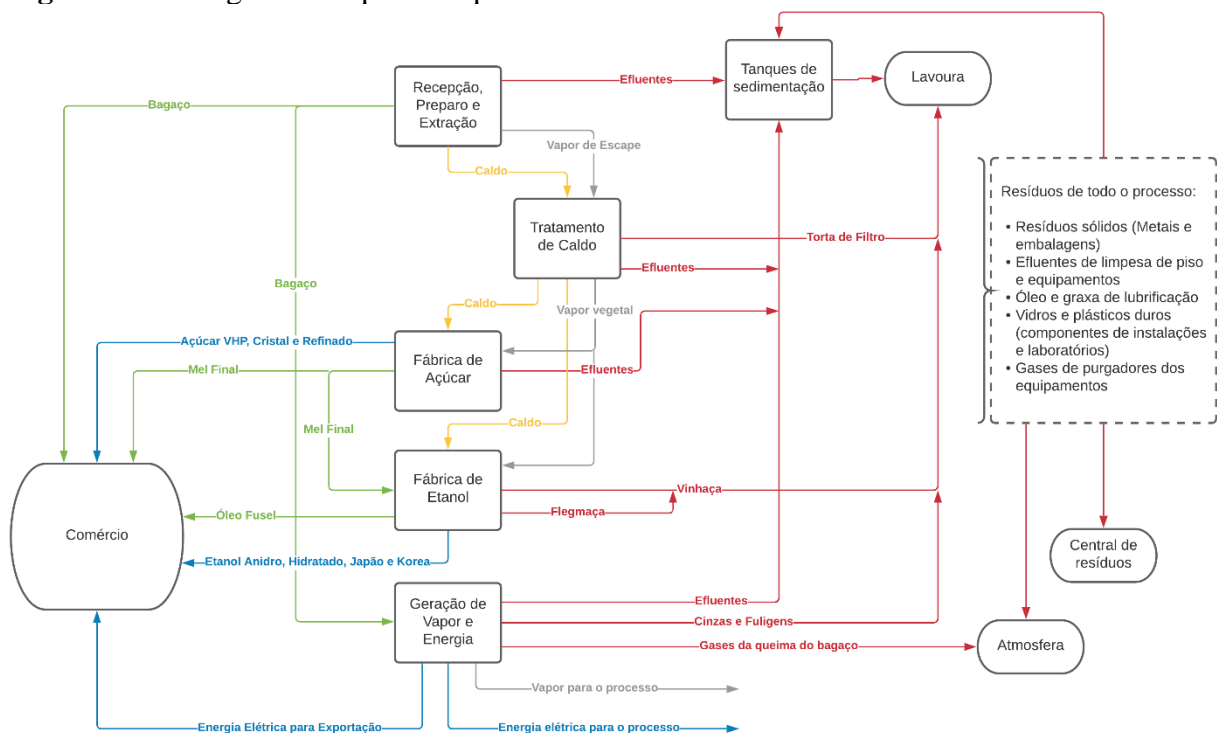
Após a entrada da cana-de-açúcar no parque industrial, a primeira operação é a pesagem, que de acordo com Ribeiro, Blumer e Horii (1999), é realizada por meio de balanças nas entradas das usinas, sendo feita em todos os caminhões que entram na planta industrial. As principais finalidades da pesagem, segundo os mesmos autores, é o controle de rendimento industrial, da produtividade agrícola e do pagamento dos fornecedores. Vale ressaltar que o caminhão é pesado duas vezes, na entrada (carregado) e na saída (descarregado), para retirar-se a tara, ou seja, a diferença entre as duas medidas, obtendo-se assim o valor verdadeiro do peso da carga.

Após a pesagem, alguns caminhões são direcionados à sonda, onde são retiradas amostras da cana-de-açúcar para a realização do pagamento da cana por teor de sacarose e pureza (PCTS). Essas amostras são analisadas com o objetivo de se conseguir dados para avaliação da qualidade da matéria prima e pagamento dos fornecedores, e essas informações

serão comparadas com os resultados de análises pós-processo, possibilitando o gerenciamento produtivo e de eficiência industrial. Esse procedimento é feito com o uso de um amostrador por sonda horizontal ou vertical. O tubo é inserido na carga de cana a fim de retirar uma amostra da qual será analisada em laboratório, resultando nos açúcares totais recuperáveis (ATR), isto é, a quantidade de açúcares presentes na cana (MELO; MARION, 1992).

Feito isso, o processo industrial de produção de EAB, de fato se inicia, onde é o ponto principal dessa dissertação. Para melhor entendimento, a figura 1 ilustra esse sistema produtivo de maneira simplificada.

Figura 1 - Fluxograma simples dos processos industriais de EAB



Fonte: Autor (2021)

3.1. Recepção, preparo e moagem da cana

A cana é descarregada diretamente nas mesas alimentadoras ou armazenadas em pátios nas próprias carretas ou em barracões depois da pesagem e amostragem, o pátio de armazenagem, onde ficam as carretas carregadas em espera para descarregamento, também é conhecido como bate e volta (MACHADO, 2012; REIN, 2016). Para o descarregamento nas mesas alimentadoras, o tombamento das carretas é realizado com o uso do guincho tombador lateral ou guincho hilo (figura 2). Também para esse processo é comum o uso de ponte rolante equipada com uma garra hidráulica.

Figura 2 - Guincho Hilo e mesas alimentadoras



Fonte: Autor (2021)

Além de recepcionar a cana para o processo produtivo, a mesa alimentadora tem como objetivo manter de forma constante e equilibrada a alimentação para o processo de preparação da cana para a moagem e extração do caldo, seu funcionamento é contínuo fornecendo cana na esteira metálica transportadora, possibilitando assim, uma fluidez com maior controle possível (LOPES, 2011).

Junto com a cana recebida há impurezas, as quais para a remoção de parte dessas, tem-se o processo de lavagem de cana. Esse processo consiste em lavar a cana diretamente nas mesas por meio do uso de jatos de água, que carregam a sujeira vinda da roça eliminando-a pelas ranhuras da rampa das mesas. Após a lavagem da cana, essa água é direcionada para o “cush-cush” de palha, uma peneira de esteira, com o intuito de conter as sujidades que acompanham a cana-de-açúcar (OMENA et al., 2004). As usinas que processam apenas cana picada vinda da colheita mecanizada, não fazem mais o uso da lavagem de cana, pois segundo o site Novacana (2020), a cana não deve ser lavada, uma vez que haveria altas perdas de sacarose, e por esse motivo muitas indústrias de EAB passaram a usar um sistema de limpeza a seco, o qual consiste em jatos de ar sobre a cana, que removem as maiores impurezas.

A cana-de-açúcar tem seu processamento iniciado no preparo de cana. Uma vez, a cana recebida e lavada, ela passa pela esteira metálica ou esteirão de cana. Essa esteira confeccionada de correntes e taliscas metálicas tem como finalidade transportar a cana pelo preparo até a alimentação inicial da moenda. O conjunto de preparo de cana pode ter diversas configurações, com picadores, desfibradores, tambores de nivelamento, espalhadores e niveladores. O “setup” básico consiste em pelo menos um picador e um desfibrador. O picador é um rotor com facas que objetiva abrir a cana e tornar a carga mais regular e constante. Já o desfibrador que também é um rotor, tem a diferença de ser constituído de martelos com o objetivo de abrir as células da cana para assim se obter uma melhor extração do caldo. O índice de abertura das células da cana é chamado “OpenCell”, que de acordo com Manella (2012), tem a finalidade de mensurar a eficiência do preparo de cana, sendo ideal estar entre 85 e 90%. É importante ressaltar que o conjunto de preparo (picadores e desfibradores) pode ser horizontal (mais comum) e vertical dependendo da usina.

O processo de extração do caldo, que pode ser realizado através de moagem ou por difusão, é um procedimento físico de separação do caldo da fibra ou bagaço da cana-de-açúcar. A extração feita pelo processo de moagem (Figura 3) passa por um conjunto de moendas determinadas como ternos de moendas.

Figura 3 - Moenda de seis ternos em operação



Fonte: Autor (2021)

As usinas são equipadas de 4 a 6 ternos. Em tese, quanto mais ternos melhor a eficiência, porém, mais do que seis ternos de moendas não apresentam melhora, sendo assim, desnecessário. Esses equipamentos são arranjos de três rolos principais (superior, entrada e saída) e um rolo secundário (pré-rolo ou rolo de pressão). Os rolos principais são dispostos em formato de triângulo isósceles com o objetivo de esmagar a cana preparada por meio da pressão entre eles. O quarto rolo, tem a finalidade de direcionar o coxão de cana para o conjunto principal (MURAD, 2015).

Conforme Payne (1982), durante fluxo da cana entre os ternos de moenda é adicionado água para melhorar a extração, esse processo é chamado de embebição pressurizada. Essa embebição é adicionada apenas no último terno para “lavar” o bagaço e retirar o máximo de açúcares. Para o restante dos ternos, a embebição é composta, ou seja, água mais caldo, em um circuito contra a corrente do bagaço. Dessa forma, o primeiro terno extrai o caldo primário (puro) e os demais ternos o caldo secundário ou caldo misto. Uma vez que, esses dois tipos de caldo podem ser tratados separadamente, direcionando o caldo primário para a produção de açúcar por ter maior concentração de açúcares ($^{\circ}$ Brix maior) e o caldo misto para a produção de etanol.

Já a extração por difusão, consiste na divisão pela locomoção da cana preparada através de um fluxo contínuo de água e vapor (ALCOOLBRÁS, 2004). Esse processo de extração feito pelos difusores é conhecido também por ser um processo de extração do caldo por osmose. A eficiência de extração dos difusores é maior que a da extração feita por moendas, a diferença é que o difusor utiliza maiores quantidades de água deixando o bagaço mais úmido, uma vez que esse bagaço é um subproduto utilizado como biomassa para a geração de vapor e energia. Outra desvantagem da utilização da difusão é a impureza carregada pelo bagaço, o que dificulta a sua queima.

3.2. Tratamento de caldo

O caldo da cana vindo da fase de extração, contém impurezas, as quais são removidas por um processo físico-químico, o tratamento de caldo. Esse processo de tratamento químico é formado pela coagulação, floculação e precipitação de tais impurezas que são retiradas do caldo por sedimentação (ANA, 2009). Nessa etapa de tratamento do caldo, existem algumas fases, sendo elas: sulfitação, caleação, aquecimento do caldo, clarificação do caldo, filtração e concentração do caldo. A sulfitação trata-se da absorvência de dióxido de enxofre pelo caldo sendo empregada apenas para a produção de açúcar cristal branco. A caleação tem como objetivo neutralizar os ácidos orgânicos e formar fosfato e sulfito de cálcio para esses, quando sedimentarem, carregarem as sujidades contidas no caldo. A caleação também objetiva aumentar o pH do caldo através da aplicação do leite de cal (PAYNE, 1982; SANTOS, 2006).

Após a calagem é feito o aquecimento do caldo. A temperatura de aquecimento do caldo é realizada em torno de 105 °C, para o favorecimento da floculação e coagulação de coloides e não-açúcares proteicos (ANA, 2009).

O caldo é clarificado para se dar continuidade ao processamento produtivo através de clarificadores contínuos ou por decantadores (figura 4). Nesse procedimento de clarificação do caldo, gera-se o lodo composto por sujidades acumuladas no fundo do decantador, esse lodo é direcionado para o processo de filtração onde se tem como propósito a recuperação de açúcares, diminuindo assim as perdas (SILVA et al., 2009). Após a separação do caldo do lodo, o resultado é um resíduo denominado torta de filtro, que por sua vez é utilizado como adubo no plantio e tratos culturais da cana-de-açúcar.

Figura 4 – Decantador de caldo



Fonte: Autor (2021)

Como última etapa do processo de tratamento de caldo, a concentração do caldo clarificado é realizada através de evaporadores (figura 5), o objetivo é retirar toda a água contida no caldo elevando sua concentração, sendo esse caldo concentrado chamado a partir desse momento de xarope. A água retirada em forma de vapor posteriormente é condensada e reutilizada no processo, como por exemplo, para embebição do bagaço na moenda e alimentação das caldeiras.

Figura 5 - Evaporadores

Fonte: Autor (2021)

3.3. Fabricação de açúcar

A fábrica de açúcar recebe o xarope e faz seu processamento, resultando em vários tipos de açúcares, desde “Very High Polarization” (VHP) (menos puro; utilizado para dar liga em piche de asfalto) ao Tipo 1 (mais puro e mais branco). Nos dias atuais as usinas tendem a produzir o açúcar Tipo 2 por ser o mais procurado pelas indústrias de fabricação alimentícia que utilizam o açúcar como ingrediente.

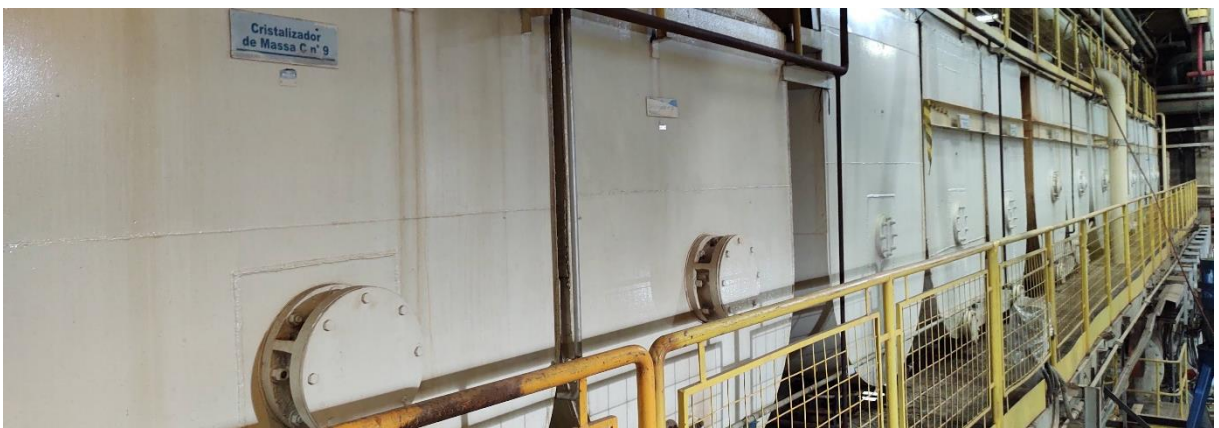
A primeira etapa de fabricação do açúcar é o cozimento, que aumenta ainda mais a concentração do xarope. Os equipamentos utilizados nesse processo, segundo Machado (2012), são chamados de cozedores ou evaporadores de simples efeito (figura 6), onde a água é novamente evaporada, gerando assim a massa A. Essa massa é enviada para a etapa seguinte, a cristalização, realizada a partir de cristalizadores (figura 7), que objetiva o seu lento resfriamento e ainda permite diminuir a perda de sacarose (REBELATO; MADALENO; RODRIGUES, 2011). A massa A já resfriada é direcionada para as centrifugas (figura 8) que separam os cristais de sacarose do mel (CREMASCO, 2014).

Figura 6 - Cozedores



Fonte: Autor (2021)

Figura 7 - Cristalizadores



Fonte: Autor (2021)

Figura 8 - Centrifugas de açúcar



Fonte: Autor (2021)

A partir desse ponto já se tem o açúcar úmido pronto que posteriormente será enviado para o processo de secagem. O mel resultante desse processo de centrifugação (mel A) é enviado para um segundo processo de cozimento e centrifugação dando como resultado a massa B. Essa massa é adicionada de caldo clarificado dando origem ao magma que por sua vez é utilizado para aumentar a concentração do xarope e/ou da massa A, em um processo que visa semear essa massa. O processamento da massa B, gera um subproduto chamado de mel B, do qual, passa novamente por um processo de cozimento e centrifugação, resultando em massa C e mel final. A massa C semeia a massa B e o mel final é utilizado para a produção de etanol, ou em alguns casos, onde a usina produz apenas açúcar, o mel final é vendido para outras empresas que usam esse subproduto para dar origem a outros produtos.

O açúcar úmido, por sua vez, passa pelos secadores de açúcar (figura 9) para diminuir sua umidade e temperatura (COSTA; JÚNIOR, 2012). Nesse processo o açúcar sai pronto e é direcionado para o envase. Por fim, o açúcar é ensacado, geralmente em sacas de 50 Kg e em Big-Bags de 1000 a 1200 Kg. É importante ressaltar que o açúcar a granel apenas é indicado para o tipo VHP.

Figura 9 - Secadores rotativos



Fonte: Autor (2021)

3.4. Fabricação de Etanol

O processo de fabricação do etanol é realizado no setor de fermentação e destilação (figura 10), inicia-se na mistura do caldo clarificado resfriado com o mel final e água, dando origem assim ao mosto. O mosto é concentrado de acordo com parâmetros de obtenção de teor alcoólico almejado na fermentação (NOLASCO, 2005).

Figura 10 - Fermentação e destilaria



Fonte: Autor (2021)

A fermentação é realizada por meio de leveduras, sendo essas por sua vez, da espécie *Saccharomyces Cerevisiae* (VÁSQUEZ, 2007; DIAS, 2008). Essas leveduras são dispostas em tanques com mexedores chamados de cubas, nelas além das leveduras, é adicionado água e ácido sulfúrico para a retirada de bactérias e formação do pé-de-cuba. O mosto é enviado às dornas de fermentação juntamente com o pé-de-cuba, onde estes serão depositados por um tempo (tempo de fermentação - entre 6 e 8 horas) para se converter os açúcares do mosto em álcool, gerando o vinho fermentado, que posteriormente passa por um processo de centrifugação que visa separar e recuperar a levedura contida no vinho. A levedura recuperada é reenviada para as cubas e passa a realizar todo o processo de fermentação novamente. O vinho centrifugado, também chamado de vinho turbinado, vai para as dornas volantes e posteriormente para o processo de destilação (MILANEZ, 2015).

Quanto a destilação, é um processo de separação dos elementos contidos no vinho, sendo eles água, etanóis e ácidos, através do ponto de ebulição de cada componente.

Conforme Abdala (2017), esse processamento inicia-se com a disposição no vinho em uma coluna de destilação, coluna A, na qual se insere vapor permitindo dois produtos como resultado – flegma como produto principal e vinhaça como resíduo (FINGUERUT et al.,2008). Tal vinhaça é enviada para um tanque e depois utilizada na lavoura como produto para fertirrigação (LOPES; GABRIEL; BORGES, 2011). A flegma segue para uma segunda coluna de destilação, a coluna B, nela aumenta-se a concentração de alcoólica e retira-se uma porção de sujidades, o resultado é o etanol hidratado, o óleo fúsel e o flegmaça. Dessa forma, o etanol hidratado é um produto comercializado, assim como o óleo fúsel, já o flegmaça é um efluente comumente utilizado para limpeza de equipamentos do processo ou descartada nas águas residuais ou na vinhaça.

O etanol hidratado, ainda pode passar por um terceiro processo de destilação através da coluna “C”, onde é retirada quase toda a água do etanol, gerando assim o etanol anidro com concentração em média de 99,6% de graduação alcoólica (ABDALA, 2017). Há ainda outros tipos de etanol produzido pelas usinas de EAB, como por exemplo o etanol hidratado Korea e o etanol hidratado Japão, dos quais são tipo de melhor qualidade, voltados para a exportação. Sendo eles produzidos de forma a eliminar contaminantes e tóxicos. São tipos de etanóis produzidos em menor quantidade, porém bastante valorizados.

Por fim, o etanol produzido (quaisquer que sejam), são depositados em tanques de armazenamento (figura 11), onde ficaram estocados para em seguida serem despachados em caminhões tanques.

Figura 11 - Tanques de etanol



Fonte: Autor (2021)

3.5. Geração de vapor e energia

Para a fabricação, tanto do açúcar quanto do etanol, é necessária energia mecânica e elétrica. De tal modo, para a geração da energia as usinas utilizam de caldeiras (figura 12), que queimam um produto como combustível, aquecendo a água que se transforma em vapor.

Figura 12 – Caldeira de geração de vapor



Fonte: Autor (2021)

Antes as usinas queimavam óleo diesel para tal finalidade, mas há um bom tempo elas passaram a utilizar o que até então era resíduo como produto para esse fim, o bagaço da cana. Após a moagem, o bagaço é utilizado como biomassa e reaproveitado nas caldeiras. Possibilitando assim, uma imensa quantidade de energia a ser utilizada no processo industrial (MOTA, 2020).

O vapor produzido é direcionado às turbinas que o transforma em energia mecânica. Essa energia é utilizada para o acionamento de turbinas, que por sua vez movimentam as

moendas, turbobombas e geradores de energia elétrica. Em todos os casos, há um vapor excedente, o vapor de escape que é utilizado no processo de fabricação de açúcar e etanol, como por exemplo, esse tipo de vapor é reutilizado nos pré-evaporadores de caldo.

Segundo Sosa Arnao (2007), através dos geradores de energia, o vapor produzido pelas caldeiras é convertido em energia elétrica que alimentam os motores da planta industrial por todo o processo produtivo, além de possibilitar a exportação da energia excedente. Atualmente, as usinas vêm investido nessa modalidade, uma vez que o mercado de eletricidade provisiona um bom retorno financeiro. A chamada cogeração de energia além de uma estratégia é também uma maneira limpa de gerar energia para uso global.

4. MÉTODO DE PESQUISA

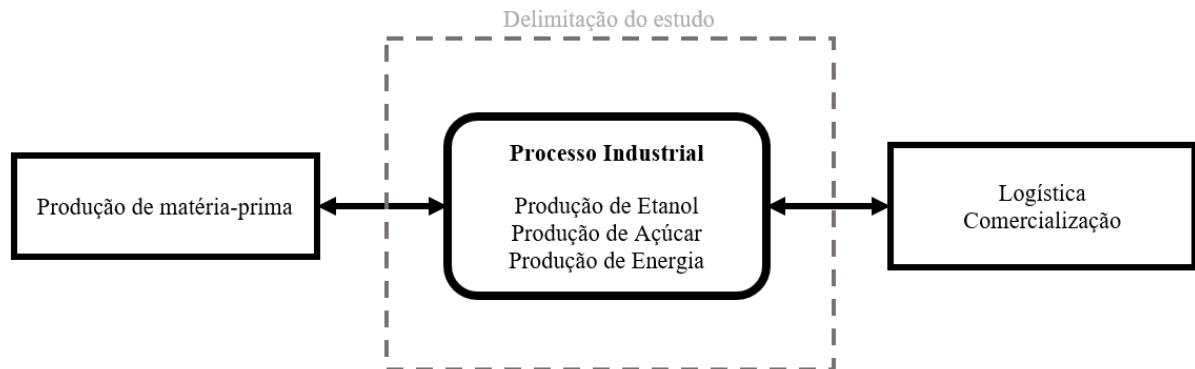
O presente trabalho qualifica-se como sendo de natureza aplicada, caráter exploratório e finalidade metodológica. Uma vez que Moresi (2003), afirma que uma pesquisa classificada do ponto de vista de sua natureza como aplicada, tem como objetivo produzir entendimento de utilidade prática para resolução de problemas específicos. Quanto aos fins, o mesmo autor diz que um estudo exploratório é feito onde não existe muito conhecimento reunido e estruturado sobre o assunto. Bem como a finalidade metodológica, é uma investigação realizada para desenvolvimento de ferramentas de controle ou obtenção da realidade, sendo, portanto, ligada a meios de se atingir certo propósito.

Esse tipo de pesquisa busca produzir conhecimentos para resolução de problemas por meio da aplicação prática, tem propriedade investigativa, sendo um estudo referente ao desenvolvimento de ferramentas para avaliação de informações. É um método que procura uma abordagem do tema pela coleta de dados a fim de se adquirir maior entendimento sobre o fenômeno, tornar o problema mais explícito e achar uma maneira melhor de interpretá-lo (GERHARDT; SILVEIRA, 2009).

A opção pelo processo industrial de Etanol, Açúcar e Bioenergia (EAB) para a elaboração dessa dissertação, foi realizada pela facilidade do autor por acesso a informações necessárias para tal fim. A aquisição dos dados foi feita por meio de documentos institucionais, inspeções e análises de campo de todo o processo produtivo de EAB.

Em relação ao propósito desse trabalho, a ênfase é voltada às fases produtivas da indústria de EAB, não incluindo as fases de produção, manejo e transporte da cana-de-açúcar e logística e expedição dos produtos – açúcar, etanol e bioenergia. Assim sendo, no desenvolvimento do cálculo para a elaboração do índice de desempenho ambiental desse setor, apenas serão tomados em conta os resíduos e efluentes provindos dos processos e operações produtivas industriais.

O limite de estudo dessa pesquisa (figura 13), está nos resíduos e efluentes utilizados como dados a serem considerados, sendo eles apenas os que tem como destino o uso para fertirrigação e fertilização do solo de produção agrícola da cana-de-açúcar. Isto porque o índice elaborado por essa dissertação busca avaliar o desempenho ambiental da indústria de EAB quanto à disposição dos resíduos e efluentes direcionados ao solo. O índice utiliza, além dos dados de composição química dos resíduos e efluentes, dados de fragilidade ambiental da bacia hidrográfica onde a indústria em avaliação está localizada e onde despeja tais produtos.

Figura 13 - Definição dos limites de estudo

Fonte: Autor (2021)

Para atingir os objetivos dessa pesquisa, a produção metodológica utilizada é formada por dez estágios:

- a) Caracterizar as etapas do processo industrial de produção de EAB;
- b) Reconhecer os resíduos e efluentes destinados ao solo produzidos pela indústria de EAB;
- c) Indicar a composição química de cada resíduo e efluente;
- d) Calcular os potenciais de impacto ambiental para cada resíduo e efluente;
- e) Normalizar os potenciais de impacto ambiental;
- f) Efetuar a ponderação relativa dos potenciais de impacto ambiental;
- g) Definir a amplitude geográfica de impacto ambiental;
- h) Calcular o coeficiente de fragilidade ambiental da bacia hidrográfica onde são rejeitados os resíduos e efluentes;
- i) Elaborar e calcular o índice para avaliação de desempenho ambiental de uma empresa de produção de EAB;
- j) Realizar a discussão dos resultados e conclusão;

4.1. Desenvolvimento da pesquisa

O estudo foi elaborado com o intuito de se obter um índice para avaliação de desempenho ambiental (ADA) do setor sucroenergético. Para isso seguiu-se uma sequência de etapas até a obtenção de sua fórmula e posteriormente foi calculado obtendo-se o resultado do índice para uma indústria teste a partir de dados coletados na mesma.

Para melhor entendimento, a equação elaborada para o índice é apresentada primeiramente e em seguida a sequência de cálculos até o atingimento dos resultados.

4.1.1. Índice de avaliação de desempenho ambiental

O índice de avaliação de desempenho ambiental para a indústria de EAB (IEAB), foi elaborado exclusivamente para a análise dos resíduos destinados à fertirrigação e fertilização do solo e para ser proporcional a:

- A massa dos resíduos gerados;
- A quantidade gerada de cada resíduo determinado período;
- Tendo em vista que cada resíduo é gerado em várias etapas do processo de EAB, é preciso analisar o potencial de impacto ambiental de cada fase produtiva;
- A destinação final, a área e a quantidade de despejo de cada resíduo realizada pela companhia;
- A correlação dos potenciais de impacto ambiental com os dados de avaliação de fragilidade ambiental da bacia hidrográfica onde a empresa é pertencente;

Dessa forma, a fórmula do IEAB é apresentada da seguinte maneira:

$$IEAB = \frac{R}{\sum_{i=1}^n V_i \cdot A_i \cdot C} \quad (1)$$

Onde:

V_i é o fator de impacto potencial ponderado de cada resíduo em cada categoria;

A_i equivale a um peso de cada resíduo i correspondente com a sua dispersão geográfica;

C_i refere-se ao coeficiente de fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Baixo Mogi (BHBM)

R corresponde à massa total em kg de resíduos e efluentes produzidos pela empresa;

n corresponde ao número de resíduos;

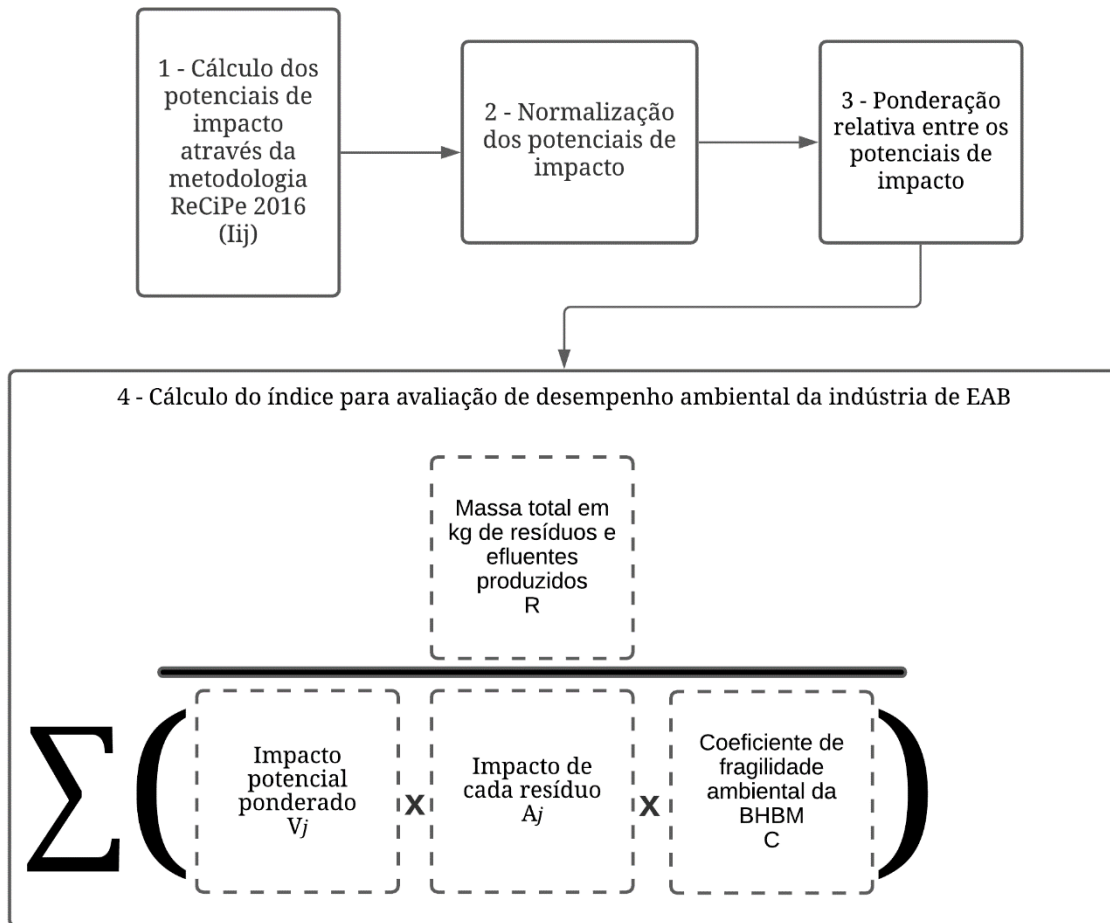
4.1.2. Etapas de desenvolvimento da pesquisa

O índice elaborado é um avanço no estudo de Rebelato et al. (2019), uma vez que o objetivo é se obter um parâmetro inédito a partir do cumprimento dos estágios da pesquisa. Assim como no estudo citado, esta pesquisa objetiva o desenvolvimento de um índice de ADA para a indústria da cana-de-açúcar, porém com uma abordagem diferente em vários aspectos. Nesse estudo não serão avaliados todos os resíduos gerados no processo produtivo,

mas sim, apenas os resíduos e efluentes que possuem destinação ao solo de cultivo agrícola, bem como a ênfase dada à bacia hidrográfica onde a unidade industrial em estudo está localizada e onde despeja tais resíduos e efluentes.

Esse trabalho foi realizado seguindo o fluxo de cálculos conforme figura 14 para se atingir os resultados esperados.

Figura 14 - Fluxograma de cálculos



Fonte: Autor (2021)

- a) Todas as etapas de produção de produção industrial de EAB foram descritas, bem como o diagrama do processo;
- b) Realizou-se a identificação de cada resíduo e efluente destinados à fertirrigação e fertilização do solo. Todas as informações levantadas sobre estes elementos - vinhaça, efluente de lavagem de dornas, efluente de lavagem pisos e equipamentos, efluente da lavagem de cana, torta de filtro, efluente de tratamento de gases cinzas da queima do bagaço e

lodo da estação de tratamento de esgoto (ETE) e piscinas de decantação de efluentes - foram unidas para a explicação de composição e origem, conforme apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Resíduos destinados a aplicação no solo gerados pela indústria de EAB

Resíduo	Origem	Características Químicas
Vinhaça	Destilação de vinho para produção de etanol	Bário (Ba); Cobre (Cu); Cromo (Cr); Mercúrio (Hg); Molibdênio (Mo); Níquel (Ni); Zinco (Zn); Cadmio (Cd); Chumbo (Pb); Ferro (Fe); Fenol (C ₆ H ₆ O); Amônia (NH ₃); Fósforo (P); Fosfato (PO ₄ ³⁻);
Torta de filtro	Filtragem de lodo dos decantadores de caldo	Carbono (C); Nitrogênio (N); Enxofre (S); Fósforo (P); Magnésio (Mg); Potássio (K); Cálcio (Ca); Ferro (Fe); Cádmi (Cd); Manganês (Mn); Zinco (Zn); Cobre (Cu); Chumbo (Pb); Cromo (Cr);
Cinzas e Fuligem	Queima do bagaço nas caldeiras para geração de vapor	Boro (B); Cobre (Cu); Ferro (Fe); Manganês (Mn); Zinco (Zn); Carbono (C); Oxigênio (O); Magnésio (Mg); Alumínio (Al); Silício (Si); Enxofre (S); Potássio (K); Cálcio (Ca); Ferro (Fe);
Águas residuais	Lavagem de cana; Limpeza de piso; Limpeza de gases; Aquecimento; Evaporação; Cozimento; Limpeza de dornas;	Fósforo (P); Potássio (K); Nitrogênio (N); Sódio (Na); Cálcio (Ca); Magnésio (Mg); Cloro (Cl); Bicarbonato (NaHCO ₃); Chumbo (Pb); Cobre (Cu); Nitrogênio Amoniacal (N-NH ₃);
Lodo de esgoto	Estação de tratamento de esgoto e piscinas de decantação de águas residuais	Nitrogênio (N); Fósforo (P); Potássio (K); Cálcio (Ca); Magnésio (Mg); Manganês (Mn); Ferro (Fe); Cobre (Cu); Zinco (Zn);

Fonte: Adaptado de Thomaz (2017)

c) Para cada resíduo e efluente foram calculados os potenciais de impacto ambiental em cada categoria.

A utilização do método ReCiPe 2016, neste estudo, se deu pelo fato de ser uma ferramenta com nível de classificação “midpoint” na avaliação do impacto ambiental empregado. Este método faz uso de índices próprios do processo fabril. Ainda, tal recurso possui abrangência de utilização global, envolvendo a máxima variedade de categorias. O principal objetivo do ReCiPe 2016, é modificar a listagem de apurações da lista do ciclo de vida em um resultado restrito de pontuações de índices. O impacto ambiental relativo a uma categoria é exposto pelas pontuações do índice (RIVM, 2018).

A definição do ponto médio se dá pelas ações dos processos físicos, químicos e biológicos para uma determinada categoria de impacto ambiental, associando os resultados da análise do ciclo de vida aos indicadores de categoria e aos pontos finais das categorias (ABNT, 2009).

Essa ferramenta aborda vários pontos categóricos de danos e de impactos ambientais - mudanças climáticas, depleção de ozônio, toxicidade humana, formação de oxidante fotoquímico, formação de material particulado, radiação ionizante, acidificação terrestre, eutrofização marinha, eutrofização de água doce, ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade de água doce, ecotoxicidade marinha, ocupação do solo agrícola, ocupação do solo urbano, transformação natural da terra, depleção de metal, depleção de fósseis e esgotamento de água (JOINT RESEARCH CENTRE, 2010; GOEDKOOP et al., 2009). O quadro 2 apresenta as categorias de danos e impactos ambientais do ReCiPe 2016 utilizados nessa pesquisa em sua abordagem “midpoint” e suas unidades de medidas correspondentes.

Quadro 2 - Categorias "midpoint" do ReCiPe 2016

Categorias de Danos	Categorias de Impacto	Unidade
Saúde Humana	Toxicidade humana	kg 1,4-DB eq
Ecossistemas	Eutrofização de água doce	kg P eq
	Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DB eq
	Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4-DB eq
	Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DB eq

Fonte: RIVM (2018)

A abordagem “midpoint” fornece uma visão mais concisa dos resultados de avaliação de desempenho ambiental, ou seja, é um modelo de categoria de impacto de ponto médio que

considera os impactos principais para avaliação ambiental. O resultado final desta abordagem é dado em uma única pontuação adimensional da qual é equivalente por pessoa.

A perspectiva hierarquista foi adotada por ser uma opção de ponderação do método e por buscar acordo entre as perspectivas de curto e longo prazo. Esta perspectiva é comumente utilizada e referenciada em normas como a ISO 14044 e em princípios políticos (GOEDKOOOP et al., 2009).

Por sua vez, as categorias de impactos ambientais foram definidas por abrangerem uma parte extensa de questões ambientais relacionadas ao processo em estudo, considerando os objetivos e intuítos dessa dissertação. Sendo utilizadas apenas as categorias de impactos de eutrofização de água doce, ecotoxicidade de água doce, toxicidade humana, ecotoxicidade marinha e ecotoxicidade terrestre.

O cálculo para essa pesquisa será composto pelos potenciais de impacto categorizados para cada resíduo originado no processo industrial de EAB com destinação ao solo. Com os resíduos classificados e apontados na ordem de “midpoint” e na perspectiva hierarquista, serão obtidos os resultados para a normalização.

Para isso, o cálculo será realizado para cada resíduo identificado:

$$I_{ij} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Q_{ij} \cdot w_i \quad (2)$$

Onde:

I_{ij} corresponde ao impacto potencial para substância i na categoria j ;

Q_{ij} é o fator de caracterização que une a substância i com a categoria de impacto j obtido através da metodologia ReCiPe 2016;

w_i trata-se da massa da substância i ;

d) A normalização dos potenciais de impacto ambiental I_{ij} possui a finalidade de proporcionar a regularidade das informações, de modo a parametrizar os dados de potenciais de impactos ambientais em sua totalidade. Para isso são calculadas as grandezas correspondentes com o intuito de obtenção de um produto ideal para a consideração de desenlace. Portanto a normalização é atribuída para um grupo de informações diferentes, ou por outra, com dimensões, escalas, medidas e intervalos divergentes. Por consequência, precisam ser normalizados para que fiquem na mesma base (SCARPIN, 2021).

Nesta dissertação a normalização foi feita para cinco categorias ambientais - eutrofização de água doce; ecotoxicidade de água doce; toxicidade humana; ecotoxicidade

marinha; ecotoxicidade terrestre - onde os coeficientes de normalização do método ReCiPe 2016 foram utilizados conforme apresentados pela tabela 1. Sendo necessário salientar que os dados de normalização dos potenciais poluidores de impactos são resultados dos cálculos dos resíduos e subprodutos do processo em estudo. A obtenção de valores comparáveis é essencial para a compreensão das informações que constroem o indicador de avaliação de desempenho ambiental utilizado para uso nessa área produtiva destacada por este trabalho.

Tabela 1 - Valores de normalização do ReCiPe 2016

Categoria de impacto	Unidade	Valor de normalização
Eutrofização de água doce	kg P eq/p/yr	2,90E-01
Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4-DB eq/p/yr	3,26E+02
Toxicidade humana	kg 1,4-DB eq/p/yr	5,93E+00
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DB eq/p/yr	4,30E+00
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DB eq/p/yr	2,46E+00

Fonte: RIVM (2018)

e) A próxima etapa é a de ponderação. Essa trata de pontos auxiliares de um determinando grupo de informações, conferindo pesos maiores ou menores aos resultados. A geração do índice é interferida pelos pesos (FEIL; SCHREIBER, 2017a). Assim, a delimitação desse processo é a junção dos produtos dos cálculos realizados anteriormente, a fim de se obter uma unidade singular de degradação ambiental, permitindo a explanação e exploração dos dados do processo em estudo (OLIVEIRA, 2020). A magnitude da consequência vinda do resultado da degradação é retratada pelo fator de ponderação do potencial de impacto ambiental (MARTINS, 2020).

Existem diversos métodos de ponderação, porém a própria metodologia do ReCiPe 2016 previu essa necessidade para a elaboração de índices e indicadores de ADA. E assim sendo, os fatores para a realização da ponderação dos potenciais de impacto ambiental calculados nessa pesquisa são apresentados pela tabela 2.

Tabela 2 - Pesos de Ponderação do ReCiPe 2016

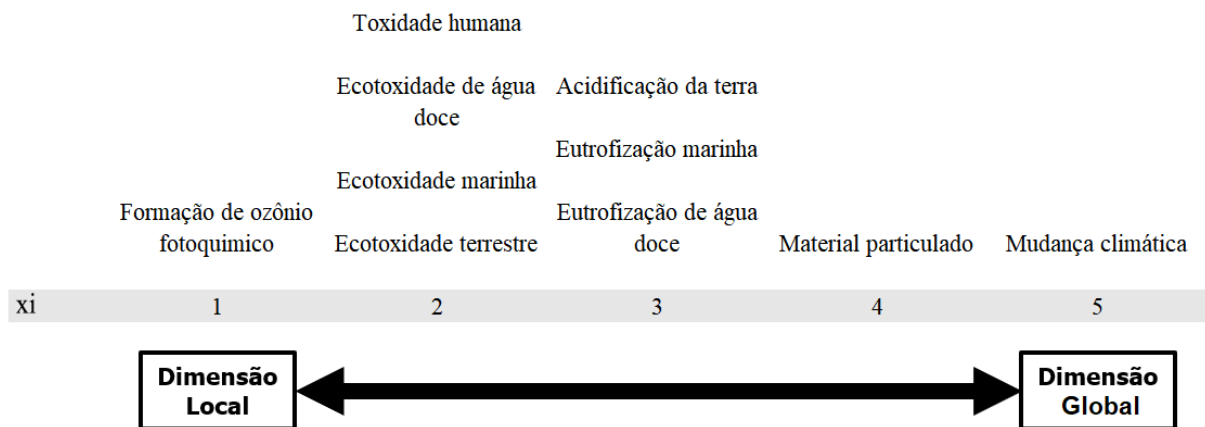
Perspectiva	Ecossistemas	Saúde Humana
Hierarquista	400	300

Fonte: RIVM (2018)

f) O impacto de cada resíduo correspondente com a sua dispersão geográfica A_i foi definido de acordo com as categorias hierárquicas ambientais da metodologia ReCiPe 2016, onde x_i é a faixa de emissão relativa determinada de acordo com a figura 15, para o alcance de emissão que corresponde ao nível de impacto de cada resíduo.

$$A_i = \frac{x_i \cdot 100}{\sum_{j=1}^n x_j} \quad (3)$$

Figura 15 – Dispersão categórica de impacto ambiental



Fonte: RIVM (2018)

g) A definição do coeficiente de fragilidade ambiental da BHBM C é realizada por meio do cálculo a seguir:

$$C = a_a \cdot f \quad (4)$$

Onde:

a_a é referente a área de aplicação do resíduo informado pela empresa teste;

f é a fragilidade ambiental a erosão da BHBM;

$$f = \frac{1 \cdot A_1 + 2 \cdot A_2 + 3 \cdot A_3 + 4 \cdot A_4 + 5 \cdot A_5}{a_b} \quad (5)$$

Onde:

A_1 é a área em km^2 classificada como nível 1 de fragilidade ambiental da BHBM;

A_2 é a área em km^2 classificada como nível 2 de fragilidade ambiental da BHBM;

A_3 é a área em km^2 classificada como nível 3 de fragilidade ambiental da BHBM;

A_4 é a área em km^2 classificada como nível 4 de fragilidade ambiental da BHBM;

A_5 é a área em km^2 classificada como nível 5 de fragilidade ambiental da BHBM;

Desse modo, a determinação de f é realizada por meio da utilização da geotecnologia e da metodologia desenvolvida por Ross (2012), onde foi possível processar os dados de declividade, pluviometria, pedologia e uso e ocupação do solo da área estudada resultando na fragilidade ambiental a erosão da BHBM. Sendo utilizado como ferramenta para o processamento desses dados o “software” QGIS versão 3.10.2 A Coruña, do qual é um programa de código aberto gratuito para coletar, processar, analisar e disponibilizar informações com referência geográfica, ou seja, para o geoprocessamento.

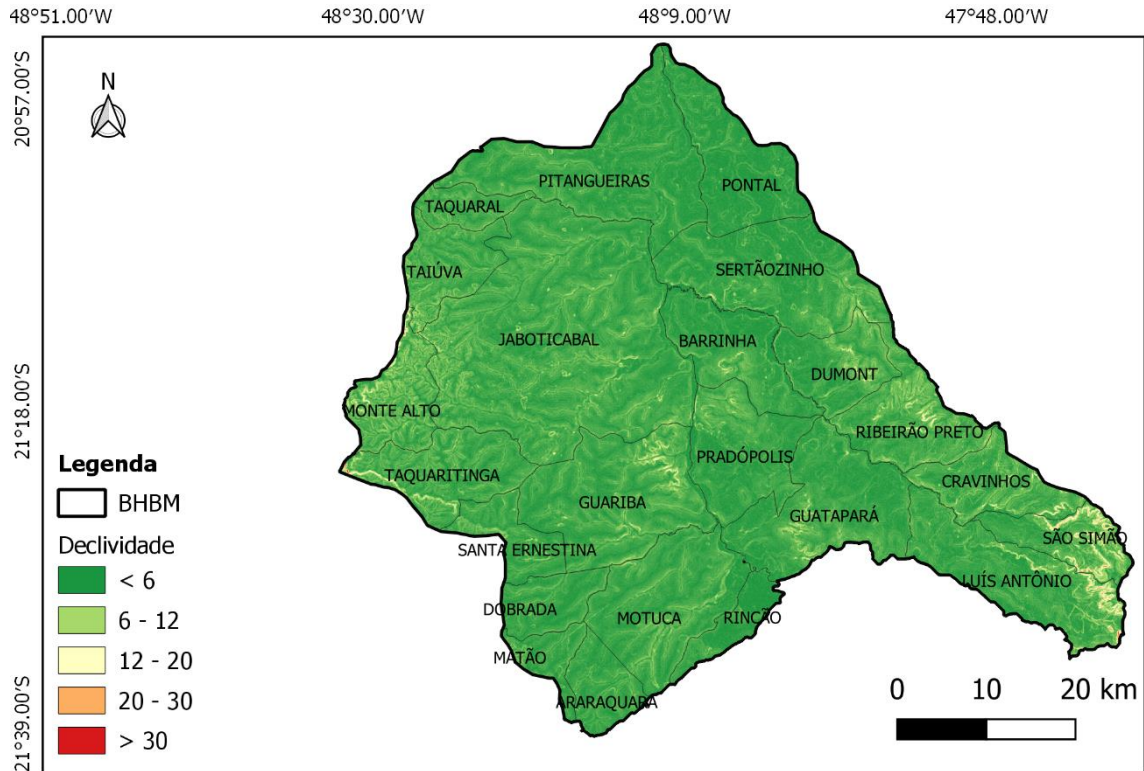
Logo esse processo é feito em 4 partes:

i. Aquisição dos Planos de Informações

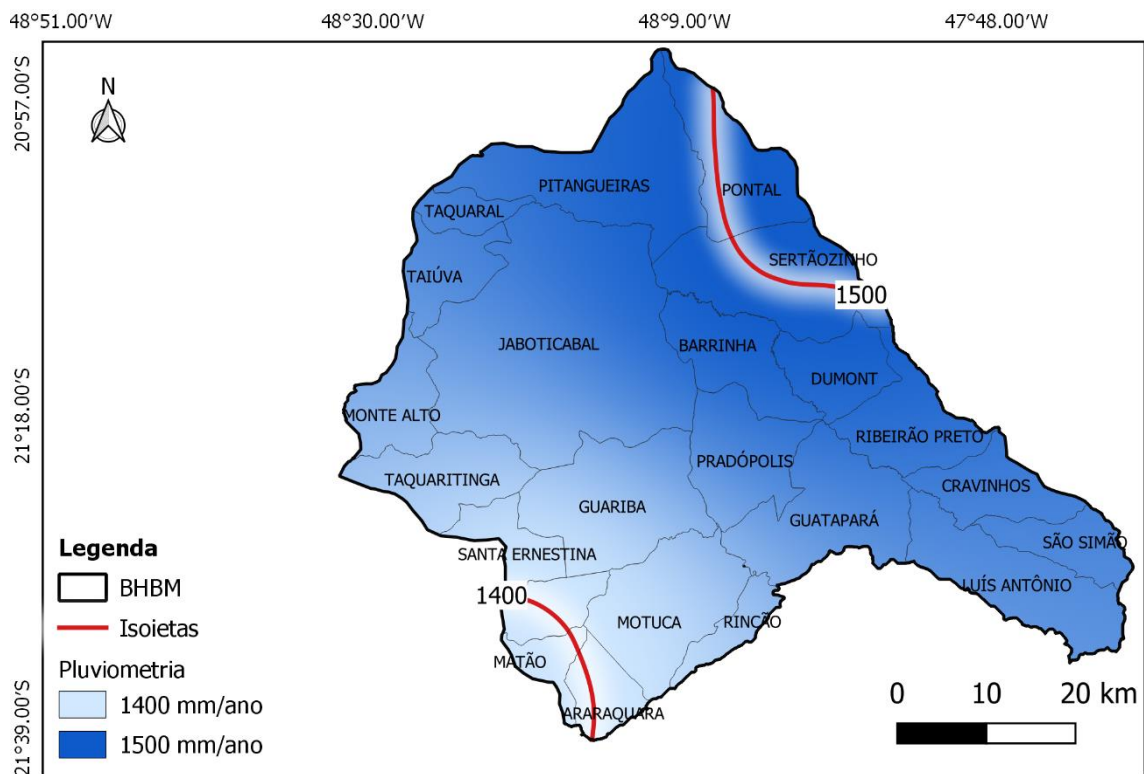
A obtenção dos dados característicos da bacia foi feita de forma gratuita e eles foram retirados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e do Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil (MapBiomas). Sendo esses os mais atuais disponíveis em cada plataforma. Essas informações para utilização no QGIS possuem os formatos Raster (imagens de satélites em pixels) e Shapefile (dados vetoriais em polígonos) e são processados no Sistema de Referência de Coordenadas (SRC) Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS) 2000 – Universal Transversa de Mercator (UTM) zona 23S.

O arquivo com a delimitação e posição geográfica da BHBM foi obtido no sítio eletrônico da ANA, sendo esse utilizado como base para os recortes dessa mesma área nos Planos de Informações (PIs) necessários para a elaboração da carta de fragilidade ambiental.

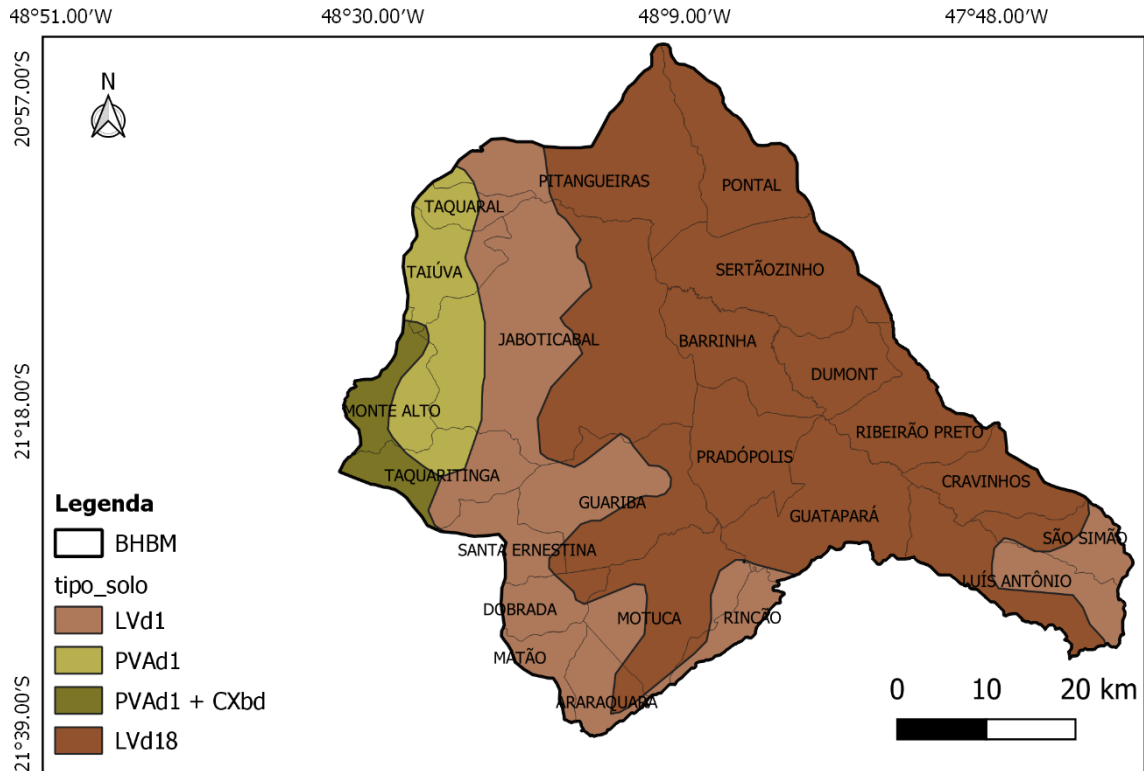
Posteriormente foram obtidos os PIs de declividade (INPE), pluviometria (CPRM), pedologia (IBGE) e uso e ocupação do solo (MapBiomas) de áreas disponíveis por cada fonte onde contém a BHBM. Assim, utilizando o arquivo com a delimitação da bacia hidrográfica como camada de sobreposição foram recordados os demais PIs com os algoritmos Recortar Vetor e Recortar Raster, obtendo-se assim as cartas temáticas da BHBM de Declividade (figura 16), Pluviometria (figura 17), Pedologia (figura 18) e Uso e Ocupação do Solo (figura 19).

Figura 16 - Plano de Informação de Declividade

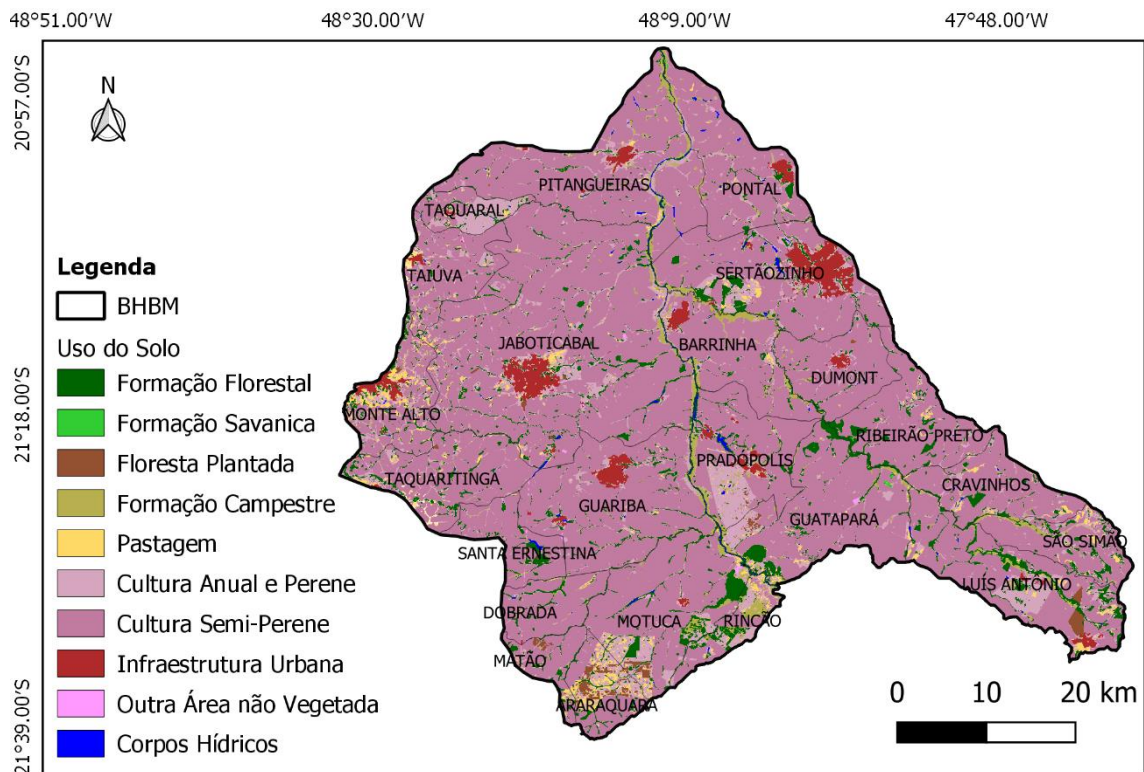
Fonte: Autor (2021)

Figura 17 - Plano de Informação de Pluviometria

Fonte: Autor (2021)

Figura 18 - Plano de Informação de Pedologia

Fonte: Autor (2021)

Figura 19 - Plano de Informação de Uso e Ocupação do Solo

Fonte: Autor (2021)

ii.Reclassificação do Planos de Informações

A reclassificação consiste em alterar as informações contidas em cada PI para que fiquem todas em uma mesma base em que substitui os dados característicos da bacia reorganizando-os no intervalo de números inteiros de 1 a 5.

Essa reclassificação é feita por meio da utilização de estudos que sugerem essas substituições para as cartas temáticas de declividade, pluviometria, pedologia e uso e ocupação do solo.

Para tanto, cada tipo de arquivo tem uma maneira diferente para realizar essa reclassificação. No QGIS para o arquivo Raster é utilizado o algoritmo Reclassificar por Tabela, onde, nesse caso apenas o PI de declividade é processado dessa forma, sendo ele reclassificado conforme os limites apresentados pela tabela 3.

Tabela 3 - Classificação de declividade por nível de fragilidade

Classe de Declividade	Declividade (%)	Nível de Fragilidade
Plano	< 6%	1
Suave Ondulado	6 a 12%	2
Ondulado	12 a 20%	3
Forte Ondulado	20 a 30%	4
Montanhoso Escarpado	> 30%	5

Fonte: Elaboração própria com base em Bezerra, Silva e Sales (2016) e Ross (1994)

Já para os PIs de pluviometria, pedologia e uso e ocupação do solo os quais são arquivos em formato Shapefile processados como polígonos vetoriais a reclassificação é realizada pela Tabela de Atributos, onde, é inserido uma coluna com os níveis de fragilidade indicados para cada característica física da área.

A reclassificação pedológica foi feita conforme os tipos de solos presentes na BHBM como apresentado na tabela 4.

Tabela 4 - Classificação pedológica por nível de fragilidade

Tipo de Solo	Sigla do tipo de solo	Nível de Fragilidade
Latossolo Vermelho Distrófico	LVAd1	1
Latossolo Vermelho Ditrófico	LVAd18	2
Agrissolo Vermelho Eutrófico	PVAd1	4
Agrissolo Vermelho Eutrófico + Neolosso Quartizarênico Órtico	PVAd1+CX	5

Fonte: Elaboração própria com base em Kawakubo et al. (2005), e Valle, Francelino e Pinheiro (2016)

A carta pluviométrica, é referente às precipitações correspondentes às isoietas médias anuais de 1977 a 2006, onde apresenta 1400 e 1500 mm/ano sendo reclassificada conforme a tabela 5.

Tabela 5 - Classificação pluviométrica por nível de fragilidade

Característica Pluviométrica	Nível de Fragilidade
Situação pluviométrica com distribuição irregular, com período seco entre dois e três meses no inverno e período com alta intensidade de chuva entre dezembro e março, com volumes anuais entre 1300 e 1600 mm/ano.	3

Fonte: Ross (2012)

E o PI de uso e ocupação do solo foi reclassificado de acordo com a tabela 6.

Tabela 6 - Classificação de uso e ocupação do solo por nível de fragilidade

Nível de Fragilidade	Tipo de Uso e Ocupação do Solo
1 - Muito Baixa	Corpos hídricos Formação florestal Floresta plantada
2 – Baixa	Infraestrutura urbana Formação savânica Formação campestre
3 – Média	Cultura semi-perene Pastagem
4 – Forte	Cultura perene
5 - Muito Forte	Área não vegetada (solo exposto)

Fonte: Elaboração própria com base em Adami et al. (2012) e Ross (1994)

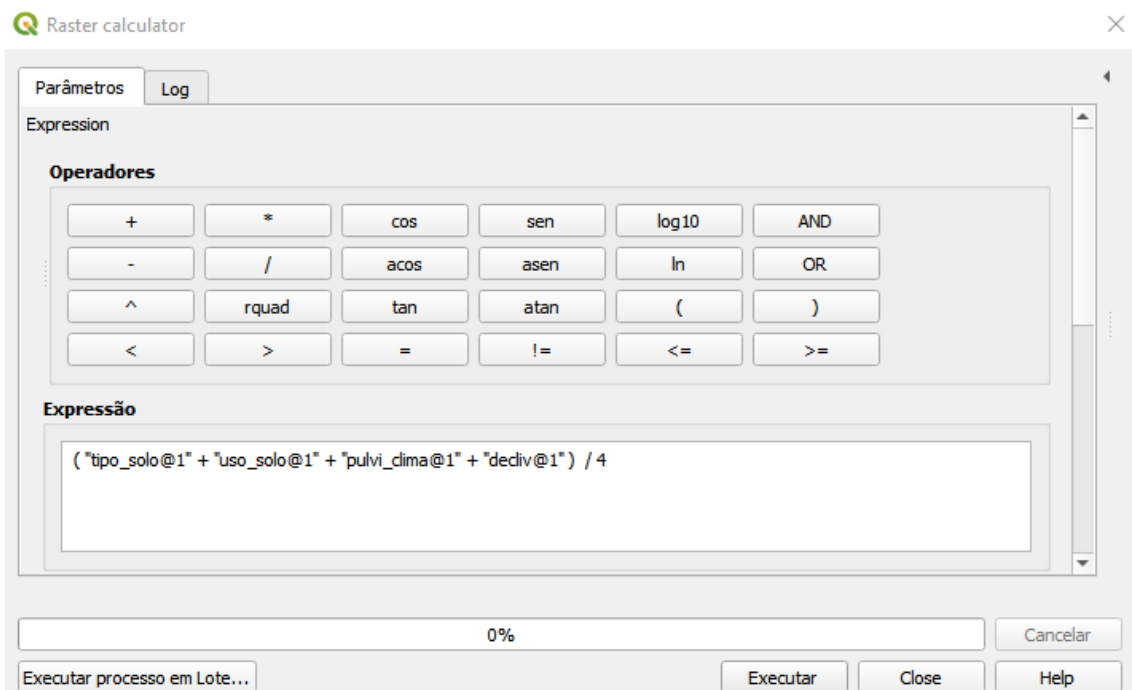
Após reclassificar todos os PIs os arquivos com os dados pluviométricos, pedológicos e de uso e ocupação do solo os quais estão em formato Shapefiles precisam ser convertidos para o formato Raster, sendo para tanto utilizado o algoritmo Rasterizar no QGIS. Esse processo resulta nas cartas temáticas reclassificadas de 1 a 5 em formato Raster. Assim sendo,

todos as cartas temáticas passam a estar classificadas de mesma forma e em formato igual para serem processadas na próxima etapa.

iii. Álgebra de Mapas

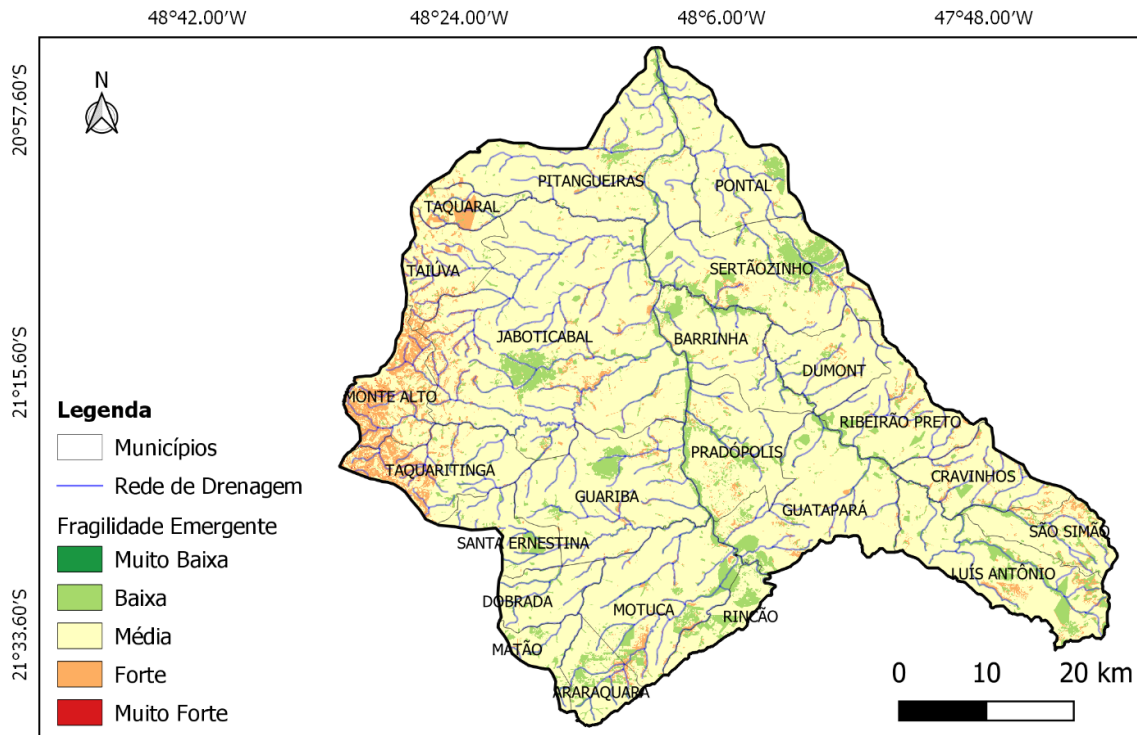
Com os arquivos reclassificados o próximo passo é a realização da Álgebra de Mapas que consiste em combinar dados Raster pixel a pixel por meio de operações matemáticas sendo utilizado para isso o algoritmo Calculadora Raster como apresentado pela figura 20.

Figura 20 - Algoritmo Calculadora Raster



Fonte: Autor (2021)

Nesse caso o cálculo feito trata-se da média aritmética das cartas temáticas de declividade, pluviométrica, pedologia e uso e ocupação do solo o que gera assim o PI de fragilidade ambiental a erosão da BHBM conforme figura 21.

Figura 21 - Mapa de fragilidade ambiental a erosão da BIBM

Fonte: Autor (2021)

iv. Apuração das áreas

Através do algoritmo Reportar gera-se um relatório que permite a obtenção das áreas para cada nível categórico de fragilidade ambiental, ou seja, define a amplitude em km² de cada nível. Desse modo áreas correspondentes para cada nível são apresentadas pela tabela 7.

Tabela 7 - Área por nível de fragilidade ambiental da BIBM

Nível de Fragilidade	Área (km ²)
1	0
2	439,62
3	3.209,49
4	242,77
5	18,79

Fonte: Autor (2021)

A área de aplicação de cada resíduo e efluente a_a são dados coletados da empresa teste referentes às quantidades geradas e depositadas no solo da bacia hidrográfica durante a safra 2020/2021 conforme tabela 8.

Tabela 8 - Quantidade e área de aplicação dos resíduos gerados

Resíduo	Área de aplicação (Km²)
Vinhaça	145,574
Torta de filtro	7,98
Cinzas de bagaço e fuligem da limpeza de gases	19,009
Águas residuais	145,574
Lodo de esgoto (ETE)	16,16

Fonte: Autor (2021)

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo mostra os resultados obtidos neste estudo, que seguiu cada etapa projetada para sua obtenção, assim como a análise dos dados para avaliação de desempenho ambiental por meio do índice desenvolvido com a utilização do ReCiPe 2016, com base nos cálculos do potencial de impacto de cada resíduo e subproduto, gerado pela indústria de Etanol, Açúcar e Bioenergia (EAB), com aplicação para cultivo agrícola da cana-de-açúcar.

Também, é apresentado o teste desta metodologia para a Avaliação de Desempenho Ambiental (ADA), por meio de dados adquiridos de uma companhia do setor sucroenergético. Todos os cálculos foram realizados em “midpoint”, na divisão hierarquistada, dos potenciais de impacto do solo da bacia hidrográfica, de eutrofização de água doce e de toxicidade, onde o potencial de toxicidade teve maior abrangência nos cálculos, sendo dividido nas categorias de ecotoxicidade de água doce, toxicidade humana, ecotoxicidade marinha e ecotoxicidade terrestre.

5.1. Aquisição dos dados e teste do índice

A realização do teste foi dada por meio de informações obtidas pelo pesquisador, durante os anos de 2020 e 2021, através de visitas em uma unidade industrial de EAB e de dados provenientes de uma pesquisa também realizada pelo autor no ano de 2020 sobre fragilidade ambiental da bacia hidrográfica, onde a usina está localizada.

Os dados sobre a geração e descarte dos resíduos foram retirados de documentos concedidos pela empresa e levantamento bibliográfico para reconhecimento das características químicas de cada um deles.

5.1.1. Cenário de aquisição dos dados

Inaugurada em 1961, a empresa que serviu como instrumento de coleta de dados está localizada no interior do estado de São Paulo a aproximadamente 360 km da capital paulista, dentro da Bacia Hidrográfica do Baixo Mogi (BHBM). Esta indústria EAB tem capacidade para processar 3,3 milhões de toneladas de cana-de-açúcar por ano safra, com produção total de cerca de 267 mil m³ de etanol, 229 mil toneladas de açúcar e 30 MW de potência disponível para exportação de energia elétrica neste mesmo período. A companhia emprega aproximadamente 1500 pessoas, das quais estão alocadas em seus diversos setores agrícolas,

industriais e administrativos. A área total da usina, onde contém seu processo produtivo, oficinas automotivas e seus escritórios administrativos, possui cerca de 600.000 m².

Os dados adquiridos são referentes aos resíduos gerados por esta indústria de EAB durante o ano safra 2020/2021 no período de 06/04/2020 à 05/11/2021 com destinação exclusiva à fertirrigação e fertilização do solo.

5.2. Cálculo dos potenciais de impacto ambiental no solo

Nessa fase, foram calculados os potenciais de impacto ambiental para cada resíduo gerado pela usina de EAB com destinação à fertirrigação e fertilização do solo, com uso da metodologia ReCiPe 2016. Tendo em vista que a destinação final de cada resíduo é a aplicação no solo, todos os potenciais de impacto foram calculados com base apenas nesse compartimento. Com a identificação da composição química de cada um dos resíduos, por meio de revisão bibliográfica e com análise e utilização dos dados do ReCiPe 2016, as categorias de impacto utilizadas foram: eutrofização de água doce, ecotoxicidade de água doce, toxicidade humana, ecotoxicidade marinha e ecotoxicidade terrestre.

Os resíduos detectados e seus respectivos processos de origem, assim como sua composição química e quantidades de cada elemento presentes, estão descritos no quadro 3.

Quadro 3 - Resíduos destinados ao solo de EAB e suas características

Resíduo	Processo de Origem	Componente Químico	Quantidade
Vinhaça	Destilação de mosto fermentado	Bário	0,41 mg/L
		Cobre	0,72 mg/L
		Cromo	1,76 mg/L
		Mercúrio	0,0019 mg/l
		Molibdênio	0,008 mg/l
		Níquel	0,03 mg/l
		Zinco	1,66 mg/l
		Cadmio	0,66 mg/l
		Chumbo	0,23 mg/l
		Ferro	72,5 mg/l
		Fenol	34 mg/l
		Amônia	13,3 mg/l

		Fósforo	26,36 mg/l
		Fosfato	80,84 mg/l
Torta de filtro	Decantação de caldo	Carbono	358,9 g/kg
		Nitrogênio	17,3 g/kg
		Enxofre	3,4 g/kg
		Fósforo	19,1 g/kg
		Magnésio	1 g/kg
		Potássio	1,6 g/kg
		Cálcio	8,8 g/kg
		Ferro	11,86 g/kg
		Cádmio	0,99 g/kg
		Manganês	400,64 g/kg
		Zinco	81,14 g/kg
		Cobre	27,28 g/kg
		Chumbo	4,06 g/kg
		Cromo	19,06 g/kg
Cinzas e fuligem	Queima de bagaço	Boro	27,7 mg/kg
		Cobre	4,9 mg/kg
		Ferro	1366,4 mg/kg
		Manganês	103,5 mg/kg
		Zinco	17,1 mg/kg
		Carbono	90 g/kg
		Oxigênio	595,9 g/kg
		Magnésio	8,9 g/kg
		Alumínio	17,4 g/kg
		Silício	242,5 g/kg
		Enxofre	2,7 g/kg
		Potásio	23,1 g/kg
		Cálcio	9,1 g/kg
		Ferro	10,4 g/kg
Águas residuais	Lavagem de cana	Fósforo	3,5 mg/l
	Limpeza de piso	Potásio	32,03 mg/l
	Limpeza de gases	Nitrogênio	29,02 mg/l

	Aquecimento Evaporação Cozimento Limpeza de dornas	Sódio Cálcio Magnésio Cloro Bicarbonato Chumbo Cobre Nitrogênio Amoniacal	140,32 mg/l 80,39 mg/l 37,37 mg/l 261,27 mg/l 443 mg/l 0,01725 mg/l 0,37 mg/l 1,2875 mg/l
Lodo de esgoto	ETE e piscinas de decantação de efluentes	Nitrogênio Fósforo Potássio Cálcio Magnésio Manganes Ferro Cobre Zinco	55,83 g/kg 5,90 g/kg 0,92 g/kg 3,03 g/kg 0,60 g/kg 0,47 g/kg 44,42 g/kg 0,21 g/kg 0,62 g/kg

Fonte: Elaboração própria com base em Vitti, Lima e Cicarone (2006), Júnior, Marques e Júnior (2008), ANA (2009), Macedo (2009), Chacón et al. (2011), Christofolletti (2013) e Oliveira (2017).

Com isso, os potenciais de impacto (I_{ij}), foram calculados a partir da equação 2, tendo os resultados expressos pela tabela 5.

Tabela 9 - Potenciais de impacto da indústria EAB com destinação ao solo

Resíduo	Eutrofização de água doce (kg P eq)	Ecotoxicidade de água doce (kg 1,4-DB eq)	Toxicidade humana (kg 1,4-DB eq)	Ecotoxicidade marinha (kg 1,4-DB eq)	Ecotoxicidade terrestre (kg 1,4-DB eq)
Vinhaça	8,091E+04	4,566E+04	4,751E+08	2,581E+05	5,248E+06
Torta	1,350E+06	1,486E+06	1,270E+10	8,638E+06	1,755E+08
Cinzas	0,000E+00	2,400E+02	4,236E+05	1,214E+02	2,264E+03
Águas Residuais	1,832E+03	2,129E+04	4,048E+07	4,084E+05	1,292E+06

Lodo					
ETE	2,182E+04	2,462E+04	2,061E+08	1,399E+05	2,843E+06

Fonte: Autor (2021)

5.3. Normalização dos potenciais de impacto ambiental

A normalização objetiva transformar todos os potenciais em unidades iguais, ou seja, converte todos os dados para a mesma base. A partir dos resultados dos potenciais de impacto, os cálculos de normalização são realizados pela divisão desses dados pelo valor de normalização indicado pelo próprio ReCiPe 2016. Desse modo, os potenciais de impacto ambiental normalizados trazem maior facilidade para o cálculo de ponderação que é o estágio seguinte.

Os resultados dos cálculos de normalização dos potenciais de impacto ambiental são apresentados em impacto por pessoa por ano (p/yr). Nesta pesquisa, a normalização deu-se apenas nas categorias de eutrofização de água doce, ecotoxicidade de água doce, toxicidade humana, ecotoxicidade marinha e ecotoxicidade terrestre. Sendo possível classificar todos os resíduos e em todas as categorias em uma mesma base de dados, conforme os resultados obtidos e apresentados na tabela 6. Nota-se que, a cinza do bagaço é o único resíduo que não apresenta impacto em uma das categorias, a de eutrofização de água doce.

Tabela 10 - Potenciais de impacto normalizados

Resíduo	Eutrofização de água doce (p/yr)	Ecotoxicidade de água doce (p/yr)	Toxicidade humana (p/yr)	Ecotoxicidade marinha (p/yr)	Ecotoxicidade terrestre (p/yr)
Vinhaça	1,882E+04	1,062E+04	1,457E+06	1,049E+05	8,849E+05
Torta	3,914E+05	6,391E+06	4,139E+12	2,125E+07	1,040E+09
Cinzas	0,000E+00	1,032E+03	1,381E+08	2,987E+02	1,342E+04
Águas Residuais	5,313E+02	9,102E+04	1,319E+10	1,005E+06	7,657E+06
Lodo ETE	6,327E+03	1,034E+05	6,687E+10	3,437E+05	1,682E+07

Fonte: Autor (2021)

5.4. Ponderação dos potenciais de impacto ambiental

Com os potenciais de impacto normalizados e multiplicados aos pesos de ponderação indicados pelo ReCiPe 2016 (tabela 11), foi possível ponderar esses valores e obter os resultados para cada resíduo. A partir de então, tornou-se possível realizar o cálculo do índice de desempenho ambiental da indústria de EAB para cada resíduo destinado à fertirrigação e fertilização do solo através da equação 1 do Índice de Desempenho Ambiental da indústria de EAB (IEAB).

Tabela 11 - Valor relativo do potencial de impacto ponderado

Resíduo	Potencial de impacto ambiental ponderado (p/yr)
Vinhaça	8,449E+08
Torta	1,380E+10
Cinzas	4,603E+05
Águas Residuais	4,400E+07
Lodo ETE	2,229E+08

Fonte: Autor (2021)

5.5. Cálculo do IEAB de resíduos destinados ao solo

Com posse dos dados apresentados anteriormente, foi possível calcular o IEAB pela equação 1 para os resíduos destinados ao solo da indústria de EAB teste, assim como a correlação com as informações da BIBM, fornecendo um resultado do índice aplicado à bacia hidrográfica onde a usina é pertencente. A tabela 12, apresenta os resultados de V_i , C e IEAB.

Tabela 12 - Resultados para a empresa de EAB teste

Resíduo	Ponderação Relativa (V_i)	Coefficiente de fragilidade da BHBM (C)	IEAB (kg.yr/km².p)
Vinhaça	8,449E+08	4,31E+02	3,28E-04
Torta	1,380E+10	2,36E+01	3,66E-04
Cinzas	4,603E+05	5,63E+01	4,61E+00
Águas Residuais	4,400E+07	4,31E+02	6,30E-03
Lodo ETE	2,229E+08	4,78E+01	1,12E-02

Fonte: Autor (2021)

Os resultados de IEAB mostram a medição dos impactos ambientais gerados por cada resíduo avaliado de acordo com sua capacidade de degradação ao meio ambiente, sendo importante salientar que o índice é inversamente proporcional V_i e a C uma vez que indica a massa do resíduo por quilômetro quadrado, isso é, quanto menor o valor de IEAB maior é o impacto causado pelo resíduo. Isso por relacionar os resíduos de forma a cobrirem 1 km² de área, onde quanto mais impactante for o resíduo menor é a quantidade que se pode aplicar a uma mesma área.

Em vista disso, a partir da análise destes resultados nota-se que o resíduo com maior ponderação relativa calculado foi a torta de filtro devido ao auto índice de toxicidade humana de seus componentes químicos. O processo de filtração do lodo produz a torta que é composta por carbono, nitrogênio, enxofre, fósforo, magnésio, potássio, cálcio, ferro, cádmio, manganês, zinco, cobre, chumbo e cromo os quais são elementos impactantes ao solo e tem grande potencial de impacto ambiental nas categorias de eutrofização de água doce, ecotoxicidade de água doce, toxicidade humana, ecotoxicidade marinha e ecotoxicidade terrestre.

Porém, quando realizado o cálculo para se atingir o IEAB a torta de filtro passa a ser o segundo resíduo com maior impacto ambiental. Isso ocorre, porque a proporção de aplicação é maior que a do resíduo mais impactante, a vinhaça. Sendo assim, a torta de filtro da empresa teste tem maior impacto quando avaliado apenas pela sua composição química em disposição ao solo, sem outras premissas, mas quando utilizado dados de avaliação do local de aplicação, no caso a BHBM, seu impacto ambiental é reduzido tornando-se menor que o impacto ambiental gerado pela vinhaça.

Por sua vez, a vinhaça é o segundo resíduo que apresenta maior V_i de impacto ambiental. A destilação do vinho para produção de etanol gera a vinhaça, a qual é composta

pelos elementos: bário, cobre, cromo, mercúrio, molibdênio, níquel, zinco, cádmio, chumbo, ferro, fenol, amônia, fósforo e fosfato. Assim como a torta de filtro, seu alto potencial impacto está nas categorias de eutrofização de água doce, ecotoxicidade de água doce, toxicidade humana, ecotoxicidade marinha e ecotoxicidade terrestre. Vale ressaltar que, a vinhaça é o principal resíduo utilizado para fertirrigação do cultivo da cana-de-açúcar, bem como é o mais gerado pelo processo industrial de EAB e tem maior área de aplicação.

Desse modo, é plausível o resultado quando avaliado pelo IEAB. A vinhaça torna-se o resíduo mais impactante em termos ambientais. Sendo importante salientar que, a vinhaça é o único dos resíduos avaliados que possui uma norma técnica, emitida pela CETESB, para cálculo da dosagem máxima de aplicação no solo como produto de fertirrigação. Além deste cálculo de aplicação, também existem normas para os tanques de depósito, assim como é necessário o licenciamento e alvará para armazenamento e utilização desse efluente.

A vinhaça é um composto muito discutido e estudado, tendo várias propostas de utilização alternativas, como é o caso da geração de energia através de sua biodigestão e queima dos gases liberados neste processo. Todavia, para esse estudo a vinhaça é o resíduo com maior impacto ambiental para a bacia hidrográfica, porém não altera a fragilidade ambiental emergente da BHBM avaliada por Souza e Rebelato (2020). Isso devido a sua quantidade máxima de dosagem estar muito abaixo da quantidade estabelecida pelo cálculo indicado pela norma, onde se resultou em uma taxa de dosagem máxima de aproximadamente $850 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, sendo que a unidade industrial de EAB utilizada como teste, informa aplicação média de aproximadamente $105 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$.

O terceiro resíduo avaliado, são as cinzas e fuligens provenientes da queima do bagaço. Trata-se de um resíduo produzido pelas caldeiras de geração de vapor, esse por sua vez é utilizado na fertilização e adubação do solo, tendo em sua composição química, boro, cobre, ferro, manganês, zinco, carbono, oxigênio, magnésio, alumínio, silício, enxofre, potássio, cálcio e ferro. Embora possua vários elementos, esse resíduo é o que apresentou menor impacto ambiental dentre todos os resíduos estudados nessa pesquisa.

A utilização das cinzas e fuligens das caldeiras pode ocorrer de forma a ser realizada apenas com o próprio resíduo ou misturados a outros compostos como por exemplo a torta de filtro e outros fertilizantes.

As águas residuais, são efluentes gerados por várias etapas do processo produtivo industrial de EAB. Esse efluente é adicionado à vinhaça e utilizado na fertirrigação. Sua composição contém, fósforo, potássio, nitrogênio, sódio, cálcio, magnésio, cloro, bicarbonato, chumbo, cobre e nitrogênio amoniacal. Embora possua vários elementos químicos, as águas

residuais foi o terceiro resíduo com menor impacto ambiental, de acordo com o resultado de IEAB.

Por último, o lodo de esgoto, proveniente da ETE e das piscinas de decantação de efluentes, é o segundo resíduo menos impactante de acordo com a avaliação de IEAB. Apresentando resultado de $1,12E-02$ kg/km².

Esse resíduo é composto por nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, manganês, ferro, cobre e zinco e sua utilização é feita inserindo-o a outros compostos como a torta de filtro por exemplo. Além de ter o menor impacto ambiental dentre os resíduos avaliados, esse é o menos produzido pela indústria teste.

6. CONCLUSÕES

O propósito desta pesquisa foi desenvolver um índice de avaliação de desempenho ambiental para ser aplicado na indústria de produção de açúcar, etanol e bioenergia (EAB) através do processamento da cana-de-açúcar. Para tanto, o índice de desempenho ambiental para a indústria de EAB (IEAB), foi elaborado de forma a expressar o grau de impacto ambiental de cada resíduo destinado ao solo de produção agrícola da cana-de-açúcar gerados pela indústria de EAB.

Os resultados dos cálculos de impacto ambiental dos resíduos da produção de EAB, expuseram potenciais resultantes nas categorias de eutrofização de água doce, ecotoxicidade de água doce, toxicidade humana, ecotoxicidade marinha e ecotoxicidade terrestre.

A normalização foi a divisão dos potenciais de impacto ambiental I_{ij} pelos fatores de normalização indicados pela estrutura metodológica do ReCiPe 2016, onde resultou nos potenciais de impacto em mesma ordem dimensional de cada resíduo em cada categoria.

Para a ponderação, foram relacionados os potenciais de impacto ambiental com os pesos relativos de cada resíduo, dados esses também retirados da metodologia ReCiPe 2016 que prevê essa necessidade de relatividade entres as informações.

O cálculo do IEAB foi criado para avaliação de desempenho ambiental (ADA), sendo imprescindível a ordenação das entradas para o índice, expondo-o em um mecanismo matemático para ADA da indústria de EAB. Assim como, foi desenvolvido para relacionar os dados dos resíduos e efluentes avaliados com os dados de fragilidade emergente da bacia hidrográfica do Baixo Mogi (BHBM) onde a indústria de EAB teste encontra-se localizada, propiciando um método de medição ambiental das disposições dos resíduos e efluentes gerados e aplicados ao solo.

As variáveis presentes na formulação do índice elaborado são: o fator de impacto potencial ponderado (V_i); o impacto correspondente à dispersão geográfica (A_i); o número de resíduos n ; coeficiente de fragilidade ambiental da BHBM (C); massa total em kg de resíduos e efluentes produzidos pela empresa (R).

A utilização da metodologia proposta, garante a avaliação do impacto ambiental quanto a aplicação dos resíduos e efluentes no solo agrícola, o acompanhamento do desempenho ambiental e a quantidade adequada de massa dos resíduos e efluentes em disposição ao meio ambiente.

O teste do IEAB possibilitou apurar 5 resíduos gerados pela indústria de EAB avaliada com destinação à fertirrigação e fertilização do solo de cultivo agrícola da cana-de-açúcar,

sendo esses resíduos avaliados de maneira individual, quanto quando relacionados com os dados de fragilidade da bacia hidrográfica em estudo, sem alterar seu nível de fragilidade ambiental.

Desta forma, o método exposto traz a possibilidade de consideração das empresas de produção de EAB a aumentarem seus esforços quanto a gestão ambiental, a fim de ampliar sua eficiência de ajustes ambientais direcionada à destinação dos resíduos e efluentes no solo, gerados por seus processos de produção industrial.

Entre as colaborações desta pesquisa, encontram-se as características principais do processo industrial de produção de EAB, assim como todos os resíduos e efluentes gerados com aplicação no solo de cultivo agrícola. Ainda, promovendo o desenvolvimento de um índice de desempenho ambiental aplicável a este tipo indústria, que pode ser ele aplicada à empresa teste ou a quaisquer outras empresas do setor.

O IEAB é evidenciado como uma metodologia satisfatória para ADA do setor de produção de EAB, sua utilização tem capacidade de fazer com que as empresas deste setor consigam enxergar sua gestão ambiental, aumentar seus esforços quanto a preservação do meio ambiente e aperfeiçoar sua imagem perante seus clientes e a sociedade.

6.1. Limitações da pesquisa e sugestões para estudos futuros

Este trabalho traz como limitação o estudo dos resíduos e efluentes gerados pela indústria de EAB com destino ao solo para uso de tratamentos culturais da cana-de-açúcar (fertilização e irrigação), e a correlação com os dados da bacia hidrográfica onde a unidade industrial modelo está alocada e onde são descartados esses materiais. Porém, não é suficiente para avaliar de maneira mais precisa o desempenho ambiental dos locais onde os resíduos gerados pela indústria são despejados. De tal modo, é sugerido para trabalhos futuros a análise aprofundada das áreas de descarte desses resíduos e efluentes. Assim sendo, a avaliação ambiental deste tipo de organização fica mais completa e possibilita o melhor gerenciamento ambiental.

Com isso, a abordagem de ADA para a indústria de EAB, torna-se mais completa de modo a proporcionar uma avaliação que engloba toda a cadeia produtiva, analisando todos os processos desde o plantio e a colheita, passando pelo processamento industrial até aos tratamentos culturais, por meio da fertilização e irrigação com a utilização dos resíduos e efluentes gerados pela indústria EAB.

Em suma, é necessário a aplicação de forma prática e objetiva do índice de avaliação de desempenho ambiental nas empresas produtoras de EAB a partir da cana-de-açúcar. Assim estas organizações poderão realizar o correto gerenciamento dos riscos ambientais que suas operações trazem para o meio ambiente, garantindo sua preservação natural, o uso responsável de recursos e o desenvolvimento de metodologias mais sustentáveis.

6.2. Implicações gerenciais

A metodologia empregada nesse trabalho, pode ser utilizada para aferir o impacto ambiental provocado por qualquer indústria de produção de EAB.

Ainda, os resultados obtidos serão apresentados para representantes da organização utilizada como objeto de teste, bem como um plano de melhoria para controle da geração e despejo de resíduos e efluentes.

Logo, a avaliação de desempenho ambiental passará a ser realizada de maneira eficiente e satisfatória, assim como a resolução de falhas por meio dos resultados expostos por essa dissertação.

REFERÊNCIAS

- ABDALA, Thais Oliveira. **Análise comparativa dos processos de produção de etanol anidro**. 2017. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.
- ADAMI, S. F. et al. Environmental fragility and susceptibility mapping using geographic information systems: applications on Ribeirão do Pinhal watershed (Limeira, State of São Paulo). **Acta Scientiarum**, p. 433-440, 2012.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Manual de conservação e reuso de água na agroindústria sucroenergética**. Brasília: ANA, 2009. 288 p.
- AMSTERDAM. GLOBAL REPORTING INITIATIVE. **Diretrizes para Relatório de Sustentabilidade**. São Paulo: GRI, 2006. 50 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 46 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14031**: Gestão ambiental – Avaliação de desempenho ambiental - Diretrizes. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 44 p.
- BALEŽENTIS, T. et al. Is the Lithuanian economy approaching the goals of sustainable energy and climate change mitigation? Evidence from DEA-based environmental performance index. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 116, p. 23-31, 10 mar. 2016.
- BENITES, L. L. L.; POLO, E. F. A sustentabilidade como ferramenta estratégica empresarial: governança corporativa e aplicação do Triple Bottom Line na Masisa. **Revista de Administração da UFSM**, [S. l.], v. 6, p.195-210, maio 2013.
- BEZERRA, A. B.; SILVA, L. T. M. S.; SALES, L. G. L. Uso de Geotecnologias para o mapeamento da Fragilidade Ambiental da SubBacia do Rio Piancó, PB. In: I Congresso Internacional da Diversidade do Semiárido. Campina Grande. **Anais [...]**.Campina Grande, 2016.
- BORTOLUZZI, S. C.; ENSSLIN, S. R.; ENSSLIN, L. Performance Evaluation of Tangible and Intangible Aspects of the Market Area: a case study in a medium industrial company. **Review of Business Management**, [S. l.], v. 12, n. 37, p. 425-446, jan. 2011
- BORTOLUZZI, S. C. et al. Structuring of a Performance Assessment Model for the Management of Accountancy Programs at Universidade Tecnológica Federal do Paraná. **Revista de Educação e Pesquisa em Contabilidade**, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 36–57, 2013.
- CAMPOS, L. M. S.; MELO, D. A.; MEURER, S. A. A importância dos indicadores de desempenho ambiental nos sistemas de gestão ambiental (SGA). In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE, 9., 2007, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba: FEA/USP, 2007. p. 26-21.

CARVALHO, A. et al. From a literature review to a framework for environmental process impact assessment index. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 64, p. 36-62, 1 fev. 2014.

CARVALHO, P. G. M.; BARCELLOS, F. C. Mensurando a Sustentabilidade. *In*: MAY, P. (org.). **Economia do Meio ambiente: teoria e prática**. 2. ed. Rio de Janeiro: Campus-Elsevier, 2010. Cap. 5, p. 40.

CASTILLO-VERGARA, M. et al. Implementation of a Cleaner Production Agreement and impact analysis in the grape brandy (pisco) industry in Chile. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 96, p. 110-117, 1 jun. 2015.

CHACÓN, E. A. V.; MENDONÇA, E. S.; SILVA, R. R.; LIMA, P. C.; CANTARUTTI, R. B. Decomposição de fontes orgânicas e mineralização de formas de nitrogênio e fósforo. **Rev. Ceres**, Viçosa, v. 58, n. 3, p. 373-383, mai/jun, 2011.

CHRISTOFOLETTI, C. A. **Avaliação da toxicidade de resíduos industriais e urbanos aplicados na agricultura**. 2013. 178 f. Tese - (doutorado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Instituto de Biociências de Rio Claro, 2013.

CÓ JÚNIOR, C.; MARQUES, M. O.; TASSO JÚNIOR, L. C. Efeito residual de quatro aplicações anuais de lodo de esgoto e vinhaça na qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, [S.L.], v. 28, n. 1, p. 196-203, mar. 2008.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **P4.231: Vinhaça – Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola**. 3 ed. São Paulo: Cetesb, 2015. 15 p.

COSTA, S.S.; FARIA JÚNIOR, E. Análise de risco no processo de manutenção corretiva em um secador de açúcar úmido. **Intercursos**, Ituiutaba, v. 12, n. 1, p. 63-75, jun. 2012.

CREMASCO, M. A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2014.

CUNHA, C. E. S. C. P. D.; RITTER, E.; FERREIRA, J. A. The use of performance indicators in the evaluation of the operational. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 2, p. 345-360, abr. 2020.

DIAS, M. O. S. **Simulação do processo de produção de etanol a partir do açúcar e do bagaço, visando a integração do processo e a maximização da produção de energia e excedentes do bagaço**. 2008. 253p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP.

EPELBAUM, M. Sistemas de gestão ambiental. *In*: VILELA JÚNIOR, A.; DEMAJOROVIC, J. **Modelos e ferramentas de gestão ambiental: desafio e perspectivas para as organizações**. 3. ed. São Paulo: Senac, 2013. p. 115-146.

ENSSLIN, S. R. et al. Uma metodologia multicritério (MCDA-C) para apoiar o gerenciamento do capital intelectual organizacional. **RAM, Rev. Adm. Mackenzie (Online)**, São Paulo, v. 9, n. 7, p. 136-162, dez. 2008.

EYKELBOSH, A. J. et al. Biochar from sugarcane filtercake reduces soil CO₂ emissions relative to raw residue and improves water retention and nutrient availability in a highly-weathered tropical soil. **PLoS One**, [S. l.], v. 9, n. 6, p. e98523, 4 jun. 2014.

FAGUNDES, A. B. et al. Environmental performance evaluation of organizations with focus on industrial waste management: A contribution to the implementation of the national solid waste policy. **Espacios**, [S. l.], v. 37, n. 25, p. 1-11, 2016.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (Rome). **Rankings**: countries by commodity. 2020. Disponível em: http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity. Acesso em: 28 dez. 2020.

FEDERAÇÃO E CENTRO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Cartilha**: Indicadores de Desempenho Ambiental na Indústria. In: Câmara Ambiental da Indústria Paulista. São Paulo: FIESP; CIESP, 2003. 38p.

FEIL, A. A.; SCHREIBER, D. Análise da estrutura e dos critérios na elaboração do índice de Sustentabilidade. **Sustentabilidade em Debate**, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 30-43, 1 set. 2017a.

FEIL, A. A.; SCHREIBER, D. Sustentabilidade e desenvolvimento sustentável: desvendando as sobreposições e alcances de seus significados. **Cadernos Ebape.br**, [S. l.], v. 15, n. 3, p.667-681, jul. 2017b.

FINGUERUT, J., MEIRELLES, A. J. A., GUIRARDELLO, R., COSTA, A. C. **Fermentação, hidrólise e destilação**. Cap. 13, 2008.

FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002. Apostila.

FREITAS, E. P. et al. Indicadores ambientais para áreas de preservação permanente. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.17, n. 4, p. 443-449, 2013.

GALLOPÍN, G. C. Indicators and their use: information for decision-making. In: MOLDAN, B.; BILLHARZ, S. (ed.). **Sustainability Indicators**: report on the project on indicators of sustainable development. Chichester: SCOPE 58; Wiley, 1997. Cap. 1. p. 13-27.

GARCÍA-ÁLVAREZ, M. T.; MORENO, B. Environmental performance assessment in the EU: a challenge for the sustainability. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 205, p. 266-280, 20 dez. 2018.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. (org.). **Métodos de pesquisa**. Porta Alegre: UFRGS, 2009. 120 p.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GOEDKOOP, M.; HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M.; SCHRYVER, A.; STRUIJS, J. RECIPE: a life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level. **Ministerie van Volkshuisvesting**. (Report, 1), 2009.

GONÇALVES, D. B. **Mar de Cana, Deserto Verde? Dilemas do Desenvolvimento Sustentável na Produção Canavieira Paulista**. 2005, 259 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

GONZÁLEZ-ARTEAGA, T.; CALLE, R. D. A.; MARTÍNEZ, L. Managing Interacting Criteria: Application to Environmental Evaluation Practices. **Axioms**, [S. l.], v. 7, n. 4, p. 1-24, 2018.

HAYES, R. H.; UPTON, D. M. Operations-Based Strategy. **California Management Review**, [S. l.], v. 40, n. 4, p. 8-25, 1998.

HEINK, U.; KOWARIK, I. What are indicators? On the definition of indicators in ecology and environmental planning. **Ecological Indicators**, Amsterdam, v. 10, p. 584-593, 2010.

HOQUE, N. et al. Environmental Life Cycle Assessment of Alternative Fuels for Western Australia's Transport Sector. **Atmosphere**, [S. l.], v. 10, n. 7, p. 1-27, 15 jul. 2019.

IBGE - EMBRAPA - **Mapa de Solos do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2001 - Escala 1:5.000.000.

INPE. Topodata. **Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil**. São José dos Campos, SP, 2011. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>. Acesso em 20 jul. 2020.

JABBOUR, A. B. L. S. et al. Brazil's new national policy on solid waste: challenges and opportunities. **Clean Technologies And Environmental Policy**, [S. l.], v. 16, n. 1, p. 7-9, 29 mar. 2013.

JOINT RESEARCH CENTRE – JRC. **Analysis of existing environmental impact assessment methodologies for use in life cycle assessment: background document**. (ILCD Handbook), 2010.

KAPLAN, R. S.; NORTON, D. P. Transforming the BSC from performance measurement to strategic management: part I. **Accounting Horizons**, [S. l.], v. 15, n. 1, p. 87–104, 2001.

KAWAKUBO, F. S.; MORATO R. G.; CAMPOS K. C.; LUCHIARI A.; ROSS J. L. S. Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento. *In*: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. São José dos Campos. **Anais [...]**. Goiania: INPE; 2005. p. 2203-2210.

LANGFORD, R. Environmental performance indicators: key features of some recent proposals. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, [S. l.], v. 102, p. 409-418, 2007.

LAVORATO, M. L. D. A. **A importância dos indicadores de desempenho ambiental para a competitividade das empresas e iniciativas ambientais**. Mais Projetos. São Paulo, p. 8. [2009].

LIM, C. I.; BISWAS, W. K. An evaluation of holistic sustainability assessment framework for palm oil production in Malaysia. **Sustainability**, [S. l.], v. 7, n. 12, p. 16561-16587, 16 dez. 2015.

LIM, C. I.; BISWAS, W. K. Development of triple bottom line indicators for sustainability assessment framework of Malaysian palm oil industry. **Clean Technologies and Environmental Policy**, [S. l.], v. 20, n. 3, p. 539-560, 11 nov. 2017.

LOPES, C. H. (org.). **Tecnologia de produção de açúcar de cana**. São Carlos: EdUFSCar, 2011. 183 p. (Coleção UAB-UFSCar).

LOPES, C. H.; GABRIEL A.V. M. D.; BORGES M. T. M. R. **Produção de etanol a partir da cana de açúcar**. UFSCAR, São Carlos, 2011.

MACEDO, P.C. **Avaliação do desempenho de argamassas com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. 2009. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

MACHADO, S. S. **Tecnologia da Fabricação do Açúcar**. Inhumas: IFG; Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2012. 56 p.

MANDAL, S.; DAS, B. K.; HOQUE, N. Optimum sizing of a stand-alone hybrid energy system for rural electrification in Bangladesh. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 200, p. 12-27, nov. 2018.

MANELLA, J. N. A. **Glossário de termos técnicos usados na indústria açucareira e alcooleira**. Maracaí: Markgraf, 2012.

MANNIGEL, A. R. et al. Fator de erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 24, n. 5, p. 1335-1340, 2002.

MAPBIOMAS (Brasil). **Mapbiomas**. 2018. Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org>. Acesso em: 02 jan. 2020.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de Pesquisa**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2008. 296 p.

MARINHO, J. F. U. et al. Sugar cane vinasse in water bodies: Impact assessed by liver histopathology in tilapia. **Ecotoxicology And Environmental Safety**, [S. l.], v. 110, p. 239-245, dez. 2014.

MARQUES, J. F.; SKORUPA, L. A.; FERRAZ, J. M. G. **Indicadores de sustentabilidade em agroecossistemas**. Jaguariúna: Embrapa, 2003. 281 p.

MARTINS, K. P. **Índice de avaliação do desempenho ambiental do processo produtivo de papel e celulose**. 2020. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Administração, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2020.

MASERA, O.; ASTIER, M.; LÓPEZ-RIDAURA, S. **Sustentabilidad y manejo de recursos naturales: el marco de evaluación MESMIS**. [S. l.]: Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada, 2000. 109 p.

MELO, F. A. D.; MARION, P. Qualidade da cana-de-açúcar de fornecedores em Estados do Nordeste do Brasil após a implantação do sistema de pagamento de cana pelo teor de sacarose. **Cadernos Ômega**. Série Agronomia, Recife, n. 5, p.59-83, 1992.

MILANEZ, Artur Yabe et al. De promessa a realidade: como o etanol celulósico pode revolucionar a indústria da cana-de-açúcar: uma avaliação do potencial competitivo e sugestões de política pública. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n.41, p. 237-294, mar. 2015.

MOLDAN, B. et al. How to understand and measure environmental sustainability: indicators and targets. **Ecological Indicators**, [S. l.], v. 17, p. 4-13, 2012.

MORESI, E. **Metodologia da Pesquisa**. Brasília: Universidade Católica de Brasília – UCB, 2003. 108 p.

MOTA, Marcelo Moreira. **Aumento de geração de vapor em uma caldeira de biomassa: estudo em função da estabilidade operacional**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização (Indústria 4.0) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2020.

MOURA, Luiz Antônio Abdalla de. **Qualidade e gestão ambiental: sustentabilidade e implantação da ISO 14.001**. 6. ed. São Paulo: Del Rey, 2014. 418 p.

MURAD, M. Q. **Aplicação de chapisco em moenda de cana de açúcar com o processo FCWA**. 2015. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

NADRUZ, V. D. N. et al. Environmental performance evaluation based on environmental management practices for the qualification of power transmission line contractor hiring. **Exacta - EP**, São Paulo, v. 15, n. 2, p. 187-202, 2017.

NIMMANTERDWONG, P. et al. Environmental performance assessment of Napier grass for bioenergy production. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 165, p. 645-655, 1 nov. 2017.

NOLASCO JUNIOR, J. **Desenvolvimento de processo térmico otimizado para mosto de caldo de cana na fermentação alcoólica**. 2005. 181p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas, SP.

NOVACANA (Curitiba). **Como é feito o processamento da cana-de-açúcar nas usinas**. [2020?]. Disponível em: <https://www.novacana.com/usina/como-e-feito-processamento-cana-de-acucare-acucar>. Acesso em: 13 jan. 2021.

OLIVEIRA, D. B. B. et al. Multi-criteria analysis in the strategic environmental assessment of the sugar and alcohol sector. **Acta Scientiarum: Technology**, [S. l.], v. 34, n. 3, p. 303-311, 15 fev. 2012.

OLIVEIRA, L. D. M. **Desenvolvimento de um índice para avaliação do desempenho ambiental do processo produtivo da indústria cerâmica**. 2020. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Administração, Universidade Estadual de São Paulo, Jaboticabal, 2020.

OLIVEIRA, O. H. **Parâmetros genéticos do crescimento inicial da cana-de-açúcar irrigada com água residuária**. 2017. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) - Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, Paraíba, Brasil, 2017.

OMENA, S. P. F. et al. Tratamento de águas de lavagem de cana-de-açúcar, visando a sua reutilização. In: Congresso Brasileiro De Águas Subterrâneas, 8, 2004, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: ABAS, 2004. v. 1, p. 1-17.

PAYNE, J.H. **Unit Operations in Cane Sugar Production**. 4. ed. New York: Elsevier Science, 1982. 203 p.

QUAL a menor extração. **Alcoolbrás**, São Paulo, v. 83, n. 1, p. 44-49, fev. 2004. Disponível em: http://revistaalcoolbras.com.br/edicoes/ed_83/ed_83.html. Acesso em: 14 out. 2021.

RAMALHO, S. C.; SELLITTO, M. A. Environmental performance assessment of a company of aluminum surface treatment. **Revista Produção Online**, Florianópolis, v. 13, n. 3, p. 1034-1059, set. 2013.

REBELATO, M. G.; MADALENO, L. L.; RODRIGUES, A. M. Um estudo sobre a aplicabilidade do sistema puxado de produção na fabricação de açúcar. **Revista Gestão Industrial**, Ponta Grossa, v. 7, n. 1, p. 228-246, 15 abr. 2011.

REBELATO, M. G.; MADALENO, L. L.; RODRIGUES, A. M. Avaliação Do Desempenho Ambiental dos Processos Industriais de Usinas Sucoenergéticas: um Estudo na Bacia Hidrográfica do Rio Mogi Guaçu. **Revista de Administração da UNIMEP**, [S. l.], v. 12, n. 3, 2014. p. 122-151.

REBELATO, M. G.; MADALENO, L. L.; RODRIGUES, A. M. Análise do desempenho ambiental das usinas sucoenergéticas localizadas na bacia hidrográfica do Rio Mogi Guaçu. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S. l.], v. 21, n. 3, p. 579-591, set. 2016.

REBELATO, M. G., RODRIGUES, A. M., THOMAZ, A. G. B., SARAN, L. M., MADALENO, L. L., OLIVEIRA, O. J., Developing an Index to Assess Human Toxicity Potential of Sugarcane Industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 209, p. 1274-1284, 2019.

REIN, P. **Cane Sugar Engineering**. 2. ed. Berlin: Verlag Dr. Albert Bartens KG, 2016. 945 p.

REIS, J. A.; SELLITTO, M. A. Environmental performance assessment in machinery manufacturer. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 19, n. 2, p. 1589-1599, ago. 2015.

RIBEIRO, C. A. F.; BLUMER, S. A. G.; HORII, J. **Fundamentos de tecnologia sucroalcooleira: tecnologia do açúcar**. Piracicaba: USP, 1999. 70 p.

RÍOS, A. -M.; PICAZO-TADEO, A. J. Measuring environmental performance in the treatment of municipal solid waste: the case of the european union-28. **Ecological Indicators**, [S. l.], v. 123, n. 107328, p. 1-10, abr. 2021. Elsevier BV.

RIVM - RIJKSINSTITUUT VOOR VOLKSGEZONDHEID EN MILIEU (Bilthoven). **ReCiPe 2016**. 2018. Disponível em: <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/downloads>. Acesso em: 05 ago. 2020.

ROSS J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, p. 63-74, 1994.

ROSS, J. L. S. Landforms and environmental planning: Potentialities and Fragilities. **Revista do Departamento de Geografia**, p. 38-51, 2012.

SANTOS, D. O.; FREITAS, E. B. A Internet das Coisas e o Big Data Inovando os Negócios. **REFAS: Análise e Desenvolvimento de Sistemas**, São Paulo, v. 3, n. 1, p.1-18, out. 2016. Quadrimestral.

SANTOS, L. M. **Manual para tratamento de caldo**. Barra do Bugres, 2006. 6 p.

SARADÓN, S. J.; FLORES, C. C. Evaluación de la sustentabilidad emagroecosistemas: una propuesta metodológica. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Porto Alegre, n. 4, p. 19-28, 2009.

SCARPIN, N. E. **Avaliação de desempenho ambiental: um estudo de caso em uma empresa paulista do setor cerâmico**. 2021. 67 f. Dissertação (Mestrado em Administração) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2021.

SEIFFERT, M. E. B. **ISO 14001 Sistemas de gestão ambiental: implantação objetiva e econômica**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2011. 256 p.

SENAI-RS. **Implementação de programas de produção mais limpa**. Porto Alegre, Centro Nacional de Tecnologias Limpas SENAI-RS/UNIDO/INEP, 2003. 42 p. il.

SILALERTRUKSA, T.; PONGPAT, P.; GHEEWALA, S. H. Life cycle assessment for enhancing environmental sustainability of sugarcane biorefinery in Thailand. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 140, n. 2, p. 906-913, 1 jan. 2017.

SILVA, A. W. L.; SELIG, P. M.; MORALES, A. B. T. Indicadores de sustentabilidade em processos de avaliação ambiental estratégica. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v.15, n.3, p.75-96, set.- dez. 2012.

SILVA, C. E. P. M. **Avaliação da incerteza de indicadores de desempenho ambiental: estudo de caso**. 2011, 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

SILVA, R. B.; WOLQUIND, C. S.; SILVA, F. S.; PORTO, A. G.; SILVA, F. T. C. Aplicação da produção mais limpa no processo de clarificação do caldo de cana para produção de açúcar. **Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, Bauru, v. 4, n. 1, p. 59-71, mar. 2009.

SILVA, V. C. B.; MACHADO, P. S. SIG na Análise Ambiental: Susceptibilidade Erosiva da Bacia Hidrográfica do Córrego Mutuca, Nova Lima – Minas Gerais. **Revista de Geografia**, v. 31, n. 2, p. 66-87, 2014.

SINGH, R. K. et al. An overview of sustainability assessment methodologies. **Ecological Indicators**, [S. l.], v. 15, n. 1, p. 281-99, 2012.

SOLEDADE, M. G. M. et al. ISO 14000 e a Gestão Ambiental: uma reflexão das práticas ambientais corporativas. *In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE*, 9, 2007, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba: FEA/USP, 2007. p. 1-15.

SONG, ML. et al. Environmental performance evaluation with big data: theories and methods. **Annals Of Operations Research**, [S. l.], v. 270, n. 1-2, p. 459-472, 2 mar. 2016.

SOSA ARNAO, Juan Harold. **Caldeiras aquatubulares de bagaço**: estudo do sistema de recuperação de energia. 2007. 233 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP.

SOUZA, E. G. S.; REBELATO, M. G. Avaliação da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Baixo Mogi com uso da geotecnologia. **Brazilian Journal Of Animal And Environmental Research**, Curitiba, v. 4, n. 1, p. 411-426, 2021.

SPERLING, T. L. V.; SPERLING, M. V. Proposição de um sistema de indicadores de desempenho para avaliação da qualidade dos serviços de esgotamento sanitário. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S. l.], v. 18, n. 14, p. 313-322. 2013.

THOMAZ, A. G. B. **Construção de uma estrutura metodológica para avaliação de desempenho ambiental (ADA) de indústrias sucroenergéticas**: um estudo multicase. 2017. 113 f. Dissertação (Mestrado em Administração) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2017.

TIBOR, T.; FELDMAN, I. **ISO 14000**: um guia para as novas normas de gestão ambiental. São Paulo: Futura, 1996. 302 p.

TODOROV, V.; MARINOVA, D. Modeling sustainability. **Mathematics and Computers in Simulation**, [S. l.], v. 1, n. 7, p. 1397-408, 2011.

TONIOLO, B. P.; SILVA, D. C. C.; LOURENÇO, R. W. Uso de geotecnologias para delimitação de susceptibilidade erosiva na Unidade de Negócio Oeste SABESP. *In: III Simpósio Brasileiro Online de Gestão Urbana*. **Anais [...]** São Paulo, 2019. p. 489-502.

USAPEIN, P.; CHAVALPARIT, O. Evaluating the performance of 3R options to reduce landfill wastes using the 3R indicator (3RI): case study of polyethylene factories in Thailand. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, [S. l.], v. 17, n. 2, p. 303–311, 2015.

VALLE, I. C.; FRANCELINO, M. R.; PINHEIRO, H. S. K. Mapeamento da fragilidade ambiental na bacia do Rio Aldeia Velha, RJ. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 2, p. 295-308, 2016

VÁSQUEZ, M. P. **Desenvolvimento de Processo de Hidrólise Enzimática e Fermentação Simultâneas para a Produção de Etanol a Partir de Bagaço de Cana-deAçúcar**. 2007. 205 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2007.

VITTI, G.C.; LIMA, E.; CICARONE, F. Cálcio, magnésio e enxofre. *In*: MANLIO, S.F. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p.299-325.

YANG, M. et al. A rough set-based quality function deployment (QFD) approach for environmental performance evaluation: a case of offshore oil and gas operations. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 19, p. 1513-1526, set. 2011.

YEO, R. The tangibles and intangibles of organizational performance. **Team Performance Management**, [S. l.], v. 9, p. 199–204, 2003.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.

ZUO, X. et al. Environmental Performance Index at the Provincial Level for China 2006–2011. **Ecological Indicators**, [S. l.], v. 75, p. 48-56, abr. 2017.