UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Instituto de Ciência e Tecnologia
Campus Sorocaba - ICTS/Unesp

Gabriel Vasovino Burger

Estimativa do grau de sustentabilidade de países através de indicadores ambientais e humanos com base no modelo de avaliação *Fuzzy* SAFE

Sorocaba/SP
2022

GABRIEL VASOVINO BURGUER

Estimativa do grau de sustentabilidade de países através de indicadores ambientais e humanos com base no modelo de avaliação *Fuzzy* SAFE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista (UNESP), como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

ORIENTADOR: Prof. Dr. José Arnaldo Frutuoso

Sorocaba/SP

2022

B954e

Burger, Gabriel Vasovino

Estimativa do grau de sustentabilidade de países através de indicadores ambientais e humanos com base no modelo de avaliação Fuzzy SAFE / Gabriel Vasovino Burger. -- Sorocaba, 2022

25 p.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba

Orientador: José Arnaldo Frutuoso

1. Sustentabilidade. 2. Sistema PER. 3. Lógica Fuzzy. 4. Indicadores. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada

GABRIEL VASOVINO BURGUER

Estimativa do grau de sustentabilidade de países através de indicadores ambientais e humanos com base no modelo de avaliação *Fuzzy* SAFE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista (UNESP), como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Sorocaba, 11 de julho de 2022.

_____

Prof. Dr. José Arnaldo Frutuoso Roveda

_____

Prof. Dr. Admilson Irio Ribeiro

_____

Profª. Drª. Ana Carolina Camargo Francisco

Sorocaba/SP

2022

RESUMO

O aumento das mudanças climáticas tem alavancado o debate acerca da proteção do meio ambiente, por consequência termos como sustentabilidade ou desenvolvimento sustentável foram apresentados como uma alternativa mais alinhada à proteção do meio ambiente. Porém, o conceito de sustentabilidade ainda permanece difuso e por esta característica, o modelo de estimativa do grau de sustentabilidade dos países baseadas em indicadores humanos e ambientais, criado por Phillis e Andriantiatsaholiniaina (2001), apresenta-se como uma interessante alternativa para análise de sustentabilidade. O modelo, baseado em lógica *Fuzzy*, possui o intuito de calcular a sustentabilidade de países utilizando indicadores categorizados no modelo pressão-estado-resposta. Para comparação foi realizado um estudo alterando as regras e funções de pertinência da última etapa do modelo, o que resultou no aumento da sensibilidade na percepção da qualidade dos indicadores humanos, o novo modelo possui uma aderência de 92% ao modelo SAFE original.

Palavras-Chave: Sustentabilidade. PER. Lógica *Fuzzy*.

ABSTRACT

The increase in climate change has leveraged the debate about environmental protection, consequently terms like sustainability or sustainable development have been presented as an alternative more aligned to environmental protection. However, the concept of sustainability still remains vague and for this characteristic, the model for estimating the degree of sustainability of countries based on human and environmental indicators, created by Phillis and Andriantiatsaholiniaina (2001), presents itself as an interesting alternative for sustainability assessment. The model, based on fuzzy logic, aims to calculate the sustainability of countries using indicators categorized in the pressure-state-response model. For comparison, a study was conducted by changing the rules and membership functions of the last stage of the model, which resulted in increased sensitivity in the perception of the quality of human indicators, the new model has an adherence of 92% to the original SAFE model.

Keywords: Sustainability. PER. Fuzzy logic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo Conceitual PER. Passos, Helga & Pires, Monica. (2022). 14
Figura 2. Esquema representativo do modelo SAFE.....16
Figura 3. Estrutura hierárquica do modelo SAFE: (1) normalização, (2) suavização exponencial, (3) imputação e (4) fuzzificação de indicadores básicos; (5–8) inferência difusa de indicadores compostos e sustentabilidade geral; (9) defuzzificação. KOULOUMPIS, 2008. 19
Figura 4. (a) Funções de pertinência do modelo SAFE para os indicadores normalizados. (b) Funções de pertinência para AIR, WATER, LAND, BIOD, HEALTH, WEALTH, KNOW e POLICY. (c) Funções de pertinência para ECOS, HUMS e OSUS (KOULOUMPIS, 2008). 23
Figura 5. Função de pertinência para ECOS e HUMS produzida no software MATLAB. 27
Figura 6. Função de pertinência para OSUS produzida no software MATLAB. 27
Figura 7. Superfícies geradas pelo software MATLAB utilizando a base de regras. 28
Figura 8. Gráfico da sustentabilidade geral dos dois modelos para os 128 países com os valores de sustentabilidade dos mesmos classificada da maior para a menor de acordo com o modelo original SAFE 2008. SAFE 2008 é a OSUS dada pelo modelo de Phillis e Andriantiatsaholiniaina, já SAFE Alterado é o modelo com alterações nas últimas etapas. 29
Figura 9. Gráfico das variáveis ECOS e HUMS dos países classificados pela menor até a maior diferença em comparação com a diferença absoluta (DIF) entre o modelo SAFE 2008 e o SAFE Alterado 29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Indicadores representativos do modelo SAFE. 18
Tabela 2. Indicadores de BIOD categorizados no modelo Pressão-Estado-Resposta definidos por Phillis e Andriantiatsaholiniaina (2001). 21
Tabela 3. Variáveis linguísticas utilizadas no Modelo SAFE. 22
Tabela 4. Regras utilizadas por Phillis e Andriantiatsaholiniaina (2001) para ECOS e HUMS. 24
Tabela 5. Regras utilizadas por Phillis e Andriantiatsaholiniaina (2001) para AIR, WATER, LAND, BIOD, WEALTH, HEALTH, KNOW e POLIC. 25
Tabela 6. Regras utilizadas para avaliação da sustentabilidade Geral (OSUS). VB – Very Bad; B – Bad; FB – Fairly Bad; S – Satisfactory; FG – Fairly Good; G – Good; VG – Very Good. 26
Tabela 7. Resultados de sustentabilidade Geral através dos dois modelos SAFE para os países. SAFE 2008 sendo o modelo desenvolvido por Kouloumpis e SAFE Alterado o modelo com as alterações. A coluna DIF% apresenta a diferença percentual entre os modelos. 28
Tabela 8. Correlação entre as variáveis e a sustentabilidade geral dos dois modelos. 30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIR Integridade do Ar

BIOD Biodiversidade

ECOS Integridade Ecológica

EFM *Ecological Footprint Method*

HEALTH Saúde

HUMS Integridade Social ou Humana

IDS Indicadores de Desenvolvimento Sustentável

KNOW Educação

LAND Integridade da Terra

OECD Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

ONU Organização das Nações Unidas

OSUS Grau de Sustentabilidade

PEIR Pressão-Estado-Impacto-Resposta

PER Pressão-Estado-Resposta

PNUMA Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

POLICY Aspectos Políticos

PR Pressão

RE Resposta

SAFE *Sustainability Assessment by Fuzzy Evaluation*

ST Estado

WATER Integridade da Água

WELTH Pode Econômico

Sumário

OBJETIVO **11**

1. INTRODUÇÃO **10**

1.1 Conceito de sustentabilidade *10*

1.2 Indicadores e Sistema Pressão-Estado-Resposta (PER) *11*

1.3 Lógica Fuzzy e sustentabilidade *11*

2. REVISÃO DA LITERATURA **13**

2.1 Definição de sustentabilidade *13*

2.2 Indicadores e sua importância *13*

2.3 Variáveis e Regras Linguísticas na Lógica Fuzzy *15*

3. MATERIAIS E MÉTODOS **15**

3.1 O modelo SAFE *15*

3.2 Indicadores de sustentabilidade *16*

3.2.1 Normalização e Tratamento dos indicadores *18*

3.2.2 Análise Fuzzy *22*

4. RESULTADOS **28**

5. DISCUSSÃO **30**

6. CONCLUSÃO **30**

REFERÊNCIAS **32**

OBJETIVO

O trabalho possui como objetivo a alteração de regras e funções de pertinência da última fase do modelo de estimativa do grau de sustentabilidade de países chamado criado por Phillis e Andriantiatsaholiniaina. As alterações visam levar em conta o dinamismo ambiental e humano, assim a criação das regras e funções para cálculo da sustentabilidade será feito no software MATLAB através da biblioteca de lógica *Fuzzy*. Tal estudo é importante para análise de medidas e políticas socioambientais de países.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Conceito de sustentabilidade

O conceito de sustentabilidade aparece pela primeira vez na história através das tradições de povos indígenas. A constituição criada pela nação Iroquesa, grupo nativo norte-americano que vivia em torno da região dos grandes lagos, chamada de Gayanashagowa que significa grande lei da unidade ou a Grande Lei da Paz, o antigo código penal dos iroqueses, nela os chefes indígenas já avaliavam o impacto das suas decisões e ações sobre as gerações futuras. Já em 1712, no livro Sylvicultura Oeconomica, escrito pelo cientista alemão Hans Carl von Carlowitz, foi considerado o primeiro uso conhecido do termo “sustentabilidade”. Assim, mais tarde silvicultores ingleses e franceses passaram a utilizar práticas de plantio de árvores com o objetivo de atingir a “Silvicultura de rendimento contínuo” (GOMES, SCHWENGBER, 2020)

Já em 1972, na conferência de Estocolmo, tratou-se de entender a relação entre sociedade e natureza, observando o desenvolvimento econômico em função da redução do impacto ambiental. Trazendo pela primeira vez o conceito de desenvolvimento sustentável e sustentabilidade.

Além do meio ambiente, o termo sustentabilidade possui um caráter multidimensional. Caporal e Costabeber (2002) definem as dimensões de sustentabilidade como:

- Ecológica; manutenção e recuperação de recursos naturais
- Social; os serviços ecossistêmicos oferecidos pelo meio ambiente para a sociedade
- Econômica; Resultados econômicos obtidos
- Cultural; reconhecimento das identidades culturais das populações
- Política; processos participativos e democráticos que constituem o contexto social
- Ética; relacionando a solidariedade intra e entre gerações

De acordo com Heinberg (2007), atualmente a palavra sustentável tem sido amplamente utilizada para, de um modo vago e geral, se referir apenas às práticas que possuem a reputação de estarem mais de acordo com um meio socioambiental mais saudável do que outras. No dicionário Priberam, o termo sustentabilidade possui

como definição “a característica ou condição de ser sustentável”, isto é, um modelo de sistema que tem condições para se manter ou conservar. Entretanto, a definição se torna difusa quando é levada em consideração a expectativa de vida humana, pois certos processos com grande potencial de causar danos ao meio ambiente podem passar despercebidos por gerações.

1.2 Indicadores e Sistema Pressão-Estado-Resposta (PER)

Indicadores são meios comunicáveis de progresso em relação a um objetivo, podendo utilizar como base para a quantificação de ações, processos, pessoas etc. O trabalho em volta da criação de indicadores é a representação fidedigna da realidade de modo simplificado.

Um sistema de indicadores popular é o Pressão-Estado-Resposta (PER). Desenvolvido pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE, 1993) com o objetivo de avaliar a sustentabilidade local o PER tem como base o princípio de causalidade, partindo do pressuposto que as atividades humanas exercem pressão sobre o ambiente, alterando seu estado, ou seja, sua qualidade e/ou quantidade de recursos naturais disponíveis, por fim, as alterações no meio induzem respostas advindas da sociedade em forma de políticas ambientais, econômicas e setoriais (HORST, 2020)

1.3 Lógica *Fuzzy* e sustentabilidade

A teoria *Fuzzy* aparece pela primeira vez pelo lógico polonês Jan Lukasewicz, em 1920, introduzindo valores de pertinência entre 0 e 1. Já em 1965, foi publicado o primeiro artigo com o termo “*Fuzzy*”, pelo professor da Universidade da Califórnia Lotfi Asker Zadeh. Na lógica clássica os conjuntos são denominados “crisp”, e um certo elemento do universo pertence ou não a esse conjunto. Já em *Fuzzy*, é considerado um grau de pertinência de cada elemento a um certo conjunto (ABAR, 2004).

Por não existir consenso na definição universal de sustentabilidade valores e interesses políticos e econômicos têm um papel central no debate sobre sustentabilidade. Do ponto de vista científico, no entanto, algumas abordagens fornecem ferramentas de comparação entre países que registram um caminho para o progresso da sustentabilidade. A definição e quantificação do caráter sustentável de uma prática ou política ainda é um dos grandes desafios a serem endereçados. Assim,

a criação de sistemas capazes da avaliação do grau de sustentabilidade é considerada crucial para formuladores de políticas.

Legisladores poderiam se beneficiar de uma metodologia padronizada de valoração da efetividade das políticas sustentáveis. Além disso Phillis e Andriantiatsaholiniaina definem um impasse que impede a quantificação da sustentabilidade, residindo no fato de que “Os cientistas estão esperando que importantes questões políticas sejam levantadas pelos formuladores de políticas, enquanto os formuladores de políticas estão esperando que importantes questões ecológicas e indicadores ecológicos de sustentabilidade sejam levantados pelos cientistas” (Brink, 1989).

Assim, devido à capacidade de emular o pensamento crítico humano e possuir uma abordagem sistemática em assuntos considerados difusos ou vagos, a lógica *Fuzzy* se apresenta como uma metodologia adequada para o estudo de quantificação e valoração da sustentabilidade.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Definição de sustentabilidade

Existem diversas definições de sustentabilidade na literatura, de acordo com Sachs (1993), o documento preparatório da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente Humano de 1972, definindo como possível, através da inovação tecnológica, a conservação de recursos naturais e o progresso tecnológico e científico.

Van Bellen (2004) cita que o conceito de desenvolvimento sustentável atingiu uma notoriedade inusitada a partir da década de 1990, quando se tornou alinhado ao novo conceito de desenvolvimento. Assim, o capital natural é considerado o limitante da economia, porém é preciso mensurar o quanto desse capital é necessário para manter ou suportar o sistema.

Já em relação ao desenvolvimento sustentável, segundo Barbosa (2008) é um processo de aprendizagem guiado por políticas relacionadas a um plano de desenvolvimento nacional. Outra definição dada pela (*World Commission on Environment and Development*) considera o desenvolvimento sustentável como a capacidade de atender a demanda do tempo presente sem o comprometimento de futuras gerações.

2.2 Indicadores e sua importância

De acordo com Hammond (1995), o termo indicador possui origem no latim *indicare*, que significa descobrir, apontar, anunciar ou estimar, com o objetivo de quantificar uma certa ação e ser utilizado para detecção do progresso em relação a metas sustentáveis. Segundo Horst (2020), indicadores possuem como principal função a avaliação de condições e tendências em relação a metas e objetivos.

Para Van Bellen (2005) a mensuração dos indicadores de sustentabilidade tem como principal objetivo auxiliar os tomadores de decisão na avaliação de um desempenho em função dos objetivos estabelecidos fornecendo informações para análise e replanejamento de futuras decisões.

O modelo PER desenvolvido pela OECD (1993) com a finalidade de estudar indicadores ambientais, vem sendo aceito e adotado internacionalmente. Porém, de acordo com Silva (2022), com o avanço da degradação ambiental houve a adição de um outro elemento no modelo, aumentando sua complexidade e buscando avaliar o impacto gerado pela urbanização sobre o meio. Assim, introduzindo no modelo o

componente “I” - “Impacto” criando-se o PEIR (Pressão, Estado, Impacto e Resposta), utilizado amplamente pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). Para a metodologia foi utilizado o sistema PER em conjunto com o modelo SAFE.

De acordo com Horts (2020), ainda assim existem diversos outros sistemas de indicadores como os Indicadores de Desenvolvimento Sustentável no Brasil (IDS Brasil), EFM (*Ecological Footprint Method*), entre outros.

A vantagem do modelo PER é colocar em evidência a relação humana e o meio ambiente, tendo como principal base entender a interligação entre tais segmentos (OCDE, 1993). Conforme Lira (2008), os indicadores são divididos em três categorias:

- Pressão: Se referindo às pressões que as atividades antropológicas causam impactos sobre o meio ambiente.
- Estado: Qualidade do ambiente e dos recursos naturais disponíveis.
- Resposta: Baseia-se na resposta da sociedade em relação aos impactos ambientais, podendo se relacionar com a prevenção dos efeitos negativos da ação dos seres humanos, reversão e paralisação dos danos causados e a preservação e conservação dos recursos naturais.

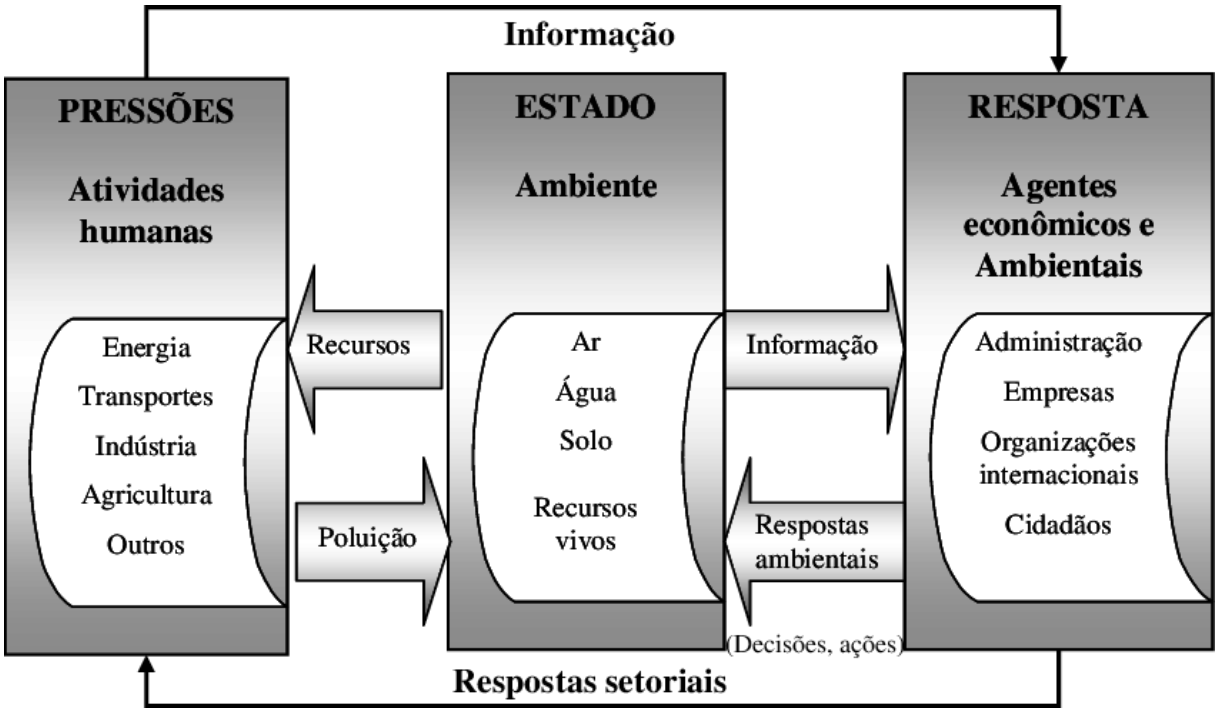


Figura 1. Modelo Conceitual PER. Passos, Helga & Pires, Monica. (2022).

2.3 Variáveis e Regras Linguísticas na Lógica *Fuzzy*

De acordo com Yannis e Andriantiatsaholiniaina (2001), é consenso que o meio mais confiável de avaliação e mensuração da sustentabilidade seria a integração do meio econômico e os recursos naturais. Entretanto, essa mensuração é dificultada pela falta de dados estruturados e problemas metodológicos ainda não resolvidos.

Ainda de acordo com Phillis e Andriantiatsaholiniaina, a lógica *Fuzzy* se torna uma ótima alternativa ao simular a dinâmica de um sistema sem a necessidade de utilizar uma modelagem matemática detalhada. Utilizando conceitos linguísticos SE-ENTÃO é possível descrever a evolução lógica de um sistema se baseando nos pesos definidos pelos valores linguísticos.

As regras linguísticas são constituídas de quatro itens, a variável linguística (por exemplo Dinheiro), seguido por seu valor linguístico (por exemplo: Muito ou Pouco), a função de pertinência das variáveis linguísticas e por último o domínio físico dos valores que representam a variável. Assim, de acordo com o exemplo acima, as funções de pertinência de “Muito” ou “Pouco” podem ser funções exponenciais do montante de renda em reais por mês e a faixa de renda é o domínio físico da variável. (YANNIS E ANDRIANTIATSAHOLINIAINA, 2001).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 O modelo SAFE

O modelo de *Sustainability Assessment by Fuzzy Evaluation* (SAFE) desenvolvido por Phillis e Andriantiatsaholiniaina (2001) é um modelo de avaliação baseado em indicadores que, através da lógica *Fuzzy*, definem a sustentabilidade geral de um país. O modelo é constituído de dois componentes primários: a integridade ecológica (ECOS) e a integridade social ou humana (HUMS). Os dois componentes são divididos em mais 8 variáveis secundárias. A integridade ecológica:

- Integridade da terra (LAND)
- Qualidade da água (WATER)
- Qualidade do ar (AIR)
- Biodiversidade (BIOD)

Já para a integridade social ou humana:

- Aspectos políticos (POLICY)

- Poder econômico (WEALTH)
- Saúde (HEALTH)
- Educação (KNOW)

Assim, todas as variáveis no nível secundário são avaliadas pelo método Pressão-Estado-Resposta (PER), os indicadores são caracterizados como indicadores terciários e agrupados em Pressão (PR), Estado (ST) e Resposta (RE). Um esquema gráfico do modelo SAFE é apresentado na figura 2.

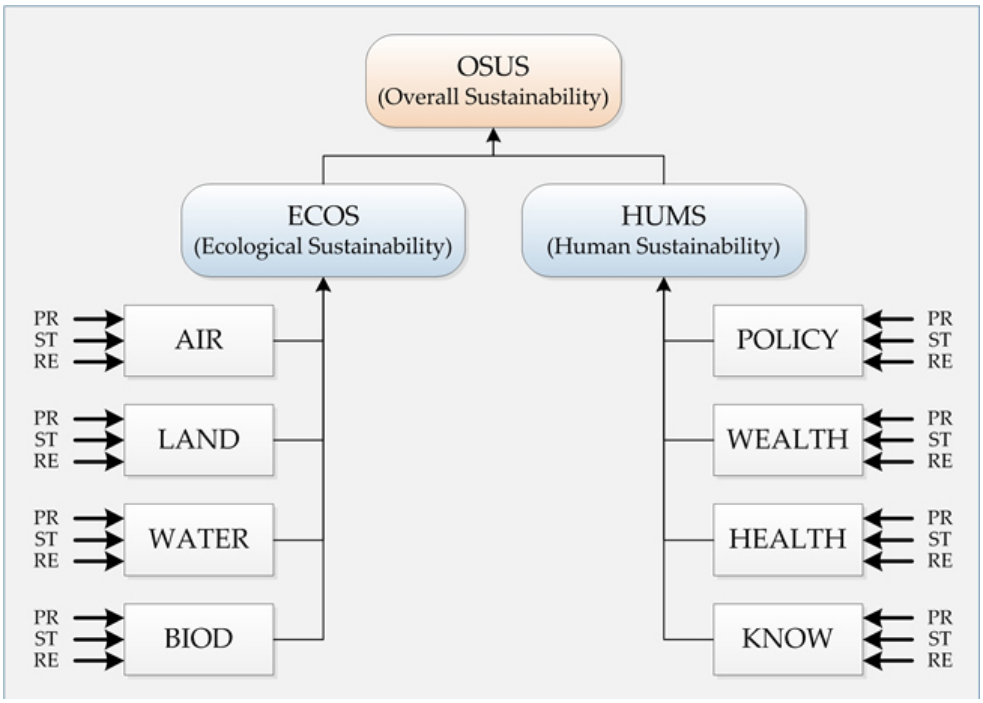


Figura 2. Esquema representativo do modelo SAFE.

3.2 Indicadores de sustentabilidade

De acordo com Phillis e Andriantiatsaholiniaina os indicadores mais adequados para o modelo safe são apresentados na tabela 1. A escolha dos indicadores são limitadas pela disponibilidade dos dados, entretanto eles devem seguir os seguintes critérios:

- Atributos espaciais: Dados devem estar disponíveis para todas as economias e devem ser comparáveis.
- Atributos temporais: As mesmas faixas de tempo para todas as economias devem estar disponíveis

- Atributos baseados em metas: Indicadores devem estar linkados ou indicar tendências a objetivos sustentáveis.
- Atributos estatísticos: Correlações entre indicadores de tipos similares podem ser utilizados para reduzir o número de indicadores totais

Variáveis	Indicadores de Pressão (PR)	Indicadores de Status (ST)	Indicadores de Resposta (RE)
LAND	Importação de energia Geração de resíduo municipal Taxa de crescimento populacional	Densidade Populacional Desertificação Índice de produção rural	Produção de energia Crescimento da população Taxa de reciclagem de resíduos
WATER	População total Poluição hídrica Consumo de fertilizante	Área total Acesso a água limpa Qualidade da água	Acesso a tratamento de esgoto
BIOD	Espécies ameaçadas (Mamíferos, plantas, peixes, anfíbios e répteis)	Desertificação Área de floresta Número total de plantas, peixes e mamíferos	Área protegida - Reflorestamento/Desmatamento
AIR	Emissão de CO2 Emissão de particulados e GEE	Concentração de CO2 na atmosfera Concentração de GEE	Uso de combustíveis tradicionais Energia primária
POLICY	Gastos militares Refugiados per capita População a abaixo da linha da pobreza	Direitos políticos Indice GINI Indice de percepção de corrupção	Leis ambientais Imposto coletado
WEALTH	Deflator implícito do	Dívida externa	Exportação

	PIB Importação Desemprego	Dívida do governo central PNB per capita	Crescimento do PIB Investimento financeiro estrangeiro
HEALTH	Casos de doenças infeciosas Taxa de mortalidade Taxa de mortalidade infantil	Expectativa de vida Suprimento de caloria diária média per capita Crianças vacinadas contra doenças severas	Gasto público em saúde Número de doutores Número de leitos hospitalares
KNOW	Importação de produtos manufaturados Taxa de estudantes que seguem carreira acadêmica	Expectativa de anos na escola (Homem e Mulheres) Taxa de alfabetização Indice de Conhecimento do Banco Mundial (KEI)	Gasto público e privado em P&D Gasto público na educação Taxa de computadores per capita

Tabela 1. Indicadores representativos do modelo SAFE.

3.2.1 Normalização e Tratamento dos indicadores

Para coleta e utilização dos dados coletados dos indicadores são realizadas 3 etapas de tratamento dos dados, a normalização, a suavização ou amortecimento da série e a introdução de dados ausentes para posteriormente a fuzzificação, como demonstra a figura 3. Os dados coletados diretamente dos indicadores são normalizados para serem utilizados em na função de pertinência específica, baseada na metodologia PER, para a parte terciária do modelo.

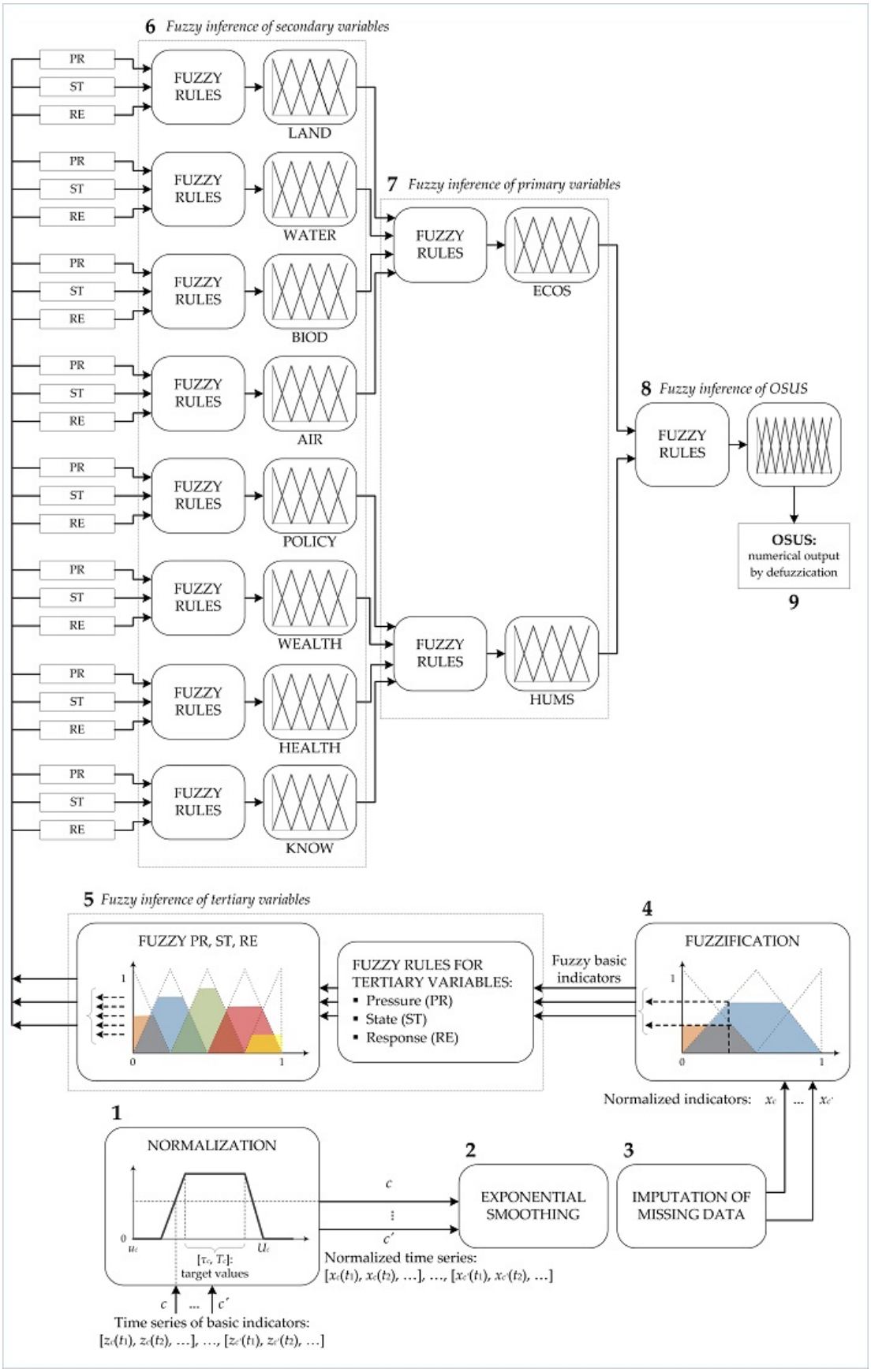


Figura 3. Estrutura hierárquica do modelo SAFE: (1) normalização, (2) suavização exponencial, (3) imputação e (4) fuzzificação de indicadores básicos; (5–8) inferência difusa de indicadores compostos e sustentabilidade geral; (9) defuzzificação. KOULOUMPIS, 2008.

A normalização dos dados é realizada através da análise temporal dos dados coletados para os indicadores, utilizando dados máximos e mínimos observados no período é possível definir valores extremos considerando-os como mais ou menos sustentável. A fórmula para normalização é definida com base nos valores definidos como meta do indicador, sendo considerado o valor mais sustentável e chamado de Target (T). Caso o valor T corresponda para um máximo:

$$N(v_i) = \begin{cases} \dfrac{v_i - \min(s)}{T(v_i) - \min(s)} & \text{para } v_i \leq T(v_i), \text{ e} \\ 1 & \text{para } v_i \geq T(v_i) \end{cases}$$

Se T corresponde para um valor mínimo:

$$N(v_i) = \begin{cases} 1 & \text{para } v_i \leq T(v_i), \text{ e} \\ \dfrac{max(s) - v_i}{\max(s) - T(v_i)} & \text{para } v_i \geq T(v_i) \end{cases}$$

E por fim, caso T corresponda para um valor médio, dentro do intervalo.

$$N(v_i) = \begin{cases} \dfrac{v_i - \min(s)}{\min T(v_i) - \min(s)} & \text{para } v_i \geq minT(v_i), \text{ e} \\ 1 \text{ para } v_i \in [minT(v_i), maxT(v_i)] \text{ e} \\ \dfrac{max(s) - v_i}{\max(s) - \max T(v_i)} & \text{para } v_i \geq maxT(v_i) \end{cases}$$

A tabela 2 exemplifica indicadores coletados nos Estados Unidos utilizados no artigo de Phillis e Andriantiatsaholiniaina. Utilizando como referência os valores de mamíferos ameaçados de 1990 a 1999 nos Estados Unidos, é definido como valor mais sustentável para T, no caso a porcentagem de 0% de espécies de mamíferos ameaçados. A normalização desse valor é realizada com a fórmula do valor T mínimo, demonstrado na equação 1. O valor se confirma com os valores normalizados indicados na tabela 2 retirada do artigo.

Indicadores para BIOD	*Mín (v)*	*Máx (v)*	*Min (s)*	*Máx (s)*	*Objetivo,T (v)*	*Dado (v)*	*N (v)*
Indicadores de Pressão							
Mamíferos ameaçados (espécies ameaçadas, %,1985)	0	46,6	0	100	0	6,8	0,932
Plantas altas ameaçadas (espécies ameaçadas, %,1985)	0	31,7	0	100	0	11,5	0,885
Peixes ameaçados	0	100	0	100	0	15	0,85
PRESSURE = 0,77 (depois dos cálculos de inferência Fuzzy usando o MATLAB)							
Indicadores de Status							
Número de espécies de mamíferos a cada 1000km² (1994)	2	131,1	0	Máx (v)	Máx (v)	45	0,333
Número de espécies de plantas altas a cada 1000km² (1994)	157	10.479	0	Máx (v)	Máx (v)	1679	0,147
Número de todas as espécies de peixes (1994)	3	822	0	Máx (v)	Máx (v)	822	1
Extenção total de áreas de florestas (000 Ha,1995)	0	763.500	0	Máx (v)	Máx (v)	212.515	0,278
STATUS = 0,29 (depois dos cálculos de inferência Fuzzy usando o MATLAB)							
Indicadores de Resposta							
Todas as áreas protegidas (porcentagem de terra, 1997)	0	43,1	0	100	Máx (v)	13,4	0,134
Dematamento anual (+)/Reflorestamento (-) (km², 1990-1995)	-5.886	25.544	Mín (v)	Máx (v)	Mín (v)	-5.886	1
RESPONSE = 0,525 (depois dos calculos de inferência Fuzzy usando o MATLAB), finalmente BIOD= 0,39 (depois da computação das funções de Fuzzy no modelo PER).							

Tabela 2. Indicadores de BIOD categorizados no modelo Pressão-Estado-Resposta definidos por Phillis e Andriantiatsaholiniaina (2001).

$$\frac{max(s) - v_i}{max(s) - T(v_i)} \Rightarrow \frac{100 - 6{,}8}{100 - 0} \Rightarrow 0{,}932$$

Equação 1. Normalização dos dados de espécies de mamíferos ameaçados, no caso para $v_i \geq T(v_i)$.

3.2.2 Análise *Fuzzy*

A metodologia SAFE divide a fuzificação em 3 categorias, a primeira utiliza a entrada de indicadores normalizados, a segunda para os indicadores compostos das etapas 5, 6 e 7, e por fim, a sustentabilidade geral. As variáveis linguísticas e as respectivas funções de pertinência utilizadas nos dois modelos SAFE foram indicadas na tabela 3 e na figura 4. A principal diferença entre os modelos é o acréscimo de 4 novas variáveis linguísticas na sustentabilidade geral.

Modelo SAFE 2001		
Indicadores normalizados	Indicadores compostos	sustentabilidade Geral
• Fraco (W) • Médio (M) • Forte (P)	• Muito Ruim (VB) • Ruim (B) • Satisfatório (S) • Bom (G) • Muito Bom (VG)	• Muito Baixa (VL) • Baixa (L) • Intermediário (I) • Alta (H) • Muito Alta (VH)
• Modelo SAFE 2008		
• Fraco (W) • Médio (M) • Forte (P)	• Muito Ruim (VB) • Ruim (B) • Mediano (A) • Bom (G) • Muito Bom (VG)	• Extremamente Baixa (EL) • Muito Baixa (VL) • Baixa (L) • Levemente Baixa (FL) • Intermediário (I) • Levemente Alta (H) • Alta (H) • Muito Alta (VH) • Extremamente Alta (EH)

Tabela 3. Variáveis linguísticas utilizadas no Modelo SAFE.

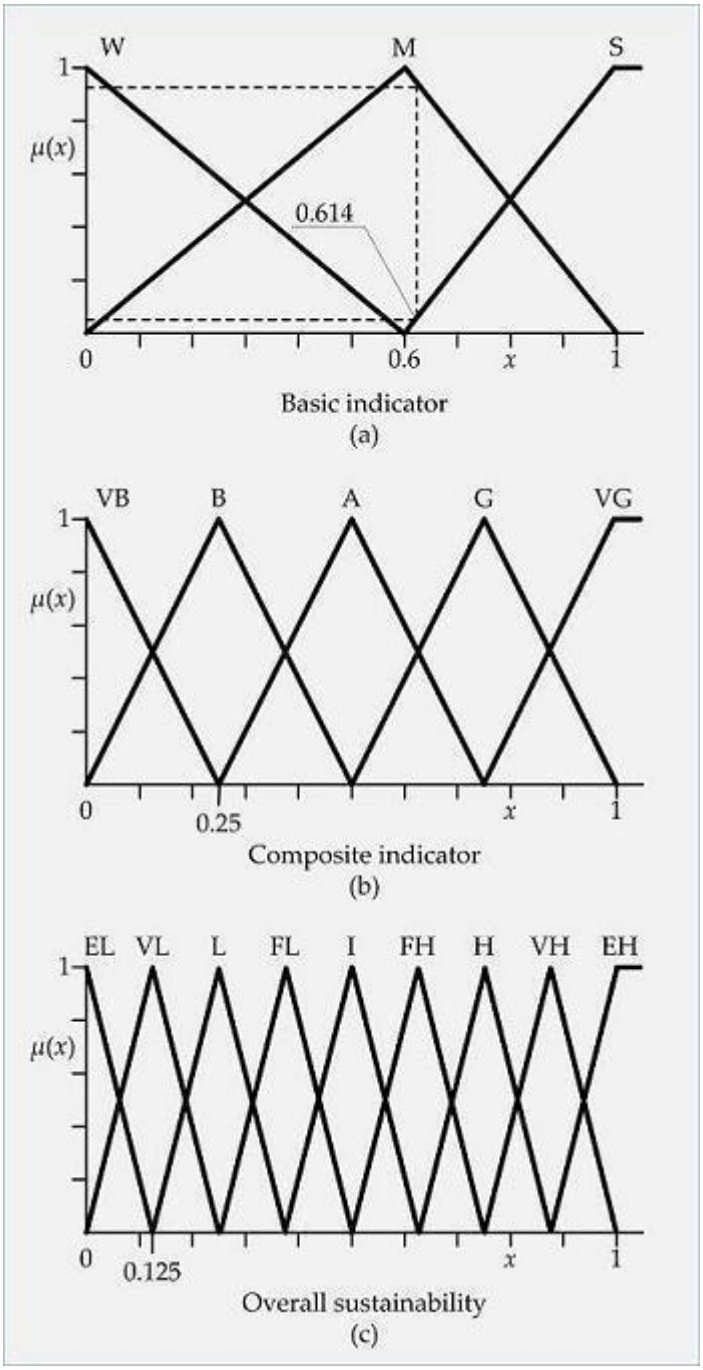


Figura 4. (a) Funções de pertinência do modelo SAFE para os indicadores normalizados. (b) Funções de pertinência para AIR, WATER, LAND, BIOD, HEALTH, WEALTH, KNOW e POLICY. (c) Funções de pertinência para ECOS, HUMS e OSUS (KOULOUMPIS, 2008).

Para determinar a sustentabilidade Geral (OSUS) no modelo SAFE de 2001 foi utilizada uma base de regras com $5^2 = 25$ regras, derivada das 5 variáveis linguísticas (VL, L, I, H e VH) e as duas variáveis HUMS e ECOS. Já a segunda etapa são $5^4 = 625$ regras derivadas das 4 variáveis secundárias e as mesmas 5 variáveis linguísticas. Porém para redução do número de regras foi utilizado o conectivo “OU”, baixando o número total de 625 para 254 regras. As 8 variáveis da terceira etapa são

caracterizadas por $3^3 = 27$ regras derivadas das 3 variáveis linguísticas (W, M, P) e 3 variáveis do sistema PER. Por fim, o número de regras do sistema PER para uso com os indicadores é caracterizada por $R = 3^n$ pois cada variável pode conter um número específico de indicadores. As regras utilizadas no primeiro modelo SAFE, desenvolvido por Phillis e Andriantiatsaholiniaina (2001) estão descritas na tabela 4 e 5.

Base de regras linguísticas					
(a) Primária (25 regras)					
ECOS	**VB**	**B**	**S**	**G**	**VG**
HUMS					
VB	VB	VB	VB	VB	VB
B	VB	B	B	B	B
S	VB	B	S	S	S
G	VB	B	S	G	G
VG	VB	B	S	G	VG

Tabela 4. Regras utilizadas por Phillis e Andriantiatsaholiniaina (2001) para ECOS e HUMS.

Inputs			*Output (AIR; ou WATER; ou LAND; ou BIOD; ou WEALTH; ou HEALTH; ou KNOW; ou POLIC)*
***se* PRESSURE**	**e STATUS**	**e RESPONSE**	***então* Integridade Resultante**
P	P	P	VH
P	M	P	I
P	W	P	B
P	P	M	H
P	M	M	I
P	W	M	B
P	P	W	I
P	M	W	B
P	W	W	VB
M	P	P	VH
M	M	P	I
M	W	P	B
M	P	M	H
M	M	M	I
M	W	M	B
M	P	W	I
M	M	W	B
M	W	W	VB
W	P	P	VH
W	M	P	I
W	W	P	B
W	P	M	H
W	M	M	I
W	W	M	B
W	P	W	I
W	M	W	B
W	W	W	VB

Tabela 5. Regras utilizadas por Phillis e Andriantiatsaholiniaina (2001) para AIR, WATER, LAND, BIOD, WEALTH, HEALTH, KNOW e POLIC.

Para fins de comparação e estudo foram estabelecidas novas regras e duas funções de pertinência da OSUS. A principal mudança nas regras foi a utilização da lógica em que valores baixos de ECOS possuem baixa mobilidade, sendo difícil mudar valores considerados ruins. O objetivo dessa lógica é simular a dinâmica socioambiental, em que ambientes degradados possuem uma maior dificuldade de recuperação, dependendo cada vez mais da variável HUMS. As regras foram expostas na tabela 6. As funções de pertinência da variável OSUS são baseadas no primeiro modelo SAFE publicado por Phillis e Andriantiatsaholiniaina (2001) com acréscimo de 2 novas variáveis para diferenciar e indicar uma maior subjetividade nos valores médios, as novas funções de pertinência são expostas nas figuras 5 e 6. A análise foi realizada com o software MATLAB, utilizando a biblioteca de lógica *Fuzzy*. Para comparação foram utilizados dados de ECOS e HUMS dos 128 países disponibilizados pelo site oficial do modelo SAFE criado pela *Technical University of Crete*, após o cálculo foi comparado o valor obtido para da OSUS.

ECOS	**VB**	**B**	**S**	**G**	**VG**
HUMS					
VB	VB	VB	B	B	FB
B	VB	B	FB	FB	FB
S	VB	B	S	FG	G
G	VB	B	FG	G	VG
VG	VB	FB	G	VG	VG

Tabela 6. Regras utilizadas para avaliação da sustentabilidade Geral (OSUS). VB – Very Bad; B – Bad; FB – Fairly Bad; S – Satisfactory; FG – Fairly Good; G – Good; VG – Very Good.

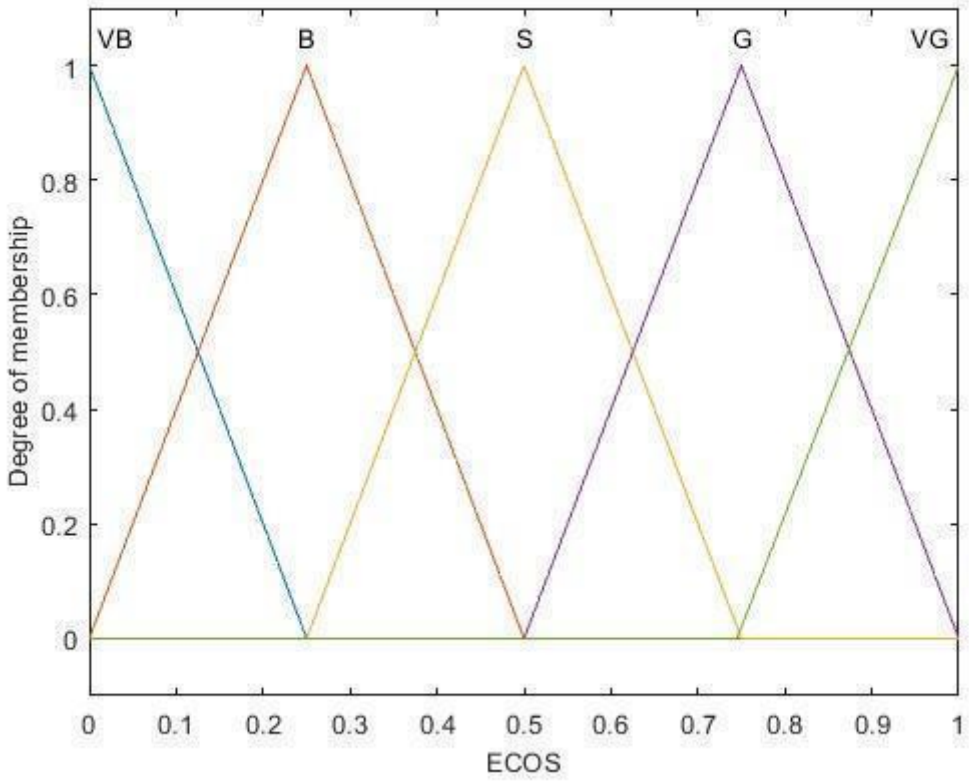


Figura 5. Função de pertinência para ECOS e HUMS produzida no software MATLAB.

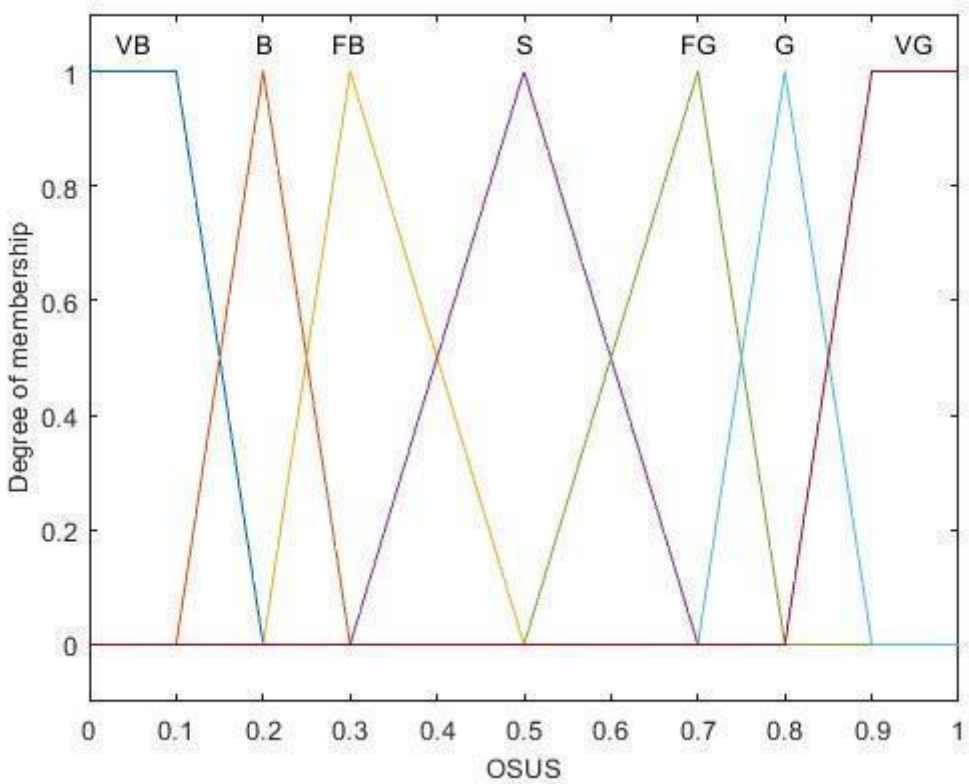


Figura 6. Função de pertinência para OSUS produzida no software MATLAB.

4. RESULTADOS

Os valores de OSUS obtidos resultaram em uma aderência de 92% com o modelo SAFE de Kouloumpis. A figura 7 mostra a superfície construída pelas regras e a tabela 7 resume alguns valores calculados para os dois modelos. A figura 8 apresenta os valores dos dois modelos para os 128 países. A tabela 8 também apresenta a correlação entre as variáveis ECOS e HUMS com a OSUS calculadas nos dois modelos.

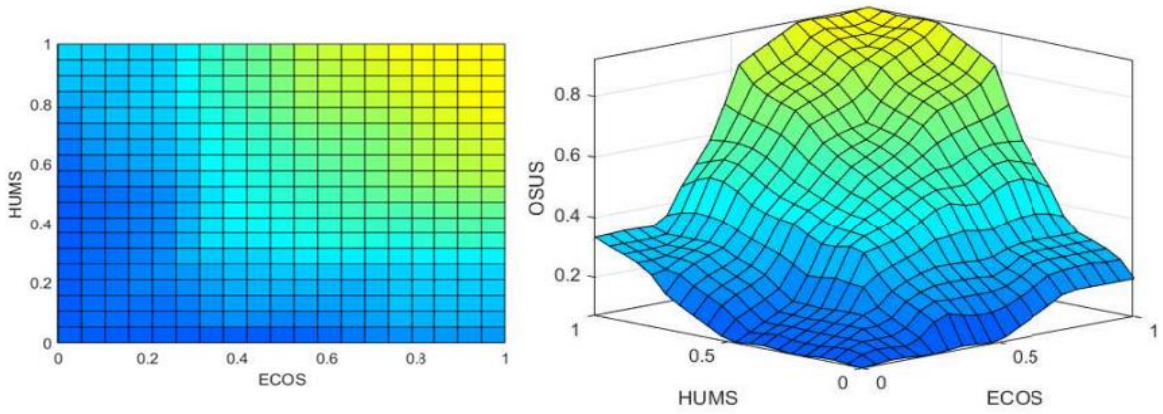


Figura 7. Superfícies geradas pelo software MATLAB utilizando a base de regras.

País	ECOS	HUMS	SAFE 2008	SAFE ALTERADO	DIF%
Alemanha	0,855	0,998	0,927	0,988	6%
Suíça	0,829	1	0,915	0,992	9%
Suécia	0,791	1	0,896	0,996	11%
Rússia	0,6	0,736	0,668	0,717	7%
Georgia	0,748	0,567	0,658	0,726	11%
Panamá	0,748	0,55	0,649	0,719	11%
Brasil	0,738	0,693	0,715	0,76	6%
Coréia do Sul	0,502	0,75	0,626	0,697	11%
Síria	0,658	0,497	0,577	0,593	3%
Jordânia	0,503	0,625	0,564	0,574	2%
Namíbia	0,733	0,391	0,562	0,518	7%
Irã	0,481	0,5	0,491	0,476	4%
Tanzânia	0,69	0,291	0,49	0,399	18%
Camboja	0,591	0,299	0,445	0,42	7%
Sudão	0,5	0,201	0,351	0,245	31%
Mauritânia	0,509	0,11	0,31	0,164	48%

Tabela 7. Resultados de sustentabilidade Geral através dos dois modelos SAFE para os países. SAFE 2008 sendo o modelo desenvolvido por Kouloumpis e SAFE Alterado o modelo com as alterações. A coluna DIF% apresenta a diferença percentual entre os modelos.

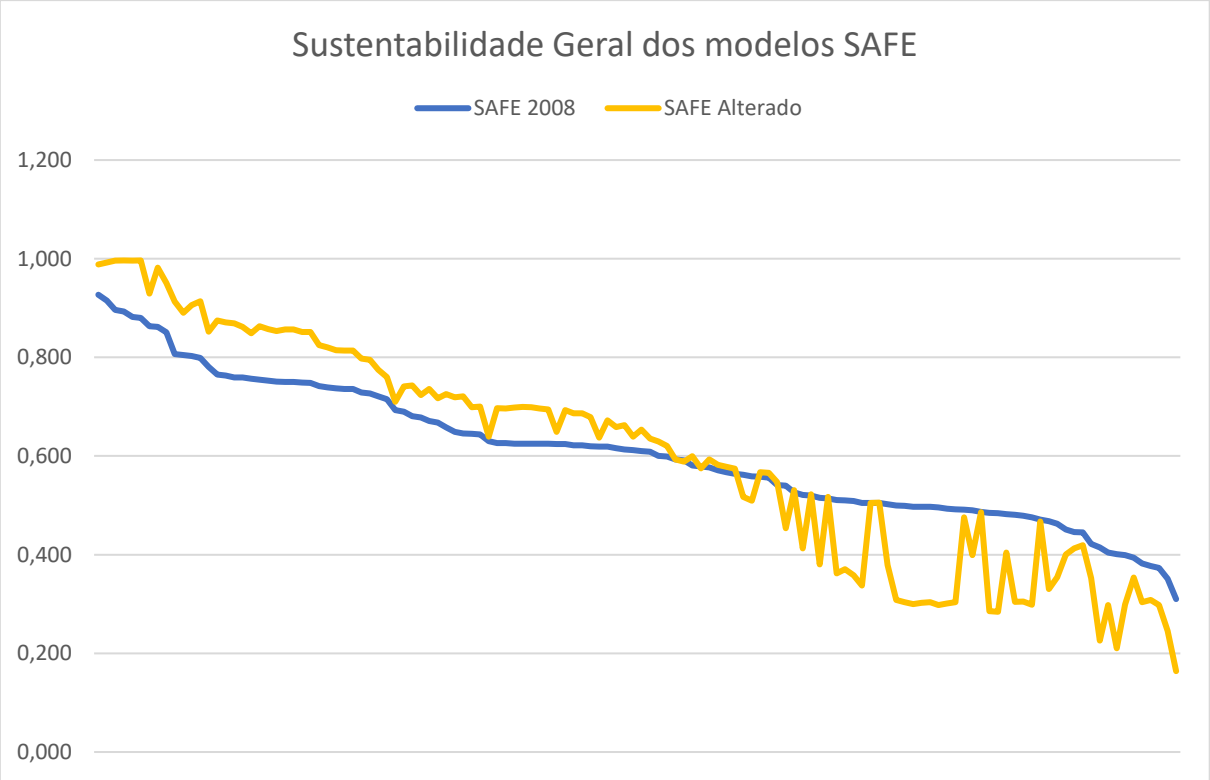


Figura 8. Gráfico da sustentabilidade geral dos dois modelos para os 128 países com os valores de sustentabilidade dos mesmos classificada da maior para a menor de acordo com o modelo original SAFE 2008. SAFE 2008 é a OSUS dada pelo modelo de Phillis e Andriantiatsaholiniaina, já SAFE Alterado é o modelo com alterações nas últimas etapas.

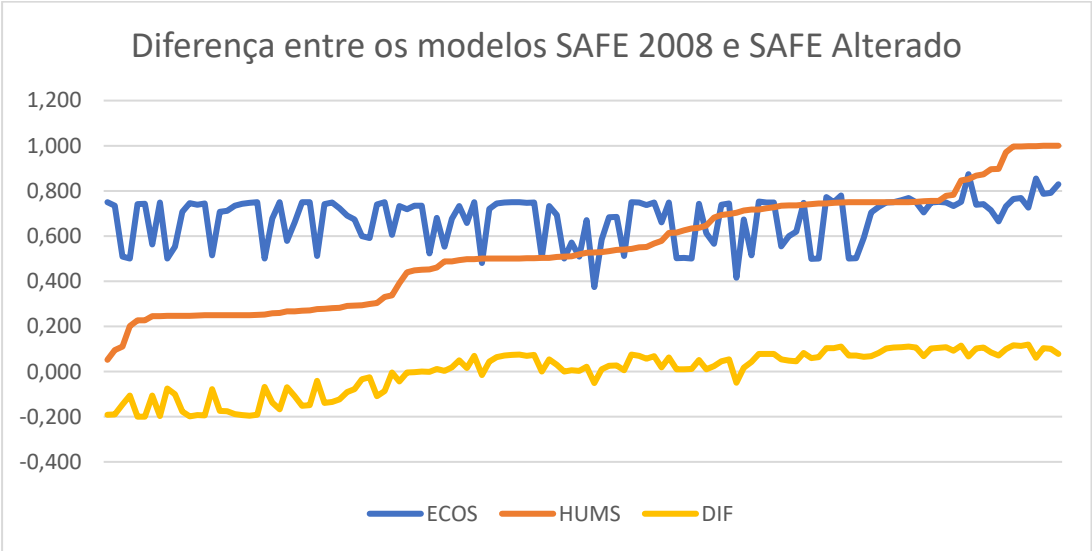


Figura 9. Gráfico das variáveis ECOS e HUMS dos países classificados pela menor até a maior diferença em comparação com a diferença absoluta (DIF) entre o modelo SAFE 2008 e o SAFE Alterado

VARIÁVEL	SAFE 2008	SAFE ALTERADO
ECOS	0,52	0,37
HUMS	0,93	0,95

Tabela 8. Correlação entre as variáveis e a sustentabilidade geral dos dois modelos.

5. DISCUSSÃO

A alteração das regras e funções de pertinência na etapa final do modelo resultou em um novo modelo, que tem os mesmos resultados em 92% dos dados analisados. Porém, para o modelo SAFE com a alteração das regras e funções de pertinência, os valores extremos se diferenciaram mais no grau de sustentabilidade em comparação com o modelo original. A variável HUMS passou a possuir um peso maior estimativa do grau de sustentabilidade, o mesmo comportamento é visto na análise de correlação demonstrada na tabela 8, onde é possível perceber que em ambos os modelos a variável HUMS possui uma maior correlação com a sustentabilidade geral dos países, porém no novo modelo o valor altera de 0,93 para 0,95. Além disso, na figura 9 é observado que no modelo SAFE Alterado a variável HUMS possui uma maior sensibilidade para definição do grau de sustentabilidade (OSUS), os valores baixos são mais penalizados no modelo alterado e valores altos resultam em um leve aumento na pontuação OSUS.

6. CONCLUSÃO

As mudanças realizadas resultaram em um modelo mais sensível aos indicadores humanos, assim, países que não possuem infraestrutura e meios econômicos para a manutenção do meio ambiente resultam em pontuações mais baixas no grau de sustentabilidade. Como conclusão o modelo simula a variável HUMS como mais volátil e sujeita a mudanças, já que a variável leva em consideração indicadores políticos e econômicos que podem ser considerados mais instáveis, isto é, se alteram com maior intensidade em menor tempo. Porém o contrário é observado nos indicadores da variável ECOS, levando em consideração o “Ponto de não retorno” na dinâmica ambiental, em que ambientes já degradados são consideravelmente mais

difíceis de recuperar, pois a estabilidade entre os serviços ecossistêmicos foi quebrada, já ambientes preservados podem ser degradas com maior facilidade.

Para próximos trabalhos seria possível, além de alterar as regras e variáveis linguísticas do modelo SAFE, substituir o modelo Pressão-Estado-Resposta (PER) pelo novo modelo Pressão-Estado-Impacto-Resposta (PEIR) desenvolvido pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e adaptada pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE).

REFERÊNCIAS

ABAR, C. **Lógica Fuzzy**. 2004. Disponível em: <https://www.pucsp.br/~logica/Fuzzy.htm>. Acesso em: 20 jun. 2022.

BARBOSA, G. S. **O desafio do desenvolvimento sustentável**. Revista Visões, n.4, v.1, Jan./Jun, 2008.

CAPORAL, F. R.; COSTABEBER, J. A. **Análise multidimensional da sustentabilidade: uma proposta metodológica a partir da Agroecologia**. Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável, Porto Alegre, v. 3, n. 3, p. 70-85, jul./set. 2002b.

FERREIRA DA SILVA, S. S.; SANTOS, J. G.; CÂNDIDO, G. A.; RAMALHO, Ângela M. C. **Indicador de sustentabilidade pressão –estado – impacto - resposta no diagnóstico do cenário sócio ambiental resultante dos resíduos sólidos urbanos em cuité/pb**. REUNIR Revista de Administração Contabilidade e sustentabilidade, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 76-93, 2012. DOI: 10.18696/reunir.v2i2.68. Disponível em: https://reunir.revistas.ufcg.edu.br/indice.php/uacc/article/view/68. Acesso em: 24 jun. 2022.

GOMES e SCHWENGBER, **Sustentabilidade: evolução conceitual e aplicações na história recente**. 2020. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/220611/1/Doc-490 sustentabilidade.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2022.

HAMMOND, A., et al. ***Environmental indicators: a systematic approach to measuring and reporting on environmental policy performance in the context of sustainable development***. Washington, D.C.: World Resources Institut, 1995.

HEINBERG, R. **Cinco axiomas da sustentabilidade**. 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/128116/Cinco%20axiomas%20da%20sustentabilidade%20Heinberg.doc?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 jun. 2022.

HORST, Monique. **Aplicação do modelo Pressão-Estado-Resposta (PER) como instrumento de Gestão Ambiental Municipal: Um estudo de caso em Alfredo Wagner/SC**. Florianópolis. 2020.

PASSOS, Helga e PIRES, Monica. **Indicadores ambientais para avaliação de agroecossistemas**. 2022.

PHILLIS, Y. A., ANDRIANTIATSAHOLINIAINA, L. A. ***Sustainability: an ill-defined concept and its assessment using Fuzzy logic, Ecological Economics***, Volume 37, Issue 3, 2001, Pages 435-456, ISSN 0921-8009, https://doi.org/10.1016/S0921-8009(00)00290-1.

SACHS, Ignacy**. Estratégias de Transição para o Século XXI: desenvolvimento e meio ambiente**. São Paulo: Studio Nobel/Fundação do Desenvolvimento Administrativo, 1993.

VAN BELLEN, Hans Michael. ***Sustainable development: presenting the main measurement methods***. Ambiente e Sociedade. Campinas,v. 7, n. 1 jun. 2004. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid= S1414-753X2004000100005&lng=en&nrm=iso>.

VAN BELLEN, H. M. **Indicadores de sustentabilidade: uma análise comparativa**. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2005.