



RICARDO AMARAL REMER

CONSERVOMETRIA

**CONCEITO E APLICAÇÃO EM ÁREAS DE ENERGIA
RENOVÁVEL E RECUPERAÇÃO DE CORPOS HÍDRICOS**

Orientadora: Mirian Araujo Carlos Crapez

**Niterói – RJ
2024**

RICARDO AMARAL REMER

CONSERVOMETRIA

**CONCEITO E APLICAÇÃO EM ÁREAS DE ENERGIA
RENOVÁVEL E RECUPERAÇÃO DE CORPOS HÍDRICOS**

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra da Universidade Federal Fluminense como requisito à avaliação para obtenção do grau de Doutor.

Orientadora: Mirian Araujo Carlos Crapez

**Niterói – RJ
2024**

RICARDO AMARAL REMER


“CONSERVOMETRIA”:

CONCEITO E APLICAÇÃO EM ÁREAS DE ENERGIA RENOVÁVEL E RECUPERAÇÃO DE CORPOS HÍDRICOS

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra da Universidade Federal Fluminense como requisito à avaliação para obtenção do grau de Doutor.

Aprovada em: 29 de julho de 2024

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 MIRIAN ARAUJO CARLOS CRAPEZ
Data: 29/07/2024 12:26:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


MIRIAN ARAUJO CARLOS CRAPEZ, Dra. (PPGDOT-UFF) - Orientadora

DocuSigned by:


F1B8B2D88C4F4BD
DR. CARLOS ALMIRO DE MAGALHÃES MELO

DocuSigned by:


2BD8AF4C82AF4BB...
DRA. DANIELA MATTOS SANDOVAL COLI

Documento assinado digitalmente
 JOSE ANTONIO BAPTISTA NETO
Data: 02/08/2024 09:43:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

DR. JOSÉ ANTONIO BAPTISTA NETO

Documento assinado digitalmente
 RODRIGO MARTINS FERNANDES
Data: 04/08/2024 15:19:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

DR. RODRIGO MARTINS FERNANDES

Documento assinado digitalmente
 WIM MAURITS SYLVAIN DEGRAVE
Data: 05/08/2024 10:52:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

DR. WIM MAURITS SYLVAIN DEGRAVE

Niterói – RJ
2024

Certificado de Conclusão

Identificação de envelope: 42F06A59936F4B3A8B44DCA2A74692E2

Status: Concluído

Assunto: Complete with DocuSign: Tese_Ricardo_Amaral_Remer_Folha_de_Assinaturas_assinado.pdf, ATA_DEFESA...

Envelope fonte:

Documentar páginas: 3

Assinaturas: 4

Remetente do envelope:

Certificar páginas: 5

Rubrica: 0

Patricia Regina Pires

Assinatura guiada: Ativado

Av. das Nações Unidas, 14261 - Chácara Santo

Selo com Envelopeld (ID do envelope): Ativado

Antônio

Fuso horário: (UTC-03:00) Brasília

São Paulo, São Paulo 04794-000

patriciapires@brkambiental.com.br

Endereço IP: 163.116.228.107

Rastreamento de registros

Status: Original

Portador: Patricia Regina Pires


Local: DocuSign

31/07/2024 14:44:43

patriciapires@brkambiental.com.br

Eventos do signatário**Assinatura****Registro de hora e data**

Carlos Almiro de Magalhães Melo
 carlosalmiro@brkambiental.com.br
 Presidente Instituto BRK

DocuSigned by:

 F1B8B2D88C4F4BD...

Enviado: 31/07/2024 14:48:37
 Visualizado: 31/07/2024 16:36:43
 Assinado: 31/07/2024 16:36:53

BRK

Adoção de assinatura: Estilo pré-selecionado

Nível de segurança: E-mail, Autenticação da conta (Nenhuma)

Usando endereço IP: 189.96.31.253

Assinado com o uso do celular

Termos de Assinatura e Registro Eletrônico:

Aceito: 04/10/2021 11:42:05

ID: 9b8d814a-75a3-42a6-b96e-9dc6ed579789

Daniela Mattos Sandoval Coli
 danielasandoval@brkambiental.com.br
 VP Corporate Affairs and Reg

DocuSigned by:

 2BD8AF4C82AF4BB...

Enviado: 31/07/2024 14:48:37
 Visualizado: 01/08/2024 14:26:18
 Assinado: 01/08/2024 14:26:27

Brk Ambiental Participacoes S.A.

Adoção de assinatura: Estilo pré-selecionado

Nível de segurança: E-mail, Autenticação da conta (Nenhuma)

Usando endereço IP: 163.116.233.31

Termos de Assinatura e Registro Eletrônico:

Não oferecido através do DocuSign

| Eventos do signatário presencial | Assinatura | Registro de hora e data |
|-----------------------------------|------------------------|-------------------------|
| Eventos de entrega do editor | Status | Registro de hora e data |
| Evento de entrega do agente | Status | Registro de hora e data |
| Eventos de entrega intermediários | Status | Registro de hora e data |
| Eventos de entrega certificados | Status | Registro de hora e data |
| Eventos de cópia | Status | Registro de hora e data |
| Eventos com testemunhas | Assinatura | Registro de hora e data |
| Eventos do tabelião | Assinatura | Registro de hora e data |
| Eventos de resumo do envelope | Status | Carimbo de data/hora |
| Envelope enviado | Com hash/criptografado | 31/07/2024 14:48:37 |
| Entrega certificada | Segurança verificada | 01/08/2024 14:26:18 |

| Eventos de resumo do envelope | Status | Carimbo de data/hora |
|--------------------------------------|----------------------|-----------------------------|
| Assinatura concluída | Segurança verificada | 01/08/2024 14:26:27 |
| Concluído | Segurança verificada | 01/08/2024 14:26:27 |

| Eventos de pagamento | Status | Carimbo de data/hora |
|---|---------------|-----------------------------|
| Termos de Assinatura e Registro Eletrônico | | |

Ficha catalográfica automática - SDC/BIG
Gerada com informações fornecidas pelo autor

R386c Remer, Ricardo Amaral
CONSERVOMETRIA : CONCEITO E APLICAÇÃO EM ÁREAS DE ENERGIA
RENOVÁVEL E RECUPERAÇÃO DE CORPOS HÍDRICOS / Ricardo Amaral
Remer. - 2024.
164 f. : il.

Orientador: Mirian Araujo Carlos Crapez.
Tese (doutorado)-Universidade Federal Fluminense, Instituto
de Geociências, Niterói, 2024.

1. Métricas ambientais. 2. Blockchain e tokenização. 3.
Sustentabilidade Econômica. 4. Águas interiores. 5.
Produção intelectual. I. Crapez, Mirian Araujo Carlos,
orientadora. II. Universidade Federal Fluminense. Instituto de
Geociências. III. Título.

CDD - XXX

Cogito, ergo est

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a meus Pais e Irmãos, que trazem luz em todos os momentos.

Além deles, muitas outras pessoas contribuíram decisivamente para a realização deste trabalho, às quais agradeço.

À Profa. Dra. Mirian Crapez, pelo convite que resultou no meu ingresso no programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra da UFF. Também sou muito grato por sua motivação aos estudos, discussões profundas e intensa e efetiva orientação, sempre com leveza e humor notáveis.

Ao analista de mercado Marcelo da Fonseca Baptista, dileto amigo que contribuiu profundamente para a concepção do conceito de Créditos de Conservação e pelas alongadas discussões sobre princípios de razão econômica.

Ao Dr. Wim Degrave, amigo, mestre e parceiro em diversas iniciativas. Foi quem me iniciou na experiência acadêmica há muitos anos e também quem sugeriu o estudo de sistemas de aeração em bioprocessos mais recentemente. Ele segue inspirando a todos ao seu redor, tanto por sua ampla visão científica quanto por sua conduta admirável.

Gratidão ao Dr. Rodrigo Fernandes, parceiro de alongadas discussões sobre projetos e perspectivas sobre este mundo em transformação.

Gratidão aos colaboradores de Campos dos Goytacazes/RJ, Eng. Leonardo Tavares e Dr. Rogério Atem de Carvalho (Polo de Inovação do IFF), Eng. Marcos J. R. Gonçalves Jr. (Eneltec, Things Go Online), pela parceria, profissionalismo e amizade.

Gratidão aos amigos e parceiros que atuaram conjuntamente no Projeto de Pesquisa na Laguna de Piratininga, Niterói: Dr. Gilberto Tavares Macedo Dias (UFF), Dr. Fernando Pinto (UFRJ), Dr. Thiago Linde e Eng. Hugo Mendes; a toda equipe do Pro-Sustentável, em especial Dionê Marinho Castro e Camile Alves; ao casal Luiz Henrique e Grazi, pela gentil disponibilização de sua casa no Tibau para suporte ao projeto; e ao pescador Luis, sempre ajudando com o transporte com barco e com seus conhecimentos da região.

Gratidão aos sócios e colaboradores de Remer Villaça & Nogueira, pelo suporte e compreensão pelo esforço investido na tese e colaboração nas patentes e marcas originadas neste trabalho.

Agradecimentos à Laressa Amaral e Maristela Santos Moreira, da equipe da Pós-Graduação em Dinâmica do Oceanos e da Terra da UFF, pelo suporte em temas acadêmicos nos últimos anos.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| Resumo | 1 |
| Abstract | 2 |
| Lista de Figuras | 3 |
| Lista de Tabelas | 5 |
| Glossário | 6 |
| INTRODUÇÃO GERAL | 7 |
| OBJETIVOS | 8 |
| METODOLOGIA | 9 |
| | |
| CAPÍTULO 1: CONSERVOMETRIA | 10 |
| 1.1. Resumo | 10 |
| 1.2. Introdução | 11 |
| 1.2.1. O Conceito de CONSERVOMETRIA | 11 |
| 1.2.2. Parâmetros e Métricas em Conservação Ambiental | 14 |
| 1.2.3. Comunicação e Considerações Culturais..... | 16 |
| 1.3. Conservação Ambiental e <i>Razão Econômica</i> | 18 |
| 1.3.1. Serviços Ambientais..... | 18 |
| 1.3.2. A Questão do <i>Greenwashing</i> | 22 |
| 1.4. Conclusão do Capítulo 1 | 24 |
| | |
| CAPÍTULO 2 – CONSERVÔMETRO[®], CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®] e GIVEBACK[®] | 26 |
| 2.1. Resumo | 26 |
| 2.2. Introdução | 27 |
| 2.2.1. O Conceito do CONSERVÔMETRO [®] | 30 |
| 2.2.2 <i>Blockchain</i> , Tokens e seu Uso na CONSERVOMETRIA | 33 |
| 2.2.3. O Conceito de CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO [®] | 35 |
| 2.2.4. O Conceito de GIVEBACK [®] | 37 |
| 2.3. Uma Implementação Prática: a Plataforma ThingsGo.Online | 40 |
| 2.3.1. Propósito..... | 42 |
| 2.3.2. Arquitetura da Plataforma..... | 44 |
| 2.3.2.1. Dispositivo IoT/ <i>software</i> e Automação da Tokenização (<i>Joker</i>)..... | 45 |
| 2.3.2.2. Verificação de Dados (Autenticador)..... | 47 |
| 2.3.2.3. Tokens RWA, Tokens de Recompensa e NFTs | 48 |
| 2.3.2.4. Economia Circular Digital | 50 |
| 2.3.2.5. Eficiência Energética até nos Algoritmos: Uso de XRP Ledger..... | 52 |
| 2.3.3 Problemas Resolvidos..... | 54 |
| 2.4. Estudo de Caso na Produção de Energia Solar | 57 |
| 2.5. Estudo de Caso na Redução de Emissão de Metano | 63 |
| 2.5.1. O Potencial dos Créditos de Metano..... | 68 |
| 2.6. Conclusão do Capítulo 2 | 74 |

| | |
|--|------------|
| CAPÍTULO 3: CONSERVOMETRIA em Águas Interiores..... | 76 |
| 3.1 Resumo | 77 |
| 3.2. Introdução..... | 77 |
| 3.2.1. Água, o Grande Recurso Natural e Prestadora de Serviços..... | 78 |
| 3.2.2. Biogeoquímica, Produtividade Primária e Consórcios Microbianos..... | 83 |
| 3.2.3. Metagenômica ou <i>Environmental Genomics</i> | 91 |
| 3.3. Ambientes Aquáticos Interiores..... | 94 |
| 3.3.1. Lagunas..... | 97 |
| 3.3.2. Estudo de Caso na Laguna de Piratininga, Niterói/RJ..... | 101 |
| 3.3.2.1. Resultados de Redução dos Níveis de Fósforo e Lipídios | 106 |
| 3.3.3. <i>Wetlands</i> Naturais | 112 |
| 3.3.4. <i>Constructed Wetlands</i> ou Jardins Filtrantes..... | 121 |
| 3.3.4.1. Alternativa ou complemento às ETEs | 127 |
| 3.3.4.2. <i>Wetlands</i> do Parque Orla Piratininga..... | 129 |
| 3.4. Conclusão do Capítulo 3..... | 132 |
| | |
| 4. CONCLUSÃO GERAL..... | 137 |
| | |
| 5. REFERÊNCIAS | 142 |
| | |
| ANEXO | 156 |

Produção científica e tecnológica resultante desta tese (2 Artigos e 9 Patentes)

RESUMO

O presente trabalho apresenta o conceito de “CONSERVOMETRIA”, aqui definido como um conjunto de meios tecnológicos para a obtenção, documentação, validação e comunicação de métricas de conservação e/ou de recuperação ambiental. Múltiplas tecnologias foram desenvolvidas no âmbito desta tese para esta finalidade e envolvem a integração de sensores de grandezas físicas com *hardware* e/ou *software* para registro automático em *blockchain* das métricas ambientais. O objetivo é garantir a *validade e confiabilidade dos dados* e proporcionar *razão econômica* para atividades de conservação ambiental. Aplicações práticas de CONSERVOMETRIA são apresentadas no contexto da produção de energia renovável e redução de emissão de metano com o uso de geradores a biogás. Foi também feita uma extensa revisão de literatura sobre parâmetros relacionados às águas interiores, com ênfase em *Wetlands* e Lagunas. São apresentados os resultados de projeto de pesquisa na Laguna de Piratininga, Niterói/RJ, onde foi empregada uma tecnologia de aeração por filmes finos de líquido e a modulação dos consórcios microbianos com adição de microrganismos benéficos. Estas abordagens visam auxiliar a formulação de métricas específicas para águas interiores, cuja multiplicidade de parâmetros e variedade de serviços ecossistêmicos prestados trazem complexidade ao tema. Os resultados mostraram que a redução de teores de fósforo total e de lipídios é factível e que os sedimentos têm relevante participação na ciclagem de cargas orgânicas - merecendo mais atenção pelos formuladores de políticas ambientais e proponentes de projetos de conservação ambiental. Tais informações devem idealmente integrar as métricas da biogeoquímica nestes ambientes, viabilizando o desenho de estratégias de conservação ambiental mais eficientes, que tenham mais impacto positivo e com maior sustentabilidade econômica devido ao uso do modelo conceitual ora proposto.

Palavras-chave: Biogeoquímica; Águas Interiores; Lagunas, Métricas Ambientais, *Blockchain*; Sedimentos; Consórcios Microbianos, Aeração por Filmes Finos de Líquido.

ABSTRACT

This paper presents the concept of “CONSERVOMETRY”, defined herein as a set of technological means for obtaining, documenting, validating and communicating conservation and/or environmental recovery metrics. Multiple technologies were developed within the scope of this thesis for this purpose and involve the integration of physical sensors with hardware and/or software for automatic registration of environmental metrics in the blockchain. The purpose is to provide or guarantee the *validity and reliability of the data* and to provide *economic reason* for environmental conservation activities. Practical applications of CONSERVOMETRY are presented in the context of renewable energy production and methane emission reduction using biogas generators. An extensive literature review was also carried out on parameters related to inland waters, with emphasis on Wetlands and Lagoons. Presented herein are the results of a research project in the Piratininga Lagoon, Niteroi/RJ/Brazil, where a liquid thin film aeration technology was used together with the modulation of microbial consortia with the addition of beneficial microorganisms. These approaches aim to help formulate specific metrics for inland waters, whose multiplicity of parameters and variety of ecosystem services provide complexity to the issue. The results show that reducing total phosphorus and lipid levels is feasible, and that sediments play a very important role in the cycling of organic loads - deserving more attention from environmental policy makers and proponents of environmental conservation projects. Such information should ideally integrate the biogeochemistry metrics on these environments, thus enabling the design of more efficient conservation strategies – having increased positive impact and being more economically sustainable due to the use of the conceptual model herein proposed.

Keywords: Biogeochemistry; Inland Waters; Lagoons, Environmental Metrics, Blockchain; Sediments; Microbial Consortia, Liquid Thin Film Aeration.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1 – Exemplo de forma de comunicação de CONSERVOMETRIA.
- Figura 1.2 – Outro exemplo de forma de comunicação de CONSERVOMETRIA.
- Figura 1.3 – O caso de *Greenwashing* da Volkswagen.
- Figura 2.1 - Evolução dos conceitos e algumas tecnologias descritas na tese.
- Figura 2.2 - Medição direta do O₂ nos gases de saída no PULMÃO.
- Figura 2.3 – Alguns modelos de negócio relacionados ao CONSERVÔMETRO®.
- Figura 2.4 - PULMÃO inteligente – monitoramento remoto em tempo real.
- Figura 2.5 - Esquema conceitual do CONSERVÔMETRO®.
- Figura 2.6 - Camadas CONSERVÔMETRO®.
- Figura 2.7 - Diagrama de blocos funcionais da plataforma ThingsGo.Online.
- Figura 2.8 - *Joker*, IoT para automação do registro de métricas em *blockchain*.
- Figura 2.9 - Representação esquemática da Economia Circular Digital.
- Figura 2.10 - Foto aérea de painéis solares da Cooperativa COSOLAR/RJ.
- Figura 2.11 - Registro do total de tokens em 26Fev2024.
- Figura 2.12 - Energia efetivamente produzida e a documentada periodicamente pela Plataforma ThingsGo.Online.
- Figura 2.13 - Quantidade mensal de tokens registrados em *blockchain* entre 2022/2024.
- Figura 2.14 - Acumulado de tokens de recompensa TGO até 25Fev2024.
- Figura 2.15 - Gerador da CHP Brasil e, na área destacada, o dispositivo *Joker*.
- Figura 2.16 - Total de tokens-dispositivo MWH registrados no período analisado.
- Figura 2.17 - Quantidade mensal de tokens-dispositivo MWH registrados em *blockchain*.
- Figura 2.18 - Registro de tokens de recompensa TGO.
- Figura 2.19 - Evolução das cotações dos créditos de carbono entre 2011 e 2024.
- Figura 3.1 – Mar de Aral em diferentes momentos: A) antes de 1960; B) atualmente; C) evolução de sua linha costeira entre 1960-2009.
- Figura 3.2 – Foto representativa de áreas desérticas no Mar de Aral.
- Figura 3.3 - Águas costeiras onde a hipóxia é observada.
- Figura 3.4 - Categorização dos microrganismos de acordo com as fontes de carbono.
- Figura 3.5 - Fatores que afetam o equilíbrio de consórcios microbianos.
- Figura 3.6 – Algumas formas de Fósforo não-reativo (recalcitrante) comuns em águas residuárias.

Figura 3.7 – Representação esquemática da estrutura da região 16S rRNA.

Figura 3.8 – Distribuição dos principais filos de bactérias na superfície da raiz, com ou sem adição de óxido de manganês para auxiliar na degradação de derivados de petróleo em amostras de diferentes regiões de uma *wetland*.

Figura 3.9 – Exemplos de plantas típicas de águas interiores.

Figura 3.10 – Rizosfera e seus componentes.

Figura 3.11 – Proposta de categorização de diferentes corpos d'água.

Figura 3.12 – Lagunas do Estado do Rio de Janeiro.

Figura 3.13 – Mapa do Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu, bacias hidrográficas e tributários.

Figura 3.14 – Distribuição espacial de fósforo na Laguna de Itaipú, Niterói/RJ.

Figura 3.15 – Microbacias hidrográficas que drenam para a Laguna de Piratininga.

Figura 3.16 – Localização da Laguna de Piratininga e áreas do experimento *in situ* no Tibau do projeto UFF/BIOTECAM.

Figura 3.17 – Tecnologia EMTM com aporte de microrganismos probióticos em *mudballs*

Figura 3.18 – Instalação de um PULMÃOTM na Laguna de Piratininga.

Figura 3.19 – PULMÃOTM em operação.

Figura 3.20 - Medições de fósforo total (FT) no sedimento no período de estudo.

Figura 3.21 – Resultados de teores médios e desvios-padrão de biopolímeros no sedimento no período estudado.

Figura 3.22 – Zonas de plantas de uma *wetland* e gradiente de profundidade de água.

Figura 3.23 – Regiões das *wetlands* estudadas por Liang *et al* (2023).

Figura 3.24 – Configurações de *wetlands* construídas a) livre fluxo de água na superfície; b) fluxo horizontal subsuperficial; e c) fluxo vertical.

Figura 3.25 – Distribuição de publicações usadas na meta-análise sobre emissão de GEE em *wetlands* construídas.

Figura 3.26 – Produção, transporte e oxidação de CH₄ em *wetlands*.

Figura 3.27 – Perfil vertical e horizontal de microrganismos em *wetlands* construídas.

Figura 3.28 – Vista aérea da região onde ficam as *wetlands construídas* do Parque Orla Piratininga, Niterói/RJ.

Figura 3.29 – Martim Pescador - *Megaceryle torquate*.

Figura 3.30 – Vista aérea do Sistema Cafubá, uma *wetland* do Parque Orla Piratininga.

Figura 3.31 - Mapa mostrando a distribuição espacial dos principais ecossistemas de carbono azul na costa brasileira.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Atributos de diferentes tecnologias de *blockchain*.

Tabela 2.2 - Potencial de monetização do mercado brasileiro de geradores de biogás/metano.

Tabela 3.1 – Geolocalização dos pontos de amostragem na Laguna de Piratininga.

Tabela 3.2 – Dados das medições (média de três medidas, dados em mg/kg) de fósforo no sedimento, no período de estudo em 2022.

Tabela 3.3 – Dados das medições (média de três medidas, dados em mg/g) de biopolímeros no sedimento no período de estudo.

Tabela 3.4 – Lista de Ramsar, *wetlands* registradas no Brasil.

Tabela 3.5 – Listagem de macrófitas usadas nas *wetlands* do Parque Orla Piratininga.

GLOSSÁRIO

Águas Interiores: Águas no interior da linha de base do mar territorial, incluindo mares completamente fechados, lagos, lagoas, rios, lagoas e *wetlands*.

Blockchain: Tecnologia para documentar dados digitalmente com cadeia ou corrente de blocos, os quais guardam os mais diversos tipos de informações de forma segura, imutável.

Blue Carbon: Também chamado de Carbono Azul, pode ser definido simplificada e como o carbono capturado por ambientes aquáticos.

Cap and Trade: Mecanismo para estimular a conservação com o uso de regras de mercado; consiste em limitar o uso de um dado recurso por meio da precificação. Usado, por exemplo, no mercado de créditos de carbono.

Greenwashing: Conduta que envolve manipular, falsear ou maquiar dados ambientais.

Metagenômica: Método de análise que envolve o sequenciamento de ácidos nucleicos dos organismos presentes em uma dada amostra, de forma quantitativa.

Mudballs: Bolas de lama usadas para levar microrganismos ao sedimento.

NFT: *Non-fungible tokens* ou tokens não fungíveis. Distinguem-se dos demais tipos de criptoativos ou tokens porque são únicos, inseparáveis, insubstituíveis e verificáveis.

PULMÃO™: (em letras maiúsculas) Nome dado ao equipamento de aeração de água desenvolvido pelo autor e colaboradores.

Naming Rights: Concessão de direitos de nomeação por governos ou empresas mediante pagamento, normalmente envolvendo alguma forma de intangível reputacional.

Token: *A thing serving as a visible or tangible representation of a fact, quality, feeling, etc; a voucher that can be exchanged for goods or services, typically one given as a gift or offered as part of a promotional offer.* É, portanto, um vale, *voucher* ou representação de valor de algo. No presente trabalho, os tokens são das próprias métricas ambientais.

Tokenizar: “Tokenizar” é um neologismo em forma de verbo, derivado da palavra “token”, e significa gerar *vouchers*, vales ou representações de valor correspondentes ao que foi documentado. A tecnologia *blockchain* é particularmente útil para tokenizar ativos em meio digital.

Wetlands: Corpos d’água lânticos, com baixa profundidade (<5m), baixo fluxo de água (predominantemente unidirecional), área maior que 5 hectares e porcentual de vegetação emergente acima de 30% (Richardson *et al* 2022). Podem ser naturais ou construídas (no Brasil estas últimas também são conhecidas como Jardins Filtrantes).

INTRODUÇÃO GERAL

O presente trabalho apresenta o conceito de CONSERVOMETRIA e sua aplicação prática em diferentes contextos, sendo aqui exemplificados: a produção de energia renovável; a redução da emissão de metano; e a conservação de águas de ecossistemas costeiros. A tese foi organizada em três capítulos:

O Capítulo 1 “CONSERVOMETRIA”, apresenta o referido conceito como um conjunto de meios tecnológicos para a obtenção, documentação, validação e comunicação de métricas de conservação e/ou recuperação ambiental, envolvendo automação da obtenção de dados e o uso da tecnologia *blockchain*. O autor propôs esta abordagem para superar as nítidas dificuldades das métricas atuais quanto à *validade e confiabilidade dos dados*, e para disponibilizar um mecanismo para trazer *razão econômica* às atividades de conservação ambiental. A premissa é que o valor da conservação ambiental ou mesmo da *informação* sobre a conservação ambiental seja não apenas reconhecido e usado como elemento reputacional, mas também monetizado.

O Capítulo 2 “CONSERVÔMETRO, CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO E GIVEBACK” apresenta algumas tecnologias desenvolvidas pelo autor e colaboradores envolvendo *hardware* e *software*, para a automação da documentação confiável de dados ambientais, seu uso reputacional, bem como os princípios de tokenização das métricas ambientais para viabilizar sua monetização. É também apresentado o *case* da Plataforma ThingsGo.Online, que é uma *startup* fundada pelo autor e colaboradores, e duas implementações práticas de CONSERVOMETRIA: uma em usina solar no Rio de Janeiro, tokenizando a energia renovável produzida; e outra em uma fazenda em Minas Gerais, tokenizando a produção de energia em geradores a biogás e/ou o metano não emitido, apontando caminhos e oportunidades para a monetização de Créditos de Metano.

O Capítulo 3 “CONSERVOMETRIA EM ÁGUAS INTERIORES” aprofunda questões técnicas relacionadas às métricas aplicadas às águas e sua multiplicidade de serviços prestados. É feita uma extensa revisão bibliográfica sobre detalhes biogeoquímicos de *Wetlands* e Lagunas. São apresentados os resultados de projeto de pesquisa conduzido na Laguna de Piratininga, Niterói/RJ, com a redução de teores de fósforo e lipídios nos sedimentos pelo uso de um sistema de aeração com tecnologia de filmes finos de líquido, desenvolvido pelo autor e colaboradores, e a modulação dos consórcios microbianos com

a aplicação de microrganismos (EMTM) na forma de *Mudballs*. O autor conclui que a formulação de métricas para águas interiores deve considerar o sedimento como elemento fundamental na ciclagem de cargas orgânicas, sendo de especial relevância neste trabalho os biopolímeros, os consórcios microbianos e o nível de oxigenação ou potencial redox presentes. Tais informações devem idealmente integrar as métricas da biogeoquímica nestes ambientes, viabilizando o desenho de estratégias de conservação ambiental mais eficientes, que tenham mais impacto positivo e com sustentabilidade econômica devido ao uso do modelo conceitual ora proposto.

OBJETIVOS

- 1) Formular e propor o modelo conceitual de CONSERVOMETRIA, que envolve a melhoria da *qualidade de métricas* ambientais e modelos de captura de valor das mesmas, viabilizando o uso reputacional das métricas e visando prover *razão econômica* para as atividades de conservação ambiental;
- 2) Desenvolver soluções tecnológicas que viabilizem a implementação prática do conceito de CONSERVOMETRIA e testá-las na prática em diferentes modelos experimentais;
- 3) Analisar o caso específico de CONSERVOMETRIA em Águas Interiores, que são *hotspots* de produtividade biológica e *Blue Carbon*, a partir duas abordagens: uma extensa revisão de literatura sobre *Wetlands* e Lagunas; e a realização de experimentos em projeto de pesquisa na Laguna de Piratininga, avaliando o uso de aeração com tecnologia de filmes finos de líquido e uso de consórcios microbianos na forma de *Mudballs*, bem como seus efeitos biogeoquímicos nos sedimentos do referido ecossistema.

METODOLOGIA

Este trabalho tem como uma das premissas a percepção de que a Conservação Ambiental é desejo de muitos, mas ainda não tem sustentabilidade econômica evidente e a falta de *razão econômica* é fator limitante. A hipótese central é de que desenvolver mecanismos que contribuam para a sustentabilidade econômica de projetos de Conservação Ambiental pode mudar esse panorama. Para tanto, a abordagem metodológica de tese inclui:

- O desenvolvimento de ferramentas de medição, documentação, comunicação e monetização de métricas ambientais (CONSERVÔMETRO):
 - Generalização do CONSERVÔMETRO (partindo do PULMÃO para outras aplicações), incluindo o desenvolvimento de *hardware*, *software* e arquitetura de um sistema de registro de métricas ambientais em *blockchain*;
 - Testes práticos do conceito de CONSERVOMETRIA em energia renovável e redução da emissão de metano, incluindo tokenização das métricas visando comercialização;
- O desenvolvimento de tecnologias para aumento de produtividade na conservação ambiental:
 - O desenvolvimento de abordagem de modulação de consórcios microbianos de sistemas aquáticos;
 - O aperfeiçoamento de um equipamento de aeração de corpos líquidos (PULMÃO) para melhorados desempenho e monitoramento em sistemas de aeração em projetos de conservação ambiental;
- O estudo de fatores críticos para alterar a biogeoquímica de sistemas ambientalmente relevantes:
 - recorte temático em sistemas aquáticos, disponibilidade de oxigênio dissolvido, papel de consórcios microbianos e sua modulação nestes sistemas;
 - Extensa revisão de literatura sobre parâmetros relevantes na biogeoquímica de Lagunas e *Wetlands*; e
 - Experimentos na Laguna de Piratininga, Niterói/RJ, com o emprego do PULMÃO e microrganismos efetivos (EM) atuando junto ao sedimento e avaliação de alteração de parâmetros (ênfase em biopolímeros e fósforo), visando obter elementos para a proposição de métricas nestes ambientes complexos.

CAPÍTULO 1 - CONSERVOMETRIA

1.1. Resumo

Este capítulo apresenta o conceito de “CONSERVOMETRIA” como um conjunto de meios tecnológicos para a obtenção, documentação, validação e comunicação de métricas de atitudes sustentáveis, de conservação e/ou de recuperação ambiental.

A literatura mostra que, apesar de existirem várias diferentes métricas de sustentabilidade, restam ainda muitas lacunas neste domínio do conhecimento. De um lado, as métricas conhecidas são em geral limitadas a determinadas áreas temáticas, não havendo ainda uma métrica abrangente. Além disso, são nítidas as dificuldades de proporcionar ou garantir a *validade e confiabilidade dos dados* utilizados nas métricas de sustentabilidade e de comunicar métricas de forma simples a um público abrangente (Melchior & Henriqson 2020). Consequentemente, comunicar as métricas a estes públicos diversos requer adequado e cuidadoso planejamento, de forma a viabilizar simplicidade e facilidade de compreensão – incluindo a compreensão do que se ganha com a conservação ambiental. Neste contexto, o autor propôs e desenvolveu mecanismos para trazer *razão econômica* para atividades de conservação ambiental, para que o valor da conservação ambiental ou mesmo da *informação* sobre a conservação ambiental seja não apenas reconhecido, mas também monetizado.

Neste contexto, é aqui proposto o uso de um conjunto de tecnologias em conjunto com a tecnologia *blockchain*¹ para implementar o conceito de CONSERVOMETRIA, para documentar de forma segura e confiável os dados quantitativos de ativos ambientais. Essa abordagem resolve os problemas indicados acima e, em conjunto com outras tecnologias desenvolvidas pelo autor e colaboradores, evita ou minimiza o problema do “*greenwashing*”², devido à maior confiabilidade dos dados de origem e à manutenção de seus atributos de integridade, transparência e auditabilidade.

¹ Em tradução literal, *blockchain* é uma cadeia ou corrente de blocos, os quais guardam os mais diversos tipos de informações de forma segura, imutável. Os dados registrados em *blockchain* podem ser acompanhados e visualizados sem que seja possível modificá-los. Mais detalhes serão providos ao longo deste e do próximo capítulo.

² Simplificadamente, significa manipular, falsear ou maquiar dados ambientais. O termo *greenwashing* foi usado pela primeira vez em 1989 no artigo intitulado “*Aid to Disaster*” da revista *New Scientist*. Disponível em <https://www.newscientist.com/article/mg12416850-100-aid-to-disaster/>.

1.2. Introdução

1.2.1. O Conceito de CONSERVOMETRIA

O conceito de “CONSERVOMETRIA” é definido pelo autor como um conjunto de meios tecnológicos para a obtenção, documentação, validação e comunicação de métricas de atitudes sustentáveis ou de projetos conservação e/ou de recuperação ambiental.

O termo “atitudes sustentáveis” já é conhecido e aplicado há bastante tempo, sendo relacionado a comportamentos alinhados ao conceito de desenvolvimento sustentável (Leiserowitz *et al* 2006).

O termo “Conservação” pode ser definido de várias formas^{3,4}, sendo escolhida aqui a definição da National Geographic⁵: *Conservação e proteção de recursos naturais (água, solo, minerais, plantas e animais) visando assegurar que tais recursos sejam usados de forma sustentável, permanecendo disponíveis no futuro*. Interessante notar que a definição inclui o verbo “usar”, uma vez que o homem é parte integrante do ambiente e necessita de recursos naturais para sua sobrevivência, desenvolvimento e progresso. A qualificação do verbo usar, incluindo a expressão “*de forma sustentável*” reitera o conceito segundo o qual a Conservação envolve o uso dos recursos naturais, mas tal uso deve ser tal que não comprometa a *disponibilidade* dos respectivos recursos *no futuro*.⁶

O termo “Recuperação Ambiental”, na definição de Timpane-Padgham *et al* (2017), envolve atividades de reabilitação de ecossistemas e habitats que foram degradados ou

³ No livro de Sarkar (2005), conceitua-se que “*conservação é fundamentalmente uma expressão de valores humanos*”.

⁴ Segundo Kareiva & Marvier (2012), as atitudes e ações humanas moldam o mundo que será deixado para as futuras gerações. Consequentemente, as considerações lógicas e psicológicas subjacentes às ações humanas e à visão sobre a natureza são elementos chave, ainda que sejam dimensões frequentemente negligenciadas na conceituação de “Conservação”.

⁵ Disponível em <https://education.nationalgeographic.org/resource/conserving-earth/>

⁶ Esta perspectiva é alinhada, em parte, à visão de Kareiva & Marvier (2012), para os quais diferentemente do termo “*Conservation Biology*” ou Biologia da Conservação, o termo “*Conservation Science*” ou Ciência da Conservação tem como propósito principal a melhoria do bem-estar do Ser Humano através da gestão do ambiente. Então, na Ciência da Conservação são buscadas estratégias para maximizar, concomitantemente, os benefícios às pessoas e à biodiversidade. É, portanto, uma disciplina que requer a aplicação tanto de ciências naturais quanto sociais para endereçar adequadamente a dinâmica acoplada de sistemas humanos-naturais.

prejudicados por atividade humana ou outras razões⁷. Colocado de outra forma, o termo também se refere à *restauração e regeneração da biodiversidade, ecossistemas e infraestrutura ambiental*. As atividades de Recuperação Ambiental são, portanto, complementares às de Conservação Ambiental, uma vez que, no processo de Recuperação, não se deve comprometer a disponibilidade futura de recursos naturais do ambiente a ser recuperado. Conseqüentemente, métricas relacionadas a atitudes sustentáveis e/ou ações de conservação ou recuperação ambiental devem incluir os elementos conceituais indicados acima para que sejam coerentes e façam sentido prático.

A crescente sensibilização da população em geral sobre a importância da conservação e/ou recuperação ambiental vem trazendo mais atenção ao tema. Isso pode ser constatado pela inclusão, na agenda da ONU, dos chamados “Objetivos de Desenvolvimento Sustentável” – ou ODS. É importante chamar a atenção para o fato de que os objetivos são *de desenvolvimento*, ou seja, este é o aspecto principal, enquanto seu predicado *sustentável* é um qualificador alinhado ao conceito de Conservação. Essa ressalva é importante porque ainda é frequente uma visão parcial de Ambiente, que não leva em consideração as necessidades do Homem. Dentre os 17 ODS listados pela ONU, alguns são de particular relevância no contexto do presente trabalho:

- ODS 3 – Saúde e bem-estar;
- ODS 6 – Água limpa/potável e Saneamento;
- ODS 11 – Cidades Sustentáveis;
- ODS 14 – Vida na água;
- ODS 15 – Vida Terrestre;
- ODS 17 – Parcerias e meios de implementação.

Entretanto, a despeito da maior visibilidade sobre o tema, ainda não estão disponíveis ferramentas robustas para melhorar a qualidade dos dados relativos às atividades de conservação ou recuperação ambiental, a avaliação de seu desempenho ou evolução e

⁷ Timpane-Padgham *et al* (2017) também fizeram uma revisão sistemática da literatura para avaliar conceitos e atributos de resiliência no contexto da recuperação, e sugeriram que: (1) incluir resiliência como um objetivo explícito de planejamento pode ampliar o sucesso de projetos de recuperação; (2) considerar o contexto ecológico e a escala de uma ação de recuperação é essencial para escolher os atributos de resiliência; e (3) certos atributos ecológicos, tais como diversidade e conectividade, são mais comumente considerados como proporcionando resiliência porque se aplicam a uma ampla variedade de espécies e ecossistemas.

mecanismos para prover *sustentabilidade econômica* a tais atividades. Usualmente, as iniciativas de conservação ou recuperação de ativos ambientais são propostas qualitativas, sem que critérios objetivos sejam efetivamente utilizados ou, quando tais critérios existem, restam importantes lacunas técnicas e metodológicas para a obtenção e custódia de amostras, análise, validação, documentação e/ou certificação dos dados e métricas utilizadas.

No contexto ora apresentado, o conceito de CONSERVOMETRIA se propõe a superar parte dessas limitações. Certos princípios fundamentais sobre métricas em geral (Melchior 2014) merecem destaque, sendo igualmente aplicáveis ao conceito de CONSERVOMETRIA. As métricas devem, tanto quanto possível, ser:

- simples e de fácil compreensão;
- concebidas sob o ponto de vista do resultado final desejado;
- de fácil comparação/*benchmarking*;
- progressivamente mais detalhadas conforme necessidade; e
- comunicadas ao público-alvo adequado.

O termo "simples e de fácil compreensão" é o fundamento sobre o qual qualquer atividade que envolva a sociedade em geral deve ser concebida. Sempre que as métricas não forem compreendidas, será difícil analisá-las e ainda mais difícil desenhar ações sobre as mesmas.

A razão de existir de uma métrica, notadamente no contexto da CONSERVOMETRIA, é viabilizar tanto a avaliação do progresso de atividades que visam um objetivo como também o melhoramento contínuo. Atingir um objetivo, ou seja, chegar até os resultados desejados, requer ações e melhorias contínuas que precisam estar baseadas em métricas com dados sólidos e confiáveis. Assim, cada novo projeto, processo, ideia ou melhoria deve ser avaliado sob o prisma de atingir um resultado. A existência de uma métrica adequada é o que permite avaliar se se chegou ou não ao resultado esperado, de forma *quantitativa*.

Frequentemente, as métricas precisam ser refinadas ou mais bem detalhadas. A teoria de gestão de processos em geral, incluindo a gestão de processos visando a sustentabilidade (Brown & Ulgiati 1997; Franke *et al* 2016; Hasheminasab *et al* 2018) indica que não é

possível uma adequada gestão sem métricas. Porém, cada métrica tem suas limitações e um aperfeiçoamento contínuo é desejável para que as métricas evoluam. Comparações com outras referências ou projetos assemelhados (*benchmarking*) são muito úteis para aferir se as métricas escolhidas são adequadas ou não e, portanto, o *benchmarking* é instrumento muito útil nesse processo de melhoria. Por exemplo, a medição de parâmetros físico-químicos ou bioquímicos em uma lagoa degradada pode gerar um conjunto de métricas úteis no contexto de sua conservação ou recuperação. Entretanto, outras métricas como contagem de espécies biológicas, ou inventário de uma cadeia alimentar de uma lagoa saudável (por exemplo, bactérias, fitoplâncton, zooplâncton, pequenos herbívoros e carnívoros) podem acrescentar maior representatividade de um projeto de conservação ou recuperação ambiental. Logo, é importante analisar que tipos de métricas devem ser considerados e sua aplicação em cada fase de um projeto.

A seguir são detalhados alguns parâmetros e métricas que podem ser utilizadas em projetos de conservação e/ou recuperação ambiental.

1.2.2. Parâmetros e Métricas em Conservação Ambiental

Diversos parâmetros são atualmente utilizados como critério para projetos de conservação ou recuperação ambiental. Exemplos incluem: número de árvores plantadas (o que não necessariamente reflete as espécies nativas ou desejáveis no local em questão); esgoto equivalente tratado, baseado na média de geração de esgoto por habitante; gás carbônico (CO₂) capturado ou não emitido, o que pode desconsiderar a cadeia completa (por exemplo, carros elétricos na Europa podem ser recarregados com eletricidade de termoelétricas, que emitem CO₂) e assim por diante. Portanto, é de grande importância analisar a cadeia completa dos ecossistemas e parâmetros envolvidos. Consequentemente, o uso de parâmetros individuais ou de métricas derivadas destes parâmetros no tema geral de conservação ou CONSERVOMETRIA tem grande complexidade.

Métricas, em outras disciplinas, podem servir como referência e merecem breve menção. No campo dos processos químicos, é conhecida a expressão Química Verde ou *Green Chemistry*, para a qual algumas métricas foram desenvolvidas e são aplicadas. Em geral, as referidas métricas se relacionam com a entrada e saída de materiais, a energia

consumida e questões ambientais associadas, sendo bem conhecidas as métricas associadas aos materiais usados, como: “Intensidade de Massa – IM⁸”; “Economia de Átomos – EA⁹”; e “Fator Ambiental – FA¹⁰” (Rosa *et al* 2022).

Mais voltado ao tema da sustentabilidade de projetos de conservação ou recuperação ambiental, o conceito de “*Emergia*” tem sido objeto de alguns estudos (Brown *et al* 2016; Brown & Ulgiati 1997). Na definição de Odum¹¹ (1998), Emergia é toda energia necessária para um ecossistema produzir um recurso (energia, material, serviço ambiental ou serviço humano). O índice de emergia de um sistema por ser calculado para avaliar a real sustentabilidade deste meio. Segundo Brown & Ulgiati (1997), a emergia é a energia que a biosfera investe para produzir seus bens e serviços, incluindo bens e serviços da sociedade.

Na revisão sistemática de Melchior & Henriqson (2020) vários diferentes índices ou métricas de sustentabilidade foram analisados. Coerentemente com o demonstrado nos parágrafos acima, os autores indicaram que os estudos disponíveis se limitam a determinadas áreas temáticas, sendo ainda necessário desenvolver índices ou métricas mais abrangentes. Além disso, os autores concluíram que nenhuma das múltiplas referências analisadas entrou no mérito da *validade e confiabilidade dos dados* utilizados (primários ou secundários) para o desenvolvimento dos índices ou métricas de sustentabilidade.

Estas considerações trazem mais luz à complexidade da utilização de parâmetros individuais ou métricas conhecidas (ou ainda novas métricas) para atividades de conservação ou recuperação ambiental. Idealmente, o manejo de fontes renováveis e/ou

⁸ Intensidade de Massa ou *Mass Intensity* (às vezes referida também como *Process Mass Intensity*) é uma métrica segundo a qual se determina quanto da massa total de reagentes em um processo chega ao produto final. Essa abordagem enfatiza o desenho de reações com mínimo consumo de reagentes, em vez de enfatizar os subprodutos indesejáveis que acabam sendo problemas ambientais.

⁹ Economia de Átomos ou *Atom Economy* é um conceito proposto pelo Prof. Barry Trost e se refere a reações químicas que não desperdiçam átomos (Trost 1991). O conceito visa ampliar a sustentabilidade ambiental de processos através de: estimular a redução do uso de fontes não renováveis, minimizando a quantidade de rejeitos; e reduzir o número de etapas de síntese de compostos.

¹⁰ Fator Ambiental ou *Environmental Factor* (ou *E Factor*) é um índice usado na indústria química e farmacêutica relacionado à minimização de efluentes e à sustentabilidade ambiental (Sheldon 2017).

¹¹ Disponível em <https://archive.epa.gov/aed/html/collaboration/web/pdf/emergyeval.pdf>

o uso do conceito de *economia circular* devem fazer parte destas equações. Neste contexto, Nicholson *et al* (2021) fizeram uma interessante abordagem sobre a teoria da mudança, disponibilizando uma revisão sobre indicadores úteis para avaliar o progresso de iniciativas de conservação ou recuperação ambiental. Os referidos autores, entretanto, apontam que ainda são necessários múltiplos indicadores que capturem as diferentes dimensões de um ecossistema.

Importante ressaltar que métricas em si não são suficientes para garantir o sucesso de um serviço ambiental ou projeto de conservação/recuperação ambiental. Por exemplo, as métricas não substituem a importância da gestão e motivação de pessoas, sendo ainda importantes ferramentas para a gestão de projetos. Logo, ao escolher ou conceber métricas é importante sempre lembrar o objetivo final, começar de forma simples, fazer comparações e refinar as métricas ao longo dos projetos, de acordo com a necessidade de comunicação com o público-alvo, que também evolui. Esses princípios certamente ajudam muito a se chegar ao objetivo final, que no caso de projetos de conservação ou recuperação ambiental é uma melhoria das condições do ambiente em questão.

1.2.3. Comunicação e Considerações Culturais

As formas de comunicação das métricas também merecem atenção. No caso de iniciativas de conservação ou recuperação ambiental, os *stakeholders* ou público-alvo da comunicação é muito diverso, incluindo a comunidade local afetada, os formuladores de políticas públicas, os financiadores dos projetos, os executores dos projetos e a sociedade civil em geral. Isso inclui também, obviamente, quem “perde” com a conservação, com a falta ou perda de lucratividade ou da vantagem pretendida sem a conservação (ex. projetos de mineração, de extração de petróleo ou de água, de geração de energia, de transporte terrestre ou aéreo, de descarte de lixo ou poluentes diversos, de loteamento, extrativismo, de exploração econômica diversa como caça, pesca, plantio, pecuária, irrigação, turismo etc.). Consequentemente, comunicar as métricas a estes públicos diversos requer adequado e cuidadoso planejamento, de forma a viabilizar simplicidade e facilidade de compreensão. Logo, um caminho recomendável é iniciar um projeto com um conjunto simples de métricas e ampliar a complexidade das mesmas com o passar do tempo.

No caso específico de projetos de recuperação ambiental de corpos d'água degradados, algumas das métricas relevantes podem ser comunicadas de forma simples (Fig. 1.1) e intuitiva, como é o caso das faixas de cada parâmetro usando cores - não sendo necessário aos leigos conhecer detalhes sobre os mesmos.

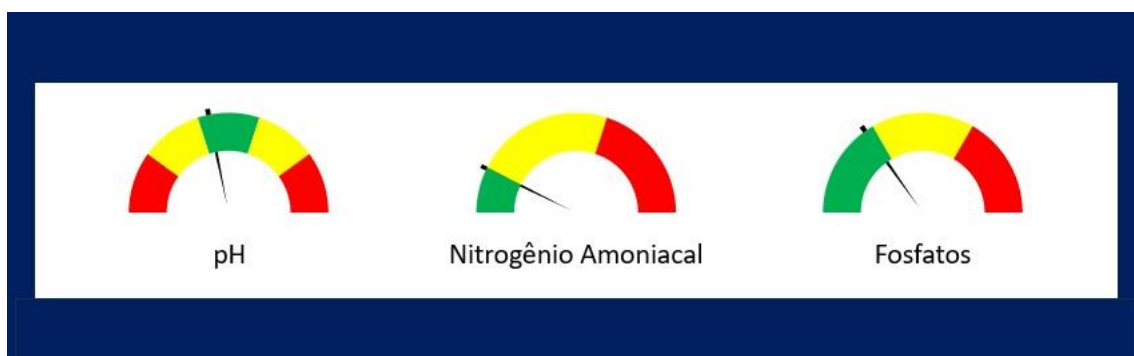


Figura 1.1 – Exemplo de forma de comunicação de CONSERVOMETRIA.

Opcionalmente, quando para alguns parâmetros há legislação¹² que estabelece as faixas aceitáveis, tais limites podem ser também mostrados de forma intuitiva (Fig 1.2).

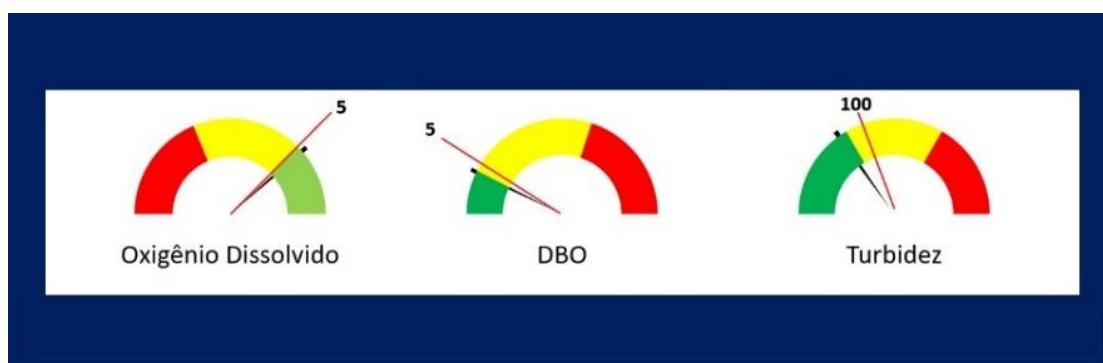


Figura 1.2 – Outro exemplo de forma de comunicação de CONSERVOMETRIA.

¹² Como, por exemplo, a Resolução Conama nº 357 de 17 de março de 2005. Ela dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. Estabelece, por exemplo, que águas de classe 2 podem ser destinadas: a) à pesca amadora; e b) à recreação de contato secundário. Para águas de classe 2, alguns limites aceitáveis incluem: Oxigênio Dissolvido ≥ 5 mg/L; DBO ≤ 5 mg/L (demanda bioquímica de oxigênio); e Turbidez ≤ 100 UNT.

Por fim, a demanda por uma melhor representação das considerações culturais tem sido objeto de estudos na área de gestão ambiental. Satterfield *et al* (2013) ressaltam a importância da inclusão de serviços culturais nas abordagens de serviços ambientais. Esta dimensão traz complexidade ao conjunto de métricas a serem avaliadas, uma vez que “métricas culturais” podem ser concebidas de forma muito rudimentar quando os gestores do projeto são apenas da área econômica, biociências ou biofísica. Aspectos intangíveis como benefícios culturais ou impactos sociais devem ser adequadamente contextualizados e comunicados, sendo recomendável que *modelos culturais* sejam usados em entrevistas que utilizam métricas subjetivas para documentar preocupações culturais expressas a cada projeto específico. Satterfield *et al* (2013) recomendam uma abordagem para auxiliar a caracterizar os benefícios e impactos culturais a partir das entrevistas mencionadas acima, para avaliar a mentalidade (*mind set*) dos possíveis colaboradores, para em seguida indicar outros exemplos de projetos assemelhados e já testados como referência ou *benchmarking* e caracterizar os tipos de obstáculos que em princípio são passíveis de solução usando técnicas ou tecnologias à disposição. A dimensão *comunicação* é muito relevante na abordagem indicada acima.

1.3. Conservação Ambiental e Razão Econômica

1.3.1. Serviços Ambientais

O termo “Serviços Ambientais” pode ser encontrado em diferentes contextos, com significados diferentes. No âmbito da ciência ambiental, são numerosas as publicações relativas a *serviços ecossistêmicos* de áreas protegidas, ou seja, serviços prestados pelas áreas de proteção ou conservação¹³. Neste contexto, a revisão sistemática de Pu *et al*

¹³ Conforme bem ilustrado na publicação de Patterson (2011), serviços ecossistêmicos representam tudo que os ecossistemas funcionais fazem para as pessoas (que em geral não pagam por isso). Exemplos incluem a retenção de sedimentos e filtragem de água por uma encosta florestada, captura de carbono da atmosfera por plantas, proteção conferida pelos mangues contra a ação de marés e tempestades, entre outros. Quando um serviço ecossistêmico é perdido, os substitutos feitos pelo Homem (estações de tratamento de água, muros de contenção de encostas etc) requerem investimentos e têm custo de manutenção. A gestão ambiental cada vez mais leva em conta os valores de serviços ecossistêmicos como parte da análise custo-benefício. Entretanto, a tarefa não é tão simples porque deve também incluir a crescente demanda humana por eles. Complica ainda mais a avaliação o fato de que os benefícios sociais normalmente não são computados em termos monetários padrão (devido, ao

(2023) mostra que a maior parte dos estudos têm limitações metodológicas e/ou limitações na compreensão de padrões temporais ou espaciais dos serviços ecossistêmicos providos por áreas protegidas, dificultando os caminhos para melhorada gestão. Um dos pontos relevantes apontados na referida revisão é a *necessidade de melhoria de métodos para aquisição de dados e melhoria da avaliação dos referidos serviços*.

No Brasil, onde a Agricultura e o setor florestal são fortes segmentos econômicos, há interessantes iniciativas relacionadas a Serviços Ambientais. A Embrapa, por exemplo, distingue os *serviços ecossistêmicos* (providos pela natureza) dos *serviços ambientais* (providos por ações humanas) e mostra como ambos podem ser oferecidos no caso da atividade agrícola e/ou florestal. A Embrapa oferece, também, um portfólio de Serviços Ambientais¹⁴, mas reconhece que ainda restam muitos desafios no setor, e suas prioridades de P, D&I nestes temas incluem:

- *Valorar e quantificar os serviços ambientais* propiciados por sistemas de produção agropecuários e florestais sustentáveis e que viabilizam mecanismos de compensação econômico-financeiros;
- *Ampliar a certificação de propriedades rurais* com sistemas de produção multifuncionais *que assegurem a prestação de serviços ambientais*;
- *Estruturar plataformas digitais integradas de dados espaço-temporais* sobre a biodiversidade e serviços ambientais.

A nítida dificuldade de quantificação e documentação fidedigna de serviços ambientais ou ecossistêmicos é um dos fatores que motivou o autor a desenvolver o conceito de CONSERVOMETRIA.

Estas dificuldades, refletidas como *desafios tecnológicos*, não se limitam ao Brasil. Neste contexto, a Organização Mundial do Comércio disponibiliza uma série de informações sobre o mercado de Serviços Ambientais¹⁵. Esse dinâmico segmento tem crescido substancialmente - e parâmetros cada vez mais restritivos e regulamentações têm surgido

menos em parte, à ausência de métricas adequadas). Não sendo computados, são vulneráveis à perda.

¹⁴ Disponível no link: <https://www.embrapa.br/portfolio/servicos-ambientais>

¹⁵ Ver, por exemplo, a informação disponível no link: https://www.wto.org/english/tratop_e/serv_e/environment_e/environment_e.htm

para atender às demandas oriundas da geração de resíduos ou escassez ou exaurimento de recursos, entre outros.

Os serviços ambientais foram por muito tempo vistos como de utilidade pública, sendo providos predominantemente pelo poder público. Entretanto, esse panorama está mudando rapidamente e há cada vez mais oportunidades para o mercado privado de serviços ambientais¹⁶. Neste contexto, o desenvolvimento de novas tecnologias tem potencializado o comércio internacional no setor, havendo empresas de consultoria ambiental, serviços de monitoramento remoto (como no caso de energias renováveis, por exemplo) entre outras iniciativas. Tecnologias de elevado impacto neste setor¹⁷ incluem: “*Green-Focused Data Collection*”, ou tecnologias de obtenção de dados ambientais ou de conservação; e a tecnologia *blockchain*, que substitui as práticas convencionais de contratos por uma abordagem com menos consumo de tempo, papel e resíduos, além de prover segurança da informação. Conforme será descrito em mais detalhes adiante neste e no próximo capítulo, o conceito de CONSERVOMETRIA emprega estas duas abordagens concomitantemente.

A exploração do mercado de serviços ambientais ainda carece de mais aprofundamento da percepção sobre os benefícios econômicos. No livro digital intitulado *Introduction to Economic Analysis*, v. 1.0, especificamente no capítulo 1.3 *Economic Reasoning and Analysis*¹⁸, são feitas interessantes considerações sobre o conceito de Razão Econômica e o chamado princípio do “*Homo economicus*”. Como este toma decisões egoísticas, se baseando apenas seus interesses, o que então ele ganha com a conservação ambiental?

¹⁶ Dados do Relatório intitulado “Environmental Services: U.S. Market and Trade Trends” publicado em maio de 2023 pelo US International Trade Commission, Office of Industry and Competitiveness Analysis, indicam que o tamanho do mercado norte-americano de serviços ambientais relacionados à gestão de resíduos e serviços de remediação ambiental tem crescido nos últimos anos, aumentando de US\$ 47,8 bilhões em 2010 para US\$ 65,6 bilhões em 2021 (aprox. 28% no período). A íntegra do relatório é disponível no link: https://www.usitc.gov/publications/332/working_papers/final_compiled_environmental_services_u.s_market_and_trade_trends_20230511-compliant.pdf

¹⁷ Segundo publicação da *Forbes* de 19Jul2022 “15 ‘Green’ Tech Innovations And Practices That Can Help Protect The Environment”, disponível no link: <https://www.forbes.com/sites/forbestechcouncil/2022/07/19/15-green-tech-innovations-and-practices-that-can-help-protect-the-environment/?sh=211df90764e2>

¹⁸ Disponível em: https://saylordotorg.github.io/text_introduction-to-economic-analysis/s02-03-economic-reasoning-and-analysis.html acesso em 05Jan2024.

A resposta não é trivial e provavelmente explica por que a atividade de Conservação Ambiental sempre foi um desejo declarado, porém sem investimentos baseados em fundamentos econômicos. Apesar da premissa de análise econômica quanto ao caráter egoísta que permeia as decisões humanas, dados empíricos mostram que as pessoas reais podem ser mais altruístas que o *Homo economicus*. Neste contexto, Rankin (2011) demonstrou que experimentos no campo da economia comportamental sugerem que humanos tem uma tendência a se comportar de forma altruísta mesmo quando isso é contrário a seus interesses - mas que isso é ainda controverso porque seus achados podem ter relação com a abordagem metodológica usada. A conclusão é de que ainda são necessários mais estudos que integrem as ciências evolucionárias e econômicas. Por outro lado, Balmford *et al* (2002) fizeram uma interessante demonstração das razões econômicas para se conservar a natureza selvagem. Em seu trabalho, mostraram que esta atividade proporciona marcantes benefícios econômicos, indicando uma ousada relação custo/benefício de 100:1 ou mais nas atividades de conservação.

Mais recentemente, Barwick *et al* (2020) demonstraram uma outra perspectiva muito interessante, apresentando evidências de que os efeitos da *informação* sobre o comportamento humano são fatores cruciais na *percepção do valor* das atividades de conservação. Os autores do referido estudo usaram como evidência experimental o comportamento de cidadãos chineses em resposta a uma decisão governamental de *reportar com precisão e periodicamente informações sobre a qualidade do ar*, que era ruim desde 2013. O efeito foi que as pessoas passaram a evitar certos trajetos e atividades, quando a qualidade do ar era particularmente ruim. Além disso, a *percepção generalizada destas métricas* passou a influenciar positivamente o preço dos imóveis nos locais de melhor qualidade do ar. Uma razoável conclusão é de que o valor da conservação ambiental ou mesmo somente da *informação* sobre a conservação ambiental em geral tende a ser reconhecido – e mesmo monetizado - não só pelo *Homo economicus*, mas também pelo *Homo sapiens*.

Ainda mais recentemente, Jayachandran (2022) traçou interessantes relações entre os direitos de propriedade e os efeitos sobre os investimentos. Por exemplo, citou o caso de proprietários de áreas com florestas, demonstrando que as atitudes em relação às áreas florestadas têm intensa relação com a segurança jurídica sobre a propriedade, que incentiva investimentos de mais longo prazo e desestimula a receita de curto prazo

relacionada ao desmatamento – impacto este sendo particularmente relevante em países em desenvolvimento. Também foi observado que os proprietários de terra (em Ruanda, no caso) tinham uma maior tendência a conservar o solo de terras cuja propriedade era devidamente documentada.

Por fim, Liu *et al* (2023) mostraram os resultados de projetos de recuperação ambiental na China, para ampliar a biodiversidade e serviços ecossistêmicos. No caso de projetos de recuperação de *wetlands*¹⁹, por exemplo, houve significativo aumento de serviços ambientais/culturais (aprox. 73% de aumento). Ainda assim, o artigo conclui que há muito a ser feito e que há urgência no desenvolvimento de *mecanismos para melhorar o monitoramento em tempo real das condições ecológicas* em cada projeto de conservação ou recuperação e a (concomitante ou consequente) participação pública.

1.3.2. A Questão do *Greenwashing*

A consideração de ativos ambientais no contexto econômico, embora tenha sua relevância e utilidade prática, não deve necessariamente prevalecer sobre outras considerações. Ainda assim, deve-se levar em conta as dimensões reputacional, regulatória e financeira sob o prisma da tentação do bicho Homem em falsear tudo o que envolver valor.

Neste contexto, um aspecto que também traz relevância ao conceito de CONSERVOMETRIA é a prática de “*greenwashing*” que, simplificada, significa manipular, falsear ou maquiagem dados ambientais. O termo *greenwashing* foi usado pela primeira vez em 1989 no artigo intitulado “*Aid to Disaster*” da revista *New Scientist*²⁰. O *greenwashing* tem sido objeto de numerosas publicações recentes (de Freitas *et al* 2020; Yang *et al* 2020; Pendse *et al* 2023), que apontam para esta maliciosa prática e suas consequências nefastas (Fig. 1.3).

¹⁹ Tema que será explorado em mais detalhes do Capítulo 3.

²⁰ Disponível em <https://www.newscientist.com/article/mg12416850-100-aid-to-disaster/>.

Greenwashing na prática: o caso da VW (2015)



Figura 1.3 – O caso de *Greenwashing* da Volkswagen.

O exemplo famoso do caso da Volkswagen (VW) (Fig. 1.3) se refere à autuação feita pela EPA (*Environmental Protection Agency* dos EUA) devido à manipulação, pela VW, do software que avalia a emissão de gases de seus veículos²¹. Essa conduta prejudica os necessários esforços de desenvolvimento sustentável e diminui a credibilidade de certas práticas de conservação e/ou recuperação ambiental.

O conceito de CONSERVOMETRIA, portanto, deve incluir não apenas as métricas de conservação ou recuperação ambiental em si, mas também uma lógica de garantia de qualidade dos dados que traga credibilidade ao público-alvo.

²¹ Em agosto de 2015 a EPA multou a VW em 18 bilhões de dólares pela referida manipulação. As ações da companhia caíram 26 bilhões de dólares nos dois dias subsequentes ao relato de *greenwashing*, perfazendo um prejuízo de US\$ 44 bilhões em apenas 2 dias. Diante desse imenso prejuízo financeiro e reputacional, muitas empresas passaram a incorporar políticas severas para evitar o *greenwashing*.

1.4. Conclusão do Capítulo 1

Analisar e propor soluções que podem minimizar as dificuldades e problemas associados às métricas de atividades de conservação ou recuperação ambiental é uma das propostas do presente trabalho. Isso inclui o desenvolvimento do conceito de CONSERVOMETRIA, que envolve documentar, de forma hígida, transparente e auditável cada métrica original ou “métrica originária”.

Uma métrica será tão mais fidedigna quanto mais próxima à fonte for sua documentação, minimizando problemas como: cadeia de custódia de amostras (que pode levar a erros analíticos ou interferência humana em seu reporte); manipulação de dados por humanos (que podem errar sem intenção ou deliberadamente, buscando o *greenwashing* ou, ao contrário, buscando demérito proposital de atividades com real impacto positivo, devido a interesses conflitantes); demora na percepção ou comunicação, devido ao grande número de etapas prévias. Uma tecnologia atualmente disponível e que é útil para minimizar os problemas referidos acima é a tecnologia *blockchain*. A tecnologia *blockchain* surgiu em um artigo²² publicado por Satoshi Nakamoto em 2008 e vem revolucionando diversas áreas do conhecimento. “*Blockchain*” é, em tradução literal, uma cadeia ou corrente de blocos, os quais guardam os mais diversos tipos de informações de forma segura, imutável. Os dados registrados em *blockchain* podem ser acompanhados e visualizados sem que seja possível modificá-los, o que traz a dimensão de segurança referida acima. A documentação de dados em *blockchain* proporciona a manutenção de importantes atributos da informação: **integridade, transparência e auditabilidade**.

O conceito de CONSERVOMETRIA faz uso destes atributos que a tecnologia *blockchain* traz, ao documentar as métricas de conservação ou recuperação ambiental com esta tecnologia. Portanto, a implementação do conceito de CONSERVOMETRIA utiliza uma

²² Disponível em: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>. A publicação foi feita apenas eletronicamente e até hoje não se sabe exatamente quem é Satoshi Nakamoto ou se o nome é verdadeiro. Uma curiosidade adicional é que, em japonês, Satoshi (聡) significa “que tem clareza mental; inteligente, perspicaz; admirável”; Naka (中) significa “meio; interno; relação”; e Moto (本) significa “origem; fundamento”. Consequentemente, Satoshi Nakamoto 聡中本 poderia ser traduzido como *inteligente nos fundamentos internos* (ou *intelligence in the core* ou ainda *Central Intelligence*) – o que reforçaria a hipótese de não ser de fato uma pessoa real.

abordagem metodológica que envolve a manutenção dos atributos essenciais da informação ou métrica originária e a tecnologia *blockchain* foi escolhida por esta razão.

Entretanto, a tecnologia *blockchain* também tem suas limitações e não é suficiente para resolver todos os problemas neste setor (Sorensen 2023). Neste contexto, o presente autor, em conjunto com um grupo de desenvolvedores, desenvolveu e implementou algumas tecnologias especificamente para resolver estes e outros problemas. A tecnologia chamada de CONSERVÔMETRO[®] integra sensores físicos de parâmetros com dispositivos para documentação automática e comunicação das métricas com fins reputacionais, minimizando interferência humana, preferencialmente usando *blockchain* para registro indelével dos respectivos dados e para tokenizar²³ diretamente as respectivas métricas. A tecnologia do CONSERVÔMETRO[®] foi implementada na prática em uma plataforma digital denominada ThingsGo.Online. Referida plataforma já está em operação e, além de documentar automaticamente métricas de projetos de conservação ou recuperação ambiental em vários contextos, inclui uma ferramenta de *economia circular digital* que é uma nova abordagem ou meio de implementação alinhado à ODS 17. Mais detalhes sobre o CONSERVÔMETRO[®], a plataforma digital que o implementa na prática (ThingsGo.Online) e as demais tecnologias desenvolvidas pelo autor e colaboradores para viabilizar esta solução são descritos no capítulo subsequente.

²³ “Tokenizar” é um neologismo em forma de verbo, derivado da palavra “token”, que, no presente contexto, significa em inglês: *a thing serving as a visible or tangible representation of a fact, quality, feeling, etc; a voucher that can be exchanged for goods or services, typically one given as a gift or offered as part of a promotional offer*. Em resumo, um *token* é um vale, *voucher* ou uma representação de valor e tokenizar é gerar vouchers ou representações de valor (ou ainda vales) correspondentes ao que foi documentado. A tecnologia *blockchain* é particularmente útil para gerar tokens digitais, que representam o valor de algo. No presente caso, os tokens são das próprias métricas ambientais.

CAPÍTULO 2 – CONSERVÔMETRO[®], CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®] e GIVEBACK[®]

2.1. Resumo

Este capítulo apresenta o conceito do CONSERVÔMETRO[®]²⁴, que é uma ferramenta ou sistema para medir, documentar, validar e comunicar métricas ambientais; e os conceitos de CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®]²⁵ e GIVEBACK[®], que são as entidades de valor associadas às respectivas métricas. Conforme abordado no capítulo anterior, a viabilização prática do conceito de CONSERVOMETRIA requer a aplicação de metodologias que garantam os atributos de **integridade, transparência e auditabilidade** das métricas relacionadas às atividades de conservação ou recuperação ambiental. Por esta razão, nesta aplicação prática de CONSERVOMETRIA foi adotada a tecnologia *blockchain* para integrar as etapas de obter, validar, documentar e monetizar as respectivas métricas. Neste contexto, a implementação prática do CONSERVÔMETRO[®] e dos CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®] foi desenvolvida pelo presente autor em colaboração com um grupo de desenvolvedores e já está em funcionamento na plataforma inovadora batizada de ThingsGo.Online. A referida plataforma foi concebida para documentar com qualidade as métricas, prover meios de recompensá-las quantitativamente e fornecer *razão econômica* a tais atitudes e projetos. Esses propósitos são viabilizados através de: (i) medição segura de projetos sustentáveis com dispositivo IoT/*software* e emissão automática de tokens de recompensa/CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®] lastreados nas medições reais, usando *blockchain*; e (ii) uma abordagem de economia circular, através da qual os tokens de recompensa são acumulados ou negociados para a aquisição de NFTs²⁶ chamados de GIVEBACK[®] no momento que o detentor desejar. Esta abordagem envolve quatro diferentes invenções²⁷.

²⁴ CONSERVÔMETRO[®] é uma marca concebida pelo presente autor e registrada no INPI.

²⁵ CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®] e GIVEBACK[®] são marcas concebidas pelo autor.

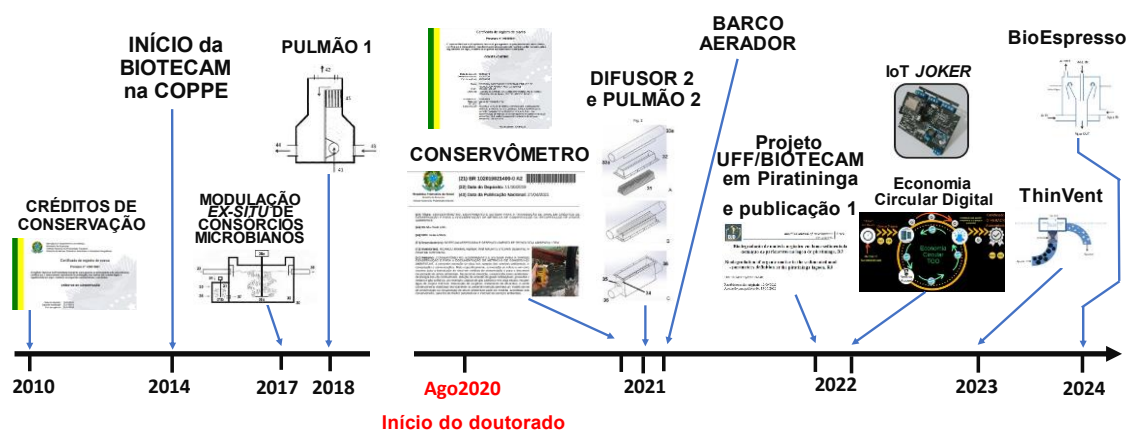
²⁶ NFT é abreviatura de “*Non-Fungible Token*”, ou token não fungível. NFTs são tokens que representam um item virtual único, que tem autenticidade comprovada através de informações registradas na *blockchain*. No presente caso, os NFTs são únicos porque incluem todo o histórico, data, hora, local e métrica de cada respectiva atitude sustentável, entre outras informações.

²⁷ As invenções foram concebidas no âmbito da presente tese, o presente autor sendo co-inventor das mesmas. O conteúdo de todas as respectivas patentes é anexado ao presente trabalho via links no ANEXO, que sumariza a produção científica e tecnológica desta tese.

2.2. Introdução

Os conceitos e casos reais apresentados neste capítulo são resultado de vários anos de pesquisa, desenvolvimento e inovação²⁸ (Fig. 2.1).

Evolução dos conceitos e tecnologias antes e durante a tese



Entre 2016 e 2024 foram depositadas 25 patentes relativas a sistemas de conservação ambiental

Figura 2.1 - Evolução dos conceitos e algumas tecnologias descritas na tese.

Um dos pontos de partida que motivou o autor a idealizar o conceito de CONSERVOMETRIA e desenvolver a tecnologia do CONSERVÔMETRO[®] foi o desenvolvimento de um equipamento para transferência de massa gás-líquido denominado PULMÃO (Remer & Degrave 2018), cujo uso predominante é a oxigenação de corpos líquidos. O equipamento emprega a tecnologia de filmes finos de líquido²⁹, proporcionando muita eficiência energética na dissolução do oxigênio na água.

²⁸ Neste contexto, foram depositadas nos últimos dez anos, pelo autor em conjunto com outros coinventores, mais de 25 patentes relacionadas a equipamentos, processos ou sistemas úteis em conservação ambiental.

²⁹ A tecnologia de filmes finos de líquido (Fukugawa *et al* 2009) aumenta muito a eficiência de dissolução por várias razões concomitantes: (i) aumenta área de troca; (ii) minimiza a espessura de líquido, otimizando a dissolução de acordo com a equação de Noyes-Whitney (1897); e promove a dessaturação do líquido. Uma boa fonte de literatura mais atual sobre os fundamentos físicos relacionados aos filmes finos de líquido é disponível em Chatzigiannakis *et al* (2021). Um dos pontos chave para a formação dos *filmes finos de líquido*, que viabilizam maior eficiência de transferência de massa no PULMÃO, é a geometria do difusor. Uma solução técnica de geometria e também para fabricar um difusor útil para os testes realizados e descritos no Capítulo 3 foi desenvolvida no âmbito da tese e é descrita na Patente BR102018072624-2 (Remer *et al* 2021).

Os equipamentos conhecidos para aeração dos corpos líquidos descarregam os gases de saída na atmosfera livre, o mesmo também ocorrendo com as versões de dispositivos e equipamentos formadores de filmes finos de líquido anteriormente conhecidos (Fukugawa *et al* 2009; Remer & Degrave 2018).

Já no âmbito do trabalho desta tese, o presente autor e colaboradores desenvolveram uma versão melhorada do PULMÃO que, ao contrário das tecnologias anteriores, direciona todos os gases de saída por uma tubulação, viabilizando na prática a medição de gases de saída com sensores (Remer *et al* 2021). Como o ar tem concentração de O_2 conhecida, a medição do teor de O_2 no gás de saída (e a diferença entre entrada e saída) fornece uma **medida direta da taxa de dissolução** do O_2 na água. Esse novo princípio foi aplicado experimentalmente em uma estação de tratamento de efluentes (Fig. 2.2) - a primeira materialização do CONSERVÔMETRO[®] - que é útil na conservação de corpos líquidos.

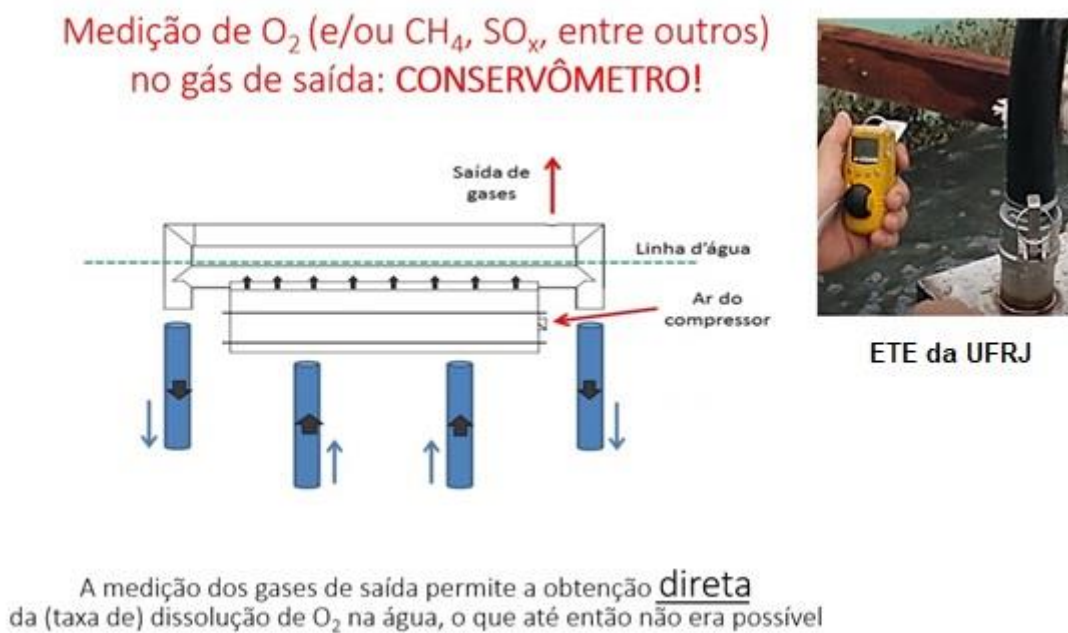


Figura 2.2 - Medição direta do O_2 nos gases de saída no PULMÃO.

A obtenção de métricas de conservação ambiental através de sensores, sua automação e comunicação deu origem ao conceito do CONSERVÔMETRO[®], que levou o autor a conceber modelos de negócio baseados nas métricas em si (Fig. 2.3).

Alguns Modelos de Negócio

1) Modelo de pagamento por desempenho;
melhora monitoramento



Aplicativo para a **comunicação**
e/ou uso reputacional das métricas de
conservação e dos
CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO®.

2) Modelo de *Naming Rights*

CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO :
43.200.000*
Litros de ÁGUA, pela <empresa>

* Volume de água
completamente oxigenado por
mês com a operação de um
PULMÃO de 0,5HP



Figura 2.3 – Alguns modelos de negócio relacionados ao CONSERVÔMETRO®.

Estes desenvolvimentos motivaram o autor (sócio da BIOTECAM, *startup* na Incubadora de Empresas da Coppe/UFRJ), a propor um projeto para automação mais robusta do PULMÃO. Este projeto foi aprovado e conduzido em parceria com o Polo de Inovação do Instituto Federal Fluminense, em Campos dos Goytacazes/RJ, com recursos da BIOTECAM, EMBRAP II e SEBRAE. O resultado foi um PULMÃO inteligente, automatizado e com sensores, com armazenamento de dados em nuvem (Fig. 2.4).

1. Instrumentação do PULMÃO
2. Controle automático remoto
3. Dados em nuvem

Projeto **Polo de Inovação IFF, Campos/RJ**
Recursos EMBRAP II/SEBRAE



Figura 7 – Foto do conjunto montado

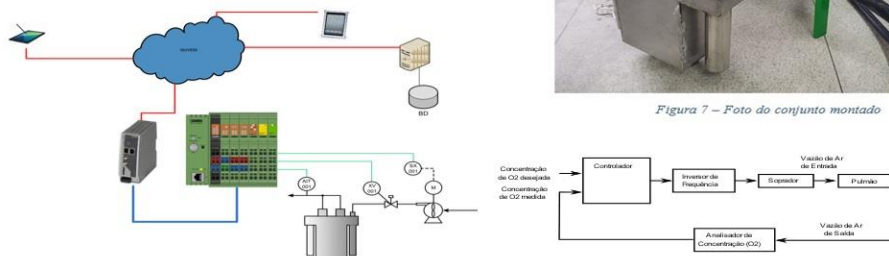


Figura 2.4 - PULMÃO inteligente – monitoramento remoto em tempo real.

2.2.1. O Conceito do CONSERVÔMETRO®

O conceito do CONSERVÔMETRO® foi materializado inicialmente na medição direta de gases em sistemas de conservação de águas, mas inclui diversas outras aplicações. É uma ferramenta e tecnologia³⁰ para medir, validar, documentar e comunicar métricas de atitudes sustentáveis ou ativos ambientais, incluindo ações de desenvolvimento sustentável, conservação ou recuperação ambiental (Remer *et al* 2021). Neste contexto, a expressão “ativos ambientais” inclui, mas não se limita a: conservação de energia e/ou de combustíveis; redução do uso de substâncias tóxicas ou perigosas, redução da emissão de gases indesejáveis, poluentes ou de efeito estufa, como gás carbônico, metano e gás sulfídrico, por exemplo; recuperação e/ou conservação de espécies ou áreas ambientalmente relevantes, conservação da qualidade da água de corpos hídricos; tratamento de efluentes; e combinações dos mesmos.

O CONSERVÔMETRO® é um sistema ou equipamento que: (i) integra meios para o recebimento de informações ou sinais de sensores, que registram dados reais que tenham sido previamente validados ou dados físicos mensuráveis relacionados a atitudes sustentáveis e medidos automaticamente; e (ii) processa os referidos dados/sinais e gera arquivos de dados das respectivas métricas, que são preferencialmente documentados³¹ em rede *blockchain* (Fig. 2.5, preparada pelo autor).

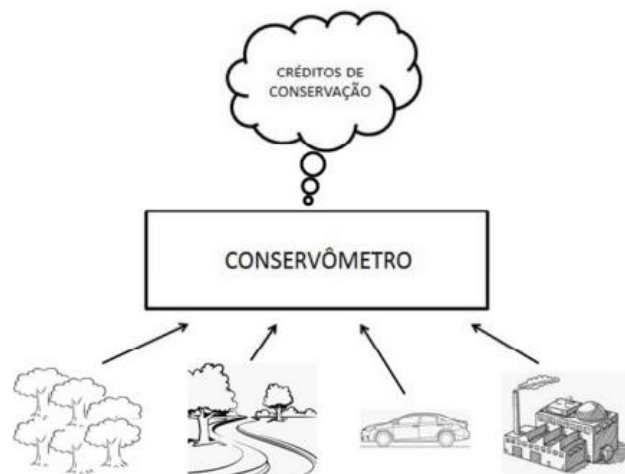


Figura 2.5 - Esquema conceitual do CONSERVÔMETRO®.

³⁰ Além de ser uma marca registrada, o CONSERVÔMETRO® é também uma tecnologia descrita no Pedido de Patente BR 102019021409-0, sendo o presente autor um dos co-inventores.

³¹ Opcionalmente, o sistema envia os arquivos com as respectivas métricas a dispositivos de comunicação para melhor disseminar o conceito de CONSERVOMETRIA, abordagem que é particularmente interessante no contexto do uso para fins reputacionais, ilustrada na Fig. 2.3.

O CONSERVÔMETRO[®] foi desenvolvido como ferramenta para viabilizar na prática o conceito de CONSERVOMETRIA em variados contextos. Além disso, viabiliza tecnicamente um modelo de negócio segundo o qual qualquer atitude sustentável ou iniciativa de conservação ou recuperação de ativos ambientais pode ser medida, validada, submetida a métricas, documentada e comunicada, para fins de melhor parametrizar os chamados serviços ambientais e prover mecanismos de reconhecimento reputacional. A essência é prover incentivos para este tipo de conduta e auxiliar a formação de um mercado que proporcione *sustentabilidade econômica* a serviços ambientais e projetos de conservação.

A dimensão técnica do CONSERVÔMETRO[®] pode ser descrita, sumariamente, como um equipamento e sistema para: o recebimento de sinais/informações relacionados à conservação de ativos ambientais; o processamento dos referidos sinais para gerar arquivos de dados; e o envio de dados para um sistema de registro e/ou comunicação, que apresenta as métricas de conservação ou CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®]. O sistema ou equipamento pode ser concretizado de diversas formas, desde que as respectivas camadas funcionais sejam coesas, havendo devida integração de fluxo de informação de medição, processamento e controle.

Uma representação esquemática das camadas funcionais para implementar o CONSERVÔMETRO[®] pode ser vista na figura 2.6, preparada pelo autor.

Importante salientar que cada etapa pode ser realizada por diferentes sistemas ou dispositivos, em conjunto ou em separado. Em outras palavras, o sistema idealmente tem alta coesão e baixo acoplamento e pode ser implementado em *hardware* ou *software*, ou por combinações destes.

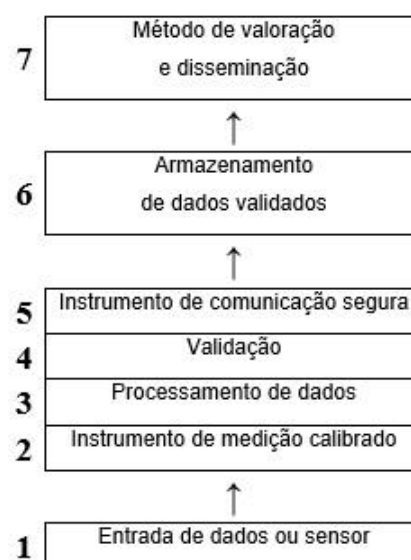


Fig. 2.6 – Camadas do CONSERVÔMETRO[®].

O CONSERVÔMETRO[®] pode ser implementado em um equipamento único, no qual as várias camadas funcionais atuam em um mesmo *hardware*. Na figura 2.6, são ilustradas esquematicamente as camadas de função: as numeradas de 2 a 5 são implementadas em uma combinação de *hardware* e *software* e as de números 1, 6 e 7 representam parte do ambiente externo. A camada de número 1 é o ativo ambiental a ser conservado e/ou recuperado e constitui a origem dos créditos de conservação; a de número 6 é o armazenamento externo de informações e a de número 7 complementa o CONSERVÔMETRO[®] e auxilia na implementação/comunicação da CONSERVOMETRIA.

O dispositivo ou sistema para a realização de medição é implementado em ambiente seguro contra invasões que possam gerar leitura e/ou escrita de dados e/ou corrupção de seu código objeto, bem como previne alteração de alguma espécie nas funções de *hardware*, para evitar corrupção do próprio método de medição. O referido dispositivo ou sistema para medição opcionalmente proporciona também auditoria local e/ou remota de sua implementação, sendo, portanto, seguro e validado. A não-corruptibilidade do Dispositivo de Medição Seguro e Validado pode ser verificada através de chave criptografada, *hash*³² ou técnica similar (uma boa revisão sobre criptografia é disponível no livro de Martin Keith, 2020), com informações armazenadas remotamente em bancos de dados ou em livros contábeis digitais distribuídos, como por exemplo os que empregam tecnologia *blockchain*.

O Dispositivo de Comunicações Seguras é um dispositivo de telecomunicações que proporciona a comunicação em um ou mais protocolos de comunicação selecionado(s) dentre: Ethernet IEEE 802.3, Wifi IEEE 802.11, Bluetooth IEEE 802.15, Lora, Redes Industriais e outros (Naveena Pai *et al* 2020). Referido dispositivo pode também incluir um *software* e/ou *hardware*.

³² *Hash*: conforme definido no wikipedia, é um escrutínio ou uma sequência de bits gerada por um algoritmo de dispersão, em geral representada em base hexadecimal, que permite a visualização em letras e números (0 a 9 e A a F), representando uma sucessão de quatro cifras binárias (um *nibble*) cada. O conceito teórico diz que "*hash* é a transformação de uma grande quantidade de dados em uma pequena quantidade de informações". Um *hash* é uma sequência que visa busca identificar um arquivo ou informação unicamente. É um método para transformar dados de tal forma que o resultado seja (quase) exclusivo. Além disso, funções usadas em criptografia garantem que não é possível a partir de um valor de *hash* retornar à informação original.

O Dispositivo de Armazenamento Validado é concretizado por um ou mais dispositivos físicos ou virtuais que proporcionam o recebimento e geração de réplicas/cópias, de maneira segura e auditável, das informações enviadas pelo Dispositivo de Comunicações Seguras. Na implementação descrita mais adiante, o referido dispositivo ou sistema compreende um livro contábil digital distribuído, como os que empregam tecnologia *blockchain*.

2.2.2. *Blockchain*, Tokens e seu Uso na CONSERVOMETRIA

A tecnologia de *blockchain*, registro digital distribuído ou *distributed digital ledger*, cuja origem já foi descrita brevemente no capítulo 1, é particularmente útil para integrar a medição, documentação, autenticação e tokenização em geral (Heines 2021). No contexto ora proposto, a tecnologia *blockchain* serve como base da implementação do conceito de CONSERVOMETRIA, uma vez que fornece uma estrutura descentralizada e segura para registrar e validar ações sustentáveis, sendo usada no CONSERVÔMETRO[®] para dar origem aos CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®] e aos Certificados GIVEBACK[®].

Conforme detalhado na seção anterior, o CONSERVÔMETRO[®] é um sistema que compreende um ou mais dispositivos de medição automática de grandezas físicas associadas a atitudes sustentáveis ou de conservação ou recuperação de ativos ambientais; e um processo de registro digital distribuído das métricas autenticadas. A documentação *online* de métricas autenticadas de conservação ambiental serve para fins reputacionais e de lastro para os ativos digitais ou tokens documentados pelo próprio sistema.

É de se notar que o campo técnico dos sistemas de registro de ativos digitais é vasto, sendo conhecidas diversas abordagens relativas aos processos envolvidos nas correspondentes transações (Davydov & Khalilova 2019; Ferrara *et al* 2022) e aos algoritmos de consenso (Bamakan *et al* 2020; Xiong *et al* 2022). Neste contexto, a chamada “tokenização” de ativos digitais emerge como uma grande oportunidade para modernizar a infraestrutura dos sistemas financeiros e para melhorar os mercados de capitais, uma vez que proporciona novas plataformas que dão acesso a crédito e financiamento e, conseqüentemente, investimento. A tokenização é uma abordagem

técnica que proporciona diversas vantagens, incluindo o aumento de liquidez e a criação de novas oportunidades para investidores e emissores de tokens.

Dentro do contexto da tecnologia de registro digital distribuído (DLT – *Distributed Ledger Technology*), onde a *blockchain* se destaca na atualidade, a tokenização é a forma de representar um ativo específico através da emissão de tokens que representam frações do valor do respectivo ativo (Furnari & Lener 2022). Tais tokens são aplicáveis a praticamente todas as atividades econômicas e para um variado número de propósitos – da obtenção de capital ao fracionamento de ativos para destravar sua liquidez e valor. Tal qual um vale, cupom ou *voucher* trocável por um bem, um token pode representar uma fração de qualquer ativo negociável, como *equity*, dívida, imóvel, *commodities* etc – e neste trabalho são usados tokens RWA³³ (*real world assets*) para a tokenização de ativos ambientais.

Nos últimos anos, a tokenização tem chamado muita atenção e ganhando adeptos como meio de modernizar a infraestrutura financeira, havendo vários bancos que atualmente utilizam esta tecnologia para melhorar o desempenho e segurança das operações (Garcia-Teruel & Simón-Moreno 2021; Guo & Zhou 2023). No campo específico da sustentabilidade, diversas iniciativas chamadas de “sustentáveis” têm surgido (Siew 2015; uma detalhada revisão é provida no livro de Bini & Bellucci 2020), mas enfrentam alguns problemas técnicos, incluindo: a dificuldade de medir e/ou autenticar as métricas de conservação ambiental/sustentabilidade com lastro verídico; como evitar iniciativas meramente especulativas ou de falsear resultados (conhecido como *greenwashing*); e como recompensar as atividades de conservação ou atitudes sustentáveis de forma clara, objetiva e auditada. A tecnologia *blockchain* ajuda a preencher estas lacunas, por se tratar de uma tecnologia que resolve estes e outros problemas técnicos.

Assim, no contexto ora apresentado, a CONSERVOMETRIA envolve a tokenização de métricas com tecnologia *blockchain*, para registrar de forma hígida e indelével, as atitudes sustentáveis e suas respectivas quantidades. O registro das métricas e outros predicados no *hash* de documentação na *blockchain* provê o lastro que traz valor aos chamados CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®], descritos em mais detalhes a seguir.

³³ Descritos em mais detalhes nas próximas páginas.

2.2.3. O Conceito de CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO®

O conceito de CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO® deriva de intensas discussões entre o presente autor e o analista de mercado Marcelo da Fonseca Baptista³⁴ entre 2009 e 2010. Durante as referidas discussões, dois elementos ficaram claros: (i) a falta de *razão econômica* clara ou evidente para atividades de conservação ambiental e (ii) a limitação de alcance do conceito de créditos de carbono³⁵, que na época estava em voga mas depois passou longo tempo na berlinda. As discussões de então deixaram claro que seria necessário um conceito mais abrangente e que este deveria ser revestido de elementos de mercado capazes de mover interesses econômicos para trazer sustentabilidade econômica às iniciativas de conservação ou, de forma mais geral, às atitudes sustentáveis. Essas discussões motivaram o presente autor a conceber o conceito de CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO® e depositar o pedido de registro da referida marca no INPI em 2010.

CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO® são as *entidades de valor* associadas às métricas de conservação de ativos ambientais ou de atitudes sustentáveis. O conceito é mais abrangente que o conceito de créditos de carbono, uma vez que este é uma espécie específica, enquanto os CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO® podem incluir diversos “ativos ambientais” como o próprio carbono, mas também conservação de energia e/ou de combustíveis; redução do uso de substâncias tóxicas ou perigosas, redução da emissão de gases indesejáveis, de poluentes ou de efeito estufa como metano e/ou gás sulfídrico, por exemplo; recuperação e/ou conservação da qualidade da água de corpos hídricos; tratamento de efluentes e combinações dos mesmos. Portanto, o conceito dos CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO® foi concebido como forma de integrar variadas práticas e ações

³⁴ Sócio da empresa Innofinance Consultoria Financeira (innofinance.com.br) e consultor financeiro de algumas empresas do presente autor desde aquela época.

³⁵ O Protocolo de Kyoto (1997) definiu o conceito de **crédito de carbono** como um mecanismo de flexibilização para auxiliar os países a atingirem metas de redução de emissão de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, devido aos efeitos ambientais causados. Um crédito de carbono é uma entidade de valor do mercado de carbono e representa a não emissão de uma tonelada de dióxido de carbono à atmosfera. Naquela época, o objetivo era de que quando um país conseguisse reduzir cada tonelada de emissão de CO₂, poderia receber uma certificação emitida pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), ou seja, receberia os créditos que estarão disponíveis para comercialização com os países que não alcançaram suas metas. Atualmente, o conceito inclui também o mercado privado e voluntário.

de sustentabilidade sob uma rubrica única, embebida do conceito econômico da palavra crédito, para viabilizar na prática o mercado de compensação. Embora guarde semelhanças com os créditos de carbono, os CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®] não se limitam ao carbono e, ao contrário, visam atender a todas as (espécies de) demandas de sustentabilidade que existem em nosso planeta em suas mais variadas expressões.

Os CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®] podem ser um reconhecimento de valor entre duas partes, quando estas aceitam as regras de sua emissão e valor (assemelhando-se ao caso do mercado voluntário), ou podem ser revestidos de atributos que proporcionem reconhecimento de valor por um público mais abrangente. Para este reconhecimento mais abrangente, os CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®] precisam ser reconhecidos como autênticos, precisos quantitativamente, imutáveis e transparentes/rastreáveis. Essas características são fornecidas pelo registro de dados em *blockchain* (Lo *et al* 2017), sendo esta uma das razões de ter sido adotada a referida tecnologia. Neste contexto, o cenário ideal dos CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®] é que sua emissão seja feita com a tecnologia *blockchain* na forma de *tokens lastreados nas reais métricas* das ações de sustentabilidade. O lastro em medições físicas ou dados reais traz materialidade ao valor dos tokens e evita que o valor seja meramente especulativo, como é o caso de muitos tokens ou criptoativos existentes no mercado (Meider 2023).

O efetivo registro de todos os predicados de sua origem, como a certificação da data, hora, localização, tipos de métricas de sustentabilidade etc., traz também mais credibilidade, transparência e rastreabilidade aos CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®]. Assim sendo, a emissão, em uma plataforma *blockchain*, de tokens que contenham todos esses atributos proporciona o reconhecimento de valor dos CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®] por um público mais abrangente. Isso é um dos requisitos para a existência de um ecossistema e mercado de recompensas justo e equitativo e, eventualmente, para atender futuramente aos mercados regulados. Em outras palavras, os CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®], na forma concebida e ora implementada, são uma abordagem para *proporcionar Razão Econômica* às atitudes sustentáveis, às atividades de conservação do meio ambiente, para que as mesmas possam ser sustentáveis também economicamente.

A sensibilização ao tema da sustentabilidade e a efetiva promoção de práticas sustentáveis é alinhada à crescente percepção de que o planeta tem recursos finitos. Entretanto, entre a percepção do problema e a efetiva mudança de comportamento das pessoas e empresas existe um longo caminho, cuja transposição é limitada, entre outros fatores, pelos interesses econômicos dominantes (Ertz & Leblanc-Proulx 2018). Consequentemente ficou claro para o presente autor, que seria necessário conceber uma espécie de crédito ou análogo de contrapartida financeira para estimular e acelerar a existência de um mercado (e sua escala) de projetos e atitudes sustentáveis.

Os CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®] foram a resposta a estas considerações e o registro em *blockchain* e a geração de tokens foi a solução encontrada para viabilizar seu reconhecimento como créditos autênticos, quantitativamente precisos, imutáveis e transparentes/rastreáveis.

2.2.4. O Conceito de GIVEBACK[®]

O conceito de GIVEBACK[®]³⁶ foi concebido pelo autor em 2017 com o propósito de estimular e convidar o ser humano e empresas a devolverem ao ambiente ou à sociedade parte de seu legado existencial – o *footprint* ambiental ou social. Assim, terceiros que tiverem interesse em contribuir para projetos de conservação ou recuperação ambiental³⁷ poderão “*giveback*³⁸”, ou seja, *devolver* à sociedade a compensação de ao menos parte de

³⁶ Descrito no pedido de patente BR102017016011-4, intitulado “*Giveback* – a devolução à sociedade do *footprint* social”. O pedido foi depositado em 26Jul2017 e depois retirado, tendo permanecido em segredo desde então. Portanto, o documento serve de prova de autoria e registro da data da criação.

³⁷ Um exemplo concreto é um projeto de conservação ou recuperação da qualidade de água de uma lagoa. Conforme descrito em mais detalhes no Capítulo 3, um projeto desse tipo pode dar origem a várias métricas, como por exemplo a quantidade de oxigênio efetivamente dissolvida na (ou *devolvida* à) água mediante o uso de equipamentos para a aeração forçada. A dissolução intencional do oxigênio do ar na água tem como finalidade *devolver* à água o oxigênio que foi consumido ou demandado por conta do *footprint* humano, como é o caso do lançamento de cargas orgânicas em lagoas e rios.

³⁸ GIVEBACK[®] tem o sentido exato de devolução. A ideia de que utilizamos recursos naturais para produzir riqueza é, neste caso, combinada com a devolução de recursos, ou atributos de recursos, e visa a conservação ambiental. A riqueza gerada, no entanto, é retida. Essa é uma outra forma de considerar o conceito de *desenvolvimento sustentável*. No caso específico da água, o despejo inadequado de carga orgânica decorrente de atividades antrópicas é uma assimetria do processo de desenvolvimento, que torna o ambiente aquático insustentável. Portanto, *devolver* aos corpos líquidos o oxigênio que foi consumido em função da carga orgânica

seu *footprint*. O conceito é abrangente e permeia um modelo de negócio segundo o qual qualquer pessoa que perceba a relevância de determinado projeto ou iniciativa de interesse ambiental ou social possa colaborar financeiramente ou de outras formas. Exemplos incluem, mas não se limitam, à contribuição voluntária a projetos de interesse ambiental ou social, ou modelos de negócio baseados no valor/benefício reputacional associado à conservação.

Importante ressaltar que *valor* e *preço* não são a mesma coisa, podendo ser percebidos de formas muito diferentes entre pessoas ou momentos (Kaczorowska *et al* 2019; Wang *et al* 2023). Assim, essa característica inerente ao conceito de *valor* traz um desafio e uma oportunidade, notadamente quando o valor em questão tem múltiplos aspectos intangíveis (benefícios difusos para a sociedade, benefícios reputacionais e financeiros para quem detém os referidos créditos, comprovação *quantitativa* de práticas sustentáveis por empresas etc.). Conseqüentemente, para viabilizar a monetização dos CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®] de acordo com o *valor percebido* pelo interessado em determinado momento, foi implementado o conceito de GIVEBACK[®] na forma de NFTs (tokens não-fungíveis).

NFTs se distinguem dos demais tipos de criptoativos ou tokens porque são únicos, inseparáveis, insubstituíveis e verificáveis (Gonserkewitz *et al* 2022), sendo utilizados como forma de registro de ativos reais e únicos como, por exemplo, ativos de propriedade intelectual. Portanto, a emissão de Certificados³⁹ GIVEBACK[®] como NFTs para atividades de conservação no contexto ora apresentado é coerente com a presente abordagem, uma vez que cada atitude e cada projeto é único, sendo também únicos os registros de data, hora, local e quantidades/métricas de conservação.

No contexto ora apresentado, os CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®] são emitidos em nome de quem executa atitudes sustentáveis ou projetos de conservação (ou seja, detém

decorrente de atividade antrópica é uma atitude no sentido de reequilibrar o ecossistema e buscar sua sustentabilidade. Quando isso é feito de forma economicamente eficiente, pode-se também atingir sustentabilidade econômica ao ciclo. O conceito de GIVEBACK[®] tem esse propósito.

³⁹ Os termos “Certificado GIVEBACK[®]” e “NFT” são, neste contexto, intercambiáveis. O primeiro se refere a uma descrição da perspectiva de seu detentor e do mercado, enquanto o segundo é uma linguagem técnica que especifica a espécie de token utilizada.

a propriedade). Eles podem ser acumulados ou usados para a aquisição de Certificados GIVEBACK[®] por quem deseja contribuir com atitudes sustentáveis ou projetos de conservação ou por quem precisa compensar suas pegadas - de acordo com o *valor percebido* pelo interessado em determinado momento. Esse arranjo oportuniza as forças de mercado a *apreciarem o valor dos ativos ambientais* tokenizados e prover mais incentivos para as atitudes sustentáveis. Conseqüentemente, o valor atribuído a cada Certificado GIVEBACK[®] tem lastro nas métricas específicas de cada projeto, conforme cotações de mercado (por exemplo, no caso de créditos de carbono há referências de mercado para o preço), mas detentores (vendedores) e interessados (compradores) têm liberdade quanto ao momento da negociação e preço a ser pago. Portanto, o preço pago dependerá essencialmente de dois fatores: (i) as métricas reais tokenizadas ou CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®] documentadas em *blockchain*; e (ii) o *valor percebido* ou preço que o terceiro interessado está disposto a pagar naquele momento. De um lado, a tokenização das métricas dando origem aos CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®] e, de outro lado, os referidos créditos podem ser usados para a aquisição de Certificados GIVEBACK[®] a qualquer momento e mediante negociação⁴⁰. Este arranjo tende a produzir valor econômico e viabiliza o desacoplamento, no tempo e no espaço, entre a tokenização da atitude sustentável gerando créditos e o momento de aquisição dos Certificados GIVEBACK[®] pelo mercado pagador. Isto traz maior amplitude geográfica e temporal à monetização das práticas sustentáveis. Em resumo, o autor percebeu que seria desejável prover, e por fim desenvolveu, um mecanismo que visa estimular o fluxo de recursos para viabilizar um mercado de ativos ambientais⁴¹.

Conforme será mostrado em mais detalhes adiante, a tecnologia *blockchain*, combinada com outras tecnologias desenvolvidas pelo autor e colaboradores, foi implementada em uma plataforma digital que integra as etapas de tokenização de ativos ambientais, geração de CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®], emissão de Certificados GIVEBACK[®] e um *marketplace* que concretiza, na prática, o conceito de CONSERVOMETRIA.

⁴⁰ Quando o detentor dos CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®] (ou seja, quem efetivamente desempenhou a atitude sustentável) deseja utilizar tais créditos em relatórios de sustentabilidade, ele próprio pode convertê-los em Certificados GIVEBACK[®]. Alternativamente, ele pode vender os créditos para terceiros.

⁴¹ Ficou claro para o autor que o desejo “difuso” e muitas vezes utópico em ter um ambiente melhor é insuficiente, e que prover mecanismos que sirvam como estímulos econômicos pode ser uma forma de impulsionar e dar mais escala às atividades de conservação ambiental.

2.3. Uma Implementação Prática: a Plataforma ThingsGo.Online

Para implementar o CONSERVÔMETRO[®] na prática, o presente autor, em colaboração com um grupo de desenvolvedores, criou uma plataforma inovadora batizada de ThingsGo.Online^{42,43} (Remer *et al* 2023). A referida plataforma/ecossistema está em operação⁴⁴, é baseada em *blockchain* e foi projetada para revolucionar a forma como a sustentabilidade é promovida e recompensada.

A plataforma visa enfrentar os desafios globais prementes de degradação ambiental e impacto social, a partir do uso de tecnologias avançadas como a *blockchain* e outras desenvolvidas pelo autor e colaboradores. O uso combinado de várias tecnologias proporciona um ecossistema transparente, seguro e voltado para a comunidade para medir, registrar e recompensar ações, projetos e processos sustentáveis. Na plataforma ThingsGo.Online, a tokenização de medições reais de ativos ambientais é feita nas suas próprias fontes, minimizando assim a interferência humana e a possibilidade de *greenwashing*. A plataforma também foi projetada para permitir a tokenização *automatizada* de uma variedade de métricas, de modo que a documentação de práticas sustentáveis possa ser monitorada *online* e em tempo real, na maioria dos casos⁴⁵.

Estas características trazem confiança ao ecossistema, que inclui um mercado/*marketplace* no qual os “ativos ambientais medidos e tokenizados” podem ser negociados. Por esta razão, indivíduos, empresas e organizações de qualquer porte podem usar a plataforma para documentar e monitorar as suas atividades sustentáveis ou as de terceiros, p. ex., desde a redução das emissões de carbono ou metano até a adoção de

⁴² O nome Things Go Online foi concebido pelo Eng. Marcos José Rangel Gonçalves Junior, um dos fundadores da empresa Things Go Online Consultoria, Desenvolvimento e Tecnologia em Métricas e Tokens de Impactos Ambientais e Sociais Ltda., da qual o autor é um dos sócios. O nome representa exatamente o que a plataforma ThingsGo.Online faz: levar atributos de coisas ao ambiente digital. No caso, os atributos e predicados relevantes para que o valor das respectivas coisas possa ser transacionado com mais eficiência, velocidade e transparência no ambiente digital.

⁴³ Pedido Internacional de Patente PCTBR2023050060 (WO2023159291), o presente autor sendo um dos co-inventores.

⁴⁴ Pode ser acessada no link [ThingsGo.Online](#), onde variadas informações, incluindo conceitos, modelos de negócio e detalhes técnicos estão disponíveis.

⁴⁵ A plataforma também contempla outras funcionalidades, como a tokenização de métricas previamente validadas e certificadas (sem o uso de sensores) e a tokenização de atitudes e projetos sociais – esta última vai além do escopo da presente tese.

fontes de energia renováveis, bem como a implementação de quaisquer práticas amigáveis ao ambiente e/ou negociar os referidos ativos ambientais tokenizados.

Na referida plataforma, a tokenização das ações de sustentabilidade é feita na forma de *tokens de dispositivo*, que são automaticamente trocados (*swap* automático) por *tokens de recompensa TGO* (os CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO®). Os tokens de dispositivo e os de recompensa TGO têm como predicados todas as informações relevantes, como medições reais, carimbos de data e hora, localização, tipos de métricas de sustentabilidade⁴⁶ etc. Este sistema de tokenização garante transparência, rastreabilidade e confiança no processo de medição e recompensa, promovendo um ecossistema e um *marketplace* justo e equitativo.

A figura 2.7 mostra um diagrama de blocos funcionais de uma concretização da referida plataforma. São mostrados em A) dispositivos de medição/sensores; B) processo de emissão de tokens; C) registro digital distribuído; D) integração dos tokens emitidos no registro digital distribuído; E) corretora de valores em registro digital distribuído ou *blockchain*; F) emissão e execução de ordens de negociação; G) cliente comprador/vendedor.

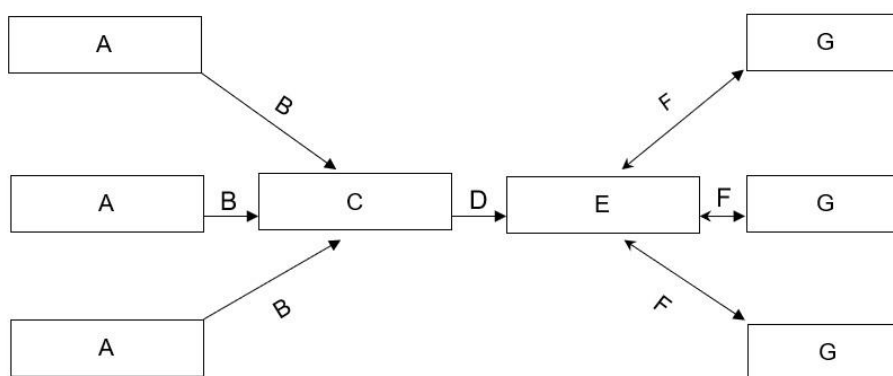


Figura 2.7 - Diagrama de blocos funcionais da plataforma ThingsGo.Online.

A plataforma também proporciona a emissão de NFTs chamados de Certificados GIVEBACK®, que representam o impacto tangível das referidas ações sustentáveis medidas e tokenizadas. Como indicado acima, o nome do certificado deriva de sua tradução literal, “devolver”, uma vez que visa justamente servir de meio para que pessoas

⁴⁶ Esses predicados são registrados no *hash* que dá origem aos tokens dispositivo, que lastreiam toda a operação.

e empresas “devolvam” ao meio ambiente ao menos parte de sua pegada existencial ou *footprint*. Os GIVEBACK® são certificados emitidos como NFT na *blockchain* em troca de tokens de recompensa TGO (que então recirculam). Portanto, os Certificados GIVEBACK® incluem exatamente os mesmos predicados dos tokens de dispositivo originários, fornecendo assim um registro verificável e imutável da ação sustentável específica executada, ou seja, carregam consigo todas as informações sobre as métricas de sustentabilidade que os lastreiam. Assim, os Certificados GIVEBACK® servem como prova de compromisso com a sustentabilidade e podem ser adquiridos, negociados, retirados e rastreados dentro da plataforma ThingsGo.Online. Pessoas, organizações e empresas podem utilizar estes certificados nos seus sistemas e/ou relatórios de sustentabilidade.

O sistema de recompensas, baseado em ações *reais e verificadas* e a ferramenta para sua monetização são a essência da plataforma ThingsGo.Online, que foi construída para incentivar práticas sustentáveis e fomentar um esforço coletivo para um futuro mais sustentável. A plataforma capacita indivíduos e organizações a causarem impactos positivos no meio ambiente e na sociedade, ao mesmo tempo em que colhem os benefícios monetários dos seus esforços de sustentabilidade. Em outras palavras, a plataforma *proporciona Razão Econômica* à atividade de proteção ao meio ambiente, o que por sua vez traz sustentabilidade econômica a estas atividades. Através desta abordagem transformadora, a plataforma é uma ferramenta para um mundo onde a sustentabilidade não seja apenas um ideal teórico e uma responsabilidade, mas também um esforço gratificante, inclusivo e recompensador.

2.3.1. Propósito

O propósito da plataforma ThingsGo.Online é centrado na promoção da sustentabilidade, no incentivo a ações sustentáveis e na criação de um ecossistema de documentação segura e de recompensas transparente e inclusivo, ou seja, é essencialmente baseado no conceito de CONSERVOMETRIA. A plataforma visa superar as limitações e ineficiências das atuais iniciativas de sustentabilidade para atingir os seguintes objetivos:

a) Prover Razão Econômica para e Fomentar Práticas Sustentáveis:

A plataforma é uma ferramenta para incentivar indivíduos, empresas e organizações a adotarem práticas sustentáveis, reconhecendo e recompensando os seus esforços. Sendo uma ferramenta para medir, documentar e “tokenizar” ações de sustentabilidade na *blockchain*, a plataforma implementa na prática o conceito de CONSERVOMETRIA. Isso proporciona um sistema verificável e transparente que motiva as partes interessadas a se envolverem ativamente na responsabilidade ambiental e social, tendo com isso benefícios econômicos (a mencionada *Razão Econômica* das atividades sustentáveis).

b) Melhorar a medição e a responsabilização:

Um dos principais objetivos da plataforma é prover uma forma prática de melhorar a precisão e a responsabilização da medição da sustentabilidade, ou seja, da CONSERVOMETRIA na prática. A plataforma é uma ferramenta na qual as ações sustentáveis são registradas e validadas com precisão, fornecendo um registro confiável e imutável do impacto alcançado. Isto aumenta a transparência e a confiança entre os participantes, permitindo uma melhor monitorização e comunicação dos esforços de sustentabilidade, bem como o uso em modelos reputacionais como o ilustrado na Fig. 2.3.

c) Promover a utilização dos Certificados GIVEBACK®:

Os Certificados GIVEBACK® desempenham um papel importante no ecossistema ThingsGo.Online, representando os resultados tangíveis de ações sustentáveis. A plataforma visa popularizar o uso dos Certificados GIVEBACK® como uma prova reconhecida e valiosa de sustentabilidade. Esses certificados, emitidos como NFTs, servem como uma prova do compromisso de um indivíduo ou organização com a sustentabilidade, fornecendo um ativo valioso que pode ser adquirido, negociado e rastreado na plataforma⁴⁷.

d) Impulsionar a colaboração e o compartilhamento de conhecimento:

A plataforma visa criar uma comunidade vibrante de entusiastas da sustentabilidade, promovendo a colaboração e o compartilhamento de conhecimento. A plataforma oferece um espaço para indivíduos e organizações se conectarem, trocarem ideias e aprenderem com as experiências uns dos outros. Ao promover um ambiente colaborativo, a plataforma

⁴⁷ Podem também ser usados em relatórios ESG – *Environmental and Social Governance*.

pretende acelerar a adoção de práticas sustentáveis e inspirar ações coletivas para um futuro mais sustentável.

e) Estabelecer um ecossistema de recompensas inclusivo:

A plataforma viabiliza a emissão de tokens de recompensa TGO e de NFTs, proporcionando um ecossistema de recompensas inclusivo que beneficia todos os participantes. Indivíduos e organizações podem receber tokens TGO como recompensa por suas ações sustentáveis, que podem ser acumulados ou trocados NFTs ou por diversos benefícios, incluindo descontos, produtos e serviços de parceiros dentro da plataforma. Esta abordagem inclusiva visa incentivar a participação de diversas partes interessadas em promover a adoção generalizada de práticas sustentáveis.

A concepção da plataforma ThingsGo.Online teve como propósito viabilizar uma mudança de paradigma na forma como a sustentabilidade é percebida, praticada e recompensada. A plataforma capacita indivíduos e organizações a contribuírem significativamente para um futuro sustentável, ao mesmo tempo em que promove a colaboração, a transparência e a responsabilidade no cenário global de sustentabilidade. Neste contexto, os itens a) a e) acima são bastante alinhados à ODS⁴⁸ 17, por ser um arcabouço e ferramenta que proporciona meios de implementação e parcerias.

2.3.2. Arquitetura da Plataforma

A arquitetura da plataforma ThingsGo.Online foi projetada para apoiar o complexo ecossistema de ações, recompensas e transações sustentáveis. A complexidade e os desafios técnicos são detalhados no respectivo pedido de patente (Remer *et al* 2023), que também é anexado ao presente trabalho.

A plataforma usa uma tecnologia de contabilidade digital distribuída, especificamente o XRP Ledger⁴⁹, para garantir um ambiente descentralizado e transparente, facilitando

⁴⁸ ODS é a sigla de Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, estabelecidos pela ONU - Organização das Nações Unidas. Mais detalhes no link: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>

⁴⁹ XRP Ledger ou XRPLedger, é uma rede *blockchain* pública e descentralizada, construída pela empresa Ripple para negócios. A rede *peer-to-peer* que gerencia o livro razão (ou “*ledger*”) é aberta a todos. A rede XRP Ledger é mantida por engenheiros de *software*, operadores de

transações seguras e eficientes enquanto mantém a integridade dos dados. A arquitetura é escalável e integra perfeitamente novos recursos e funcionalidades à medida que seu uso cresce, permitindo interações fáceis e seguras entre os usuários e o sistema de recompensa. Isso permite mensurar, documentar e incentivar projetos e ações sustentáveis.

Como parte dos desafios técnicos para implementar os conceitos ora detalhados, a equipe de desenvolvedores também desenvolveu: (i) uma ferramenta de integração entre os dados de entrada e a *blockchain*, na forma de um dispositivo IoT/*software* chamado *Joker*; e (ii) um sistema e método de autenticação de *hardware* e *software* (o chamado Autenticador) para dar mais confiabilidade aos dados antes da efetiva documentação em *blockchain*. Estas soluções são descritas a seguir.

2.3.2.1. Dispositivo IoT/*software* Embarcado e Automação da Tokenização (*Joker*)

Os dispositivos IoT (de *Internet of Things*, ou Internet das Coisas) desempenham um importante papel no processo de CONSERVOMETRIA, uma vez que proporcionam a captura *automática* de dados relacionados a práticas sustentáveis e medições em tempo real.

Para implementar um IoT/*software* com estas características, foi desenvolvido um inovador dispositivo IoT/*software*, a placa chamada de “*Joker*”⁵⁰, que proporciona a integração de vários sensores, sistemas e processos para registro de dados diretamente e automaticamente em *blockchain* (Fernandes *et al* 2023).

O dispositivo “*Joker*” (Fig. 2.8) foi projetado para capturar dados de diversas fontes, como medidores de energia, sensores e equipamentos de monitoramento ambiental, de forma a documentar as métricas de forma direta e sem interferência humana. Portanto, o

servidores, usuários e empresas: uma comunidade global trabalhando para resolver problemas e criar valor no mundo real. Para mais informações, ver <https://xrpl.org/xrp-ledger-overview.html>
⁵⁰ O *Joker* tem esse nome por servir de coringa e é objeto do Pedido Internacional de Patente PCTBR2023050061 (WO2022159292), sendo o presente autor um dos co-inventores.

Joker é um dispositivo e sistema para medição de quantidades, processamento de dados e integração com sistema de emissão de ativos digitais ou tokens em redes do tipo *blockchain*.



Figura 2.8 – *Joker*, IoT para automação do registro de métricas em *blockchain* (Crédito: Marcos J. R. Gonçalves Jr.).

A mensuração de magnitudes é vital para dar objetividade aos sistemas de conservação ou recuperação ambiental, evitando o que se chama de “*greenwashing*”, ou ações que supostamente realizam essa preservação ou recuperação, sem de fato fazê-lo. Ao medir grandezas físicas, o sucesso da ação é garantido de forma objetiva e científica.

O *Joker* é um dispositivo IoT que compreende: um ou mais dispositivos ou sistemas de medição de entidades/quantidades associadas à sustentabilidade, conservação ou recuperação de ativos ambientais, fornecendo métricas de conservação ambiental; e um processo de gravação (em sistema digital distribuído ou *blockchain*) de métricas autenticadas. Neste caso, o *Joker* compreende um processador, memória de armazenamento de dados, e um *software* embarcado para processar dados das referidas grandezas medidas, transformá-los em informações e armazená-las na *blockchain* através do processo de tokenização. Em outra modalidade, o *Joker* é um *software*, embarcado em um dispositivo pré-existente⁵¹, de forma a realizar cálculos, obter da memória primária do dispositivo as grandezas lidas do meio e computar as métricas de sustentabilidade.

⁵¹ Por exemplo, quando se trata de prover economia de consumo de energia elétrica na emissão de tokens ou outros criptoativos, o *Joker* na forma de um *software* pode documentar a economia de energia dos nós (computadores) validadores do XRP Ledger. Isso é particularmente útil para a geração de CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO®, de acordo com um algoritmo pré-estabelecido para o efeito, relativo à poupança de energia consumida quando comparada com o consumo de outras formas de documentação de ativos via *blockchain*, como Bitcoin ou Ethereum.

2.3.2.2. Verificação de Dados (Autenticador)

Uma outra tecnologia foi também desenvolvida e incorporada para a proporcionar rigorosos processos de verificação da informação de origem, para garantir sua precisão e confiabilidade⁵². Essa tecnologia, chamada de “Autenticador” proporciona análises de dados com algoritmos avançados, para que as informações relacionadas à sustentabilidade sejam validadas e dotadas de um grau superior de qualidade (Carvalho & Remer 2022). Neste contexto, a verificação e autenticação de dados é um aspecto importante dos processos de CONSERVOMETRIA, pois estabelece aumentada confiabilidade aos dados obtidos e documentados. O Autenticador emprega sofisticados mecanismos de verificação e autenticação, de forma a identificar e mitigar qualquer potencial anomalia, erro ou tentativa fraudulenta, garantindo a integridade e qualidade dos dados de sustentabilidade.

O Autenticador acima referido aperfeiçoa as abordagens de autenticação de *hardware* e/ou *software* embarcado. O método do Autenticador compreende os passos de: a) obter um registro identificado de cada dispositivo único de *hardware* e *software*; b) interrogar subsequentemente este mesmo dispositivo único de *hardware* e *software* para comparar o referido registro identificado obtido na interrogação com aquele previamente registrado e c) identificar eventual corrupção, adulteração e/ou invasão/*eavesdropping* do conjunto *hardware/software* embarcado quando a comparação dos registros não resultar em correspondência.

Esta abordagem é particularmente útil para a autenticação de *hardware* e/ou *software* embarcado, para a identificação de *eavesdropping* e/ou de adulteração de *hardware* e/ou *software*, localmente ou remotamente. Isso pode ser feito periodicamente ou continuamente. Assim sendo, esta tecnologia é útil, dentre outros, para assegurar a fidedignidade de dados e/ou métricas medidas por um conjunto integrado de *hardware* e *software*, que atua nas etapas de medição das grandezas físicas e sua autenticação prévia ao passo de registro de ativos digitais distribuídos em *blockchain*.

⁵² Essa abordagem de autenticação de *hardware* e *software*, chamada de “Autenticador”, é objeto do Pedido Internacional de Patente PCTBR2022050015 (WO2022155718), de titularidade de Rogério A. de Carvalho, sendo o presente autor um dos coinventores.

A combinação de dispositivos IoT/*software* e processos robustos de verificação e autenticação de dados garante a confiabilidade e autenticidade dos dados de sustentabilidade, reforçando a transparência e credibilidade da CONSERVOMETRIA. Portanto, essa integração de dispositivos IoT/*software* na plataforma capacita indivíduos, empresas e organizações a medir e rastrear com precisão as suas ações sustentáveis.

2.3.2.3. Tokens RWA, Tokens de Recompensa e NFTs

A tokenização é um componente-chave da plataforma ThingsGo.Online e revoluciona a forma como a sustentabilidade é medida, monitorada e recompensada. Através da tokenização, a plataforma proporciona a transformação de ações e iniciativas sustentáveis em ativos digitais que podem ser facilmente negociados, trocados e recompensados.

O conceito mais amplo de tokenização RWA (*Real World Asset*), descrito, entre outros, em Hou *et al* 2023, é usado na plataforma ThingsGo.Online de uma forma mais específica e única de tokenização chamada *Device Tokens* (ou tokens dispositivo) para representar e quantificar ações e iniciativas sustentáveis. Esses tokens de dispositivo servem como um tipo específico de token RWA que captura e representa os dados relacionados à sustentabilidade obtidos e documentados por dispositivos IoT ou *softwares* embarcados em medidores existentes. Isso viabiliza uma vantagem única: tokenizar *automaticamente* e com mínima ou nenhuma interferência humana as medições reais diretamente junto aos sensores.

O processo de tokenização começa documentando ações de sustentabilidade – como, por exemplo, redução de emissões de carbono ou metano, geração de energia renovável ou esforços de conservação - em tokens digitais exclusivos, conhecidos como tokens de dispositivo, armazenados com segurança na *blockchain*, garantindo transparência e imutabilidade. A tokenização dos dados de sustentabilidade como tokens de dispositivo na plataforma permite a medição, o rastreamento e a verificação dos reais impactos e benefícios de diversas práticas sustentáveis.

Esta abordagem facilita a integração de dispositivos IoT/*software* (como medidores inteligentes, sensores, sondas multiparamétricas ou geradores de energia renovável) na plataforma, permitindo a obtenção e análise de dados em tempo real. Além disso, os tokens de dispositivo aumentam a transparência e a rastreabilidade das ações sustentáveis (Arcenegui *et al* 2021). Através da infraestrutura *blockchain*, esses tokens permitem registros imutáveis do desempenho de cada dispositivo, garantindo a integridade e confiabilidade dos dados de sustentabilidade. Esta transparência também cria confiança entre os participantes, uma vez que a autenticidade e a precisão das métricas de sustentabilidade registradas podem ser verificadas por qualquer pessoa.

Na plataforma, os tokens dispositivo são automaticamente trocados (*swap* automático) por Tokens de Recompensa TGO⁵³, o principal ativo digital da plataforma e que representa os CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO®. Os Tokens de Recompensa TGO servem como mecanismo de recompensa, reconhecendo e incentivando os usuários por suas contribuições para a sustentabilidade, permitindo que os usuários acessem uma série de benefícios.

Os Tokens de Recompensa TGO podem ser usados de várias maneiras. Por exemplo, os usuários têm flexibilidade para trocar seus Tokens de Recompensa TGO por *cashback*, descontos ou ofertas exclusivas em produtos e serviços sustentáveis oferecidos por organizações parceiras. Além disso, os Tokens de Recompensa TGO podem ser usados na aquisição de Certificados GIVEBACK®. Cada Certificado GIVEBACK® é um token não fungível (NFT) vinculado a uma quantidade específica de tokens dispositivo, fornecendo um vínculo transparente e rastreável entre a ação sustentável e sua representação na forma de um NFT. Esta integração fornece aos usuários uma prova tangível de seus esforços de sustentabilidade e garante a credibilidade e integridade dos Certificados GIVEBACK®. Além disso, a quantidade de tokens dispositivo utilizada para respaldar a emissão dos (tokens de recompensa TGO e subsequentemente dos) Certificados GIVEBACK® é “queimada” no momento da cunhagem do NFT, para evitar eventuais erros de duplo respaldo⁵⁴.

⁵³ TGO é a abreviatura de Things Go Online e a denominação do token de recompensa TGO, que materializa os CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO®.

⁵⁴ O *hash* do processo de “queima” é armazenado, fornecendo uma trilha de auditoria.

2.3.2.4. Economia Circular Digital

A plataforma ThingsGo.Online inclui um conceito inovador de *economia circular digital*⁵⁵ (Fig. 2.9, preparada pelo autor).

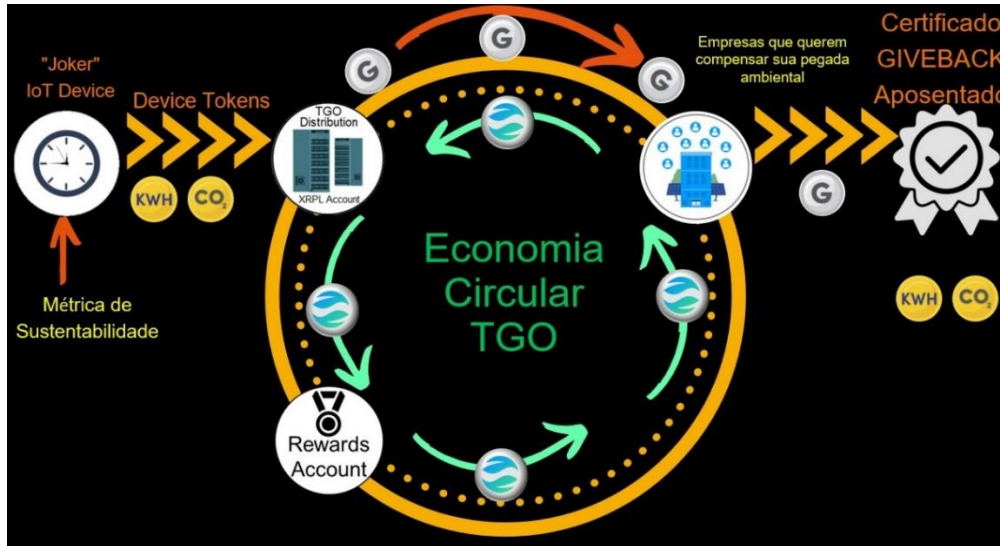


Figura 2.9 - Representação esquemática da Economia Circular Digital.

A Economia Circular Digital pode ser descrita como um processo de três etapas:

- 1 - a medição e documentação de atitudes, projetos e ações sustentáveis, que são quantificados e representados como tokens dispositivo (device tokens) na *blockchain*;
- 2 - a conversão ou *swap* automático dos tokens dispositivo em tokens de recompensa TGO, também na *blockchain*, formando uma conta de recompensas para a gestão dos tokens de recompensa TGO ou CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®]. Essa conta viabiliza a negociação de tais ativos (de maneiras detalhadas adiante); e
- 3 - a troca de tokens de recompensa TGO ou CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®] por Certificados GIVEBACK[®].

⁵⁵ Concebido pelo Dr. Rodrigo Martins Fernandes e outros, incluindo o autor (Fernandes *et al* 2023).

Os princípios de uma economia circular digital visam maximizar o valor dos esforços sustentáveis e minimizar custos e desperdícios. Neste princípio de economia circular, os tokens de dispositivo (com as métricas de entrada) são infinitos; os tokens de recompensa TGO são finitos e os Certificados GIVEBACK[®] são infinitos.

O processo de economia circular digital pode ser descrito mais detalhadamente da seguinte forma: ele começa com o registro das medições (o que pode ser feito pelo *Joker*) das atitudes, projetos e ações sustentáveis, que são representadas quantitativamente como tokens dispositivo. Esses tokens dispositivo representam métricas específicas, como geração de energia sustentável (kWh ou MWh), captura de carbono (ton CO₂), metano (ton CH₄) ou gases contendo enxofre (ton SO_x), economia ou conservação de água (m³ H₂O), remoção de carga orgânica de corpos líquidos, dentre outros indicadores de sustentabilidade relevantes.

Na plataforma, os tokens de dispositivo são convertidos automaticamente (swap automático) em tokens de recompensa TGO, sem interferência humana⁵⁶. Isso significa que um token TGO é momentaneamente “consumido” do estoque total a cada emissão. Neste contexto, na origem da plataforma ThingsGo.Online, foram emitidos 1 bilhão de tokens de recompensa TGO e esse número não pode mais ser alterado, sendo aferível de forma transparente e auditável na plataforma. Os tokens de recompensa TGO servem como moeda nativa da plataforma e oferecem uma infinidade de benefícios aos usuários. Eles podem ser acumulados ou usados para acessar diversos benefícios e descontos, trocar por moeda fiduciária ou outras criptomoedas e na aquisição de Certificados GIVEBACK[®].

O processo circular se completa quando os tokens de recompensa TGO são trocados por Certificado(s) GIVEBACK[®], e os tokens de recompensa TGO recirculam (agora “vazios”), para novas documentações⁵⁷. Importante ressaltar que todos os predicados documentados originalmente por meio dos tokens de dispositivo, ou seja, aqueles associados a cada ação sustentável - incluindo suas métricas - são transferidos ao

⁵⁶ E com base em uma taxa de preço estabelecida pelo serviço Oracle da ThingsGo.Online.

⁵⁷ Assim, a recirculação dos tokens TGO compatibiliza sua finitude com as infinitas métricas de entrada e os correspondentemente infinitos Certificados GIVEBACK[®].

Certificado(s) GIVEBACK[®], adquirido(s) mediante pagamento ao até então detentor dos tokens de recompensa TGO.

Em resumo, os certificados GIVEBACK[®] são respaldados ou *lastreados* por tokens de dispositivo que contemplam as métricas e demais predicados registrados na *blockchain* – e por esta razão possuem valor inerente na demonstração das efetivas métricas do impacto de ações sustentáveis. Quando os Certificados GIVEBACK[®] são aposentados (por exemplo, quando usados em relatórios ESG), eles são efetivamente queimados, tornando-os não negociáveis e solidificando sua importância como evidência de compensação da pegada ambiental. Estes Certificados GIVEBACK[®] aposentados podem ser utilizados em relatórios de sustentabilidade para mostrar o impacto tangível de ações sustentáveis empreendidas por indivíduos, empresas ou organizações, fornecendo provas verificáveis e quantitativas do seu compromisso com a sustentabilidade.

2.3.2.5. Eficiência Energética até nos Algoritmos: Uso de XRP Ledger.

A plataforma ThingsGo.Online foi implementada em *blockchain* com a tecnologia do XRP Ledger, que foi escolhida especificamente por ser robusta e ter elevada confiabilidade, escalabilidade, velocidade e eficiência energética. Os atributos do XRP Ledger proporcionam à plataforma grande transparência, imutabilidade e documentação de dados relacionados à sustentabilidade, sendo à prova de falsificação (Tumas 2023). Ações sustentáveis, sejam elas redução de emissões de gases de efeito estufa, adoção de fontes de energia renováveis ou conservação de recursos naturais, são registradas como transações no XRP Ledger. Estas transações são executadas e compartilhadas de forma integrada em toda a rede, permitindo o acompanhamento e verificação em tempo real dos esforços de sustentabilidade. Além disso, o algoritmo de consenso e os protocolos criptográficos do XRP Ledger garantem a integridade e segurança dos dados armazenados na *blockchain*. Isto garante que as informações relacionadas às ações sustentáveis permaneçam imutáveis e resistentes a tentativas de fraude ou de modificação.

Características importantes da tecnologia XRP Ledger, que foram usadas como critério para sua escolha na implementação da plataforma ThingsGo.Online, incluem: sua extrema velocidade, seu baixíssimo consumo energético e alta escalabilidade. A tabela 2.1 ilustra esses aspectos e mostra que a tecnologia da XRP Ledger se destaca quando comparada às outras tecnologias conhecidas no mercado de criptoativos. Seu baixíssimo consumo energético é consistente com o propósito de conservação ambiental e alinhado ao conceito de CONSERVOMETRIA.

Tabela 2.1 – Atributos de diferentes tecnologias de *blockchain*, segundo Kohli *et al* 2023.

| Atributo\Tecnologia | Ethereum | Bitcoin | XRP Ledger |
|-------------------------------------|-----------------|----------------|-------------------|
| Tempo por registro/transação | 20 min | 2 h | 3 s |
| Custo por registro/transação | US\$ 15 | US\$ 25 | US\$ 0,0004 |
| Escalabilidade (transações/segundo) | 16 tps | 32 tps | 1500 tps |
| Consumo energético por transação | 4,5 kWh | 707 kWh | 0,0079 kWh |

Um aspecto adicional e diferencial da plataforma é a capacidade de documentar dados *em tempo real*. Esse recurso, derivado do uso do *Joker* (tecnologia já descrita nesse capítulo) e da tecnologia de registro em *blockchain* escolhida (o XRP Ledger⁵⁸) devido à sua elevadíssima velocidade, permite que os usuários obtenham informações valiosas sobre seu impacto ambiental, consumo de energia e outras métricas de sustentabilidade continuamente ou *quasi* continuamente. Isto proporciona um melhor monitoramento de processos, incentiva uma maior responsabilização e melhora os processos de tomada de decisão informada, facilitando a identificação rápida de áreas para melhorias adicionais.

Por fim, também é muito eficiente economicamente a abordagem de economia circular da plataforma ThingsGo.Online com a tecnologia XRP Ledger. Isso porque as tokenizações neste princípio de economia circular não requerem o uso de *smart contracts*, usando, em vez disso, uma transação do tipo *cross-currency payment* junto ao XRPL *Dex Order Book*. Este tipo de transação mantém a higidez e a segurança dos dados e tem custo

⁵⁸ A tecnologia do XRP Ledger proporciona tokenização tão rápida que é compatível com o controle *online* de processos. Conforme mostra a tabela comparativa acima, o mesmo não ocorreria se fosse usada a tecnologia usada pelo Bitcoin ou a usada pelo Ethereum, para citar alguns exemplos.

extremamente baixo⁵⁹. Neste contexto, a somatória de todas as transações no XRP Ledger das operações de medição e tokenização continuada do Estudo de Caso de Produção de Energia Solar (descrito no item 2.4 a seguir), custou menos de US\$ 0,25 por ano, ou seja, menos que R\$ 1,25 por ano para realizar todas as respectivas transações/registros na blockchain. É muito eficiente economicamente.

2.3.3. Problemas Resolvidos

O panorama de sustentabilidade existente enfrenta vários desafios que dificultam a eficácia e a adoção generalizada de práticas sustentáveis. Esses desafios serviram de inspiração para a criação da plataforma ThingsGo.Online, que aborda e resolve a questão prática de métricas de ativos ambientais ou CONSERVOMETRIA. A plataforma também resolve os seguintes problemas:

a) Falta de transparência e responsabilização:

Os métodos tradicionais de promoção da sustentabilidade carecem frequentemente de transparência e responsabilização. Os créditos de carbono, as certificações de energias renováveis e outras iniciativas semelhantes sofrem de limitada rastreabilidade e verificação. Esta falta de transparência mina a confiança e torna difícil validar o verdadeiro impacto das ações sustentáveis. A plataforma pretende superar esse desafio usando sua tecnologia IoT/*software* que conecta sensores à *blockchain*, aproveitando assim a tecnologia *blockchain*, e proporcionando registros transparentes e imutáveis de ações sustentáveis. Conseqüentemente, a plataforma é um ecossistema confiável e verificável de documentação de práticas sustentáveis.

b) Medição e Verificação Ineficientes:

Os métodos atuais de medição e verificação de ações sustentáveis são, muitas vezes, complicados e ineficientes e os processos manuais de relatórios e auditoria estão sujeitos a erros, atrasos e precisão limitada (Bini & Bellucci 2020). Esta ineficiência dificulta a capacidade de avaliar com precisão o impacto ambiental e social das iniciativas de

⁵⁹ Cada transação/registo tem um custo de 0,000012XRP e a cotação do XRP no momento da preparação deste texto (01Mar2024) era de US\$ 0,60.

sustentabilidade. A plataforma aborda esse desafio automatizando o processo de medição e verificação por meio de dispositivos IoT/*software* e tecnologia *blockchain*. A tecnologia empregada permite a captura de dados em tempo real e o registro com segurança na *blockchain*, de forma que a plataforma proporciona uma medição precisa e confiável das ações de sustentabilidade, ou seja, é uma ferramenta prática de implementação do conceito de CONSERVOMETRIA.

c) Falta de incentivos e de reconhecimento:

Muitos indivíduos e organizações estão motivados a envolver-se em práticas sustentáveis, mas a falta de incentivos financeiros e/ou de reconhecimento limita o alcance de seu compromisso. Os sistemas de recompensa existentes muitas vezes não conseguem recompensar e reconhecer adequadamente as ações sustentáveis. A plataforma visa completar esta lacuna, viabilizando o uso de modelos de negócio baseados na reputação (*naming rights*, por exemplo), bem como a emissão e comercialização dos Certificados GIVEBACK®.

d) Colaboração limitada e compartilhamento de conhecimento:

O atual cenário de sustentabilidade carece de um ambiente colaborativo para a partilha de conhecimentos e melhores práticas. Indivíduos e organizações muitas vezes trabalham isolados, com oportunidades limitadas de se conectarem e aprenderem uns com os outros. A plataforma pretende superar este desafio fornecendo uma plataforma que promove a colaboração e a partilha de conhecimento. Os participantes podem participar de discussões, partilhar experiências e acessar recursos valiosos, criando uma comunidade vibrante dedicada a impulsionar mudanças sustentáveis. Ademais, a cada prática ou projeto diferente, as métricas relacionadas às atividades sustentáveis como as de conservação ou recuperação ambiental ficam documentadas de forma indelével, sendo acessíveis ao público em geral. Essas métricas são referências de CONSERVOMETRIA que provêm parâmetros quantitativos para outros projetos, servindo de *benchmark* e/ou elementos de formulação de políticas públicas.

e) Acessibilidade e Inclusão:

Acessibilidade e inclusão continuam a ser desafios significativos no espaço da sustentabilidade. Muitas iniciativas existentes estão restritas a indústrias, regiões ou

partes interessadas específicas, limitando a participação mais ampla necessária para um impacto global. A plataforma aborda esse desafio criando um ecossistema de recompensas inclusivo que incentiva a participação de indivíduos, empresas e organizações de vários setores e tamanhos. O uso de tokens de recompensa TGO materializa o conceito de CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO® e garante acesso igualitário a recompensas e benefícios, promovendo o envolvimento generalizado e democratizando a sustentabilidade.

f) Dores ou dificuldades técnicas de outros sistemas que usam *blockchain*

Literatura recente (Sorensen 2023) mostra que a tecnologia *blockchain*, embora muito adequada ao registro de ativos ambientais, não é suficiente para resolver alguns problemas de heterogeneidade dos tipos de tokens como os créditos de carbono. Essa e outras limitações dificultam a ampla adoção da tecnologia pela indústria. Neste contexto, é a combinação da tecnologia *blockchain* com outras tecnologias que resolve estes problemas: o uso do XRPLedger (baixo custo, alta velocidade e escalabilidade); a tecnologia do *Joker* (registro da métrica junto à origem, evitando registro de dados espúrios e minimizando *greenwashing*); e abordagem de Economia Circular Digital (“*triple token approach*”, que proporciona desacoplamento temporal e geográfico entre a tokenização das métricas e sua comercialização; e o uso de transações do tipo *cross-currency payment*, que não requerem o uso de *smart contracts*). Em conjunto, as tecnologias resolvem estes e outros problemas – incluindo a facilitada interconversão de tokens de métricas distintas. Através da transparência, automação, reconhecimento, colaboração e inclusão, a plataforma visa capacitar indivíduos e organizações a impactarem de maneira significativa e mensurável o meio ambiente e a sociedade.

Em resumo, os principais aspectos da plataforma são: (i) a automação de processos e tecnologias usadas, tanto as previamente disponíveis como *blockchain* e XRP Ledger quanto as quatro outras tecnologias desenvolvidas no âmbito desta tese (CONSERVÔMETRO®; Plataforma ThingsGo.Online/Economia Circular Digital; Autenticador; e *Joker*), ou seja, as tecnologias usadas garantem escalabilidade, eficiência e confiabilidade; (ii) a transparência e a segurança, que são fundamentais na plataforma; e (iii) o sistema de economia circular digital que viabiliza um mercado que incentiva e monetiza atitudes sustentáveis, além de inovar no segmento de economia digital.

2.4. Estudo de Caso na Produção de Energia Solar

Os conceitos deste capítulo foram implementados na prática em diferentes contextos, sendo descrito a seguir o caso de uso na produção de energia renovável fotovoltaica/solar na Cooperativa COSOLAR em Campos dos Goytacazes/RJ.

A COSOLAR foi a primeira cooperativa de energia solar no Rio de Janeiro e foi escolhida como primeiro parceiro/cliente da ThingsGo.Online para a mensuração e tokenização de atitudes sustentáveis em *blockchain*, usando as tecnologias descritas neste capítulo.



Figura 2.10 - Foto aérea de painéis solares da Cooperativa COSOLAR/RJ (Crédito Rodrigo Martins Fernandes).

As medições e registros/tokenização em *blockchain* da energia renovável produzida na referida unidade de produção de energia solar iniciaram em 16Maio2022, sendo feitas com precisão na plataforma ThingsGo.Online como será demonstrado adiante. Isso proporcionou não apenas o retorno financeiro pela venda da energia física produzida (prática comum em investimentos em energia solar), mas também recompensa financeira aos cooperados pela atitude sustentável, venda dos CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®] e contribuição para os esforços de redução da pegada de carbono.

A unidade da COSOLAR (Fig. 2.10) era inicialmente dotada de módulos fotovoltaicos de 50kWp e um inversor de 40kW. Em maio de 2022, foi instalado um dispositivo *Joker* descrito em seção anterior neste capítulo, para iniciar a tokenização das métricas de sustentabilidade na plataforma ThingsGo.Online. No início de 2023, a unidade teve uma

expansão, com a instalação de módulos fotovoltaicos adicionais, perfazendo uma potência instalada de 140 kWp e um inversor de 75kW.

A quantidade total de tokens-dispositivo denominados KWH registrados no período analisado (desde 16Mai2022 até 26Fev2024) foi de 214.392 KWH, conforme pode ser verificado no registro público da XRP Ledger (disponível em <https://xrpscan.com/account/rhoTGoHHCcdwu77V8rWx4g85TE41ftocff>, Fig. 2.11).

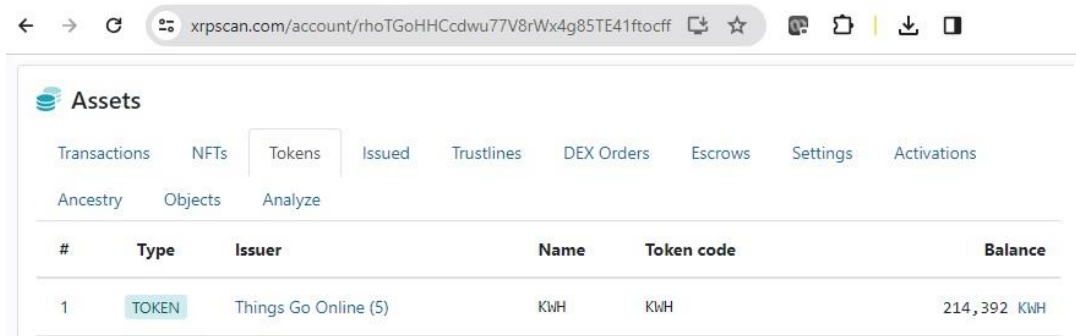


Figura 2.11 - Registro do total de tokens em 26Fev2024.

O registro de tokens dispositivo KWH representa a exata quantidade de energia renovável, em kilowatt-horas, gerada pela unidade da COSOLAR no período. Isso pode ser demonstrado pelo gráfico abaixo, que mostra a energia efetivamente produzida (linha contínua) e aquela documentada periodicamente (o valor acumulado) pela plataforma. Para clareza e melhor resolução, a figura 2.12 mostra os dados de apenas um dia de registro.



Figura 2.12 - energia efetivamente produzida (linha contínua) e a documentada periodicamente (valor acumulado) pela Plataforma.

Conseqüentemente, a tokenização da produção de energia renovável pelo ecossistema ThingsGo.Online é comprovadamente um caso de registro fidedigno de atitudes sustentáveis, documentadas pelos princípios de CONSERVOMETRIA e usando o CONSERVÔMETRO®.

Detalhes sobre os registros feitos entre 16Mai2022 e 25Fev2024 (Fig. 2.13) indicam a quantidade mensal de tokens dispositivo KWH registrados em *blockchain* no período.



Figura 2.13 - Quantidade de tokens registrados em *blockchain* entre 2022 e 2024.

Como pode ser observado (Fig. 2.13), a quantidade de tokens KWH registrados mensalmente em *blockchain* varia e proporciona informações valiosas sobre o desempenho de geração de energia renovável pela unidade da COSOLAR. Essa documentação proporciona uma trilha de auditoria de desempenho e garante transparência às informações. Algumas tendências e ocorrências ficaram evidentes a partir desses registros:

- (i) A produção média nos meses de inverno de 2022 foi de 5225 kWh e, conforme esperado, a média de produção de energia após o início dos meses mais ensolarados aumentou. Em setembro e outubro de 2022, a produção de energia (6591,3 e 6367,7 kWh, respectivamente) foi aproximadamente 20% superior à do período anterior;
- (ii) Em novembro de 2022 a produção (4831,9 kWh) diminuiu aproximadamente 25% em relação à média dos dois meses anteriores, fato atribuído às intensas chuvas no período. Em dezembro de 2022, a produção aumentou novamente (5744,5 kWh);

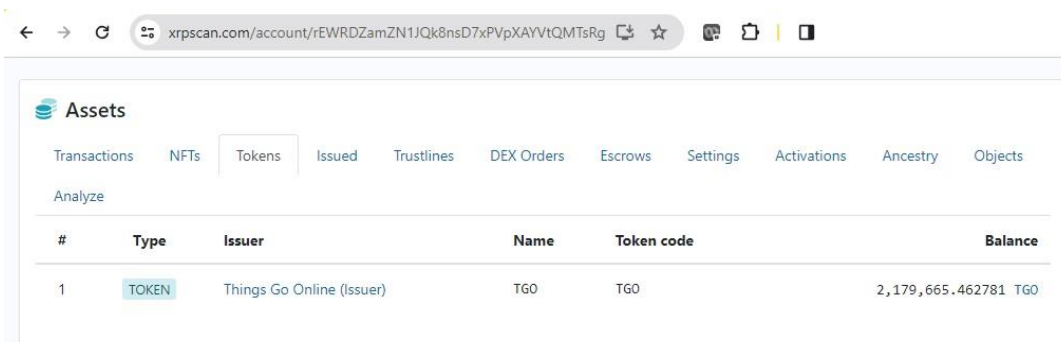
- (iii) A produção foi substancialmente menor (2555,6 kWh) em Jan2023, devido às obras de expansão da unidade e correspondentes interrupções;
- (iv) Em Fev2023 houve ainda pequena produção mas nenhum registro em *blockchain* devido a falhas no provedor de acesso à internet. Entretanto, em Mar2023 foi registrada a quantidade tanto de fevereiro quanto de março (4584,3 kWh), pois o sistema de registros da plataforma armazena os dados mesmo sem internet e quando a conexão é reestabelecida o acumulado é devidamente registrado em *blockchain*;
- (v) Os dados a partir de Abr2023 já refletem a plena operação da unidade após a expansão, sendo registrados 12542 kWh
- (vi) Os meses subsequentes seguiram com registros que refletiram o perfil de oscilações de incidência solar. Por exemplo, em Out2023 houve muita chuva e as medições foram menores (13875 kWh), bem inferiores à media dos meses de setembro-dezembro de 2023 (aproximadamente 17000 kWh);
- (vii) Por fim, em Jan2024, novamente devido à grande incidência de chuvas, a produção foi um pouco menor (15923 kWh) que no período anterior. Semelhante perfil ocorreu em Fev2024 (13719 kWh), embora os dados sejam correspondentes a um período mais curto, devido à data de corte (as medições de fevereiro se referem a apenas 25 dias).

As informações disponíveis e comentadas acima permitem a avaliação, acompanhamento e elementos para tomada de decisão por qualquer dos *stakeholders* relacionados ao empreendimento. Como os dados são disponíveis publicamente na internet, qualquer um pode acompanhar a evolução das medições das atitudes sustentáveis e direcionar esforços em situações em que ocorrências inesperadas aconteçam.

Por outro lado, e conforme já detalhado em seções anteriores deste capítulo, os tokens dispositivo (KWH neste caso) são convertidos automaticamente (*swap* automático) em tokens de recompensa TGO, os CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO⁶⁰. O registro destes tokens TGO é feito na conta de recompensas em nome de seu proprietário (Cooperativa COSOLAR, cuja atitude deu origem aos créditos), e é disponível publicamente⁶⁰ em <https://xrpscan.com/account/rTGoNeK6vpu28U2oE5tiqhH3x8z2jBhxy>. Neste contexto,

⁶⁰ Assim, os *stakeholders* podem acompanhar a evolução do acúmulo de seus créditos continuamente, de forma transparente.

havia sido acumulados até 25Fev2024 um total de 2 milhões 179 mil seiscentos e sessenta e cinco tokens de recompensa TGO (Fig. 2.14).



| # | Type | Issuer | Name | Token code | Balance |
|---|-------|---------------------------|------|------------|----------------------|
| 1 | TOKEN | Things Go Online (Issuer) | TGO | TGO | 2,179,665.462781 TGO |

Figura 2.14 - Acumulado de tokens de recompensa TGO até 25Fev2024.

Além disso, uma empresa adquiriu, mediante pagamento, Certificados GIVEBACK[®] com os mesmos predicados/métricas documentados no *hash* de emissão dos tokens dispositivo. Essa transação também é registrada e pode ser verificada publicamente. A referida transação envolveu pagamento para a emissão dos Certificados GIVEBACK[®] que representam a totalidade das métricas de atitudes sustentáveis - neste caso a energia renovável produzida. O adquirente pode, com transparência e precisão, fazer a comunicação corporativa das (agora suas) atitudes sustentáveis e usar esta (devidamente lastreada) informação em relatórios de sustentabilidade se assim desejar.

Este caso real mostra como a plataforma ThingsGo.Online implementa na prática o conceito de CONSERVOMETRIA. A arquitetura da plataforma garante que as medições de quantidades/métricas sejam efetivamente documentadas, de forma indelével e transparente, nos *hashs* das transações em *blockchain*. Portanto, a trilha de medição/documentação em tokens dispositivo (RWA), sua conversão automática em tokens de recompensa TGO e a subsequente negociação para emissão de Certificados GIVEBACK[®] é totalmente transparente, verificável e lastreada nas quantidades reais documentadas.

Este caso real mostra também como a plataforma incentiva e monetiza práticas sustentáveis. Importante ressaltar, neste contexto, que a Cooperativa COSOLAR pode perceber duas espécies diferentes de valor: (i) uma decorrente da comercialização da energia fisicamente produzida (o que não envolve a ThingsGo.Online) e (ii) outra

decorrente do registro em *blockchain* da quantidade de energia renovável produzida, para fins reputacionais ou de monetização. Essa segunda linha de monetização, indisponível na prática antes da implementação dos conceitos ora apresentados, representa o acréscimo de valor trazido à mesa. Os CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®] e os Certificados GIVEBACK[®], portanto, são formas de criar esse valor adicionado à cadeia de atitudes sustentáveis e de incentivar tais práticas.

Por fim, o potencial da abordagem aqui descrita tem relação com a capacidade instalada de energia solar no Brasil. A contribuição da energia solar na matriz energética brasileira é atualmente 6,14% do total, com 12,2 GW, conforme dados do Sistema de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (SIGA)⁶¹. Esta contribuição vem crescendo rapidamente⁶² e ainda há muito a ser explorado/desenvolvido neste segmento. O Brasil, sendo líder mundial em energia renovável (com 84,24% de sua matriz energética sendo de fontes renováveis, de acordo com os dados do SIGA), tem várias outras fontes renováveis passíveis de tokenização - de forma análoga à apresentada acima. Neste contexto, o presente autor, em conjunto com os demais parceiros/desenvolvedores da Things Go Online, buscou aproveitar esse potencial e co-inventou uma abordagem específica para a tokenização da geração hidrelétrica de energia (Fernandes *et al*, ainda não publicado)⁶³, cuja escala é quase dez vezes superior à da geração solar⁶⁴. Abordagem semelhante, usando a referida tecnologia para redução de emissão de metano e produção de energia térmica e/ou elétrica, está em fase de testes e será descrita a seguir.

⁶¹ Disponível em (acesso em 24Fev2024):

<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoibjI4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2liwiIiwiaCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>.

⁶² Além disso, o potencial de crescimento ainda é muito grande. Segundo Barbara Rubim, vice-presidente da ABSOLAR, “A área do Brasil com menor incidência solar, que é o Sul do País, como em Santa Catarina, ainda é cinco vezes melhor do que o melhor lugar na Alemanha”.

⁶³ Objeto do pedido de patente BR102023007317-4. O pedido foi depositado em 19Abr2023 e ainda está em sigilo.

⁶⁴ Conforme dados públicos do Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA).

2.5. Estudo de Caso na Redução da Emissão de Metano

O Protocolo de Kyoto estabeleceu equivalência segundo a qual o gás metano (CH₄) tem acima de 80 vezes mais potencial de efeito estufa que o gás carbônico (CO₂) em um horizonte temporal de 20 anos e de 27,9 em um horizonte de cem anos (Mar *et al* 2022). Não é surpresa, portanto, que o metano seja objeto de muitos estudos na área de conservação ambiental, havendo variados exemplos de atividades ou circunstâncias que originam a produção e/ou emissão de metano. Especial menção é feita neste trabalho aos casos da pecuária (Dalby *et al* 2021), estações de tratamento de efluentes (El-Fadel & Massoud 2001) e corpos líquidos com elevada carga orgânica e regime anaeróbico – como rios, lagoas, lagunas e *wetlands*⁶⁵ (Whiting & Chanton 2003). Segundo Koffi *et al* 2020, a emissão de metano de fontes *naturais* é predominantemente originada em *wetlands* (30 a 40%).

No Brasil, grande parte do metano é originada da pecuária, sendo estimado que 60% do potencial de produção de biogás/biometano⁶⁶ para reaproveitamento pode ser obtido do esterco de gado (Santos *et al* 2018). Neste contexto, dados do IBGE⁶⁷ mostram que o rebanho bovino brasileiro era 234,4 milhões de cabeças em 2023. Dados da Embrapa⁶⁸ indicam que a produção de biogás pode ser de 0,36 m³/dia/cabeça, o que significa um potencial de produção de até 84 milhões de m³/dia de biogás somente a partir do esterco de gado. Como porção significativa da pecuária bovina é extensiva, dificultando a coleta

⁶⁵ *Wetlands* são, na definição da Agência de Proteção Ambiental dos EUA, áreas nas quais a água cobre o solo próximo à superfície (do solo) de forma permanente ou em período(s) do ano. Essa definição inclui os pântanos, zonas alagadas e também as chamadas *constructed wetlands*, que são áreas construídas pelo Homem – como os chamados Jardins Filtrantes. As *wetlands*, bem como definições mais recentes da literatura, serão exploradas em mais detalhes no Capítulo 3, que aborda especificamente o conceito de CONSERVOMETRIA em sistemas aquáticos costeiros/águas interiores.

⁶⁶ Enquanto metano é a denominação química da molécula CH₄, biogás é o nome dado aos gases formados em processos de fermentação ou digestão anaeróbica, neste caso do esterco (que incluem em torno de 60-80% de CH₄ e entre 20 a 40% de CO₂, além de outras gases em quantidade diminutas). O biometano é o nome dado ao metano purificado a partir do biogás.

⁶⁷ <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/bovinos/br>

⁶⁸ Dados de 2021, disponíveis no site da Embrapa: [https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/p-d-e-i/biogas#:~:text=Estima%2Dse%20que%20a%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20biog%C3%A1s%20por%20animais%20seja%20de%3A&text=Aves%20\(2%2C5%20kg\),m%C2%B3%2Fcade%C3%A7a%2Fdia\).&text=Su%C3%ADnos%20\(90%20kg\)%20%E2%80%93%200%2C240,m%C2%B3%2Fcade%C3%A7a%2Fdia\).&text=Bovinos%20\(500%20kg\)%20%E2%80%93%200%2C360,m%C2%B3%2Fcade%C3%A7a%2Fdia\)](https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/p-d-e-i/biogas#:~:text=Estima%2Dse%20que%20a%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20biog%C3%A1s%20por%20animais%20seja%20de%3A&text=Aves%20(2%2C5%20kg),m%C2%B3%2Fcade%C3%A7a%2Fdia).&text=Su%C3%ADnos%20(90%20kg)%20%E2%80%93%200%2C240,m%C2%B3%2Fcade%C3%A7a%2Fdia).&text=Bovinos%20(500%20kg)%20%E2%80%93%200%2C360,m%C2%B3%2Fcade%C3%A7a%2Fdia))

e aproveitamento do esterco, apenas parte desse enorme potencial é passível de uso na produção energia.

A magnitude do volume de metano, seu impacto e o potencial do crescimento da cadeia do biogás no Brasil motivaram o time de desenvolvedores da Things Go Online ampliar o âmbito de aplicação e aperfeiçoar a tecnologia do CONSERVÔMETRO[®], especificamente para o caso de geradores a biogás/biometano. O resultado foi uma invenção descrita no pedido de patente BR102023007317-4, depositado em 19Abr2023 e ainda em sigilo, sendo intitulado “Módulo de comunicação para conversor de energia ou gerador de energia dotado de um sistema de tratamento de dados e integração com sistema de emissão de ativos digitais ou tokens, conversor de energia ou gerador de energia compreendendo o mesmo”.

Referida tecnologia é aplicável, dentre outros, ao contexto de geradores a biogás/biometano, sendo útil para documentar o metano não emitido e/ou a energia renovável produzida. Neste contexto, e visando implementar em escala a referida tecnologia, a Things Go Online celebrou uma parceria com a CHP Brasil, um dos maiores fabricantes de geradores a Biogás/Biometano do Brasil.

A CHP Brasil é uma empresa brasileira e seu nome deriva da abreviatura do termo em inglês “*Combined Heat & Power*”, que pode ser traduzido tecnicamente como “Cogeração de Energia”⁶⁹. A empresa, portanto, oferece soluções para redução do custo da energia pelo aumento da eficiência energética em projetos que utilizam a cogeração – geração de energia elétrica e térmica através do aproveitamento da dissipação de calor do gerador, usando biogás/biometano. É um caso de empresa apoiada pelo ecossistema de inovação do Brasil, uma vez que iniciou suas atividades com o desenvolvimento de seu principal produto – os grupos geradores de energia a gás, idealizados em 2004 - com apoio econômico da FINEP.

As equipes técnicas da Things Go Online e da CHP Brasil passaram a trocar informações para incorporar o *Joker*/CONSERVÔMETRO[®] aos geradores da CHP Brasil no final de 2023. A Figura 2.15 mostra um gerador da CHP Brasil de (230 kWh), com o painel de controle aberto e, na área destacada em vermelho, o dispositivo *Joker* instalado de forma

⁶⁹ Adaptado do site da empresa: <https://chpbrasil.com.br/quem-somos>

a documentar/tokenizar diretamente o montante de energia efetivamente produzida pelo referido gerador.



Figura 2.15 - Gerador da CHP Brasil de (230 kWh) e, na área destacada em vermelho, o dispositivo *Joker* (Crédito: Marcos Rangel Gonçalves Jr.).

Após a etapa de testes e validação nas instalações da CHP Brasil, foi implantada a tecnologia na Fazenda Penalva⁷⁰ (Juiz de Fora/MG), onde há criação de suínos, sistemas de coleta de dejetos, produção de biogás/biometano, e um gerador da CHP Brasil com capacidade de geração de 400 kWh no qual foi instalado o *Joker/CONSERVÔMETRO*®. Desde a instalação (em 12Nov2023) foram tokenizados até 27Fev2024 mais de 372 MWh de energia renovável ou 3,54 MWh por dia em média.

Especificamente, a quantidade total de tokens-dispositivo denominados MWH registrados no período analisado (de 12Nov2023 até 27Fev2024) foi de 372,29 MWH, conforme pode ser verificado no QRCode ao lado, também disponível no link:



<https://bithomp.com/explorer/rSWAPYcv57gbB8kxW3NyRiCFpxGy9t2B>, ou na Fig. 2.16):

⁷⁰ <https://fazendapenalva.com.br/>

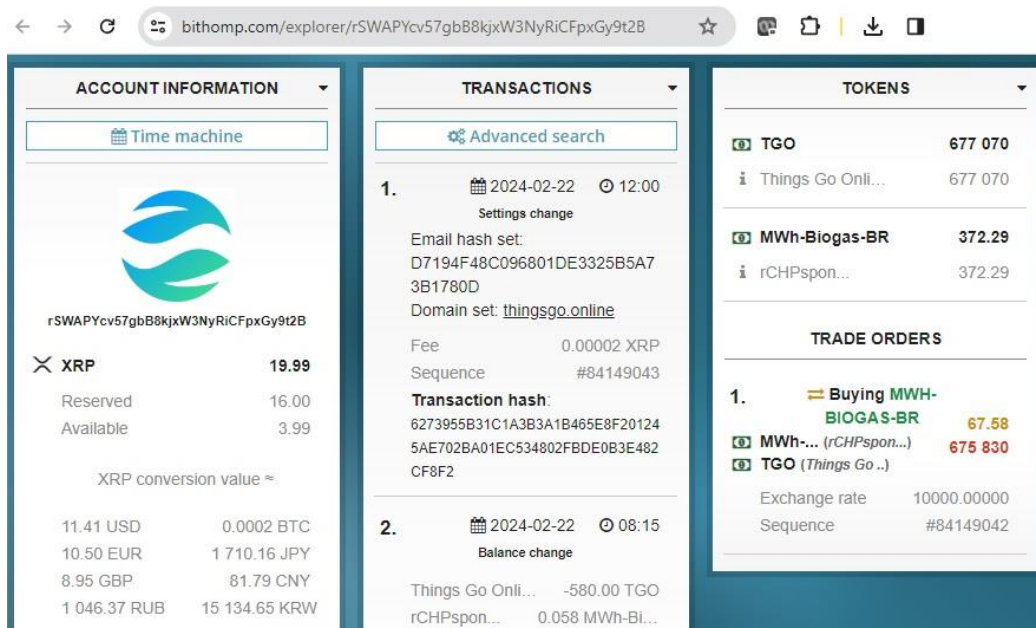


Figura 2.16 - Total de tokens-dispositivo denominados MWH registrados no período analisado (de 12Nov2023 até 27Fev2024).

O registro de tokens dispositivo MWH representa a exata quantidade de energia renovável, em megawatt-horas, gerada pelo gerador a biogás/biometano dotado da tecnologia do CONSERVÔMETRO®. Detalhes sobre os registros são apresentados na figura 2.17, que indica a quantidade mensal de tokens dispositivo MWH registrados em *blockchain* no período.



Figura 2.17 - Quantidade mensal de tokens dispositivo MWH registrados em *blockchain* no período (de 12Nov2023 até 27Fev2024).

Interessante mencionar que o regime de operação deste tipo de gerador pode ser diferente de um painel solar, cuja oscilação é essencialmente determinada pelo ciclo claro-escuro/dia-noite. No caso de geradores a biogás/biometano, sua operação pode ser frequentemente ligada e desligada de acordo com as conveniências da fazenda. Também podem ocorrer flutuações na disponibilidade de internet e por esta razão os registros são armazenados no *Joker*, para que a tokenização do valor acumulado seja feita quando a conexão com internet é reestabelecida. Essa documentação *online* proporciona uma trilha de auditoria de desempenho e garante transparência às informações, permitindo a avaliação, acompanhamento e elementos para tomada de decisão por qualquer dos *stakeholders* relacionados ao empreendimento.

A primeira parte do valor econômico produzido pela geração de energia pode ser calculada com facilidade: na região rural de MG, onde fica a Fazenda Penalva, o custo da energia fornecida pela CEMIG⁷¹ varia entre R\$ 0,74906/kWh (bandeira verde) e R\$ 0,81701/kWh (bandeira vermelha). Logo, a geração total de 372,29 MWh (372.290 kWh) no período de estudo (aproximadamente 3 meses ou 105 dias) corresponde, em termos de custo evitado, entre R\$ 278.867,54 para bandeira verde e R\$ 304.164,65 para bandeira vermelha no período.

Além disso, e conforme já detalhado em seções anteriores deste capítulo, os tokens dispositivo (MWh neste caso) são convertidos automaticamente (*swap* automático) em tokens de recompensa TGO, os CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO®. O registro destes tokens TGO é feito na conta de recompensas em nome de seu proprietário e é disponível publicamente no QRCode abaixo. Neste contexto, foram acumulados, no período (12Nov2023 até 27Fev2024) 670.070 tokens de recompensa TGO, Fig. 2.18).



Figura 2.18 - Registro de tokens de recompensa TGO.

⁷¹ Fonte: <https://www.cemig.com.br/atendimento/valores-de-tarifas-e-servicos/> (acesso em 01Mar2024).

A comercialização dos tokens/créditos pode gerar benefício adicional na forma de prêmio pela energia renovável (kWh ou MWh renovável). Neste contexto, já é recorrente a prática de emissão e comercialização de Certificados de Energia Renovável (I-REC ou I-REC com Selo REC Brazil)⁷². Entretanto, um Certificado de Energia Renovável equivale a 1 MWh de energia gerada e injetada no sistema elétrico pelo empreendimento num determinado período e atualmente é vendido por aproximadamente R\$ 3,00⁷³. Assim, considerando o caso da Fazenda Penalva, nesse período foram gerados 372,29 MWh devidamente documentados, que poderiam dar origem a 372,29 I-RECs ou R\$ 1.116,87.

Esse valor é uma fração muito pequena do valor da energia vendida ou consumida, o que significa que neste caso pode valer mais à pena obter os certificados para fins de enquadramento em programas ambientais do que propriamente pela monetização via I-RECs. Consequentemente, é feita a seguir uma consideração alternativa: a tokenização do volume/peso de metano não lançado à atmosfera devido à sua queima nos geradores, gerando Créditos de Metano.

2.5.1. O Potencial dos Créditos de Metano

Em 2022, o Brasil propôs na COP27 (em Sharm el-Sheikh, no Egito) a criação de mercado global de metano, iniciativa que reitera o compromisso assumido um ano antes na COP26 (em Glasgow, Escócia) com a assinatura do Acordo do Metano⁷⁴, que visa reduzir em 30% as respectivas emissões até 2030. Sua implementação pode se dar através de Créditos de Metano de variadas origens.

⁷² Ver <https://recbrazil.com.br/certificacoes.html>

⁷³ Os valores de comercialização dos RECs variam de acordo com o volume de certificados transacionados, a fonte (os de hidrelétricas seriam mais baratos, seguidos por eólica, biomassa e solar), mas geralmente oscilam em uma faixa de preço entre R\$ 2,50 e R\$ 3,70 por MWh. Fonte Instituto Totum: <https://www.institutototum.com.br/>

⁷⁴ Segundo a então Ministra da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Tereza Cristina, o Acordo do Metano “trará grandes oportunidades para nossa pecuária ser cada vez mais eficiente. A nossa agricultura tropical já faz a redução de vários gases, não só do metano e também do carbono. Temos muito a mostrar do que já vem sendo feito e o que mais vamos poder fazer, principalmente na pecuária, a partir das novas tecnologias que surgiram nos últimos anos”. Relato disponível em <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/acordo-global-para-reducao-de-emissao-de-metano-trara-oportunidades-para-a-agropecuaria-brasileira-diz-ministra>

Segundo Oliveira (2023), um dos principais benefícios dos Créditos de Metano é que eles criam um estímulo econômico para a implementação de tecnologias mais limpas e oferecem recompensas financeiras pela redução das emissões. Essa abordagem contribui para o atingimento das metas de redução de gases de efeito estufa (GEE), *mas tem como requisito essencial a garantia da integridade dos dados que lastreiam os Créditos de Metano*. Essa é, justamente, a contribuição que a CONSERVOMETRIA e o CONSERVÔMETRO® proporcionam, trazendo credibilidade a iniciativas desta natureza.

Dados do Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA)⁷⁵ mostram que a contribuição da energia a biogás na matriz energética brasileira é atualmente em torno de 1,1% do total, com 242MW⁷⁶. Entretanto, esses números não refletem adequadamente o potencial de geração a biogás/biometano porque na maioria dos casos a energia produzida é consumida localmente, não aparecendo, portanto, nos dados do SIGA porque estes refletem apenas o que *está no grid*.

A importância do biogás foi objeto de discussões na audiência na Câmara dos Deputados⁷⁷ em 06Fev2024, com a participação de diversas entidades ligadas ao setor. Segundo a ABIOGAS (Associação Brasileira dos Produtores de Biogás), *“o potencial brasileiro é gigantesco: são 120 milhões de metros cúbicos por dia de biometano, dos quais 57,6 milhões m³/dia estão na cadeia de sucroenergético; 38,9 milhões m³/dia na cadeia de proteína animal; 18,2 milhões m³/dia na cadeia agrícola; e 6,1 milhões m³/dia em saneamento”*.

O representante da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) na referida audiência abordou outro aspecto relevante, ao afirmar que *“o biometano é a fonte de bioenergia que mais cresce no mundo, impulsionada pela necessária resposta*

⁷⁵ Disponível em (acesso em 24Fev2024):

<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2liwiZCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>.

⁷⁶ Dados limitados a 3 usinas a biogás outorgadas para distribuição na rede/*grid*. Os geradores instalados em fazendas que consomem sua própria energia não entram nessa conta por não estarem ligados no *grid*.

⁷⁷ Fonte: Agência Câmara de Notícias. <https://www.camara.leg.br/noticias/1035277-anp-produtores-e-usuarios-projetam-crescimento-do-uso-de-biogas-e-biometano-na-transicao-energetica/>

às mudanças climáticas. Essa geração energética reduz as emissões de metano, que é 28 vezes mais potente do que o CO₂ na geração dos gases do aquecimento global.”

Conseqüentemente, a tokenização no presente estudo de caso, embora venha sendo feita até o momento para a energia produzida, pode alternativamente ser feita para o volume de metano não lançado à atmosfera devido à sua queima nos geradores, gerando Créditos de Metano.

São conhecidas as correlações entre CO₂ e CH₄ quanto ao potencial de efeito estufa de cada um (Mar *et al* 2022). No Protocolo de Kyoto foi estabelecida a equivalência⁷⁸ de 27,9. Como o mercado de Créditos de Metano é ainda muito recente e ainda não são disponíveis cotações específica no mercado, pode ser utilizada a *interconversão* com o mercado de Créditos de Carbono. Este, assim como outros mercados, apresenta oscilações e suas cotações tiveram grande alta a partir de 2020 (Fig. 2.19).



Figura 2.19 - Evolução das cotações dos créditos de carbono de 2011 a 2024.
(Fonte: Investing.com)⁷⁹

Conforme mostrado acima, a cotação de um Crédito de Carbono era de R\$ 56,31 em 01Mar2024, ou seja, na data referida o mercado pagava R\$ 56,31 por tonelada de CO₂ não emitido (dados do mercado voluntário; o mercado regulado paga bem mais). Quando

⁷⁸ Nas duas primeiras décadas após sua emissão, o CH₄ tem efeito estufa em torno de 80 vezes maior que o CO₂. Conseqüentemente, emissões nesta janela temporal são muito mais impactantes. Como o CH₄ é removido da atmosfera mais rapidamente, no Protocolo de Kyoto foi atribuída uma equivalência ao CO₂ em um horizonte de 100 anos. Esta equivalência é de 27,9, ou seja, para cada tonelada de CH₄ emitido, o equivalente em termos de efeito estufa é de 27,9 toneladas de CO₂. O estudo de Mar *et al* (2022) aponta também outros malefícios do CH₄ como gás de efeito estufa, incluindo a interferência no ciclo do O₃ na atmosfera, entre outros – mas estes não são considerados neste trabalho por simplificação.

⁷⁹ Disponível em <https://br.investing.com/commodities/carbon-emissions>

uma molécula de CH₄ é queimada em um gerador, CO₂ é produzido e liberado para a atmosfera. Assim sendo, para contabilizar mais precisamente um Crédito de Metano quando ele é queimado, deve-se descontar a quantidade de CO₂ liberada. Como o peso molecular do CH₄ é 16 e o do CO₂ é 44, a cada tonelada de metano queimada, 44/16=2,75 ton de CO₂ são liberadas na atmosfera. Logo, o potencial de efeito estufa reduzido com a queima de cada tonelada de metano é 27,9-2,75=25,15. Assim, usando-se esta equivalência prevista no Protocolo de Kyoto e a correção indicada acima, pode-se admitir, para fins de estimativa do potencial do mercado, o valor de 56,31x25,15= **R\$ 1.416,19** por tonelada de metano não emitida devido à queima. Ainda que as cotações do crédito de carbono possam oscilar substancialmente e a conversão em situação de mercado possa usar diferentes valores de equivalência ou interconversão, o valor-base para fins de comparação é bastante atraente.

No caso específico da atividade pecuária na Fazenda Penalva, é substancial a quantidade de metano que deixa de ser lançada na atmosfera devido à captura e queima no referido gerador. A quantidade pode ser medida diretamente⁸⁰ ou estimada através da conversão dos dados de MWh documentados, que é proporcional ao volume de metano/biogás/biometano queimado. O total de MWh produzidos na Fazenda Penalva pelo gerador a biogás no curto período analisado foi de 372,29 MWh. Usando como critérios a relação 2kWh/m³ de biogás (Coldebella *et al* 2006)⁸¹ e a densidade do biogás de 1,2039 kg/m³ (Zank *et al* 2020)⁸², o consumo total de biogás no período foi de 186.145 m³, o que equivale a 154,6 toneladas de metano não emitidas.

Considerando a não emissão de 154,6 toneladas de metano no período e a cotação de R\$ 1.416,19 por tonelada, o potencial de monetização dos Créditos de Metano na Fazenda Penalva é da ordem R\$ 218.942,97 no período (ou R\$ 2.085,17 por dia em média). Esse valor corresponde a adicionais 71,98% a 78,51% sobre o benefício com o gasto evitado com energia (aquele já calculado acima: entre R\$ 278.867,54 para bandeira verde e R\$

⁸⁰ A medição **direta** do metano consumido é factível no âmbito da Plataforma ThingsGo.Online e os preparativos para sua implementação estão em andamento no momento.

⁸¹ Dados de literatura (Coldebella *et al* 2006) indicam que 1 m³ de biogás equivale a 6,5 kWh de energia elétrica. Entretanto, quando se leva em conta a eficiência dos sistemas de cogeração (entre 30 e 38%) a conversão cai para 2,0 a 2,5 kWh/m³. Para evitar superestimar o potencial e para simplificar a avaliação, usamos 2,0 kWh/m³.

⁸² Por simplificação, considerou-se a densidade do biogás e do metano como a mesma e o trabalho de Zank *et al* (2020) traz uma série de outras informações interessantes.

304.164,65 para bandeira vermelha). Consequentemente, o potencial de valor adicionado, apenas em termos de monetização via CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®], é em torno de 75% adicionais sobre aquele montante decorrente da energia produzida.

Este grande potencial de monetização fica ainda mais aparente quando se considera o tamanho do mercado brasileiro de geradores a biogás/biometano. De um lado, a Fazenda Penalva é uma primeira referência real. De outro lado, os dados da ABIOGAS já indicados acima (38,9 milhões m³/dia na cadeia de proteína animal) sugerem um potencial de 32,4 mil toneladas de metano por dia. A Tabela 2.2 sumariza o potencial de monetização considerando os mesmos critérios.

Tabela 2.2: Potencial de monetização do mercado brasileiro de geradores de biogás/metano.

| Local/contexto | Potencial Diário de Créditos de Metano R\$ | Potencial Mensal de Créditos de Metano R\$ |
|---|---|---|
| Fazenda Penalva (com apenas um gerador; há outros na fazenda) | 2.085,17 | 62.555,13 |
| Cadeia de Proteína Animal (Brasil) | 67.559.546,26 | 2.026.786.387,88 |
| 1% da Cadeia de Proteína Animal | 675.595,46 | 20.267.863,87 |

Este caso é mais um exemplo de como a plataforma ThingsGo.Online está implementando na prática os conceitos de CONSERVOMETRIA e CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®]. A automação e a arquitetura da plataforma garantem que as medições de quantidades/métricas sejam documentadas, de forma automática, indelével e transparente, nos *hashs* das transações em *blockchain*. Portanto, a trilha de medição/documentação em tokens dispositivo e tokens de recompensa TGO (CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®]), para a subsequente negociação para emissão de Certificados GIVEBACK[®] - neste caso na forma de Créditos de Metano - é totalmente transparente, verificável e lastreada nas quantidades reais documentadas.

Conforme já demonstrado no item 2.3.2.4 acima, um adicional aspecto relevante da plataforma e seu conceito de economia circular é o desacoplamento espacial e temporal entre a tokenização dos CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®] e sua comercialização. No âmbito deste estudo de caso, o detentor destes créditos pode, portanto, aproveitar as oscilações do mercado em seu benefício – aproveitando a apreciação destes *ativos ambientais tokenizados*.

É relevante mencionar que, além do mercado privado de CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®] e Certificados GIVEBACK[®] na forma de Créditos de Metano, estes podem ou poderão ser monetizados ainda de outras formas. Exemplos incluem a monetização via reputacional/*naming rights* (conforme ilustrado na Fig. 2.3), a potencial aceitação, pelo Poder Judiciário destes créditos como forma de pagamento de débitos ambientais, ou ainda através da dedução de impostos, em conformidade com legislações ou projetos de lei que visam incentivar abordagens alinhadas à transição energética ou reduções de emissões de GEE.

Neste contexto, o Projeto de Lei 5174/23 (em análise na Câmara dos Deputados), por exemplo, visa instituir o Programa de Aceleração da Transição Energética (Paten)⁸³, que tem três objetivos: (i) fomentar o financiamento de projetos de desenvolvimento sustentável, especialmente aqueles relacionados a infraestrutura, pesquisa tecnológica e desenvolvimento de inovação tecnológica; (ii) aproximar as instituições financiadoras das empresas interessadas em desenvolver projetos de desenvolvimento sustentável; e (iii) permitir a utilização de créditos detidos pelas pessoas jurídicas de direito privado, junto à União, como instrumento de financiamento. O referido projeto de Lei prevê, também, a possibilidade de dedução de tributos condicionada ao investimento em desenvolvimento sustentável.

Iniciativas de legislação como esta terão como consequência, em caso de aprovação, a concretização de uma adicional forma de criar valor econômico - provendo significativo impulso ao uso do CONSERVÔMETRO[®], dos CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®] e Certificados GIVEBACK[®], bem como substancial incentivo à promoção de atitudes sustentáveis.

⁸³ Em 28Nov2023, foi aprovado um requerimento de urgência para votação do referido Projeto de Lei. Dados adicionais são disponíveis no link: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2399261>.

2.6. Conclusão do Capítulo 2

CONSERVÔMETRO[®], CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®] e GIVEBACK[®] são conceitos complementares entre si e empregam várias tecnologias para a implementação prática do conceito de CONSERVOMETRIA.

O autor partiu da premissa de que é inevitável o aumento da sensibilização ao tema sustentabilidade, mas ainda faltam mecanismos efetivos para prover *sustentabilidade econômica* às atividades de conservação ou recuperação ambiental. Por esta razão, concebeu os conceitos ora apresentados e decidiu desenvolver, em conjunto com parceiros, as tecnologias necessárias para implementá-las na prática, culminando na efetiva aplicação do conceito de CONSERVOMETRIA.

O CONSERVÔMETRO[®] tem relação com a medição e documentação precisa de métricas de conservação, empregando *hardwares* e *softwares* que viabilizam a *automação do processo de obtenção de métricas de conservação* e em muitos casos o monitoramento em tempo real. Essa abordagem não apenas minimiza a interferência humana e as correspondentes oportunidades de adulteração, como também proporciona a documentação de métricas que são muito úteis para a ciência ambiental em geral, pois servem para parametrizar projetos, estabelecer *benchmarks* que são disponibilizados publicamente, ou seja, proporciona referências para atividade de conservação – que muitas vezes carecem de métricas passíveis de comparação quantitativa.

Os CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®] e os GIVEBACK[®], ainda que também sejam implementados em tecnologia (*blockchain*), têm um propósito distinto que é de *criar valor* para as métricas de conservação. De um lado, tornar cada projeto ou atitude sustentável único por incluir a data, hora, local e quantidades, entre outros atributos, mediante documentação hígida e fidedigna, traz confiabilidade às métricas e isso incrementa seu valor, podendo ser usado em modelos de uso reputacional ou de compensação/pagamento através do Poder Judiciário. De outro lado, a criação de um ecossistema integrado (plataforma ThingsGo.Online) para a geração, documentação e negociação das métricas autenticadas de atividades de conservação ou recuperação ambiental traz estímulo econômico ao investimento nestas atividades. Por fim, também tende a criar valor o fato de que plataforma, com seu conceito de *economia circular*

digital, torna possível o desacoplamento entre o gerador dos CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®], que é quem efetivamente tem atitudes sustentáveis ou executa os projetos de conservação ou recuperação (independentemente de ser pessoa física ou jurídica), e o subseqüente detentor dos GIVEBACK[®], que em geral são terceiros que querem ou precisam documentar a compensação de seu *footprint* - e que conseqüentemente estão dispostos a pagar um determinado preço para tanto. Importante ressaltar, neste contexto, que embora muitos tenham assumido formalmente compromissos com a sustentabilidade, não são ainda disponíveis certificados de conservação hígidos em sua obtenção e precisos em suas quantidades e nem um *marketplace* onde ofertas e demandas possam ser ajustadas. A plataforma ThingsGo.Online proporciona esse desacoplamento geográfico e temporal e oportuniza um efetivo mercado inclusivo e transparente de conservação ambiental, trazendo *razão econômica* às atitudes sustentáveis.

Os exemplos práticos demonstrados neste capítulo evidenciam que o conceito de CONSERVOMETRIA pode ser aplicado a diferentes contextos, indústrias e ambientes. O conceito visa prover, concomitantemente: qualidade aos dados, viabilizar a automação de processos⁸⁴, e um meio de monetização de atitudes e projetos que impliquem em melhoria do meio ambiente. Conseqüentemente, a CONSERVOMETRIA pode ser considerada em variados processos industriais, instalações domésticas e ambientes a serem conservados/recuperados. O capítulo seguinte traz detalhes sobre a aplicação destes conceitos no contexto da conservação de águas interiores.

⁸⁴ Neste contexto, o autor e colaboradores também desenvolveram uma tecnologia para a *automação de processos de certificação* (Remer *et al* 2024), que é até o momento um dos gargalos para o mercado de créditos ambientais. Por exemplo, o nível da certificação interfere substancialmente no preço de créditos de carbono (a distinção entre o preço pago no mercado voluntário e mercado obrigatório segue essa lógica) e certamente também influenciará o preço de outros créditos ambientais.

CAPÍTULO 3: CONSERVOMETRIA em Águas Interiores

3.1. Resumo

Neste capítulo são abordadas questões específicas da CONSERVOMETRIA aplicada a águas interiores⁸⁵. É dada ênfase aos casos das lagunas – sendo mostrados resultados experimentais de um projeto de pesquisa conduzido na Laguna de Piratininga, Niterói/RJ e ao caso das *wetlands*⁸⁶ (incluindo as *constructed wetlands*), sobre as quais é apresentada uma extensa revisão de literatura.

Estudar e propor métricas de conservação para águas é um desafio de grande magnitude. O recorte temático para águas interiores se justifica porque estas são mais “íntimas” com os seres humanos devido à proximidade, serem utilizadas com maior intensidade, sofrerem maior impacto das ações antrópicas, e *por prestarem mais serviços*. Portanto, a conservação de águas interiores, e particularmente a definição de métricas correspondentes, deve levar em consideração múltiplos aspectos. Este capítulo busca trazer mais luz a este desafio.

Nos tópicos descritos a seguir, são abordados aspectos úteis à identificação, mensuração, documentação e análise de métricas - que podem ser usadas subsequentemente na formulação de estratégias de conservação ambiental de águas interiores e em modelos de captura de valor. Por exemplo, a capacidade captura de carbono de ambientes aquáticos contendo sedimentos (como é o caso de lagunas e *wetlands*, que são *hotspots* de *Blue Carbon*⁸⁷) é substancialmente maior do que a de florestas terrestres (Soares *et al* 2022) – mas este aspecto ainda não foi devidamente considerado ou aproveitado. Neste contexto,

⁸⁵ **Águas interiores**, segundo a Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar, incorporada na legislação brasileira através do Decreto 1530, de 1995, são águas no interior da linha de base do mar territorial, incluindo as lagunas, os mares completamente fechados, os lagos, lagoas, *wetlands* e os rios.

⁸⁶ *Wetlands* são às vezes traduzidas imprecisamente como “áreas úmidas”. No contexto do presente trabalho, é usada uma definição mais precisa e que corresponde mais adequadamente às funções biológicas ou ecossistêmicas: **Wetlands** são corpos d’água lênticos com baixa profundidade (<5m), maiores que 5 hectares e com percentual de vegetação emergente acima de 30% (Richardson *et al* 2022).

⁸⁷ *Blue Carbon* ou Carbono Azul é o carbono que é capturado da atmosfera e sequestrado em ambientes costeiros e marinhos, predominantemente ecossistemas vegetados como manguezais, pântanos salgados, prados de águas marinhas, lagunas e *wetlands* (Nellemann *et al* 2009).

e em acréscimo ao já detalhado no capítulo anterior, são feitas considerações sobre métricas aplicáveis a águas interiores e sua representatividade no conjunto dos impactos positivos que projetos de conservação podem proporcionar – incluindo a dimensão de sustentabilidade econômica de projetos de conservação ambiental.

3.2. Introdução

A Natureza oferece muitos benefícios para as pessoas, mas ainda é pouco aprofundado o conhecimento do impacto que mudanças em locais específicos podem acarretar sobre os serviços ecossistêmicos. Bradbury *et al* (2021) fizeram uma revisão dos trabalhos mais recentes sobre as estimativas e benefícios econômicos de atividades de conservação ou recuperação e mostraram dados de 62 diferentes locais. Os autores demonstraram que a monetização de serviços ecossistêmicos é importante para a sustentabilidade de projetos de conservação, e que a consideração de serviços adicionais pode ampliar ainda mais o balanço benéfico de tais atividades. Ao final, concluíram que atividades de conservação e recuperação ambiental proporcionam *prosperidade*.

Os benefícios da conservação da qualidade da água, em particular, foram analisados detalhadamente por Daigneault *et al* (2021), que estudaram o caso da bacia hidrográfica do Lago Sebago (Maine, EUA). Os autores propuseram um modelo para manter os sistemas de filtração natural da água da referida bacia, considerando diversos aspectos como o uso do solo, planejamento de conservação, estimativa de valor de serviços ecossistêmicos, seus custos e viabilidade de escalar a conservação do solo para toda a área da referida bacia. Os resultados mostraram a necessidade de manter 79% da bacia com florestas permanentes para assegurar a qualidade da água. Além disso, a análise dos benefícios econômicos da conservação indicou que cada dólar investido nos 25 anos subsequentes produz dez dólares em benefícios de serviços ecossistêmicos ou 2.150 dólares por ano por hectare (dada a área da referida bacia hidrográfica, isso significaria 90 milhões de dólares anuais de benefícios líquidos). Os autores também fizeram uma análise de sensibilidade nas taxas de desconto, custo de aquisição da terra, valores dos serviços ecossistêmicos e intensidade de desenvolvimento para avaliar os benefícios em diferentes cenários, e concluíram que os benefícios superam os custos em mais de 95% da área florestada e 99% das parcelas de alto impacto nessas áreas. Em resumo, os autores

justificam que há *business case* e viabilidade econômica em investir na conservação de florestas na maior parte da referida bacia hidrográfica – sendo a água um elemento central de valor.

Um ponto que chama a atenção positivamente nestes estudos, particularmente quando se considera a conservação da água, é o fato de serem considerados múltiplos aspectos distintos na avaliação dos benefícios. O presente trabalho busca trazer mais luz a este tipo de abordagem, acrescentando, como diferencial, a estratégia de identificação, mensuração, documentação e análise de métricas que podem ser usadas subsequentemente na formulação de estratégias de conservação ambiental e em modelos de captura de valor. O foco específico deste capítulo é a água, recurso natural dos mais relevantes e desafio interessante no que concerne à formulação de métricas devido aos seus múltiplos domínios de influência, efeitos e benefícios.

3.2.1. Água, o Grande Recurso Natural e Prestadora de Serviços

A água é considerada o maior recurso natural do planeta (Burlum 2017). Entretanto, por muito tempo, a gestão da qualidade da água foi uma subdisciplina da hidrologia, cujo objetivo é a determinação de parâmetros químicos (Resolução CONAMA 357/2005)⁸⁸. A relevância da hidrologia é indiscutível, mas o paradigma anterior está sendo substituído por uma visão mais ampla, que inclui aspectos sociais, políticos, de saúde, de preservação da biodiversidade e integridade de ecossistemas (Perry & Vanderklein 2009). Entretanto, ainda é escassa, em nosso País, literatura que ofereça, aos gestores e formuladores de políticas públicas, orientações abrangentes sobre a variedade de aspectos associados à gestão da água. Além da óbvia questão da degradação ambiental e seus efeitos, também é relevante aprofundar o conhecimento sobre aspectos biofísicos, sociais, econômicos, culturais etc., para que a visão sobre a relevância deste importante recurso natural não seja limitada às questões unicamente técnicas dos domínios da química, biologia e da engenharia.

⁸⁸ Disponível em (acesso em 25Mar2024): https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacao_corpos_agua_rtfcdaltrd_res_393_2007_397_2008_410_2009_430_2011.pdf

O conceito de serviços ecossistêmicos proporcionados pela água inclui os benefícios diretos e indiretos às pessoas, como uso doméstico, para irrigação, geração de energia, transporte etc. (Aylward *et al* 2005). No presente trabalho, serão analisados os casos peculiares das águas costeiras interiores, como lagunas e *wetlands* - ecossistemas que, além dos serviços já mencionados acima, também proporcionam benefícios culturais, recreacionais, cênicos, econômicos, entre outros, e que são fortemente impactados por atividades antrópicas.

Lagos e lagoas contêm substancial proporção da água doce disponível no planeta e representam uma fonte vital para uso humano, além de serem úteis para recreação, transporte, pesca e manutenção da vida selvagem e da biodiversidade (Perry & Vanderklein 2009). Uma característica das lagoas e lagos é que, em geral, seu volume de água é substancialmente maior do que o fluxo anual de entrada e saída, o que produz como consequência um perfil físico-químico peculiar como, por exemplo, a estratificação de temperaturas, densidades e concentrações de substâncias (oxigênio dissolvido, nutrientes etc). As suas dimensões são fundamentais para determinar a capacidade de assimilar poluentes, tanto devido ao efeito de diluição quanto ao tempo de residência. Além disso, nas lagoas e lagos o ambiente é propício ao crescimento de plantas, com microbiota bacteriana associada à rizosfera e de outros microrganismos como algas e protozoários, entre outros. Também é sabido que fenômenos sazonais (ventos fortes, chuva excessiva etc) podem provocar incremento na mistura ou redução da estratificação, o que tem consequências importantes na físico-química da água e na produtividade e diversidade biológica.

Características físico-químicas de lagoas também são em geral observadas em lagunas, que são peculiares por diversas razões, incluindo oscilações na salinidade e influência das marés, entre outros. As lagunas, frequentemente, são último destino das descargas orgânicas e outras formas de poluição antrópica antes de chegarem ao mar. Conseqüentemente, analisar as estratégias de gestão da qualidade deste tipo de sistema aquático é muito relevante. Neste contexto, é importante chamar atenção para o fato de que a forma como se conduz a gestão da água em geral é um reflexo do perfil cultural, econômico e político da respectiva sociedade. As diferentes abordagens em geral indicam *o valor mais relevante que se percebe* para o uso da água. Como as sociedades mudam

cada vez mais rápido, novos valores passam a influenciar as políticas e estratégias de gestão da água.

Um exemplo de gestão unidimensional da água: a história do Mar de Aral

O Mar de Aral foi o quarto maior lago do mundo, com 68.000 km² de superfície e 1.100 km³ de volume de água, localizado na Ásia Central, próximo ao Mar Cáspio, entre o Cazaquistão e o Uzbequistão (Fig. 3.1). Esse imenso lago secou rapidamente a partir dos anos 1960, após projetos soviéticos de irrigação terem desviado os rios (Amu Darya e Syr Darya) que o alimentam, em particular para irrigação de cultivos de algodão.

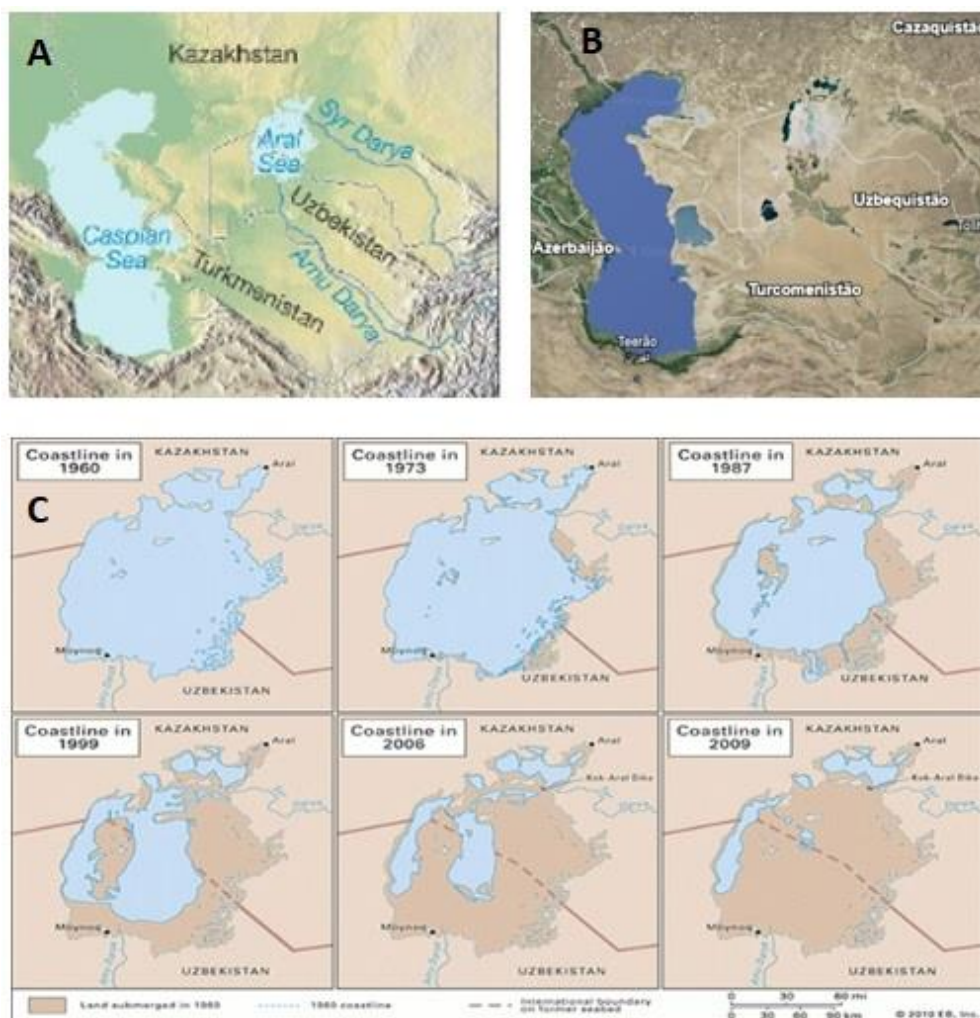


Figura 3.1 – Mar de Aral em diferentes momentos: A) antes de 1960; B) atualmente (Google Earth); C) evolução de sua linha costeira entre 1960-2009 (ESA - European Space Agency⁸⁹).

⁸⁹ Disponível em <https://earth.esa.int/web/earth-watching/image-of-the-week/content/-/article/the-changing-aral-sea> Acesso em 20Mar2024.

O impacto foi gigantesco, a ponto de atualmente a maior parte da região ser um imenso deserto (Fig. 3.2). O problema da *escassez* de água, associado a uma gestão inadequada de seu uso, conforme exemplificado no caso do Mar de Aral, pode parecer distante da realidade de muitas regiões do Brasil (mas claramente não de todas).



Figura 3.2 – Foto representativa de áreas desérticas no Mar de Aral (ESA).

Outro aspecto igualmente importante é a *qualidade* da água. Neste contexto, Aznar-Sánchez *et al* (2019) revisaram pesquisas relacionadas à deterioração de ecossistemas aquáticos, suas consequências e efeitos sobre serviços ecossistêmicos da água. Os autores concluíram que as interações entre diferentes tipos de ecossistemas devem ser estudadas sob o prisma da água, recomendando a integração de múltiplas disciplinas para se obter uma análise mais completa do conjunto de serviços que contribuem para a gestão sustentável de ecossistemas aquáticos.

Aylward *et al* (2005) descreveram em detalhes diversos aspectos e estratégias de gestão relacionados a serviços ecossistêmicos da água, incluindo mecanismos de incentivo econômico para a gestão de oferta e demanda. Neste contexto, os autores citam o exemplo de sistemas de *cap and trade* - que têm grande relação com a proposta deste trabalho.

O *cap and trade* é um mecanismo também usado no mercado de créditos de carbono, e consiste em limitar o uso do recurso (neste caso, a água) por meio da precificação e envolve três etapas: 1) determinar o limite de uso do recurso ou de poluição aceitável; 2)

a alocação de permissões de uso ou créditos de poluição e 3) o desenvolvimento de um mercado de trocas entre permissões ou créditos entre compradores e vendedores. Os aspectos-chave neste tipo de sistema são o método inicial de alocação de direitos e as regras de transferência.

O sistema *cap and trade* tem sido usado em diversos contextos:

- na gestão de águas subterrâneas, o sistema está em uso no Aquífero Edwards, no Texas, onde há um mercado ativo de créditos de água;
- em *wetlands* (*wetland mitigation banking*), mediante um sistema de crédito de criação, restauração ou melhoria de *wetlands*. Foi criado pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA) para proporcionar uma opção mais custo-efetiva para observar os regulamentos da Seção 404 do *Clean Water Act*;
- *Nutrient trading* ou parâmetros de qualidade da água, ou ainda limites de nutrientes presentes em corpos líquidos. Um exemplo é o *Connecticut Nitrogen Exchange Program*, que foi estabelecido para reduzir os níveis de hipóxia no Estuário de Long Island, associados aos lançamentos de nitrogênio na água. Devido ao sistema de créditos, a redução das emissões de nitrogênio atingiu 50% da meta prevista para 15 anos logo no primeiro ano. Sistema semelhante foi implantado na Austrália, na bacia de Murray-Darling para reduzir o nível de salinidade, usando créditos e débitos de salinidade.

Os conceitos de CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO[®] e CONSERVOMETRIA (descritos com mais detalhes nos capítulos anteriores), por serem mais abrangentes que cada um dos sistemas individuais listados acima, podem ser usados em qualquer destes casos - com a vantagem adicional de incluir uma lógica de higidez de documentação das métricas, o que é muito relevante para a credibilidade e o funcionamento de um sistema de incentivo econômico como este.

Os serviços ecossistêmicos da água no Brasil foram estudados por Valente *et al* (2021), que mostraram que o pagamento por serviços ecossistêmicos é uma ferramenta importante para promover o reflorestamento em bacias hidrográficas em zonas agrícolas. Também propuseram um modelo para suporte à tomada de decisão aplicável à região da Mata Atlântica que é baseado em múltiplas métricas, incluindo: proximidade à fonte de água, inclinação do terreno, taxa de erosão do solo, índices topográficos, porcentual de uso e cobertura da terra. As autoras concluíram que o modelo é aplicável a pequenas

bacias hidrográficas e proporciona importantes informações para a priorização de áreas de reflorestamento para melhoria da qualidade da água e seus serviços ecossistêmicos. Portanto, o modelo pode ser usado para promover melhores pagamentos de sistemas de serviços ecossistêmicos em áreas agrícolas em geral.

O caso específico das águas interiores⁹⁰, como as lagoas e as *wetlands*, têm muitas particularidades por serem áreas de grande importância cultural, recreacional, hídrica e ecológica. São também áreas de elevada produtividade biológica, nas quais acontecem variados fenômenos biogeoquímicos de impacto planetário. Enquanto as lagoas se distinguem das lagoas por terem conexão com o Mar, o que implica em fluxo entre os dois sistemas (o mar e a lagoa, com frequente oscilação no sentido do fluxo), as *wetlands* são corpos d'água lênticos, com baixa profundidade (<5m), baixo fluxo de água (predominantemente unidirecional), área maior que 5 hectares e porcentual de vegetação emergente acima de 30% (Richardson *et al* 2022).

3.2.2. Biogeoquímica, Produtividade Biológica e Consórcios Microbianos

É de conhecimento comum que ambientes aquáticos são muito favoráveis ao desenvolvimento de formas de vida. Diversidade biológica e especialmente *produtividade primária* são diretamente influenciadas pela disponibilidade de oxigênio dissolvido na água (Breitburg *et al* 2018). Produtividade biológica, na definição de Coleman & Rubinstein (2019), é a quantidade e taxa de produção que ocorre em um dado ecossistema em um determinado período. O conceito é aplicável tanto a um organismo individual, a uma população ou comunidades de organismos/ecossistemas, sendo expresso em termos de matéria seca produzida por área por tempo.

O aumento das concentrações de carga orgânica em águas costeiras tem mudado a biogeoquímica e aumentado a demanda por oxigênio nesses sistemas (Breitburg *et al* 2018). As consequências incluem, em especial, a mudança na capacidade de ciclagem da matéria orgânica e na disponibilidade nutrientes essenciais, resultando na diminuição das concentrações de oxigênio dissolvido na coluna d'água e, em consequência, uma menor

⁹⁰ Águas interiores são águas no interior da linha de base do mar territorial, incluindo as lagoas, os mares completamente fechados, os lagos, as lagoas, as *wetlands* e os rios – definição dada pela Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar, incorporada na legislação brasileira através do Decreto 1530, de 1995.

produtividade primária e redução na biodiversidade dos ambientes aquáticos. O fenômeno da hipóxia (ou reduzida concentração de oxigênio dissolvido na água) em águas costeiras tem relação direta com a densidade populacional, vinculado à elevada carga orgânica despejada nas águas em decorrência de atividades antrópicas, intensificado pela ausência de tratamento adequado de esgoto doméstico e causando impactos profundos na biogeoquímica de sistemas aquáticos (Fig. 3.3).

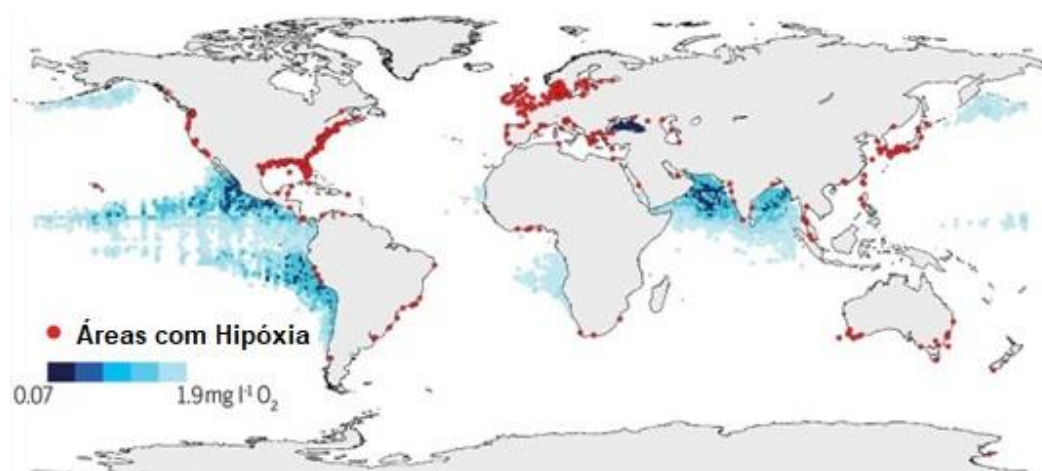


Figura 3.3 - Águas costeiras onde a hipóxia é observada (adaptado de Breitburg *et al* 2018).

A premissa de que o problema observado nas zonas costeiras interiores é ainda mais grave e complexo que nas zonas costeiras oceânicas motivou a ênfase deste capítulo em sistemas estuarinos e lagunares, incluindo especialmente lagunas e *wetlands*. O autor espera que a despeito desse recorte temático (e talvez justamente por isso, devido à sua maior complexidade), muitos dos princípios considerados e conclusões obtidas neste trabalho possam ser, com as devidas adaptações, extrapolados para outros sistemas aquáticos/hídricos.

O fenômeno da baixa concentração de oxigênio dissolvido na água (hipóxia) ou sua ausência (anóxia) tem impactos profundos na biogeoquímica de sistemas aquáticos (Breitburg *et al* 2018; Crapez *et al* 2022). É interessante observar que, embora seja crescente a conscientização sobre a importância da biodiversidade, o público em geral dá mais atenção às espécies visíveis (plantas, animais etc), que são um ramo minúsculo na árvore da vida, e desconhece que as bactérias são vastamente mais numerosas em espécies

e em quantidade, englobando praticamente toda a diversidade genética existente no planeta (Crapez & Krepsky 2021).

Assim sendo, as bactérias e outros microrganismos são quantitativamente, qualitativamente e cineticamente (devido à sua rápida resposta, ciclos de crescimento muito curtos e exponenciais) os principais organismos responsáveis pela maioria dos processos metabólicos desempenhados nos ciclos biogeoquímicos importantes na biosfera, particularmente na ciclagem, biotransformação de matéria orgânica, metais e minerais, intemperismo e formação de solo e sedimentos (Crapez & Krepsky 2021). Significa dizer que a produtividade biológica é *essencialmente microbiana*. As bactérias utilizam carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre para sintetizar material celular, bem como ferro, manganês, cobalto, zinco e molibdênio como cofatores de enzimas. São, portanto, cruciais para o bom funcionamento de ecossistemas aquáticos.

A compreensão dos ciclos biogeoquímicos é muito importante para uma mais abrangente avaliação de projetos de conservação ou recuperação ambiental (Aznar-Sánchez *et al* 2019), e também no contexto mais amplo de trocas de massa no planeta (Whiting & Chanton 2003). No presente capítulo, é dada ênfase às substâncias em fase gasosa (dissolvidas no líquido ou na forma livre, que podem ser absorvidas da ou emitidas para a atmosfera, como gás carbônico (CO₂) ou metano (CH₄), entre outros) e às substâncias recalcitrantes, que não são facilmente consumidas/degradadas pelos microrganismos. Neste contexto, os ciclos biogeoquímicos são muito relacionados com os microrganismos atuantes, podendo também ser categorizados de acordo com a disponibilidade de fonte de carbono (Fig. 3.4).

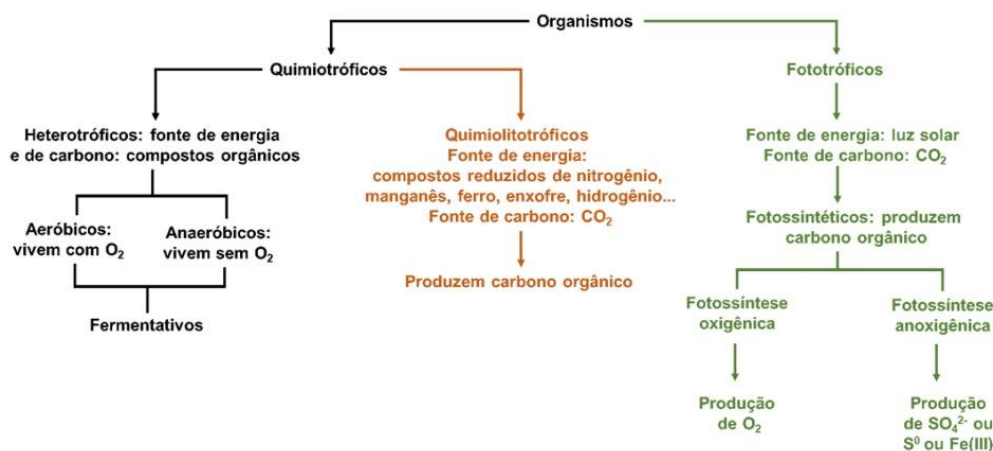


Figura 3.4 - Categorização dos microrganismos de acordo com as fontes de carbono (Crapez & Krepsky 2021).

Os fenômenos biogeoquímicos ocorrem em paralelo (Fig. 3.4), com transformações metabólicas envolvendo gases e líquidos, concomitantemente. Tais transformações ocorrem em maior ou menor grau de acordo com as condições ambientais e a diversidade biológica em cada nicho específico.

Em sistemas aquáticos, os microrganismos anaeróbicos em geral predominam junto aos sedimentos, enquanto os aeróbicos predominam junto à superfície ou na rizosfera de plantas (que fornecem o oxigênio). Quando vivem em presença de oxigênio, são conhecidos como heterótrofos aeróbicos e, na ausência, heterótrofos anaeróbicos. Aqueles que produzem oxigênio ou enxofre/ferro oxidados são os microrganismos fototróficos (Crapez & Krepsky 2021). A disponibilidade de oxigênio dissolvido na água é um fator limitante e determina não só as vias metabólicas utilizadas, mas também a riqueza relativa de organismos e a produtividade biológica. Isso decorre, em grande parte, da baixa solubilidade do oxigênio na água – que é 39,3 vezes inferior à solubilidade do CO₂, em temperatura ambiente e pressão atmosférica; o CH₄ é ainda menos solúvel em água que o oxigênio (Kaye & Laby 1986). A baixa solubilidade do oxigênio é um fator limitante da produtividade, uma vez que na presença de grande quantidade de nutrientes seu consumo pelo metabolismo microbiano é muito rápido e superior à taxa de dissolução natural, causando depleção (Crapez & Krepsky 2021).

Na ausência ou baixa disponibilidade de oxigênio dissolvido na água, outras rotas metabólicas e outros organismos tendem a predominar. A degradação anaeróbica da matéria orgânica envolve cadeias alimentares microbianas complexas, começando com a hidrólise de biopolímeros por enzimas extracelulares e formação de moléculas orgânicas para produção de ATP (adenosina trifosfato). As bactérias fermentativas podem viver na presença ou ausência de oxigênio dissolvido (sendo denominadas, portanto, de facultativas) e produzem ATP, biomassa, ácidos graxos voláteis (ácido fórmico, acetato, propionato, butirato), H₂ e CO₂. Os produtos da fermentação, como os ácidos graxos voláteis, são usados como fonte de carbono e de energia pelas bactérias anaeróbicas sulfato-redutoras, para produção de ATP e biomassa. Elas também utilizam o sulfato como fonte de energia e devolvem os sulfetos para o ambiente, que são utilizados pelas bactérias fotossintéticas anoxigênicas, reforçando o sinergismo existente entre os ciclos biogeoquímicos. Entretanto, quando não há disponibilidade de sulfato, a degradação da

matéria orgânica fica a cargo das metanogênicas, que possuem espectro mais restrito, pois só utilizam H_2 , CO_2 e acetato para produção de CH_4 .

O CH_4 , um gás com potente efeito estufa já mencionado no capítulo 2, é produzido em sedimentos anóxicos por Archeas metanogênicas. Entretanto, cerca de 90% do metano produzido é oxidado por via anaeróbica dependente de sulfato (quando este é disponível), através de um consórcio microbiano formado por Archeas e bactérias redutoras de sulfato (Wallenius *et al* 2021). Assim, algumas premissas sobre o equilíbrio e influência dos gases podem ser inferidas em sistemas aquáticos: (i) excesso de matéria orgânica leva à diminuição da concentração de oxigênio dissolvido na água (Fig. 3.3); (ii) criando nichos metabólicos para microrganismos fermentativos e anaeróbicos; (iii) dependendo do grau de hipóxia, aumenta-se a produção de CH_4 ; (iv) que poderá ser utilizado como fonte de carbono, a depender da disponibilidade de enxofre produzido e/ou emitido à atmosfera.

Os sistemas aquáticos costeiros interiores são responsáveis pela maior parte das emissões de marinhas de metano e em geral têm baixas concentrações de sulfato, de forma que a oxidação dependente de sulfato é menos relevante em tais condições (Wallenius *et al* 2021). Entretanto, existem outros aceptores de elétrons, tais como óxidos metálicos ou nitrato, cuja disponibilidade é determinada pelo zoneamento redox no sedimento – que por sua vez depende do regime de aeração e tipo/quantidade de carga orgânica que chega ao sistema. Fatores como a eutrofização também podem afetar esta dinâmica, por alterar os consórcios microbianos, o zoneamento biogeoquímico e a ciclagem de metano nos sedimentos (Ni *et al* 2022; Zhu *et al* 2022).

A entrada de matéria orgânica é fator preponderante no aumento da estratificação da disponibilidade de oxigênio dissolvido ao longo da coluna d'água nestes sistemas, bem como da hipóxia nas águas mais profundas, o que favorece a metanogênese. São conhecidos alguns microrganismos metanotróficos como *Methylomirabilota* sp. associados às vias de oxidação do metano que são capazes de gerar oxigênio intracelular a partir do óxido nítrico (Zhu *et al* 2022). Conseqüentemente, a oxidação do metano é muito susceptível a estas dinâmicas, podendo variar substancialmente e depende de interrelações com outros ciclos biogeoquímicos. Ainda há muito a ser compreendido, notadamente sobre os fatores que controlam estes processos.

Os exemplos citados até aqui evidenciam que pode haver sinergismo metabólico entre os ciclos biogeoquímicos, que são predominantemente determinados pelos consórcios microbianos nos ambientes aquáticos. Os consórcios microbianos podem ser definidos como dois ou mais grupos bacterianos ou microbianos que vivem simbioticamente e podem ser endossimbióticos, mesossimbióticos ou ectossimbióticos⁹¹, ou ocasionalmente ambos. As evidências de simbiose entre microrganismos sugerem fortemente que estes foram precursores da evolução das plantas terrestres e da sua transição das comunidades do mar para a terra, sendo conhecido que os consórcios microbianos são afetados pelas plantas e por diversos outros fatores (Fig. 3.5).

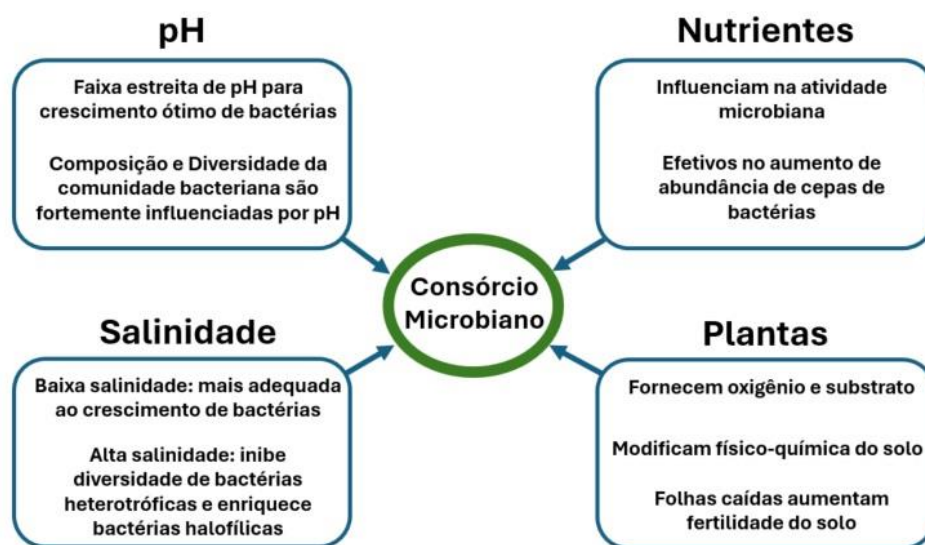


Figura 3.5 - Fatores que afetam o equilíbrio de consórcios microbianos (adaptado de Liang *et al* 2023)

Nos consórcios biológicos, múltiplas espécies podem realizar uma variedade de tarefas em um ecossistema, como a rizosfera das plantas. Os mecanismos benéficos de estimulação do crescimento das plantas incluem maior disponibilidade de nutrientes, modulação de fito-hormônios, biocontrole, tolerância ao estresse biótico e abiótico exercidos por diferentes atores microbianos na rizosfera, como bactérias promotoras de

⁹¹ O termo Endossimbiótico é usado para denotar a relação ecológica que ocorre quando organismo vive dentro de outro (dentro de células, mais especificamente); e o termo Ectossimbiótico é usado para denotar a relação ecológica que ocorre quando organismo vive na superfície de outro, como é o caso de vários microrganismos presentes na rizosfera das plantas. Há também o caso superfícies internas (cavidades), como o revestimento do intestino, onde ocorre a chamada de *mesossimbiose* (exemplos incluem microbiota intestinal, microbiota oral). O conceito de *consórcio* foi usado pela primeira vez por Johannes Reinke em 1872, e em 1877 o termo simbiose foi introduzido e posteriormente ampliado.

Outra abordagem para a remoção de fósforo não-reativo de águas residuárias foi descrita por Venkiteshwaran *et al* (2021), que investigaram um processo de oxidação avançada (AOP) de UV/H₂O₂ para converter fósforo não-reativo na forma de fósforo reativo solúvel ou ortofosfato, mais facilmente removível/recuperável. Por outro lado, no contexto de corpos líquidos como lagoas, lagunas etc., uma abordagem conhecida para o fósforo é a imobilização no fundo do leito com o uso de Phoslock®, um produto que imobiliza fisicamente o fósforo em uma argila ionicamente modificada contendo lantânio⁹². Entretanto, nenhuma de tais abordagens viabiliza a efetiva ciclagem do fósforo, sendo focadas em processos de remoção ou imobilização.

Lipídios também são considerados moléculas recalcitrantes porque as suas taxas de degradação nos sedimentos de lagos e lagunas são muito baixas, as quantidades destas biomoléculas sendo controladas principalmente pela degradação microbiana pós-deposição ao longo das escalas de tempo da ordem de séculos (Han *et al* 2022). Portanto, como lipídios são muito mais estáveis em comparação com outras biomoléculas (por exemplo, carboidratos, proteínas e DNA) estes são usados como biomarcadores para investigar a coevolução da vida e da Terra (Summons *et al* 2022).

Conforme será detalhado no item 3.3.2 deste capítulo, resultados surpreendentes de ciclagem do fósforo e de lipídios foram obtidos com uma abordagem de biodragagem, neste caso usando microrganismos e aeração, sendo objeto de uma publicação à parte (Remer *et al* 2024, redigido e em fase de submissão). Conseqüentemente, uma melhor compreensão sobre a dinâmica populacional dos microrganismos nos sistemas aquáticos pode trazer mais luz sobre múltiplos aspectos importantes na biogeoquímica de tais sistemas, incluindo a ciclagem de cargas orgânicas, poluentes e emissão de gases e, eventualmente, uma nova percepção sobre as substâncias recalcitrantes.

As técnicas convencionais de análise de microrganismos ou Microbiologia Clássica, em geral, utilizam a amostragem e cultivo, opcionalmente isolando espécies para sua subsequente identificação. Entretanto, em amostras ambientais, a diversidade e quantidade de microrganismos é tão grande que as técnicas convencionais de cultivo são até mesmo inviáveis, uma vez que certos tipos de microrganismos somente crescem em

⁹² E que por esta e outras razões tem sido objeto de fortes críticas quanto ao uso em ecossistemas aquáticos.

comunidades e/ou não são passíveis de cultivo em laboratório. Uma alternativa para este tipo de problema é a metagenômica, uma potente ferramenta para produzir informações importantes neste contexto.

3.2.3. Metagenômica ou *Environmental Genomics*

A metagenômica⁹³ também pode, dependendo do contexto, ser denominada de “genômica ambiental” ou “ecogenômica” e envolve o sequenciamento de ácidos nucleicos dos organismos presentes em uma dada amostra, de forma quantitativa. Usualmente, o ácido nucléico sequenciado é o gene que codifica uma parte do RNA ribossomal chamada de 16S rRNA, presente em quase todos os organismos⁹⁴ (Fig. 3.7).

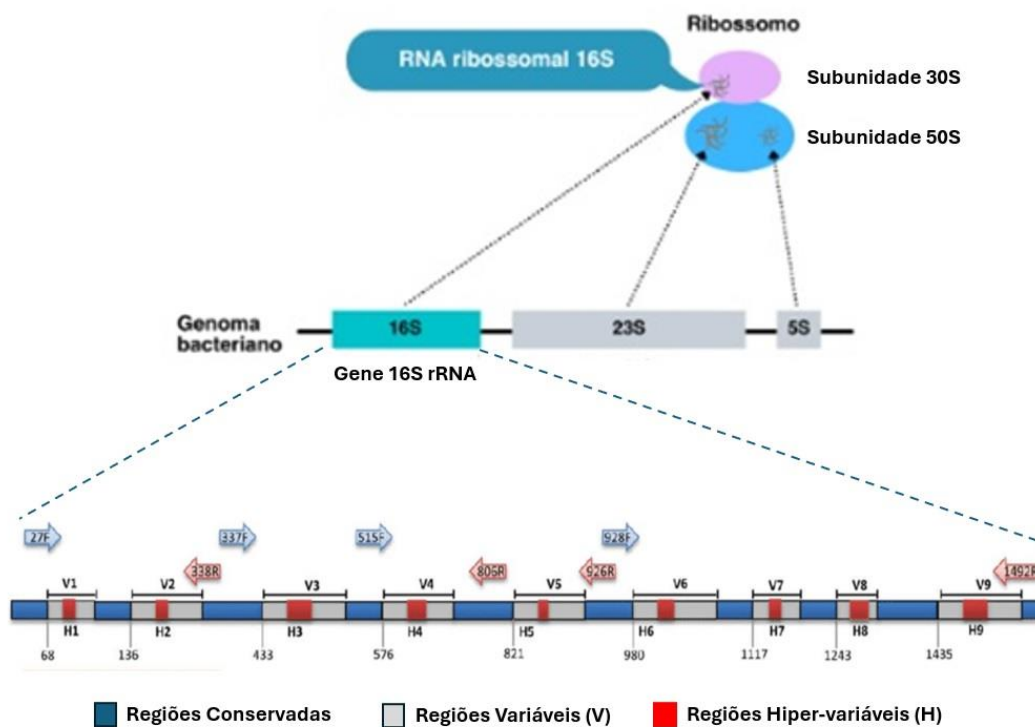


Figura 3.7 – Representação esquemática da estrutura da região 16S rRNA (adaptado de Fukuda *et al* 2016).

⁹³ A designação Metagenômica foi usada pela primeira vez por Handelsman *et al* (1998), por se referir à ideia de que coleções de genes de diferentes organismos poderiam ser sequenciadas paralelamente. Tem alguma analogia ao sequenciamento de um genoma individual, porém a diferença é que neste caso todos os genes de um só organismo são sequenciados, enquanto na metagenômica um ou alguns genes comuns a vários organismos são sequenciados concomitantemente, provendo o perfil e a quantidade relativa entre os organismos em questão.

⁹⁴ Como é o caso de procaríotos e eucaríotos como bactérias e fungos. No caso de vírus ou fagos, outras sequências de ácido nucléico podem ser utilizadas.

O gene da região chamada de 16S rRNA tem múltiplas regiões conservadas, regiões variáveis e regiões hiper-variáveis, e por esta razão sua análise por sequenciamento é muito útil para fins de identificação, filogenia etc. A análise metagenômica a partir do sequenciamento de 16S rRNA proporciona um perfil detalhado das comunidades biológicas de uma dada amostra, sendo útil tanto para a identificação quanto para a indicar suas proporções relativas. Exemplos incluem a metagenômica de microrganismos da flora intestinal, de microrganismos de estações de tratamento de efluentes, de amostras de solo em áreas de cultivo agrícola e, como é mais ligado ao tema do presente trabalho, de amostras ambientais em geral ou ainda mais especificamente de lagunas ou *wetlands* (Wang J *et al* 2022; Shiau & Chang 2022).

Uma boa avaliação de diferentes abordagens de estudos metagenômicos em sistemas aquáticos é disponível no trabalho de Rieder *et al* (2023), que estudaram as comunidades microbianas em sistemas de aquicultura recirculantes. Os autores compararam diferentes tipos de sequenciamento (3 tipos de sequenciamento de amplicon curto 16S, sequenciamento de amplicon de leitura longa PacBio e metagenômica *shotgun* livre de amplificação) para a caracterização de consórcios microbianos. Os resultados mostraram que a escolha do iniciador 16S e o comprimento do amplicon afetam alguns valores (por exemplo, medidas de diversidade, número de táxons atribuídos ou distinção de *amplicon sequence variants*, ASVs), mas não têm impacto nos padrões espaço-temporais entre tipos de amostras, locais e pontos de coleta ao longo do tempo. Isto implica que as abordagens 16S rRNA são em geral adequadas para estudos de consórcios microbianos. Os amplicons de leitura longa tiveram desempenho inferior em relação à resolução quantitativa de padrões espaço-temporais, mas foram adequados para identificar serviços funcionais, por exemplo, ciclo de nitrificação e detecção de patógenos. A metagenômica *shotgun*, por outro lado, também é útil por permitir englobar fungos, vírus e bacteriófagos, abrindo caminhos para explorar interações entre diferentes domínios de organismos ou entidades biológicas⁹⁵. Todos os conjuntos de dados de sequenciamento foram concordantes no que se refere aos principais microrganismos procarióticos, como *Actinobacteriota*, *Bacteroidota*, *Nitrospirota* e *Proteobacteria*. Em resumo, as diferentes abordagens de sequenciamento produzem resultados sobrepostos e altamente

⁹⁵ Vírus e bacteriófagos não são propriamente “organismos”, pois não preenchem os requisitos para esta definição. Para eles, o termo mais adequado é “entidade biológica”.

complementares, com cada uma contribuindo com dados únicos que podem não ser obtidos com as outras abordagens.

Um exemplo de análise metagenômica ou *Environmental Genomics* aplicada à obtenção do perfil de microrganismos de *wetlands* construídas é descrito no trabalho de Zhang *et al* (2022), que buscaram identificar quais organismos são mais eficazes para degradar os poluentes aromáticos, típicos de resíduos de refinarias de petróleo e indústrias petroquímicas. A análise metagenômica ilustrada na Fig. 3.8 mostra os perfis de abundância relativa de microrganismos em diferentes locais (incluindo especialmente os da rizosfera das plantas) de uma *wetland* construída, com ou sem a adição de óxido de manganês. A análise proporciona informações valiosas para viabilizar a identificação de quais microrganismos específicos são responsáveis pela degradação de compostos aromáticos.

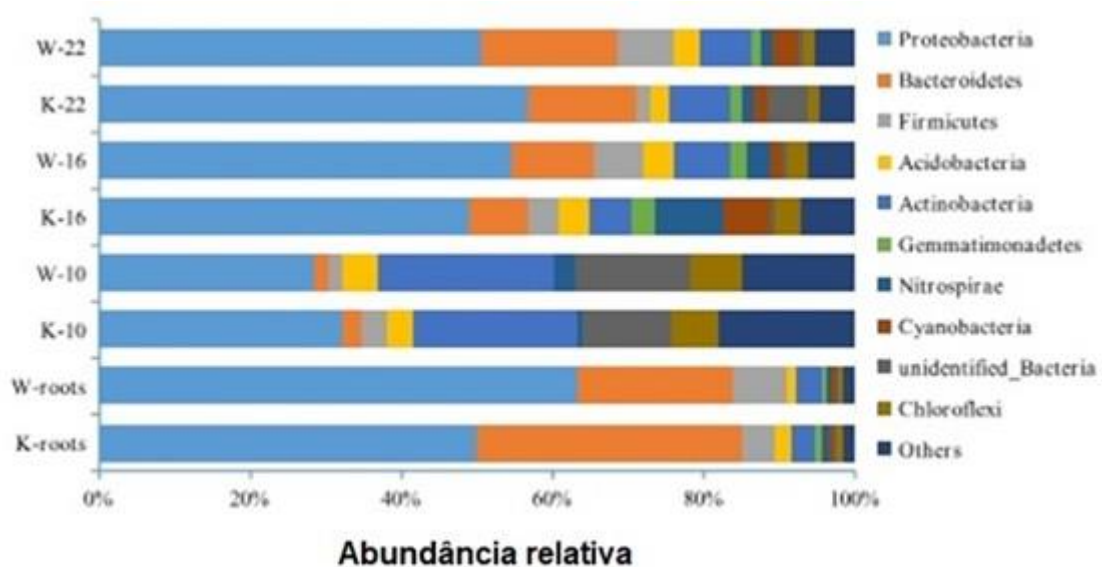


Figura 3.8 – Distribuição dos principais filos de bactérias na superfície da raiz, com (W) ou sem (K) a adição de óxido de manganês para auxiliar na degradação de derivados de petróleo em amostras de diferentes regiões de uma *wetland* (adaptado de Zhang *et al* 2022).

3.3. Ambientes Aquáticos Interiores

Águas interiores, segundo a Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar, incorporada na legislação brasileira através do Decreto 1530, de 1995, são águas no interior da linha de base do mar territorial, incluindo as lagoas, os mares completamente fechados, os lagos, lagoas, *wetlands* e os rios.

Em lagoas e em *wetlands*, foco de estudo do presente trabalho, a presença de plantas aquáticas/macrófitas é comum, incluindo, por exemplo, *Phragmites australis*, *Typha latifolia*, *Cyperus giganteus*, *Spartina alterniflora* (Fig. 3.9).



Phragmites australis (caniço)



Typha latifolia (taboa)



Cyperus giganteus (papiro)



Spartina alterniflora (capim marinho)

Figura 3.9 – Exemplos de plantas típicas de águas interiores.

A proporção entre Carbono (C) e Nitrogênio (N) na água dos ambientes costeiros e, particularmente nas águas interiores, é relevante, i.e., quando a relação C:N é em torno de 30, a vegetação necessita pequena quantidade de N para fixar bastante C (Bowen *et al* 2020). A avaliação de quanto de biomassa é capturada na região acima do solo e também abaixo do solo é outro fator importante para compreender a biogeoquímica e sua dinâmica

em ambientes aquáticos. Neste contexto, referidos autores estudaram como ocorre o enriquecimento de variadas espécies reativas de nitrogênio em ambientes aquáticos e indicaram que a maior parte do N derivado de atividades antropogênicas despejado em regiões costeiras está na forma oxidada de nitrato (NO_3^-). Bowen *et al* (2020) demonstraram que os microrganismos podem acessar o NO_3^- disponível e usá-lo como aceptor de elétrons na respiração usando matéria orgânica, que de outra forma seria armazenada. Também analisaram o balanço de massa do nitrogênio usando formas isotópicas de NO_3^- (^{15}N) no Capim-marinho (*Spartina alterniflora*, uma planta herbácea, perene halófila, presente em habitats lacustres, lagunares, pântanos e zonas costeiras) e em microalgas: a conclusão foi de que o N é rapidamente metabolizado por microalgas e lentamente pela *Spartina*.

Nas plantas em geral e nas que habitam ambientes aquáticos, existe um consórcio microbiano que é adaptado às condições locais. Neste contexto, é importante descrever alguns detalhes sobre a rizosfera (região entre o tecido vascular interno das raízes das plantas e o solo) e suas subpartes (Fig. 3.10), pois os consórcios microbianos podem ser mais afeitos a cada uma dessas partes.

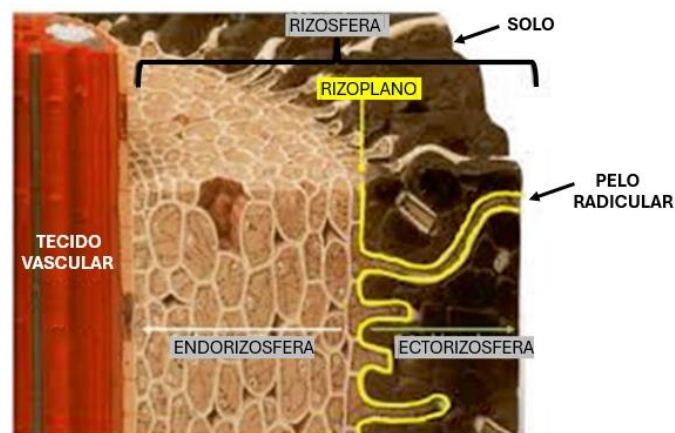


Figura 3.10 – Rizosfera e seus componentes (adaptado de Bashir *et al* 2016).

O conhecimento sobre a importância dos consórcios microbianos da rizosfera de plantas presentes em lagunas e *wetlands* aumentou consideravelmente com a recente descoberta de que tais consórcios efetivamente modificam a capacidade de adaptação das plantas no ambiente e aos diferentes climas, ajudando a remover poluentes (Wang Y *et al* 2023). Além disso, sabe-se que a oscilação das condições hidrodinâmicas leva a alterações

complexas no ambiente microbiano e da rizosfera, sendo de particular relevância no contexto de locais que recebem cargas orgânicas substanciais e variadas, como por exemplo é o caso da Laguna de Piratininga, Niterói/RJ e dos rios que nela deságuam (discutida em mais detalhes no item 3.3.2 deste capítulo). Interessante notar, neste contexto, que o trabalho de Wang Y *et al* (2023) mostra que o foco dos estudos mais recentes neste tipo de sistemas aquáticos mudou do conceito de geral biorremediação ou de remoção de nutrientes para a avaliação de composição do consórcio microbiano na rizosfera – sendo sugerido que deve ser dada mais atenção às funções ecológicas dos consórcios microbianos na rizosfera para proporcionar novos indicadores da avaliação das funções ecossistêmicas das *wetlands*.

Distinção entre Lagoas e *Wetlands*

A categorização de corpos d'água de acordo com características físicas e biológicas facilita as generalizações e a comunicação, mas não corresponde às funções biológicas ou ecossistêmicas. Corpos d'água lênticos (águas paradas ou de baixo fluxo), por exemplo, têm sido categorizados como *wetlands* ou lagoas de acordo com tamanho, profundidade, estado trófico ou regime de mistura. Neste contexto, Richardson *et al* (2022) estudaram as variadas categorizações da literatura e propuseram uma categorização funcional entre *wetlands* e diferentes tipos lagoas, comparando métricas ecossistêmicas existentes como metabolismo, concentração de nutrientes e fluxo de gases e propuseram uma harmonização de linguagem para mais adequadamente definir estes tipos de ecossistemas aquáticos (Fig. 3.11).

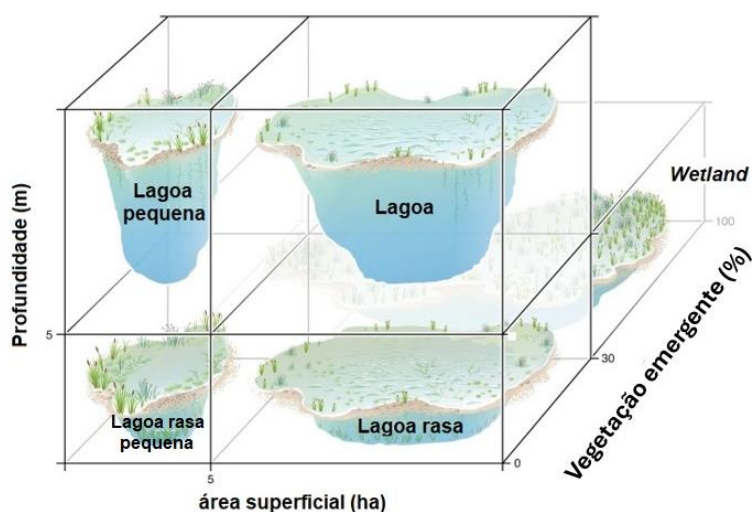


Figura 3.11 – Proposta de categorização de diferentes corpos d'água (adaptado de Richardson *et al* 2022).

Portanto, segundo a definição de Richardson *et al* (2022), *wetlands* são corpos d'água lânticos com baixa profundidade (<5m), maiores que 5 hectares e com porcentual de vegetação emergente acima de 30%.

3.3.1. Lagunas

O Brasil tem muitas lagunas no Nordeste, no Sul e no Sudeste, notadamente em Alagoas, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e Rio de Janeiro, respectivamente. O Estado do Rio de Janeiro tem litoral com geomorfologia peculiar e contempla grande quantidade de lagunas (Fig. 3.12).

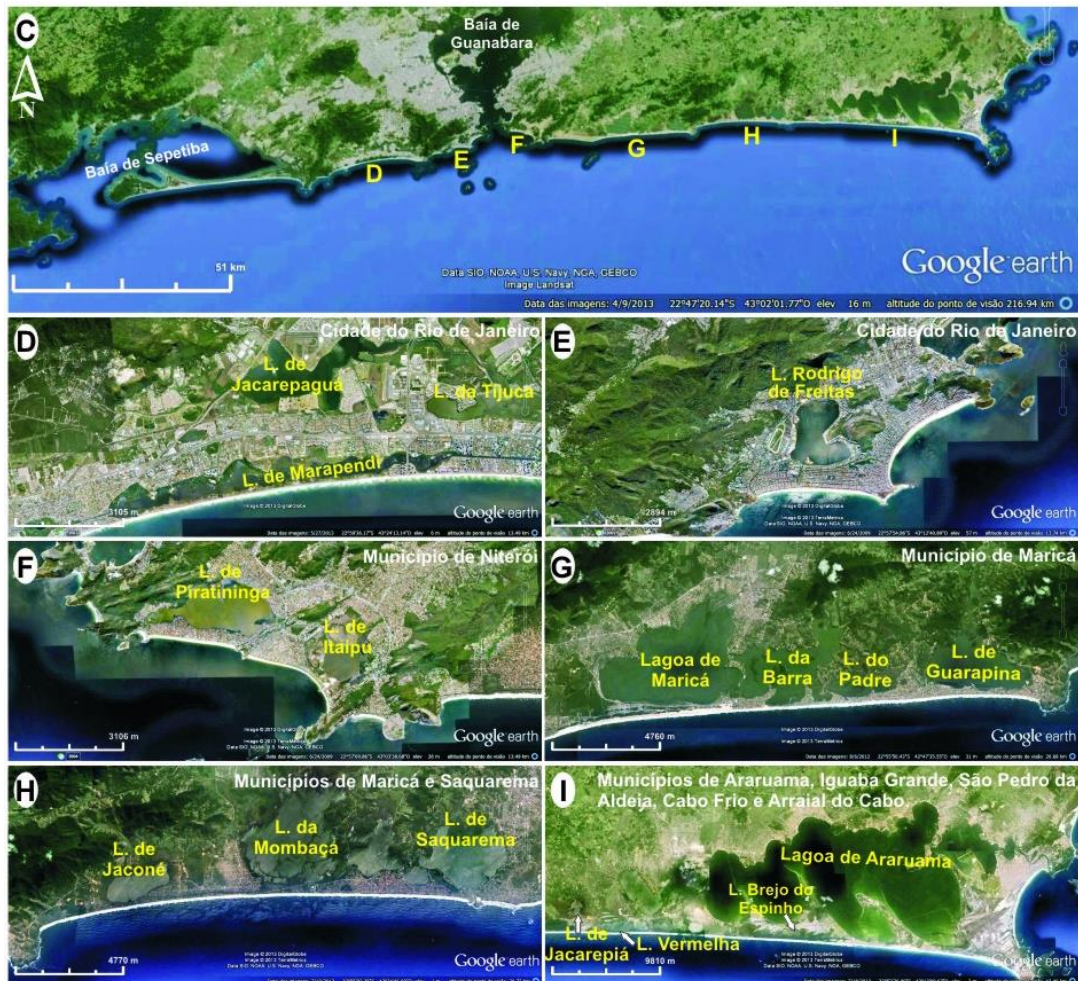


Figura 3.12 – Lagunas do Estado do Rio de Janeiro (adaptado de Silvestre & Silva 2016).

A Laguna de Araruama (Fig. 3.12 I) é uma das maiores lagunas costeiras hipersalinas no mundo, sendo um exemplo de laguna com características peculiares. Ela apresenta

concentrações de alcalinidade total e de carbono inorgânico dissolvido maiores que as da água do mar que a alimenta, devido à evaporação (Cotovicz *et al* 2021). Tais autores estudaram a química do carbonato na referida laguna, concluindo que ocorrem ações simultâneas e antagônicas da precipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3) e do metabolismo autotrófico nos fluxos de CO_2 , o que pode indicar as possíveis condições futuras de outros ecossistemas costeiros.

Sistemas lagunares respondem às variações nas condições tróficas, sendo conhecido que as taxas de mobilização do nitrogênio no sedimento de tais ambientes aquáticos variam. Baumann *et al* (2022) estudaram aspectos biogeoquímicos e microbiológicos de lagos eutróficos e oligotróficos, visando compreender as taxas de remoção de Nitrogênio (N) em sedimentos de sistemas lagunares. Neste contexto, investigaram quais genes metabolizam ou transformam nitrogênio através de uma abordagem de metagenômica em escala temporal e espacial. Os resultados indicaram que, no sedimento, os consórcios microbianos, bem como as concentrações de nutrientes, são muito distintos, sendo observada mais pronunciada variabilidade espacial do que temporal/sazonal.

Consequentemente, uma melhor compreensão da dinâmica da biogeoquímica em sistemas lagunares ou estuarinos depende da identificação de padrões de produtividade, poluição por nutrientes e relações entre variáveis biológicas e físico-químicas nas escalas local e global. Watson *et al* (2022) estudaram estes aspectos com uma abordagem pouco utilizada em sistemas lagunares: a determinação de isótopos de carbono (^{13}C), de nitrogênio (^{15}N) e de enxofre (^{34}S) para avaliação espacial da biota, matéria orgânica particulada em sedimentos de um sistema lagunar. O estudo foi conduzido na Bahía San Quintín (Baja California, México), uma laguna heterotrófica dominada por ervas marinhas. Alguns resultados interessantes incluem a potencial variabilidade espacial no equilíbrio entre a desnitrificação e a fixação de nitrogênio dentro da laguna, com a identificação de uma associação entre níveis elevados de ^{15}N e a cultura de ostras no local, sugerindo que a presença de ostras pode estar aumentando a produção de N_2 . Portanto, a consideração do mapeamento de isótopos estáveis se mostrou uma ferramenta útil para a avaliação do metabolismo lagunar/estuarino, podendo ser também aplicada para identificar a influência de gradientes espaciais e/ou sugerir locais específicos de análise da abundância ou função microbiana.

Estes estudos são importantes para melhor compreender as dinâmicas dos sistemas lagunares, que são muito impactadas pelas atividades antrópicas. Neste contexto, a degradação dos sistemas lagunares costeiros tropicais em áreas urbanas têm sido associada a um aumento de áreas impermeáveis e à falta de ou ineficiência no tratamento de esgotos domésticos, aumentando o escoamento de nutrientes e sólidos em suspensão de suas bacias hidrográficas (Lobo *et al* 2023).

Tema relevante no presente trabalho é o Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu (Niterói/RJ) e sua bacia de drenagem (Fig. 3.12 F e Fig. 3.13), que têm sido alvo de um intenso processo de urbanização nas últimas quatro décadas. A Laguna de Itaipu, por exemplo, apresenta sinais de eutrofização devido ao lançamento de grandes quantidades de esgoto doméstico (Cerdeira *et al* 2013).

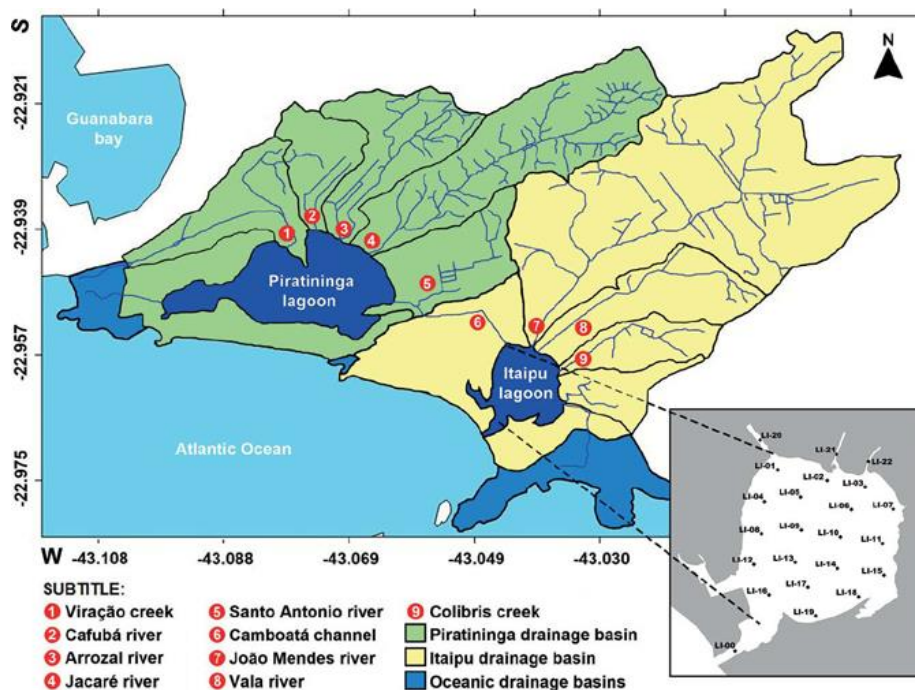


Figura 3.13 – Mapa do Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu (PILAS), bacias hidrográficas e tributários (Lobo *et al* 2023).

O Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu sofreu diversas intervenções humanas nas últimas décadas⁹⁶. Um exemplo é o restabelecimento da ligação entre a Laguna de Piratininga e o Mar em 2008, o que acarretou mudanças e variações no balanço de nutrientes

⁹⁶ Uma bela revisão histórica foi feita no trabalho do Prof. Gilberto Tavares de Macedo Dias, disponível (acesso em 03Abr2024) em: http://www.prosustentavel.niteroi.rj.gov.br/wp-content/uploads/2019/08/01_Gilberto.pdf

inorgânicos dissolvidos. Neste contexto, antes da abertura da ligação com o Mar (em 2006), tanto a Laguna de Piratininga quanto a de Itaipu eram autotróficas e a perda de nitrogênio era predominante. Após a ligação da Laguna de Piratininga com o Mar (período avaliado entre 2009-2010), esta sofreu alterações na estrutura trófica, tornando-se heterotrófica (Cerdeira *et al* 2013).

Mais recentemente, Lobo *et al* 2023 avaliaram as alterações biogeoquímicas causadas por intervenções antrópicas na Laguna de Itaipu, Niterói/RJ, incluindo a análise da distribuição espacial do fósforo (P) sedimentar e seu balanço de massa. Os resultados (Fig. 3.14) mostram que os teores de fósforo orgânico e inorgânico são maiores junto à região de maior densidade populacional (noroeste da Laguna) e menores na região próxima ao canal de ligação com o Mar. Entretanto, a distribuição espacial destas formas de fósforo não é homogênea nas outras áreas.

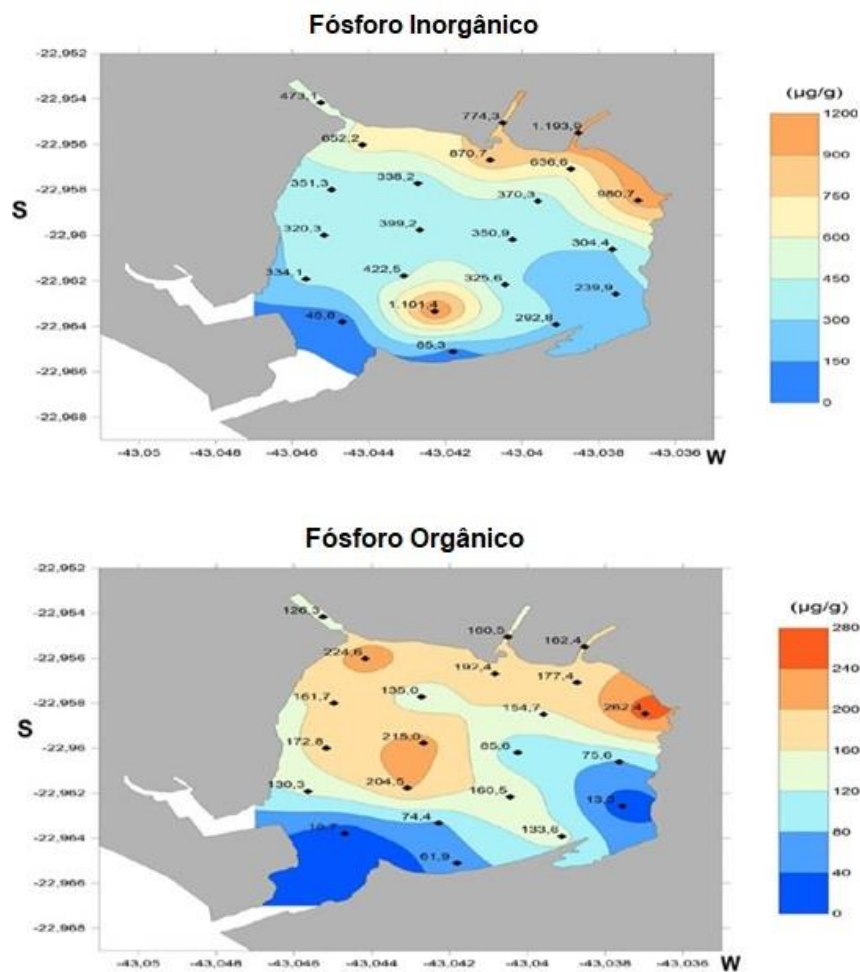


Figura 3.14 – Distribuição espacial de fósforo orgânico e inorgânico na Laguna de Itaipú, Niterói/RJ (adaptado de Lobo *et al* 2023).

Por exemplo, concentrações mais elevadas de fósforo orgânico na laguna foram observadas próximas ao Canal de Camboatá (Fig. 3.14 e Fig. 3.22), o que sugere que seu aporte advém do próprio canal. Isso aumenta o problema da eutrofização da Laguna de Itaipu, uma vez que o fósforo orgânico é associado à proliferação de algas (Ni *et al* 2022). Portanto, soluções que minimizem o aporte de fósforo orgânico advindo do Canal de Camboatá podem contribuir para mitigar o problema da eutrofização na Laguna de Itaipu.

3.3.2. Estudo de Caso na Laguna de Piratininga (Niterói/RJ)

As complexas relações entre efeitos antrópicos e naturais foram objeto de estudo na Laguna de Piratininga⁹⁷ (referida popularmente como Lagoa de Piratininga), que fica em uma das microbacias hidrográficas da Região Oceânica de Niterói, RJ. A microbacia da Laguna de Piratininga é um sistema que totaliza uma área de 22 km² (2.200 hectares) e recebe o esgoto sanitário/água cinza das populações que vivem próximas ao Rio Cafubá, Rio Arrozal, Rio Jacaré, Córrego da Viração e Córrego de Santo Antônio (Fig. 3.15).



Figura 3.15 – Microbacias hidrográficas que drenam para a Lagoa de Piratininga⁹⁸.

⁹⁷ A palavra Piratininga é de origem Tupi Guarani e significa “Peixe a secar” ou “Secagem de Peixe”. Decorre da junção de Pira (peixe) com Tininga (a secar). A mortandade de peixes na região é concedida há muito tempo, sendo registrada ao menos desde 1914, fato coerente com o nome dado ao local.

⁹⁸ Extraído do Projeto Conceitual Parque Orla Piratininga, disponível em (acesso em 10Mar2024): <http://sdc.niteroi.rj.gov.br/licitacao/sma/2018/cp-01-18-an1.pdf>

A Laguna de Piratininga é uma área muito urbanizada e com elevado aporte de esgoto doméstico sem tratamento, entre outras contribuições para o problema ambiental. A poluição que chega à laguna disponibiliza nutrientes em excesso na coluna d'água, exaurindo o oxigênio dissolvido e com isso selecionando microbiota anaeróbica; o metabolismo desta microbiota tem menor rendimento energético, fazendo com que os compostos orgânicos não sejam degradados com a mesma velocidade em que chegam ao ambiente⁹⁹ (Crapez *et al* 2022).

Diversas iniciativas no sentido de buscar melhorias para os problemas ambientais na referida laguna foram promovidas, incluindo ETECs – Encomendas Tecnológicas da Prefeitura Municipal de Niterói/RJ - para a avaliação de variadas tecnologias e seu impacto. Dentre estas, uma proposta de equipe de pesquisadores de UFF em colaboração com a BIOTECAM¹⁰⁰ foi apresentada e aprovada como projeto de pesquisa para avaliar o conceito de biodragagem/biorremediação¹⁰¹.

A biorremediação é uma tecnologia que acelera processos naturais de degradação ou detoxificação de contaminantes em solos, água e ar, sendo vantajosa devido à sua sustentabilidade: produz efeitos crescentes devido ao crescimento dos microrganismos, mas somente enquanto houver matéria orgânica em excesso a ser removida; os subprodutos do processo são água, dióxido de carbono e biomassa mobilizável pelo próprio ecossistema; e tem baixo custo (Crapez *et al* 2022).

A proposta da UFF/BIOTECAM foi uma abordagem de aeração contínua e modulação de consórcios microbianos¹⁰² para a mobilização da matéria orgânica na laguna em uma pequena área conhecida como Tibau (Fig. 3.16).

⁹⁹ Consistentemente com esta afirmação, foram encontradas concentrações crescentes de nitrogênio medido pelo método de Kjeldahl, que são indicadores de contaminação ambiental contínua por esgoto doméstico (Crapez *et al* 2022).

¹⁰⁰ *Startup* que tem o presente autor como sócio e co-fundador.

¹⁰¹ Este trabalho deu origem à publicação de Crapez *et al* (2022), o presente autor sendo co-autor.

¹⁰² A primeira das várias patentes concedidas à BIOTECAM é justamente uma tecnologia voltada à modulação de consórcios microbianos (Remer & DeGrave 2017).

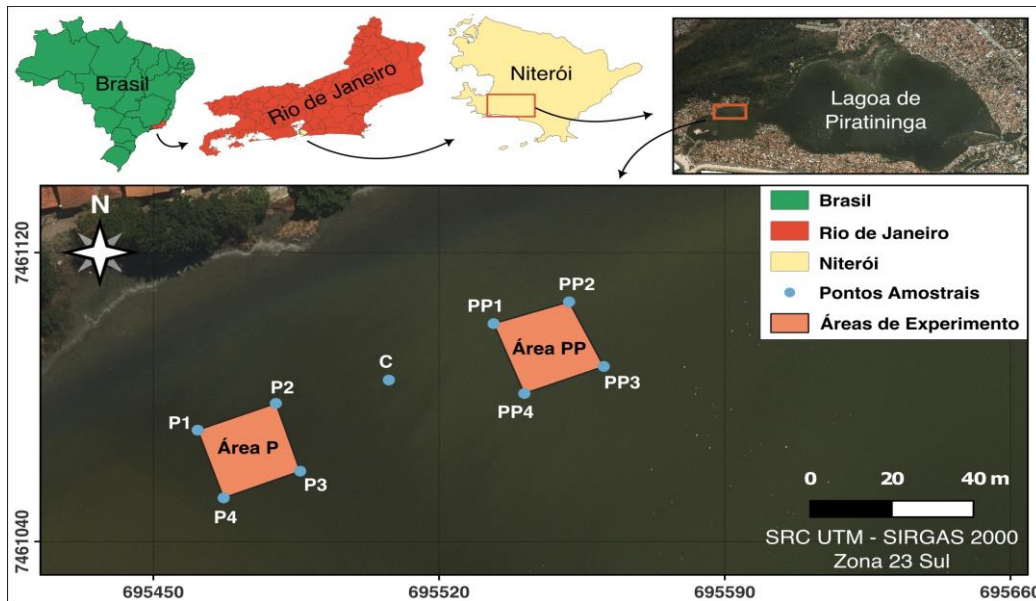


Figura 3.16 – Localização da Lagoa de Piratininga e áreas do experimento *in situ* no Tibau, projeto UFF/BIOTECAM (Crapez *et al* 2022).

Dadas as limitações do projeto (temporais, de recursos e de área disponível), seu objetivo foi contribuir para a formulação de políticas de conservação e recuperação ambiental de sistemas lagunares a partir da avaliação dos efeitos da modulação dos consórcios microbianos e da oxigenação da água. A proposta foi aprovada e conduzida entre março/22 e julho/22 com o uso de duas tecnologias complementares: EMTM e PULMÃOTM. Na área P (20m x 20m=400m²) da figura 3.16 foi usada a tecnologia EMTM; a área C foi controle, sem aplicação de nenhuma tecnologia; e na área PP (20m x 20m=400m²) foram usadas concomitantemente as tecnologias EMTM e PULMÃOTM.

O termo “EM” se refere a “*effective microorganisms*” e, portanto, a tecnologia EM[®] é uma abordagem de aporte de microrganismos probióticos regenerativos de ambientes aquáticos, como bactérias ácido-lácticas e leveduras que pertencem à categoria regenerativa (Higa 1998). A incorporação do consórcio microbiano de EMTM aos ambientes aquáticos acarreta alterações biogeoquímicas sinérgicas, com ocupação de nichos ecológicos pelos microrganismos e síntese substâncias que favorecem o restabelecimento da saúde ambiental (Higa 1998; Linde *et al* 2022). No projeto, o EM1[®] contendo *Lactobacillus casei* (4,7 x 10⁴ UFC/mL), *Lactobacillus acidophilus* (7,9 x 10⁴ UFC/mL) e *Saccharomyces cerevisiae* (1,5 x 10⁶ UFC/mL) foi adquirido da empresa

AMBIEM Ltda. para posterior preparação de *mudballs*¹⁰³ (Fig. 3.17), para que os microrganismos sejam transportados ao fundo, sobre o lodo. Foi usada 1 *mudball*/m² nas áreas de estudo, sendo aplicadas uma vez por mês.



Figura 3.17 – Tecnologia EM™ com aporte de microrganismos probióticos regenerativos em *mudballs*

A tecnologia denominada PULMÃO™, já descrita brevemente no capítulo 2, foi desenvolvida no Brasil pelo autor e colaboradores (Remer & Degrave 2018) na BIOTECAM, e envolve um equipamento que produz “filmes finos de líquido” para ampliar a transferência de massa gás-líquido, proporcionando melhor oxigenação e recuperação do ecossistema. Além da muito eficiente oxigenação de corpos líquidos, o equipamento promove também a remoção (*stripping*) dos gases que previamente nele estavam, o que contribui para o aumento da taxa de dissolução de oxigênio e para a acelerada recuperação do corpo líquido. Um PULMÃO com soprador de 0,3 HP e capacidade de insuflação de 400 litros de ar por minuto na água foi instalado na Laguna de Piratininga (Fig. 3.18).

¹⁰³ As *mudballs* (\cong 100g/cada) são preparadas da seguinte forma: o consórcio de microrganismos é ativado em meio de cultura contendo EM1®, melão e água sem cloro na proporção 1:1:18, respectivamente, durante 7 dias. Em seguida, os microrganismos são misturados à argila, farelo de trigo na proporção 5 litros: 14 kg: 700 g, respectivamente. A incubação é feita por 15 dias em temperatura ambiente de 22°C.



Figura 3.18 – Instalação de um PULMÃO na Laguna de Piratininga.

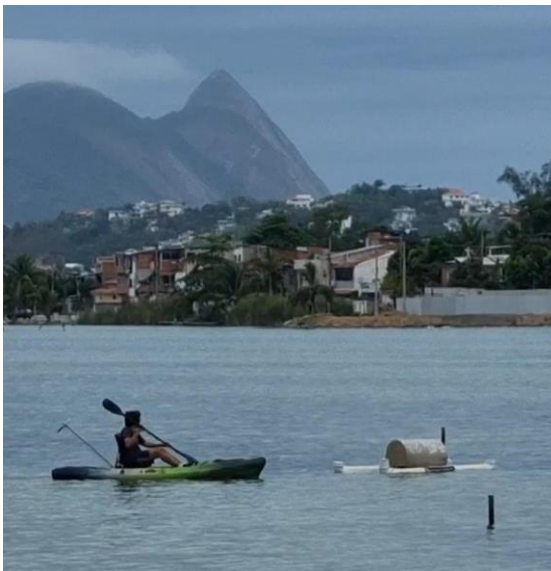


Figura 3.19 – PULMÃO em operação.

Em operação (Fig. 3.19), o equipamento com flutuadores junto à superfície da água promove a formação de uma espécie de sifão submerso que proporciona um significativo fluxo de água rica em oxigênio dissolvido. Esse fluxo pode ser direcionado de forma controlada em variadas distâncias ou profundidades, tanto para a coluna d'água como para o sedimento de fundo, conforme desejado.

O acompanhamento da espessura da camada de lodo sedimentado no curto período analisado nas áreas do estudo foi realizado através da altimetria ortométrica, conforme descrito por Crapez *et al* (2022). A medição da profundidade¹⁰⁴ foi feita diretamente, através da utilização de um disco de policarbonato sobre a superfície da lama e a medição com corda, sendo os valores medidos (em quadruplicata) convertidos em altitudes

¹⁰⁴ A medição da profundidade da superfície de fundo não usou o método batimétrico acústico tradicional, uma vez neste caso a precisão é prejudicada porque a onda acústica penetra na lama.

ortométricas relacionadas ao Nível Zero do IBGE, utilizando-se os Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS – *Global Navigation Satellite System*),

Os resultados, ainda que limitados a uma pequena janela temporal, indicam maior tendência de consumo do lodo, tanto utilizando a tecnologia EM1[®] quanto utilizando a combinação EM1[®]+Pulmão[™], diminuindo levemente a sua espessura – sugerindo que o aporte de lodo foi praticamente anulado, conforme previamente publicado (Crapez *et al* 2022). Por outro lado, resultados surpreendentes em termos de alteração do perfil físico-químico nos sedimentos, descritos em mais detalhes a seguir, apontaram para um novo paradigma para a remoção de substâncias consideradas recalcitrantes.

3.3.2.1. Resultados de Redução dos Níveis de Fósforo e Lipídios

O projeto envolveu uma série de análises físico-químicas para avaliar como as diferentes abordagens testadas poderiam impactar na biogeoquímica da área de estudo, e comprovou que efetivamente promoveram alterações no perfil físico-químico dos sedimentos da Laguna na área do Tibau. Neste contexto, foram quantificados os seguintes parâmetros: matéria orgânica, carbono total, carbono orgânico, nitrogênio Kjeldahl, fósforo total e biopolímeros, em amostras de sedimento superficial nas áreas de experimento *in situ* (P e PP) e área controle (C). Os resultados foram surpreendentes em vários aspectos, sendo enfatizados aqui o fósforo e os biopolímeros, em especial os lipídios.

Medições de teores fósforo total e de biopolímeros (CHO, PRT, LPD) foram realizadas nas três áreas experimentais (controle; *Mudballs*; e *Mudballs* + PULMÃO) conforme mostra a tabela 3.1 (e Fig. 3.16).

Tabela 3.1 – Geolocalização dos pontos de amostragem na laguna de Piratininga.

| Área | X(m) | Y(m) |
|-------------------------------------|------------|-------------|
| Controle | 695507,689 | 7461084,732 |
| Experimento <i>Mudballs</i> | 695471,726 | 7461070,491 |
| Experimento <i>Mudballs</i> +PULMÃO | 695544,787 | 7461098,937 |

Antes da condução deste projeto, se pensava que o fósforo não seria mobilizável¹⁰⁵. Entretanto, o teor de fósforo total¹⁰⁶, ainda que abaixo do previsto pela Resolução do CONAMA 454/2012, teve perfil de redução significativamente relevante nas áreas dos experimentos em relação ao controle (Tab.3.2 e Fig. 3.20).

Tabela 3.2 – Dados das medições (média de três medidas, dados em mg/kg) de fósforo no sedimento, no período de estudo em 2022.

| Amostra Mês | Controle | Mudballs | Mudballs+PULMÃO |
|------------------------------|-----------------|-----------------|------------------------|
| Mar | 65,5 | 142 | 82,2 |
| Abr | 480,4 | 150,5 | 345,9 |
| Jun | 146 | 63,9 | 72,3 |

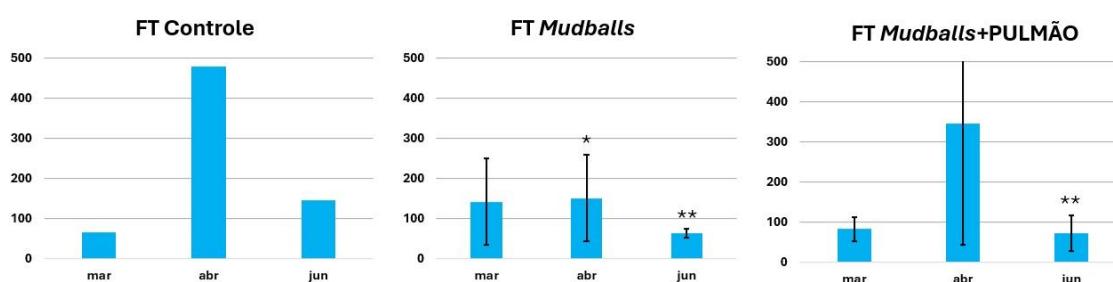


Figura 3.20 - Medições de fósforo total (FT) no sedimento no período de estudo. Significâncias estatísticas: * comparação com controle em abril; ** comparação com controle em junho.

Os resultados mostraram que as formas orgânicas do fósforo predominaram no lodo sedimentar, e que os teores de fósforo total diminuíram significativamente nas duas áreas de experimento quando comparados com o controle. Especificamente na área onde foram aplicadas *Mudballs*, as reduções em relação ao controle foram de 68,6% em abril e 56,2% em junho (Tab. 3.2). Na área onde foram aplicadas as tecnologias *Mudballs+PULMÃO*, também houve redução do teor de fósforo total nos meses de abril e junho, sendo significativa estatisticamente em junho, com redução de 50,5% em relação ao controle no

¹⁰⁵ Essa premissa inclusive motivou a consideração, em projetos anteriores de terceiros, de outras abordagens de tentar minimizar o problema do fósforo, como sua imobilização no fundo do leito da Laguna com o uso de Phoslock, um produto que não mobiliza ou reaproveita o fósforo, mas o imobiliza em uma argila ionicamente modificada contendo lantânio.

¹⁰⁶ No esgoto, o fósforo total engloba o fósforo orgânico das proteínas e o inorgânico, como ortofosfato e polifosfatos (Jordão e Pessoa 2011).

mesmo mês (Tab. 3.2). Estes resultados sugerem que formas de fósforo puderam ser consumidas durante o processo de biorremediação pela microbiota, se incorporando a outros níveis tróficos bacterívoros. Conseqüentemente, os resultados apontam para novos caminhos no sentido de ser possível minimizar ou resolver o problema do fósforo - que é um dos grandes problemas em corpos d'água poluídos com cargas orgânicas – com o uso de tecnologias de biorremediação como as aqui reportadas.

Também foram quantificados os biopolímeros carboidratos (CHO), proteínas (PRT) e lipídios (LPD) na área do Tibau da Lagoa de Piratininga, onde já era sabido que os referidos teores são maiores que os quantificados na Baía de Guanabara (Sabadini-Santos *et al* 2014). Dentre estas espécies químicas, o lipídio é provavelmente o mais problemático por ser considerado recalcitrante, ou seja, seu metabolismo no ambiente não ocorre facilmente, ao contrário de CHO e PRT (Summons *et al* 2022) – sendo inclusive usado como um biomarcador de contaminação por esgoto doméstico. Análises dos teores destes biopolímeros foram realizadas nos mesmos pontos de amostragem (Tab. 3.1), e os resultados são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Dados das medições (média de três medidas, dados em mg/g) de biopolímeros no sedimento no período de estudo em 2022.

| | Amostra Mês | Controle | Mudballs | Mudballs+PULMÃO |
|------------|------------------------------|-----------------|-----------------|------------------------|
| CHO | Mar | 0,30 | 0,49 | 0,51 |
| | Abr | 0,58 | 0,63 | 0,58 |
| | Jun | 0,60 | 0,62 | 0,50 |
| PRT | Mar | 0,39 | 0,48 | 0,52 |
| | Abr | 0,50 | 0,58 | 0,50 |
| | Jun | 0,65 | 0,59 | 0,50 |
| LPD | Mar | 0,46 | 0,76 | 0,52 |
| | Abr | 1,12 | 1,41 | 1,37 |
| | Jun | 0,60 | 0,59 | 0,36 |

* CHO=carboidratos; PRT= Proteínas; LPD= lipídios.

Gráficos mostrando a evolução temporal destes parâmetros (Fig. 3.21) foram preparados para melhor visualizar o efeito das alterações na área controle e naquelas áreas onde foram testadas duas abordagens tecnológicas distintas (*Mudballs* e *Mudballs+PULMÃO*).

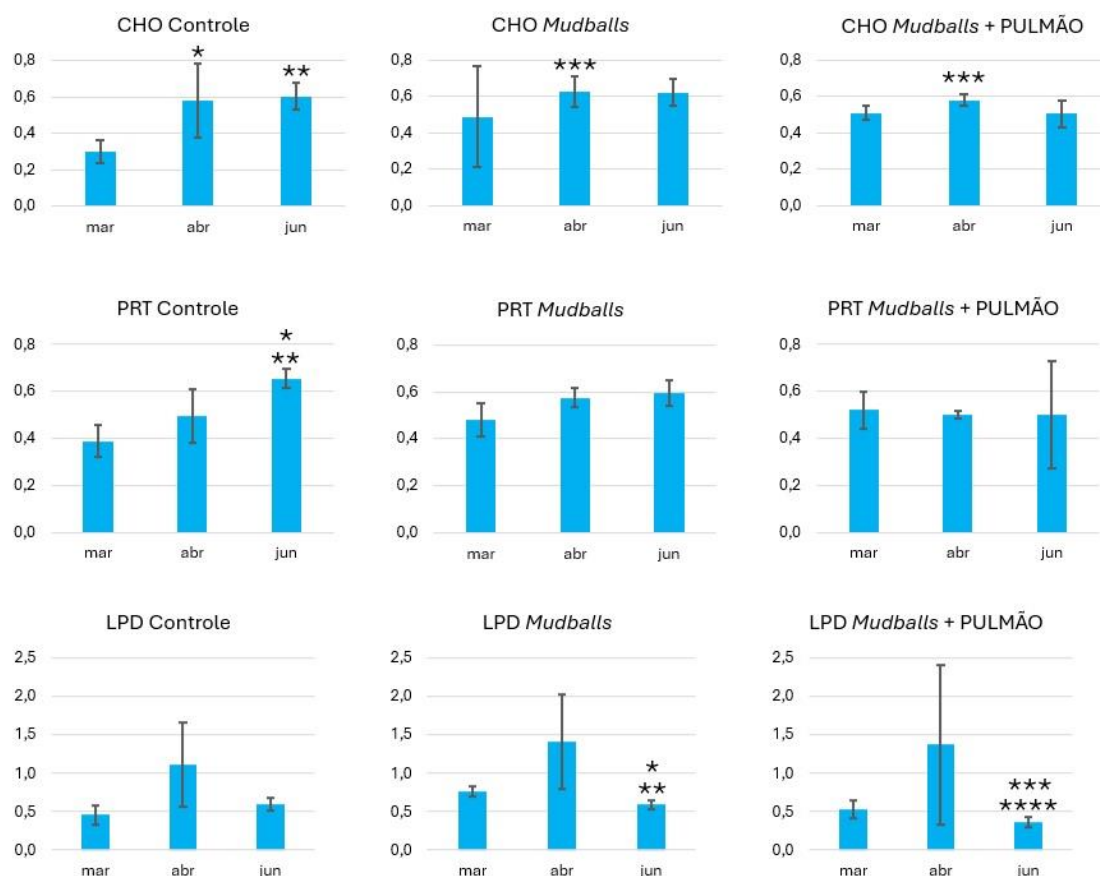


Figura 3.21 – Resultados de teores médios e desvios-padrão de biopolímeros no sedimento no período estudado. Significâncias estatísticas: CHO * comparação entre março e abril; ** comparação entre março e junho; *** comparação com controle em março; PRT * comparação entre março e junho; ** comparação entre abril e junho; LPD * comparação entre março e junho; ** comparação entre abril e junho; *** comparação com controle em junho; **** comparação com *Mudballs* em junho.

Os resultados mostraram algumas respostas dinâmicas interessantes: 1) na área controle é visível uma tendência de incremento significativo no teor de carboidratos e proteínas em todo o período analisado, sugerindo aporte contínuo de cargas orgânicas; 2) uma amenização desta tendência de incremento de teores de carboidratos e proteínas na área de aplicação de *Mudballs*; e 3) uma reversão deste perfil, com diminuição dos teores de carboidratos e proteínas na área de aplicação de *Mudballs*+PULMÃO.

Por outro lado, os resultados revelam também aspectos interessantes e surpreendentes sobre a dinâmica dos lipídios. No final do período de testes, em junho, houve significativa redução dos teores de lipídios na área onde foram aplicadas as tecnologias *Mudballs*+PULMÃO, com redução de 39,9% do teor de lipídios em comparação com o

mesmo momento (junho) na área controle. Também houve substancial e significativa redução (39,3%) em relação à área onde foram aplicadas apenas as *Mudballs*. Os perfis temporais de oscilação dos teores de lipídios em cada área experimental também merecem menção por eventualmente apontarem possíveis rotas metabólicas ou adaptação biogeoquímica digna de nota. Neste contexto, a redução do teor de lipídios na área controle, de abril para junho foi de 46,6%, enquanto foi de 58,1% na área de aplicação de *Mudballs* (24,7% maior que na área controle), e de 73,8% na área de aplicação de *Mudballs*+PULMÃO (58,5% maior que na área controle). Por outro lado, na área onde foi aplicada a tecnologia de *Mudballs* houve um aumento significativo de teor de lipídios no mês de março em relação à área controle, o que pode ser associado a uma maior produção de biomassa na área com aplicação de *Mudballs* no início dos experimentos, teores estes subsequentemente reduzidos de forma significativa no mês de junho.

Conseqüentemente, a aplicação das duas tecnologias proporcionou substancial mudança no perfil físico-químico do sedimento. As concentrações relativas iniciais dos biopolímeros no sedimento eram LPD>CHO>PRT, nesta ordem, sendo o perfil alterado, com substancial consumo de lipídios, de forma que ao final do período de estudo as concentrações relativas passaram para PRT~CHO>LPD, nesta ordem (tabela 3.3 e Fig. 3.21).

Em conjunto, os resultados sugerem que as *Mudballs* efetivamente alteram o perfil físico-químico de espécies de biopolímeros – moléculas complexas, cuja síntese ou degradação requer considerável trabalho metabólico. Os resultados também mostram que a utilização do PULMÃO potencializa substancial e significativamente a ação das *Mudballs*, incrementando muito a alteração dos perfis físico-químicos em curto espaço de tempo. Os dados relativos à substancial redução dos teores de lipídios na área de aplicação das tecnologias *Mudballs*+PULMÃO são uma interessante surpresa pela elevada magnitude (redução de 39,9%), comparativamente à área controle e especialmente devido ao curto período de tempo de testes, proporcionando a alteração de uma dinâmica de atenuação, no caso de uso de *Mudballs* somente, para uma efetiva redução dos teores de lipídios (bem como de carboidratos e proteínas) no caso de uso combinado *Mudballs*+PULMÃO. Neste contexto, os lipídios são, ao menos até o momento, considerados moléculas recalcitrantes devido à baixíssima taxa de degradação nos sedimentos (Han *et al* 2022) – de forma que os presentes resultados contradizem este paradigma e claramente apontam um novo caminho para a remoção/mobilização rápida desta espécie de biopolímero. Os

resultados também mostram novos caminhos de intervenção em áreas degradadas, para a ciclagem de cargas orgânicas, poluentes e potencialmente a redução de emissão de gases de efeito estufa (GEE), dando impulso à abordagem de biodragagem objeto do estudo.

O fato de os lipídios (até então considerados recalcitrantes neste ambiente) terem sido metabolizados sugere que estes se tornaram fonte de carbono e de energia para a microbiota (Crapez *et al* 2022). Estas modificações nas áreas experimentais apontam para um novo caminho de recuperação ambiental em áreas contendo grandes quantidades de lipídios, como é o caso da região em estudo. Além disso, estes biopolímeros podem ser utilizados como biomarcadores biogeoquímicos do processo de biorremediação de lodo sedimentado.

Estas relevantes modificações em uma pequena janela temporal são encorajadoras por: (i) evidenciarem a ciclagem de fósforo e de lipídios, ambos até então considerados recalcitrantes no ambiente, sugerindo um novo caminho de bioremediação; (ii) indicarem que o processo de restauração ambiental na Laguna de Piratininga ocorreu durante o período de estudos; e (iii) viabilizarem a obtenção de parâmetros e métricas úteis para a formulação de políticas de conservação ambiental em corpos hídricos degradados, conforme detalhado neste capítulo.

Por fim, ainda que os dados sejam muito encorajadores, a janela temporal dos experimentos foi muito pequena - sendo recomendável uma pesquisa de maior prazo e abrangendo ciclos sazonais completos. Neste contexto, e com o intuito de facilitar os procedimentos de monitoramento e/ou conservação de corpos líquidos em projetos futuros, o autor desenvolveu em conjunto com colaboradores um barco aerador (Remer *et al* 2021). Este pode ser um drone flutuante de monitoramento automatizado, ou seja, primeiramente voltado à coleta de dados, e/ou pode ser uma chata de maior escala para promover os efeitos descritos neste estudo de caso, porém em escala muito maior, para a conservação ou recuperação de corpos líquidos degradados. O conceito de um barco dotado de sensores para monitoramento contínuo em tempo real proporciona maior velocidade de obtenção e de comunicação de dados de interesse ambiental, é passível de automação e uso de sistemas de comunicação em nuvem. Com isso, pode ser uma ferramenta útil para aumentar o desempenho de projetos de monitoramento, conservação, engajamento das pessoas/instituições e para educação ambiental – sendo alinhado ao propósito de CONSERVOMETRIA, objeto desta tese.

3.3.3. Wetlands naturais

Wetlands são ambientes entre os mais fortemente produtivos, berçário de diversidade biológica que oferece água e habitat para numerosas espécies de plantas, animais e microrganismos. Os benefícios ou serviços ecossistêmicos que as *wetlands* proporcionam são indispensáveis, incluindo, entre outros, a melhoria da qualidade da água, suprimento de alimentos e biodiversidade, controle de enchentes.

Sua importância é reconhecida também pela UNESCO (Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura), que em 1971 organizou uma Convenção Sobre *Wetlands* de Importância Internacional na cidade de Ramsar, Irã (e por isso é também conhecida como Convenção de Ramsar)¹⁰⁷. O artigo 2.1 da Convenção sobre *Wetlands* estabelece que cada país conveniente deve incluir as *wetlands* de seu território na Lista de *Wetlands* de Importância Internacional, ou Lista de Ramsar, selecionadas de acordo com sua significância em termos ecológicos, botânicos, zoológicos, limnológicos ou hidrológicos. A lista de Ramsar é atualizada frequentemente e na atualização de 12Fev2024, conta com 27 *wetlands* registradas no Brasil (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 – Lista de Ramsar, *wetlands* registradas no Brasil.

| Local | Data de designação | UF | Área (ha) | Coordenadas |
|-----------------------------------|--------------------|----------------|-----------|------------------|
| Lund Warming | 05/06/2017 | MG | 23.865 | 19°30'S 043°59'W |
| Abrolhos P. Nacional Marinho | 02/02/2010 | BA | 91.300 | 17°49'S 038°49'W |
| Estuário do Amazonas e Manguezais | 19/03/2018 | AP MA PA | 3.850.253 | 01°09'S 046°48'W |
| Anavilhanas P. Nacional | 22/03/2017 | AM | 350.470 | 02°28'S 060°49'W |
| Atol das Rocas | 11/12/2015 | RN | 35.186 | 03°51'S 033°46'W |
| APA Baixada Maranhense | 28/02/2000 | MA | 1.775.036 | 02°58'S 044°59'W |
| Cabo Orange P. Nacional | 02/02/2013 | AP | 657.328 | 03°38'N 051°11'W |
| APA Cananéia Iguape Peruíbe | 04/09/2017 | SP | 202.307 | 24°40'S 047°35'W |
| Fernando de Noronha Arquip. | 25/01/2018 | PE | 10.929 | 03°51'S 032°24'W |
| Guaporé Reserva Biológica | 22/03/2017 | RO | 600.000 | 12°31'S 062°47'W |
| Guaraqueçaba Est. Ecol. | 05/06/2017 | PR | 4.370 | 25°17'S 048°22'W |
| Guaratuba | 21/09/2017 | PR | 38.329 | 25°51'S 048°41'W |
| Ilha Grande P. Nacional | 30/09/2017 | MS PR | 76.033 | 23°41'S 053°59'W |

¹⁰⁷ Mais informações disponíveis em <https://www.unesco.org/en/biodiversity/wetlands>

| | | | | |
|---|------------|----|------------|------------------|
| Ilha do Bananal | 04/10/1993 | TO | 562.312 | 10°31'S 050°12'W |
| Lagoa do Peixe | 24/05/1993 | RS | 34.400 | 31°14'S 050°57'W |
| Mamirauá | 04/10/1993 | AM | 1.124.000 | 02°18'S 066°01'W |
| Parque Est. Mar. do Parcel Manoel Luís incl. Baixios do Mestre Álvaro e Tarol | 28/02/2000 | MA | 34.556 | 00°30'N 044°45'W |
| Pantanal Matogross. P. Nac. | 24/05/1993 | MT | 135.000 | 17°39'S 057°25'W |
| RPPN Sesc Pantanal | 06/12/2002 | MT | 87.871 | 16°40'S 056°15'W |
| Reentrâncias Maranhenses | 30/11/1993 | MA | 2.680.911 | 01°35'S 044°53'W |
| RPPN Fazenda Rio Negro | 22/05/2009 | MS | 7.000 | 19°32'S 056°13'W |
| Parque Estadual Rio Doce | 15/03/2010 | MG | 35.973 | 19°40'S 042°33'W |
| Rio Juruá | 29/09/2018 | AM | 2.136.489 | 05°09'S 067°13'W |
| Rio Negro | 19/03/2018 | AM | 12.001.614 | 01°43'S 064°05'W |
| Estação Ecológica Taiamã | 21/10/2018 | MT | 11.555 | 16°51'S 057°30'W |
| Estação Ecológica Taim | 22/03/2017 | RS | 10.939 | 32°44'S 052°35'W |
| P. Nacional Viruá | 22/03/2017 | RR | 216.427 | 01°17'N 061°09'W |

A nomenclatura das diferentes regiões dentro de uma *wetland* merece algum esclarecimento, uma vez que diferentes tipos de vegetação e diferentes microrganismos que exercem função ecossistêmica ficam em locais específicos (Fig. 3.22).

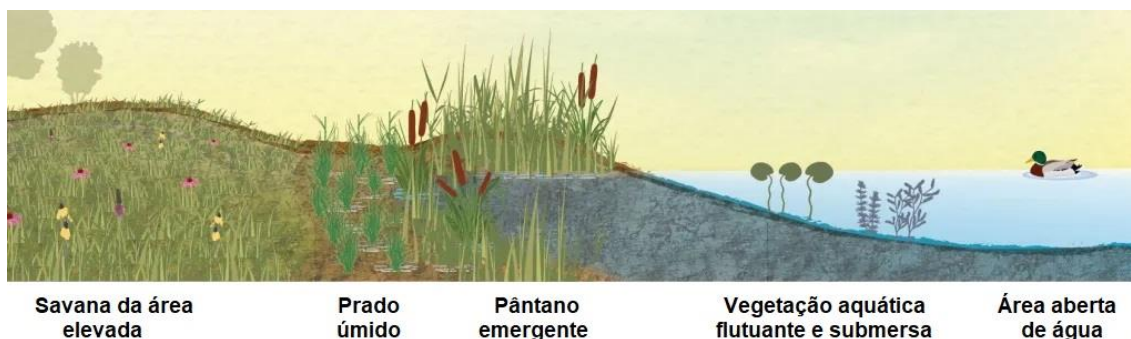


Figura 3.22 – Zonas de plantas de uma *wetland* e gradiente de profundidade de água (adaptado de Iowa Wetlands¹⁰⁸).

Os consórcios microbianos associados às raízes de plantas de *wetlands* são essenciais para a função ecológica do sistema radicular e para o equilíbrio das *wetlands*, mas os

¹⁰⁸ Disponível em (acesso em 10mar2024):

https://naturalresources.extension.iastate.edu/files/page/files/iowa_wetlands_accessible_reduce_d_size.pdf

mecanismos e efeitos bioquímicos ainda são pouco conhecidos. Wang L *et al* (2023) estudaram os processos ecológicos relacionados a consórcios bacterianos e de fungos na água, solo, solo da rizosfera e endosfera das raízes para três diferentes estágios de desenvolvimento de *Typha orientalis* em *wetlands* de locais diversos. Os resultados sugerem que aspectos como diversidade do consórcio microbiano, sua composição e redes de interação na zona água-solo-raízes são predominantemente determinados pelo nicho local e estágio de desenvolvimento – sendo menos importante onde fica a respectiva *wetland*. Por exemplo, foi observado que nos estágios iniciais do desenvolvimento vegetal de *Typha orientalis* as bactérias benéficas predominam, enquanto nos estágios finais do desenvolvimento da referida planta as bactérias saprófitas predominam. Além disso, a análise da endosfera das raízes de *Typha orientalis* mostrou que o consórcio microbiano associado é primariamente oriundo dos seguintes nichos: a rizosfera do solo (bactérias 39,9%; fungos 27,3%) e da água (bactérias 18,9%; fungos 19,1%). Isso significa que os consórcios microbianos são dinâmicos e associados ao estágio de desenvolvimento da planta ou vice-versa.

As *wetlands* costeiras ficam na junção entre ecossistemas terrestres e marinhos, tendo composições e funções peculiares - e de elevado interesse ecológico e para a manutenção dos ciclos biogeoquímicos. A elevada urbanização junto às regiões costeiras é um fator adicional de influência e pressão para a crescente degradação das *wetlands* costeiras. Neste contexto, Liang *et al* (2023) demonstraram que os consórcios microbianos dos sedimentos desempenham papel muito importante nos ciclos deste tipo de *wetland* e que compreender em profundidade as comunidades microbianas em tais ambientes é muito importante para conservar, recuperar ou melhorar o desempenho de tais *wetlands*. Também avaliaram as mudanças de padrão de genes funcionais de consórcios microbianos em múltiplas *wetlands* (Fig. 3.23) e sugeriram algumas métricas para a melhoria dos ciclos biogeoquímicos ou da remediação de poluição em tais ambientes.



Figura 3.23 – Regiões das *wetlands* estudadas por Liang *et al* (2023).

As *wetlands* são conhecidas por fixar carbono em condições anaeróbicas no histosol - um solo que consiste, principalmente, de materiais orgânicos (Whiting & Chanton 2003). Entretanto, se por um lado as *wetlands* fixam carbono no solo devido a captura de CO₂ do ar, por outro lado a carga orgânica no sedimento do ambiente aquático anaeróbico proporciona a emissão de metano (CH₄) na atmosfera. Portanto, é o balanço entre o CH₄ emitido e o CO₂ fixado que determina a contribuição (positiva ou negativa) das *wetlands* para o efeito estufa. O artigo de Whiting & Chanton (2003) traz também importante luz a esta discussão, ao analisar o balanço entre o CH₄ emitido e o CO₂ fixado em *wetlands* em diferentes latitudes - tanto em regiões boreais quanto em regiões subtropicais/temperadas. As conclusões são surpreendentes: o balanço no horizonte de 20 anos é desfavorável, ou seja, as *wetlands* aumentam o efeito estufa, pois a relação molar entre o CH₄ emitido e o CO₂ fixado é entre 0,05 a 0,2, e o efeito estufa das emissões de CH₄ é maior do que a contribuição pela fixação do CO₂ devido ao maior potencial de efeito estufa do CH₄. Essa conta se inverte quando se considera o horizonte de 100 anos devido à mais rápida degradação do CH₄ na atmosfera. O artigo conclui que nas regiões temperadas as *wetlands* contribuem para a redução do efeito estufa, diferentemente daquelas nas regiões mais setentrionais.

As *wetlands* correspondem a uma pequena porção do território do planeta (<2%), mas desempenham uma influência desproporcional no sequestro de carbono, emissões de CH₄ (entre 30 e 40% das emissões naturais de CH₄, segundo Koffi *et al* 2020) e fluxos aquáticos de carbono e, por esta razão, é importante conhecer os processos biogeoquímicos que afetam a dinâmica de carbono em tais ambientes (Bansal *et al* 2023).

Dado o grande potencial de efeito estufa do metano (CH₄) e a substancial emissão de metano associada a *wetlands*, um estudo mais aprofundado sobre os mecanismos biogeoquímicos associados à produção de metano nestes ambientes é altamente recomendável. Neste contexto, Wilmoth *et al* (2021) avaliaram o papel do oxigênio no estímulo à produção de metano em *wetlands*. De um lado, a metanogênese microbiana por *Arqueas*, em condições anaeróbicas, é responsável pela maior parte das emissões conhecidas de metano. Entretanto, observações mais recentes indicam que pode haver substancial emissão de metano por camadas de solo de *wetlands* quando estas são oxigenadas de forma oscilante. Wilmoth *et al* (2021) incubaram turfa de *Sphagnum* para demonstrar que sua exposição temporária ao oxigênio aumenta a produção de CH₄ até 2000 vezes quando é retomada a condição anóxica. Análise metagenômica por 16S RNA indicou que o aumento da produção de CH₄ é devido a mudanças funcionais nos consórcios microbianos durante a oscilação redox que aumenta a degradação de carbono. Espécies como *Novosphingobium* com genes para oxigenase aromática dependente de O₂ cresceram intensamente em abundância relativa durante o período de oxigenação. Além disso, espécies de *Acidobacteria* foram particularmente relevantes no metabolismo anaeróbico de carbono de turfa, incluindo a produção de substratos metanogênicos como H₂ e CO₂. O aumento da produção de CO₂ na fase anóxica de turfa, que sofreu oscilação redox previamente, estimulou a produção hidrogenotrófica de CH₄ por espécies de *Methanobacterium*. A persistência de ferro reduzido (Fe(II)) durante a oxigenação prolongada na oscilação redox pode aumentar ainda mais a degradação de carbono por mecanismos abióticos (reações de Fenton, por exemplo). Os resultados apontam para o fato de que a dinâmica microbiana tem fortes implicações sobre a biogeoquímica no ambiente e que transições redox podem afetar muito fortemente as emissões de CH₄ e possivelmente outras espécies químicas. Na prática, a consideração de oxigenação de *wetlands* deve, portanto, primar pela aeração continuada, pois é a oscilação da disponibilidade de O₂ dissolvido que pode se tornar problema na formação de CH₄.

Existem diversos modelos para estimar as emissões de metano em *wetlands* costeiras, mas tais modelos foram concebidos para ecossistemas de baixa carga de solutos e não se aplicam a águas interiores que tenham elevada salinidade, como é o caso de muitas lagunas. Soued *et al* (2024) fizeram um levantamento de campo especificamente sobre a influência do ciclo do metano oriundo de atividade microbiana em águas interiores e demonstraram que a salinidade restringe substancialmente as emissões de metano nestes ambientes aquáticos. Portanto, os modelos atuais estão superestimados em águas interiores salinas, em especial as regiões com habitats lênticos. O estudo de Soued *et al* (2024), especificamente em águas interiores do Canadá, mostrou que a estimativa com base nos modelos atuais é de até 81% maior que a medida - também apontou, surpreendentemente, que a crescente salinização antropogênica (devido à mineração, agricultura, urbanização, deposição atmosférica etc.) tem potencial de reduzir ainda mais as emissões de metano nestes ambientes aquáticos. Assim, é um caso interessante em que os efeitos antropogênicos podem ter resultados opostos: de um lado, o aumento de carga orgânica decorrente da urbanização e falta de tratamento adequado, com o consequente maior potencial anaeróbico para geração de metano e, do outro lado, o aumento da salinização por causas antropogênicas, que reduz as emissões de metano. Conseqüentemente, os modelos quantitativos de emissão de metano, bem como as projeções futuras, devem levar em considerações esses efeitos opostos.

Independentemente da rigidez dos modelos, é consenso que a recuperação de *wetlands* costeiras é uma atividade importante para atingir as metas de redução da emissão de GEE, melhorar a qualidade da água e alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (Iram *et al* 2022). No entanto, permanecem muitas incertezas relacionadas com a obtenção, medição e comunicação do sucesso da recuperação ambiental de *wetlands* costeiras. Iram *et al* (2022) mediram os níveis de redução de carbono (C) e potencial remoção de nitrogênio (N) de *wetlands* costeiras recuperadas na região subtropical de Queensland, Austrália. O local era originalmente uma floresta composta por *Melaleuca spp.*, que foi desmatado e drenado na década de 1990 para a produção de cana-de-açúcar. Em 2010, a inundação das marés foi restabelecida e surgiu um mosaico de vegetação costeira (pântanos salgados, manguezais e florestas supratidais). Os autores mediram os fluxos de GEE no solo (CH_4 , N_2O , CO_2) e o sequestro de C orgânico nas árvores e no solo para estimar a redução líquida de C associada aos locais de referência, convertidos e recuperados. Para avaliar a influência da recuperação na melhoria da qualidade da água,

os autores mediram a desnitrificação e o acúmulo de N no solo e concluíram que a recuperação de *wetlands* costeiras em cenário subtropical reduz eficazmente as emissões de CO₂, ao mesmo tempo que proporciona outros benefícios adicionais, especialmente a melhoria da qualidade da água.

As oscilações do nível da água são muito comuns em *wetlands* e, portanto, trazem como consequência rápidas mudanças na disponibilidade de oxigênio e de aceptores finais de elétrons alternativos - resultando em fortes alterações nas reações redox microbianas predominantes, com efeitos significativos no crescimento das plantas. Além disso, a composição microbiana é fortemente influenciada pela composição da vegetação. Portanto, os conhecimentos microbiológicos e da ecologia vegetal são essenciais para compreender os principais fatores biogeoquímicos e biológicos que impulsionam a heterogeneidade e a composição total da comunidade (isto é, microrganismos e vegetação) em diferentes escalas espaciais e temporais.

A maioria dos estudos sobre interações na rizosfera concentra-se em patógenos, simbiose micorrízica ou transformações de carbono. Embora as transformações biogeoquímicas de N, S e Fe tenham efeitos profundos na vegetação, estes efeitos têm recebido muito menos atenção (Lamers *et al* 2012). Os autores indicaram algumas premissas importantes: em primeiro lugar, esses três elementos (N, S e Fe) são nutrientes para as plantas e a atividade microbiana altera significativamente a sua disponibilidade. Em segundo lugar, a oxidação microbiana com oxigênio fornecido pela liberação radial de oxigênio das raízes nas *wetlands* provoca acidificação, enquanto a redução utilizando diferentes aceptores de elétrons leva à alcalinização, afetando o pH na rizosfera e, portanto, a composição da planta. Em terceiro lugar, espécies reduzidas desses três elementos podem tornar-se fitotóxicas. Além disso, a ciclagem do Fe está intimamente ligada à do S e do P.

Neste contexto, em solos de *wetlands* e sedimentos de sistemas aquáticos, o sulfeto é uma forte fitotoxina que pode ser acumulada como resultado da redução microbiana do sulfato durante a anaerobiose (Lamers *et al* 2013). Os efeitos fitotóxicos deste composto de enxofre reduzido em diferentes tipos de ecossistemas, tanto no funcionamento ecofisiológico de plantas individuais, como em associações plantas-microrganismos, não são pequenos e as interações multiespécies na rizosfera mostram mecanismos ainda mais complexos que explicam a resistência ao sulfeto. Este, portanto, é uma fitotoxina potente, que afeta profundamente o desempenho fisiológico das plantas e o funcionamento dos

ecossistemas em toda a gama de tipos de *wetlands*. Para explicar os efeitos diferenciais do sulfeto nos diferentes níveis organizacionais, é vital um conhecimento profundo sobre os processos biogeoquímicos, fisiológicos das plantas e ecológicos da rizosfera.

A estequiometria dos nutrientes dentro de uma *wetland* é afetada pelo uso da terra circundante e pode desempenhar um papel significativo na remoção de nitrato ($\text{NO}_3\text{-N}$) (Grebliunas & Perry 2016). Bacias hidrográficas agrícolas drenadas experimentam altos *inputs* sazonais de $\text{NO}_3\text{-N}$, mas baixas cargas de fósforo ($\text{PO}_4\text{-P}$) e carbono orgânico dissolvido em relação aos sistemas dominados pelas águas superficiais. Essa diferença pode apresentar condições estequiométricas que limitam a desnitrificação nos cursos d'água receptores. Uma métrica importante estudada por Grebliunas & Perry (2016) foi a razão C:N:P e como ela afeta as taxas de desnitrificação de sedimentos de *wetlands* de mitigação drenadas. Os resultados sugerem que os sedimentos das *wetlands* fornecem um conjunto limitante de carbono orgânico dissolvido lábil para manter a remoção prolongada de $\text{NO}_3\text{-N}$. Além disso, a limitação do carbono orgânico dissolvido tornou-se mais evidente em concentrações elevadas de $\text{NO}_3\text{-N}$ (20 mg/L), indicando que a disponibilidade de carbono orgânico dissolvido lábil desempenha um importante papel limitante na desnitrificação dos sedimentos nas *wetlands*.

A concentração de nutrientes tem efeitos sobre as relações planta-microrganismos na rizosfera, onde os consórcios bacterianos oligotróficos são dominantes quanto há elevado do teor de nutrientes, e a diversidade microbiana é maior em solos fertilizados (Bledsoe *et al* 2020). Consequentemente, as mudanças taxonômicas na rizosfera associadas ao teor de nutrientes podem ter implicações para a saúde vegetal e funções ecossistêmicas associadas aos ciclos de carbono e nitrogênio. Neste contexto, Cechetti *et al* 2020 estudaram a metabolização de nitrogênio pelas plantas em Sistemas Baseados na Natureza (SBN) - *wetlands* construídas -, com um novo método com isótopos de nitrogênio e um modelo de mistura para distinguir as diferentes fontes de N. Os resultados em sistema piloto avaliado por dois anos mostraram que 14% do N das plantas advém do efluente e o restante é obtido do solo. Entretanto, os dados variam muito dentro do espaço de uma *wetland*: 82% do nitrogênio nas plantas nos dois primeiros metros da elevação da orla advém do efluente, enquanto no restante do sistema menos de 12% do nitrogênio das plantas advém do efluente. Além disso, foi demonstrada uma alta variabilidade sazonal com maior incorporação de N em plantas mais maduras, variando bastante de acordo com o tipo de planta usado.

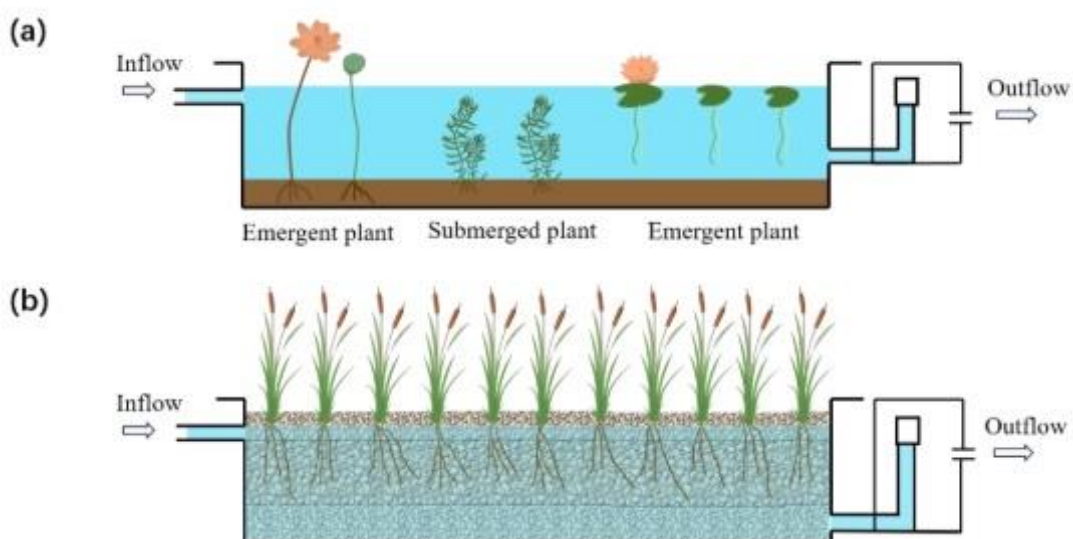
Donato *et al* (2020) estudaram as respostas de plantas e do consórcio microbiano associado. Para tanto, criaram mesocosmos com diferentes macrófitas (*Phragmites australis*, *Spartina pectinata*, *Typha latifolia*) e diferentes qualidades de água (água fresca como controle, água enriquecida com nitrogênio, sal do mar e sal de descongelamento de estradas) e mediram fluxos de CO₂ e CH₄, biomassa acima e abaixo do nível do solo, porosidade radicular, físico-química da água dos poros (NH₄⁺, NO₃⁻, SO₄⁻², Cl⁻ e carbono orgânico dissolvido), mineralização de carbono no solo e também os consórcios microbianos do sedimento por metagenômica (sequenciamento de 16S RNA). Alguns resultados interessantes incluem: a) o enriquecimento com nitrogênio estimulou a produção de biomassa vegetal e a respectiva captura de CO₂, porém reduziu a penetração de luz (em especial em *Spartina*); b) a porosidade radicular não foi afetada pela qualidade da água, mas é correlacionada com a emissão de CH₄, sugerindo que as plantas podem ser condutas importantes de CH₄ das regiões anóxicas do sedimento para a atmosfera; c) a composição dos consórcios microbianos do sedimento não foi muito afetada pelo enriquecimento com nitrogênio, mas sim pela presença de sal – que reduziu a diversidade do consórcio e a mineralização de carbono; d) as emissões de metano foram suprimidas pelo sal marinho mas não pelo sal de descongelamento de estradas, isso sendo evidência de um controle químico adicional (disponibilidade de íons sulfato, SO₄⁻²) no processo mediado por microrganismos.

As *wetlands* naturais do complexo do Lago Frank, no Canadá, foram estudadas por Zhou *et al* (2023). No referido estudo, quantificaram o ciclo da matéria orgânica dissolvida usando efluentes urbanos e agroindustriais. Análises ópticas mostraram que a mudança composicional de carga orgânica dissolvida e biodisponível na forma de proteínas (na entrada) para formas aromáticas e húmicas (na saída) são provavelmente devidas à metabolização da carga orgânica em plantas do pântano e em solos da *wetland*. Estudos de incubação com microrganismos mostraram que a carga orgânica é rapidamente consumida, apresentando meia vida de 35 dias para a carga orgânica de entrada (proteica) e de 462 dias para a matéria de saída (húmica e aromática). A conclusão é de que a referida *wetland* é uma *fonte* de matéria orgânica dissolvida em vez de um sumidouro de matéria orgânica, e que esse efeito tem relação com o tempo de residência e tempo de processamento de matéria orgânica.

As plantas submersas também têm impacto no desempenho de *wetlands* e os consórcios microbianos desse nicho foram objeto de estudo por Wang B *et al* (2021), que fizeram uma análise metagenômica dos consórcios microbianos dos sedimentos em nichos com e sem plantas submersas (neste caso *Vallisneria natans*). Os resultados mostram que existe uma abundância muito maior de genes funcionais envolvidos nos metabolismos de C, N, S em sedimentos onde há plantas submersas. A comparação das anotações de genes funcionais com aquela de bases de dados de ciclos de N e S mostrou que os genes envolvidos na fixação de nitrogênio (como *nifD/H/K/W*), na redução assimilatória de nitrato (como *nasA* e *nirA*), na desnitrificação (como *nirK/S* e *nosZ*), na redução assimilatória de sulfato (como *cysD/H/J/N/Q* e *sir*), e na oxidação de enxofre (como *glpE*, *soeA*, *sqr* e *sseA*) são significativamente aumentados em sedimentos com vegetação. Os autores atribuem esse achado a fatores ambientais como o fósforo e nitrogênio total e a relação C:N, mostrando inequívoca relação entre plantas submersas, seu respectivo consórcio microbiano e os ciclos de C, N e S em ecossistemas de *wetlands*.

3.3.4. Constructed Wetlands ou Jardins Filtrantes

As *wetlands* artificiais ou *constructed wetlands* (conhecidas no Brasil como Jardins Filtrantes) são Soluções Baseadas na Natureza alternativas às tecnologias de tratamento de esgoto, sendo relevantes os microrganismos nos processos de degradação de poluentes e metabolização de nutrientes. Podem ser categorizadas em três tipos (Fig. 3.24).



(c)

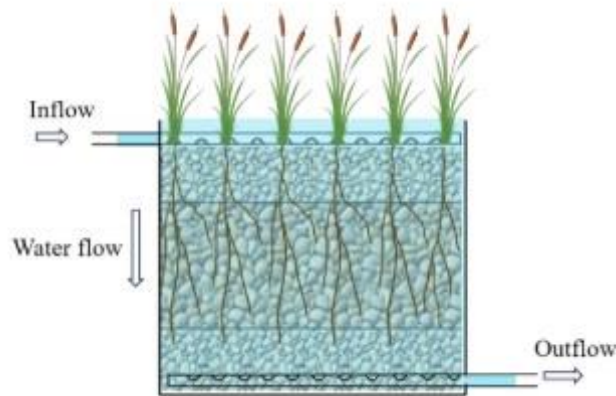


Figura 3.24 – Configurações de *wetlands* construídas a) livre fluxo de água na superfície; b) fluxo horizontal subsuperficial; e c) fluxo vertical (Yin *et al* 2023).

As *wetlands* construídas são amplamente utilizadas em todo o mundo como um sistema de tratamento de águas residuais de baixo custo que fornece simultaneamente vários serviços ecossistêmicos. Os microrganismos nos solos das *wetlands* servem como produtores e decompositores fundamentais que suportam as funções das *wetlands*. No entanto, poucos estudos documentaram as composições dos microrganismos do solo em sistemas de *wetlands* construídas e menos ainda avaliaram como os microrganismos do solo mudam após a construção de *wetlands*. Shiau & Chang (2022) coletaram amostras de solo de quatro *wetlands* construídas de diferentes idades e as analisaram com um método de ácidos graxos fosfolipídicos (PLFA) para mostrar como as comunidades microbianas do solo mudam ao longo do tempo. Os resultados foram que a abundância de bactérias e fungos aumentou com a idade das *wetlands*, e as bactérias representavam cerca de 90% das comunidades microbianas do solo em todas as idades das *wetlands* construídas. Embora as composições das comunidades microbianas tenham permanecido semelhantes entre as *wetlands*, os índices de stress mostraram que o stress microbiano pode ser afetado por alterações na disponibilidade de nutrientes *in situ*, por ex. amônia, nitrato, nitrogênio orgânico solúvel e nitrogênio total dissolvido.

As *wetlands* construídas são também um método eficiente e econômico de restaurar áreas degradadas, nas quais os microrganismos presentes dão uma contribuição significativa para o ecossistema. Deng *et al* (2024) investigaram exaustivamente 7 tipos de *wetlands* construídas e as compararam com arrozais, quanto aos padrões de diversidade nos níveis da rizosfera e da filosfera. Os resultados mostraram que as comunidades da rizosfera das *wetlands* construídas exibiram uma estrutura mais equilibrada do que a dos arrozais, e 5

tipos de *wetlands* construídas demonstraram maior diversidade potencial do que a dos arrozais. No entanto, tendência oposta foi observada para as comunidades da filosfera. Os resultados podem auxiliar na avaliação de tipos de *wetlands* construídas, fornecer melhor compreensão dos processos ecológicos dos consórcios microbianos, e prover novos *insights* sobre a modulação de consórcios microbianos em *wetlands* que recebem águas poluídas.

Hu *et al* (2023) aplicaram uma meta-análise para revisar quantitativamente os principais fatores que influenciam a emissão de GEE de *wetlands* construídas em diferentes locais do planeta (Fig. 3.25). Os autores mediram as emissões de NH₃, Carbono orgânico volátil e H₂S qualitativamente. A meta-análise indica que as *wetlands* de fluxo subterrâneo horizontal emitem menos CH₄ e N₂O do que as *wetlands* de fluxo superficial de água livre. As características das águas residuais afluentes (por exemplo, relação C/N, salinidade) e as condições ambientais (por exemplo, temperatura) também podem impactar as emissões de GEE. A volatilização de NH₃ das *wetlands* é positivamente correlacionada com a concentração de nitrogênio influente e o valor de pH.

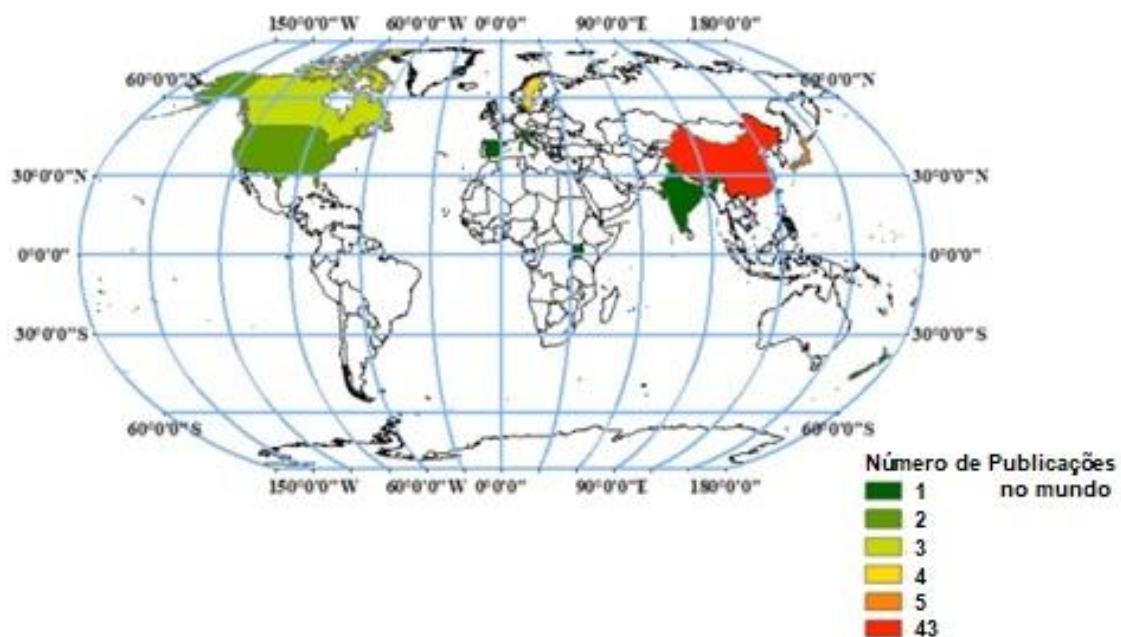


Figura 3.25 – Distribuição de publicações usadas na meta-análise sobre emissão de GEE em *wetlands* construídas (adaptado de Hu *et al* 2023).

A conclusão é de que a alta riqueza de espécies vegetais tende a reduzir a volatilização de NH_3 , a composição das plantas tendo efeitos maiores do que a riqueza de espécies. Embora nem sempre ocorram emissões de H_2S em *wetlands*, isso deve ser observado quando houver influxo de águas residuais com hidrocarbonetos e ácidos.

Yin *et al* (2023) também fizeram uma revisão sobre a emissão de GEE em *wetlands* e caracterizaram os efeitos fonte-sumidouro e os fatores que afetam a emissão de CO_2 , CH_4 e óxido nitroso (N_2O) em *wetlands* construídas (Fig. 3.26).

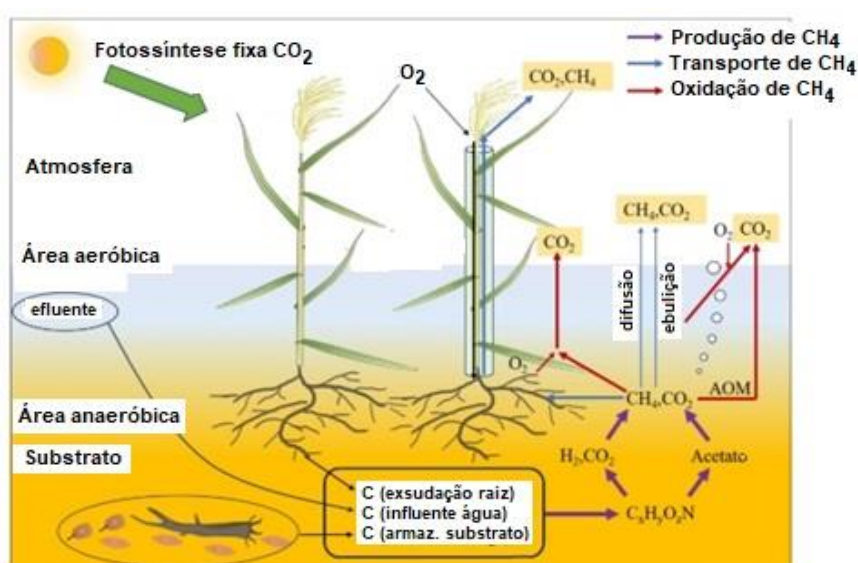


Figura 3.26 – Produção, transporte e oxidação de CH_4 em *wetlands* (adaptado de Yin *et al* 2023).

Os resultados mostram que as *wetlands* podem produzir e transmitir esses GEE para a atmosfera, formando fontes de GEE e sequestrar CO_2 através da fotossíntese das plantas, formando sumidouros de GEE. A diferença no desempenho depende de muitos fatores, como os tipos de plantas usadas, o uso de substratos de adsorção, a temperatura e a relação C/N (quando a relação é de cinco, efeito fonte de GEE é mitigado).

Wang J *et al* (2022) revisaram o conhecimento atual sobre a estrutura e diversidade dos consórcios microbianos nestes ambientes e demonstraram que o principal filo funcional envolvido inclui *Proteobacteria*, *Bacteroidetes*, *Actinobacteria* e *Firmicutes*. Estes microrganismos são funcionais porque podem remover poluentes através de reação catalítica, biodegradação, biossorção e também auxiliam o desenvolvimento vegetal. Entretanto, mostraram que elevadas concentrações de metais pesados, nitrogênio e

fósforo diminuem significativamente a diversidade e população dos consórcios microbianos.

Engida *et al* (2021) revisaram as publicações sobre os consórcios microbianos responsáveis pela remoção de matéria orgânica e nutrientes em *wetlands* construídas. Além disso, analisaram o efeito da presença e ausência de macrófitas e identificaram os principais fenômenos que afetam a dinâmica dos consórcios microbianos, bem como a eficiência de desempenho dos tipos de *wetlands* construídas (Fig. 3.27). Demonstraram que: (i) a remoção de determinados poluentes em cada tipo de *wetland* construída é predominantemente relacionada a um determinado grupo funcional microbiano; e (ii) as *wetlands* construídas com espécies vegetais têm maior densidade e atividade microbiana do que as não plantadas.

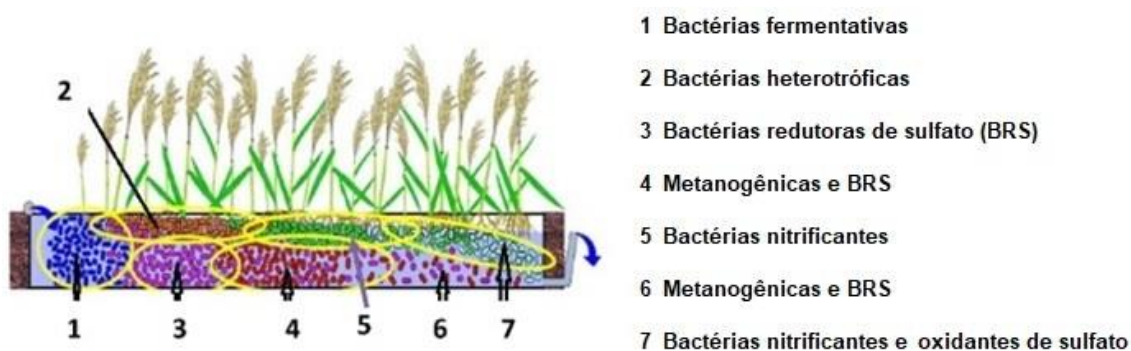


Figura 3.27 – Perfil vertical e horizontal de microrganismos em *wetlands* construídas (adaptado de Engida *et al* 2021).

Portanto, a interação entre raízes de plantas, microrganismos e substratos, ao longo do tempo de operação, parece contribuir para o estabelecimento de diversos consórcios microbianos, existindo grupos funcionais microbianos (como os nitrificantes, desnitrificantes, metanogênicos, etc) responsáveis pela remoção de poluentes específicos. Em resumo, sistemas de fluxo vertical favorecem as populações microbianas aeróbicas, enquanto os sistemas de fluxo horizontal sub-superficial favorecem os microrganismos anaeróbicos. Sistemas híbridos aumentam a eficiência de remoção de poluentes devido à integração de todas as condições redox, com vários grupos funcionais microbianos, e diferentes taxas de carga hidráulica não resultaram em alterações significativas nas comunidades microbianas e na eficiência de remoção. Com o passar do tempo, as

bactérias anaeróbicas predominaram em termos de biomassa total e as bactérias redutoras de sulfato foram as mais abundantes de todos os grupos.

A migração e transformação do enxofre estão intimamente relacionadas com as fontes de carbono. No entanto, é limitado o conhecimento sobre os padrões de co-ocorrência de bactérias relacionadas com o enxofre e outros microrganismos consumidores de carbono em *wetlands* construídas. Wang Q *et al* (2021) avaliaram sedimentos de *wetlands* entremarés, como inoculante microbiano de *wetlands* construídas, para investigar as taxas de remoção de sulfato e demanda química de oxigênio (DQO), a composição da comunidade microbiana e a rede de co-ocorrência. O padrão topológico microbiano revelou que a transferência de massa, de energia e de informação pelos microrganismos de *wetlands* inoculadas foi mais rápida do que nas não inoculadas (tanto no caso de presença ou ausência de vegetação). A análise da rede de co-ocorrência indicou que as bactérias redutoras de sulfato (por exemplo, *Desulfuromonadaceae*) apresentava correlações negativas com bactérias desnitrificantes (por exemplo, *Thauera*, *Flavobacterium* e *Burkholderiaceae*) devido à competição de doadores de elétrons. No entanto, *Flavobacterium* e *Thauera* poderiam cooperar para desnitrificar através de diferentes doadores de elétrons para evitar a competição. Além disso, *Pseudomonas* e *Amaricoccus* tinham alimentação cruzada quando o carbono era restrito.

Wang D *et al* (2023) estudaram o efeito da adição de areias de manganês a versões laboratoriais (mesocosmos) de *wetlands* construídas, com o objetivo de melhorar o desempenho de remoção de micropoluentes orgânicos. Os resultados experimentais mostraram que a adição de areias de manganês pode aumentar significativamente a remoção de micropoluentes (8,48% atrazina, 13,16% atenolol e 6,27% sulfametoxazol). A análise metagenômica indicou que a remoção dos referidos micropoluentes era associada à presença de organismos específicos, que estão presentes tanto no *setup* experimental quanto nas *wetlands* (*Thauera* e *Desulfobulbus* como degradadores de atrazina; *Nitrospira*, como responsável pela biotransformação do atenolol devido à capacidade de oxidação de amônia; e a bactéria SCGC-AG-212-J23 como responsável pela biotransformação de sulfametoxazol). Consequentemente, os autores concluem ser factível na prática em escala real usar os referidos organismos.

Wang JF *et al* (2023) investigaram a viabilidade da aplicação de hidroxiapatita (HA)-cascalho para adsorção de Flúor e metais pesados e seu efeito na redução de NO₃ - -N em

wetlands construídas. Os resultados indicaram que a eficiência de remoção de F, Cr, As e NO_3^- -N aumentou substancialmente a remoção de tais espécies com o uso de hidroxiapatita. Usando abordagem metagenômica, os autores mostraram que genes funcionais chave, incluindo *nirK/nirS*, *korA/korB*, *ChrA/ChrD*, *arsA/arsB*, associados a enzimas que catalisam os processos de biotransformação de nitrogênio, metabolismo energético, redução de NO_3^- -N e íons metálicos também tiveram expressão aumentada quando se acrescentou hidroxiapatita. Em resumo, o estudo fornece novos *insights* sobre como a microbiota responde estrutural e funcionalmente a diferentes substratos em *wetlands* construídas.

3.3.4.1. Alternativa ou complemento às ETEs

As *wetlands* construídas são consideradas Soluções Baseadas na Natureza que podem ser alternativas ou complementos às Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs), sendo particularmente úteis em sistemas coletivos de pequeno porte e pequenas comunidades recebendo esgotos domésticos (von Sperling & Sezerino 2018).

Wetlands construídas também podem ser de grande utilidade em cidades pequenas ou remotas, onde o custo de implantação e/ou operação de uma ETE não é economicamente viável. Neste contexto, Schroeder *et al* (2022) estudaram os custos (tanto CAPEX quanto OPEX) de diferentes sistemas de *wetlands*, concluindo que os custos e requisitos de qualidade de tratamento são as principais restrições encontradas para definir o arranjo tecnológico. Referido estudo comparou sistematicamente a eficiência de tratamento e os custos envolvidos nas tecnologias de filtro anaeróbio (FAN), lodo ativado em batelada (LAB) com três modalidades de *wetlands* construídas, incluindo fluxo vertical (WCV), fluxo horizontal (WCH) e um sistema híbrido com a combinação destes últimos. Em termos de custos operacionais, o sistema WCH apresentou o menor custo (R\$ 7,41 $\text{hab}^{-1}\text{ano}^{-1}$) e o LAB o maior (R\$ 118 $\text{hab}^{-1}\text{ano}^{-1}$), ou seja, quase 16 vezes maior que o custo de operação do referido tipo de *wetland*.

Um detalhado estudo com critérios de dimensionamento usando como premissas as cargas orgânicas e regimes hidráulicos, entre outros fatores, é disponível no trabalho de von Sperling & Sezerino (2018), que enumera os seguintes critérios:

- Cálculos de processo: taxas de aplicação que permitam a determinação da área superficial requerida; critérios para especificação do número de unidades em paralelo a serem adotadas e das principais dimensões das unidades (comprimento, largura, profundidade);
- Detalhes hidráulicos: tubulações de entrada, distribuição, coleta e saída;
- Detalhes do meio filtrante: espessura, granulometria;
- Detalhes construtivos: taludes, borda livre, declividade de fundo, impermeabilização dos taludes e do fundo;
- Plantas: listagem de plantas comumente utilizadas;
- Estratégia operacional: alimentação contínua ou em bateladas (pulsos); eventual alternância entre leitos em paralelo;
- Pré-tratamento requerido;
- Eficiências de remoção esperadas para a etapa de *wetlands* e para o sistema, como um todo: faixas típicas esperadas para esgotos domésticos (não são efetuados cálculos usando modelos matemáticos).

É interessante observar que nenhuma consideração em relação ao impacto dos consórcios microbianos (ou sua modulação) é disponível nos referidos critérios de dimensionamento, o que é consistente com o fato de que este conhecimento é muito mais recente, conforme relatado na revisão de literatura provida acima neste capítulo (Chang *et al* 2021; Wang B *et al* 2021; Wang Y *et al* 2023; Liang *et al* 2023; Bansal *et al* 2023; Zhang *et al* 2023; Hu *et al* 2023). Consequentemente, as considerações feitas nesse capítulo quanto à grande magnitude de impacto dos consórcios microbianos na eficiência de remoção de cargas orgânicas podem e provavelmente devem ser incorporadas aos critérios de projeto e operação de tais sistemas. Efeitos como alteração do regime de fonte ou sumidouro, especialmente na janela temporal dos primeiros 20 anos (na qual o impacto de emissão de metano e outros GEE é mais pronunciado) são alguns que merecem menção.

Estas breves considerações têm conexão com o desenvolvimento sustentável dos recursos costeiros, a exploração ou preservação e regeneração destes ambientes junto ao Mar, integrando a chamada *Blue Economy* ou Economia Azul. Neste contexto, o declínio na saúde dos oceanos (já citado neste capítulo em regiões costeiras, Breitburg *et al* 2018), ensejou a Conferência dos Oceanos das Nações Unidas realizada em Lisboa em 2022, que visou discutir soluções práticas, realistas, econômicas e replicáveis que podem ser adotadas para garantir a saúde dos oceanos. As *wetlands* construídas são particularmente

úteis em ambientes costeiros, devido a questões topográficas e alta densidade populacional - que impacta diretamente tais ambientes.

3.3.4.2. *Wetlands* do Parque Orla Piratininga

O Parque Orla Piratininga Alfredo Sirkis consiste em um parque público na orla da Laguna de Piratininga, Niterói/RJ, totalizando uma área de 680 mil m². O parque foi concebido com o propósito de prover um ambiente que prioriza e aproxima o usuário do meio natural. Sua obra de implantação iniciou no segundo semestre de 2020, com a execução dos projetos de infraestrutura verde (incluindo *wetlands*/jardins filtrantes, vertedouros, bacias de sedimentação e revegetação de áreas degradadas), escavação do terreno para implantação dos três sistemas de *wetlands*/jardins filtrantes da bacia de sedimentação e do vertedouro dos Rios Cafubá, Arrozal e Jacaré (Fig. 3.28), perfazendo 35.290m² de *wetlands* construídas¹⁰⁹.



Figura 3.28 – Vista aérea da região onde ficam as *wetlands construídas* do Parque Orla Piratininga, Niterói/RJ. (Fonte: Pro-sustentável <https://www.prosustentavel.niteroi.rj.gov.br>)

¹⁰⁹ O conjunto contempla três sistemas de *wetlands* construídas: 1) o Sistema Cafubá, que conta com um vertedouro, um tanque de sedimentação e três tanques filtrantes; 2) o Sistema Arrozal, que também conta com um vertedouro, um tanque de sedimentação e três tanques filtrantes; e 3) o Sistema Jacaré, que conta com um vertedouro, dois tanques de sedimentação e onze tanques filtrantes.

Estas *wetlands* são *Constructed Wetlands*, uma vez que não constavam da paisagem natural inicialmente. São também categorizadas como *Soluções Baseadas na Natureza* (SBN), para minimizar o impacto das cargas orgânicas e estimular a integração do cidadão com o ecossistema local. Nesse sistema de *wetlands* construídas, a vegetação é importante elemento funcional. As plantas macrófitas contribuem em múltiplos aspectos, tanto paisagísticos quanto funcionais, provendo habitat para pássaros (Fig. 3.29), absorvendo nutrientes e provendo oxigênio e evapotranspiração pelas folhas.



Figura 3.29 – Martim Pescador - *Megaceryle torquata* (foto do autor).

Quinze diferentes macrófitas são usadas nos sistemas das *wetlands* do Parque Orla Piratininga, conforme sumarizado na Tabela 3.5 (Fonte: Pro-sustentável <https://www.prosustentavel.niteroi.rj.gov.br>).

Tabela 3.5 – Listagem de macrófitas usadas nas *wetlands* do Parque Orla Piratininga.

| | Nome científico | Nome popular | Local |
|----|------------------------------------|---------------------|------------------|
| 1 | <i>Schoenoplectus californicus</i> | Junco | Caf.; Jac.; Arr. |
| 2 | <i>Canna indica</i> var. laranja | Beri | Caf.; Jac.; Arr. |
| 3 | <i>Canna indica</i> var. vermelha | Beri | Caf; Arr. |
| 4 | <i>Cyperus giganteus</i> | Papiro-brasileiro | Caf.; Jac.; Arr. |
| 5 | <i>Cyperus haspan</i> | Papiro-anão | Caf.; Jac.; Arr. |
| 6 | <i>Sagittaria montevidensis</i> | Aguapé-de-fecha | Caf.; Jac.; Arr. |
| 7 | <i>Echinodorus grandifloras</i> | Chapéu-de-couro | Caf.; Jac. |
| 8 | <i>Eleocharis acutângula</i> | Junco “cebola” | Caf.; Jac. |
| 9 | <i>Ludwigia sericea</i> | Cruz-de-malta | Caf. |
| 10 | <i>Crinum americanos</i> | Açucena | Caf. |
| 11 | <i>Cyperus sp.</i> | Tiricão | Caf. |

| | | | |
|----|--------------------------------|--------------------|------------------|
| 12 | <i>Heliconia psittacorum</i> | Helicônia-papagaio | Caf. |
| 13 | <i>Equisetum arvense</i> | Cavalinha | Caf. |
| 14 | <i>Limnocharis flava</i> | Couve-D'água | Caf.; Jac.; Arr. |
| 15 | <i>Schoenoplectus robustus</i> | Junco | Jac. |

* Caf.=Cafubá; Jac.=Jacaré; Arr.=Arrozal

O sistema com o maior número de espécies de macrófitas é o Sistema Cafubá, cuja *Wetland* é ilustrada em mais detalhe na figura 3.30.



Figura 3.30 – Vista aérea do Sistema Cafubá, uma *wetland* do Parque Orla Piratininga. (Fonte: Pro-sustentável <https://www.prosustentavel.niteroi.rj.gov.br>)

As macrófitas também proporcionam habitat para consórcios microbianos na rizosfera, que aceleram a ciclagem de cargas orgânicas/poluentes em simbiose com as plantas, que por sua vez fornecem suporte e oxigênio via difusão radicular. A literatura revisada neste capítulo mostra que os consórcios microbianos formados junto à rizosfera de algumas macrófitas são fundamentais nos processos de ciclagem de matéria orgânica e poluentes (Bashir *et al* 2016; Wang Y *et al* 2023), mas, até o conhecimento do autor, nenhum estudo detalhado sobre estes sistemas foi feito no Brasil (ver, neste contexto, a Fig. 3.25, Hu *et al* 2023).

3.4 Conclusão do Capítulo 3

O recorte temático do estudo de águas interiores tem várias motivações. Seu volume é substancialmente menor do que aquele das águas oceânicas, que são impactadas por diferentes forças e fenômenos. Além disso, pode-se dizer que as águas interiores são mais “íntimas” com os seres humanos, por estarem mais próximas, serem utilizadas com maior intensidade, prestando mais serviços, e por sofrerem proporcionalmente maior impacto das ações antrópicas. Consequentemente, discutir e propor métricas para águas interiores é um desafio que pareceu adequado ao presente estudo.

No capítulo 2 foram discutidas e detalhadas: questões envolvendo métricas de produção de energia renovável, que são métricas predominantemente diretas e para as quais existe arcabouço regulatório e mercado; e métricas relacionadas a gases de efeito estufa (com ênfase no CH₄), para o qual o arcabouço regulatório é mais recente ou ainda em evolução, e o mercado está em fase de aperfeiçoamento. Isso decorre, em parte, do fato de que para certas métricas é possível ou necessária alguma espécie de conversão. Por exemplo, no capítulo 2 foi demonstrado que, para um mesmo projeto, as métricas de créditos de metano são muito mais vantajosas economicamente do que as métricas de energia renovável gerada em geradores a biogás. Isso ilustra uma interessante dimensão do conceito de CONSERVOMETRIA: as métricas serão tão mais fidedignas quanto melhor representarem o conjunto completo de impactos que determinada atitude sustentável ou projeto de conservação proporcionar – e mais atraentes quando trouxerem maior sustentabilidade econômica aos projetos de conservação ambiental.

Neste capítulo, foi demonstrado que o conjunto de serviços prestados pela água é muito vasto, o que traz desafios e oportunidades ao tema. Um dos aspectos relacionado às águas e que vem ganhando força é o conceito de *Blue Carbon* ou Carbono Azul, que pode ser definido simplificadaamente como o carbono capturado por ambientes aquáticos incluindo marinhos (Lai *et al* 2022). Outra definição mais abrangente de Carbono Azul é a do carbono que é capturado da atmosfera e sequestrado em ambientes costeiros e marinhos, predominantemente ecossistemas vegetados como manguezais, pântanos salgados, prados de águas marinhas, e consiste de formas orgânicas e inorgânicas (Nellemann *et al* 2009).

O conceito de *Blue Carbon* ainda está em evolução, mas já está claro que a proporção de

carbono capturado por ambientes aquáticos pode ser ordens de magnitude superior à captura de carbono em florestas, por exemplo (Soares *et al* 2022), o que claramente mostra as grandes oportunidades disponíveis aos formuladores de políticas ambientais ou proponentes de projetos de conservação. Colocado de outra forma, os impactos de conservação em ambientes aquáticos tendem a ser maiores e as oportunidades de captura de valor também o são, ou seja, dois fatores distintos e convergentes que motivam o estudo mais aprofundado deste tipo de ambiente. Além disso, embora o conceito de *Blue Carbon* inclua também águas oceânicas, é bem estabelecido que os grandes *hotspots* de captura de carbono estão em águas interiores, mais especificamente manguezais, *wetlands*, lagunas etc (Fig. 3.31).

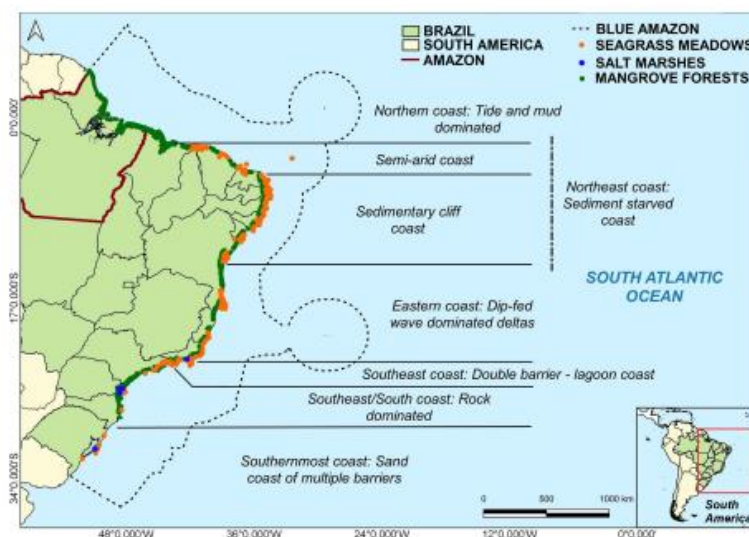


Figura 3.31 - Mapa de distribuição espacial dos principais ecossistemas de carbono azul na costa brasileira. Pontos em laranja, azul e verde indicam ecossistemas de pântanos salgados, prados de águas marinhas e manguezais, respectivamente (Soares *et al* 2022).

Os manguezais e *wetlands* são conhecidos por proporcionar grande captura de carbono e, portanto, podem representar uma forma economicamente eficiente compensação das emissões de carbono. Entretanto, poucos países desenvolveram inventários nacionais adequados destes ambientes nos mercados de créditos de carbono. O Brasil, por exemplo, tem a segunda maior área de manguezais do mundo, mas ainda não aproveita o respectivo potencial de captura de carbono, que é de 8,5% a 13,5% de todo o estoque de carbono de manguezais do planeta. Importante ressaltar que, quando comparado com os biomas vegetais do Brasil (florestas, por exemplo), o estoque de carbono dos manguezais é **4,3 vezes maior** na camada de um metro abaixo do solo, e que deveria ser considerado em projetos de captura devido à sua magnitude (Soares *et al* 2022).

Em alguns casos, ambientes como *wetlands* salinas (influenciadas pela maré) e manguezais podem capturar **até 50 vezes mais carbono** que biomas terrestres florestados tropicais ou temperados, sendo locais que poderiam integrar as estratégias de compensação de emissão de carbono (Mcleod *et al* 2011). Entretanto, tais ecossistemas podem funcionar como fonte ou sumidouro (*source or sink*), dependendo de alguns fatores, como aporte de carga orgânica, disponibilidade de oxigênio, estado trófico, composição e concentração da matéria orgânica nos sedimentos (Fabiano *et al* 1995). Conseqüentemente, o efetivo aproveitamento deste enorme potencial depende do acompanhamento das respectivas métricas e o manejo adequado para maximizar os benefícios. Os experimentos realizados na Laguna de Piratininga, bem como o estudo de literatura de *wetlands* como as de Piratininga, feitos neste capítulo, seguem esta direção.

Neste contexto, e porque a medição direta de gases de saída é viabilizada pelo PULMÃO, sugere-se a **consideração do CH₄ emitido¹¹⁰ como uma das métricas para este tipo de ambiente**, dado o maior impacto de efeito estufa estabelecido no Protocolo de Kyoto (27,9 vezes maior que o do CO₂) e seu valor econômico maior, conforme mostrado no Capítulo 2. Outras métricas a serem consideradas, alinhadas com os resultados experimentais apresentados neste capítulo, incluem a quantidade de oxigênio efetivamente dissolvida¹¹¹ com equipamentos; e os **biopolímeros** (por exemplo carbono biopolimérico) presentes nos sedimentos, uma vez que estes são indicativos do estado trófico e, portanto, da capacidade de ciclagem/degradação de cargas orgânicas (Fabiano *et al* 1995; Silva *et al* 2010).

É importante reiterar que a dinâmica microbiana tem fortes implicações sobre a biogeoquímica no ambiente, e que transições redox podem afetar muito fortemente as emissões de CH₄ (Wilmoth *et al* 2021). Conseqüentemente, as estratégias de manejo, modulação de consórcios microbianos e/ou uso de sistemas de aeração continuada desses ambientes tem grande impacto na CONSERVOMETRIA. Um fator de relevante influência é a presença de íons Fe e seu estado de oxidação nos sedimentos de ecossistemas como os descritos neste capítulo, sendo conhecido da literatura que o ferro

¹¹⁰ Neste caso tendo um estudo prévio do *baseline*, ou seja, das emissões antes de uma intervenção, para viabilizar a contabilização da diferença.

¹¹¹ Ou "*devolvida*" ao corpo líquido após consumo acarretado pelas ações antrópicas, materializando, neste contexto, o conceito de *giveback*. Neste caso, a métrica de O₂ dissolvido ou *devolvido* provavelmente será interconvertida subsequentemente, com base nos efeitos ecossistêmicos gerados.

desempenha importante papel no bloqueio da mineralização de formas orgânicas de nitrogênio para a formação de amônio e formação e acúmulo de íons NH_4^+ (Clément *et al* 2005). O trabalho de Mello (2015) corrobora estes achados e mostra que a nitrificação anaeróbia do amônio a NO_3^- é dependente da produção de oxigênio pela enzima catalase, sendo produzido NH_4^+ (88 – 99% das formas nitrogenadas dissolvidas) nos lagos tropicais estudados. Em tais ambientes, a produção de CO_2 foi até duas vezes maior que a de CH_4 , sendo aparentemente relacionada, entre outros fatores, à equilibrada comunidade microbiana presente no ambiente naturalmente alagado.

Estas considerações mostram que o desenvolvimento de métricas para águas interiores deve levar em consideração não apenas os parâmetros físico-químicos convencionais, mas também os consórcios microbianos presentes, presença ou ausência de oxigênio e elementos que interferem na dinâmica metabólica e vias de oxidação. Quando tomados em conjunto, vários indicadores podem contribuir de formas não lineares para a degradação de matéria orgânica, formação de gases de efeito estufa, bem como no equilíbrio do ecossistema e a multiplicidades de serviços que estes podem prestar. Conseqüentemente, as métricas para as águas interiores têm, de um lado, mais complexidade do que as métricas de outros ecossistemas e, de outro, uma maior magnitude de potencial de captura de valor e de ampliação do conjunto de serviços ecossistêmicos prestados.

Outro aspecto que merece menção é o uso da abordagem de CONSERVOMETRIA como forma de documentar múltiplos parâmetros concomitantemente, formando uma base de dados de indicadores ambientes que é muito útil para estudos, pesquisas, projetos e formulação de políticas. Essa abordagem, quando feita *antes* de intervenções de conservação e/ou recuperação, também pode formar o *baseline* prévio às intervenções, oportunizando comparações mais precisas e avaliações sobre o impacto quantitativo de cada projeto ou cada tecnologia empregada subsequentemente. Conseqüentemente, as métricas devidamente documentadas poderão servir de parâmetros para o desenvolvimento de novas tecnologias para a conservação ou recuperação.

A abordagem de CONSERVOMETRIA, devido à sua intrínseca dimensão econômica de viabilizar a monetização das métricas em si, também pode ser uma nova abordagem de gestão pelo poder público: um modelo segundo o qual a redução do passivo ambiental é monetizada por empresas proponentes de projetos de conservação ou recuperação, de

forma quantitativamente proporcional às correspondentes métricas – *sem com isso demandar investimentos do próprio poder público* (assemelhando-se, em alguns aspectos, ao modelo de concessão ou de parceria público/privada, PPP). Essa inovação em modelos de negócio e/ou em formas de gestão pública é uma dimensão que merece atenção, podendo incluir modelos de captura de valor baseados diretamente nas métricas e/ou nos benefícios reputacionais (Fig. 2.3), modelos de *naming rights* ou de “adoção” de espaços públicos, bem como a monetização direta das métricas com o sistema de tokens proposto. Espera-se, por fim, que o presente trabalho auxilie os formuladores de políticas de conservação e sirva de fonte de informação e estímulo para gestores e proponentes de projetos no setor.

4. CONCLUSÃO GERAL

- São nítidas as dificuldades de proporcionar ou garantir a *validade e confiabilidade dos dados* utilizados nas métricas de sustentabilidade e de comunicar métricas de forma simples a um público abrangente;
- A abordagem de CONSERVOMETRIA é útil para formar bases de dados de indicadores ambientais confiáveis, sendo útil para estudos, pesquisas, projetos e formulação de políticas. Quando feita *antes* de intervenções de conservação e/ou recuperação, pode formar o *baseline* prévio que oportuniza comparações mais precisas e avaliações sobre o impacto quantitativo de cada projeto ou cada tecnologia empregada subsequentemente.
- O CONSERVÔMETRO[®] se mostrou útil para a *automação do processo de obtenção de métricas de conservação*, mediante: (i) integração de meios para o recebimento de informações ou sinais de sensores, que registram dados reais previamente validados ou dados físicos de interesse ambiental medidos automaticamente; e (ii) processamento dos referidos dados/sinais e geração de arquivos de dados das respectivas métricas, que são documentados em rede *blockchain*.
- A CONSERVOMETRIA também demonstrou ser um mecanismo útil para trazer *razão econômica* às atividades de conservação ambiental, para que o valor da conservação ambiental ou mesmo da *informação* sobre a conservação ambiental seja não apenas reconhecido, mas também monetizado, seja através de um modelo baseado em reputação/*naming rights*, seja através da comercialização dos tokens. Esses modelos são alinhados à ODS17 e podem ser interessantes tanto para o poder público quanto para o privado;
- A integração das múltiplas tecnologias desenvolvidas permitiu resolver as atuais dores do mercado de registro de ativos ambientais em *blockchain*. Especificamente, no âmbito do presente trabalho, isso foi feito através da combinação da tecnologia *blockchain* com: o uso do XRPLedger (baixo custo, alta velocidade e escalabilidade); a tecnologia do *Joker* (registro da métrica junto à origem, evitando registro de dados espúrios e minimizando *greenwashing*); e abordagem de Economia Circular Digital (“*triple token approach*”, que proporciona desacoplamento temporal e geográfico entre a tokenização das

métricas e sua comercialização; e o uso de transações do tipo *cross-currency payment*, que não requerem o uso de *smart contracts*).

- Dois estudos de caso de aplicação da plataforma ThingsGo.Online demonstraram sua viabilidade:
 - o 1º caso demonstrou viabilidade técnica em uma unidade de produção de energia solar, mediante a tokenização da energia renovável gerada (em operação já há dois anos), sendo documentados 214,4 MWh de energia renovável (entre 16Mai2022 e 26Fev2024); e
 - o 2º caso demonstrou viabilidade técnica e econômica em uma fazenda em Minas Gerais, onde há produção de biogás com dejetos de animais e geração de energia com um gerador a biogás. Este projeto documentou 372,29 MWh (entre Nov2023 e Fev2024) de geração de energia renovável, correspondentes à não-emissão de 154,6 toneladas de metano na atmosfera no período – abrindo caminho para o bastante atraente mercado de Créditos de Metano, que ainda está em formação;
- As lagunas e *wetlands* foram escolhidas como um dos modelos de estudo devido à elevada produtividade biológica, aos serviços ecossistêmicos prestados e ao grande impacto de geração ou captura de gases de efeito estufa (são *hotspots* de *Blue Carbon*). O fato de poderem atuar como fonte ou sumidouro de carbono e/ou gases de efeito estufa (GEE), a depender em grande parte dos parâmetros e condições em cada local, constitui uma oportunidade diante da maior produtividade e grande potencial de captura de valor;
- Teores de oxigênio dissolvido e consórcios microbianos junto aos sedimentos se mostraram parâmetros muito relevantes para a produtividade biológica em tais ambientes;
- O sulfeto foi detectado (pelo cheiro característico) nas *wetlands* do Parque Orla Piratininga, sendo altamente fitotóxico e modulando a atividade microbiana, podendo também impactar a emissão de metano. Portanto, recomenda-se seu monitoramento por poder afetar o desempenho de ecossistemas como as *wetlands* construídas;
- Os resultados experimentais descritos neste trabalho mostram que o uso de sistemas de aeração contínuos para este tipo de ambiente (Lagunas e *wetlands*) tem grande impacto benéfico. Entretanto, não é recomendado o uso de sistemas

- de aeração intermitentes, pois estes podem privilegiar consórcios microbianos facultativos, que aumentam substancialmente as emissões de metano na fase anaeróbica;
- Os resultados dos experimentos realizados no projeto de pesquisa na Laguna de Piratininga, mesmo em uma janela temporal pequena, mostram que:
 - o uso de microrganismos benéficos (EM) na forma de *Mudballs* é associado a uma redução estatisticamente significativa dos teores de fósforo total nos sedimentos, resultado este surpreendente e que contradiz o paradigma anterior - apontando um novo caminho de remediação deste tipo de ambiente, notadamente no que concerne à eutrofização, problema recorrente em vários ambientes análogos e especificamente no Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu;
 - o uso do sistema de aeração com tecnologia de filmes finos de líquido (PULMÃO), desenvolvido pelo autor, aumenta o impacto dos microrganismos benéficos e é associado a uma redução estatisticamente significativa dos teores de lipídios (e outros biopolímeros) nos sedimentos – outro resultado surpreendente e que contradiz o paradigma anterior. O fato deste efeito ter sido proporcionado com um equipamento de 0,3HP em uma área de 400m² da referida laguna também aponta para a viabilidade do uso da referida tecnologia em maiores escalas;
 - O uso do PULMÃO mostrou-se útil para modular a biogeoquímica em ecossistemas da Laguna, com resultados bastante favoráveis. O referido equipamento pode também vir a ser utilizado nestes ambientes (ou outros, como Estações de Tratamento de Efluentes) para medir diretamente os gases de saída e para registrar, comunicar e/ou tokenizar e monetizar as métricas de redução de GEE, como o CH₄, usando a abordagem de CONSERVOMETRIA
 - Os resultados dos experimentos apontam para a relevância da consideração dos **sedimentos como locais de grande impacto biogeoquímico**, tanto devido aos consórcios microbianos presentes quanto devido à oscilação da disponibilidade de oxigênio, afetando vias de oxidação/redução fundamentais para a ciclagem de cargas orgânicas; São portanto desejáveis métricas específicas para sedimentos;
 - Os resultados também permitem concluir que métricas úteis nestes ambientes incluem: parâmetros como biopolímeros (incluindo lipídios), fósforo (associado

à eutrofização); o nível trófico (influenciado fortemente pela disponibilidade de oxigênio e carga orgânica aportada); os consórcios microbianos presentes; e a presença ou ausência de oxigênio que interfere na dinâmica metabólica e vias de oxidação;

- Quando tomados em conjunto, vários indicadores podem contribuir para a ciclagem da matéria orgânica, captura ou liberação de GEE, bem como no equilíbrio do ecossistema e na multiplicidade de serviços que estes ambientes podem prestar;
- Uma métrica direta sugerida para águas interiores é a emissão de metano, devido à possibilidade de medição automática com sensores, ao grande volume emitido em certas condições, e ao potencial de redução de emissões quando se usa tecnologias mitigadoras;
- Uma outra conclusão relevante decorre dos resultados experimentais e também do extenso levantamento bibliográfico realizado: a análise de sedimentos é fundamental para a efetiva formulação de métricas nestes *hotspots*, porém isso não é refletido nas normativas ambientais no Brasil. A ausência de resoluções de uma legislação federal (como as do CONAMA) particularmente voltadas à qualidade ou saúde dos sedimentos em ecossistemas de águas interiores é um tema que merece reflexão diante do apresentado nesse trabalho;
- Espera-se que o presente trabalho auxilie os formuladores de políticas de conservação e sirva de fonte de informação e estímulo para gestores e proponentes de projetos no setor.

Perspectivas futuras

- Aplicar o conceito de CONSERVOMETRIA em ETEs e/ou instalações industriais, seja em modelos de monetização reputacional como é o caso dos *naming rights* ou assemelhados, seja pela monetização dos CRÉDITOS DE CONSERVAÇÃO®.
- Os conhecimentos adquiridos e consolidados, bem como as tecnologias desenvolvidas no âmbito desta tese, viabilizam uma visão segundo a qual projetos de conservação ou recuperação de ecossistemas de águas interiores (como lagunas, *wetlands*, lagoas e afins) podem ser considerados como atraentes empreendimentos, tanto do ponto de vista reputacional e de conservação da natureza quanto economicamente;
- Diante dos dados disponíveis para o Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu e dos resultados experimentais obtidos pelo autor e colaboradores na Laguna de Piratininga, sugere-se que seja considerado no futuro um projeto específico para o Canal do Camboatá (onde os níveis de fósforo são particularmente elevados), com a aplicação de aeração por tecnologia de filmes finos de líquido e uso de consórcios microbianos benéficos, cujos resultados, aqui mostrados, foram bastante promissores. Um projeto como este pode ser considerado como alternativa à dragagem convencional (que é paliativa) e/ou como abordagem subsequente, para manutenção da qualidade do ecossistema. Além do fósforo e demais indicadores, referido projeto pode idealmente incluir a medição das emissões de metano;
- É premente a realização de estudos metagenômicos nestes tipos de *hotspot* de *Blue Carbon*, sendo sugerida sua realização nas *Wetlands* do Parque Orla Piratininga. De um lado, não são conhecidos até o momento estudos deste tipo no Brasil, de forma que a genômica ambiental nestes ecossistemas brasileiros é essencialmente desconhecida. Os estudos sugeridos certamente serão úteis para melhor compreender as dinâmicas dos consórcios microbianos e as relações de ciclagem de cargas orgânicas e da biogeoquímica nestes ecossistemas.

5. REFERÊNCIAS

Arcenegui, J; Arjona, R; Román, R; Baturone, I. (2021), “Secure Combination of IoT and Blockchain by Physically Binding IoT Devices to Smart Non-Fungible Tokens Using PUFs”. *Sensors*, 21, 3119. <https://doi.org/10.3390/s21093119>

Aylward, B; Bandyopadhyay, J; Belausteguigotia, JC. *et al* (2005), “Freshwater ecosystem services.” *Ecosystems and human well-being: policy responses*, 3, 213-256. https://www.researchgate.net/publication/309903735_Freshwater_ecosystem_services

Aznar-Sánchez, JA; Velasco-Muñoz, Belmonte-Ureña, LJ; Manzano-Agugliaro, F. (2019), “The worldwide research trends on water ecosystem services”. *Ecological Indicators*, Volume 99, pages 310-323, ISSN 1470-160X, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.12.045>

Balmford, A; Bruner, A; Cooper, P; Costanza, R. *et al* (2002), “Economic Reasons for Conserving Wild Nature”. *Science* 297,950-953. [DOI:10.1126/science.1073947](https://doi.org/10.1126/science.1073947)

Bamakan, SMH; Motavali, A; Bondarti AB. (2020), “A survey of blockchain consensus algorithms performance evaluation criteria”. *Expert Systems with Applications*, Volume 154, 113385, ISSN 0957-4174, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113385>

Bansal, S; Creed, IF; Tangen, BA; Bridgham, SD. *et al* (2023) “Practical Guide to Measuring Wetland Carbon Pools and Fluxes”. *Wetlands* (Wilmington) 2023; 43(8): 105. <https://doi.org/10.1007/s13157-023-01722-2>

Barwick, PJ; Li, S; Lin, L; Zou, E. (2020), “From fog to smog: the value of pollution information”. *NBER Work. Pap.* 26541, disponível em: https://www.nber.org/system/files/working_papers/w26541/w26541.pdf

Bashir, O; Kan, K; Hakeem, KR. *et al* (2016), “Soil Microbe Diversity and Root Exudates as Important Aspects of Rhizosphere Ecosystem”. In book: *Plant, Soil and Microbes Volume 2: Mechanisms and Molecular Interactions*, Edition: 2016 Chapter: Soil Microbe Diversity and Root Exudates as Important Aspects of Rhizosphere Ecosystem; Springer DOI: [10.1007/978-3-319-29573-2_15](https://doi.org/10.1007/978-3-319-29573-2_15)

Baumann, KBL; Thoma, R; Callbeck, CM; Niederdorfer, R. *et al* (2022), “Microbial Nitrogen Transformation Potential in Sediments of Two Contrasting Lakes Is Spatially Structured but Seasonally Stable”. *mSphere* 7(1): e01013-21. <https://doi.org/10.1128/msphere.01013-21>

Bini, L. & Bellucci, M. (2020), “Integrated Sustainability Reporting - Linking Environmental and Social Information to Value Creation Processes”. *Springer*, 150 pages <https://doi.org/10.1007/978-3-030-24954-0>

Bledsoe, RB; Goodwillie, C; Peralta, AL. (2020), “Long-Term Nutrient Enrichment of an Oligotroph-Dominated Wetland Increases Bacterial Diversity in Bulk Soils and Plant Rhizospheres”. *mSphere* 5(3): e00035-20. <https://doi.org/10.1128/msphere.00035-20>

Bowen, JL; Giblin, AE; Murphy, AE. *et al* (2020), “Not All Nitrogen Is Created Equal: Differential Effects of Nitrate and Ammonium Enrichment in Coastal Wetlands”. *Bioscience* 70(12): 1108–1119. <https://doi.org/10.1093/biosci/biaa140>

Bradbury, RB; Butchart, SHM; Fisher, B. *et al* (2021), “The economic consequences of conserving or restoring sites for nature”. *Nat Sustain* 4, 602–608. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00692-9>

Breitburg D; Levin, LA; Oschlies, A; Grégoire, M. *et al* (2018), “Declining oxygen in the global ocean and coastal waters”. *SCIENCE* Vol 359, Issue 6371. [DOI: 10.1126/science.aam7240](https://doi.org/10.1126/science.aam7240)

Brown, MT; Campbell, DE; DeVilbiss, C; Ulgiati, C. (2016), “The geobiosphere emergy baseline: A synthesis”. *Ecological Modelling*, Volume 339, Pages 92-95, <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.03.018>

Brown, MT. & Ulgiati, S. (1997), “Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation”. *Ecological Engineering*, v. 9, n. 1-2, p. 51-69. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(97\)00033-5](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(97)00033-5)

Burlum, SK. (2017), “The Race to Protect Our Most Important Natural Resource: Water”. (Livro) Sam Burlum Business Strategy & Consulting Services; Illustrated edition, 168 pag. ISBN-10: 099888720X; ISBN-13: 978-0998887203.

Carvalho, RA. & Remer, RA. (2022), “Dispositivo e Método para Autenticação de Hardware e/ou Software Embarcado”. Pedido de Patente BR102021001278-1.

Cecchetti, AR; Sytsma, A; Stiegler, NA. *et al* (2020), “Use of stable nitrogen isotopes to track plant uptake of nitrogen in a nature-based treatment system”. *Water Res X*. 9: 100070. <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2020.100070>

Cerda, M; Nunes-Barboza, CD; Scali-Carvalho, CN. *et al* (2013), “Nutrient budgets in the Piratininga-Itaipu lagoon system (southeastern Brazil): Effects of sea-exchange management”. *Latin American Journal of Aquatic Research* 41(2):226-238, DOI: [10.3856/vol41-issue2-fulltext-3](https://doi.org/10.3856/vol41-issue2-fulltext-3)

Chang, KY, Riley, WJ, Knox, SH *et al* (2021), “Substantial hysteresis in emergent temperature sensitivity of global wetland CH₄ emissions”. *Nat Commun* 12, 2266. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22452-1>

Chatzigiannakis, E; Jaensson, N; Vermant, J. (2021), “Thin liquid films: Where hydrodynamics, capillarity, surface stresses and intermolecular forces meet”. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, Volume 53, 101441, ISSN 1359-0294, <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2021.101441>.

Clément, JC; Shrestha, J; Ehrenfeld, JG; Jaffé, PR. (2005), “Ammonium oxidation coupled to dissimilatory reduction of iron under anaerobic conditions in wetland soils”. *Soil Biology & Biochemistry* 37; 2323–2328. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.03.027>

Cotovicz, LC; Knoppers, BA; Régia, CR. *et al* (2021), “Eutrophication overcoming carbonate precipitation in a tropical hypersaline coastal lagoon acting as a CO₂ sink (Araruama Lagoon, SE Brazil)”. *Biogeochemistry* 156:231-254, <https://doi.org/10.1007/s10533-021-00842-3>

Coldebella, A; Souza, SNM; Souza, J; Hoheler, AC. (2006), “Viabilidade da Cogeração de Energia Elétrica com Biogás da Bovicultura de Leite”. In *Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural*, Campinas (SP, Brazil) [online]. Available from: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022006000200053&lng=en&nrm=iso.

Cornejo, P; Becker, J; Pagilla, K; Mo, W; Zhang, Q; Mihelcic, JR; Chandran, K; Sturm, B; Yeh, D; Rosso, D. (2019), “Sustainability metrics for assessing water resource recovery facilities of the future”. *Water*, Volume 91, Issue 1, Pages 45-53. <https://doi.org/10.2175/106143017X15131012187980>

Crapez, MAC; Degrave, WMS; Pinto, FN; de Linde, TNMP; Remer, RA; Dias, GTM; Oliveira Filho, SR; Mendes, HV. (2022), “Biodegradação de Matéria Orgânica no Lodo Sedimentado – Definição de Parâmetros na Lagoa de Piratininga/RJ”. *Brazilian Journal Development* Vol. 8 No. 10, 67051–67069. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv8n10-148>

Crapez, MAC. & Krepsky, N. (2021), “Atividade Bacteriana na Baía de Guanabara”. Capítulo do Livro de da Fonseca, EM *et al*, “Baía de Guanabara: um ambiente em transformação” Ape’Ku, 544 p. ISBN 978-65-86657-55-5.

Dalby, FR; Hafner, SD; Petersen, SO; VanderZaag, AC; *et al* (2021), “Understanding methane emission from stored animal manure: A review to guide model development”. *Journal of Environmental Quality* (50):4, pages 817-835; <https://doi.org/10.1002/jeq2.20252>

Daigneault, A; Strong, AL; Meyer, SR. (2021), “Benefits, costs, and feasibility of scaling up land conservation for maintaining ecosystem services in the Sebago Lake watershed, Maine, USA”. *Ecosystem Services*, Volume 48, 101238, ISSN 2212-0416, <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101238>

Davydov, V. and Khalilova. M. (2019), “Business model of creating digital platform for tokenization of assets on financial markets”. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 497 012069 DOI 10.1088/1757-899X/497/1/012069.

de Freitas Netto, SV; Sobral, MFF; Ribeiro, ARB. (2020), “Concepts and forms of greenwashing: a systematic review”. *Environ Sci Eur* 32, 19. <https://doi.org/10.1186/s12302-020-0300-3>

De Keersmaecker, W; Rodríguez-Sánchez, P; Milencović, M; Herold, M; Reiche, J; Verbesselt, J. (2022), “Evaluating recovery metrics derived from optical time series over tropical forest ecosystems”. *Remote Sensing of Environment*, Volume 274, 112991, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.112991>

Dell'Anno, A; Mei, ML; Pusceddu, A; Danovaro, R. (2002), "Assessing the trophic state and eutrophication of coastal marine systems: a new approach based on the biochemical composition of sediment organic matter". *Marine Pollution Bulletin* 44: 611–622. DOI: [10.1016/S0025-326X\(01\)00302-2](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00302-2)

Deng, N; Liu, C; Tian, Y. *et al* (2024), "Assembly processes of rhizosphere and phyllosphere bacterial communities in constructed wetlands created via transformation of rice paddies". *Frontiers in Microbiology* Sec Microbiotechnology vol 15 <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1337435>

Donato, M; Johnson, O; Steven, B; Lawrence, BA. (2020), "Nitrogen enrichment stimulates wetland plant responses whereas salt amendments alter sediment microbial communities and biogeochemical responses". *PLoS One* 15(7): e0235225. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235225>

El-Fadel, M. & Massoud, M. (2001), "Methane emissions from wastewater management". *Environmental Pollution*, Volume 114, Issue 2, Pages 177-185; [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00222-0](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00222-0)

Engida, T; Alemu, T; Wu, J. *et al* (2021), "Microbial community dynamics and activity in constructed wetland treating agro-industrial and domestic wastewater: a review". *Applied Ecology and Environmental Research* 19(4):2667-2687. DOI: http://dx.doi.org/10.15666/aecer/1904_26672687

Ertz, M. & Leblanc-Proulx, S. (2018), "Sustainability in the collaborative economy: A bibliometric analysis reveals emerging interest". *Journal of Cleaner Production*, Volume 196, Pages 1073-1085, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.095>.

Fabiano, M; Danovaro, E; Frascchetti, S. (1995), "A Three-year Time Series of Elemental and Biochemical Composition of Organic Matter in Subtidal Sandy Sediments of the Ligurian Sea (northwestern Mediterranean)". *Continental Shelf Research* 15:11/1, pp 1453-1469 [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(94\)00088-5](https://doi.org/10.1016/0278-4343(94)00088-5)

Fernandes, RM; Carvalho, RA; Gonçalves Jr, MJR; Gama, HS; Gonçalves, JMB; Remer RA. (2023), "Dispositivo e Sistema para Medição de Grandezas, Tratamento de Dados e Integração com Sistema de Emissão de Ativos Digitais ou Tokens". Pedido de Patente BR102022003697-7.

Ferrara, G; Messina, F; De Benedetti, M; Santoro, C. (2022), "Physical Assets Tokenization for Blockchain Market". In: Camacho, D., Rosaci, D., Sarné, G.M.L., Versaci, M. (eds) *Intelligent Distributed Computing XIV*. IDC 2021. *Studies in Computational Intelligence*, vol 1026. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96627-0_25

Fick A (1855), "Ueber Diffusion". *Annalen der Physik*. **94** (1):59-86. [Bibcode:1855AnP...170...59F. doi:10.1002/andp.18551700105.](https://doi.org/10.1002/andp.18551700105)

Fick A (1855). "On liquid diffusion". *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. **10** (63): 30–39. [doi:10.1080/14786445508641925.](https://doi.org/10.1080/14786445508641925)

- Frank, AG; DalleMolle, N; Gerstlberger, W; Bernardi, JAB; Pedrini, DC. (2016), “An integrative environmental performance index for benchmarking in oil and gas industry”. *Journal of Cleaner Production*, v. 133, p. 1190-1203. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.064>
- Fukuda, K; Ogawa, M; Taniguchi, H; Saito, M. (2016), “Molecular Approaches to Studying Microbial Communities: Targeting the 16S Ribosomal RNA Gene”. *J UOEH*. 38(3):223-32. <https://doi.org/10.7888/juoeh.38.223>
- Fukugawa, M; Hadano, K; Fujisato, T; Fujisato, R. (2004), “Method, device, and system for controlling dissolved amount of gas”. International Patent Application published as WO2004071635.
- Furnari, S; Lener, R. (2022), “Token, tokenization and sustainable development“. *Law & Digital Technologies*, Vol. 2. – № 1 C. 16-23, DOI: [10.18254/S278229070019696-1](https://doi.org/10.18254/S278229070019696-1)
- Garcia-Teruel, RM; Simón-Moreno, H. (2021), “The digital tokenization of property rights. A comparative perspective”. *Computer Law & Security Review*, volume 41, 105543, ISSN 0267-3649, <https://doi.org/10.1016/j.clsr.2021.105543>
- Greblunas, BD. & Perry, WL. (2016), “The role of C:N:P stoichiometry in affecting denitrification in sediments from agricultural surface and tile-water wetlands”. *Springerplus* 5:359. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-1820-6>
- Gonserkewitz, P; Karger, E; & Jagals, M. (2022), “Non-fungible tokens: Use cases of NFTs and future research agenda”. *Risk Governance and Control: Financial Markets & Institutions*, 12(3), 8–18. <https://doi.org/10.22495/rgcv12i3p1>
- Guo, D. & Zhou, P. (2023), “The evolution of financial market infrastructure: from digitalization to tokenization”. *International Journal of Innovation and Entrepreneurship* 2 (1), 2. [10.56502/IJIE2010002](https://doi.org/10.56502/IJIE2010002)
- Han, X; Tolu, J; Deng, L; Fiskal, A. *et al* (2022), “Long-term preservation of biomolecules in lake sediments: potential importance of physical shielding by recalcitrant cell walls”. *PNAS Nexus*, Volume 1, Issue 3, <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgac076>
- Handelsman, J; Rondon, MR; Brady, SF. *et al* (1998), “Molecular biological access to the chemistry of unknown soil microbes: a new frontier for natural products”. *Chemistry & Biology*. 5 (10): R245-9. [https://doi.org/10.1016/s1074-5521\(98\)90108-9](https://doi.org/10.1016/s1074-5521(98)90108-9)
- Hasheminasab, H; Gholipour, Y; Kharrazi, M; Streimikiene, D. (2018), “A novel Metric of Sustainability for petroleum refinery projects”. *Journal of Cleaner Production*, v. 171, p. 1215-1224. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.223>
- Heines, R; Dick, C; Pohle, C; Jung, R. (2021), "The Tokenization of Everything: Towards a Framework for Understanding the Potentials of Tokenized Assets". *PACIS 2021 Proceedings*. 40. <https://aisel.aisnet.org/pacis2021/40>
- Higa, T. (1998), “Effective Microorganisms. For Sustainable Agriculture and Healthy Environment”. *Jan van Arkel, Utrecht*, 191 pp.

Hodson, EL; Poulter, B; Zimmermann, NE; Prigent, C; Kaplan, JO. (2011), “The El Niño–Southern Oscillation and wetland methane interannual variability”. *Geophysical Research Letters* Vol 8, Issue 8 <https://doi.org/10.1029/2011GL046861>

Hou, D; Ma, W; Zhang, W; Li, Y; Du, Y; Hao, Y. (2023), “An on-chain trading model of real world asset backed digital assets”. *IET Blockchain* 00, 1-9. <https://doi.org/10.1049/blc2.12045>

Hu, S; Zhu, H; Bañuelos, G. *et al* (2023), “Factors Influencing Gaseous Emissions in Constructed Wetlands: A Meta-Analysis and Systematic Review”. *Int J Environ Res Public Health* 20(5): 3876. <https://doi.org/10.3390/ijerph20053876>

Iram, N; Maher, DT; Lovelock CE. *et al* (2022), “Climate change mitigation and improvement of water quality from the restoration of a subtropical coastal wetland”. *Ecol Appl.* 32(5): e2620. <https://doi.org/10.1002/eap.2620>

Jayachandran, S. (2022), “How Economic Development Influences the Environment”. *Annual Review Economics*, vol 14:229-252; <https://doi.org/10.1146/annurev-economics-082321-123803>

Jordão, EP & Pessoa, CA. (2011), “Tratamento de esgotos domésticos”. 6a Ed. ABES, 1050 p. ISBN 8570221193, 9788570221193

Kaczorowska, J; Rejman, K; Halicka, E; Szczybyło, A; Górską-Warsewicz, H. (2019), “Impact of Food Sustainability Labels on the Perceived Product Value and Price Expectations of Urban Consumers”. *Sustainability*, 11(24), 7240; <https://doi.org/10.3390/su11247240>

Kareiva, P. & Marvier, M. (2012), “What Is Conservation Science?”. *BioScience*, Volume 62, Issue 11, Pages 962–969, <https://doi.org/10.1525/bio.2012.62.11.5>

Kaye, GWC. & Laby, TH. (1986), "Tables of Physical and Chemical Constants". 15th ed., Longman, NY, p. 219. <https://archive.org/details/tablesophysical004093mbp>

Keith, M. (2020), “Cryptography: The Key to Digital Security, How It Works, and Why It Matters”. W.W. Norton (ISBN 9781324004295).

Koffi, EN; Bergamaschi, P; Alkama, R; Cescatti, A (2020), “An observation-constrained assessment of the climate sensitivity and future trajectories of wetland methane emissions”. *SCIENCE ADVANCES* Vol 6, Issue 15; DOI: [10.1126/sciadv.aay4444](https://doi.org/10.1126/sciadv.aay4444)

Kohli, V; Chakravarty, S; Chamola, V; Sangwan, KS; Zeadally, S. (2023), “An analysis of energy consumption and carbon footprints of cryptocurrencies and possible solutions”. *Digital Communication and Networks* Vol 9: 79-89. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2022.06.017>

Lai, Q; Ma, J; He, F; Zhang, D. *et al* (2022), “Research development, current hotspots, and future directions of blue carbon: a bibliometric analysis”. *Water*, 14 (8) p. 1193 <https://doi.org/10.3390/w14081193>

Lamers, LPM; Govers, LL; Janssen, ICJM. *et al* (2013), "Sulfide as a soil phytotoxin - a review". *Front Plant Sci.* 4: 268. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00268>

Lamers, LPM; van Diggelen, JMH; Op den Camp, HJM. *et al* (2012), "Microbial Transformations of Nitrogen, Sulfur, and Iron Dictate Vegetation Composition in Wetlands: A Review". *Front Microbiol.* 2012; 3: 156. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00156>

Leiserowitz, AA; Kates, RW; Parris, TM (2006), "Sustainability Values, Attitudes, and Behaviours: A Review of Multinational and Global Trends". *Annual Review of Environment and Resources* Vol 31:413-444; <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.31.102505.133552>

Li, Y; Tian, H; Yao, Y. *et al.* (2024), "Increased nitrous oxide emissions from global lakes and reservoirs since the pre-industrial era". *Nat Commun* **15**, 942. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-45061-0>

Li, Y; Zheng, L; Zhang, Y; Liu, H; Jing, H. (2019), "Comparative metagenomics study reveals pollution induced changes of microbial genes in mangrove sediments". *Sci Rep.* 9:5739. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42260-4>

Liang, S; Li, H; Wu, H; Yan, B; Song, A. (2023), "Microorganisms in coastal wetland sediments: a review on microbial community structure, functional gene, and environmental potential". *Front Microbiol.* 14:1163896. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1163896>

Linde, TNMP; Pinto, FN; Mendes, HV; Crapez, MAC. (2022), "Microorganisms for Environmental Sustainability". *Brazilian J. Development.* v.8, n.3, p.17890-17904. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv8n3-158>

Liu, T; Yu, L; Chen, X; Wu, H; Lin, H; Li, C; Hou, J. (2023), "Environmental laws and ecological restoration projects enhancing ecosystem services in China: A meta-analysis". *J Environ Manag.* 327:116810. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116810>

Lo, SK; Xu, X; Chian, YK; Lu, Q. (2017), "Evaluating Suitability of Applying Blockchain". *22nd International Conference on Engineering of Complex Computer Systems (ICECCS)*, Fukuoka, Japan". pp. 158-161, <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:3436616>

Lobo, M; Loureiro, D; Nepomuceno, A; Alves L; Lamego, F. (2023), "Phosphorus spatial distribution and mass balance in the Itaipu lagoon (Rio de Janeiro, Brazil)". *Ocean and Coastal Research* 71 <https://doi.org/10.1590/2675-2824071.21092ml>

Mallick, S; Hussein, F; Husted, S. *et al* (2022), “Adsorption of Recalcitrant Phosphorus Compounds Using the Phosphate-Selective Binding-Protein Pst^s”. *Chemosphere* Volume 304, 135311, <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4087420>

Mar, A; Unger, C; Walderdorff, L; Buttler, T. (2022), “Beyond CO₂ equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health”. *Environmental Science & Policy* Volume 134, Pages 127-136; <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.03.027>

McLeod, E; Chmura, GL; Bouillon, S. *et al* (2011), “A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂”. *Frontiers in Ecology and the Environment* 9(10):552-560. <https://doi.org/10.1890/110004>

Meider, E. (2023), “Crypto Currencies: Speculative Bubble or Disruptive Technology?”. In: Užík, M., Schmitz, C., Block, S. (eds) *Financial Innovation and Value Creation. Financial Innovation and Technology*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22426-3_2

Melchior C; Henriqson, E. (2020), “Revisão Sistemática de Literatura Sobre Métricas de Sustentabilidade / Systematic Literature Review on Sustainability Metrics”. *Rev. FSA, Teresina*, v. 17, n. 2. DOI: <http://dx.doi.org/10.12819/2020.17.2.2>

Melchior, D. (2014), “The Fundamental Principles of Metrics”. *Shared Services and Outsourcing Network (SSON)* disponível em: <https://www.ssonetwork.com/shared-services/articles/the-fundamental-principles-of-metrics>

Mello, RC. (2015), “Produção de CO₂ e CH₄ por degradação anaeróbia relacionada à decomposição da matéria orgânica em dois lagos tropicais”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Programa de Pós-Graduação em Geociências. https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/1608/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Raquel%20C.%20de%20Mello%20doc._BGQ2.pdf?sequence=1

Mitoulis, AS; Bompa, DV; Argyroudis, S (2023), “Sustainability and climate resilience metrics and trade-offs in transport infrastructure asset recovery”. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 121, 103800. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103800>

Naveena Pai, G; Swathi Pai, M; Dankan, GV.; Shruthi, M; Naveen KB (2020), "Internet of Things: A Survey on Devices, Ecosystem, Components and Communication Protocols". *4th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, Coimbatore, India, 2020, pp. 611-616, DOI: [10.1109/ICECA49313.2020.9297458](https://doi.org/10.1109/ICECA49313.2020.9297458)

Nellemann, C; Corcoran, E; Duarte, CM. *et al* (2009), “Blue Carbon. A Rapid Response Assessment. GRID-Arendal: *United Nations Environment Programme, GRID-Arendal* (Norway: Birkeland Trykkeri AS).

Ni, Z; Li, Y; Wand, SR. (2022), “Cognizing and characterizing the organic phosphorus in lake sediments: Advances and challenges”. *Water Research* 220(1):118663 DOI: [10.1016/j.watres.2022.118663](https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118663)

Nicholson, E; Watermeyer, KE; Rowland, JA. *et al* (2021), “Scientific foundations for an ecosystem goal, milestones and indicators for the post-2020 global biodiversity framework”. *Nat Ecol Evol* 5, 1338–1349. <https://doi.org/10.1038/s41559-021-01538-5>

Noyes, AA & Whitney, WR. (1897), “The rate of solution of solid substances in their own solutions.” *Journal of the American Chemical Society* 19: 930-934. <https://doi.org/10.1021/JA02086A003>

Oliveira, IGS. (2023), “Créditos de Metano: um Instrumento para Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa Provenientes de Resíduos Sólidos”. *Revista de Ciências Jurídicas e Sociais* 4(1):69-85; <https://doi.org/10.47595/cjsiurj.v4i1.140>

Patterson, TM. (2011), ”Ecosystem Services”. Wiley Online Library. <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0021902>

Pendse, MK; Nerlekar, VS; Darda, P. (2023), "A comprehensive look at Greenwashing from 1996 to 2021: a bibliometric analysis". *Journal of Indian Business Research*, Vol. 15 No. 1, pp. 157-186. <https://doi.org/10.1108/JIBR-04-2022-0115>

Perry, J. & Vanderklein, EL. (2009), “Water Quality: Management of a Natural Resource”. Livro, John Wiley & Sons, 656 pags;

Pietrangelo, L; Bucci, A; Maiuro, L; Bulgareli, D; Naclerio, G. (2018), “Unraveling the Composition of the Root-Associated Bacterial Microbiota of *Phragmites australis* and *Typha latifolia*”. *Front. Microbiol. Sec. Plant Pathogen Interactions*, Volume 9 – 2018; <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01650>

Pu, X; Ding, W; Ye, WG; Nan, X.; Lu, R. (2023), “Ecosystem service research in protected areas: A systematic review of the literature on current practices and future prospects”. *Ecological Indicators*, Volume 154, 110817, ISSN 1470-160X, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110817>

Rankin, D. (2011), “The social side of *Homo economicus*”. *Trends Ecol Evol* 26(1):1-3; doi: [10.1016/j.tree.2010.10.005](https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.10.005)

Remer, RA. & Carvalho, RA. (2022), “Dispositivo e Método para Autenticação de Hardware e/ou Software Embarcado”. Pedido de Patente BR102021001278-1.

Remer, RA; Carvalho, RA; Mendes, HV; Degrave, WMS. (2021), “Conservômetro, Equipamento e Sistema para Transdução de Sinal e para a Documentação de Métricas de Conservação e/ou Recuperação de Ativos Ambientais”. Pedido de Patente BR102019021409-0.

Remer, RA. & Degrave, WMS. (2017), “Equipamento para a Modulação de Consórcios Microbianos para Aplicações Ambientais, Uso de Subsistema Ex-situ para Modulação de Consórcios Microbianos e Processo para Modulação Ex-situ de Consórcios

Microbianos”. Patente BR112016018887-0, publicada em 21Fev2017 e concedida em 05Jun2018.

Remer, RA. & Degrave, WMS. (2018), “Equipamento e Processo para Dissolução Massiva de Gases em Líquidos”. Patente BR 112017023185-9, depositada no INPI em 28Abr2016, publicada em 31Jul2018 e concedida em 14Abr2020.

Remer, RA; Degrave, WMS; Mendes, HV. (2021), “Difusor para Transferência de Massa Gás-líquido e Processo de Fabricação do Mesmo”. Patente BR102018072624-2, publicada em 11Mai2021 e concedida em 31Ago2022.

Remer, RA; Degrave, WMS; Mendes, HV. (2021), “Processo para Minimização da Poluição de Águas de Rios, Águas Costeiras ou Oceânicas”. Pedido de Patente BR 102020005205-5.

Remer, RA; Degrave, WMS; Mendes, HV; Carvalho CEMV. (2021), “Barco Aerador e Processo para Monitoramento e/ou Conservação de Corpos Líquidos”. Patente BR102020001599-0, publicada em 03Out2021 e concedida em 16Abr2024.

Remer, RA; Degrave, WMS; Mendes, HV; Crapez, MAC. (2024), “Equipamento e Processo para a Transferência de Massa, Difusor, Tubo de Venturi Invertido Processo para a Conservação ou Recuperação de um Corpo Líquido”. Pedido de patente BR102023020701-4.

Remer, RA; Fernandes, RM; Carvalho, RA (2023), “Sistema e Método Integrado para a Emissão de Ativos Digitais ou Tokens Lastreados em Métricas de Conservação Autenticadas”. Pedido de Patente BR102022003708-6.

Remer, RA; Fernandes, RM; Carvalho, RA (2024), “Método, Dispositivo e Sistema para Medição do Desempenho de Processos e/ou para Automação de Procedimentos de Certificação”. Pedido de Patente BR102023004992-3.

Remer, RA; Pinto, FN; Mendes, HV; Degrave, WMS; Crapez, MAC. (2024), “Redução de fósforo e lipídios em sedimento de ecossistema salobro com as tecnologias de PULMÃO e microrganismos probióticos”. *Em submissão*

Richardson, DC; Holgerson, MA; Farragher, MJ. *et al* (2022), “A functional definition to distinguish ponds from lakes and wetlands”. *Sci Rep.* 12: 10472. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14569-0>

Rieder, J; Kapopoulou, A; Bank, C; Adrian-Kalchhauser, I. (2023), “Metagenomics and metabarcoding experimental choices and their impact on microbial community characterization in freshwater recirculating aquaculture systems”. *Environ Microbiome* 18: 8. <https://doi.org/10.1186/s40793-023-00459-z>

Rosa, R; Pini, M; Cappucci, GM; Ferrari, AM. (2022), “Principles and indicators for assessing the environmental dimension of sustainability within green and sustainable chemistry”. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, Volume 37, 100654, <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100654>.

Rovai AS; Twilley RR; Worthington TA. & Riul P. (2022), “Brazilian Mangroves: Blue Carbon Hotspots of National and Global Relevance to Natural Climate Solutions”. *Front. For. Glob. Change* 4:787533. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.787533>

Sabadini-Santos, E; Senez, TM; Silva, TS; Moreira, MR; Santelli, RE; Crapez, MAC. (2014), “Organic matter and pyritization relationship in recent sediments from a tropical and eutrophic bay”. *Marine Pollution Bulletin* 89:220–228. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.09.055>

Santos, C; Coelho, A. & Marques, A. (2023), “A systematic literature review on greenwashing and its relationship to stakeholders: state of art and future research agenda”. *Manag Rev Q* 2023. <https://doi.org/10.1007/s11301-023-00337-5>

Santos, IFS; Vieira, NDB; Nobrega, LGB; Barros, RM; Tiago Filho, GL. (2018), “Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement”. *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 131, Pages 54-63, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.012>

Sarkar, S. (2005), “*Biodiversity and Environmental Philosophy: An Introduction*”. Cambridge University Press.

Satterfield T; Gregory, R; Klain, S; Roberts, M; Chan, KM. (2013), “Culture, intangibles and metrics in environmental management”. *Journal of Environmental Management*, Volume 117, Pages 103-114. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.11.033>

Schroeder, AK; Pelissari, C; Pereira, LD; Sezerin, PH, (2022), “Avaliação de desempenho e custos aplicada aos *wetlands* construídos e tecnologias normatizadas empregadas no tratamento descentralizado de esgoto”. *Revista DAE* v. 70, n 236, pp 67-78. <https://doi.org/10.36659/dae.2022.036>

Self, J. (2004), "Metrics and management: applying the results of the balanced scorecard". *Performance Measurement and Metrics*, Vol. 5 No. 3, pp. 101-105. <https://doi.org/10.1108/14678040410570111>

Sheldon, RA. (2007), “The E Factor: fifteen years on”. *Green Chemistry*, vol 9, pp. 1273-1283, <https://doi.org/10.1039/B713736M>

Shiau, YJ; & Chang, ED. (2022), “Microbial community development in tropical constructed wetland soils in Taiwan”. *Science of the Total Environment* 812, 152563. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152563>

Siew, RYJ. (2015), “A review of corporate sustainability reporting tools (SRTs)”. *Journal of Environmental Management*, Volume 164, Pages 180-195, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.09.010>

Silvestre, CP. & Silva, ALC. (2016), “Lagunas Costeiras Fluminenses”. XI SINAGEO, Maringá/PR. <https://www.sinageo.org.br/2016/trabalhos/7/7-461-910.html>

- Soares, MO; Bezerra, LEA; Copertino, M; Lopes BD. *et al* (2022), "Blue Carbon Ecosystems in Brazil: Overview and an Urgent Call for Conservation and Restoration". *Front. Mar. Sci.* 9:797411. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.797411>
- Song, J ; Huang, B ; Li, R. (2017), "Measuring Recovery to Build up Metrics of Flood Resilience Based on Pollutant Discharge Data: A Case Study in East China. *Water* 2017, 9(8), 619; <https://doi.org/10.3390/w9080619>
- Sorensen, D. (2023), "Tokenized Carbon Credits". *Ledger* Vol 8:76-91 <https://doi.org/10.5195/ledger.2023.294>
- Soued, C; Bogard, MJ; Finlay, K. *et al* (2024), "Salinity causes widespread restriction of methane emissions from small inland Waters". *Nat Commun.* 15: 717. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-44715-3>
- Staponites, LR; Barták, V; Bílý, M. *et al.* (2019), "Performance of landscape composition metrics for predicting water quality in headwater catchments". *Sci Rep* 9, 14405. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50895-6>
- Summons, R; Welander, PV; Gold, DA. (2022), "Lipid biomarkers: molecular tools for illuminating the history of microbial life". *Nature Reviews Microbiology* volume 20, pages174–185, <https://doi.org/10.1038/s41579-021-00636-2>
- Thoral, F; Montie, S; Thomsen, M.S. *et al.* (2022), "Unravelling seasonal trends in coastal marine heatwave metrics across global biogeographical realms". *Sci Rep* 12, 7740. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11908-z>
- Timpana-Padgham, BL; Beechie, T; Klinger, T. (2017), "A systematic review of ecological attributes that confer resilience to climate change in environmental restoration". *PLoS ONE* 12(3): e0173812. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0173812>
- Trost, BM. (1991), "The Atom Economy — A Search for Synthetic Efficiency". *Science*, Vol 254, Issue 5037, pp. 1471-1477, [DOI: 10.1126/science.1962206](https://doi.org/10.1126/science.1962206)
- Tumas, V. (2023), "Multi-layer security analysis of the XRP Ledger". Tese de doutorado na Universidade de Luxemburgo; disponível em https://orbilu.uni.lu/bitstream/10993/57178/1/Magnum_Opus_Vito_Tumas_-1.pdf
- Valente, RA; Mello, K; Metedieri, JF; Américo, C. (2021), "A multicriteria evaluation approach to set forest restoration priorities based on water ecosystem services". *Journal of Environmental Management*, Volume 285, 112049, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112049>
- Venkiteshwaran, K; Kennedy, E; Graeber, C. *et al* (2021), "Conversion of soluble recalcitrant phosphorus to recoverable orthophosphate form using UV/H₂O₂". *Chemosphere*, Volume 278, 130391, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130391>

von Sperling, M. & Sezerino, PH. (2018), “Dimensionamento de wetlands construídos no Brasil”. *Boletim Wetlands Brasil*, Edição Especial, dezembro/2018. 65 p. ISSN 2359-0548. <http://gesad.ufsc.br/boletins/>

Wallenius, AJ; Martins, PD; Slomp, CP; Jetten, MSM. (2021), “Anthropogenic and Environmental Constraints on the Microbial Methane Cycle in Coastal Sediments”. *Front Microbiol.* 12: 631621. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.631621>

Wang, B; Zheng, X; Zhang, H. *et al* (2021), “Metagenomic insights into the effects of submerged plants on functional potential of microbial communities in wetland sediments”. *Mar Life Sci Technol.* 3(4): 405–415. <https://doi.org/10.1007%2Fs42995-021-00100-3>

Wang, D; Ma, Q; Lin, H. *et al* (2023), “Enhancement of micropollutant biotransformation by adding manganese sand in constructed wetlands”. *Heliyon* 9(4): e15092. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15092>

Wang, J; Long, Y; Yu, G. *et al* (2022), “A Review on Microorganisms in Constructed Wetlands for Typical Pollutant Removal: Species, Function, and Diversity”. *Front. Microbiol., Sec. Microbiotechnology* Volume 13; <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.845725>

Wang, J; Wang J; Zhang, Z. *et al* (2020), “Shifts in the Bacterial Population and Ecosystem Functions in Response to Vegetation in the Yellow River Delta Wetlands”. *mSystems* 5(3): e00412-20. <https://doi.org/10.1128/msystems.00412-20>

Wang JF; Zhou, HZ; Tang, GH. *et al* (2023), “Reducing the inhibitive effect of fluorine and heavy metals on nitrate reduction by hydroxyapatite substrate in constructed wetlands”. *Journal of Hazardous Materials* 446, 130692. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130692>

Wang, L; Liu, J; Zhang, M; Wu, T; Chai, B. (2023), “Ecological Processes of Bacterial and Fungal Communities Associated with *Typha orientalis* Roots in Wetlands Were Distinct during Plant Development”. *Environmental Microbiology* Vol. 11, No. 1. DOI: <https://doi.org/10.1128/spectrum.05051-22>

Wang, L; Li, W; Weng, J. *et al.* (2023), “Do low-carbon rewards incentivize people to ridesplitting? Evidence from structural analysis”. *Transportation* **50**, 2077–2109. <https://doi.org/10.1007/s11116-022-10302-y>

Wang Q; Zhou G; Qin Y. *et al* (2021), “Sulfate removal performance and co-occurrence patterns of microbial community in constructed wetlands treating saline wastewater”. *Journal of Water Process Engineering* Volume 43, 102266, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102266>

Wang, X; McCarty, PL; Lui, J ; Qu, J. (2015), “Probabilistic evaluation of integrating resource recovery into wastewater treatment to improve environmental sustainability”. *PNAS*, 112 (5) 1630-1635. <https://doi.org/10.1073/pnas.1410715112>

- Wang, Y; Bai, J; Zhang, J. *et al* (2023), “Advances in studies on the plant rhizosphere microorganisms in wetlands: A visualization analysis based on CiteSpace,”. *Chemosphere* Volume 317, 137860, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137860>
- Watson, EB; Hinojosa-Corona, A; Krause, JR. *et al* (2022), “Lagoon Biogeochemical Processing is Reflected in Spatial Patterns of Sediment Stable Isotopic Ratios”. *J. Mar. Sci. Eng.* 8(11), 874; <https://doi.org/10.3390/jmse8110874>
- Whiting GJ & Chanton JP. (2003), “Greenhouse carbon balance of wetlands: methane emission versus carbon sequestration” *Tellus B*, Vol 53, Issue 5, Pages 521-528; <https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.2001.530501.x>
- Wilmoth, JL; Schaefer, JK; Schlesinger, DR. *et al* (2021), “The role of oxygen in stimulating methane production in wetlands”. *Glob Chang Biol.* 2021 Nov; 27(22): 5831–5847. <https://doi.org/10.1111/gcb.15831>
- Xiong, H; Chen, M; Wu, C; Zhao, Y; Yi, W. (2022), "Research on Progress of Blockchain Consensus Algorithm: A Review on Recent Progress of Blockchain Consensus Algorithms". *Future Internet* 14, no. 2: 47. <https://doi.org/10.3390/fi14020047>
- Yang, Q; Chen, S; Li, Y; Liu, G; Ran, L. (2024), “Carbon Emissions From Chinese Inland Waters: Current Progress and Future Challenges”. *JGR Biogeosciences* Vol 129 issue 2. <https://doi.org/10.1029/2023JG007675>
- Yang, Z; Nguyen, TTH; Nguyen, HN; Nguyen, TTN; & Cao, TT. (2020), “Greenwashing behaviours: causes, taxonomy and consequences based on a systematic literature review”. *Journal of Business Economics and Management*, 21(5), 1486-1507. <https://doi.org/10.3846/jbem.2020.13225>
- Yin, X; Jiang, C; Xu, S. *et al* (2023), “Greenhouse Gases Emissions of Constructed Wetlands: Mechanisms and Affecting Factors”. *Water* 15, 2871. <https://doi.org/10.3390/w15162871>
- Zank, JCC; Brandt, LS; Bezerra, RC; Pereira, EN. (2020), “As características do biogás e avaliação de substituição de combustíveis”. *Exacta* 18(3):502-516; doi [10.5585/exactaep.v18n3.10802](https://doi.org/10.5585/exactaep.v18n3.10802)
- Zhang, N; Gao, F; Cheng, S. *et al* (2022), “Mn oxides enhanced pyrene removal with both rhizosphere and non-rhizosphere microorganisms in subsurface flow constructed wetlands”. *Chemosphere* 307, 135821. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135821>
- Zhang, Z, Poulter, B, Feldman, AF *et al.* (2023), “Recent intensification of wetland methane feedback. *Nat. Clim. Chang.* 13, 430–433. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01629-0>
- Zhou, X; Johnson, SE; Bogard, MJ. (2023), “Organic matter cycling in a model restored wetland receiving complex effluent”. *Biogeochemistry* 162(2): 237–255. <https://doi.org/10.1007/s10533-022-01002-x>

Zhu, B; Karwautz, C; Andrei, S. *et al* (2022), “A novel *Methylomirabilota* methanotroph potentially couples methane oxidation to iodate reduction”. *mLife* 1, 323–328, <https://doi.org/10.1002/mlf2.12033>

ANEXO

Produção científica e tecnológica resultante desta tese

2 Artigos

- 1) Crapez, MAC; Degrave, WMS; Pinto, FN; de Linde, TNMP; **Remer, RA**; Dias, GTM; Oliveira Filho, SR; Mendes, HV. (2022), “Biodegradação de Matéria Orgânica no Lodo Sedimentado – Definição de Parâmetros na Lagoa de Piratininga/RJ”. *Brazilian Journal Development* Vol. 8 No. 10, 67051–67069. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv8n10-148>
- 2) **Remer, RA**; Pinto, FN; Mendes, HV; Degrave, WMS; Crapez, MAC. (2024), “Redução de fósforo e lipídios em sedimento de ecossistema salobro com as tecnologias de PULMÃO e microrganismos probióticos”. *Em preparação*

9 Patentes/Pedidos de patente

Pedido de Patente BR102019021409-0 (CONSERVÔMETRO): Conservômetro, Equipamento e Sistema para Transdução de Sinal e para a Documentação de Métricas de Conservação e/ou Recuperação de Ativos Ambientais. Publicado em 27Abr2021.

<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/075868327/publication/BR102019021409A2?q=BR102019021409>

Patente BR102018072624-2 (Difusor 2, PULMÃO 2): Difusor para Transferência de Massa Gás-líquido e Processo de Fabricação do Mesmo. Publicada em 11Mai2021 e concedida em 31Ago2022.

<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/076038172/publication/BR102019022947B1?q=biotecam>

Pedido de Patente BR 102020005205-5: Processo para Minimização da Poluição de Águas de Rios, Águas Costeiras ou Oceânicas. Publicado em 28Set2021.

<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/090730616/publication/BR102020005205A2?q=BR%20102020005205>

Patente BR102020001599-0 (Barco Aerador): Barco Aerador e Processo para Monitoramento e/ou Conservação de Corpos Líquidos. Publicada em 03Out2021 e concedida em 16Abr2024.

<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/077614843/publication/BR102020001599A2?q=BR102020001599>

Pedido de Patente BR102021001278-1 (também publicado como pedido internacional de patente WO2022155718) (Autenticador): Dispositivo e Método para Autenticação de Hardware e/ou Software Embarcado, publicado em 09Ago2022.

<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/082548205/publication/BR102021001278A2?q=BR102019021409-0>

Pedido de Patente BR102022003708-6 (também publicado como pedido internacional de patente WO2023159291) (Economia Circular Digital): Sistema e Método Integrado para a Emissão de Ativos Digitais ou Tokens Lastreados em Métricas de Conservação Autenticadas. Publicado em 31Ago2023.

<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/087764216/publication/WO2023159291A1?q=BR102022003708>

Pedido de Patente BR102022003697-7 (também publicado como pedido internacional de patente WO2022159292) (Joker): Dispositivo e Sistema para Medição de Grandezas, Tratamento de Dados e Integração com Sistema de Emissão de Ativos Digitais ou Tokens. Publicado em 31Ago2023

<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/087764226/publication/WO2023159292A1?q=BR102022003697>

Pedido de Patente BR102023004992-3 (CertMeter): Método, Dispositivo e Sistema para Medição do Desempenho de Processos e/ou para Automação de Procedimentos de Certificação. Publicado em 09Jan2024

<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/089908587/publication/BR102023004992A2?q=BR102023004992>

Pedido de patente BR102023020701-4 (BioExpresso, ThinVent): Equipamento e Processo para a Transferência de Massa, Difusor, Tubo de Venturi Invertido Processo para a Conservação ou Recuperação de um Corpo Líquido. Publicado em 30Abr2024

<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/091034045/publication/BR102023020701A2?q=BR102023020701>
