

## VALORAÇÃO DE DANOS AMBIENTAIS EM UM ECOSISTEMA DE RESTINGA NA ILHA DE SANTA CATARINA, SUL DO BRASIL

### VALUATION OF ENVIRONMENTAL DAMAGE IN A RESTINGA ECOSYSTEM ON SANTA CATARINA ISLAND, SOUTHERN BRAZIL

Tayene Oltramari de Souza<sup>a</sup>, Cátia Regina Silva de Carvalho Pinto<sup>b</sup>, Kléber Isaac Silva de Souza<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC),

<sup>b</sup>Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (UFSC), <sup>c</sup>Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

tayene.souza@hotmail.com

Submissão: 16 de junho de 2024

Aceitação: 21 de novembro de 2024

#### Resumo

A pressão imobiliária nas regiões costeiras degrada o ecossistema de restinga, impactando a produção de serviços ecossistêmicos essenciais e afetando o bem-estar social. Esta pesquisa aplica e compara diferentes métodos de valoração de danos ambientais para subsidiar perícias em ecossistemas de restinga com fitofisionomia herbácea-subarbustiva, usando um estudo de caso em Florianópolis, Santa Catarina, Brasil. A metodologia calcula a área de *habitat* necessária para compensar a perda de serviços ecossistêmicos por meio da Análise de Equivalência de Habitat (HEA), baseada no índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), e determina o valor econômico do dano ambiental pelo método de custo de reposição, com e sem a utilização do HEA. A taxa de incremento anual dos serviços ecossistêmicos foi de 0,00009, representando um aumento de 3,285% ao ano no valor médio do NDVI para a área de estudo. A análise identificou a perda de 9,41 SE.ha.ano e uma área de compensação de 4,82 hectares, considerando-se manutenção por 10 anos. O valor econômico do dano ambiental ficou em R\$ 882.536,86 com o método de análise de equivalência, e R\$ 653.102,91 sem o método de análise de equivalência. Selecionar a métrica de avaliação adequada ao tipo de dano é crucial, e o NDVI se mostra viável para determinar o nível base dos serviços ecossistêmicos antes e depois do dano, além da taxa de recuperação. Concluiu-se que integrar métodos e utilizar o NDVI melhora a precisão e a abrangência da valoração econômica de danos em perícias ambientais em áreas de restinga.

**Palavras-Chave:** Análise de Equivalência de Habitat; Índice de Vegetação por Diferença Normalizada; Método de Custo de Reposição; Perícia ambiental; Serviços ecossistêmicos.

#### Abstract

Real estate pressure in coastal regions degrades the restinga ecosystem, affecting the production of essential ecosystem services and affecting social well-being. This research applies and compares different methods of environmental damage valuation to support assessments in restinga ecosystems with herbaceous-subshrub phytophysiology, using a case study in Florianópolis, Santa Catarina, Brazil. The methodology calculates the habitat area needed to compensate for the loss of ecosystem services through Habitat Equivalency Analysis (HEA), based on the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), and determines the economic value of environmental damage using the replacement cost method, with and without the use of HEA. The annual rate of increase in ecosystem services was 0.00009, representing a 3.285% annual increase in the average NDVI value for the study area. The analysis identified a loss of 9.41 SE.ha.year and a compensation area of 4.82 hectares, considering maintenance for 10 years. The economic value of environmental damage was R\$ 882.536,86 with the equivalency analysis method and R\$ 653.102,91 without the equivalency analysis method. The study shows that the HEA method complements the replacement cost method by considering the

restoration of lost ecosystem services. Selecting the appropriate assessment metric for the type of damage is crucial, and NDVI proves to be viable for determining the baseline level of ecosystem services before and after damage, as well as the recovery rate. We conclude that integrating methods and using NDVI improves the accuracy and comprehensiveness of the economic valuation of damages in environmental assessments in restinga areas.

**Keywords:** Ecosystem services; Environmental assessment; Habitat Equivalency Analysis (HEA); Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).

## 1 INTRODUÇÃO

Serviços ecossistêmicos representam os benefícios que a população humana obtém, direta ou indiretamente, a partir das funções ecossistêmicas. Esses serviços são fundamentais para o funcionamento do sistema que suporta a vida na Terra (Costanza *et al.*, 1997a).

A restinga é um ecossistema presente nas regiões costeiras que produz diversos serviços ecossistêmicos, tais como, *habitat*, ciclagem de nutrientes, serviços culturais, proteção contra inundações, tempestades e controle da erosão (Barbier *et al.*, 2011a; Ghermandi *et al.*, 2011). Por ser um ambiente de transição entre o oceano e o continente, reduz a vulnerabilidade das regiões costeiras a eventos extremos (Brasil, 2018).

Em Santa Catarina estão localizadas as maiores restingas brasileiras em superfície, entretanto, integram a mais destruída e ameaçada das formações vegetacionais das regiões sul e sudeste do Brasil (Falkenberg, 1999). Para frear a degradação dos ambientes naturais são necessárias diferentes ações de controle e gestão, educação, engajamento da população, políticas públicas e ferramentas legislativas.

A Lei 12.651, de 25 de maio de 2012, define as restingas, quando fixadoras de dunas ou estabilizadoras de mangue, como Área de Preservação Permanente (APP). Por tratar-se de um ecossistema associado ao Bioma Mata Atlântica, a vegetação de restinga possui regime jurídico especial no qual o corte, a supressão e a exploração da vegetação far-se-ão de maneira diferenciada, conforme se trate de vegetação primária ou secundária, nesta última levando-se em conta o estágio de regeneração (Brasil, 2012).

Entretanto, na prática, o regime jurídico não assegura a proteção dessas áreas, principalmente pelas dificuldades para execução da fiscalização dos órgãos públicos. Logo, na ocorrência de dano ou crime ambiental, o sistema jurídico utiliza a valoração de danos para fins de pagamento de multa. Para o cálculo, são priorizados métodos que possam ser aplicados, dentro dos prazos legais e

administrativos, e que estejam dentro do orçamento disponível nos órgãos de perícia e fiscalização (Vieira, 2013).

Grande parte das metodologias existentes exigem uma grande quantidade de coleta de dados em campo e análises que demandam mais tempo do que o disponível para o trabalho do perito, ou ainda, são metodologias que não abrangem todos os valores ambientais (Vieira, 2013).

Um método que tem sido muito utilizado devido a sua praticidade é o de custo de reposição, no qual o perito atribui o valor do dano com base no valor que o infrator deverá gastar para repará-lo. É um método objetivo e prático, por basear-se em preços de produtos disponíveis no mercado e não necessitar de longas coletas em campo. De outro modo, deixa de englobar alguns aspectos envolvidos na valoração de danos ambientais, como a perda ou os impactos nos serviços ecossistêmicos que aquele ecossistema estaria fornecendo se não houvesse a degradação (Vieira, 2013).

O método de Análise de Equivalência de Habitat (HEA) é um método que faz referência à área de *habitat* perdida, usado para calcular a quantidade de restauração compensatória que irá gerar serviços de recursos naturais equivalentes a perdas de serviço devido ao dano. As perdas de serviço e os benefícios compensatórios são quantificados em unidades não monetizadas, como serviços descontados/hectare/ano (DSAYs), portanto, não é considerado um método de valoração de danos ambientais (Viehman; Thur; Piniak, 2009; Magliano, 2019). Ainda assim, o HEA pode ser utilizado na avaliação monetária de danos associado aos outros métodos para englobar a perda de serviços ecossistêmicos e minimizar as lacunas dos métodos de valoração.

Faz-se necessário o desenvolvimento de pesquisas que visem a possibilidade de adaptação do método de custo de reposição associado ao HEA para valorar os serviços ecossistêmicos que serão impactados pela conversão de uma área de restinga herbácea-subarbusiva em área de ocupação do solo - tipo loteamento.

Sendo assim, esta pesquisa tem como objetivo comparar diferentes procedimentos de valoração de danos ambientais como subsídio para perícias ambientais em ecossistema de restinga com fitofisionomia herbácea-subarbustiva.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Área de Estudo

A área de estudo está localizada na planície costeira do distrito do Pântano do Sul, no município de Florianópolis, SC. Seu limite Leste se dá pela Praia do Pântano do Sul, e seu limite Oeste pela Estrada João Belarmino da Silva. Sua face Norte tem limite com a Rua Janaúba e sua face Sul está voltada para o Morro da Costa de Dentro.

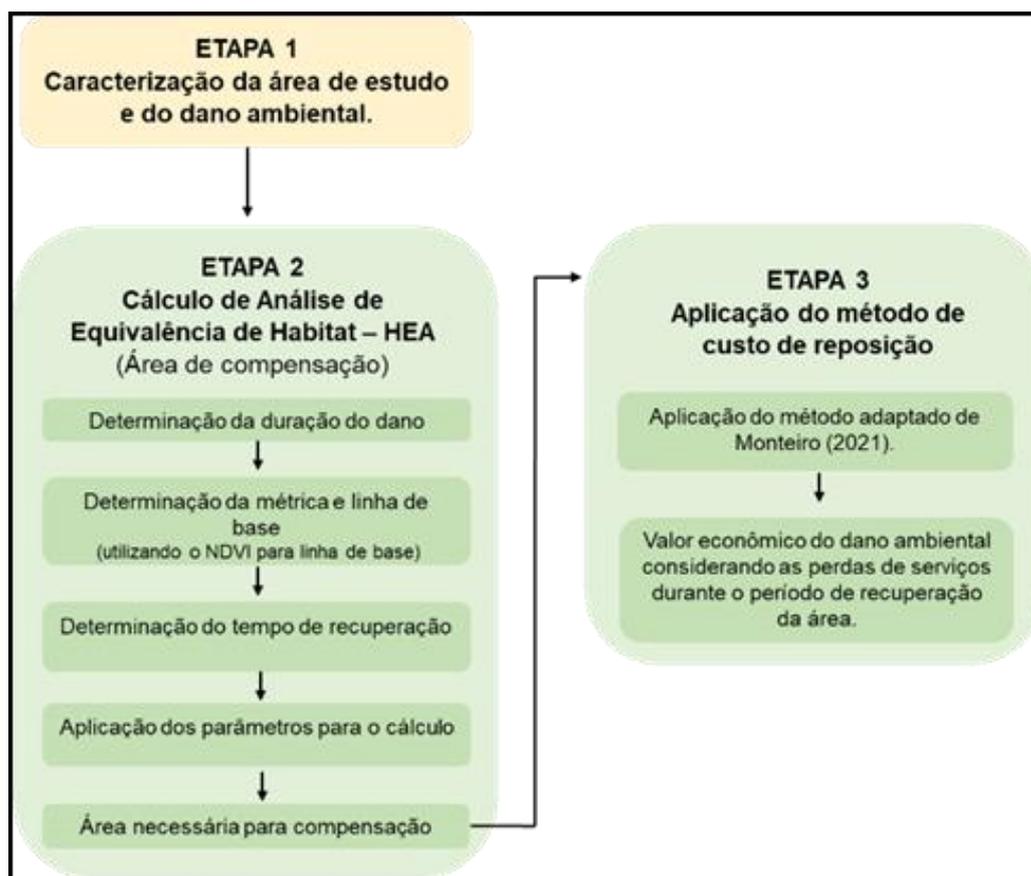
A ilha de Florianópolis possui complexo

vegetacional pertencente ao Bioma Mata Atlântica. Segundo levantamento realizado pelo Plano Municipal de Conservação e Recuperação da Mata Atlântica de Florianópolis - PMMA (Florianópolis, 2020), a Ilha possui três tipos de fitofisionomia principais, que são elas: floresta ombrófila densa, restinga e mangueza. Nas restingas podem ser distinguidas tanto formações arbustivas e arbóreas quanto herbáceas e subarbustivas, muitas vezes em mosaicos.

A área de estudo é uma gleba que fica localizada entre o Balneário dos Açores e Costa de Dentro, a qual apresentava duas formas de dano ambiental (supressão de vegetação e aterramento com cascalho) no ecossistema de restinga herbácea/subarbustiva.

O fluxograma da metodologia (Figura 1) ilustra as etapas necessárias para o desenvolvimento da pesquisa.

Figura 1 - Fluxograma da metodologia da pesquisa



Fonte: os autores.

O método de custo de reposição foi utilizado como base para o cálculo do valor econômico do dano. Para acrescentar ao método de custo de reposição, os valores do dano intermitente e dos serviços ecossistêmicos perdidos, foi utilizada a metodologia de Análise de Equivalência de Habitat

(HEA), com a aplicação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI para definir parâmetros necessários ao HEA, como a definição da linha de base e do tempo de recuperação do recurso.

## 2.2 Análise de Equivalência de Habitat

O método de Análise de Equivalência (HEA) teve sua base conceitual descrita inicialmente no artigo de King e Adler (1991) para a compensação de danos em áreas úmidas (*wetlands*). O HEA assume que os recursos naturais são como um ativo que fornece um fluxo de serviços (Allen; Chapman; Lane, 2005). Este fluxo de serviços pode ser interrompido quando ocorre um dano e o HEA se baseia na ideia de que o público pode ser compensado pela perda de serviços por meio da provisão de serviços adicionais do mesmo tipo no futuro (Unsworth; Bishop, 1994).

Como este método tem como foco a quantificação de unidades de serviços ecossistêmicos necessários para a compensação (abordagem de equivalência ecológica ou de recursos) e não retorna diretamente valores monetários, ele pode não ser considerado um método de valoração econômica de recursos naturais *stricto sensu* como os citados anteriormente (Magliano, 2019).

Entretanto, a partir do resultado do HEA é possível estimar valores monetários por meio dos custos da realização das atividades de restauração primária e do projeto de compensação. O HEA consegue encontrar os valores de uso e não uso dos recursos naturais (Unsworth; Bishop, 1994).

Para a aplicação do método de Análise de Equivalência foram realizadas as etapas a seguir:

### 2.2.1 Descrição e avaliação preliminar do dano

Para esta etapa foram realizadas a pesquisa bibliográfica, a análise de imagens de satélite e duas incursões à campo. A partir da medição com trena em pontos na área e da análise de imagens de satélite foi determinada a quantidade de cascalho depositado na área de estudo.

### 2.2.2 Definição dos parâmetros de aplicação para HEA

A linha de base foi definida a partir da análise do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). Foi utilizada a média do índice na área antes do dano (13/06/2021) como linha de base. A média do índice após o dano (25/06/2021) foi utilizada para estabelecer a porcentagem de serviços ecossistêmicos perdidos em relação à linha de base. As imagens utilizadas foram oriundas do Satélite Sentinel 2A. As análises de NDVI foram realizadas na área de estudo e em uma área testemunha (com mesmo tamanho em um

remanescente, próximo à área de estudo, que se encontrava a mais de 10 anos sem intervenções).

A função de recuperação após a remediação primária foi considerada linear, por exemplo, uma recuperação estável com um aumento de serviços constante a cada ano de recuperação em direção à linha de base. Foi realizada uma análise de regressão do índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) de dois anos (2022 e 2023) após o dano. A tendência observada de crescimento do NDVI nestes anos foi utilizada para estabelecer o tempo de recuperação do recurso perdido. Como forma de evitar interferências de variações sazonais, tendo em vista que a região da área de estudo possui as quatro estações bem definidas, foram utilizados os dados dos dois anos completos. Para o cálculo da evolução do NDVI foram utilizadas séries de imagens orbitais do Satélite Sentinel 2A, fornecidas pela Agência Espacial Europeia (ESA).

## 2.3 Método de Custo de Reposição

Foi realizado o método de custo de reposição para calcular o valor monetário para se recuperar a área determinada por meio do método HEA. O método de custo de reposição foi aplicado para a área equivalente resultante do método HEA, acrescido do custo de remoção do aterro e da regeneração natural da área em que ocorreu o dano (Equação 1).

$$(C_t = C_{rn} + C_c) \quad (1)$$

Onde:

C<sub>t</sub> = Custo total

C<sub>rn</sub> = Custo para a regeneração natural

C<sub>c</sub> = Custo para recuperação da área de compensação

Para o custo de regeneração natural (C<sub>rn</sub>) da área em que ocorreu o dano, o cálculo foi realizado com base na Portaria IBAMA nº 118/2022 (Brasil, 2022) corrigido pelo IGP-M do período (-4,6627%), considerando como método a regeneração natural, tendo em vista que a área foi abandonada após a ocorrência do dano e já se encontra em processo de regeneração natural. Além disto, devido à presença de aterramento com cascalho, também foi acrescido o custo para a remoção do aterramento (C<sub>a</sub>).

Para o Custo para recuperação da área de compensação (C<sub>c</sub>), o cálculo foi realizado a partir do método apresentado por Monteiro (2021), com a realização de ajustes monetários. O método de

Monteiro (2021) traz as fórmulas para o valor econômico do serviço de preservação da paisagem ( $V_{pp}$ ) mensurado pela soma do investimento envolvido na recuperação do ambiente degradado, que envolve investimentos de: elaboração do projeto por um profissional habilitado ( $Ela$ ); implantação do projeto ( $Imp$ ), com todos os investimentos de insumos e mão de obra; manutenção do projeto ( $Man$ ), contemplando reposição de mudas, adubação, manutenção de equipamentos; monitoramento do projeto por responsável técnico ( $Mon$ ), com emissão de relatórios periódicos, durante  $n$  anos — até que a vegetação da área atinja porte equivalente ao que eventualmente foi suprimido ou ao que se quer valorar (Equação 2).

Ou seja:

$$(C_c = V_{pp}) \quad (2)$$

Onde,

$$(V_{pp} = Ela + Imp + Man + Mon) \quad (3)$$

Nesse caso não foi acrescentado ao método o custo de aquisição/aluguel de terreno para a área de compensação, pois ela pode ser realizada em terrenos públicos que necessitam de recuperação, além de que incluir os custos de aquisição/aluguel de terrenos, em área equivalente à danificada, pode inflacionar significativamente o resultado da valoração, tendo em vista o alto valor destas áreas na ilha de Florianópolis. Logo, o foco principal foi determinar custos diretos para o projeto de recuperação.

Para fins de comparação com o resultado do presente estudo e o resultado de Pavanelli e Voulouvis (2019), os valores monetários originalmente descritos em moeda brasileira (R\$) também foram ajustados pela inflação de 2017 e, depois, convertidos para dólares internacionais usando fatores de conversão apropriados de paridade de poder de compra (PPC) relativos ao ano de 2017, conforme encontrados na OCDE (2024).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados os resultados de acordo com as etapas listadas na metodologia.

#### 3.1 Descrição e avaliação do dano

A área de estudo está localizada na planície costeira do distrito do Pântano do Sul na Ilha de

Florianópolis, município do estado de Santa Catarina.

A ilha de Florianópolis possui complexo vegetacional pertencente ao Bioma Mata Atlântica.

A área encontra-se em uma região urbanizada do distrito do Pântano do Sul, com presença de residências unifamiliares, condomínios multifamiliares e pequenos comércios. A localidade em questão é considerada Área de Preservação Permanente (APP) pelos critérios estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 303 (Brasil, 2002).

Segundo o mapeamento realizado com dados do projeto MonitoraSC (FURB, 2021), a área de estudo encontra-se em local com alto potencial de vegetação de restinga. Segundo os autores, o mapa foi estabelecido por meio do cruzamento entre cinco atributos: altimetria, modelo de acumulação, classificação do solo, relevo e subdomínio hidrológico. Nas restingas podem ser distinguidas tanto formações arbustivas e arbóreas, quanto herbáceas e subarbustivas, muitas vezes em mosaicos.

Os dados referentes à vegetação disponibilizados pelo Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis – IPUF (Florianópolis, 2016) demonstram a presença de vegetação de restinga, sendo um terço do terreno com fitofisionomia herbácea-subarbustiva (na qual encontra-se a área de estudo) e o restante com fitofisionomia arbustiva/arbórea.

Conforme o mapa geológico da Ilha de Santa Catarina, elaborado por Tomazolli e Pelerini (2014) a área de estudo se localiza sobre depósitos eólicos (dunas transversais ativas) do período Holoceno. Estes depósitos são caracterizados como sedimentos arenosos finos, bem selecionados, de cor esbranquiçada, formando camadas de recobrimento ou dunas transversais ativas (Tomazolli; Pelerini, 2014).

A classificação geológica da área corrobora com a identificação da classificação da vegetação devido ao fato de que a restinga é a vegetação associada à presença de sedimentos arenosos. Em um sentido amplo e em um contexto ecológico, o chamado ecossistema de restinga representa um grupo de tipos de vegetação formado pela deposição de sedimentos arenosos marinhos quaternários ao longo do litoral (Araújo; Lacerda, 1987).

O relatório de vistoria da Fundação Municipal do Meio Ambiente - FLORAM, que consta na ACP nº 5019152-93.2021.4.04.7200, afirma: [...] Na porção da gleba próxima à praia foram observadas

espécies herbáceas e subarbusculares típicas de dunas [...] (Trecho do relatório de vistoria FLORAM – retirada da Ação Civil Pública nº 5019152-93.2021.4.04.7200).

Uma das funções da vegetação fixadora de dunas é justamente promover o controle de erosão, atuando como elemento responsável pela estruturação do solo através do sistema radicular; logo, uma intervenção na área afeta diretamente o serviço ecossistêmico em questão (Prandini; Iwasa; Oliveira, 1982).

Segundo o Panorama da Erosão Costeira no Brasil (Brasil, 2018), os processos erosivos e deposicionais têm sido observados em diversas praias arenosas ao longo da linha de costa terrestre, e apesar de ser um processo natural da dinâmica praial, sua intensificação está intimamente relacionada com as ocupações urbanas que se instalam junto ao ambiente praial em distintas costas do Brasil e particularmente no estado de Santa Catarina.

O mar territorial na região da área de estudo encontra-se com proteção especial, por integrar a Unidade de Conservação Federal, Área de Proteção Ambiental da Baleia Franca (APA da Baleia Franca), o que torna a área de estudo um ambiente sensível na manutenção de *habitat* para a produção de serviços ecossistêmicos, como

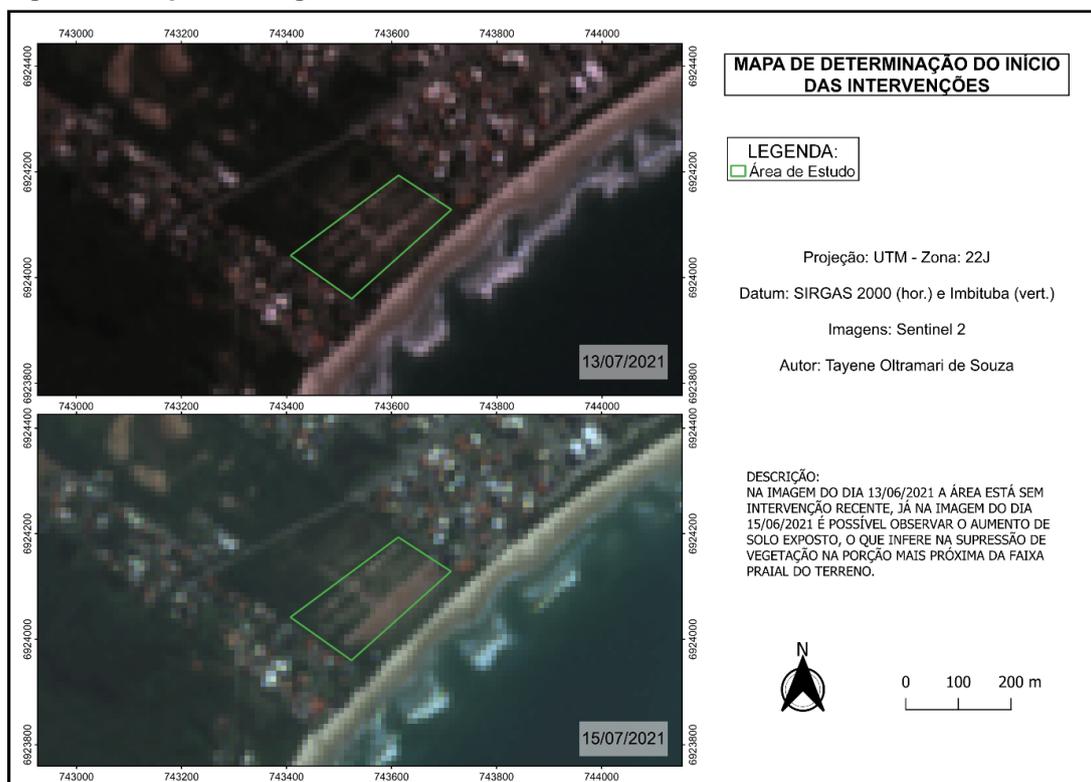
recursos genéticos e espécies icônicas.

Segundo Bueno e Reis (2021), a região dos açores onde localiza-se a área em questão possui a presença de diversos sítios arqueológicos, que estão ligados à promoção de serviços ecossistêmicos culturais, como valores espirituais e religiosos, oportunidades recreativas, inspiração.

A área de estudo ao longo dos anos passou por mais de uma intervenção relacionada ao uso e ocupação do solo. As primeiras aberturas de via foram realizadas em julho de 2017, houve um período sem intervenção e as obras foram retomadas em 15 de junho de 2021. A intervenção a partir desta data é que está sendo avaliada no presente estudo. Após 2017, as primeiras imagens de satélite com alteração na vegetação da área datam de 15 de junho de 2021, com o início do corte da vegetação na porção frontal do terreno. Nesta mesma data houve a prestação de queixa sobre o início das obras por parte de membros da comunidade, o que reitera a determinação da data de início das intervenções na área.

Na Figura 2 pode-se comparar duas imagens de satélite, a primeira do dia 13 de junho de 2021, dois dias antes do início das obras e a segunda em 15 de junho de 2021, na qual é possível observar o aumento de solo exposto.

**Figura 2 - Mapa de imagens da área de estudo em momento antes e durante as obras**



Fonte: os autores.

A partir do dia 15 de junho foi realizada a supressão de vegetação de todo o terreno com o uso de máquinas. Além da supressão de vegetação foi realizada a deposição de cascalho nas áreas que seriam utilizadas como vias do condomínio e o plantio de grama na porção frontal do terreno. Em análise no local, foi estimada a quantidade de cascalho depositada no terreno em 315,00 m<sup>3</sup>, 6300,00 m<sup>2</sup> de área aterrada por 5 cm de profundidade.

### 3.2 Análise de Equivalência de Habitat

#### 3.2.1 Definição da métrica de avaliação

A dificuldade em estabelecer uma métrica para a valoração de danos ambientais encontra-se principalmente no fato de que as perícias são frequentemente conduzidas quando a área está consideravelmente descaracterizada, tornando desafiador estimar os parâmetros dos recursos ambientais antes do dano, como densidade, abundância ou diversidade de espécies da vegetação. Assim, quando não há dados de estudos anteriores disponíveis sobre o ecossistema em análise, a avaliação precisa ser baseada em métricas que possam ser quantificadas por meio de imagens de satélite.

Berghöfer e Schneider (2015) destacam que, dependendo do serviço ecossistêmico a ser medido ou da disponibilidade de dados, a métrica pode estar mais diretamente relacionada às condições biofísicas nas quais os serviços são gerados.

A métrica utilizada, para que possa ser quantitativa, se concentra majoritariamente em um recurso ambiental perdido. Portanto, o que é medido é o recurso perdido e não diretamente o serviço ecossistêmico prestado por ele. Ainda assim busca-se um recurso que represente o maior número de serviços possíveis e que, quando ocorra a reposição deste recurso, os serviços sejam providos e compensados (Viehman; Thur; Piniak, 2009).

Os pesquisadores que estudam indicadores de serviços ecossistêmicos para o planejamento ambiental reconhecem que, frequentemente, é necessário utilizar múltiplos indicadores para representar adequadamente os serviços em questão. Isso ocorre devido à dependência da maioria dos serviços ecossistêmicos em relação a diversas estruturas ou processos ecológicos (Burkhard; Müller, 2008; Kandziora *et al.*, 2013).

No entanto, uma vez que o foco da definição da métrica, para a análise de equivalência de

*habitat*, reside na avaliação da qualidade da área após o dano e sua capacidade de fornecer serviços ecossistêmicos, não é necessário determinar um indicador específico para cada serviço ecossistêmico. É suficiente utilizar um indicador ecológico que evidencie o impacto do tipo de dano na capacidade do ecossistema de fornecer seus serviços ecossistêmicos potenciais (Magliano, 2019).

Portanto, a aplicação do método exige que os profissionais sejam capazes de medir numa métrica comum os serviços ecossistêmicos fornecidos por um recurso natural ou *habitat*, que muitas vezes pode ser indefinido. Geralmente assume-se que a recuperação do serviço diretamente capturado pela métrica será acompanhado pela restauração de todos os outros serviços ecossistêmicos (Viehman; Thur; Piniak, 2009).

Por exemplo, Fonseca *et al.* (2000), ao avaliar danos em leitos de ervas marinhas no Santuário Marinho Nacional de Florida Keys, utilizaram a biomassa de ervas marinhas acima do solo como métrica comum, uma vez que esta medida é correlacionada com os serviços prestados pelo *habitat*.

A escolha da vegetação como indicador para a área de estudo se deu pela sua relação direta com o dano ambiental e por ser uma métrica viável de ser analisada por meio de *softwares* de geoprocessamento. Além de a vegetação estar direta ou indiretamente relacionada com a maioria dos serviços ecossistêmicos potenciais da área.

Por exemplo, um dos serviços ecossistêmicos mais representativos do ecossistema de restinga com fitofisionomia herbácea-subarbusciva é o controle da erosão do solo, sendo este serviço bem representado pela cobertura vegetal na área (Kandziora *et al.*, 2013).

Em 1992, o autor a seguir cita a correlação entre a vegetação e produção de serviços ecossistêmicos:

[..] a retirada total ou parcial da cobertura florestal pode levar à degradação dos solos e recursos hídricos pelo processo erosivo intensificado dos recursos biológicos, pela aceleração do processo de extinção e dos recursos estéticos da paisagem natural por sua simplificação e potencial deformação negativa; conseqüentemente as áreas empobrecem na sua capacidade de fornecer benefícios à sociedade (Jesus, 1992).

### 3.2.2 Definição da linha de base dos serviços ecossistêmicos

As linhas de base referem-se à “condição dos recursos naturais e serviços que existiriam se o incidente não tivesse ocorrido. Os dados de base podem ser estimados usando dados históricos, dados de referência, dados de controle ou dados sobre mudanças incrementais (por exemplo, número de animais mortos), isoladamente ou em combinação, conforme apropriado” (EUA, 2024).

O comitê de avaliação dos efeitos do derramamento de petróleo nos serviços ecossistêmicos no Golfo do México destaca que a quantificação do nível de base do dano é mais complicada quando o evento ocorre em um ecossistema que está sujeito a mudanças naturais e antropogênicas, que não estão relacionadas ao evento específico. Os autores ressaltam que neste caso o dano precisa ser avaliado em relação a dados de referência dinâmicos ou mutáveis (National Research Council, 2013). No presente trabalho, a área de estudo vem sofrendo com impactos anteriores ao dano, o que cria uma linha de base dinâmica para a avaliação do dano. O uso do NDVI possibilita a comparação entre o índice de vegetação antes e após o dano, o que facilita a determinação da linha de base excluindo os impactos sofrido pela área anteriormente.

O NDVI é calculado a partir de medições de refletância nas bandas do vermelho (RED) e do infravermelho próximo (NIR), e aproveita o fato de que a vegetação verde reflete menos luz visível e mais infravermelho próximo, enquanto a vegetação esparsa ou menos verde reflete mais luz visível e menos de infravermelho próximo, variando de -1 a 1, em que valores mais baixos indicam ausência de vegetação (por exemplo, água) e valores mais altos indicam abundância de vegetação saudável (Rouse *et al.*, 1974; Yengoh *et al.*, 2016).

A área de estudo, que possui um histórico de intervenções anteriores, apresentou uma média do NDVI inferior à média da área testemunha antes do dano (13/06). Além disso, a área testemunha, que se encontra sem intervenções por aproximadamente 10 anos, apresentou uma linha de tendência com baixo incremento no NDVI (Figura 4), tanto antes quanto depois do dano. O que não acontece na área de estudo, que vem sofrendo intervenções ao longo dos anos e, por isso, apresentou uma linha de tendência com maior incremento nos valores do NDVI (Figura 3).

No gráfico é possível observar a tendência de

evolução da média do NDVI para a área de estudo antes e depois do dano (Figura 3).

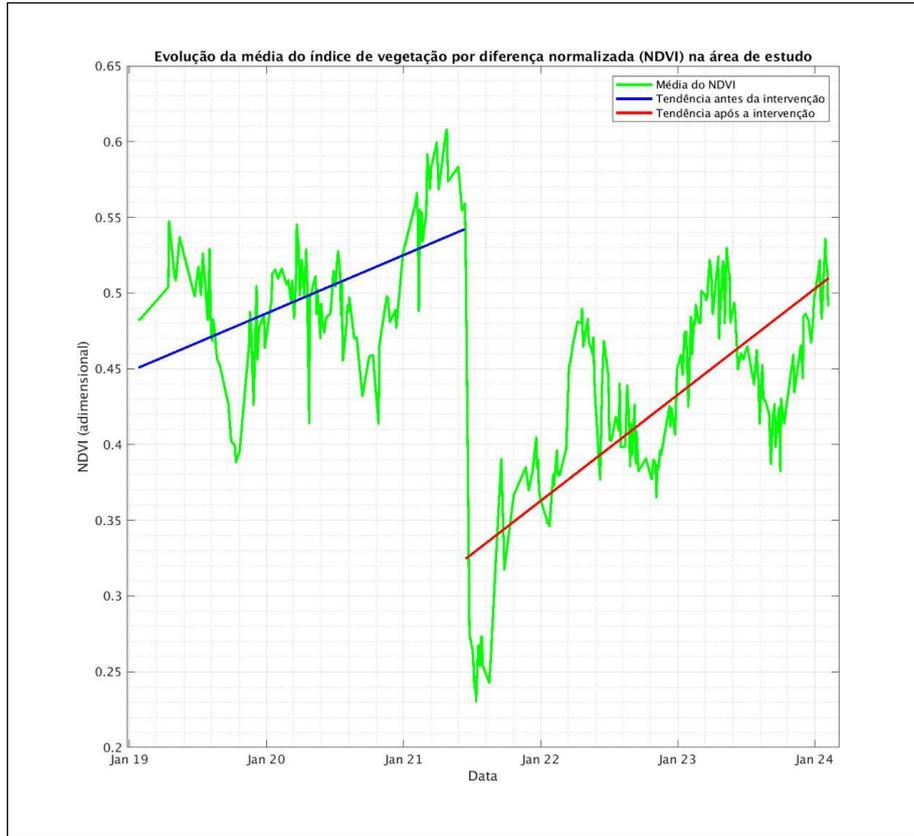
Gamarra *et al.* (2016) consideraram o NDVI uma medida indireta da complexidade do *habitat*, pois indica a complexidade estrutural (vertical) e a quantidade de fitomassa do *habitat* e, ao relacionar os valores do NDVI com parâmetros de estrutura da vegetação registrados em campo concluíram que houve relação significativamente positiva entre a complexidade do *habitat* (NDVI médio) e a cobertura por espécies lenhosas de fitofisionomias do cerrado.

A partir da análise do Índice de Vegetação Normalizada foi possível observar que a área de estudo apresentou uma queda expressiva na média do NDVI no momento do dano, o que não ocorreu na área testemunha (Figura 3 e Figura 4, respectivamente).

O histograma da Figura 5 apresenta a frequência dos valores médios do NDVI para a área de estudo antes da intervenção, enquanto que o histograma da Figura 6 apresenta a frequência dos valores médios da área testemunha antes da intervenção. É possível observar uma maior frequência da média de 0,5 do NDVI para a área de estudo, que são valores relacionados a uma vegetação menos sadia ou de solo exposto. Já para a área testemunha, as maiores frequências ficam entre 0,8 e 0,85, que são valores que representam uma vegetação mais sadia. Podemos observar que antes mesmo do dano à área de estudo apresentou valores médios de NDVI inferiores ao da área testemunha, o que corrobora com o fato de a área já estar sofrendo intervenções antes mesmo do dano em análise no presente estudo, e o NDVI conseguiu refletir esta variação no ambiente.

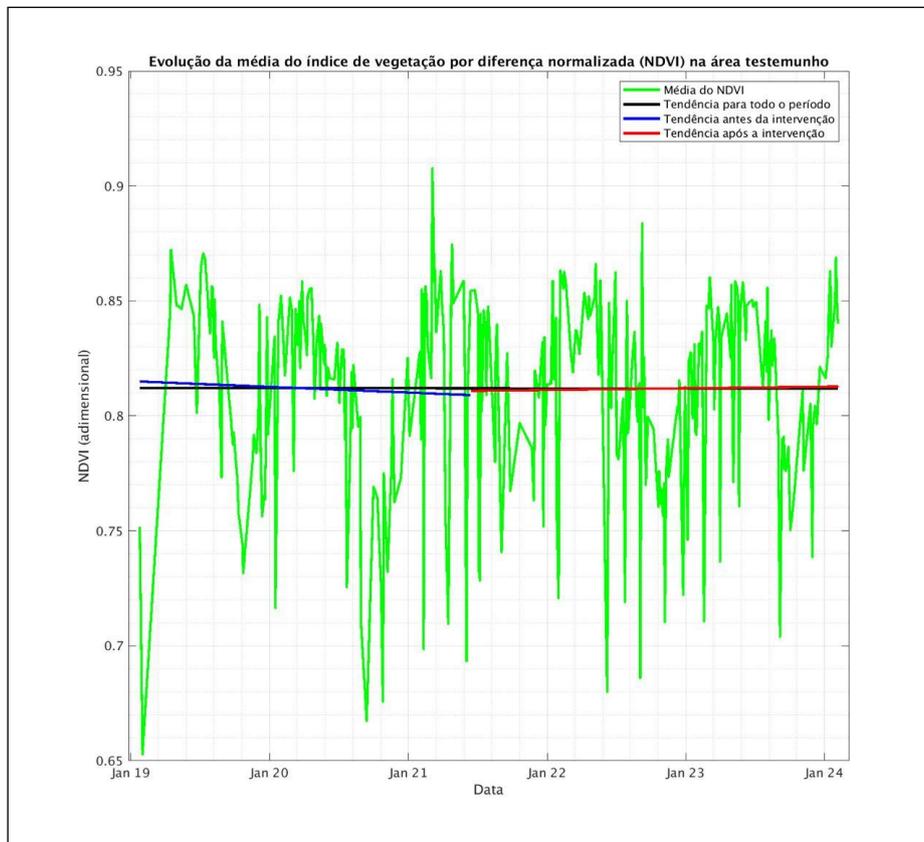
Na Figura 7, que apresenta o histograma com a frequência dos valores médios do NDVI, após a intervenção na área de estudo, é possível observar que ocorreu a diminuição da frequência de valores médios acima de 0,5, e um aumento expressivo na frequência de valores médios inferiores à 0,5 que como citado, anteriormente, são valores relacionados a uma vegetação menos sadia ou de solo exposto. Na Figura 8 consegue-se observar que a mesma análise realizada para a área testemunha confirma que não existiu nenhum outro fator relevante, tanto no ambiente como na imagem de satélite, que pode ter influenciado na variação do NDVI, pois praticamente a frequência da média do NDVI para a área testemunha permaneceu a mesma de antes do dano.

**Figura 3 - Gráfico de evolução média do NDVI na área de estudo antes e após a intervenção**



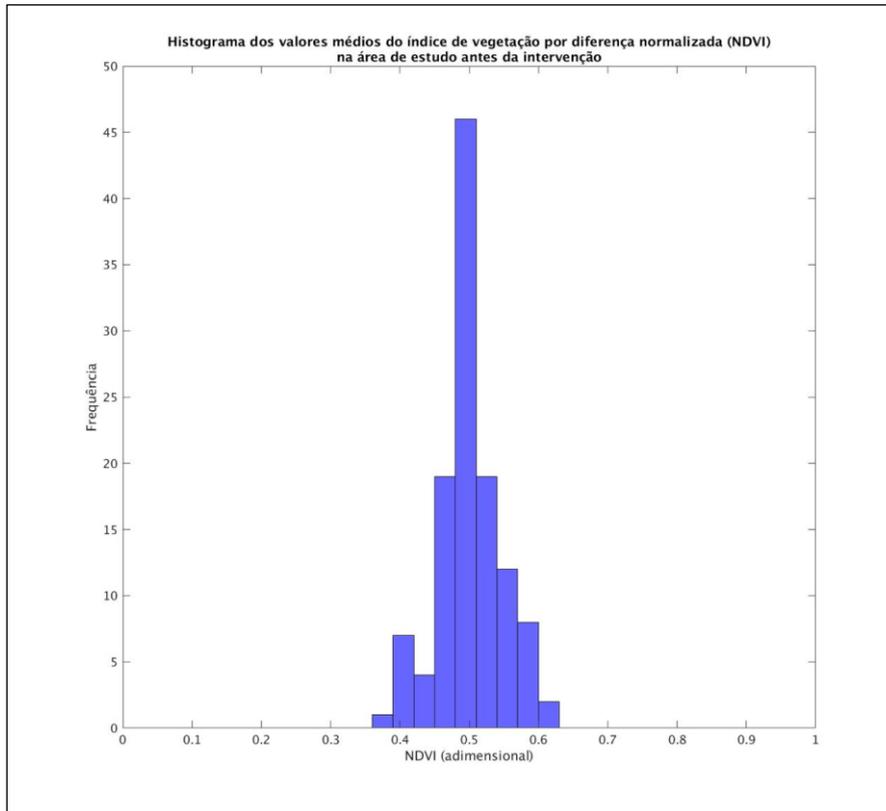
Fonte: os autores.

**Figura 4 - Gráfico da evolução média do NDVI na área testemunha**



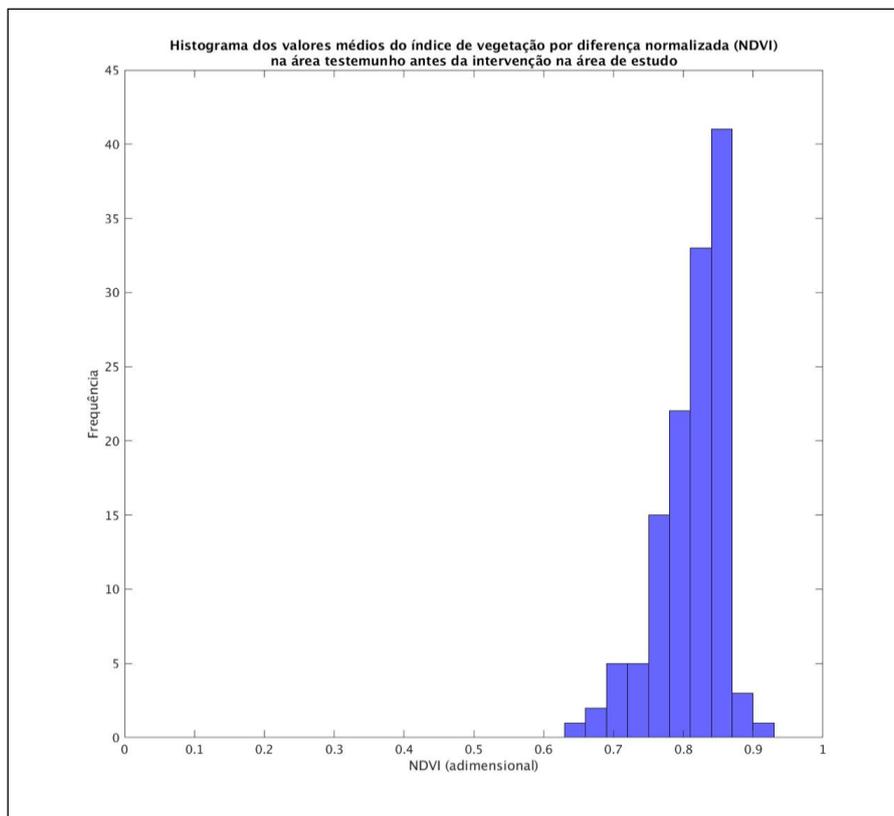
Fonte: os autores.

**Figura 5 - Histograma dos valores médios do NDVI na área de estudo antes da intervenção**



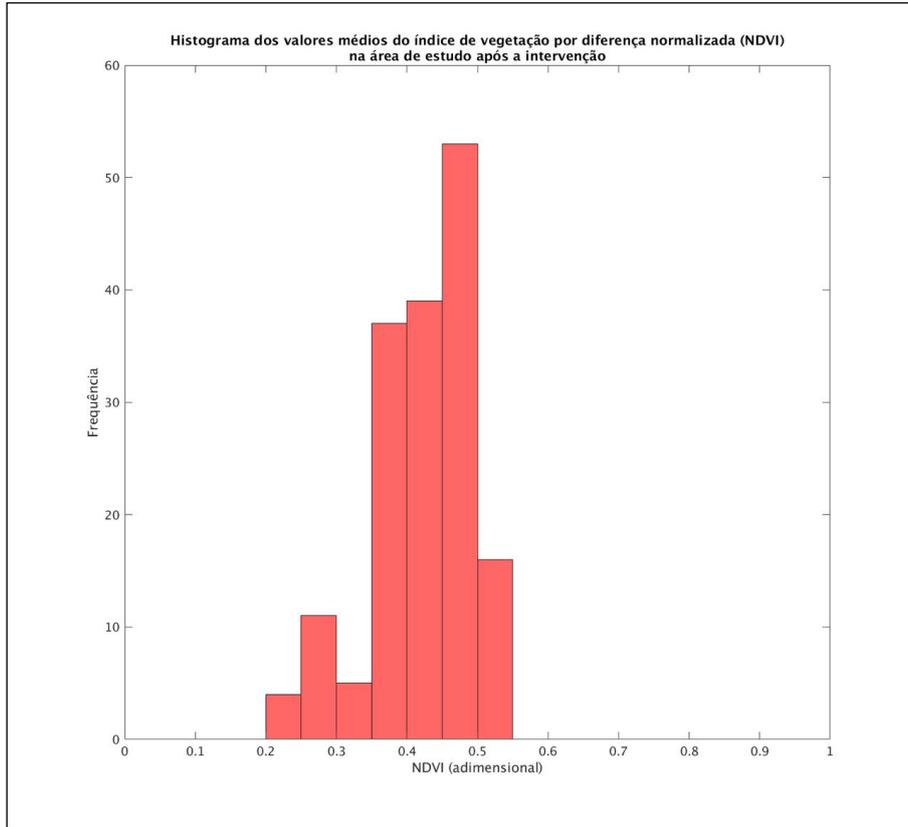
Fonte: os autores.

**Figura 6 - Histograma dos valores médios do NDVI na área testemunha antes da intervenção**



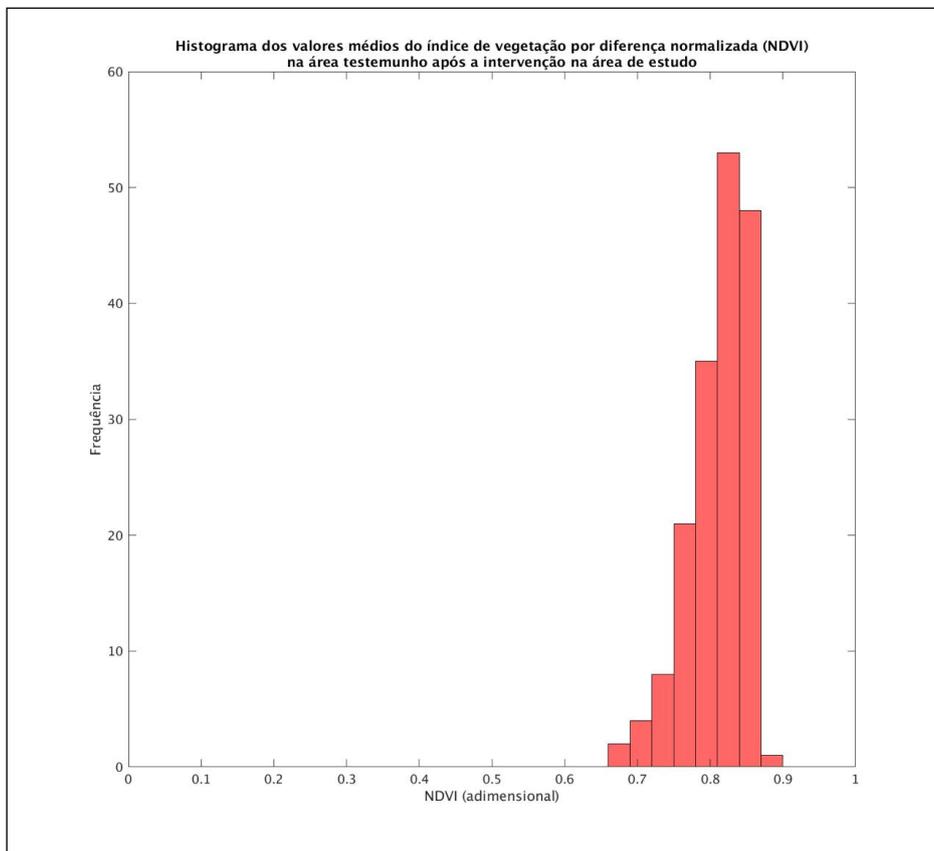
Fonte: os autores.

**Figura 7 - Histograma dos valores médios do NDVI na área de estudo após da intervenção**



Fonte: os autores.

**Figura 8 - Histograma dos valores médios do NDVI na área testemunha após a intervenção**



Fonte: os autores.

A Tabela 1 apresenta os valores encontrados por meio da análise do NDVI.

A partir dos dados da tabela anterior pode-se definir a porcentagem de redução do nível de serviços em relação à linha de base em 40,18%.

A utilização do NDVI como uma ferramenta para a avaliação de danos ambientais é reconhecida como uma solução em casos de não existirem estudos pretéritos na área impactada. Conforme Magliano (2022), praticamente toda mudança de uso do solo em ambientes terrestres afeta a produtividade do ecossistema. O autor ressalta que quando uma intervenção está sendo analisada em um processo de licenciamento ambiental, o diagnóstico da qualidade ambiental é geralmente feito por meio de um estudo prévio de impacto ambiental, que também prevê os danos

potenciais. Contudo, muitos danos ambientais resultam de atividades ilícitas que não foram previamente avaliadas pelo Estado, tornando difícil determinar a quantidade e qualidade dos recursos afetados sem conhecer o estado de conservação anterior. Na ausência de inventários recentes e equivalentes à área degradada, a técnica mais acessível para análises retrospectivas é o uso de dados de sensoriamento remoto.

É importante ressaltar que o NDVI representa de forma mais sensível as variações espaciais e temporais da atividade fotossintética da vegetação e de variações estruturais do dossel (Gao *et al.*, 2000; Huete *et al.*, 2002) podendo não retratar a diversidade, a composição de espécies e a qualidade dos seus estratos (Yengoh *et al.*, 2016).

**Tabela 1 - Resultados análise de NDVI**

	Área de estudo	Área testemunha
Média do NDVI antes do dano (linha de base)	0,542417	0.808985
Médio do NDVI depois do dano	0,324479	0.810844
Diferença nos valores de NDVI após o dano	-0,217938	0.000321

Fonte: os autores.

Tendo em vista que dentre as incertezas inerentes à Análise de Habitat Equivalente estão os julgamentos profissionais sobre a linha de base, a avaliação subjetiva dos resultados dos projetos de recuperação e compensação e a falta de medições objetivas (Desvousges *et al.*, 2018), entende-se que a utilização do método com o uso do NDVI é preferível em casos judiciais devido à diminuição do viés interpretativo e da possibilidade de comparação com outros casos.

O uso do NDVI neste estudo de caso revelou-se vantajoso devido às características do dano e do estado da área antes do dano, pois, como a área de estudo encontrava-se em regeneração natural por abandono desde o embargo da obra, foi possível analisar o ritmo de desenvolvimento da vegetação neste período a partir do uso do NDVI, o qual apresenta os valores de recuperação da vegetação específicos do local, contemplando as variáveis envolvidas no processo de recuperação.

No entanto, é importante notar que esse resultado pode não ser replicável em alguns casos, exigindo uma avaliação prévia pelo especialista quanto à sua aplicabilidade. Por exemplo, se a área já estivesse degradada antes do dano, mas com o plantio de espécies exóticas invasoras, o

NDVI poderia indicar valores elevados, erroneamente sugerindo que a área está provendo serviços ecossistêmicos comparáveis a uma floresta preservada, quando, na realidade, ela está degradada devido a presença da vegetação exótica.

A análise da evolução do NDVI após o dano, nos anos de 2022 e 2023, mostrou um coeficiente angular de 0,00009, o que representa um incremento de 3,285% ao ano no valor do NDVI médio para a área de estudo. Considerando-se o percentual de perda de serviços de 41,80%, para se alcançar novamente a linha de base, o tempo de recuperação do recurso será de aproximadamente 12 anos 2 meses e 23 dias. Utilizou-se uma taxa de incremento linear nos serviços ecossistêmicos, por ser esta a função mais aplicada atualmente para realizar as estimativas de equivalência, entretanto, é preciso lembrar que a regeneração dos ambientes não segue um padrão linear.

Conforme Ricklefs (2003), após uma perturbação, o processo de regeneração natural é iniciado, sendo influenciado pela presença de remanescentes florestais próximos, os quais contribuirão para a dispersão de diásporos.

Contudo, o estabelecimento desses diásporos é afetado por diversos fatores ambientais que agora impactam o novo conjunto de espécies na área, incluindo efeitos do clima, disponibilidade de água e nutrientes (Matteucci; Colma, 1982). Sendo assim, sugerimos que futuras pesquisas com o HEA busquem aplicar modelos assintóticos para aplicação da taxa de regeneração.

Os resultados das análises anteriores serviram para estabelecer os valores dos parâmetros necessários à aplicação do método de análise de equivalência de *habitat* (Tabela 2 e Tabela 3). A taxa de desconto anual foi utilizada devido a sua consolidação da literatura. A taxa de desconto (3%) utilizada considera que as perdas e ganhos de serviços se concretizam em anos diferentes e se estendem ao futuro e serve para atualizar todos os valores dos serviços para o presente. Essa taxa de desconto reflete a preferência temporal da sociedade, evidenciando sua vontade de ajustar o consumo de bens

públicos ao longo do tempo (Dunford et al. 2004).

Com a aplicação do Método de Análise de Equivalência utilizando o NDVI sugere-se que a área voltará a produzir os serviços ecossistêmicos que eram produzidos antes do dano a partir de 12 de setembro de 2033, desde que seja mantida a regeneração natural da área e considerando-se condições ambientais estáveis. O total de débito de serviços ecossistêmicos resultou em 9,41 SE.ha.ano; este débito representa o total de serviços ecossistêmicos que não foram produzidos pela área durante o período de regeneração pós dano.

Na Figura 9 é possível observar o gráfico da evolução do dano interino, o qual demonstra o acumulado do débito de serviços ecossistêmicos ao longo dos anos que a área precisa para se restabelecer. A partir do ano 12 (quando a área volta à linha de base) o valor do débito de serviços tende a estabilizar.

**Tabela 2 - Parâmetros para o cálculo de perdas de serviços ecossistêmicos**

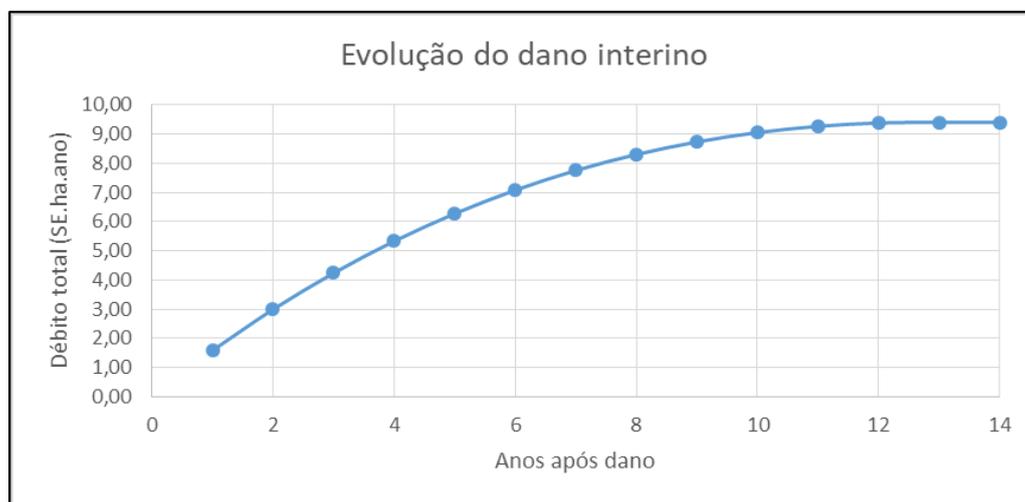
Informação da linha de base do recurso impactado	
Tipo de Habitat	Restinga Herbácea/Subarbusiva
Ano do dano	Junho de 2021
Área do dano (m <sup>2</sup> )	36.196
Porcentagem de perda de serviços no ano do dano (relativo à linha de base dos serviços)	40,18%
Recuperação de habitat degradado através da regeneração natural	
Ano do início do projeto de recuperação	2021
Tempo até a recuperação total	12 anos 2 meses e 23 dias
Serviços ao nível máximo (porcentagem relativa à linha de base)	59,8%
Forma da função de restauração	Linear
Taxa de desconto	
Taxa de desconto anual	3% (Conforme Pavanelli e Voulvoulis, 2019)

Fonte: os autores.

**Tabela 3 - Parâmetros para o cálculo dos ganhos de serviços ecossistêmicos**

Característica do projeto de Reposição	
Tipo de Habitat a ser reposto	Restinga Herbácea/Subarbustiva
Nível inicial de serviços	5%
Ano em que se inicia a reposição	2024
Ano em que o nível de serviços começa a aumentar	2024
Ano em que se alcança o nível determinado de serviços (fim do período de recuperação)	10 anos
Nível máximo de serviços	100%
Forma da função de recuperação	Linear
Parâmetro de comparação do projeto de recomposição	
Razão máxima de serviços por área no local de compensação e a linha de base de serviços perdidos por área.	1:1 Uma unidade de habitat recuperado equivale a 1 unidade de habitat original (em relação a produção de serviços)
Taxa de desconto	
Taxa de desconto anual	3% (Conforme Pavanelli e Voulvoulis, 2019)

Fonte: os autores.

**Figura 9 - Gráfico de evolução do dano interino**


Fonte: adaptado de Bezzera *et al.* (2020) com dados da autora.

A compensação pelas perdas, do dano interino é chamada de remediação compensatória e pode envolver o aumento ou a criação de recursos. A remediação compensatória pode ser implementada para maximizar os serviços ecossistêmicos ou para estabelecer estes serviços em áreas que os carecem (Pavanelli; Voulvoulis, 2019).

O uso da Análise de Equivalência neste trabalho não possui o objetivo de estabelecer uma área real de compensação e sim o valor econômico do dano; ainda assim será considerada a realização do projeto de recuperação e manutenção pelo período de 10 anos, que seria o tempo mínimo necessário para que os serviços ecossistêmicos fossem produzidos. Portanto, a

área equivalente utilizada no cálculo de compensação foi referente ao tempo de 10 anos, resultando em uma área de compensação de 4,82 hectares.

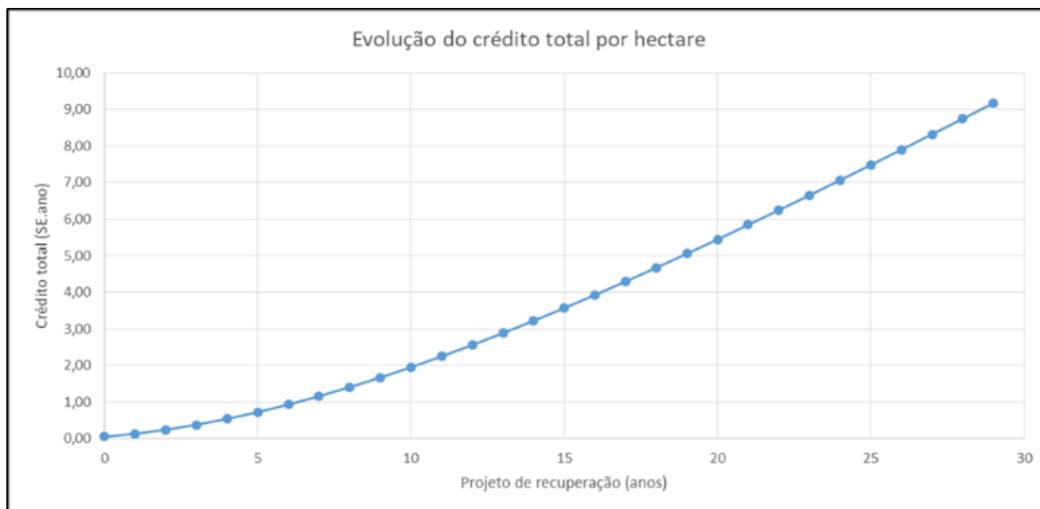
É possível observar (Figura 10) que quanto mais tempo a área de compensação ficar prestando serviços ecossistêmicos, menor precisa ser o seu tamanho para produzir a quantidade necessária de compensação. Em casos nos quais a compensação será efetivamente realizada com a recuperação de uma área, as condições de tamanho da área e tempo de recuperação podem ser determinadas conforme a disponibilidade de áreas e de tempo que a mesma pode permanecer

preservada.

O gráfico (Figura 10) apresenta a evolução na produção de serviços ecossistêmicos da área de compensação ao longo dos anos. Utilizou-se uma taxa de incremento linear nos serviços ecossistêmicos, por ser esta a função mais aplicada atualmente para realizar as estimativas de equivalência, entretanto, é preciso lembrar que a regeneração dos ambientes não segue um padrão linear.

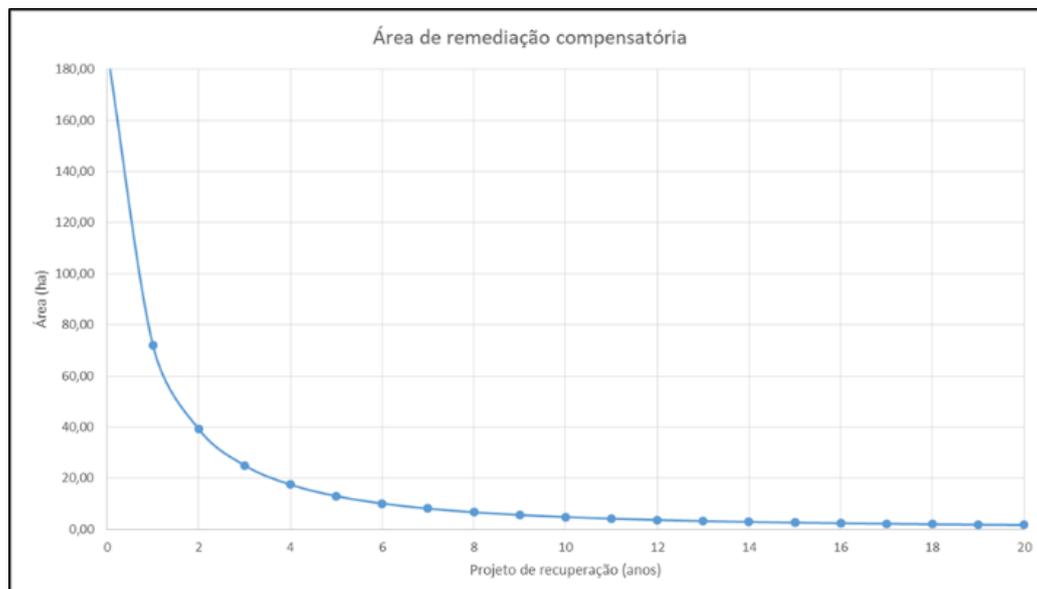
A **Figura 11** Figura 11 apresenta o gráfico do tamanho da área necessária de compensação em relação ao tempo em anos de preservação da área.

**Figura 10 - Gráfico da evolução do crédito de serviços ecossistêmicos do projeto de compensação**



Fonte: adaptado de Bezzera *et al.* (2020) com dados da autora.

**Figura 11 - Gráfico da área (ha) de remediação compensatória**



Fonte: adaptado de Bezzera *et al.* (2020) com dados da autora.

### 3.3 Custo de Reposição

A Tabela 5 apresenta a composição dos custos e o resultado da aplicação do método de custo de reposição para a área de 4,82 hectares resultante do HEA.

A Tabela 4 apresenta o resultado do método aplicado no estudo para valores de 2017 e convertidos em 2017Int.\$/ha para comparar com

os valores encontrados no estudo de Pavanelli e Voulvoulis (2019). Os autores calcularam o valor econômico do dano ambiental de três danos à floresta ombrófila densa da mata atlântica; os danos são: desmatamento para plantio de *citrus* (5,33 ha), desmatamento para mineração de areia (1,22ha) e desmatamento para plantio de eucaliptos (21,87ha). Os autores aplicaram o método de custo de reposição acrescido do HEA.

**Tabela 4 - Comparação dos resultados da valoração com outros autores**

Resultado da pesquisa (R\$/ha)	Resultado da pesquisa (2017 Int\$/ha)	Pavanelli e Voulvoulis (2019) (2017 Int.\$/ha)
245.149,13	78.885,42	13.216,00 (plantio de <i>citrus</i> ); 28.024,00 (mina de areia); 19.681,00 (plantio de eucalipto)

Fonte: os autores.

A diferença principal nos valores observados na tabela 5 está relacionada aos valores estabelecidos para o método de custo de reposição. O método de Monteiro (2021), aqui adaptado e aplicado, busca incluir os custos unitários para a recuperação e inclui também a elaboração e o monitoramento do projeto por profissionais especializados. Já o estudo de Pavanelli e Voulvoulis (2019) aborda no custo de reposição os valores referentes ao valor das matérias-primas extraídas das áreas desmatadas e a implementação de projetos de remediação primária e compensatória: com a inclusão do custo das matérias-primas extraídas da área danificada; o custo da remediação primária (projeto de reflorestamento na área danificada); o custo da remediação compensatória (projeto de reflorestamento nas áreas calculadas e o custo de instalação de cerca no entorno de áreas de recuperação e remediação natural.

O valor mínimo por há, com plantio de mudas, pela portaria nº 118 do IBAMA (Brasil, 2022) é de R\$ 17.733,17 (sem correção pelo IGP-M) para o custo de reposição. Calculando-se que a cada 6,00 m<sup>2</sup> se tem uma muda, em 1 ha (10.000,00 m<sup>2</sup>) tem-se o plantio de 1.666 mudas. Considerando-se o preço de R\$ 20,00 para o plantio de uma muda, somente para o plantio das mudas já seriam 33.333,33, quase duas vezes mais que o valor mínimo estabelecido pela portaria. Isto demonstra que o custo de reposição com os valores mínimos estabelecidos pela portaria subestima os valores de mercado para os serviços de reposição.

Aplicou-se o método de custo de reposição sem acrescentar o HEA como forma de comparar os resultados. Para a aplicação do método de custo de reposição sem o HEA, não foi utilizada a Equação 2, pois considerou-se o método de custo de reposição para a área danificada. Ao considerar a Equação 2 estar-se-ia considerando a regeneração natural da área além da sua recuperação, o que causaria um erro na aplicação do método de custo de reposição. Assim, o valor do dano com a aplicação apenas do método de custo de reposição resulta em R\$ 653.102,91, equivalente a R\$ 181.417,48/ha.

A diferença entre o valor econômico do dano, com e sem a aplicação do HEA, é de R\$ 229.433,94 (equivalente a R\$ 63.731,65/ha). Esta diferença representa o custo dos serviços ecossistêmicos, que deixaram de ser produzidos pela área de estudo, no período entre a intervenção na área até a regeneração natural, ao nível de produção de serviços que existiam antes do dano. Este é o custo que o método de custo de reposição aplicado sozinho não consegue captar.

Conforme Motta (1997), os métodos de valoração ambiental têm como objetivo determinar a variação de bem-estar das pessoas devido à variação na qualidade e quantidade de bens e serviços e, para isso, é importante que sejam capazes de captar as distintas parcelas de valor econômico do recurso ambiental (conforme a equação 1).

**Tabela 5 - Composição dos custos e resultados do custo de reposição**

PROJETO	ATIVIDADE	COMPOSIÇÃO	INSUMO	CAPACIDADE (m³/hora)		PREÇO		ÁREA		ATERRO	FONTE PREÇO	Quantidade necessária	CUSTO PARCIAL (R\$)	CUSTO POR ATIVIDADE (R\$)	CUSTO POR PROJETO	VALOR TOTAL DO DANO (R\$)
				m³	m³/h	R\$	UNIDADE	há	m²							
Regeneração natural da área de estudo	Remoção aterro	Máquina	-	-	31,87	1425	Diária	-	-	315	Pesquisa de mercado	1,24	1760,57	16854,32	22074,61	
		Caminhão	-	6	-	287,5	Carga			315	Pesquisa de mercado	52,5	15093,75			
	Regeneração natural	Custo mínimo regeneração natural	-	-	-	1.450,08	há	3,6	36000	-	Valor mínimo de referência para regeneração natural da Portaria nº 118/2022 IBAMA corrigido pelo IGP-M	-	5220,29	5220,29		
Recuperação da área de Compensação	Elaboração	-	Profissional	-	-	203,5	hora	4,82	48200	-	CFBIO (2023)	42	8547,00	9476,91	860462,25	882536,86
		-	BDI (%)	-	-	-	-	-	-	-	Instrução Normativa SIE nº 2 de 30/06/2020	10,88	-			
	Implantação	-	(Insumos e mão de obra)	-	-	8,15	m²	4,82	48200	-	Monteiro (2021) corrigido pelo IPCA (2024)	-	392830,00	392830,00		
		Replanteio	Mudas	-	-	12,00	und	4,82	48200	-	Pesquisa de mercado	1606,67	19280,00	27313,33		
	Mão de Obra		-	-	5,00	und	4,82	48200	-	Pesquisa de mercado	1606,67	8033,33				
	Manutenção	Manutenção periódica (x3 anos)	Limpeza	-	-	1,93	m²	4,82	48200	-	SINAP (2024)	Área total (48200 m²)	93026,00	399096,00		
			Adubação	-	-	4,98	m²	4,82	48200	-	SINAP (2024)	Por muda (1m²/muda)	40006,00			
	Monitoramento	Relatório de Monitoramento (x3 anos)	Profissional	-	-	203,5	hora	4,82	48200	-	CFBIO (2023)	52	31746,00	31746,00		

Fonte: os autores.

O procedimento (HEA + custo de reposição) engloba, além dos valores de Uso Direto (VUD), o Valor de Uso Indireto (VUI), que por definição atribui valores a um recurso natural quando seus benefícios derivam de funções ecossistêmicas. Ao utilizar-se o método HEA para estimar a perda de serviços ao longo dos anos, consegue-se trazer ao método de custo de reposição os valores de uso indireto (serviços ecossistêmicos).

Já o Valor de Opção (VO) é atribuído à preservação dos valores de uso direto e indireto para uso futuro (Motta, 1997). Por exemplo, uma planta da restinga, ainda não classificada, pode conter o princípio ativo de um remédio que poderá vir a ser a cura de uma grave doença que venha a assolar a humanidade. Assim sendo, o valor de opção é de difícil mensuração a partir do procedimento aplicado neste trabalho, principalmente considerando-se que a área de compensação estabelecida pode ser utilizada, após o período estipulado no método, para compensar os serviços ecossistêmicos perdidos com o dano interino. Ainda assim, é possível afirmar que os custos pela perda da opção de conservação da área durante o período de análise do HEA são restituídos pelo procedimento utilizado no presente trabalho.

O valor de existência é referente à conservação dos recursos naturais sem interesse de uso. Para captar este valor com o método deve-se focar em estimar o custo para conservação da área de estudo, o que não faz parte do escopo deste trabalho.

Este é o primeiro estudo de valoração econômica de danos ambientais em ecossistema de restinga com a aplicação do NDVI para determinação dos parâmetros quantitativos para o HEA.

Magliano (2019) relata que toda medida confiável que possa revelar a alteração na disponibilidade ou na qualidade dos serviços ecossistêmicos, seja em escala local ou regional, por medição direta ou remota, pode contribuir na estimativa de danos ambientais e de sua valoração. Portanto, considera-se que a aplicação realizada no presente estudo contribui para a elucidação da aplicação do NDVI na valoração de danos ambientais, não apenas

no ecossistema de restinga, mas também para sua extrapolação a outros ecossistemas e escala.

#### 4 CONCLUSÕES

O método de Análise de Equivalência de Habitat vem sendo utilizado e difundido na avaliação de danos aos recursos ambientais dos EUA e Europa. Aos poucos, o procedimento aplicado no presente estudo tem sido estudado para orientar a aplicação em avaliações de danos brasileiros (Pavanelli; Voulouvis, 2019). A área necessária para compensar a perda dos serviços ecossistêmicos foi de 4,82 hectares.

O valor econômico do dano ambiental foi de R\$ 245.149,13 por hectare no ecossistema de restinga herbácea/subarbusiva. Mais importantes que os valores encontrados são a discussão e a aplicação do procedimento em um ecossistema tão pouco estudado e bastante impactado. A aplicação do NDVI não era o objetivo inicial da presente pesquisa, entretanto se tornou um dos achados mais importantes do trabalho, pois a utilização do NDVI neste caso trouxe luz a um problema de difícil resolução na aplicação do método que é a determinação da linha de base e do tempo de recuperação do recurso.

Ao aplicar-se o método de custo de reposição, sem o método de análise de equivalência, a diferença no valor do dano ambiental foi de R\$ 63.731,65 por hectare a menos, o que demonstra a importância da utilização do método de análise de equivalência para capturar o prejuízo na produção dos serviços ecossistêmicos.

Para trabalhos futuros, sugere-se o estudo da aplicação do NDVI na valoração de danos ambientais para outros ecossistemas, bem como a adoção de procedimentos que incorporem métodos que consideram os danos interinos, tais como o HEA.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento com

bolsa de pesquisa em nível de mestrado.

## REFERÊNCIAS

ALLEN, D. P.; CHAPMAN, D. J.; LANE, D. Scaling Environmental Restoration to Offset Injury Using Habitat Equivalency Analysis. *In*: BRUINS, R. J. F.; HEBERLING, M. T. (Eds.). **Economics and ecological risk assessment: applications to watershed management**. 1st. ed. Washington, D.C.: CRC Press, 2005, p. 156–175.

ARAÚJO, D. S. D.; LACERDA, L. D. A natureza das restingas. **Ciência Hoje**, v. 6, n. 3, p. 42-48, 1987. Disponível em: BARBIER, E.B. *et al.* Estuarine and Coastal Ecosystems and Their Services. *In*: WOLANSKI, E.; MCLUSKY, D. (Editors). **Treatise On Estuarine and Coastal Science**. [S.L.]: Academic Press, 2011, v. 3, p. 109-127. ISBN: 978-0-08-087885-0. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-374711-2.01206-7>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/288174354\\_Estuarine\\_and\\_Coastal\\_Ecosystems\\_and\\_Their\\_Services](https://www.researchgate.net/publication/288174354_Estuarine_and_Coastal_Ecosystems_and_Their_Services). Acesso em: 10 mai. 2023.

BERGHÖFER A; SCHNEIDER A. **Indicators for Managing Ecosystem Services – Options & Examples: Guidance for seeking information that supports the integration of ecosystem services into policy and public management**. ValuES Project Report. Helmholtz Zentrum für Umweltforschung (UFZ) GmbH, Leipzig, and Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Eschborn. Germany, 2015. 49p. Disponível em: [http://aboutvalues.net/es/data/about\\_values/values\\_indicators\\_for\\_managing\\_ecosystem\\_services\\_options\\_and\\_examples\\_dec2015.pdf](http://aboutvalues.net/es/data/about_values/values_indicators_for_managing_ecosystem_services_options_and_examples_dec2015.pdf). Acesso em: 20 jan. 2023.

BEZERRA, A. C. *et al.* Aplicação da Análise de Equivalência de Habitat (HEA) na valoração do dano interino em áreas desmatadas de mata atlântica no estado de São Paulo. Grupo de Perícias em Meio Ambiente do NUCRIM/SETEC/SR/PF/SP, São Paulo, jul. 2020. 25p. Disponível em:

[https://www.researchgate.net/publication/357403342\\_Aplicacao\\_da\\_Analise\\_de\\_Equivalencia\\_de\\_Habitat\\_HEA\\_na\\_valoracao\\_do\\_dano\\_interino\\_em\\_areas\\_desmatadas\\_de\\_Mata\\_Atlantica\\_no\\_Estado\\_de\\_Sao\\_Paulo](https://www.researchgate.net/publication/357403342_Aplicacao_da_Analise_de_Equivalencia_de_Habitat_HEA_na_valoracao_do_dano_interino_em_areas_desmatadas_de_Mata_Atlantica_no_Estado_de_Sao_Paulo). Acesso em: 13 jul. 2022.

BUENO, L.; REIS, L. B. (org.). **Florianópolis Arqueológica!** Florianópolis: Editora UFSC, 2021, (eBook). 521 p. Disponível em: <https://leia.ufsc.br/2021/09/27/e-book-florianopolis-arqueologica/>. Acesso em: 24 set. 2023.

BURKHARD, B.; MÜLLER, F. Indicating human-environmental system properties: case study northern fenno-scandinavian reindeer herding. **Ecological Indicators**, [S.L.], v. 8, n. 6, p. 828-840, nov. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2007.06.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X07000635?via%3Dihub>. Acesso em: 08 jan. 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 303, de 20 de março de 2002**. Dispõe sobre parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente. Disponível em: [https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com\\_sisconama&task=documento.download&id=18409](https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&task=documento.download&id=18409). Acesso em: 03 dez. 2022.

BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Presidência da República, Brasília, DF, 2012. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm). 2021 Acesso em: 18 ago. 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos e Qualidade Ambiental. **Panorama da Erosão Costeira no Brasil**. Organização de Dieter Mueher. Brasília, DF: MMA, 2018. 759p. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Admils-on-Torres/publication/329171017\\_PANORAMA\\_DA\\_EROSAO\\_COSTEIRA\\_NO\\_BRASIL\\_Amapa\\_ISBN\\_978-85-7738-394-8\\_on\\_line/links/5bf9c88d299bf1a0203139f5/PANORAMA-DA-EROSAO-COSTEIRA-NO-BRASIL-Amapa-ISBN-978-85-7738-394-8-on-line.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Admils-on-Torres/publication/329171017_PANORAMA_DA_EROSAO_COSTEIRA_NO_BRASIL_Amapa_ISBN_978-85-7738-394-8_on_line/links/5bf9c88d299bf1a0203139f5/PANORAMA-DA-EROSAO-COSTEIRA-NO-BRASIL-Amapa-ISBN-978-85-7738-394-8-on-line.pdf). Acesso em: 10 jun. 2023.

BRASIL. Ministério Público do Estado de Santa Catarina. Ação Civil Pública contra Loteamento Santa Clara. Processo nº 1383-2021. Santa Catarina, 2021. Disponível em: <https://sc.movimentoods.org.br/wp-content/uploads/2021/07/ACP-Lot-Santa-Clara-IC-1383-2021-ass.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2023.

COSTANZA, R. *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature**. [S.L.], v. 387, p. 253-260, mai. 1997a. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/40197297\\_The\\_value\\_of\\_the\\_world's\\_ecosystem\\_services\\_and\\_natural\\_capital\\_Nature](https://www.researchgate.net/publication/40197297_The_value_of_the_world's_ecosystem_services_and_natural_capital_Nature). Acesso em: 15 mar. 2023.

DALE, V. H.; BEYELER, S. C. Challenges in the development and use of ecological indicators. **Ecological Indicators**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 3-10, ago. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1470-160x\(01\)00003-6](http://dx.doi.org/10.1016/s1470-160x(01)00003-6). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X01000036?via%3Dihub>. Acesso em: 10 jun. 2023.

DESVOUSGES, W. H. *et al.* Habitat and Resource Equivalency Analysis: a critical assessment. **Ecological Economics**, [S.L.], v. 143, p. 74-89, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.07.003>. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/31>

8410500\_Habitat\_and\_Resource\_Equivalency\_Analysis\_A\_Critical\_Assessment. Acesso: 27 jul. 2023.

DUNFORD *et al.*, 2004. The use of habitat equivalency analysis in natural resource damage assessments. **Ecological Economics**, [S.L.], v. 48, n. 1, p. 49-70, jan. 2004. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2003.07.011>. Acesso em 27 jul. 2023.

ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. National Oceanic and Atmospheric Administration. **Title 15 - Commerce and Foreign Trade**. Electronic Code of Federal Regulations, Washington, D.C., (2024). Disponível em: <https://www.ecfr.gov/current/title-15/subtitle-B/chapter-IX/subchapter-E/part-990/subpart-C/section-990.30>. Acesso em: 10 jun. 2023.

FALKENBERG, D. de B. Aspectos da flora e da vegetação secundária da restinga de Santa Catarina, sul do Brasil. **Ínsula**, Florianópolis, v. 28, p. 1-30, 1999. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/insula/article/view/21771>. Acesso em: 5 ago. 2023.

FLORIANÓPOLIS. Geoportal da Prefeitura Municipal de Florianópolis. Disponível em: <https://geoportal.pmf.sc.gov.br/map>. Acesso em: 15 jun. 2024.

FLORIANÓPOLIS. Plano Municipal da Mata Atlântica. Florianópolis: Prefeitura Municipal, 2020. 160 p. Disponível em: <https://www.pmf.sc.gov.br/arquivos/arquivos/PDF/PMMA%202020.pdf>. Acesso em: 5 ago. 2023.

FONSECA, M. S. *et al.* Integrating biology and economics in seagrass restoration: how much is enough and why? **Ecological Engineering**, [S.L.], v. 15, n. 3-4, p. 227-237, jul. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0925-8574\(00\)00078-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0925-8574(00)00078-1). Disponível em: <https://oceanfdn.org/sites/default/files/Fonseca%20-%20Integrating%20biology%20and%20eco>

nomics%20in%20seagrass%20restoration%20How%20much%20is%20enough%20and%20why%3F.pdf. Acesso em: 18 nov. 2023.

GAMARRA, R. M. *et al.* Uso do ndvi na análise da estrutura da vegetação e efetividade da proteção de unidade de conservação no cerrado. **RAEGA - O Espaço Geográfico em Análise**, Curitiba, v. 37, p. 307-332, 2016. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/download/42454/29046>. Acesso em: 20jun 2023.

GAO, X. *et al.* Optical–Biophysical Relationships of Vegetation Spectra without Background Contamination. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 74, n. 3, p. 609-620, dez. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0034-4257\(00\)00150-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0034-4257(00)00150-4). Disponível em: [https://www.academia.edu/7672651/Optical\\_Biophysical\\_Relationships\\_of\\_Vegetation\\_Spectra\\_without\\_Background\\_Contamination](https://www.academia.edu/7672651/Optical_Biophysical_Relationships_of_Vegetation_Spectra_without_Background_Contamination). Acesso em: 20 dez. 2023.

GHERMANDI, A. *et al.* Recreational, Cultural and Aesthetic Services from Estuarine and Coastal Ecosystems. **SSRN Electronic Journal**, [S.L.], n. 12, p. 1-61, jan. 2010. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1532803>. Acesso em: 10 mar. 2023.

HUETE, A. *et al.* Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 83, n. 1-2, p. 195-213, nov. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0034-4257\(02\)00096-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0034-4257(02)00096-2). Disponível em: [https://cimss.ssec.wisc.edu/dbs/China2011/Day2/Lectures/MODIS\\_MOD13\\_NDVI\\_referenc.pdf](https://cimss.ssec.wisc.edu/dbs/China2011/Day2/Lectures/MODIS_MOD13_NDVI_referenc.pdf). Acesso em: 10 mar. 2023

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Portaria nº 118, de 03 de outubro de 2022. Institui Procedimento Operacional Padrão (POP) para Estimativa dos Custos de Implantação e Manutenção de Projeto de Recuperação Ambiental nos Biomas Brasileiros, para Compôr Valor

Mínimo da Reparação por Danos Ambientais à Vegetação Nativa, em Processos Administrativos no âmbito do Ibama. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=139171>. Acesso em: 10 jan. 2023.

JESUS, R. M. de. Recuperação de Áreas Degradadas. In: CONGRESSO NACIONAL DE ESSÊNCIAS NATIVAS, 2, 1992, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: Instituto Florestal, 1992. p. 407-412.

KANDZIORA, M. *et al.* Interactions of ecosystem properties, ecosystem integrity and ecosystem service indicators—A theoretical matrix exercise. **Ecological Indicators**, [S.L.], v. 28, p. 54-78, mai. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.09.006>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/257592947\\_Interactions\\_of\\_ecosystem\\_properties\\_ecosystem\\_integrity\\_and\\_ecosystem\\_service\\_indicators-A\\_theoretical\\_matrix\\_exercise](https://www.researchgate.net/publication/257592947_Interactions_of_ecosystem_properties_ecosystem_integrity_and_ecosystem_service_indicators-A_theoretical_matrix_exercise). Acesso em: 10 jan. 2023.

KING, D. M; ADLER, K. J. Scientifically Defensible Compensation Ratios for Wetland Mitigation. Washington, D.C.: [s.n.], 1991. 16p.

MAGLIANO, M. M. VALORAÇÃO ECONÔMICA DE DANOS AMBIENTAIS. 183 f. 2019. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2019. Disponível em: [http://www.realp.unb.br/jspui/bitstream/10482/37179/1/2019\\_MauroMendonc3a7aMagliano.pdf](http://www.realp.unb.br/jspui/bitstream/10482/37179/1/2019_MauroMendonc3a7aMagliano.pdf). Acesso em: 20 nov. 2022.

MAGLIANO, M. M. Valoração econômica em perícias de crimes ambientais: por que, para quem e os desafios de realizá-la. **Revista Brasileira de Ciências Policiais**, Academia Nacional de Polícia, Brasília, DF, v. 13, n. 7, p. 351-386, 19 jan. 2022. <http://dx.doi.org/10.31412/rbcp.v13i7.814>. Disponível em: Disponível em:

<https://periodicos.pf.gov.br/index.php/RBCP/article/view/814>. Acesso em: 10 jun 2023.

MATTEUCCI, S.D; COLMA, A. Metodologia para el estudio de la vegetation. Washington, DC: Secretaria General de la Organizacion de los Estados Americanos, Programa Regional de Desarrollo Cientifico y Tecnológico, 1982. 159p. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/44553298\\_Metodologia\\_para\\_el\\_estudio\\_de\\_la\\_vegetacion\\_por\\_Silvia\\_D\\_Matteucci\\_y\\_Aida\\_Colma](https://www.researchgate.net/publication/44553298_Metodologia_para_el_estudio_de_la_vegetacion_por_Silvia_D_Matteucci_y_Aida_Colma). Acesso em: 14 abr. 2022.

MONTEIRO, P. C. **VESEAPP - Valoração econômica dos serviços ecossistêmicos em Área de Preservação Permanente de curso d'água**: subsídio para avaliação de danos, impactos e compensações ambientais. 2021. 105 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Perícias Criminais Ambientais) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/234991/PPCA0061-D.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 nov. 2021.

MOTTA, R. S. **Manual para valoração econômica de recursos ambientais**. Rio de Janeiro: IPEA/MMA/PNUD/CNPq, 1997, 254p. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/8021307/mod\\_resource/content/1/manual-para-valoracao-economica-de-recursos-ambientais.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/8021307/mod_resource/content/1/manual-para-valoracao-economica-de-recursos-ambientais.pdf). Acesso em: 15 dez 2021.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. An Ecosystem Services Approach to Assessing the Impacts of the Deepwater Horizon Oil Spill in the Gulf of Mexico. Washington, DC: The National Academic Press, 2013. 350 p. Disponível em: <https://nap.nationalacademies.org/read/18387/chapter/1>. Acesso em: 19 set 2023.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). **Purchasing power parities - PPP (indicator)**. DOI: 10.1787/1290ee5a-em. Disponível em: <https://www.oecd.org/en/data/indicators/pur>

[chasing-power-parities-ppp.html](#). Acesso em: 14 jan. 2024.

PAVANELLI, D. D.; VOULVOULIS, N. Habitat Equivalency Analysis, a framework for forensic cost evaluation of environmental damage. **Ecosystem Services**, [S.L.], v. 38, p. 100953, ago. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100953>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/334098710\\_Habitat\\_Equivalency\\_Analysis\\_a\\_framework\\_for\\_forensic\\_cost\\_evaluation\\_of\\_environmental\\_damage](https://www.researchgate.net/publication/334098710_Habitat_Equivalency_Analysis_a_framework_for_forensic_cost_evaluation_of_environmental_damage). Acesso em: 20 jun. 2022.

PRANDINI, F. L.; IWASA, O. Y.; OLIVEIRA, A. M. S. A cobertura vegetal nos processos e evolução do relevo: o papel da floresta. *In*: CONGRESSO NACIONAL SOBRE ESSÊNCIAS NATIVAS, 1, 1982, Campos de Jordão. **Anais[...]**. Campos de Jordão: Silvicultura em São Paulo, 1982, p.1568-1582.

RICKLEFS, R. E. **A economia da natureza**. 5. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2003.

ROUSE, J. W. *et al.* Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *In*: PROCEEDING OF ERTS SYMPOSIUM. **Anais [...]**. NASA, United States, n. 3. p. 309-317, 1973. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19740022614/downloads/19740022614.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2023.

TOMAZZOLI, E.R.; PELLERIN, J.R.G.M. **Mapa geológico da ilha de Santa Catarina**. 1. ed. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina; Departamento de Geociências, 2014. Disponível em: <https://lmo.ufsc.br/mapa-geologico-da-ilha-de-santa-catarina/>. Acesso em: 10 jun. 2023.

UNIVERSIDADE DE BLUMENAU (FURB). Mapa Interativo. Disponível em: <https://monitora.furb.br/maps/47>. Acesso em: 15 jun. (2024).

UNSWORTH, R. E; BISHOP, R. C.  
Assessing natural resource damages using environmental annuities. **Ecological Economics**, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 35-41, 1994. Elsevier.

[https://doi.org/10.1016/0921-8009\(94\)90048-5](https://doi.org/10.1016/0921-8009(94)90048-5). Disponível em:  
<https://econpapers.repec.org/scripts/redir.pf?u=http%3A%2F%2Fwww.sciencedirect.com%2Fscience%2Farticle%2Fpii%2F0921-8009%2894%2990048-5;h=repec:eee:ecolec:v:11:y:1994:i:1:p:35-41>. Acesso em: 7 fev 2023.

VIEHMAN, S.; THUR, S. M.; PINIAK, G. A.  
Coral reef metrics and habitat equivalency analysis. **Ocean & Coastal Management**, [S.L.], v. 52, n. 3-4, p. 181-188, mar. 2009. Elsevier

BV.<http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2008.12.004>. Disponível em:  
[https://www.researchgate.net/publication/222399534\\_Coral\\_reef\\_metrics\\_and\\_habitat\\_equivalency\\_analysis](https://www.researchgate.net/publication/222399534_Coral_reef_metrics_and_habitat_equivalency_analysis). Acesso em: 5 jul. 2023.

VIEIRA, J. P. P. **Valoração de danos ambientais em ecossistemas florestais:**

adaptação do método do custo de reposição com vistas à sua aplicação na perícia criminal ambiental. 2013. Dissertação (Mestrado Profissional em Perícias Ambientais Criminais) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. 115 p. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/122633>. 2021. Acesso em: 15 ago. 2021.

YENGOH, G. T. *et al.* Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Assess Land Degradation at Multiple Scales. *Springerbriefs in Environmental Science*, [S.L.], p. 1-110, 2016. Springer International Publishing. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-24112-8>.

WIENS, J. A. Recovery of seabirds following the Exxon Valdez oil spill: an overview. *In*: WELLS, P. G.; BUTLER, J. N.; HUGHES, J. S. (eds). **Exxon Valdez Oil Spill: Fate and Effects in Alaskan Waters**. Philadelphia: American Society of Testing and Materials, Special Technical Publication n. 1219, 1995, p. 854–893.