

José Antônio Duarte da Silva

**Proposta de um Índice para Detecção de Macro
e Microplásticos em Zonas Costeiras Através de
Sensoriamento Remoto Hiperespectral**

Porto Alegre

2020

José Antônio Duarte da Silva

**Proposta de um Índice para Detecção de Macro e
Microplásticos em Zonas Costeiras Através de
Sensoriamento Remoto Hiperespectral**

Trabalho submetido ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto como requisito para a obtenção do Grau de Mestre em Sensoriamento Remoto pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS
Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Lima Hackmann

Porto Alegre

2020

CIP - Catalogação na Publicação

da Silva, José Antônio Duarte
Proposta de um Índice para Detecção de Macro e
Microplásticos em Zonas Costeiras Através de
Sensoriamento Remoto Hiperespectral / José Antônio
Duarte da Silva. -- 2020.
55 f.
Orientador: Cristiano Lima Hackmann.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em
Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Programa de
Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre,
BR-RS, 2020.

1. Sensoriamento Remoto. 2. Detecção de macro e
micro plásticos . 3. Poluição por plásticos em regiões
costeiras. 4. Índice de sensoriamento remoto em
imagens hiperespectrais. I. Hackmann, Cristiano Lima,
orient. II. Título.

José Antônio Duarte da Silva

Proposta de um Índice para Detecção de Macro e Microplásticos em Zonas Costeiras Através de Sensoriamento Remoto Hiperespectral

Trabalho submetido ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto como requisito para a obtenção do Grau de Mestre em Sensoriamento Remoto pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Cristiano Lima Hackmann
Orientador

Prof.
Dr. Cesar Liberato Petzhold - UFRGS

Prof.
Dr. Eliseu Jose Weber - UFRGS

Prof.
Dr. Ulisses Franz Bremer - UFRGS

Porto Alegre
2020

*Dedico esta dissertação aos meus pais,
José Matos da Silva e Maria do Carmo
Duarte da Silva, pelo apoio incondicional
e constante incentivo ao meu crescimento
profissional e pessoal.*

Resumo

A poluição marinha é um problema com impactos ambientais, econômicos e sociais, de dimensões globais. Diversos estudos demonstram que ações para a detecção de acúmulos de plásticos e microplásticos no meio ambiente são necessárias. Portanto o desenvolvimento de métodos para detecção remota tem grande importância para um monitoramento contínuo do problema. Os estudos neste trabalho visam ser uma base útil a ser aplicada no desenvolvimento do sensoriamento remoto (SR) de plásticos. A partir do método do ângulo de similaridade espectral (SAM), observamos o grau de similaridade entre cada um dos cinco polímeros: Polietileno de baixa densidade (LDPE), Politereftalato de etila (PET), Polipropileno (PP), Policloreto de vinila (PVC) e Poliamida 6.6 (PA6.6); e uma amostra de microplásticos coletados de ambiente costeiro. O resultado indicou que a assinatura espectral do PET é aquela que apresenta maior similaridade com a amostra de plásticos encontrados no meio ambiente. Por isso sugerimos que um limiar $\theta = 0,25$ radianos ($14,3^\circ$) pode ser empregado como parâmetro para a identificação de materiais plásticos em imagens de SR. O método de cálculo do Índice de Hidrocarbonetos Simplificado (HIS) foi desenvolvido com base nas características espectrais dos polímeros. Simulações de mistura espectral linear de diferentes proporções polímero/água e polímero/areia, mostraram haver uma relação de proporcionalidade entre o índice de hidrocarbonetos simplificado (HIS) e o índice de hidrocarbonetos (HI). O HI é um método que já tem sido empregado no sensoriamento de plásticos e uma comparação entre os resultados destes índices em uma imagem do sensor AVIRIS serviu de parâmetro para avaliar a eficácia do HIS. Também foram realizados testes com imagens de sensoriamento remoto simuladas no modelo de transferência radiativa anisotrópica discreta (DART). Estes testes sugerem que há a capacidade de detecção da proporção de plásticos existentes em uma cena, a partir do valor do HIS calculado para cada pixel da respectiva imagem, por um comportamento polinomial na relação entre a proporção de plásticos e o valor de HIS, no entanto outros estudos precisam ser realizados para confirmar a acurácia do método. Após identificadas eficácias equivalentes entre os resultados dos métodos HIS e HI, foi realizada uma classificação com base no cálculo do SAM e o resultado deste procedimento foi comparado ao resultado obtido pelo HIS. A partir da composição entre os resultados, demonstramos que os métodos de classificação SAM e HIS concordam com a presença das substâncias pesquisadas em regiões de altas concentrações do material. Porém em regiões de baixa concentração, com alto grau de misturas espectrais ou na presença de solo exposto, os métodos apresentaram algumas divergências. Vimos neste trabalho que a detecção de plásticos no ambiente natural é viável. As características espectrais dos plásticos podem ser detectadas por SR e apresentam um bom destaque em relação a outros materiais feitos pelo homem e aos materiais naturais presentes na cena. No entanto a acurácia do método precisa ser melhorada.

Abstract

Marine pollution is a problem with global environmental, economic and social impacts. Several studies demonstrate that actions to detect accumulations of plastics and microplastics in the environment are necessary. Therefore, the development of methods for remote detection is of great importance for the continuous monitoring of this problem. This study aims to be a useful basis to be applied in the development of plastics remote sensing (SR). Based on the application of the spectral similarity angle mapper (SAM) algorithm, we measured the degree of similarity between each of these five polymers: Low density polyethylene (LDPE), Ethyl polyethylene terephthalate (PET), Polypropylene (PP), Polyvinyl chloride (PVC)) and Polyamide 6.6 (PA6.6); against a sample of microplastics collected from a coastal environment. The result indicated that the spectral signature of PET is the one that most resembles the sample of microplastics found in the environment. That is why we suggest that a threshold $\theta = 0.25$ radians ($14,3^\circ$) can be used as a parameter for the identification of plastic materials in SR images. The method of calculating the Simplified Hydrocarbon Index (HIS) was developed based on the spectral characteristics of the polymers. Simulations of linear spectral mixing of different proportions of polymer / water and polymer / sand showed a relationship between the simplified hydrocarbon index (HIS) and the hydrocarbon index (HI). HI is a method that has been used for the detection of plastics, and a comparison between the results of these indices in an image of the AVIRIS sensor served as a parameter to evaluate the effectiveness of HIS. Tests were also performed with remote sensing images simulated in the Discrete Anisotropic Radiative Transfer (DART) model. These tests suggest that there is a possibility to detect the proportion of accumulated plastics in a scene, based on the HIS value calculated for each pixel in the respective image, by a polynomial behavior in the relationship between the proportion of plastics and the HIS value. Nonetheless, further studies need to be carried out to confirm the accuracy of this method. After identifying equivalent efficacies between the results of the HIS and HI methods, a supervised classification was performed based on the calculation of the SAM algorithm and the result of this procedure was compared to the result obtained by the HIS. From the composition between the results, we demonstrate that the classification SAM and HIS methods agree with the presence of the substances surveyed in regions of high concentrations of the material. However, in regions of low concentration, with a high degree of spectral mixtures or in the presence of exposed soil, the methods presented some divergences. We observed in this work that the detection of plastics in the natural environment is feasible. The spectral characteristics of plastics can be detected by SR and present a good prominence in relation to other man-made materials and the natural features present in the scene. However, the accuracy of the method needs to be improved.

Sumário

	Introdução	13
1	OBJETIVOS	16
1.1	Objetivo Geral	16
1.2	Objetivos Específicos	16
I	APRESENTAÇÃO DO CENÁRIO	17
2	O PROBLEMA DE ESTUDO	18
2.1	Problemas ambientais	20
2.2	Coleta de dados	21
II	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
3	POLÍMEROS E SENSORIAMENTO REMOTO NIR	25
3.1	Polímeros	25
3.2	Sensoriamento remoto no infravermelho próximo (NIR) - Base química	26
3.3	Índice de Hidrocarboneto (HI)	28
III	MATERIAL E MÉTODOS	30
4	MATERIAL	31
4.1	Modelo de Transferência Radiativa Anisotrópica Discreta (DART)	31
4.2	Criação de cenas simuladas	32
4.3	Espectros de refletância considerados	33
4.4	O sensor Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS)	34
5	MÉTODOS	35
5.1	Identificação digital de assinaturas espectrais de microplásticos	35
5.2	Método de Mapeamento por Ângulo Espectral (SAM)	36
5.3	Proposta de Cálculo do Índice de Hidrocarbonetos Simplificado	37
5.3.1	Detalhes da cena simulada para avaliação do HIS	38

IV	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
6	RESULTADOS	40
6.1	Resultados do estudo da similaridade espectral de microplásticos coletados comparados aos espectros de pellets virgens.	40
6.1.1	Discussão dos resultados do estudo da Similaridade espectral	41
6.2	Avaliação do índice de hidrocarbonetos simplificado HIS	41
6.2.1	Testes preliminares	41
6.2.2	Avaliação da eficácia do Índice HIS	44
6.2.3	Resultados da classificação pelo cálculo do SAM	45
6.2.4	Mapa de detecção SAM-HIS	47
6.2.5	Resultados das estimativas de proporções em imagens simuladas	48
6.2.6	Discussão dos resultados	50
	Conclusões	53
	REFERÊNCIAS	54

Lista de ilustrações

Figura 1 – Os 5 Giros Oceânicos - Fonte: <supercalibiologic.files.wordpress.com>	18
Figura 2 – A - Imagem de detritos de macrolásticos secos coletados no mar por Garaba e colaboradores, parte da exposição pública “Washed Ashore: Art to Save the Sea” at the Mystic Aquarium, Mystic CT, USA.". B - Fragmentos de microplásticos secos amostrados do Oceano Atlântico Norte foram separados em diferentes classes de tamanho. A configuração de amostragem no painel inferior direito mostra um lambertiano Painel Spectralon e as partículas agregadas em um fundo de borracha preta usado para obter uma medição de refletância em massa. Adaptado de (GARABA; DIERSSEN, 2018).	19
Figura 3 – Tartaruga Marinha comendo uma sacola de plástico. Créditos: Ashley Moore , <www.flickr.com/photos/100960649@N05/9659196479/.>	20
Figura 4 – Ave marinha morta com o estômago repleto de plástico. Créditos: Brian Gratwicke, <www.bioorbis.org/2015/10/estomagos-de-plastico.html.>	21
Figura 5 – Microplásticos recolhidos de praia na Europa. (WRIGHT; ET.AL., 2013)	22
Figura 6 – Bandas de combinações harmônicas NIR (tons e sobretons), gráfico obtido de (XIAOBO et al., 2010)	27
Figura 7 – Porção aumentada do comprimento de onda 1730 nm da assinatura espectral (brilho) de materiais hidrocarbonetos com pontos de índice A, B e C para o Índice de hidrocarbonetos; R_i e λ_i são os valores de radiância e comprimentos de onda nos pontos de índice. Adaptado de (KÜHN; OPPERMANN; HÖRIG, 2004).	29
Figura 8 – Matriz de células DART (Gastellu-Etchegorry et al., 2017).	32
Figura 9 – Exemplo de uma cena simulada (Fonte: próprio autor).	33
Figura 10 – Biblioteca espectral de referência obtida de pellets virgens, gráfico gerado a partir de dados disponibilizados por (GARABA; DIERSSEN, 2018).	34
Figura 11 – Cena simulada no modelo (areia de praia, água do mar e microplásticos). A) Vista de uma perspectiva ao Nadir. B) Cena tridimensional. (Fonte: próprio autor.)	36
Figura 12 – Triângulo formado pelos pontos de índice.(Fonte: próprio autor)	37
Figura 13 – Figura tridimensional da cena simulada por uma visada ao nadir. (Fonte: próprio autor)	38
Figura 14 – Comparação dos resultados dos índices HIS e HI para a banda 1175.(Fonte: próprio autor.	42

Figura 15 – Comparação dos resultados dos índices HIS e HI para a banda 1216.(Fonte: próprio autor)	42
Figura 16 – Comparação dos resultados dos índices HIS e HI para a banda 1732.(Fonte: próprio autor)	43
Figura 17 – (A) Composição de cores RGB de uma imagem AVIRIS na vizinhança de Sunshine Canyon Landfill na California-USA e do Metropolitan Water District plant. Ciscunscritos por caixas de pontilhados vermelho indicam alvos com concentrações de material com caraterísticas de absorção em 1732 nm. (B) Mapa baseando no índice de hidrocarbonetos sobre a característica de absorção em 1732 nm (HI_{1732}). (C) Pixels alvo usados na análise do histograma (D) Histograma e legenda de cores para o HI_{1732} . (Fonte:Imagem adaptada de (GARABA; DIERSSEN, 2018))	44
Figura 18 – Comparação dos resultados dos índices HI e HIS na imagem AVIRIS f111115t01p00r08rdn, para a banda 1732 nm. (Fonte: próprio autor)	45
Figura 19 – Classificação SAM $\theta = 0,25$ radianos ($14,3^\circ$) em relação a assinatura espectral do polímero PET. (Fonte: próprio autor)	45
Figura 20 – Comparação entre os métodos SAM e HIS (Fonte: próprio autor)	46
Figura 21 – Mapas de detecção HIS e SAM-HIS (Fonte: próprio autor)	47
Figura 22 – Aterro de Sunshine Canyon,CA-Estados Unidos (Fonte: próprio autor).	47
Figura 23 – Variações HIS por proporção no pixel em imagens simuladas. (Fonte: próprio autor)	49
Figura 24 – Comparativo de resultados de HIS em pixels puros de diversos materiais.	49

Lista de tabelas

Tabela 1 – Polímero de interesse, sigla, características físicas e utilidades comuns.	26
Tabela 2 – Composição dos pixels mistura.	32
Tabela 3 – Mapeamento de ângulo espectral (θ) para μ -NAPO na areia.	40
Tabela 4 – Mapeamento de ângulo espectral (θ) para μ -NAPO na água.	41
Tabela 5 – HIS dos pixels contendo proporções de microplásticos sobre água.	48
Tabela 6 – HIS dos pixels contendo proporções de microplásticos sobre areia.	48
Tabela 7 – HIS médios dos pixels contendo proporções de pellets sobre água.	48
Tabela 8 – HIS médios dos pixels contendo proporções de pellets sobre areia	48
Tabela 9 – HIS de outros materiais.	49

Siglas

μ - NAPO - Banco de dados de refletância de microplásticos coletados em materiais marinhos secos no Atlântico Norte e no Oceano Pacífico

ABIQUIM - Associação Brasileira da Indústria Química

ABRE - Associação Brasileira de Embalagens

AVIRIS - Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer

BRDF - fator de refletância bidirecional

COPLAST Comissão Setorial de Resinas Termoplásticas

DART - Modelo de Transferência Radiativa Anisotrópica Discreta

EcoSIS - Ecological Spectral Information System

ENVI - Environment for Visualizing Images - SulSoft

HI - índice de Hidrocarbonetos

HIS - Índice de Hidrocarbonetos Simplificado

IFOV - Instantaneous Field of View

JPL - Jet Propulsion Laboratory

LDPE - Polietileno de baixa densidade

NIR - Near infrared

PA6.6 - Poliamida 6.6

PET - Politereftalato de etila

PMMA - polimetacrilato de metila

PNUMA - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

PP - Polipropileno

PVC - Policloreto de vinila

REM - radiação eletromagnética

SAM - Spectral Angular Mapper

SCM - Mapeador de Correlação Espectral

SR - Sensoriamento Remoto

VANTs- Veículos aéreos não tripulados

VMP - Banco de dados de refletância de pellets virgens de microplásticos

Introdução

O impacto ambiental causado pela presença de detritos de plástico nos oceanos tem aumentado nas últimas quatro décadas. Esta é uma consequência direta do desenvolvimento da produção de plásticos que cresce exponencialmente ao longo dos anos. A falta de conscientização da população em relação ao descarte correto desses materiais, o tratamento inadequado, a falta de tratamento, investimentos em operações de reciclagem modestos se comparados com a produção, também contribuem para o agravamento do problema.

Em relação ao aumento na produção destes materiais, por exemplo: no Brasil o consumo de resinas termoplásticas, medido em toneladas, cresceu 5,2% em 2017, comparado ao ano anterior, dados da Comissão Setorial de Resinas Termoplásticas (COPLAST) da Associação Brasileira da Indústria Química (ABIQUIM), informação obtida na Associação Brasileira de Embalagens (ABRE, 2019); Em dezembro de 2018 a produção norte-americana de resinas plásticas totalizou um aumento de 6,3% em comparação com o mesmo mês de 2017, estatística publicada pelo American Chemistry Council (ACC, 2019).

A tendência de constante crescimento na indústria dos plásticos ocorre devido a facilidade com que esses materiais podem ser moldados, a variedade de características físicas que possuem e o baixo custo de produção. Estes materiais substituíram ao longo dos anos o uso de madeira, vidro e metal em uma diversidade de utensílios da atividade humana. Essa versatilidade tornou possível a produção em larga escala e de baixo custo de uma variedade de utensílios tornando-os acessíveis a toda a população.

Por outro lado, houve o surgimento de um grande problema com sua popularização. Seu uso, principalmente como recipientes descartáveis, o despreparo para o gerenciamento de resíduos tanto por parte da administração pública quanto por parte dos cidadãos em geral, tornaram o lixo plástico, abandonado no meio ambiente, um problema de escala global. Esta poluição ganhou notoriedade porque sob a ação das intempéries esses detritos tendem a chegar nos rios e mares. Uma vez nas águas oceânicas, por meio das correntes marítimas, podem viajar milhares de quilômetros e se acumular em regiões costeiras remotas, formar as manchas de lixo plástico no centro dos giros oceânicos e até mesmo chegar às calotas polares. Esses acúmulos causam um grande impacto negativo ao ambiente, fauna e flora, e também a economia, pesca artesanal, industrial e turismo certamente são afetados.

Desta forma, o combate a esta poluição por plásticos se tornou um assunto de interesse para pesquisa em todas as nações. O sensoriamento remoto (SR) tem o potencial de fornecer monitoramento global de longo prazo, mas para os plásticos marinhos ainda está em seus estágios iniciais (GODDIJN-MURPHY et al., 2018). Por estes motivos se

fazem necessários esforços no desenvolvimento de conhecimentos capazes de estabelecer procedimentos para a obtenção de informação, de forma sistemática, sobre o problema. As informações obtidas por estes procedimentos poderão ser úteis no entendimento da dinâmica de acumulação de detritos e na determinação e planejamento de ações de limpeza da costa e para a prevenção de reincidência de acúmulos. Esta seria uma forma de combate ao despejo de detritos de plástico em ambientes marinhos, uma atitude que se alinharia com o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) em suas diretrizes sobre a poluição marinha.

O presente trabalho propôs-se a explorar os conhecimentos mais recentes referentes ao SR de plásticos em ambientes marinhos e costeiros e avaliar a possibilidade do monitoramento da poluição por plásticos utilizando as tecnologias de SR disponíveis hoje. Na etapa inicial do trabalho identificamos os principais avanços em relação à caracterização espectral dos plásticos. Na segunda etapa foi realizado um estudo de similaridade espectral com o objetivo de obter um melhor entendimento das respostas espectrais características de plásticos em ambientes naturais.

Para isso o método utilizado foi o cálculo do ângulo de similaridade espectral descrito na Seção 5.2, o conhecimento adquirido pode ser usado no procedimento de classificação de imagens para a detecção de plásticos. Na terceira etapa propomos um Índice de plásticos para Imagens de sensores suborbitais hiperespectrais, visto que o uso de um índice pode apresentar vantagens computacionais em relação ao uso outros métodos. Espera-se que, tanto a classificação utilizando o SAM quanto o índice proposto, tenham a capacidade de identificar a presença de acúmulos de detritos.

O sensor AVIRIS é um bom representante da tecnologia de imageamento hiperespectral, uma descrição deste sensor será dada na seção 4.4. O modelo de transferência radiativa anisotrópica discreta (DART) é um modelo capaz de simular um sistema de SR completo: sensor, atmosfera, cena e características de iluminação da cena podem ser controlados utilizando esta ferramenta (GASTELLU-ETCHEGORRY; MARTIN; GASCÓN, 2004). Neste trabalho o modelo DART foi utilizado para a produção de resultados simulados do sensor AVIRIS. Tais simulações foram úteis no desenvolvimento dos estudos de similaridade espectral e na avaliação do índice proposto.

As pesquisas relacionadas ao SR de plásticos nos oceanos estão em suas fases iniciais, a maioria dos trabalhos foram realizados dentro dos últimos cinco anos. Apesar do problema ser conhecido há muitos anos e inúmeros trabalhos de outras linhas de pesquisa, tais como a oceanografia e a biologia marinha, terem se engajado no estudo do problema, os pesquisadores das áreas do SR iniciaram seus desenvolvimentos somente agora, porque a tecnologia necessária alcançou a precisão em resoluções espaciais e espectrais suficientes para a realização do sensoriamento muito recentemente. A procura por informações específicas em relação ao SR de plásticos nos oceanos e a busca por um melhor entendimento

do comportamento espectral dos plásticos em ambientes naturais levou ao encontro dos trabalhos de (GARABA; DIERSSEN, 2019; GARABA; DIERSSEN, 2018; GARABA; DIERSSEN, 2017), estas obras nortearam a maior parte do presente trabalho.

1 Objetivos

1.1 Objetivo Geral

Explorar os métodos de sensoriamento remoto hiperespectral a fim de detectar plásticos em ambientes marinhos e costeiros.

1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a possibilidade de detecção da assinatura espectral de plásticos em ambientes naturais por sensoriamento remoto hiperespectral.
- Propor um índice para identificar a presença de plástico por pixel.
- Estimar a proporção de plástico por pixel utilizando o índice proposto.

Parte I

Apresentação do Cenário

2 O problema de estudo

A poluição por plásticos descartados no ambiente marinho e costeiro, como acontece em muitos problemas ambientais, é transfronteiriço e as soluções de governança são complexas. Embora seja improvável que o ambiente marinho retorne à condição anterior à “era do plástico”, o combate a este problema é um desafio de restauração ambiental em que a governança bem-sucedida e a administração ambiental provavelmente resultariam em um ecossistema oceânico global mais saudável. Portanto, se faz necessária uma abordagem integrada que utilize a "expertise" científica, participação da comunidade e estratégias baseadas no mercado para reduzir significativamente o problema global da poluição plástica (VINCE; HARDESTY, 2017).

O acúmulo nos giros oceânicos é um fenômeno que foi muito bem descrito por Charles J. Moore, oceanógrafo, pesquisador e capitão de navio, que localizou em 1997 a Grande Mancha de lixo do Pacífico Norte e vêm estudando o problema ao redor do mundo. Moore esteve recentemente no giro do Atlântico Sul e observou o mesmo problema (Figura 1).



Figura 1 – Os 5 Giros Oceânicos - Fonte: <supercalibiologicistic.files.wordpress.com>

Além do lixo urbano comum, em alto mar e nas regiões costeiras, há também a presença de artefatos de pesca abandonados - redes fantasma (Ghost Nets), boias, linhas e iscas artificiais. Esses elementos exógenos no mar apresentam ameaças físicas, biológicas e químicas aos ecossistemas marinhos.

Muitos trabalhos vêm sendo realizados desde 1997, evidenciando uma grande mortandade da fauna marinha ocasionada pelo emaranhamento, entalamento e ingestão de detritos de plástico. As populações de aves, como os pelicanos e albatrozes, grandes peixes, mamíferos e répteis tem sofrido muito com esta forma de poluição (MOORE, 2018).

A abordagem utilizada por diversos estudos relacionados à poluição de ambientes marinhos por polímeros é muito variada e carecem de maiores detalhamentos. A maioria dos estudos varia de uma escala local a regional e registra todos os itens encontrados entre o mar e o maior trecho na costa. Os locais são frequentemente escolhidos devido à sua relevância ecológica, acessibilidade, fontes e atividades antropogênicas. Fatores que influenciam a acumulação de detritos em áreas costeiras incluem a forma da praia, localização e natureza dos detritos.

Geralmente, as contagens são de lixo na superfície que não estão enterrados em sedimento, porque a remoção de sedimentos de praia para a remoção do lixo perturbaria a fauna. Isto claramente subestima a abundância, o que distorce a composição dos estudos. Aparentemente, existe uma boa correlação entre lixo acumulado e o montante que chega a costa e aos oceanos, indicando insumos e processos regulares. Parece que o vidro e os plásticos duros estão se acumulando mais facilmente nas rochas das margens. Os acúmulos muitas vezes se concentram em praias que não possuem forte prevalência de ventos, que poderiam soprá-los para o mar (BERGMANN; GUTOW; KLAGES, 2015).

Pode-se dividir os detritos de plásticos marinhos em duas categorias: macroplásticos, maiores do que 5 mm e microplásticos, menores do que 5 mm (MOORE, 2008). Embora os macro detritos possam, às vezes, ser rastreados até a origem por identificação dos objetos por inscrições, rótulos, marcações em alto relevo ou formato; os microdetritos, consistem de partículas de duas variedades principais, (1) fragmentos quebrados de objetos maiores e (2) pellets e pós de resinaa termoplásticas básicas, matérias-primas da indústria, são difíceis de rastrear (Figura 2).

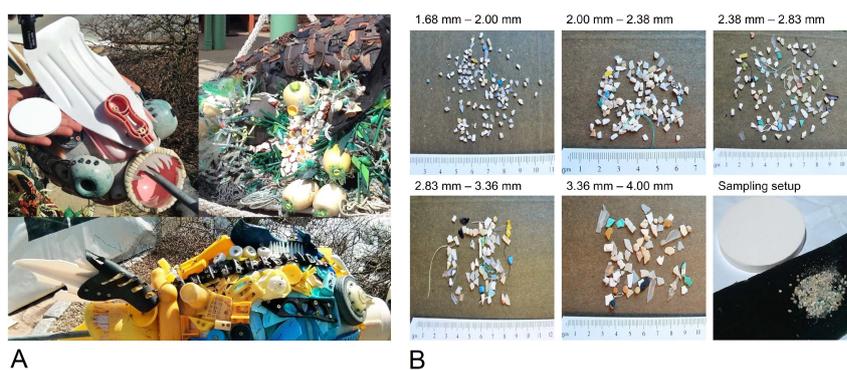


Figura 2 – A - Imagem de detritos de macroplásticos secos coletados no mar por Garaba e colaboradores, parte da exposição pública “Washed Ashore: Art to Save the Sea” at the Mystic Aquarium, Mystic CT, USA. B - Fragmentos de microplásticos secos amostrados do Oceano Atlântico Norte foram separados em diferentes classes de tamanho. A configuração de amostragem no painel inferior direito mostra um lambertiano Painel Spectralon e as partículas agregadas em um fundo de borracha preta usado para obter uma medição de refletância em massa. Adaptado de (GARABA; DIERSSEN, 2018).

2.1 Problemas ambientais

Os resíduos antropogênicos marinhos de origem polimérica, estão se acumulando em ambientes estuários e costeiros em todo o mundo devido a má gestão, ou ausência de gestão, de resíduos sólidos por parte da população e dos gestores públicos. Os polímeros sintéticos, popularmente conhecidos como plásticos, têm entrado no ambiente marinho em quantidades paralelas ao seu nível de produção ao longo do último meio século.

No entanto, nas últimas duas décadas, a taxa de deposição se acelerou em relação à taxa de produção e estes polímeros agora são um dos poluentes mais comuns e persistentes em águas oceânicas e praias em todo o mundo. Entre 1960 e 2000, a produção mundial de resinas plásticas aumentou 25 vezes, enquanto a recuperação do material permaneceu abaixo de 5%. Entre 1970 e 2003, os plásticos se tornaram o segmento de mais rápido crescimento. O lixo marinho é hoje composto de 60% a 80% de plástico, chegando a 90-95% em algumas áreas (MOORE, 2008).

Os resíduos poliméricos estão causando danos à fauna, flora e habitats. Seus efeitos nocivos tem afetado a biota marinha. Albatrozes, fulmares, pardelas e petréis confundem plásticos flutuantes com alimentos e muitos indivíduos dessas espécies são afetados. Estima-se que 44% de todas as espécies de aves marinhas são conhecidas por ingerir plástico. As tartarugas marinhas ingerem sacos de plástico, linhas de pesca e outros plásticos, assim como 26 espécies de peixes e cetáceos (Figura 3).



Figura 3 – Tartaruga Marinha comendo uma sacola de plástico. Créditos: Ashley Moore , <www.flickr.com/photos/100960649@N05/9659196479/>

No total, 267 espécies de organismos marinhos em todo o mundo são conhecidas por terem sido afetadas por esses detritos, um número que aumentará à medida que organismos menores e seu contato com os microplásticos forem avaliados. Há especulações de que o plástico tem o potencial de acumular-se na cadeia alimentar (Figura 4).



Figura 4 – Ave marinha morta com o estômago repleto de plástico. Créditos: Brian Gratwicke, <www.bioorbis.org/2015/10/estomagos-de-plastico.html>

Os plásticos podem causar prejuízos econômicos ao turismo e às indústrias marítimas. (TEUTEN; AL, 2009). Existe também um perigo potencial para os ecossistemas marinhos da acumulação de detritos de plástico no fundo do mar. A acumulação de tais detritos pode inibir a troca de gases entre as águas sobrepostas e as águas dos poros dos sedimentos, e perturbar ou sufocar habitantes dos bentos. A extensão deste problema e seus efeitos começaram recentemente a ser investigado. Estima-se que Um pouco mais da metade de todos os termoplásticos afundará na água do mar (MOORE, 2008). Para gerir a ameaça crescente da poluição por plásticos nas costas, devemos entender onde os detritos estão se acumulando e por que esses locais são diferentes de outros que não acumulam grandes quantidades de detritos. O processo de acumulação depende da capacidade dos detritos de encalhar, assentar, ressuspender/reflutuar, degradar-se e aos efeitos topográficos do vento em águas próximas à costa.

Para quantificar a importância relativa destes processos físicos que governam a acumulação de detritos plásticos as características físicas do local de origem tem o maior efeito sobre o destino dos detritos. A taxa de degradação de macroplásticos em microplásticos também têm uma grande influência no resultado. Descobertas com este foco podem ajudar a priorizar a pesquisa dos processos físicos que afetam o acúmulo de plástico, levando a uma modelagem precisa e gestão no futuro (CRITCHELL; LAMBRECHTS, 2016; MOORE, 2008).

2.2 Coleta de dados

A maioria dos estudos sobre a acumulação de detritos plásticos nas costas e oceanos efetuaram a coleta dos materiais nas margens das praias ou com redes nas águas dos mares. Posteriormente, realizaram a contagem e análise dos tipos de polímeros encontrados

(Figura 5).



Figura 5 – Microplásticos recolhidos de praia na Europa. (WRIGHT; ET.AL., 2013)

A detecção de detritos no mar apresenta um problema difícil, uma vez que os itens costumam ser relativamente pequenos e parcialmente submersos. No entanto, eles podem se acumular nos limites das parcelas de água ou nas linhas de vórtice (MACE, 2012). Em relação a detecção de plásticos por SR, podemos citar o trabalho efetuado por Moy em 2018 (MOY et al., 2018). Este foi o primeiro a quantificar, categorizar e mapear sistematicamente os macrodetritos marinhos nas principais ilhas do Havaí, incluindo áreas remotas. Moy utilizou levantamentos aéreos realizados para coletar fotos de alta resolução que foram processadas e analisadas visualmente. A técnica forneceu medições precisas da quantidade, localização, tipo e tamanho dos macrodetritos os plásticos, incluindo redes, linhas, boias, flutuadores e espuma, que representavam 83% da contagem total. Asner e Garaba realizaram pesquisas a fim de determinar as assinaturas espectrais dos polímeros comumente encontrados em regiões costeiras.

Garaba pesquisou as propriedades ópticas de detritos plásticos secos e úmidos, os quais foram quantificados para explorar a viabilidade do sensoriamento remoto óptico de detritos plásticos no ambiente natural. Seu grupo de estudos efetuou medidas da refletância espectral de microplásticos (<5 mm) encontrados no Oceano Atlântico Norte, macroplásticos (> 5 mm) localizados em terra ao longo da costa oeste dos EUA e esferas plásticas virgens em uma faixa de comprimentos de onda de 350 a 2500 nm. Comparados com a variabilidade espectral de macroplásticos secos e multicoloridos, os espectros de reflectância de aglomerados de microplásticos secos podem ser representados como um espectro médio de volume único com características de absorção notáveis a 931, 1215, 1417 e 1732 nm (ASNER, 2016; GARABA; DIERSSEN, 2018).

Pesquisas mais recentes estão sendo realizadas com o objetivo de determinar a possibilidade de se utilizar o sensoriamento remoto na detecção dos acúmulos de detritos plásticos nos oceanos e regiões costeiras. Os microplásticos úmidos coletados no mar apresentam características espectrais semelhantes aos microplásticos secos, mas a magnitude é menor em relação aos espectros medidos. Quando comparada espectralmente com

a biblioteca de referência de granulados virgens secos típicos, a reflectância média dos microplásticos secos coletados em ambiente marinho apresentava semelhanças moderadas com:

- polietileno de baixa densidade (LDPE);
- politereftalato de etila (PET);
- polipropileno (PP);
- polimetacrilato de metila (PMMA).

Parte II

Fundamentação Teórica

3 Polímeros e Sensoriamento remoto NIR

Neste capítulo na seção 3.1 são descritas algumas definições e aspectos teóricos com relação aos plásticos. Na seção 3.2 os aspectos técnicos envolvidos no sensoriamento remoto sobre as bandas espectrais na faixa do espectro da Radiação Eletromagnética (REM) são explorados.

3.1 Polímeros

Polímeros (poli "muitos"; meros "partes") são por definição compostos orgânicos, de elevado peso molecular, que resultam da ligação covalente entre várias moléculas (monômeros), e podem dividir os polímeros em três grandes classes: Plásticos, Borrachas e Fibras. Também podemos classificá-los dividindo-os em naturais e sintéticos. Os sintéticos são aqueles sintetizados pelo homem a partir de matérias-primas obtidas da natureza, geralmente subdivididos em: Termoplásticos, Termofixos, Elastômeros (borrachas) e Fibras.

Para este trabalho a determinação dos polímeros de interesse foi realizada com base nos trabalhos de autores como Garaba, Moy, Moore, (ACUÑA-RUZ et al., 2018; SERRANTI et al., 2018). Os polímeros selecionados foram os termoplásticos: polietileno tereftalato (PET), polietileno de baixa densidade (LDPE), polipropileno (PP), policloreto de vinila (PVC) e a poliamida 6.6 (PA6.6), como os tipos de plásticos que estão presentes nos ambientes costeiros e marinhos, em diversas partes do globo terrestre. Na Tabela 1 estão listados os polímeros de interesse, suas siglas, suas características físicas e as utilidades mais comuns.

Com base na formulação química dos plásticos é notável que eles são hidrocarbonetos. Ou seja, eles são compostos orgânicos formados basicamente por moléculas formadas por cadeias de carbono e hidrogênio. Para o bom entendimento das bandas espectrais, onde se localizam as características de absorção responsáveis pela capacidade de detecção, por SR destes alvos, podemos voltar nossa atenção para os mecanismos utilizados na espectroscopia infravermelho próximo (NIR - do inglês *Near infrared*), que são os mesmos existentes no sensoriamento remoto. Na seção 3.2 são apresentados os pontos básicos com respeito a teoria do infravermelho próximo.

Tabela 1 – Polímero de interesse, sigla, características físicas e utilidades comuns.

Polímero	Sigla	Características	Exemplos de utilidades
Politereftalato de Etila	PET (C-PET) (A-PET)	C-PET cristalino, opaco, pouco resistente a impactos, impermeável a gases, absorve água, resistente a produtos químicos, pouco resistente a bases, água quente, cetonas e halogenados. A-PET-amorfo transparente, resistente a impactos, menos rígido, resiste a hidrocarbonetos halogenados.	Garrafas de bebidas, embalagem de alimentos, cosméticos e remédios, chapas, folhas e películas.
Polietileno de baixa densidade	PEBD (LDPE)	Resistente à substâncias químicas, variadas características mecânicas, mantém propriedades mesmo quando submetido à temperaturas $\leq 60^{\circ}\text{C}$.	Isolantes de fios, sacos, garrafas, tampas, bolsas, revestimentos internos e externos caixas de leite, tubulações, mangueiras, telas de sombreamento.
Polipropileno	PP	Elevada resistência química a solventes, moldável, alta resistência mecânica, boa resistência ao impacto acima de 15°C , boa estabilidade térmica.	Brinquedos, copos plásticos, recipientes para alimentos, remédios e produtos químicos, tubos para cargas de canetas, carpetes, seringas, material hospitalar esterilizável, autopeças, cabos para ferramentas manuais.
Policloreto de Vinila	PVC	Conhecido como vinil. Essa resina consegue assumir tanto formas rígidas como flexíveis, graças aos aditivos. É leve e impermeável, é isolante térmico, elétrico e acústico. Boa resistência química, resistente ao fogo e às intempéries.	Filmes, laminados, solados de calçados, brinquedos, embalagens para remédios (blister), mangueiras, tubulação para água e esgoto, revestimento de fios e cabos, cateteres e bolsas de soro.
Poliamida 6 e Poliamida 6.6 (Nylon)	PA 6 e PA 6.6	Alta resistência à fadiga, Boa resistência ao impacto, Alta temperatura de fusão, Baixo coeficiente de atrito, Resistência às intempéries, Ótimas propriedades mecânicas, Alta fluidez.	Engrenagens, peças automotivas, buchas, lacres e roupas.

3.2 Sensoriamento remoto no infravermelho próximo (NIR) - Base química

Para o desenvolvimento do índice de sensoriamento remoto para a detecção de plásticos em imagens de sensoriamento remoto hiperespectral se faz necessária a compreensão das características físico-químicas envolvidas no processo de aquisição das imagens pelos sensores. Assim como na espectroscopia NIR, o sensoriamento remoto envolve transferência de energia entre luz e matéria.

As respostas espectrais dos alvos na região espectral do infravermelho próximo

(1000 – 2500nm) estão associados aos modos vibracionais dos grupos funcionais. A matéria orgânica presente nas cenas tem impressões digitais espectrais distintas na região NIR, devido à absorção relativamente forte de sobretons e aos modos de combinação relativos a vários grupos funcionais presentes na composição química dos objetos presentes na cena alvo. A restrição dos dados para os comprimentos de onda dos segundos sobretons das bandas de vibração das ligações CH, CH₂ e CH₃ e a exclusão das bandas de vibração OH melhoraram o modelo (XIAOBO et al., 2010).

Moléculas orgânicas têm padrões de absorção específicos na região do infravermelho próximo que podem relatar a composição química do material que está sendo observado por um sensor. O efeito do grupo funcional é de longe o mais dominante de todos os efeitos no espectro NIR. A Figura 6 mostra o gráfico de correlação NIR, o gráfico simplesmente resume os efeitos mais importantes, dos grupos funcionais, e oferece uma referência útil para usuários da tecnologia NIR.

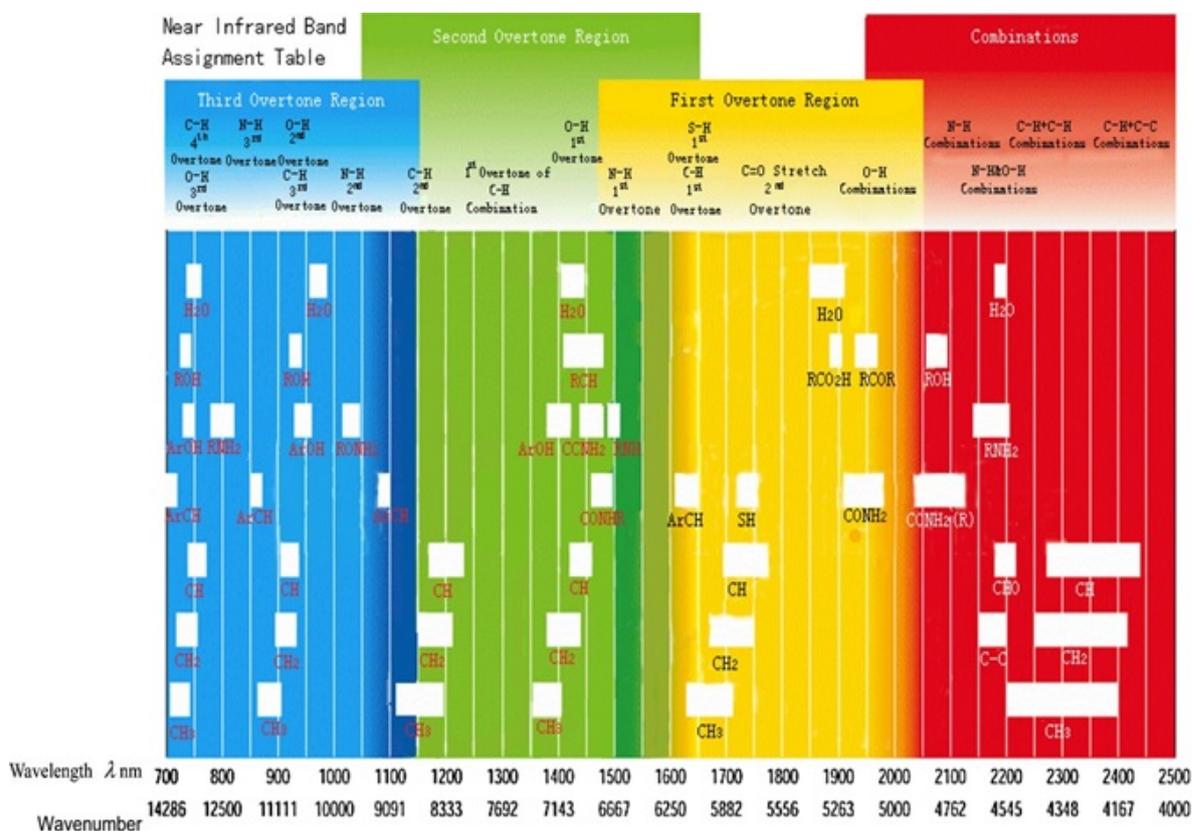


Figura 6 – Bandas de combinações harmônicas NIR (tons e sobretons), gráfico obtido de (XIAOBO et al., 2010)

No entanto, devido à natureza complicada dos espectros NIR, como efeitos de grupos vizinhos, ligação de hidrogênio, cristalinidade, separação de fases, térmica e mecânica, etc., a maioria das atribuições de bandas NIR não foi feita a partir de estudos fundamentais de moléculas simples, mas de estudos empíricos no desenvolvimento de

método de espectroscopia NIR (XIAOBO et al., 2010). Porém, no sensoriamento remoto existe ainda a interferência da atmosfera entre o sensor e o alvo. A influência desta sobre os resultados nas imagens é um fator de grande relevância devido a presença de gases diversos, poeira e água e deve ser estudado também de forma empírica.

A observação do gráfico das bandas de combinação harmônicas NIR indica que o sensoriamento remoto de plásticos deve ser realizado nas faixas espectrais de 1000 até 1250 nm e 1600 até 1800 nm, isto corrobora o que foi constatado por (GARABA; DIERSSEN, 2018). A composição das amostras coletadas, por este pesquisador, foram medidas utilizando o espectrômetro de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR - Fourier Transform Infrared) e foi consistente com o que tem sido relatado globalmente. As características de absorção em 1215 e 1732 nm foram observadas através de uma atmosfera intermediária e utilizadas para mapear as distribuições de hidrocarbonetos sintéticos a partir de um Espectrômetro de Imagens Visíveis/Infravermelhas (AVIRIS).

As mesmas características de absorção foram identificáveis em microplásticos úmidos coletados no mar, mas a capacidade de realizar sensoriamento remoto de microplásticos na camada superficial do oceano exigirá uma análise de transferência radiativa mais detalhada. As medidas espectrais apresentadas por Garaba fornecem uma base para tais avanços em direção à detecção remota de plásticos de várias plataformas (GARABA; DIERSSEN, 2018; ASNER, 2016).

Nos estudos do ângulo de contraste espectral, realizado por Garaba, foi constatado que cada macroplástico foi diferente um do outro quando avaliado o espectro inteiro de 350 até 2500 nm, com semelhanças espectrais fracas θ média de $19,1^\circ$ (0,33 radianos). Os espectros de refletância dos microplásticos foram estreitamente idênticos em todo o espectro com semelhanças espectrais muito fortes, com média de $4,6^\circ$ (0,08 radianos) (GARABA; DIERSSEN, 2018). Para maiores detalhes ver Equação 5.1 na Secção 5.2.

3.3 Índice de Hidrocarboneto (HI)

Um índice (proporção intrapixel) em sensoriamento remoto é uma ferramenta capaz de destacar, em imagens multiespectrais ou hiperespectrais, a presença de elementos a partir de sua característica espectral. Consiste de um algoritmo matemático fácil de usar para transformar dados multibanda em uma única banda capaz de mostrar a presença de um elemento específico na imagem (POLIDÓRIO; IMAI; TOMMASELLI, 2004).

Existem diferentes índices aplicados a dados de sensores remotos multiespectrais e amplamente utilizados em várias aplicações. Os índices partem da suposição básica de que alguma combinação algébrica de bandas espectrais de um sensor remoto pode nos dizer algo útil sobre a estrutura e o estado do alvo. Por outro lado, outros fatores também afetam a refletância espectral, tais como propriedades do solo, iluminação solar e outras

Parte III

Material e Métodos

4 Material

4.1 Modelo de Transferência Radiativa Anisotrópica Discreta (DART)

Neste trabalho optamos por utilizar o modelo Transferência Radiativa Anisotrópica Discreta (DART) a fim de compreender o comportamento espectral dos principais polímeros encontrados em áreas costeiras. Nas simulações aqui desenvolvidas foram utilizados os resultados obtidos e disponibilizados por Garaba ([GARABA; DIERSSEN, 2018](#)).

Desta forma, seguimos a sugestão deste autor de realizar o acoplamento daqueles resultados à um modelo de transferência radiativa com potencial de prever as limitações para a detecção de plásticos marinhos usando as técnicas de sensoriamento remoto. Este modelo nos permitiu a elaboração de experimentos em ambiente simulados e controlados para a obtenção de produtos de sensoriamento remoto.

O modelo DART é um modelo de transferência radiativa que simula imagens adquiridas remotamente. Foi originalmente desenvolvido para trabalhar nos comprimentos de onda curtos (300 a 3000 nm) em cenas tridimensionais representadas como matrizes de células retangulares contendo árvores, arbustos, grama, solo, etc. O DART tem sido revisado e atualizado para ampliar seu domínio de aplicação e melhorar sua precisão.

Atualmente, este modelo é capaz de simular paisagens naturais e urbanas, em todo o domínio óptico e com um sistema multiespectral. O modelo simula transferência radiativa em todo o sistema "atmosfera-Terra". Sua precisão se deve a três fatores:

- simulação mais precisa de espalhamento múltiplo simples;
- uso de um esquema que supera as células DART e melhora quanto a direção da radiação que dá origem a dispersão de radiação múltipla.
- simula a transferência radiativa simultaneamente na atmosfera e paisagens, com ou sem topografia.

Paisagens urbanas (ou seja, casas, edifícios, estradas) e topografia são simuladas com elementos planos (triângulos e paralelogramos). O DART atua em todo o domínio óptico, não requer o uso de um modelo atmosférico porque simula diretamente a transferência radiativa atmosférica. A atmosfera pode ser simulada contendo gases, aerossóis e perfis de água.

Uma das principais características do DART é que ele pode simular imagens no plano do sensor, para diferentes altitudes da base ao topo da atmosfera. O DART é uma

ferramenta eficiente e precisa para estudar imagens tridimensionais naturais e urbanas adquiridas no domínio óptico do visível ao domínio infravermelho termal para imagens de sensoriamento remoto orbital e suborbital (GASTELLU-ETCHEGORRY; MARTIN; GASCON, 2004).

4.2 Criação de cenas simuladas

Para gerar imagens simuladas de sensoriamento remoto de uma cena contendo água e detritos plásticos foi utilizado o modelo DART. Na criação da cena foram utilizadas algumas funcionalidades específicas do modelo descritas resumidamente a seguir:

- Criação de cenas tridimensionais;
- Armazenamento de resultados e dados de entrada (espectros de atmosfera e material, propriedades físicas da atmosfera, etc.);
- Simulação das superfícies da Terra e da atmosfera, Figura 8: matrizes 3-D de células que contêm objetos e/ou fluidos (gás, aerossol, água), com qualquer distribuição de faces, independente da matriz geométrica da célula (Gastellu-Etchegorry et al., 2017);

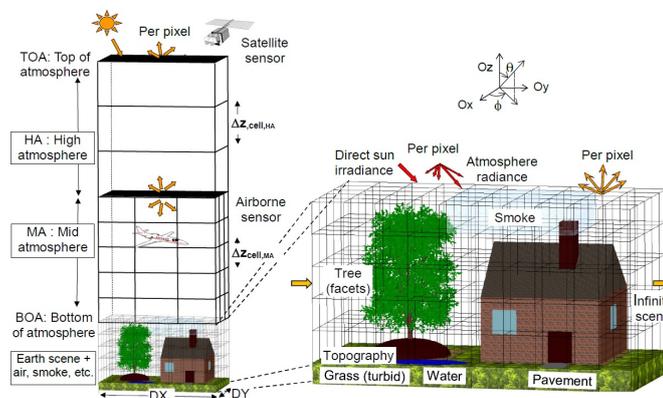


Figura 8 – Matriz de células DART (Gastellu-Etchegorry et al., 2017).

As simulações consistiram da elaboração de uma cena composta por solo, água e polímeros. Estes elementos foram posicionados de tal forma que se obteve pixels mistura com as distribuições descritas na Tabela (2).

Tabela 2 – Composição dos pixels mistura.

Polímero	100	75	50	25	12,5	0
Água	0	25	50	75	87,5	100

Na Figura 9 vemos a cena simulada em uma figura tridimensional.

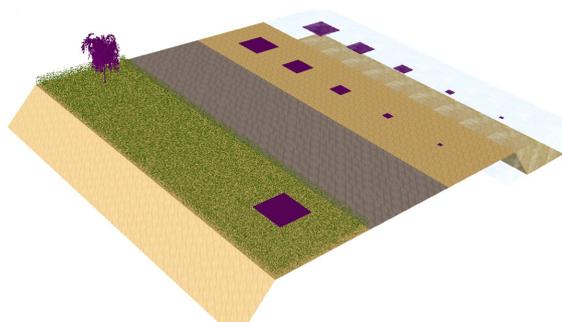


Figura 9 – Exemplo de uma cena simulada (Fonte: próprio autor).

A atmosfera é um fator importante quando tratamos de sensoriamento orbital ou suborbital de grandes altitudes. O DART possui um banco de dados de atmosfera atualizado, e outras funcionalidades que permitem a simulação das configurações reais da atmosfera como:

- Especificação do usuário da quantidade de aerossóis ou gases selecionados;
- Especificação do usuário da temperatura da atmosfera em uma determinada altitude. O desvio de temperatura associado é calculado e aplicado ao perfil vertical até 20 km acima do solo;
- Introdução de ar dentro da paisagem, isto é feito usando células de ar que contêm dois fluidos misturados com propriedades ópticas próprias (isto é, o coeficiente de extinção espectral, albedo de dispersão única, função de fase de dispersão) que são extensões exponenciais da atmosfera acima da paisagem. O usuário pode definir qualquer propriedade óptica fluida (Gastellu-Etchegorry et al., 2017).

Detalhes de como foram realizadas as simulações deste modelo poderão ser encontrados nos arquivos DART disponibilizados no seguinte repositório¹ e no manual do usuário (CESBIO, 2020). Nas Seções 4.3 e 4.4 são apresentadas as fontes dos dados incluídos ao banco de dados do modelo DART para a elaboração das simulações que fizeram parte do presente trabalho.

4.3 Espectros de refletância considerados

A Figura 10 apresenta os espectros dos polímeros disponibilizados por (GARABA; DIERSSEN, 2018; GARABA; DIERSSEN, 2017), os dados consistem de uma biblioteca espectral de referência obtida de pellets virgens, de diferentes tipos de plásticos comumente

¹ <<https://github.com/tonimath78/DART-SIM-HISeSAM>>

encontrados em detritos marinhos, analisados em laboratório. Além destes também foram plotadas as assinaturas espectrais de água e areia retiradas do software Environment for Visualizing Images - SulSoft (ENVI).

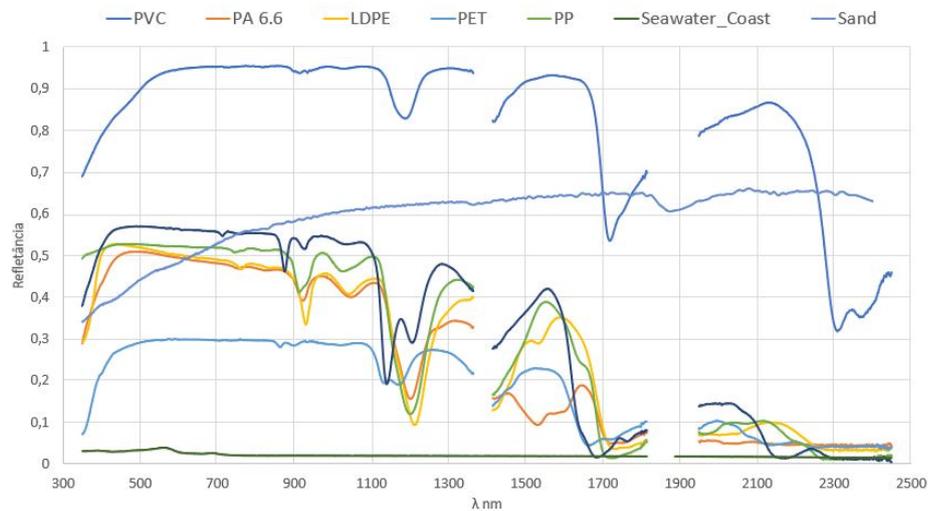


Figura 10 – Biblioteca espectral de referência obtida de pellets virgens, gráfico gerado a partir de dados disponibilizados por (GARABA; DIERSSEN, 2018).

4.4 O sensor Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS)

O AVIRIS é uma instalação que consiste em um sistema de voo, um sistema de dados terrestres, uma instalação de calibração e uma equipe de operações em tempo integral, foi desenvolvido pelo Jet Propulsion Laboratory (JPL), financiada pela NASA (National Aeronautics and Space Administration (VANE et al., 1993). As imagens obtidas por este sensor são disponibilizadas no portal do JPL². A seguir estão listados alguns dados técnicos do sensor, estas informações foram úteis para a elaboração de simulações do imageamento obtido por esta ferramenta.

- 224 bandas espectrais com Largura de 10 nm;
- Cobertura espectral estreita e contígua de 400 a 2500 nm;
- IFOV fornece um tamanho de pixel de 20 m da altitude de 20 km;
- Largura de faixa, 10,5 km;
- Linha de voo de até 100 km de comprimento.

² <<https://aviris.jpl.nasa.gov/dataportal/>>

5 Métodos

Neste Capítulo será apresentado a metodologia referente a identificação de plásticos em ambientes naturais (Seção 5.1), artigo aceito pela Latin American GRSS & ISPRS Remote Sensing Conference 2020. E a Seção 5.3 descreve o método de cálculo do índice proposto para a detecção de plásticos por pixel.

5.1 Identificação digital de assinaturas espectrais de microplásticos

Seis assinaturas espectrais de plásticos foram coletadas da plataforma Ecological Spectral Information System (EcoSIS). O banco de dados de refletância de pellets virgens de microplásticos (VMP) contém 11 assinaturas espectrais de diferentes polímeros plásticos comumente encontrados em detritos marinhos (GARABA; DIERSSEN, 2018). Com base nos usos mais comuns de plásticos (Tabela 1), optamos por incluir apenas PET, LDPE, PP, PVC e PA 6.6 como assinaturas espectrais de referência neste estudo.

Em todas as simulações as propriedades ópticas atmosféricas e as opções de aerossol foram definidas para o parâmetro TROPICAL. Para a geração de imagens de sensoriamento remoto o sensor AVIRIS foi simulado (Seção 4.4). Quanto aos espectros presentes na cena, a refletância espectral de microplásticos coletados em materiais marinhos secos do banco de dados do Atlântico Norte e Oceano Pacífico (μ -NAPO) foram adquiridas. Estes dados consistem dos espectros mediano, médio e do desvio padrão de microplásticos com composição polimérica desconhecida (GARABA; DIERSSEN, 2017). A assinatura espectral média foi selecionada como parâmetro para este trabalho.

Para simular um sistema completo de sensoriamento remoto, utilizou-se o modelo de transferência radiativa DART (Seção 4.1), pois este é capaz de simular ambientes complexos.

A primeira etapa foi adicionar todas as assinaturas espectrais microplásticas coletadas (μ -NAPO) ao banco de dados do fator de refletância bidirecional (BRDF), integrante do modelo DART.

Para que o modelo possa lê-los corretamente, foram feitas algumas modificações nos arquivos EcoSIS originais, utilizando um software de planilha eletrônica:

- Conversão de unidades: nm em μ m.
- Formatação de arquivo em valores separados por vírgula.
- Modificação de nome e formato de arquivo.

Em seguida, para cada um dos bancos de dados VMP e μ -NAPO selecionados, foi construída uma simulação para reamostrar as assinaturas espectrais para o sensor AVIRIS. As cinco cenas terrestres do VMP foram compostas por apenas um objeto de microplástico de 16 m², cada uma com sua assinatura espectral correspondente. Depois, foi construída uma cena da superfície terrestre com dimensões de 1600 m². Nesse caso, o cenário foi composto de: areia de praia, água do mar, objetos de microplásticos de 16 m² com a assinatura espectral do banco de dados μ -NAPO.

O banco de dados BRDF do DART já contém propriedades ópticas padrão de areia da praia e água do mar. Os microplásticos foram dispostos nas seguintes proporções de pixel: 100%, 75%, 50%, 25% e 12,5%, em ambos: areia da praia e água do mar (Figura 11).

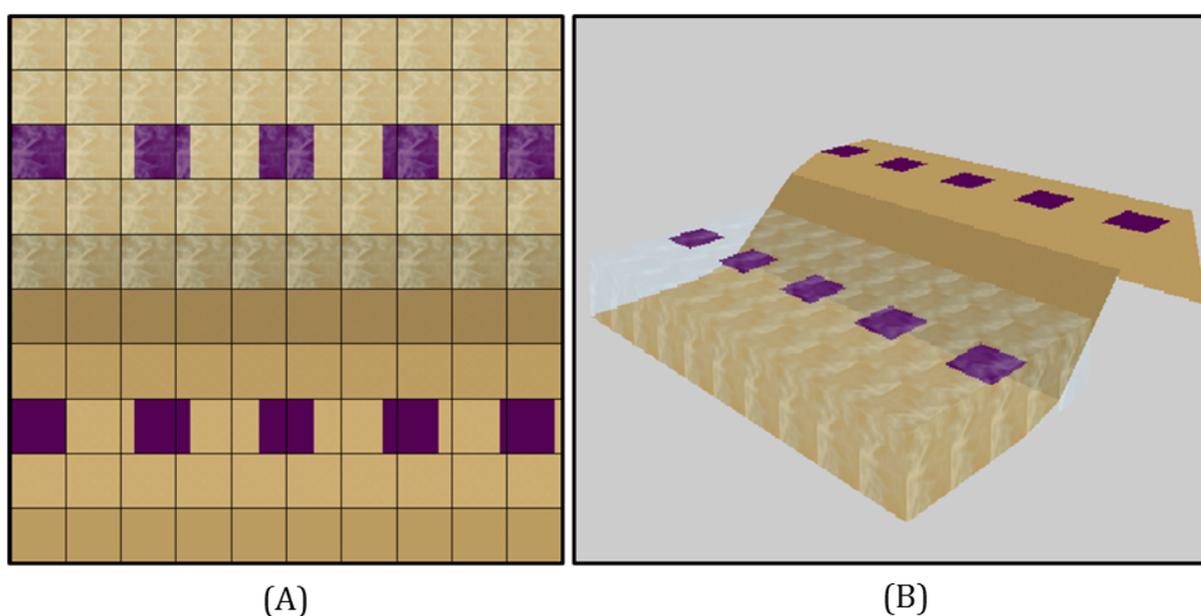


Figura 11 – Cena simulada no modelo (areia de praia, água do mar e microplásticos). A) Vista de uma perspectiva ao Nadir. B) Cena tridimensional. (Fonte: próprio autor.)

5.2 Método de Mapeamento por Ângulo Espectral (SAM)

O método de cálculo de Mapeamento por Ângulo espectral - *spectral angle mapper* (SAM) (Equação 5.1) é um cálculo para determinar a similaridade espectral entre dois espectros. Consiste do cálculo do ângulo entre dois espectros, tratando-os como vetores em um espaço com dimensionalidade igual ao número de bandas (n) (KRUSE et al., 1993).

Todos os resultados possíveis para o ângulo θ (em radianos) são valores entre 0 e $\frac{\pi}{2}$ (aproximadamente 1,57) radianos. Uma alta similaridade entre os espectros analisados

é indicada por um valor de θ próximo a 0, enquanto a falta de similaridade espectral é indicada por um valor de θ próximo de $\frac{\pi}{2}$.

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^n p_i r_i}{(\sum_{i=1}^n p_i^2)(\sum_{i=1}^n r_i^2)} \right) \quad (5.1)$$

onde:

n é o número de bandas espectrais;

p é o espectro do polímero;

r é o espectro de referência.

5.3 Proposta de Cálculo do Índice de Hidrocarbonetos Simplificado

O método consiste de apenas três operações realizadas sobre as informações de três bandas de uma imagem, para o processamento de grandes volumes de dados esta é uma grande vantagem em termos computacionais. Considerando as respostas espectrais típicas dos polímeros determina-se uma característica espectral que pode ser utilizada para o cálculo e desta forma se determinam os “pontos de índice” ABC que formam um triângulo (ver Figura 12), semelhante a proposta implementada por Kühn (KÜHN; OPPERMANN; HÖRIG, 2004) e aplicada por Garaba (GARABA; DIERSSEN, 2018).

O cálculo do Índice de Plásticos consiste, então, da soma das alturas EA e DC do trapézio circunscrito no triângulo formado pelos pontos de índice ABC.

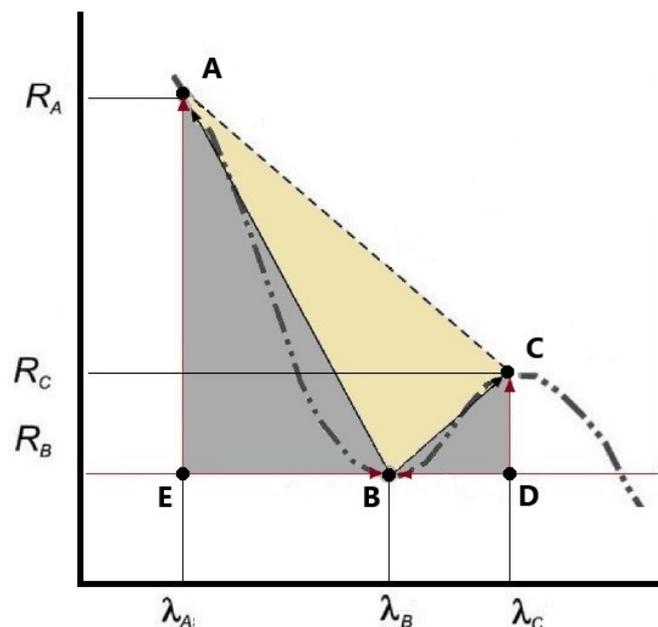


Figura 12 – Triângulo formado pelos pontos de índice.(Fonte: próprio autor)

O Índice de material polimérico será dado pela equação 5.2:

$$HIS = R_A - R_B + R_C - R_B = R_A + R_C - 2 \times R_B \quad (5.2)$$

5.3.1 Detalhes da cena simulada para avaliação do HIS

Cada uma das cenas simuladas, para a avaliação do HIS, foi composta por uma grade de treze por onze pixels (13×11), formando um total de 143 pixels (Figura 13). Cada pixel correspondeu a um quadrado de 16m^2 na cena. As linhas 1, 2 e 3, de pixels, consistiram de uma composição que representou uma porção de água, sobre areia e placas planas de plástico, com dimensões variadas cobrindo percentuais de 12,5; 25; 50; 75 e 100% de um pixel, dispostas horizontalmente sobre a água.

Analogamente, as linhas 4, 5 e 6 representaram o solo exposto, areia, com pixels cobertos por placas com as mesmas proporções de plásticos. Para cada cena simulada foram atribuídas às placas planas a assinatura espectral de diferentes tipos de plástico: PET, PP, LDPE, PVC PA 6.6 e μ -NAPO. À cena também foram colocados um trecho contendo assinatura espectral de asfalto, linhas 7, 8 e 9 e outro grama, linhas 10, 11 e 12. Sobre a grama foram inseridas ainda uma simulação tridimensional de uma árvore e uma placa com assinatura espectral de lixo genérico, esta última disponibilizada no modelo DART.

A seguir é apresentada uma figura tridimensional da cena simulada por uma visada ao nadir (Figura 13).

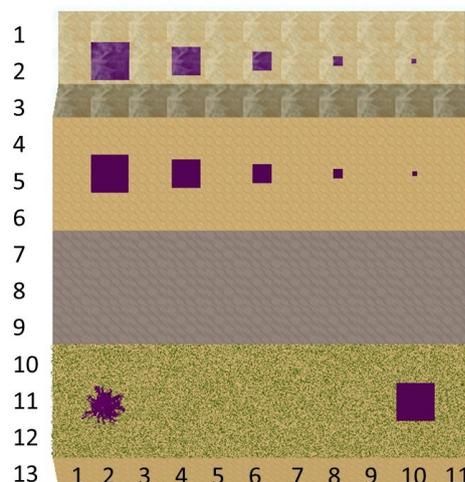


Figura 13 – Figura tridimensional da cena simulada por uma visada ao nadir. (Fonte: próprio autor)

Parte IV

Resultados e Discussão

6 Resultados

Neste Capítulo serão apresentados os resultados da Seção 6.1, que averigua a similaridade espectral de microplásticos encontrados em zonas costeiras com relação aos pellets virgens. E na Seção 6.2 apresentamos os resultados referentes ao índice HIS.

6.1 Resultados do estudo da similaridade espectral de microplásticos coletados comparados aos espectros de pellets virgens.

No trabalho discutido na Seção 5.1, procuramos determinar um limite para a identificação de microplásticos por meio do algoritmo SAM, independentemente do tipo de polímero existente na cena. O algoritmo SAM foi aplicado à dados simulados no modelo DART. A simulação consistiu de uma cena composta por pixels contendo água, areia e cinco diferentes proporções de plásticos, cada pixel continha alguma proporção de microplásticos na simulação.

Os espectros de microplásticos utilizados para a simulação foram obtidos do banco de dados do Atlântico Norte e Oceano Pacífico (μ -NAPO), disponibilizados por Garaba (GARABA; DIERSSEN, 2019). Os dados se referem a amostras de microplásticos coletados em materiais marinhos secos de composição polimérica desconhecida. Os cinco espectros de polímeros de referência foram selecionados do banco de dados Ecological Spectral Information System (EcoSIS) (GARABA; DIERSSEN, 2017), tais dados foram previamente reamostrados para o sensor AVIRIS para a elaboração das simulações.

Os resultados obtidos apresentam os valores de similaridade espectral (θ) para cada tipo de pellets de plásticos virgens (VMP) em comparação com o pixel μ -NAPO, em diferentes proporções. Para proporções de μ -NAPO localizadas na areia da praia, o polímero PET apresentou o menor ângulo espectral geral entre todas as proporções ($\theta = 0,215$) (Tabela 3).

Tabela 3 – Mapeamento de ângulo espectral (θ) para μ -NAPO na areia.

μ -NAPO	PET	LDPE	PP	PVC	PA 6.6
100%	0,215	0,276	0,279	0,324	0,313
75%	0,215	0,276	0,280	0,324	0,313
50%	0,215	0,276	0,279	0,324	0,313
25%	0,215	0,277	0,280	0,324	0,313
12.5%	0,215	0,277	0,280	0,324	0,313

Para todos os outros VMP, o algoritmo SAM demonstrou valores mais altos de θ , mas com um desvio padrão quase nulo (Tabela 4).

Tabela 4 – Mapeamento de ângulo espectral (θ) para μ -NAPO na água.

μ -NAPO	PET	LDPE	PP	PVC	PA 6.6
100%	0,214	0,276	0,278	0,326	0,309
75%	0,217	0,281	0,283	0,3270	0,314
50%	0,215	0,273	0,280	0,327	0,310
25%	0,217	0,282	0,284	0,327	0,314
12.5%	0,219	0,283	0,285	0,328	0,315

6.1.1 Discussão dos resultados do estudo da Similaridade espectral

Estudos que visam detectar lixo em ambientes marinhos podem se beneficiar de softwares de simulação de transferência radiativa, tais como o modelo DART. A simulação de plásticos descartados sob as diversas condições ambientais que o cercam permite uma melhor compreensão do comportamento espectral da cena.

Foi possível observar, a partir da aplicação do SAM, que as assinaturas espectrais de microplásticos coletados no mar são derivados diferentes produtos, cada um com uma assinatura espectral distinta. Estes sinais também são modificados pelos processos naturais de intemperismo que sofrem pela exposição aos fatores naturais. Além disso, os diferentes ambientes onde o plástico se acumula podem dificultar a sua detecção. Assim, propomos um limiar de $\theta = 0,25$ para a identificação de microplásticos em ambientes marinhos por sensores hiperespectrais, com base na aplicação do algoritmo SAM.

Trabalhos futuros irão simular imagens com proporções menores de plástico por pixel (6%, 3%, 1%), a fim de investigar melhor os limites de detecção de plásticos por sensores hiperespectrais. Também planejamos comparar diferentes tipos de assinaturas espectrais, como vegetação, algas, corais e outras superfícies da Terra, com os espectros do VMP para avaliar ainda mais o limiar proposto neste trabalho.

6.2 Avaliação do índice de hidrocarbonetos simplificado HIS

6.2.1 Testes preliminares

Os testes iniciais em relação ao desempenho do índice proposto consistiram do cálculo e da comparação dos resultados dos índices HIS e HI sobre simulações de mistura espectral, presumido o modelo de mistura linear, para concentrações de plásticos de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, sobre areia e sobre água, para três diferentes conjuntos de pontos de índice.

As assinaturas espectrais aplicadas na simulação dos plásticos foram aquelas disponibilizadas por Garaba para os pellets de plásticos virgens, as assinaturas de águas costeiras e da areia foram obtidas do software ENVI. Detalhes técnicos em relação ao uso deste software podem ser obtidos no site ([GEOSPATIAL, 2020](#)). Dois dos conjuntos sobre

a característica espectral localizadas na região NIR entre 1100 e 1250 nm. O primeiro são os pontos 1094, 1170 e 1245 nm, referente aos gráficos identificados com o valor 1175. E o segundo nos pontos 1198,1217 e 1236 nm, referente aos gráficos 1216. Mais um conjunto de dados localizado na região entre 1600 e 1800 nm foi composta pelos pontos 1709, 1728 e 1738, referente aos gráficos 1732. Nas Figuras 14, 15 e 16 são apresentados os resultados obtidos das comparações dos resultados dos índices HIS e HI sobre simulações de mistura espectral, presumido o modelo de mistura linear, para concentrações de plásticos de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% nos diferentes pontos de índice.

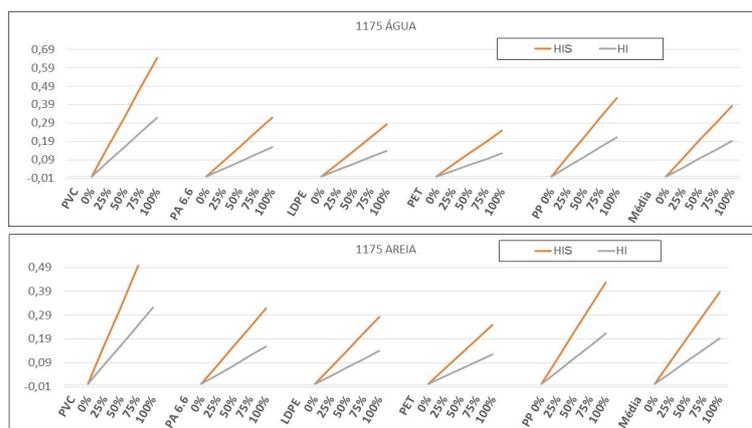


Figura 14 – Comparação dos resultados dos índices HIS e HI para a banda 1175.(Fonte: próprio autor.

Os resultados das simulações para a banda 1175 nm apresentam um comportamento crescente similar para todos os polímeros estudados. Porém não existe janela atmosférica disponível para o SR passivo nesta faixa espectral.

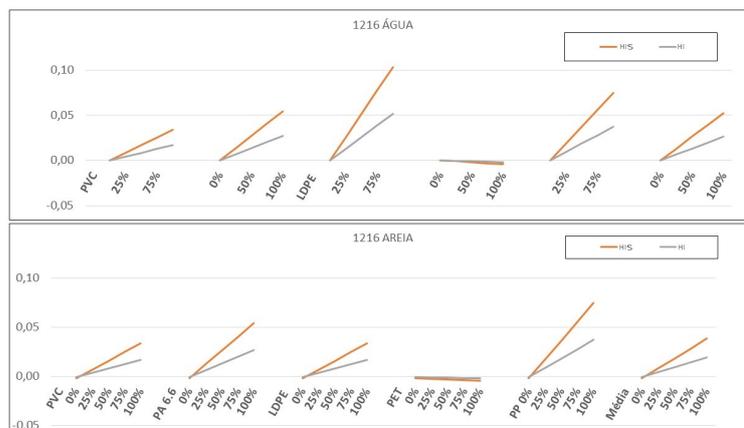


Figura 15 – Comparação dos resultados dos índices HIS e HI para a banda 1216.(Fonte: próprio autor)

Os resultados das simulações para a banda 1216 apresentam um comportamento

crecente para a maioria dos polímeros, porém, as inclinações foram distintas. A curva do PET apresentou-se quase horizontal e com inclinação negativa. Isto aconteceu porque a escolha dos pontos de índices ficou deslocada em relação ao ponto de maior absorção.

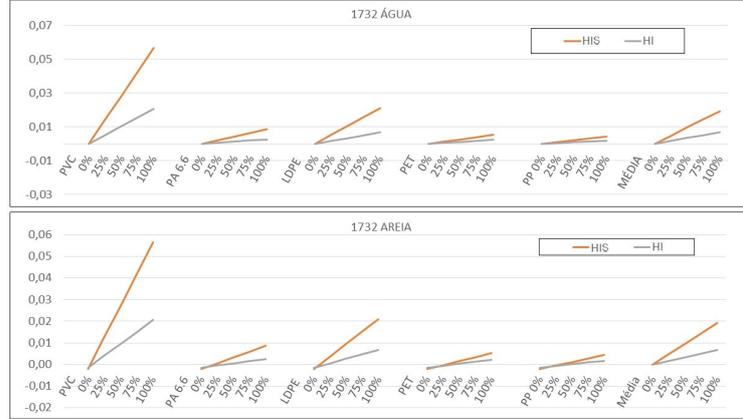


Figura 16 – Comparação dos resultados dos índices HIS e HI para a banda 1732.(Fonte: próprio autor)

Os resultados das simulações para a banda 1732 apresentam um comportamento crescente para a todos polímeros, porém, as inclinações foram distintas como no caso anterior.

Uma consequência deste teste foi a observação de uma relação de proporcionalidade entre os índices HIS e HI, o que levou a seguinte exploração da relação. Considerando três pontos de índice genéricos dados a partir de um comprimento de onda central $B = \lambda$, obtemos então os pontos de índices $A = \lambda - j$ e $C = \lambda + k$, para j e k quaisquer. A partir das definições de HIS e HI dados por:

$$HIS = R_A - R_B + R_C - R_B \tag{6.1}$$

ou

$$HIS = R_A + R_C - 2 \times R_B \tag{6.2}$$

e

$$HI = (\lambda - (\lambda - j)) \frac{R_C - R_A}{(\lambda + k) - (\lambda - j)} + R_A - R_B \tag{6.3}$$

como pela equação 6.1 $R_A - R_B = -R_C + R_B + HIS$, Substituindo $R_A - R_B$ na Equação 6.3 por $-R_C + R_B + HIS$ chegamos à relação:

$$HI = j \frac{R_C - R_A}{k + j} - R_C + R_B + HIS \tag{6.4}$$

Agora somando as Equações 6.3 e 6.4 obtemos o resultado:

$$HIS = 2HI - \frac{j - k}{j + k} R_A + \frac{j - k}{j + k} R_C \tag{6.5}$$

É fácil ver que se $j = k$ temos $HIS = 2HI$, ou seja se as distâncias entre os pontos de índice são simétricas, podemos considerar o HIS como uma forma simplificada de cálculo para o índice de hidrocarbonetos, sendo seu resultado o mesmo de HI multiplicado pelo fator 2.

6.2.2 Avaliação da eficácia do Índice HIS

Para realizar uma avaliação da eficácia do HIS, este foi aplicado sobre a imagem AVIRIS f111115t01p00r08rdn, a mesma imagem utilizada por (GARABA; DIERSSEN, 2018) com o objetivo de realizar um teste comparativo entre os resultados dos índices de hidrocarbonetos HI e HIS. De acordo com aquele autor na referida imagem foram observados e destacados vários alvos feitos pelo homem com concentrações moderadas a fortes de hidrocarbonetos ou plásticos. Esses alvos incluíam o aterro sanitário de Sunshine Canyon, telhados presumivelmente feitos de material sintético de camada única em armazéns industriais na área de Sylmar e um reservatório de água na planta do Metropolitan Water District, Figura 17.

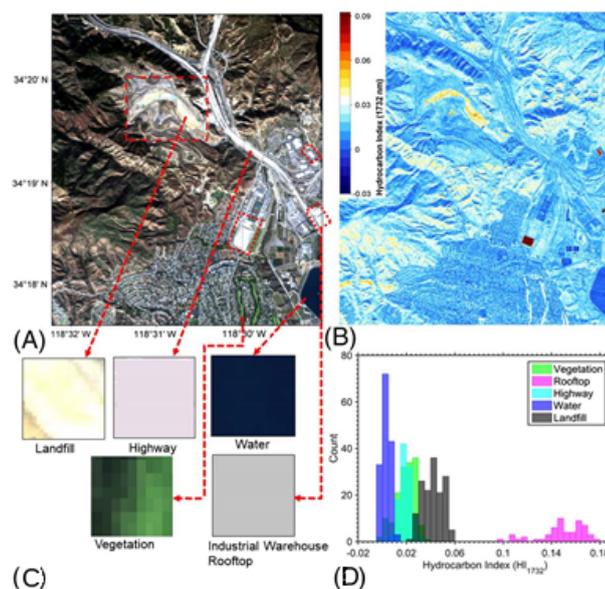


Figura 17 – (A) Composição de cores RGB de uma imagem AVIRIS na vizinhança de Sunshine Canyon Landfill na Califórnia-USA e do Metropolitan Water District plant. Circunscritos por caixas de pontilhados vermelho indicam alvos com concentrações de material com características de absorção em 1732 nm. (B) Mapa baseado no índice de hidrocarbonetos sobre a característica de absorção em 1732 nm (HI_{1732}). (C) Pixels alvo usados na análise do histograma (D) Histograma e legenda de cores para o HI_{1732} . (Fonte: Imagem adaptada de (GARABA; DIERSSEN, 2018))

Portanto, com base nos dados utilizado sobre um conjunto de alvos preliminarmente identificados, foram realizados os cálculos do HIS sobre a imagem original sem correção

atmosférica. A ferramenta utilizada para o tratamento das imagens foi o software ENVI, a partir da função "Band Math". Por fim, foi aplicada a mesma paleta de cores para ambas as imagens, a fim de destacar a diferença entre os resultados obtidos, Figura 18.

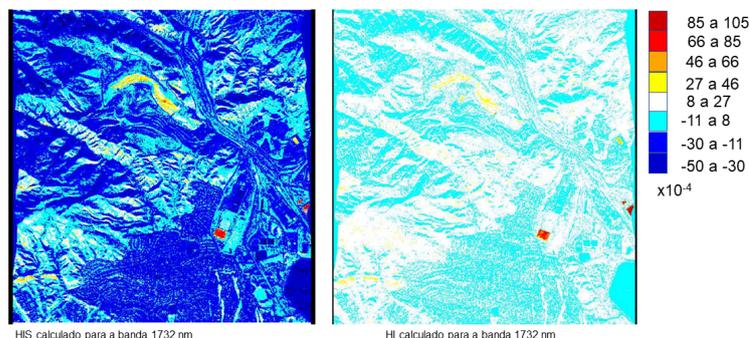


Figura 18 – Comparação dos resultados dos índices HI e HIS na imagem AVIRIS f111115t01p00r08rdn, para a banda 1732 nm. (Fonte: próprio autor)

6.2.3 Resultados da classificação pelo cálculo do SAM

O desempenho da classificação utilizando o método SAM foi verificado utilizando as ferramentas já implementadas no software ENVI. Inicialmente a assinatura do PET foi reamostrada para as 224 bandas do AVIRIS aplicando a ferramenta Spectral Library Resampling. Posteriormente, a ferramenta Spectral Angle Mapper (submenu disponível no menu classification > Supervised) foi aplicado conforme proposto na seção 5.2. Ou seja, foi considerado um limiar de detecção $\theta = 0,25$ radianos ($14,3^\circ$), desta forma obtemos uma imagem na qual os pixels com valor SAM igual ou menor do que 0,25 radianos ($14,3^\circ$), representados pela cor vermelha na Figura 19, são similares ao PET. Os pixels em preto são considerados não similares.

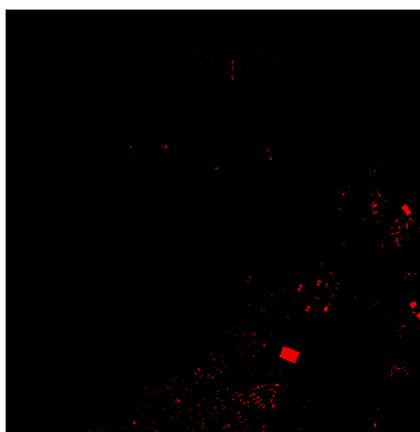


Figura 19 – Classificação SAM $\theta = 0,25$ radianos ($14,3^\circ$) em relação a assinatura espectral do polímero PET. (Fonte: próprio autor)

A seguir foi realizada uma composição de imagens para determinar se os métodos considerados possuem resultados concordantes. A composição da imagem consistiu: da Classificação SAM (Figura 19), aplicada ao canal vermelho; da componente vermelha da imagem HIS Calculado para a banda 1732 nm (Figura 18), aplicada ao canal verde; e a componente azul da mesma imagem, ao canal azul da composição. Desta forma na imagem resultante obtemos o valor 255 para o canal vermelho se a classificação SAM considerou o pixel com similaridade ao PET e 0 se o considerou não similar. No canal verde estão registrados valores entre 0 a 255, com base nos maiores valores do índice HIS registrados. No canal azul estão registrados os menores valores de HIS. O resultado da composição é apresentado na Figura 20.

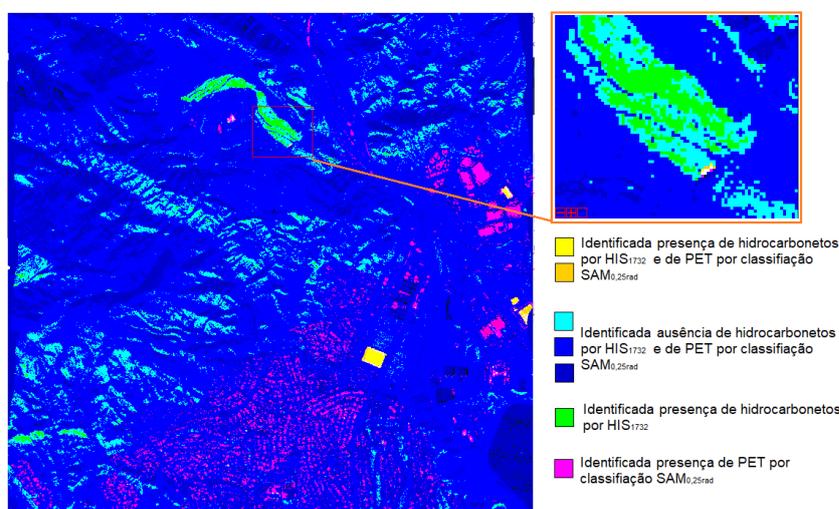


Figura 20 – Comparação entre os métodos SAM e HIS (Fonte: próprio autor)

Analisando a imagem notamos que:

- as cores amarela e laranja representam concordância entre os métodos em relação a presença de plásticos no pixel.
- As tonalidades em azul indicam que os métodos concordam na inexistência de plásticos no pixel.
- A cor magenta indica que o método de classificação SAM considera a presença e o HIS não considera a presença.
- A cor verde indica que o índice HIS considera a presença e a classificação não considera.

6.2.4 Mapa de detecção SAM-HIS

A partir dos resultados considerados até aqui podemos definir a seguinte estratégia para a elaboração de um mapa de detecção de plásticos. Apesar da classificação SAM ter por característica superestimar a presença do material pesquisado, foi possível utilizar o resultado deste método como uma máscara sobre a imagem, limitando o número de pixels sobre os quais aplicamos o cálculo do HIS. Desta forma o cálculo será executado somente sobre pixels com maior similaridade ao material procurado. E assim geramos um mapa de detecção com uma boa redução de pixels superestimados e de pixels subestimados pelos métodos (Figura 21). Nesta imagem podemos considerar que pixels com valores acima de 27 contém plásticos, enquanto que aqueles pixels com valores abaixo de 27 não contém.

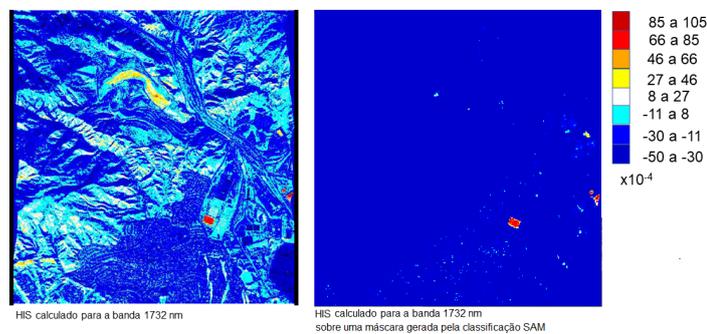


Figura 21 – Mapas de detecção HIS e SAM-HIS (Fonte: próprio autor)

Na imagem a seguir (Figura 22) podemos observar nos detalhes (A) e (B) do mapa, as região do aterro de Sunshine Canyon onde houve a detecção da presença de plásticos. A direita do mapa vemos uma imagem aérea que demonstra como o material costuma ser disperso sobre o solo. Podemos supor que neste tipo de distribuição há muita mistura espectral ocasionada pela presença de diversos materiais.

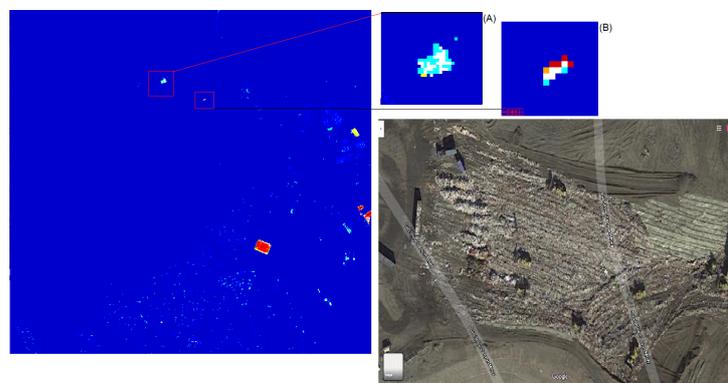


Figura 22 – Aterro de Sunshine Canyon, CA-Estados Unidos (Fonte: próprio autor).

6.2.5 Resultados das estimativas de proporções em imagens simuladas

Nesta secção são apresentados os resultados de HIS extraídos das imagens da cena simulada na Seção 4.2. A cena foi simulada seis vezes para cada uma das três faixas espectrais estudadas (1175, 1216 e 1732), nas primeiras simulações as placas planas receberam as assinaturas espectrais de microplásticos.

A Tabela 5, apresenta os índices HIS calculados para os pixels com microplástico sobre a água com proporções variando de 0 até 100%.

Tabela 5 – HIS dos pixels contendo proporções de microplásticos sobre água.

λ	0,0	12,5	0,25	0,50	0,75	1,0
1175	0,0000	0,0001	0,0003	0,0013	0,0030	0,0053
1216	0,0000	0,0001	0,0005	0,0019	0,0042	0,0075
1732	0,0000	0,0001	0,0005	0,0022	0,0051	0,0090

A Tabela 6, apresenta os índices HIS calculados para os pixels com microplástico sobre a areia com proporções variando de 0 até 100%..

Tabela 6 – HIS dos pixels contendo proporções de microplásticos sobre areia.

λ	0,0	12,5	0,25	0,50	0,75	1,0
1175	0,0000	0,0000	0,0003	0,0013	0,0030	0,0053
1216	0,0000	0,0001	0,0004	0,0019	0,0042	0,0075
1732	0,0000	0,0002	0,0006	0,0023	0,0051	0,0090

Nas demais simulações as placas planas receberam as assinaturas de pellets de plástico virgem (PET, LDPE, PP, PVC e PA6.6).

A Tabela 7, apresenta os índices HIS médios calculados para os pixels com pellets de plásticos, sobre a água com proporções variando de 0 até 100%.

Tabela 7 – HIS médios dos pixels contendo proporções de pellets sobre água.

λnm	0,0	12,5	0,25	0,50	0,75	1,0
1175	0,0000	0,0002	0,0009	0,0037	0,0083	0,0147
1216	0,0000	0,0000	0,0002	0,0006	0,0015	0,0026
1732	0,0000	0,0000	0,0002	0,0007	0,0015	0,0027

A Tabela 8, apresenta os índices HIS médios calculados para os pixels com pellets de plásticos, sobre a areia com proporções variando de 0 até 100%.

Tabela 8 – HIS médios dos pixels contendo proporções de pellets sobre areia

λnm	0,0	12,5	0,25	0,50	0,75	1,0
1175	0,0000	0,0002	0,0009	0,0036	0,0083	0,0147
1216	0,0000	0,0000	0,0001	0,0006	0,0015	0,0026
1732	0,0000	0,0001	0,0002	0,0007	0,0015	0,0027

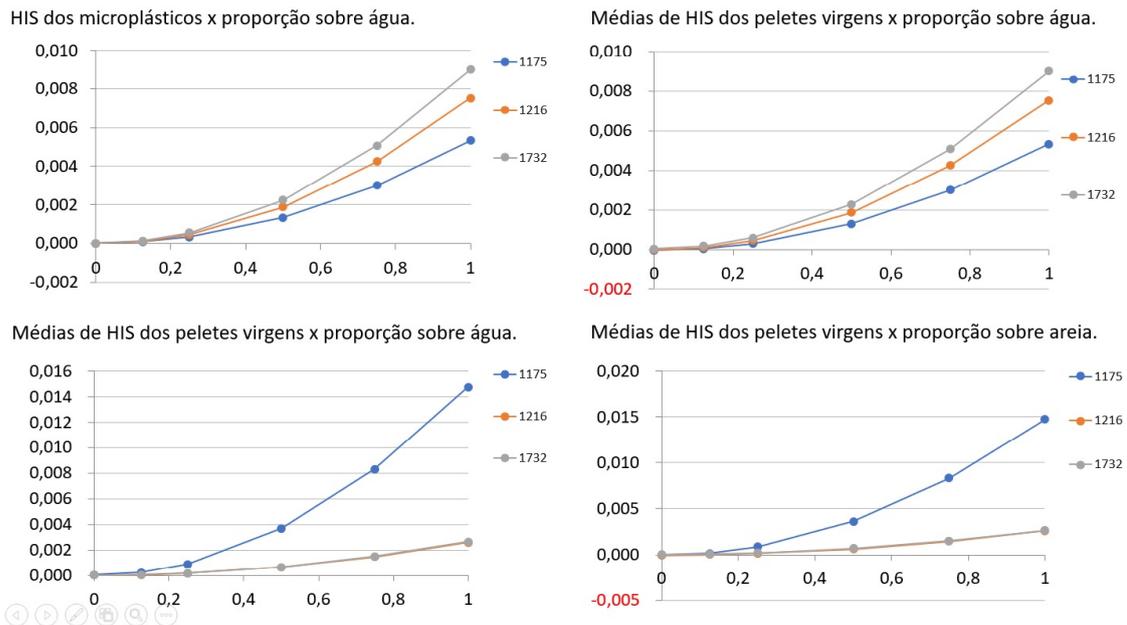


Figura 23 – Variações HIS por proporção no pixel em imagens simuladas. (Fonte: próprio autor)

Os valores de HIS para pixels contendo 100% de outros materiais presentes na cena, árvore, grama e asfalto são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – HIS de outros materiais.

λ	Microplástico	Asfalto	Árvore	Grama	Lixo
1175	0,0053	0,0000	0,0006	0,0002	0,0002
1216	0,0075	0,0000	-0,0001	-0,0002	0,0002
1732	0,0090	0,0001	0,0001	0,0001	0,0013

A Figura 24 apresenta o gráfico de barras que demonstra a capacidade do índice HIS em distinguir o plástico de outros materiais.

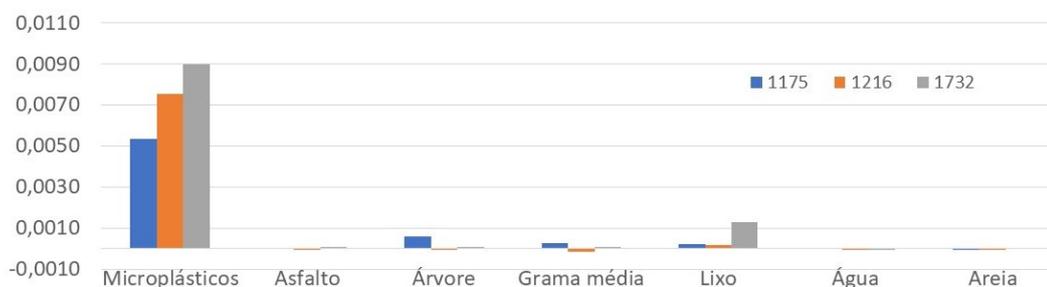


Figura 24 – Comparativo de resultados de HIS em pixels puros de diversos materiais.

6.2.6 Discussão dos resultados

Durante a elaboração deste trabalho realizamos um estudo de similaridade espectral e propomos um índice de hidrocarbonetos. Tais métodos visaram a detecção dos materiais plásticos em imagens hiperespectrais.

O resultado do estudo de similaridade espectral mostrou que a amostra estudada possui uma assinatura espectral muito similar a do PET, isto indica que o PET pode ser o polímero de maior abundância nos detritos encontrados dispersos nos ambientes naturais, o que é concordante com o que tem sido reportado na bibliografia corrente ((MOY et al., 2018; KATAOKA; HINATA; KAKO, 2012; MACE, 2012; ACUÑA-RUZ et al., 2018)). A partir deste estudo foi possível estabelecer o limiar de 0,25 radianos ($14,3^\circ$) para a aplicação da metodologia de classificação de imagens com base no cálculo do SAM.

A partir das informações obtidas na bibliografia corrente e dos testes realizados até este ponto foi possível determinar as bandas do espectro da radiação eletromagnética REM úteis para o sensoriamento. A combinação das informações até aqui coletadas e considerando as bandas de absorção da atmosfera que são proibitivos para o uso de sensoriamento remoto chegamos à mesma conclusão considerada por (GARABA; DIERSSEN, 2018; ASNER, 2016). Ou seja, as bandas na faixa NIR para o sensoriamento remoto de plástico estão localizadas em 1216 e 1732 nm. Inicialmente nestes estudos foi considerada, também, a banda 1175, esperava-se que com uma largura de banda maior, centrada neste valor, seria possível a identificação de uma variedade maior de polímeros. Contudo, esta banda está localizada em um ponto de absorção atmosférica muito acentuado o que impede o imageamento a médias altitudes e a altitudes orbitais. Eventualmente esta faixa espectral poderia ser explorada por meio de sensoriamento remoto ativo a baixas altitudes, que podem ser realizadas por veículos aéreos não tripulados (VANTs) e pequenas aeronaves tripuladas, ou até em plataformas fixas nas praias. Esta forma de detecção dependerá da existência ou do desenvolvimento de dispositivos de iluminação na faixa espectral de interesse.

Para avaliar a possibilidade de quantificar a proporção de polímeros em uma cena aplicando o índice HIS proposto, preliminarmente, utilizou-se simulações de mistura espectral linear. Sobre estas simulações foram aplicados o cálculo de HIS, para diferentes concentrações de plástico sobre a água e sobre a areia. Neste procedimento foi possível perceber que há uma relação crescente entre a proporção do plástico e o valor de HIS, para a maioria dos plásticos, nos pontos de índice propostos (Figuras 14 ,15 e 16). A relação crescente se confirmou nas simulações desenvolvidas no modelo computacional DART, porém, com comportamento polinomial (Figura 23). Um comportamento diferente já era esperado, pois o modelo DART simula a presença da atmosfera e as interações de transferências radiativa que ocorrem na cena simulada. Nas simulação DART pôde-se notar, também, que o índice HIS é capaz de diferenciar o plástico de outros materiais tais

como: água, areia, asfalto, grama, árvore e lixo (Tabela 9 e Gráfico apresentado na Figura 24).

Pretende-se, em trabalhos futuros, adicionar ajustes ao método proposto. Uma possibilidade será a inserção de razões de bandas no cálculo, pois essas operações podem remover os efeitos causados pela presença de sombras na cena. No modelo de simulação DART existe uma variedade de parâmetros que podem ser alterados. As diversas combinações destes parâmetros podem ser testadas de forma a se obter um método de cálculo que seja eficiente em cenas com um maior grau de complexidade.

O método HIS proposto se apresentou eficaz quando comparado com o índice de hidrocarbonetos HI para a detecção de plásticos quando aplicado à uma imagem AVIRIS. De fato, era esperada tal similaridade, visto que pôde ser demonstrado no decorrer deste trabalho que, para distâncias simétricas entre os pontos de índices, o HIS é equivalente ao dobro do valor apresentado para o HI. Além disso para distâncias não simétricas, quanto maior a distância entre os pontos de índice, mais os termos fora da relação $HIS = 2 \times HI$ se aproximam de $-R_A + R_C$. Se a localização da característica espectral estiver corretamente selecionada estes valores tenderão a ser iguais em módulo, e então, esta soma se reduz a um valor muito próximo de zero. Foi possível observar uma grande similaridade entre os resultados dos índices, aparentemente o índice HIS destacou de forma mais acentuada, do que o HI, os alvos que tinham maior similaridade com plásticos, isto ocorreu por causa do uso da mesma paleta de cores. A similaridade encontrada leva a concluir que o índice HIS atua de forma satisfatória na identificação de plásticos em imagens de sensoriamento remoto, além do fato de exigir menor quantidade de operações aritméticas em comparação com o HI.

O método de classificação aplicado para a identificação de assinaturas espectrais pelo cálculo do SAM se mostrou eficaz na detecção das grandes áreas de telhados compostos por material polimérico, pois houve concordância plena com os índices de hidrocarbonetos HI e HIS nestes alvos. Porém, na região do aterro o método indica pouca presença de plásticos se comparado ao que foi detectado pelos outros métodos estudados.

Nas regiões mais urbanizadas a classificação SAM superestima a presença do PET, se comparado aos resultados dos índices de hidrocarbonetos, no entanto não disponibilizamos de informação da cena suficientes para conclusões em relação a estas áreas. Uma redução no limiar de detecção poderia resolver a questão da superestima destes dados, porém, isto prejudicaria ainda mais o resultado na região com baixas concentrações de plásticos.

Para chegar a conclusões mais acuradas seria necessário o uso de imagens das quais se detenha informações mais precisas da composição da cena, a fim de se elaborar uma matriz de confusão para a análise. Uma grande limitação conhecida do SAM é a impossibilidade de distinguir entre correlações negativas e positivas, porque apenas o valor absoluto é considerado. Desta forma os valores de SAM podem demonstrar alta correlação,

indicando, erroneamente, a presença do material pesquisado (JÚNIOR; MENESES, 2000).

A composição gerada para avaliar o desempenho da classificação SAM, sobrepondo-a aos resultados do HIS, se mostrou uma ferramenta promissora na elaboração de um mapa de detecção. A partir desta ideia adotou-se a estratégia de aplicar a classificação SAM como uma máscara capaz de indicar os pixels que continham resposta espectral com maior similaridade à dos plásticos. Posteriormente efetuamos o cálculo do HIS, em um número reduzido de pixels. Desta forma o índice foi calculado somente em pixels com alta similaridade espectral ao elemento monitorado.

Os resultados obtidos foram satisfatórios, pois as áreas de cobertura dos armazéns industriais, feitos de material plástico, foram intensamente indicados no mapa. Na região do aterro de Sunshine Canyon dois grupos de pixels detectaram a presença do material, uma com menor intensidade e outra mais intensa. Estes resultados concordam com aqueles obtidos por (GARABA; DIERSSEN, 2018).

Na região residencial presente na imagem, identificamos um único pixel na cor vermelha. O autor citado anteriormente não fornece informação sobre esta região. Porém, foi possível visualizar por uma imagem de satélite a existência de uma quadra de tênis nas coordenadas daquele pixel. Assim como (KÜHN; OPPERMAN; HÖRIG, 2004), pode inferir que uma pista de atletismo, pintada com tinta a base de hidrocarbonetos, foi detectada pelo seu índice HI, podemos presumir que o índice HIS foi capaz de destacar a quadra de tênis.

Apesar dos resultados satisfatórios obtidos na combinação da classificação SAM com o uso do HIS, a aplicação efetiva do SAM para a detecção dos plásticos dependerá da melhoria na acurácia do método. Neste sentido, o Mapeador de Correlação Espectral (SCM) poderá ser explorado em trabalhos futuros. O método do algoritmo SCM, em comparação ao SAM, também utiliza um espectro de referência definido pelo investigador. Este é um método derivado do método de Pearson que consiste de um coeficiente de correlação que elimina a correlação negativa e mantém a característica do SAM de minimizar o efeito de sombreamento, resultando em melhores resultados (JÚNIOR; MENESES, 2000).

Conclusões

Pelas investigações realizadas na bibliografia corrente com o objetivo de explorar os conhecimentos mais atuais relacionados ao sensoriamento remoto de plásticos em ambientes marinhos e costeiros percebemos que o sensoriamento na região do infravermelho próximo é aquele que é mais promissor. Desta forma os sensores multiespectrais, de alta resolução espacial e espectral, são os melhores candidatos para a detecção desses materiais.

Nos estudos de similaridade espectral, realizados no decorrer deste trabalho, foi possível identificar que a assinatura espectral do PET é aquela que apresenta maior similaridade com amostras de plásticos desconhecidos, recolhidos do ambiente natural. Tal informação é corroborada pelo que têm sido reportado na bibliografia corrente. A aplicação da classificação utilizando o SAM, com o limiar de detecção 0,25 radianos ($14,3^\circ$), se mostrou eficiente para os alvos de grandes dimensões, como os telhados de material polimérico identificados na imagem AVIRIS estudada. Porém nas regiões de grande variabilidade espectral este método apresentou a tendência de superestimar a presença do plástico, por outro lado, na região do aterro de Sunshine Canyon, este método subestimou a presença de polímero se comparado ao que foi constatado pelos índices de hidrocarbonetos HI e HIS.

O índice de hidrocarbonetos simplificado (HIS), como se propôs, é simples de calcular de tal forma que pode ser aplicado diretamente nos softwares de processamento de imagens e sua implementação computacional algorítmica é trivial. A vantagem desta simplicidade é perceptível quando se parte para o tratamento de grandes conjuntos de imagens e informações espectrais. A avaliação do índice HIS pela comparação com o índice HI demonstrou que o índice HIS possui um desempenho muito similar. Ao comparar os resultados obtidos pelo índice HIS e a classificação pelo cálculo do SAM verificou-se que para as grandes áreas de telhado de material polimérico os métodos concordam que há a presença do material analisado.

O objetivo de estabelecer uma estimativa de proporção de plástico por pixel se mostrou viável a partir das simulações realizadas, no entanto, outras composições de simulações deverão ser avaliadas.

Os fatos explorados no presente trabalho evidenciam a possibilidade do uso de métodos de sensoriamento remoto para identificar os plásticos na região NIR do espectro eletromagnético. Para trabalhos futuros será importante a avaliação da aplicação do HIS em imagens de sensores orbitais. Outra opção para realizar o sensoriamento, com baixo custo em pequenas áreas, seria a utilização de VANTs equipados com sensores hiperespectrais.

Referências

- ABRE, A. B. de E. *CONSUMO DE RESINAS PLÁSTICAS CRESCE NO BRASIL EM 2017*. [S.l.]: Site da Associação Brasileira de Embalagens, 2019. [Http://www.abre.org.br/noticias/consumo-de-resinas-plasticas-cresce-no-brasil-em-2017/](http://www.abre.org.br/noticias/consumo-de-resinas-plasticas-cresce-no-brasil-em-2017/), Acesso em 03/03/2019.
- ACC. *ACC Releases December 2018 Resin Production and Sales Statistics*. [S.l.]: Site do American Chemistry Council, 2019. [Https://www.americanchemistry.com/Media/PressReleasesTranscripts/ACC-news-releases/ACC-Releases-December-2018-Resin-Production-and-Sales-Statistics.html](https://www.americanchemistry.com/Media/PressReleasesTranscripts/ACC-news-releases/ACC-Releases-December-2018-Resin-Production-and-Sales-Statistics.html), Acesso em 12/02/2019.
- ACUÑA-RUZ, T. et al. Anthropogenic marine debris over beaches: Spectral characterization for remote sensing applications. *Remote Sensing of Environment*, v. 217, p. 309 – 322, 2018. ISSN 0034-4257. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425718303730>>.
- ASNER, G. *Workshop on mission concepts for marine debris sensing 2016, east-west center of the university of Hawaii at Manoa, Honolulu, Hawaii*. 2016. http://iprc.soest.hawaii.edu/NASA_WS_MD2016/pdf/Asner2016.pdf, acesso em 11/11/2018.
- BERGMANN, M.; GUTOW, L.; KLAGES, M. (Ed.). *Marine Anthropogenic Litter*. Springer International Publishing, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3>>.
- CESBIO. *DART User's Manual (5.7.6)*. 2020. Disponível em: <http://www.cesbio.ups-tlse.fr/dart/Public/documentation/contenu/documentation/DART_User_Manual.pdf>.
- CRITCHELL, K.; LAMBRECHTS, J. Modelling accumulation of marine plastics in the coastal zone; what are the dominant physical processes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 171, p. 111 – 122, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272771416300361>>.
- GARABA, S.; DIERSSSEN, H. Spectral reference library of 11 types of virgin plastic pellets common in marine plastic debris. *Data set available on-line [http://ecosis.org] from the Ecological Spectral Information System (EcoSIS)*. <http://dx.doi.org/10.21232.p.c27h34>, 2017.
- GARABA, S. P.; DIERSSSEN, H. M. An airborne remote sensing case study of synthetic hydrocarbon detection using short wave infrared absorption features identified from marine-harvested macro- and microplastics. *Remote Sensing of Environment*, v. 205, p. 224 – 235, 2018. ISSN 0034-4257. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425717305722>>.
- GARABA, S. P.; DIERSSSEN, H. M. *Spectral reflectance of dry marine-harvested microplastics from north atlantic and pacific ocean*. 2019. [Https://ecosis.org/package/spectral-reflectanceof-dry-marine-harvested-microplastics-from-north-atlanticand-pacific-ocean](https://ecosis.org/package/spectral-reflectanceof-dry-marine-harvested-microplastics-from-north-atlanticand-pacific-ocean), acesso em 26/11/2019.

Gastellu-Etchegorry, J. et al. Dart: Recent advances in remote sensing data modeling with atmosphere, polarization, and chlorophyll fluorescence. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v. 10, n. 6, p. 2640–2649, June 2017. ISSN 1939-1404.

GASTELLU-ETCHEGORRY, J.-P.; MARTIN, E.; GASCON, F. Dart: A 3d model for simulating satellite images and studying surface radiation budget. *International Journal of Remote Sensing*, v. 25, p. 73–96, 01 2004.

GEO.SPATIAL, L. *ENVI Tutorials*. 2020. Disponível em: <<https://www.harrisgeospatial.com/docs/tutorials.html>>.

GODDIJN-MURPHY, L. et al. Concept for a hyperspectral remote sensing algorithm for floating marine macro plastics. *Marine Pollution Bulletin*, v. 126, p. 255 – 262, 2018. ISSN 0025-326X. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X17309530>>.

JÚNIOR, O. de C.; MENESES, P. Spectral correlation mapper (scm): An improvement on the spectral angle mapper (sam). 01 2000.

KATAOKA, T.; HINATA, H.; KAKO, S. A new technique for detecting colored macro plastic debris on beaches using webcam images and cieluv. *Marine Pollution Bulletin*, v. 64, n. 9, p. 1829 – 1836, 2012. ISSN 0025-326X. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X12002676>>.

KRUSE, F. et al. The spectral image processing system (sips)—interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. *Remote Sensing of Environment*, v. 44, n. 2, p. 145 – 163, 1993. ISSN 0034-4257. Airbone Imaging Spectrometry. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/003442579390013N>>.

KÜHN, F.; OPPERMANN, K.; HÖRIG, B. Hydrocarbon index – an algorithm for hyperspectral detection of hydrocarbons. *International Journal of Remote Sensing*, Taylor Francis, v. 25, n. 12, p. 2467–2473, 2004.

LIANG, S. *Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces*. [S.l.: s.n.], 2003. ISBN 9780471723721.

MACE, T. H. At-sea detection of marine debris: Overview of technologies, processes, issues, and options. *Marine Pollution Bulletin*, v. 65, n. 1, p. 23 – 27, 2012. ISSN 0025-326X. At-sea Detection of Derelict Fishing Gear. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X11004668>>.

MOORE, C. J. Synthetic polymers in the marine environment: A rapidly increasing, long-term threat. *Environmental Research*, v. 108, n. 2, p. 131 – 139, 2008. ISSN 0013-9351. The Plastic World. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001393510800159X>>.

MOORE, C. J. *Entrevista com o Capitão Charles J. Moore - O HOMEM QUE DESCOBRIU UMA ILHA DE LIXO NO MAR*. [S.l.]: Projeto Mares Limpos, 2018. <https://www.menoslixo.com.br/posts/o-homem-que-descobriu-uma-ilha-de-lixo-no-mar>, acesso em 11/11/2018.

MOY, K. et al. Mapping coastal marine debris using aerial imagery and spatial analysis. *Marine Pollution Bulletin*, v. 132, p. 52 – 59, 2018. ISSN 0025-326X. SI: Japanese Tsunami Debris. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X17310020>>.

POLIDÓRIO, A.; IMAI, N.; TOMMASELLI, A. Índice indicador de corpos d'Água para imagens multiespectrais. *Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação - DEPART/UFPE*, I, 09 2004.

SERRANTI, S. et al. Characterization of microplastic litter from oceans by an innovative approach based on hyperspectral imaging. *Waste Management*, v. 76, p. 117 – 125, 2018. ISSN 0956-053X. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X18301466>>.

TEUTEN, E. L.; AL et. Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife. *Philosophical Transactions of the Royal Society B - Biological Sciences*, v. 364, p. 2027 – 2045, 2009.

VANE, G. et al. The airborne visible/infrared imaging spectrometer (aviris). *Remote Sensing of Environment*, v. 44, n. 2, p. 127 – 143, 1993. ISSN 0034-4257. Airbone Imaging Spectrometry. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/003442579390012M>>.

VINCE, J.; HARDESTY, B. D. Plastic pollution challenges in marine and coastal environments: from local to global governance. *Restoration Ecology*, v. 25, n. 1, p. 123–128, 2017. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/rec.12388>>.

WRIGHT; ET.AL. *Microscopic fragments of plastic – or microplastics – are pieces of plastic less than 5 mm in diameter and are a global marine pollutant. This image shows microplastic fragments and pre-production pellets collected from a sandy shoreline in Europe; these items are continually fragmenting in the environment. In this issue, experiments were conducted with sediment dwelling marine worms, showing that chemically inert microplastics of a size similar to sand grains from the beaches in which the worms lived caused physical harm (Wright et al.) whilst Browne et al. showed microplastic can move pollutants and additives to worms, reducing functions linked to health and biodiversity.* 2013. Disponível em: <<https://scx2.b-cdn.net/gfx/news/hires/2013/microplastic.jpg>>.

XIAOBO, Z. et al. Variables selection methods in near-infrared spectroscopy. *Analytica Chimica Acta*, v. 667, n. 1, p. 14 – 32, 2010. ISSN 0003-2670. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003267010003582>>.