

IDENTIFICAÇÃO DOS ÍNDICES DE SENSIBILIDADE FLUVIAL AO DERRAMAMENTO DE ÓLEO EM AMBIENTES DO BAIXO AMAZONAS (ESTUDO DE CASO: SANTARÉM-PARÁ)

IDENTIFICATION OF FLUVIAL SENSITIVITY INDEXES TO OIL SPILLS IN ENVIRONMENTS OF THE LOWER AMAZON (CASE STUDY: SANTARÉM-PARÁ)

Luiz Felipe Aquino CORRÊA¹, Suzan Waleska Pequeno RODRIGUES²

¹Universidade Federal do Pará. Rua Augusto Corrêa, 01 - Guamá, Belém - PA E-mail: luizfelipe812@gmail.com

²Universidade de Brasília. Instituto de Geociências. Campus Universitário Darcy Ribeiro ICC – Ala Central. Brasília – DF. E-mail: suzanpequeno@unb.br

Introdução
Geologia regional
Materiais e métodos
Área de estudo
Dados utilizados / Processamento dos dados e geração do mapa de classes
Reclassificação para os índices de sensibilidade fluvial
Resultados e discussões
Reconhecimento das classes identificadas
Índices de Sensibilidade ao Derramamento de Óleo
Índice de Sensibilidade Fluvial 1 – Estruturas artificiais
Índice de Sensibilidade Fluvial 4 – Escarpas e barrancos
Índice de Sensibilidade Fluvial 6 – Praia ou banco de areia / seixo abrigada
Índice de Sensibilidade Fluvial 10A – Banco de macrófitas aquáticas
Índice de Sensibilidade Fluvial 10B – Vegetação alagada
Conclusões
Agradecimentos
Referências

RESUMO - Este trabalho propôs utilizar o processamento de imagens *RapidEye* conciliado com etapas de checagem de campo para gerar um mapa de Índice de Sensibilidade Fluvial ao derramamento de óleo para a orla do município de Santarém – Pará. A classificação não-supervisionada resultou na geração do mapa de classes identificadas, composto pelas classes água, área urbana, praia fluvial, área de várzea. O índice *Kappa Geral* foi de ~0,86%, o qual é considerado um excelente resultado quanto acurácia da classificação. A partir da conciliação do mapa de classes e da checagem de campo foi gerado o mapa de índice de sensibilidade fluvial (ISF) ao derramamento de óleo para a área estudada, composto por 5 índices (ISF 1- estruturas artificiais, ISF 4- escarpa / barranco, ISF 6- Praia ou banco de areia / seixo abrigada, ISF 10A- banco de macrófitas e ISF 10B- vegetação alagada (Igapós, várzea, chavascal e campo)). Os ISF's 1 e 4 que são considerados menos sensíveis aos danos ocasionados pelo contato com derivados de petróleo representam 5,1% da área total da aplicação dos índices. Já os ISF's 6, 10A e 10B representam 94,9% da área total da aplicação do índice, estes são índices mais sensíveis.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto. Imagem *RapidEye*. Ambiente fluvial. Amazônia. Derramamento de óleo.

ABSTRACT - This work proposes to use *RapidEye* image processing combined with field checking steps to generate a River Sensitivity Index map for oil spills to the border of the municipality of Santarém - Pará. The unsupervised classification which resulted in the generation of the map of identified classes, composed of the classes water, urban area, river beach, floodplain area. The Kappa Geral index was ~ 0.86%, which is considered an excellent result in terms of the accuracy of the classification. The class-map together with the data checked in the field provided sufficient data for the elaboration of the river sensitivity index (RSI) map to the oil spill in the studied area, consisting of 5 indexes (RSI 1- artificial structures, RSI 4- escarpment/ravine, RSI 6- Beach or sheltered sand/pebble, RSI 10A- macrophyte bank and RSI 10B- flooded vegetation). RSI's 1 and 4, which are considered less sensitive to damage caused by contact with oil products, represent 5.1% of the total area of application of the indices. RSI's 6, 10A and 10B represent 94.9% of the total area of application of the index, these are more sensitive indexes.

Keywords: Remote sensing. *RapidEye* image. River environment. Amazon. Oil spill.

INTRODUÇÃO

A Amazônia possui um ecossistema ímpar, et al., 1992).
que se distinguem de qualquer região do mundo. Grande parte das cidades situadas na região amazônica desenvolveram-se a partir da margem de um rio o que as tornaram cidades portuárias, porém com uma estrutura bem inferior quando comparadas com as grandes cidades situadas no litoral brasileiro. O sistema hidroviário tornou-se a principal via de transporte e acesso para essas

O rio Amazonas, considerado um dos maiores e mais complexos, possui uma extensa planície fluvial, intercalada por lagos, barras e depósitos de *overbanks* (Mertes et al., 1996). Cerca de 11% de 92400 km² da planície, até então mapeada, são recobertas por lagos maiores que 100 m (Sippel

idades e as demais regiões ribeirinhas, conseqüentemente, havendo um trânsito considerável de embarcações de pequeno e grande porte transitando entre os principais rios, deste modo, chama-se a atenção para um sinistro importante, decorrente deste transporte, que são os vazamentos de óleos diesel e gasolina que chegam às margens dos rios.

Este evento, por vezes despercebido pelo condutor, pode afetar áreas ribeirinhas e conseqüentemente a fauna e flora local. De acordo com a lei 9.966 (Brasil, 2000), portos organizados, plataformas e outras instalações portuárias devem possuir planos de emergência para combater possíveis poluições ocasionadas pelo derramamento de óleo e substâncias nocivas ou perigosas.

Uma das ferramentas deste plano são as Cartas de Sensibilidade ao Óleo (Cartas SAO), que são mapas elaborados para auxiliar na atuação de remoção do óleo, os quais indicam as áreas de maior e menor sensibilidade, assim dando uma noção a qual deve ser a prioridade na atuação da remoção.

Com intuito de estudar os principais ambientes que poderiam ser afetados, reconhecendo-os, mapeando-os e quantificando-os, optou-se pela utilização de um índice mundialmente conhecido para o mapeamento e ranqueamento dos principais ambientes a serem danificados a um eventual derramamento de óleo, o Índice de Sensibilidade Ambiental (ISA). No litoral brasileiro os estudos e aplicação do índice de sensibilidade ambiental encontram-se bem desenvolvidos (Araújo et al., 2002; Souza-Filho et al., 2009a; Souza-Filho et al., 2009b; Silva et al., 2009; Rodrigues e Souza-Filho, 2012), haja vista que é dado uma grande

importância para esta região, devido aos seus grandes portos responsáveis por grande parte das mercadorias importadas e exportadas, além de ser uma região que concentra plataformas petrolíferas exploradoras do pré-sal.

Já os sistemas fluviais brasileiros não recebem uma atenção como o litoral, os estudos aplicando e adaptando o ISA para os rios só foram surgir com Hayes et al. (1997) para rios e córregos do sudeste dos Estados Unidos, no Brasil, foi nos últimos anos que esses estudos vieram se difundir (Araújo et al., 2006; Gonçalves et al., 2006; Ferreira & Beaumord, 2008; Costa, 2015; Wally, 2015; Beneditti et al., 2016). A Amazônia possui características e sazonalidades que se diferem de qualquer outra região, o qual fez com que Araújo et al. (2006) adaptassem o índice de sensibilidade fluvial (ISF) para a referida região.

A área escolhida para o mapeamento foi a orla de Santarém, situada entre uma rota hidroviária importante, que é entre as capitais Manaus-AM e Belém-PA, além da sua representatividade no desenvolvimento do contexto amazônico. São várias as dificuldades para a realização de trabalhos em uma área extensa, muitas das vezes a logística se torna uma interrogação, porém com o auxílio de ferramentas como o sensoriamento remoto e os dados obtidos por sensores orbitais, o trabalho do usuário se torna mais completo, proporcionando facilidades na hora de tomar decisões.

Com isso, pretende-se contribuir com dados importantes para a gestão e manejo deste tipo de intempérie com mais rapidez, uma vez que estes índices e áreas já estão mapeados. Além de trazer novas perspectivas para a sensibilidade fluvial na Amazônia, espelhando o desenvolvimento de novas pesquisas para essa vasta região.

GEOLOGIA REGIONAL

A Bacia do Amazonas está separada das bacias do Solimões e do Marajó pelos arcos de Purus e Gurupá respectivamente, localizada na plataforma sul-americana, ao norte do Brasil, abrangendo os Estados do Amapá, Amazonas e Pará; abrange uma área de cerca de 500.000 km² (Cunha et al., 1994) e é classificada como intracratônica do “Tipo I – Interior Simples” (Klemme, 1980). Uma das explicações para sua origem é que ela estaria associada à dispersão de esforços de direção Norte-Sul, referente ao processo de fechamento do Ciclo Brasileiro (Cunha et al., 2007). Posteriormente aos processos distensivos, ocorreu o resfriamento dos

corpos magmáticos, dando início à subsidência térmica regional e surgimento de uma sinéclise intracontinental, formando uma bacia de geometria alongada e preenchimento predominante por rochas siliciclásticas, essencialmente paleozoicas, intrudidas no Mesozoico por diques e soleiras de diabásio, onde suas rochas podem atingir espessura máxima de 5.000 m (Almeida, 1967; Caputo, 1984; Cunha et al., 2007).

O arcabouço estratigráfico é representado por duas megassequências de primeira ordem, uma Paleozoica e outra Meso-Cenozoica (Cunha et al., 2007; Matsuda et al., 2010).

A megassequência paleozoica é dividida em outras três sequências de segunda ordem, sendo elas, Sequência Ordovício-Devoniana, Sequência Devoniana-Tournasiana e Sequência Pensilvaniano-Permiana (Cunha et al., 2007). A sedimentação pós-paleozoica é representada pela Megassequência Mesozoico-Cenozoica, que é composta pelas sequências cretácea e terciária, que juntas compõem o Grupo Javari (Cunha et al., 1994;

Eiras et al., 1994). O Grupo Javari é constituído pelas formações Alter do Chão (Neo-Cretáceo) e Solimões (Mioceno-Plioceno) (Cunha et al., 2007). A orla de Santarém compreende principalmente os arenitos bem estruturados da Formação Alter do Chão, além dos sedimentos clásticos (cascalhos, areias, siltes e argilas) dos depósitos aluvionares oriundos da planície de inundação do Rio Tapajós.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

O município de Santarém está situado ao Oeste do Pará, microrregião do médio Amazonas (Figura 1). É limitado pelos municípios de Óbidos, Monte Alegre e Alenquer ao Norte, a Oeste por Juruti e a Leste com Prainha, a Sudoeste pela cidade de Aveiro, a Sudeste por Placas e Uruará. A cidade localiza-se a margem direita do rio Tapajós, na confluência com o rio Amazonas. Possui cerca de 302.667 habitantes e uma área de unidade territorial de 17.898,389

km², segundo dados estatísticos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018). O acesso à área pode ser feito a partir de embarcações, aeronaves ou automóveis.

Segundo o projeto RADAMBRASIL (1976), que detalha bem as feições geomorfológicas da Folha 21SA - Santarém, foram identificadas oito unidades morfoestruturais, entretanto, apenas duas encontram-se na região da realização deste trabalho, sendo a Planície Amazônica e o Planalto Rebaixado da Amazônia.

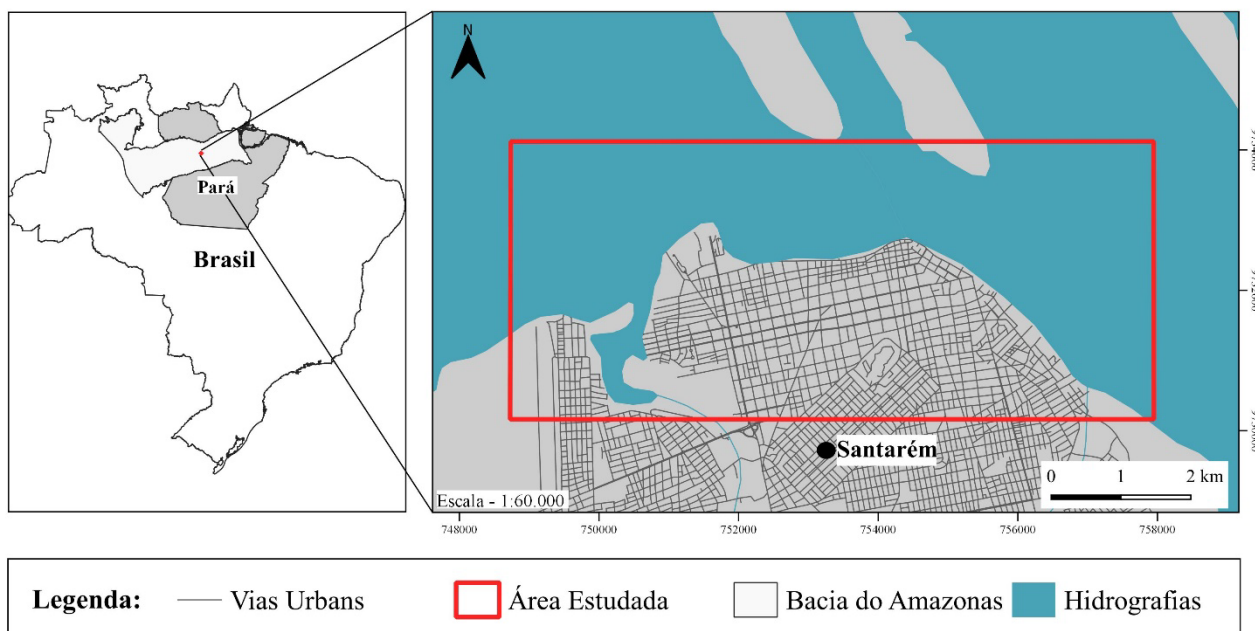


Figura 1- Mapa de localização e acesso da área de estudo.

Dados utilizados / Processamento dos dados e geração do mapa de classes

As imagens *RapidEye* utilizadas para desenvolver este trabalho foram cedidas pelo GEO CATALOGO do Ministério do Meio Ambiente para fins de pesquisa científica. A imagem é do dia 20/03/2017, tem uma resolução de 5 m para ortoimagens. Foi realizado a correção atmosférica na imagem REIS/*RapidEye* de acordo com o método de Chavez (1988), logo após foi aplicado o efeito de contraste linear com o objetivo de realçar e reduzir os efeitos da

atmosfera sobre as feições da cena, posteriormente a imagem foi recortada.

Nesse trabalho optou-se pela classificação não-supervisionada, sendo utilizado algoritmo para o reconhecimento das classes presentes na imagem. A classificação automática foi realizada a partir do Algoritmo ISOCLUS do *software PCI Geomatic 2013*, pelo método ISODATA (Tou & Gonzales, 1974), em que cada *pixel* da imagem é associado a uma resposta espectral, foram gerados 200 *pixels*. Posteriormente foi realizada a etapa de pós-

classificação, em que os 200 *pixels* foram agrupados, a fim de definir grupos de *pixels* representativos de feições texturais com significativo temático, no caso desse trabalho as temáticas em que foram agrupados são: água, área urbana, “praia fluvial” e área de várzea.

A acurácia da classificação não supervisionada foi realizada a partir do índice *Kappa*. O coeficiente *Kappa* (Tabela 1) é uma medida que visa estabelecer uma relação de quanto a classificação está de acordo com os dados de referência (Figueiredo, 2007). Para a determinação do índice da área estudada foram mostrados 200 *pixels*, em modo *random*, de acordo com a metodologia postulada por Cohen (1960), usando como base o mosaico de imagens de alta resolução espacial do satélite *WorldView-2*, disponibilizado na plataforma *GoogleEarth* de mesma data.

Na etapa de campo, utilizou-se o GPS (*Global Positioning System*), modelo *Gamin Etrex 10* para marcação das coordenadas dos pontos de controle do terreno. Realizou-se conferência de campo das classes identificadas e unidades geomorfológicas, em que cada unidade identificada foi descrita detalhadamente em uma ficha de campo e fotografada.

Tabela 1- Desempenho da classificação de acordo com os valores do Índice *Kappa* (Fonseca, 2000).












Coeficiente <i>Kappa</i>	Desempenho da classificação
<0	Péssimo
0<K≤ 0,2	Ruim
0,2<K≤ 0,4	Razoável
0,4<K≤ 0,6	Bom
0,6<K≤ 0,8	Muito Bom
0,8<K< 1,0	Excelente

Reclassificação para os índices de sensibilidade fluvial

A elaboração do mapa de sensibilidade foi baseada na proposta de Jensen et al. (1998), que utiliza a integração de técnicas de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas (SIG).

Após gerado o mapa de classes e identificado todos os possíveis ambientes da área de estudo, aplicou-se o índice de acordo com o que foi proposto por Araújo et al. (2006) (Tabela 2) e por Gonçalves et al. (2006), seguindo as determinações postuladas pela NOAA (2002) e MMA (2007). Foi utilizado o *software ArcGIS v.10.4*, para a nomeação dos índices de sensibilidade fluvial. O mapa confeccionado nesse trabalho, apresenta uma escala de 1:35.000, proporcional a escala operacional de detalhes (MMA, 2007).

Tabela 2- Índice de sensibilidade fluvial da região amazônica (Araújo et al., 2006).

ISF	Feição
1 	Estruturas artificiais
2 	Laje ou afloramento rochoso
3 	Corredeira / Cachoeira
4 	Escarpa / barranco
5 	Praia ou banco de areia / seixo exposta
6 	Praia ou banco de areia / seixo abrigada
7 	Praia ou banco de lama exposto
8 	Praia ou banco de lama abrigado
9 	Zona de confluência rios e lagos
10A 	Banco de macrófitas aquáticas
10B 	Vegetação alagada (Igapós, várzea, chavascal e campo)

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Reconhecimento das classes identificadas

A classificação não-supervisionada da imagem *RapidEye*, resultou na geração do mapa de classes identificadas (Figura 2), ferramenta importante junto com a etapa de campo para a elaboração do mapa final de ISF. O mapa de classes nos possibilitou uma prévia do tipo de

substrato que podemos encontrar na área de estudo, em que após a classificação foi possível identificar quatro classes distintas, sendo elas: água, área urbana, “praia fluvial” e “área de várzea”.

A classe água é representada pelas principais hidrografias influente da região, os rios Tapajós e Amazonas, principais vias da navegação da

Região do Baixo Amazonas, é notável também a presença do comércio de combustível que ocorre

entre embarcações e balsas que funcionam como postos de combustíveis flutuantes.

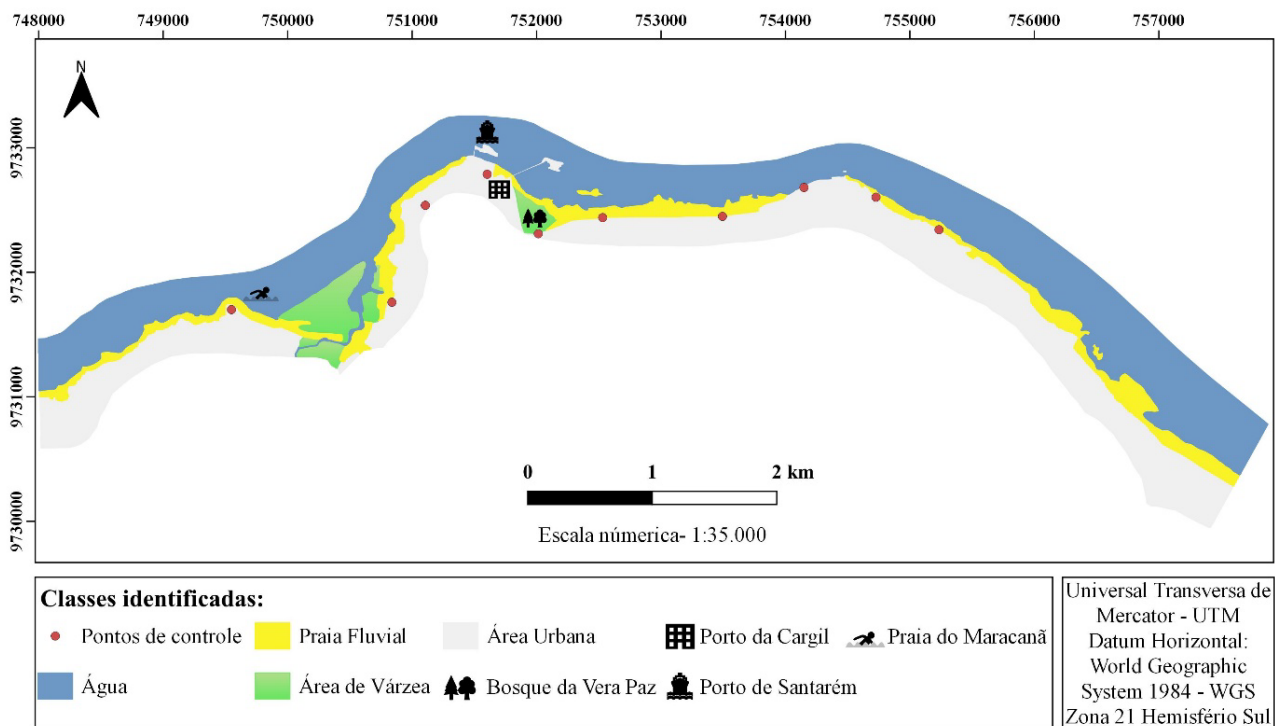


Figura 2- Mapa de classes Identificadas.

A classe área urbana é a que possui composição mais heterogênea, representada principalmente pelos principais bairros dispostos pela orla da cidade (Uruará, Santana, Prainha, Centro, Aldeia, Fátima, Laguinho, Salé, Liberdade, Mapiri e Maracanã), os quais são estruturados por portos, comércios, residências, áreas de lazer e a universidade federal do município (Universidade Federal do Oeste do Pará), é onde ocorre também o maior fluxo de pessoas dentre as classes identificadas.

Por se tratar de uma cidade localizada sobre a Formação Alter do Chão e dos Depósitos Aluvionares, ocorre a presença de extensas faixas de areais característicos dos sistemas fluviais, os quais são representados pela classe “praia fluvial”. Essa classe se estende durante boa parte da área de estudo, porém apresentando paisagens distintas.

As faixas de areia situadas próximas aos portos e comércios do município encontram-se bastante degradadas, principalmente por conta da poluição oriundas das embarcações, comércios e do despejo da rede de esgoto. A porção desta classe que possui uma boa preservação, geralmente é voltada para o lazer e atividades turísticas, um exemplo é a praia do Maracanã, localizada a oeste da região estudada, composta por sedimentos com granulometria de média a

fina e coloração esbranquiçada.

Floresta equatorial higrófila de várzea, popularmente conhecida como área de várzea, ocorre pontualmente em duas áreas, com vegetação variando de baixa a médio porte.

No período da seca (meses que os índices pluviométricos possuem valores baixos) as plantas terrestres ficam expostas, já no período da cheia passam a ser chamadas de plantas aquáticas, por ficarem submersas ou quase todas submersas pela água. Outra característica é a presença de sedimentos finos (argila, silte e areia fina) transportados pelo rio.

Somando as quatro classes identificadas, tem-se um total de 8,3570 km², sendo 49,17 % da área total representado pela classe água, 35,46 % classe área urbana, 10,98 % classe praia fluvial e 4,39 % pela classe área de várzea.

O índice *Kappa* foi aplicado com o intuito de verificar a acurácia da classificação não supervisionada. Pela análise dos dados contidos na tabela 3, nota-se que a água (*Kappa* individual = 0,893) foi a classe mais heterogênea em termos de comportamento espectral, sendo confundido duas vezes com a classe praia fluvial e uma com a classe área de várzea, já a classe praia fluvial (0,708) e área urbana (0,728) foram as que apresentaram os piores desempenhos, devido principalmente pela grande heterogeneidade da

classe área urbana que em locais pontuais tem em sua composição areia, o que proporcionou uma confusão entre ambas as classes. A classe “No Data” não entra em discussão, mas foram computados de modo a validar toda a classificação.

Levando em conta o valor *Kappa* Geral ~0,86% e associando a tabela de classificação proposta por Cohen (1960), vemos que o desempenho foi considerado excelente e que o Algoritmo ISOCLUS foi a ferramenta ideal na classificação desse caso.

Tabela 3- Índice Kappa, comissão, omissão, erro de usuário e produtor da área classificada.

Classes	A	B	C	D	E	Total	Erro do Usuário (%)	Erro de Comissão (%)
A	30	2	1	0	0	33	90,9	9,1
B	0	8	0	3	0	11	72,72	27,28
C	0	0	4	0	1	5	80	20
D	0	3	0	12	1	16	75	25
E	0	0	1	1	133	135	98,51	1,49
Total	30	13	6	16	135	200		
Erro de produtor %	100	61,54	66,66	75	98,6			
Erro de Omissão %	0	38,46	33,34	25	1,4			
Kappa individual %	0,893	0,708	0,761	0,728	0,943			
Kappa Geral (%) = 0,863					Acurácia Geral = 92,5			

Legenda: A: Água; B: Praia fluvial; C: Área de várzea; D: Área urbana; E: No data.

Índices de sensibilidade ao derramamento de óleo

Para elaboração do mapa de ISF foram avaliadas principalmente características geomorfológicas, tipo de substrato e associação áreas vegetadas, já que óleo apresenta um comportamento diferente para cada tipo de substrato. A Sensibilidade tende a crescer de acordo com a produtividade biológica, ambientes como mangues, marismas e área de várzea, demonstram uma dinâmica entre o óleo e ambiente bastante impactante, devido ao fato dos danos se estenderem ao longo prazo nas vegetações ali presente (MMA, 2007).

Foram identificados 5 índices (Figura 3), sendo o ISF 1 (estruturas artificiais), ISF 4 (escarpa/barranco), ISF 6 (praia ou banco de areia / seixo abrigada) ISF 10A (banco de macrófitas) e ISF 10B (vegetação alagada como, igapós, várzea, chavascal e campo), os quais somados totalizam uma área de 1,3702 km², sendo 4,97% representado pelo ISF 1, 0,14% ISF 4, 66,87% pelo ISF 6, 1,31% ISF 10A e 26,71% pelo ISF 10B. Os Índices identificados serão detalhados a seguir.

Índice de Sensibilidade Fluvial 1 – Estruturas artificiais

Refere-se as estruturas artificiais, localizadas principalmente na parte mais urbanizada da orla, representado por estruturas edificadas como as

palafitas (Figura 4A) e os muros de arrimo que formam o calçadão da orla (Figura 4B), construídos para conter a água do rio. São feições lisas ou pouco rugosa, com substrato impermeável, não ocorrendo a presença de comunidades biológicas nesse tipo de estrutura. Os substratos impermeáveis verticalizados sugerem apenas uma adesão do óleo à superfície, não havendo penetração, conseqüentemente facilitando sua remoção (MMA, 2007). Entretanto, caso a estrutura apresente fraturas ou fissuras, a permeabilidade começa a existir afetando o ambiente de forma mais grave, elevando o ISF.

Os processos de remoção mais adequados e viáveis para esse tipo de estruturas, são jateamento ou limpeza natural com absorventes. O jateamento a baixa e alta pressão (Figura 5A), método agressivo em virtude à pressão do jato, porém necessário para a remoção. Se faz preciso aplicação de algumas técnicas como as barreiras de contenção (Figura 5B) e/ou absorventes nas áreas adjacentes, com o objetivo de evitar recontaminação dos locais próximos. Outra opção seria a limpeza natural associada a absorventes, de maneira que o rio realizaria a remoção do óleo contido nessas superfícies e junto com aplicação de barreiras absorventes ao longo do trecho, com o propósito de conter e absorver manchas tênues oriundas da ação de lavagem natural promovida pelo rio

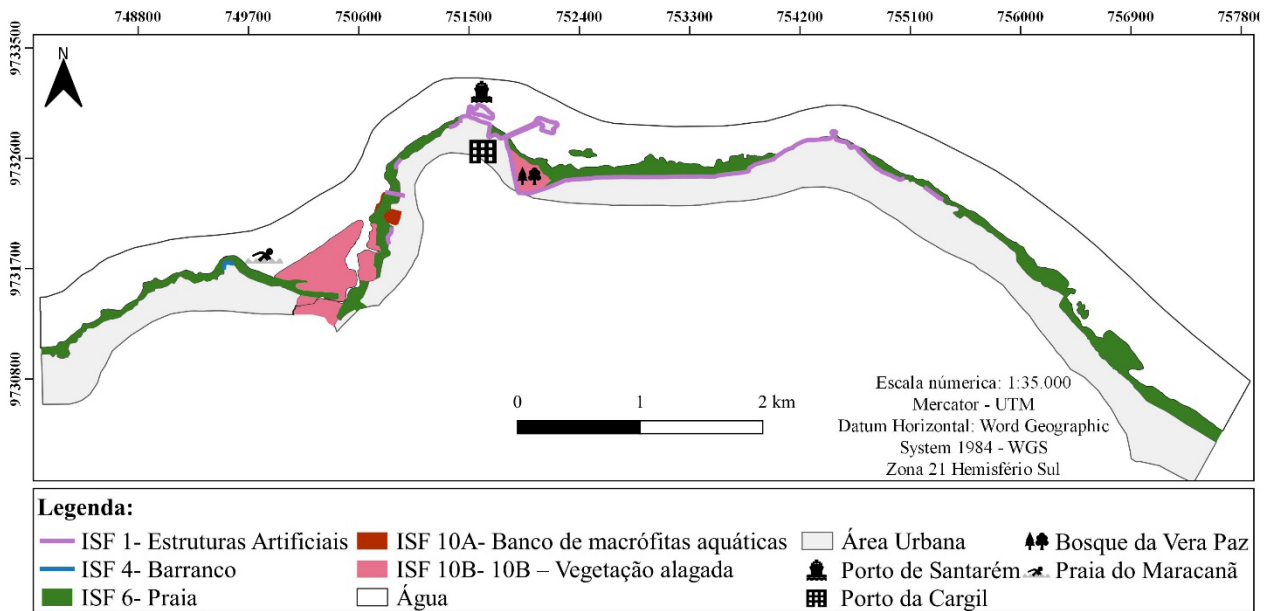


Figura 3 - Mapa de ISF da região estudada.



Figura 4 - A) ISF 1 substrato palafita; B) ISF 1 substrato muro de arrimo; C) ISF 4 Barranco de areia; D) ISF 7 praias fluviais; E) ISF 10A banco de macrófitas; F) ISF 10B área de várzea.

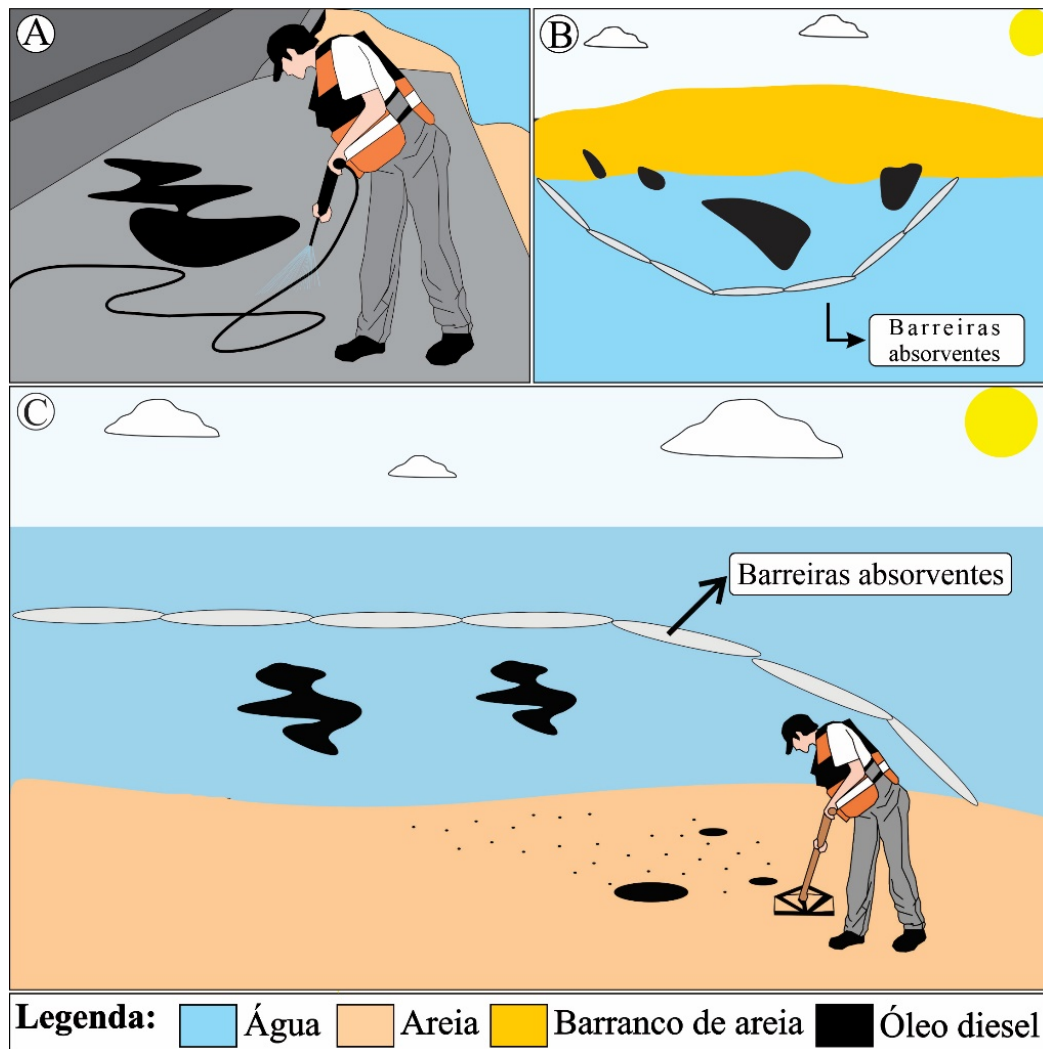


Figura 5 - A) Jateamento de alta pressão em estrutura artificial contaminada; B) Barreiras absorventes aplicados adjacentes a barrancos atingidos por óleo; C) Remoção de óleo pelo método de recolhimento manual criterioso associado a métodos de contenção (Lopes et al., 2007).

Índice de Sensibilidade Fluvial 4 – Escarpas e barrancos

O índice 4 ocorre pontualmente a oeste da área estudada, mais precisamente na praia do Maracanã, se apresenta em forma de barranco (Figura 4C), que possivelmente foi oriundo do processo de erosão ocasionado pela ação do rio. É composto por sedimentos bem selecionados e arredondados, com coloração branca avermelhada, ocorre ao seu redor blocos de arenitos bem consolidados e na sua parte superior temos presença de blocos de laterita.

Neste substrato já existe certa permeabilidade do óleo, mas a inclinação não permite que este alcance áreas além das margens (Wally, 2015).

Sugere-se 3 tipos de processos para remoção, o primeiro é o jateamento a baixa pressão, porém deve ser aplicado nas primeiras horas após o vazamento para que não dê tempo do óleo intemperizar, facilitando sua remoção, haja vista que essa técnica deve ser ocorrer sincronizada a

ações de contenção dos resíduos para que não haja contaminação das áreas adjacentes.

A segunda seria lavagem com água corrente, que causa menos danos, deve ser usada imediatamente após os locais serem atingidos, tem que se atentar para a retirada do resíduo é aconselhado o uso de bombeamento ou absorventes.

A terceira técnica seria o bombeamento a vácuo, é principalmente indicada e eficiente em ambientes onde haja acúmulo de óleo, podendo ser repetido durante os dias que forem necessários, uma vez que os impactos ocasionados por esta técnica são mínimos (Lopes et al., 2007)

Índice de Sensibilidade Fluvial 6 – Praia ou banco de areia / seixo abrigada

Aqui, referidas como “praias fluviais”, termo popularmente usado que equivale as barras deposicionais formadas por sistemas fluviais. Identificada em grande parte da área de estudo, as praias fluviais (Figura 4D) foram formadas

dentro da planície de inundação do rio Tapajós, em que nas épocas de cheias do rio (dezembro-junho) ficam quase totalmente submersas e em períodos de secas (entre julho-novembro) ficam bem expostas, estendendo-se boa parte da planície da região do Baixo Amazonas.

O substrato é inconsolidado, composto por sedimentos de areia com tamanho variando de médio a fino, coloração esbranquiçada, semipermeáveis e com declividade baixa (< que 5°).

Com o intuito de realizar uma remoção do óleo eficaz e sem causar danos as comunidades biológicas que ali habitam, se faz necessário um conjunto de métodos para remoção, sugere-se aplicação em sincronizada dos métodos de recolhimento manual criterioso (Figura 5C), uso de absorventes naturais, bombeamento a vácuo e limpeza natural causada pela água do rio (Milanelli & Lopes, 2001).

Índice de Sensibilidade Fluvial 10A – Banco de macrófitas aquáticas

O índice 10A é representado pelos bancos de macrófitas (Figura 4E), constituído por comunidades de espécies de plantas aquáticas e capins flutuantes que tendem a se formar nas áreas adjacentes as regiões de várzea (Junk, 1973; Junk & Piedade, 1997).

Ocorre pontualmente a oeste da região estudada, próximo a UFOPA. Seu alto índice se dá pelo fato de ser um excelente nicho ecológico e pelas drásticas consequências que óleo pode causar às espécies de plantas e organismos aquáticos que ali habitam.

De acordo com NOAA (2002), o processo de limpeza nesses ambientes é muito difícil por conta da presença da vegetação, além disso, a taxa de remoção natural é bastante lenta.

Para a remoção do óleo é sugerido o método de jateamento a baixa pressão, tendo muito cuidado, devido a fragilidade da vegetação, associado a cordões de contenção com absorventes com o objetivo de não deixar o rejeito contaminar áreas próximas, além disso é bem-vindo o uso do bombeamento a vácuo nas águas que rodeiam esses bancos, minimizando o contato com o óleo.

Índice de Sensibilidade Fluvial 10B – Vegetação alagada (Igapós, várzea, chavascal e campo)

Planície lamosa vegetada, popularmente conhecida como “área de várzea”, apresenta solos aluvionares, sedimentos argilosos e em alguns pontos ocorre a presença de areia de granulometria fina.

Sua vegetação é característica da floresta de várzea baixa. Nas porções próximas ao bosque da vera paz temos ocorrência pontual desse índice (Figura 4F), nesse ponto é notável a presença de muitas embarcações, além disso ao lado temos o porto da Cargill, devido ser o ambiente que possui o ISF mais alto é necessário uma atenção e cuidado maior para que não ocorra nenhum acidente.

No caso de acidentes, os processos de remoção do óleo são iguais ao do ISF 10A, jateamento de baixa pressão, associado a métodos de contenção do resíduo como cordões de absorventes.

CONCLUSÕES

Por meio da aplicação de técnicas de sensoriamento remoto no processamento da imagem *RapidEye*, obtivemos o mapa de classes identificadas da área estudada, o mesmo composto pelas classes água, área urbana, praia fluvial, área de várzea. A validação da classificação obteve um excelente resultado. O mapa de classes conciliado a etapa de campo resultou na geração do mapa de índice de sensibilidade fluvial ao derramamento de óleo para a orla de Santarém, este composto por 5 índices (ISF 1 -estruturas artificiais, ISF 4 -escarpa / barranco, ISF 6 - Praia ou banco de areia / seixo abrigada, ISF 10A - banco de macrófitas e ISF 10B - vegetação alagada (Igapós, várzea, chavascal e campo)). Os ISF's 1 e 4 que são considerados menos sensíveis aos danos ocasionados pelo contato com derivados

de petróleo representam 5,1% da área total da aplicação dos índices. Já os ISF's 6, 10A e 10B representam 94,9% da área total da aplicação do índice, estes são índices mais sensíveis, cujo os danos gerados pelo derramamento de óleo são graves e a remoção dessa substância são mais complicadas quando comparado com os ISF's 1 e 4. Assim, a orla da cidade de Santarém mostra uma sensibilidade ao derramamento de óleo considerada alta. Em um possível evento de acidente com óleo ou derivados, é necessário que as ações sejam prioridades em um primeiro momento nas áreas representadas pelos ISF's 6, 10A e 10B, posteriormente e não menos importantes, nas áreas representadas pelos ISF's 1 e 4. Nesse contexto, os resultados gerados visam colaborar para a gestão de contingência no município de Santarém.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Santiago e Cintra pela disponibilização das imagens *RapidEye* utilizadas neste trabalho e ao Laboratório de Análise de Imagens do Trópico Úmido pela disponibilização dos *softwares* e espaço para processamento das imagens. Ao Simmon Souza pelo auxílio no processamento das imagens.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. F. M. Origem da plataforma brasileira. **Boletim da divisão de Geologia e Mineralogia**, Rio de Janeiro, v. 241, p. 1-38, 1967.
- ARAÚJO, S.I.; SILVA, G.H.; MUEHE D.C.E.H. Mapas de sensibilidade ambiental a derrames de óleo: ambientes costeiros, estuarinos e fluviais. **Revista da Petrobrás**, Rio de Janeiro, p. 34-41, 2006.
- ARAÚJO, S.I.; SILVA, G.H.; MUEHE, D.C.E.H. Manual Básico para Elaboração de Mapas de Sensibilidade Ambiental a Derrames de Óleo no Sistema Petrobras: Ambientes Costeiros e Estuarinos. **CENPES/ Petrobras**, Rio de Janeiro, p. 134, 2002.
- BENEDITTI, C.A.; RIEDEL, P.S.; LUPINACCI, C.M.; MILANELLI, J.C.C.; AGUILAR, R.L. Mapeamento dos índices de sensibilidade ambiental ao óleo em trecho do rio Tietê. **Geociências (São Paulo)**, v. 35, n. 2, p. 220-230, 2016.
- BRASIL, Lei nº 9.966/2000, de 28 de abril de 2000. Estabelece a Prevenção, o Controle e a Fiscalização da poluição causada por lançamento de óleo e outras substâncias nocivas ou perigosas em águas sob jurisdição nacional e das outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, 2000.
- CAPUTO, M.V. **Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil**. Phd Thesis, Universidade da Califórnia, p. 1-583, 1984.
- CHAVEZ, P.S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 24, p. 450-479, 1988.
- COHEN, J. A. coefficient of agreement for nominal scales. **Educ Psychol Meas**, v. 46, p. 20-37, 1960.
- COSTA, D.M.; RIEDEL, P.S.; CUNHA, C.M.; ZAMBON, A.C. Utilização do Modelo Orientado à Representação do Pensamento Humano (MORPH) no estabelecimento do Índice de Sensibilidade Fluvial (ISF): uma proposta de contribuição à Classificação da Sensibilidade Ambiental ao Óleo. **Pesquisas em Geociências**, v. 42, n. 1, p. 25-44, 2015.
- CUNHA, P.R.C.; GONZAGA, F.G.; COUTINHO, L.F.C.; FEIJÓ, F.J. Bacia do Amazonas. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, v. 8, p. 47-55, 1994.
- CUNHA, P.R.C.; MELO, J.H.G.; SILVA, O.B. Bacia do Amazonas. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, v. 15, p. 227-251, 2007.
- EIRAS, J.F.; BECKER, C.R.; SOUZA, E.M.; GONZAGA, F.G.; SILVA, J.G.F.; DANIEL, L.M.F.; MATSUDA, N.S.; FEIJÓ, F.J. Bacia do Solimões. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 8, n. 1, p. 17-45, 1954.
- FERREIRA, M.F.; BEAUMORD, A.C. Mapeamento da sensibilidade ambiental à derrames de óleo nos cursos de água da bacia do Rio Canhanduba, Itajaí, SC. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v. 12, n. 2, p. 61-72, 2008.
- FIGUEIREDO, G.C. **Exatidão posicional e temática de imagens orbitais**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, p. 1-87, 2007.
- FONSECA, L.M.G. **Processamento digital de imagens**. São José dos Campos. 2000. 105p. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- GONÇALVES, F.D.; MARTINS, P.W.; MIRANDA, F.P.; PARADELLA, W.R. Técnicas automáticas para geração de mapas de índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo na Baía de Guajará, Belém-Pa. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 58, n. 3, p. 255-262, 2006.
- HAYES, J.A.; RIKER, J.B.; INGRAM, K.M. Countertransference behavior and management in brief counseling: A field study. **Psychotherapy Research**, v. 7, p. 145-153, 1997.
- JENSEN, J.R.; HALLS, N.J.; MICHEL, J. A system approach to environmental sensitivity index (ESI) mapping for oil spill contingency planning and response. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 64, n. 10, p. 1003-1014, 1998.
- JUNK, W.J. Investigation of the ecology and production-biology of the "floating meadows" Paspalo- Echinochloetum on the Midler Amazon. II. **The aquatic fauna in the root zone floating vegetation**, v. 4, n. 1, p. 9-112, 1973.
- JUNK, W.J.; PIEDADE, M.T.F. Plant life in the floodplain with special reference to herbaceous plants. In: Junk, W. J. (ed.): **The Central-Amazonian Floodplain: Ecology of a pulsing System**. **Ecological Studies**, v. 126, p. 147-186, 1997.
- KLEMME, H.D. Petroleum basins - classification and characteristics. **Journal of Petroleum Geology, Beaconsfield**, v. 3, n. 2, p. 187-207, 1980.
- LOPES, C.F.; MILANELLI, J.C.C.; POFFO, I.R.F. Ambientes costeiros contaminados por óleo. Procedimentos de limpeza: manual de orientação. In: **Ambientes costeiros contaminados por óleo. Procedimentos de limpeza: manual de orientação**. Secretaria de Estado do Meio Ambiente, p. 1-120, 2007.
- M.M.A - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, BRASIL. **Especificações e normas técnicas para elaboração de cartas de sensibilidade ambiental para derramamentos de óleo**. Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental, Gerência de Qualidade Costeira do Ar. Brasília, DF, p. 1-107, 2007.
- MATSUDA, N.S.; WINTER, W.R.; WANDERLEY FILHO, J.R.; CACELA, A.S.M. (2010) O Paleozoico da borda sul da Bacia do Amazonas, Rio Tapajós - Estado do Pará. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 18, 123-152.
- MERTES, L.A.K.; DUNNE, T.; MARTINELLI, L.A. Channel Floodplain Geomorphology along the Solimoes Amazon River, Brazil. **Geological Society of America Bulletin**, v. 108, n. 9, p. 1189 - 1107, 1996.
- MILANELLI, J.C.C.; LOPES, C.F. **Recuperação de praias atingidas por derrames de óleo: procedimentos emergenciais adotados pela CETESB**. In: Semana Nacional de Oceanografia: oceanografia e sociedade - um desafio à teoria e prática, p. 83, (2001).
- NOAA - NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. Environmental sensitivity index guidelines, Version 3.0 NOAA Technical Memorandum. **Seattle: Hazardous Materials Response and Assessment Division**, p. 1-89, 2002.
- RADAMBRASIL. Projeto. **Folha SA. 21-SANTARÉM: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra**. Departamento Nacional de Produção Mineral - Levantamento de Recursos Naturais, Rio de Janeiro, v. 10, p. 1-522, 1976.
- RODRIGUES, S.W.P.; SOUZA-FILHO, P.W.M. Mapping of environmental sensitivity index to oil spill from Landsat tm images: a study case on the amazon coastal plain. **Revista Brasileira de Geofísica (Impresso)**, v. 30, p. 533-544, 2012.
- SILVA, I.R.; NASCIMENTO, H.M.; REBOUÇAS, R.C. Avaliação da Sensibilidade Ambiental das Praias Localizadas no Arquipélago Tinharé/Boipeba, Litoral Sul do Estado da Bahia. **Geociências (São Paulo)**, v. 28, n. 2, p. 193-201, 2009.

- SIPPEL, S.J.; HAMILTON, S.K.; MELACK, J.M. Inundation area and morphometry of lakes on the Amazon River floodplain, Brazil. *Archiv für Hydrobiologie*, v. 123, p. 385-400, 1992.
- SOUZA-FILHO, P.W.M.; GONCALVES, F.D.; RODRIGUES, S.W.P.; COSTA, F.R.; MIRANDA, F.P. Multi sensor data fusion for geomorphological and environmental sensitivity index mapping in the Amazonian mangrove coast, Brazil. *Journal of Coastal Research*, v. 56, p. 1592-1596, 2009a.
- SOUZA-FILHO, P.W.M.; PROST, M.T.R.C.; MIRANDA, F.P.; SALES, M.E.C.; BORGES, H.V.; COSTA, F.R.; ALMEIDA, E.F.; NASCIMENTO, J.R.W.R. Environmental sensitivity index (ESI) mapping of oil spill in the Amazon coastal zone: The Piatam MAr Project. *Revista Brasileira de Geofísica (Impresso)*, v. 27, p.7-22, 2009b.
- TOU, J.T. & GONZALEZ, R.C. Pattern recognition principles, Addison. **Reading, MA**, p. 1-395, 1974.
- WALLY, M.K. **Índice de Sensibilidade ao Óleo em Ambientes Fluviais Aplicado a Região do Pólo Petroquímico de Triunfo e do Delta do Jacui**. Dissertação (Mestrado) - Programa De Pós-Graduação Em Oceanografia Física, Química e Geológica, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, p. 1-93, 2015.

Submetido em 23 de julho de 2020

Aceito para publicação em 20 de janeiro de 2020