

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

Caracterização de Exsudações de Hidrocarbonetos na Sub-bacia de Tucano Norte  
através de Imagens Espectrais

**NAYARA ALVES COELHO DA SILVA**

Orientador: Prof. Dr. Vinicius Hector Abud Louro

**Monografia do Trabalho de Formatura  
(TF-2021/35)**

**SÃO PAULO  
2021**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIA**

Caracterização de Exsudações de Hidrocarbonetos na Sub-bacia de Tucano Norte  
através de Imagens Espectrais

**NAYARA ALVES COELHO DA SILVA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Instituto de Geociências da Universidade de São  
Paulo, para obtenção do título de graduação, sob  
orientação do Prof. Titular Dr. Vinicius Hector  
Abud Louro.

Área de Concentração: Sensoriamento  
Remoto

**SÃO PAULO**  
**2021**

## RESUMO

Exsudações são fluidos enriquecidos em hidrocarbonetos que escapam naturalmente de uma fonte em subsuperfície. Essas exsudações ao entrarem em contato com os estratos superiores provocam alterações mineralógicas no solo e principalmente na vegetação, na qual alterações fisiológicas podem provocar, em casos acentuados, a sua morte local. Tais alterações decorrem da maior disponibilidade de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S e ácidos orgânicos produzidos pela oxidação microbiana de hidrocarbonetos nos solos e da diminuição da concentração de O<sub>2</sub> em superfície. A Bacia de Tucano Norte, no nordeste brasileiro, compreende dois *plays* exploratórios, Cretácio Inferior e Brotas pertencentes ao Sistema Santa Brígida-Sergi, que possuem expectativas de descoberta de hidrocarbonetos, como petróleo leve e gás natural. Dessa forma, este trabalho buscou reconhecer e caracterizar possíveis anomalias produzidas por exsudações de hidrocarbonetos na região de estudo. Esta investigação ocorreu mediante o processamento e análises de imagens multiespectrais de satélites. A metodologia empregada consistiu no pré-processamento de imagens produzidas através dos sensores remotos ópticos, como MSI/Sentinel-2, OLI/Landsat-8 e MUX/CBERS-4-A; e na aplicação de técnicas para classificação espectral de anomalias geobotânicas e no solo, como o índice de vegetação NDVI, Classificação Supervisionada e *Principal Component Analysis* (PCA). As análises espectrais de pixels sobre a qualidade da vegetação se mostraram eficientes e possibilitaram classificar as áreas mais e menos comprometidas por estresse na vegetação, bem como localizar possíveis regiões com exsudações de hidrocarbonetos. Os resultados obtidos das análises do solo se mostraram favoráveis para ocorrência de alterações mineralógicas, tanto para argilominerais quanto para reconhecimento do efeito de descoloração dos solos ferruginosos, típicos de regiões submetidas a exsudações por hidrocarbonetos.

**Palavras chaves:** Exsudações de Hidrocarbonetos, Bacia de Tucano Norte, NDVI, Classificação Supervisionada.

## ABSTRACT

Seepages are hydrocarbon-enriched fluids that naturally escape from a subsurface source. These seepages, when in contact with the upper strata, cause mineralogical changes in the soil and especially in the vegetation, in which physiological changes can cause, in severe cases, their local death. Such alterations result from the greater availability of CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S and organic acids produced by the microbial oxidation of hydrocarbons in the soil and the decrease in the O<sub>2</sub> concentration on the surface. The Tucano Norte Basin, in northeastern Brazil, comprises two exploratory plays, Cretácio Inferior and Brotas belonging to the Santa Brígida-Sergi System, which are expected to discover hydrocarbons, such as light oil and natural gas. Thus, this work sought to recognize and characterize possible anomalies produced by hydrocarbon seepages in the study region. This investigation took place through the processing and analysis of multispectral satellite images.

The methodology used consisted in the pre-processing of images produced through optical remote sensors, such as MSI/Sentinel-2, OLI/Landsat-8 and MUX/CBERS-4-A; and in the application of techniques for spectral classification of geobotanical and soil anomalies, such as the NDVI vegetation index, Supervised Classification and Principal Component Analysis (PCA). The spectral analysis of pixels on the quality of the vegetation proved to be efficient and made it possible to classify the area's most and least compromised by vegetation stress, as well as to locate possible regions with hydrocarbon exudations. The results obtained from the soil analyzes were favorable for the occurrence of mineralogical alterations, both for clay minerals and for the recognition of the discoloration effect of ferruginous soils, typical of regions subjected to exudations by hydrocarbons.

**Keywords:** Hydrocarbon seepages, Tucano Norte Basin, NDVI, Supervised Classification.

## SUMÁRIO

3.	INTRODUÇÃO .....	8
4.	JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS .....	9
5.	CONTEXTO GEOLÓGICO .....	9
8.1.	Sub-Bacia de Tucano Norte.....	11
8.2.	Vegetação da Bacia de Tucano Norte .....	15
	MATERIAIS E MÉTODOS .....	17
9.1.	Exsudações De Hidrocarbonetos.....	17
9.2.	Alterações Induzidas por Hidrocarbonetos .....	19
9.3.	Imagens e Técnicas.....	21
9.4.	Processamento das Imagens .....	23
10.	RESULTADOS OBTIDOS .....	27
10.1.	NDVI.....	27
10.2.	Classificação Supervisionada .....	31
10.3.	Resultados da Análise de Componentes Principais .....	34
11.	INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	38
12.	CONCLUSÕES .....	41
13.	REFERÊNCIAS .....	43

## 1. LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Figura de localização e disposição das bacias.....	10
Figura 2: Unidades geológicas aflorantes na área. ....	14
Figura 3: Bacia efetiva de Tucano Norte com indicação das chances de descobertas e localização do <i>play</i> efetivo Brotas da Bacia de Tucano Norte (extraído de EPE, 2019).	15
Figura 4: Vegetações existentes na Bacia de Tucano Norte. ....	16
Figura 5: Representação esquemática dos conceitos de macroexsudações (englobam os termos <i>macroseepage</i> e <i>miniseepage</i> ) e microexsudações ( <i>microseepage</i> ). A presença de fraturas e microfraturas permite que os gases sejam exsudados para a superfície, seja como fontes pontuais ou difusas (Asadzadeh e Souza Filho, 2017).....	18
Figura 6: Características típicas de refletância espectral para grama verde saudável e solo seco descoberto para o intervalo de comprimento de onda de 250 - 2.500 (Jensen, 2015). ....	24
Figura 7: Valores característicos de NDVI para alguns alvos. O NDVI é funcionalmente equivalente e é uma transformação não linear da razão simples (Jensen, 2015). ....	24
Figura 8: Apresenta um problema básico na classificação de reconhecimento, quando um pixel está associado erroneamente a uma classe. As áreas cinza e preta representam os possíveis erros de classificação (Jensen, 2015). ....	26
Figura 9: Imagem NDVI apresentada em falsa cor e calculada a partir das cenas do satélite LANDSAT-8, ambas do dia 06/02/2021. Observa-se a existência de uma variação entre as duas cenas, por isso foram gerados dois histogramas.....	28
Figura 10: Imagem NDVI apresentada em falsa cor e calculada a partir das cenas obtidas do satélite SENTINEL-2 para as datas de 29/07/2021 (cena principal) e 12/06/2021 (cenas complementares). Nota-se através do contorno vermelho no mapa uma ampla região onde a biomassa é pouco desenvolvida (ou ausente) e mais debilitada. ....	29
Figura 11: Cálculo do NDVI para as imagens do satélite CBERS-4A utilizando imagens da câmera multiespectral (MUX). Apenas a cena a noroeste da bacia foi obtida pelo satélite na data de 05/10/2021 e as demais cenas foram realizadas no da data de 10/10/2021, todas representam o período de seca.....	30
Figura 12: Classificação supervisionada com utilização do método da Mínima Distância. Resultados em falsa cor. ....	31
Figura 13: (A e B): Partes do Rio São Francisco fora dos limites da bacia utilizadas para treinamento; (C e D): Pequenos lagos existentes no interior da bacia que foram reconhecidos após a classificação.....	33
Figura 14: Alguns locais identificados com prováveis exsudações de hidrocarbonetos. ....	34
Figura 15: Comportamento espectral da alunita (azul), ilita (vermelho) e caulinita (verde)...	35

Figura 16: Resultado da PCA em escala de cinza (esquerda) e em composição RGB (direita). A composição RGB exibe a PC2 em azul, a PC3 em vermelho e a PC4 em verde. ....	36
Figura 17: Resultado da composição RGB em maior detalhe para área de maior exposição de solo. A composição RGB exibe a PC2 em azul, a PC3 em vermelho e a PC4 em verde. ....	36
Figura 18: Comportamento espectral dos minerais de hematita (vermelho), goetita (verde), limoita (azul), pirita (ciano) e siderita (rosa). ....	37
Figura 19: Resultado da composição RGB para análise dos minerais de ferro. A composição RGB exibe a PC1 em vermelho, a PC2 em azul e a PC3 em verde.....	37

## 2. LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resoluções das bandas multiespectrais do sensor OLI/Landsat-8 e do MSI/Sentinel-2. Informações extraídas no site da USGS e da ESA Copernicus, respectivamente. ....	22
Tabela 2: Resoluções das bandas multiespectrais do sensor MUX/CBERS-4A. Informações extraídas do banco de imagens do INPE. ....	23
Tabela 3: Classes de densidade vegetal e outras feições associadas. ....	27
Tabela 4: Alvos identificados após o a inserção dos valores de treinamento. ....	32
Tabela 5: Matriz de autovetores e correlação das Componentes Principais para análise dos argilominerais. ....	35
Tabela 6: Matriz de autovetores e correlação das Componentes Principais para análise dos minerais férricos. ....	37

### 3. INTRODUÇÃO

A contaminação por hidrocarbonetos é um problema ambiental comum em várias partes do mundo. Essa contaminação pode ocorrer tanto *onshore* quanto *offshore*. Entretanto, apesar de vazamentos de óleo acontecerem mais frequentemente em territórios continentais (Chakraborty, *et al.*, 2012), observa-se uma maior atenção pela mídia quando ocorrem em alto mar, tal como o derramamento de petróleo ao longo da costa brasileira em 2019 (Santos, 2019).

De acordo com Chakraborty *et al.* (2012), derramamentos podem acontecer em oleodutos danificados de linhas de serviços de petróleo e através de vazamentos em tanques de armazenamento subterrâneo. Isto coloca em perigo os sistemas ecológicos locais e regionais, cadeias alimentares e até áreas urbanas pelo risco de explosão. Por outro lado, também existem vazamentos naturais decorrentes de exsudações de hidrocarbonetos por atividades tectônicas (Van der Meer *et al.*, 2002). A migração desses fluídos está vinculada à pressão dos reservatórios que, por sua vez, está relacionada à pressão hidrostática e mudanças no estresse litosférico.

As exsudações que se manifestam em superfície, denominadas *seepages*, correspondem aos fluxos naturais, de migração vertical a subvertical, de gases enriquecidos em hidrocarbonetos (HC). Geralmente, esse fenômeno ocorre tanto em ambientes continentais quanto marinhos e, quando em concentrações anômalas, pode indicar a presença de reservatórios petrolíferos em subsuperfície. Pode ainda afetar a composição química e mineralógica dos solos, das rochas e da cobertura vegetal (Van der Meer *et al.*, 2002).

Várias técnicas podem ser utilizadas para a identificação e quantificação de hidrocarbonetos em solos contaminados, mas carregam desvantagens consideráveis como custo, tempo e amostragem de campo rigorosa. São exemplos análises químicas em amostras úmidas, desafiadoras para serem realizadas em larga escala (Dent e Young, 1981 *apud* Chakraborty, *et al.*, 2012); e métodos laboratoriais de cromatografia gasosa para quantificação de hidrocarbonetos de petróleo total (TPH), mas que carecem de portabilidade em campo (Forrester *et al.*, 2010).

Nesse cenário, de modo a facilitar a identificação de hidrocarbonetos aflorantes, ferramentas de sensoriamento remoto (SR) têm sido aplicadas para detecção de vazamentos e/ou exsudações marinhas ou terrestres (Lammoglia, 2010). Essa aplicação tem como finalidades a exploração petrolífera e o monitoramento ambiental, pois permitem obter informações de áreas extensas em um período relativamente curto e a baixo custo operacional. Entretanto, exsudações *onshore* se mostram mais complexas porque se baseiam em evidências indiretas da presença de hidrocarbonetos, tais como alterações mineralógicas

e geobotânicas, resultantes da interação dos mesmos com a coluna estratigráfica (Lammoglia, 2010).

A Bacia de Tucano Norte é uma área que vem sendo avaliada quanto ao seu potencial petrolífero. Babinski *et al.* (1993) e Lammoglia *et al.* (2007) mencionam a ocorrência de exsudações de hidrocarbonetos por geoquímica e sensoriamento remoto, tanto em escala regional como em escala de detalhe (Almeida Filho, 2001; Lammoglia *et al.*, 2007). Essas ocorrências são justificadas pela presença de dois *plays* exploratórios na bacia, Cretáceo Inferior e Brotas, com possibilidade de descoberta de hidrocarbonetos provenientes do petróleo leve e gás natural (EPE, 2019).

#### **4. JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS**

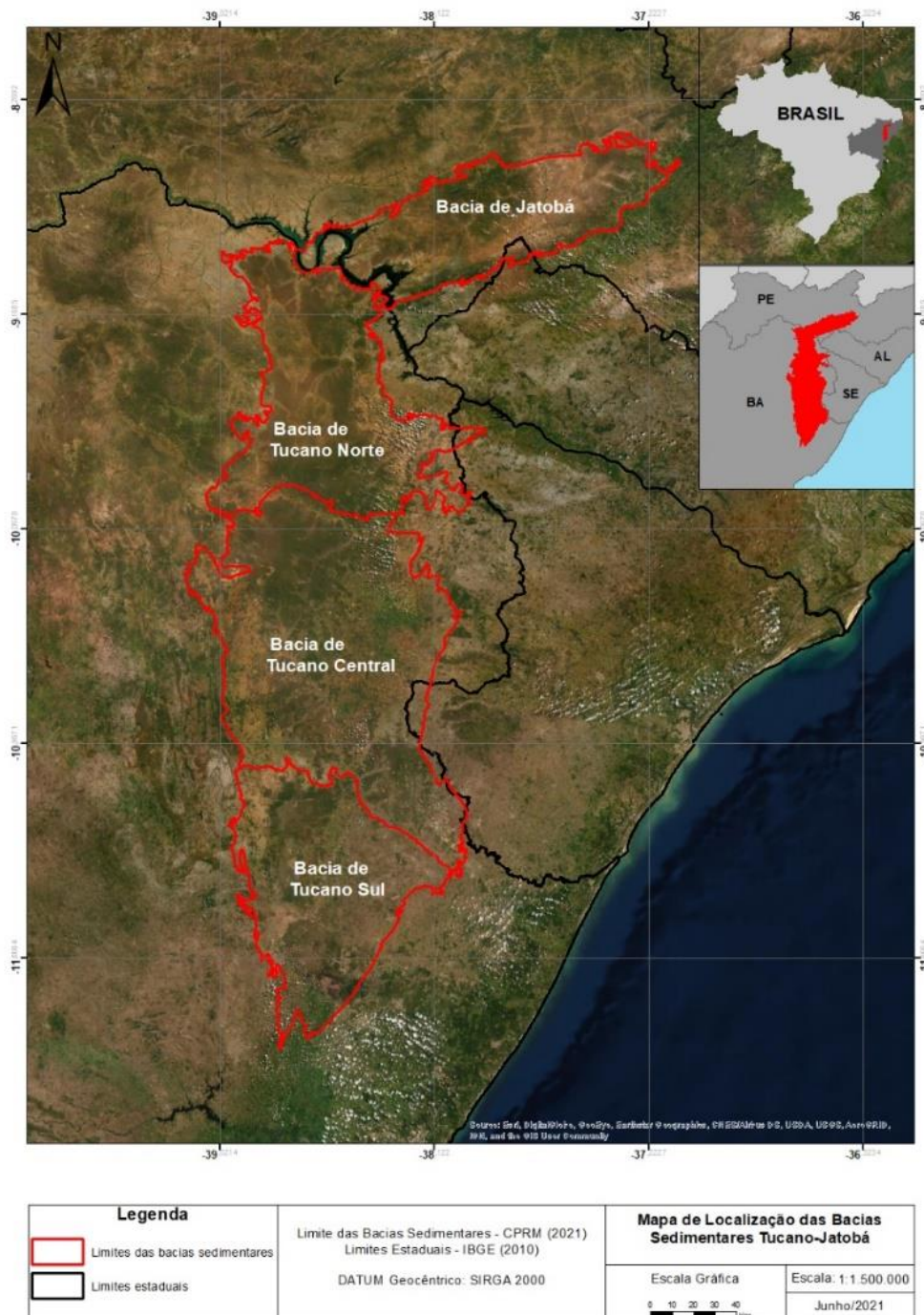
O sensoriamento remoto possui grande potencial para o fornecimento de informações detalhadas sobre as propriedades físico-químicas dos materiais presentes na superfície imageada. Dentre as informações passíveis de extração, incluem-se a composição química/bioquímica, grau de cristalinidade e morfologia dos materiais. Van der Meer *et al.* (2002), Souza Filho *et al.* (2008), Lammoglia (2010), entre outros, indicam uma notável capacidade do SR para a detecção de exsudações em áreas *onshore*, principalmente para as feições secundárias desenvolvidas pela interação dos HCs e os sedimentos situados acima.

Considerando a possibilidade de ocorrência de HCs derivados de petróleo leve e gás natural na Bacia de Tucano Norte, este trabalho apresenta possíveis áreas submetidas a contaminações por HCs causadas por exsudações. O estudo se baseia no reconhecimento em imagens espectrais das modificações mineralógicas e principalmente geobotânicas, geradas a partir dos fenômenos de macro e micro exsudações. Para tal, foi realizado o processamento de imagens multiespectrais para avaliações sazonais da reflectância de anomalias.

#### **5. CONTEXTO GEOLÓGICO**

As bacias de Tucano e Jatobá, nos estados da Bahia, Sergipe e Pernambuco, constituem o sistema de Rift do Recôncavo-Tucano-Jatobá. Estas bacias recobrem uma área de aproximadamente 45.000 km<sup>2</sup>, alongando-se na direção N-S entre a cidade de Salvador até o estado de Pernambuco (Figura 1). A Bacia de Tucano, de acordo com Caixeta *et al.* (1994), subdivide-se nas Sub-Bacias Norte, Central e Sul. Por associação litoestratigráfica e estrutural, considera-se as sub-bacias Central e Sul como pertencentes ao mesmo conjunto de análise. Por sua vez, a Sub-Bacia Tucano Norte, objeto de estudo deste trabalho, pode ser somada à Bacia Jatobá para fins de interpretação

Esse conjunto de bacias está relacionado geneticamente ao processo de rifteamento que afetou o Gondwana durante o Eocretáceo, constituindo uma série de grábens alongados nas direções N-S e NE-SW (Vasconcelos, 2003). De acordo com Magnavita (1990), o Riftte Recôncavo-Tucano-Jatobá se desenvolveu durante a separação da Placa Sul-Americana da Africana, ao longo dos estágios iniciais da abertura do paleocontinente. Atualmente, o rift atravessa um complexo mosaico de terrenos pré-cambrianos e paleozóicos pertencentes às províncias Borborema e do São Francisco, que coincide com o Cráton São Francisco.



**Figura 1:** Figura de localização e disposição das bacias.

## 8.1. Sub-Bacia de Tucano Norte

A Sub-bacia Tucano Norte localiza-se entre a Sub-Bacia Tucano Central e Bacia Jatobá, limitada a sul pela passagem do Rio Vaza Barris e a norte pela passagem do Rio São Francisco. Esta sub-bacia possui uma área de aproximadamente 8.800,00 km<sup>2</sup>, com uma orientação principal N-S. Além do embasamento cristalino de idade Proterozoica, a estratigrafia da bacia pode ser dividida em cinco tectonosequências principais:

- a) Supersequência Paleozoica, correspondente a fase sinéclise, com sedimentos depositados em clima árido, sobre um contexto de bacia intracratônica e transição de sedimentação marinha rasa, bacias evaporativas e sistemas lacustres (Aguiar e Mato, 1990; Durval, 2017). Na Bacia de Tucano Norte, o registro paleozoico é composto pelas formações Taracatu, Inajá, Curitiba e Santa Brígida descritas a seguir:
  - Formação Taracatu: Composta por arenitos de coloração cinza esbranquiçado a róseo avermelhado, de granulometria média com níveis conglomeráticos e arcósios conglomeráticos depositados em ambiente fluvial entrelaçado (Ghignone, 1979, *apud* Durval, 2017). Apresentam estratificação cruzada acanalada, plano paralela, cruzada tabular e cruzada festonada (Rocha e Leite, 1999, *apud* Durval, 2017).
  - Formação Inajá: Formada por arenitos finos a grossos com estratificação cruzada acanalada, de coloração variando de róseo a avermelhado com presença de óxido de ferro intercalados com siltitos ricos em micas com registro fossilífero. A Formação Inajá foi depositada em ambiente marinho de plataforma rasa (Rocha e Leite, 1999, *apud* Durval, 2017).
  - Formação Curitiba: Constitui-se por arenitos, calcários e varvitos (Magnavita, 2003, *apud* Durval, 2017). Alguns aspectos indicam que nesta formação ocorreram atividades glaciais evidenciadas por estrias em pavimentos de arenitos e pela presença de varves.
  - Formação Santa Brígida: Esta formação é subdividida pelos membros Caldeirão e Ingá compostos, respectivamente, por siltitos e arcósios grossos e finos de ambiente eólico, e por arenitos quartzosos, siltitos calcíferos, folhelhos verdes e dolomitos de coloração cinza escuro a preta, com presença de matéria orgânica, depositados em ambiente transicional a marinho raso durante o Permiano, Siluriano/Devoniano e Carbonífero (Costa, 2007, *apud* Durval, 2017).
- b) Supersequência Pré-Rift, considerada como uma bacia intracratônica desenvolvida no início da ruptura do supercontinente Gondwana e formação do Oceano Atlântico (Milani, 1985; Durval, 2017). É caracterizada por grandes ciclos fluvio-eólicos

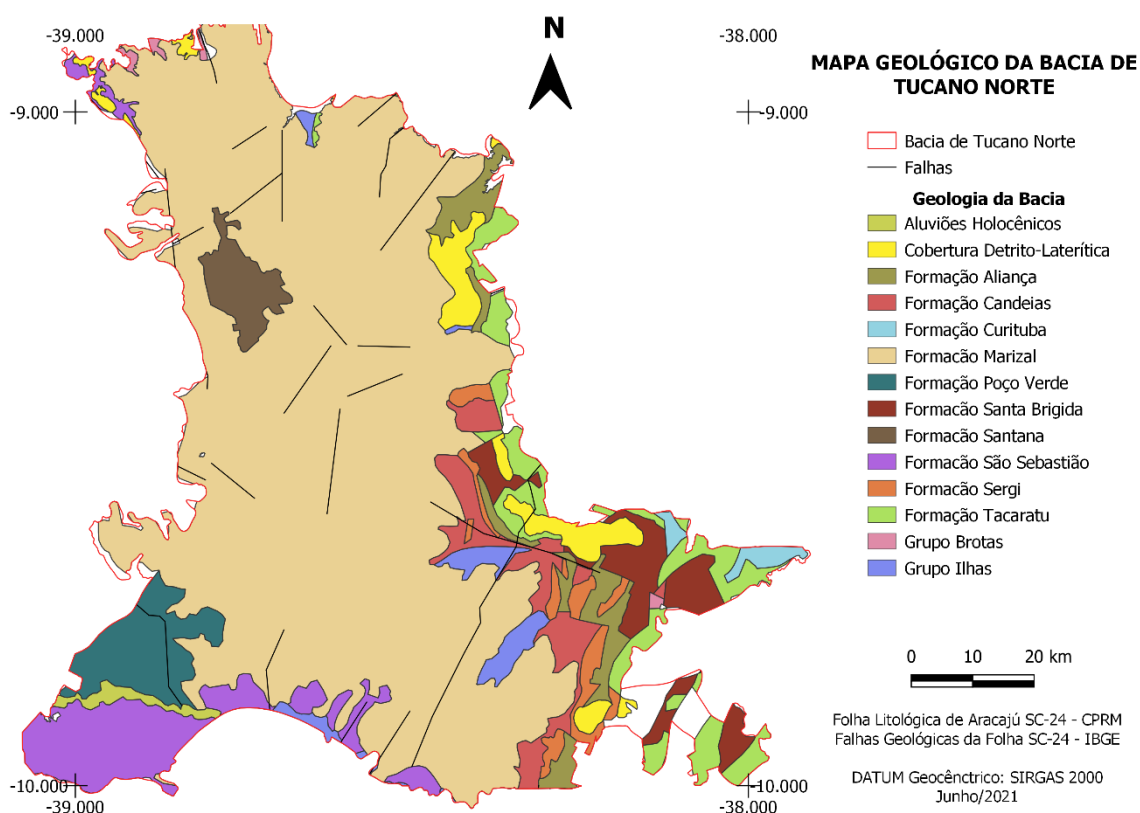
gerados durante os períodos Jurássico e Cretáceo. Esta supersequência é representada, da base para o topo, por:

- Formação Aliança: Pertence ao Grupo Brotas, o qual se desenvolveu no início do rifteamento. Esta formação, segundo Aguiar e Mato (1990, *apud* Durval, 2017), é subdividida em três membros denominados, Afligidos, Boipeba e Capianga. O membro Boipeba é caracterizado por arenitos, finos à médios, com coloração cinza-esbranquiçada, marrom, vermelho amarelado, às vezes micáceos, de composição arcoseana. Neste membro, os feldspatos apresentam-se esbranquiçados com matriz argilosa e quartzo-arenito grossos, depositados em um sistema fluvial entrelaçado com retrabalhamento eólico. Sobreposto ao membro anterior, está o Membro Capianga, composto por folhelhos avermelhados, cinza esbranquiçados, com porções esverdeadas, de característica quebradiça, micácea, apresentando intercalações de calcário microcristalino, evidenciando uma deposição de ambiente lacustre. O membro Afligidos, elevado posteriormente à hierarquia de formação, ocorre discordantemente sobre a Formação Aliança.
- Formação Sergi: Assim como a Formação Aliança, a Formação Sergi também pertence ao Grupo Brotas. De acordo com Viana (1971, *apud* Durval, 2017), essa formação neojurássica é composta essencialmente por arenitos mal selecionados, variando de finos a conglomeráticos, de coloração cinza esverdeado, pardo-amarelado e avermelhado. Apresenta interdigitações, de folhelhos, siltitos vermelhos, conglomerados argilosos, com pouco feldspato e micas, raramente caulinizados. Conta com a presença de marcas de ondas e estratificação cruzada, além de bimodalidade granulométrica bem-marcadas nos arenitos. Foi depositada por sistema fluvial entrelaçado com posterior retrabalhamento eólico (Caixeta, 1994 *apud* Durval, 2017).
- Formação Candeias: Conforme Durval (2017), a Formação Candeias está inserida no Grupo Santo Amaro de idade Eocretácea e é formada por folhelhos, siltitos cinza-esverdeados típica de ambiente redutor e arenitos turbidíticos. A Formação Candeias foi resultado de um clima mais úmido, de intensificação da atividade tectônica e estruturação da bacia em áreas plataformais pouco subsidentes. Apresenta os membros Tauá e Gomo, com o primeiro compondo a parte basal e constituído por folhelhos cinza escuros. O membro Gomo representa o topo desta formação, com folhelhos cinza-esverdeados, intercalados com biocalcarenitos, calcilitos e arenito turbidítico, revelando um sistema lacustre de lago profundo.

- c) Supersequência Sin-Rift, representa o estágio de ruptura crustal que iniciou a transgressão regional (Caixeta *et al.*, 1994; Durval, 2017) e sobrepôs os folhelhos lacustres e arenitos eólicos no decorrer do Cretáceo.
- Formação São Sebastião: Durval (2017) indica que essa formação apresenta um litotipo com características texturais e estruturais semelhantes às dos litotipos do Grupo Ilhas. Da base para o topo ocorrem, arenitos finos a grossos, intercalados com siltitos e folhelhos, sotopostos a arenitos de coloração rosada, mal selecionados e de granulação grossa, apresentando interestratificação de folhelhos, siltitos e calcários nodulares impuros, depositados por sistemas fluviais do Barresiano ao Eoaptiano. A porção superior caracteriza um amplo domínio de arenitos amarelados e avermelhados, quartzosos, mal selecionados e texturalmente impuros, com predomínio de fácies fluviais (Aragão, 1994, *apud* Durval, 2017). O Membro Paciência é composto por arenitos finos a grossos e folhelhos pretos. O Membro Passagem dos Teixeiras é formado por arenitos finos a médios e folhelhos cinza. O Membro Joanes é composto por arenitos finos e argilas avermelhadas.
  - Formação Poço Verde: A Formação Poço Verde pertence ao Grupo Massaracá e é constituída por folhelhos e calcários. No entanto, possui pouco conhecimento geológico e quase não é citada na literatura.
- d) Supersequência Pós-Rift, que reúne sedimentos depositados em ambientes flúvio-lacustres relacionados a um contexto de subsidência térmica. Durante um intervalo que se iniciou no Aptiano e teve seu término no Albiano inferior (Lima, 2018).
- Formação Marizal: Segundo Caixeta (1994, *apud* Durval, 2017) apresenta predominantemente arenitos grossos com estratificação cruzada de médio e grande porte, tabulares e acanaladas, com intercalação de conglomerados, apresentando uma matriz arenosa média a grossa, com gradação inversa e normal, depositado em feições com forma de canal, podendo ocorrer localmente, folhelhos, siltitos e calcários. A porção pelítica revela folhelhos de coloração variegada, siltícos ou pouco calcíferos. As colorações dos folhelhos são cinza, róseo e esverdeado, são micáceos, argilosos e calcíferos, os calcários são cinza a cinza-amarelado, com porções cristalinas e argilosas. Devido a sua idade Neoalagoana (Neo-Aptiano), a Formação Marizal tem a sua deposição associada a sistemas aluviais desenvolvidos no contexto de uma subsidência termal, da fase pós-rifte (Da Silva, 1993 *apud* Durval, 2017); e a erosão dos altos tectônicos originando os leques aluviais no final das atividades tafrogênicas.
  - Formação Crato: Essa formação pertence ao atual Grupo Santana (antiga Formação Santana). Segundo Durval (2017), é constituída litologicamente por

calcilutitos laminados, fossilíferos, de coloração creme a cinza claro, intercalados por arenitos muito finos a finos, siltitos e folhelhos. Estruturalmente, apresenta estratificações plano-paralelas, estruturas de escorregamento (*slump*), ondulações, fluidificação e bioturbações. O ambiente de origem desta formação é essencialmente lacustre com contribuições flúvio-deltaicas e em climas de condições áridas.

Em alguns domínios da Bacia de Tucano Norte, ocorrem também as coberturas detrítico-lateríticas desenvolvidas durante o Tércio-Quaternário, além dos depósitos aluvionares localizado ao longo das principais drenagens. A Figura 2 apresenta as principais unidades sedimentares aflorantes na Bacia de Tucano Norte.



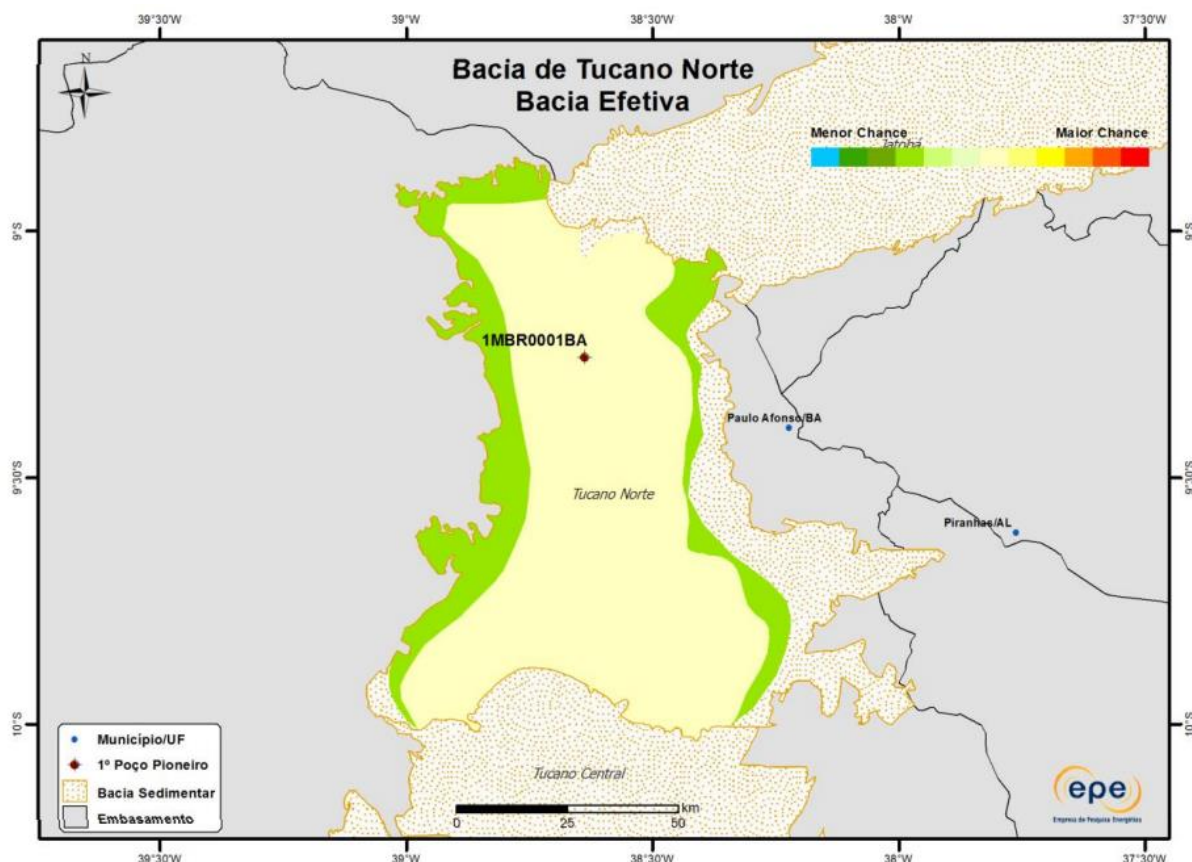
**Figura 2:** Unidades geológicas aflorantes na área.

De acordo com o Zoneamento Nacional de Recursos de Óleo e Gás (EPE, 2019), a sub-bacia de Tucano Norte possui dois *plays* exploratórios, Cretáceo Inferior e Brotas, pertencentes ao sistema Santa Brígida-Sergi, considerado o principal sistema petrolífero da bacia. A carga ou rocha geradora é atribuída aos folhelhos do membro Ingá (Fm. Santa Brígida) e aos folhelhos da Fm. Candeias. Os reservatórios são representados por arenitos das formações Tacaratu, Inajá, Curitiba, Santa Brígida, Aliança e Sergi, de idades

paleozóicas e jurássicas; e pelos arenitos dos Grupos Santo Amaro, Ilhas e Massacará, pertencentes ao Cretáceo Inferior. O sistema de trapas é formado pelos folhelhos dos Grupos Santo Amaro, Ilhas, Jatobá e Brotas.

Tanto o *play* Cretáceo Inferior quanto o Brotas apresentam baixas expectativas de descoberta de hidrocarbonetos e, caso ocorra uma descoberta, possui maior possibilidade de ocorrência de petróleo leve e gás natural. A região central da bacia apresenta maiores chances para a descoberta de hidrocarbonetos quando comparada às regiões periféricas (Figura 3).

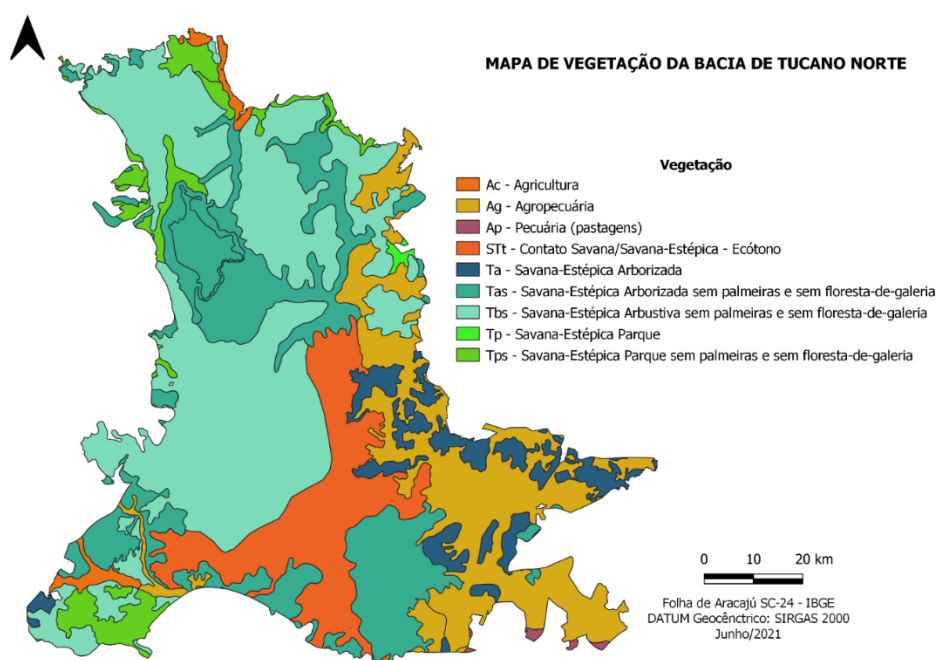
Segundo Porsani *et al.* (2008), a Bacia de Tucano Norte sofreu, no Cretáceo Inferior, em curto intervalo de tempo, uma subsidência veloz e de grande magnitude, em termos de profundidade atingida. Este fato determinou a deposição de um alto volume de arenitos em relação às rochas argilosas. Os estratos do lado leste, onde a subsidência é menor e mais lenta, possuem menor razão arenito/folhelho do que do lado oeste. Entretanto, a razão areia/folhelho também aumenta da base para o topo.



**Figura 3:** Bacia efetiva de Tucano Norte com indicação das chances de descobertas e localização do *play* efetivo Brotas da Bacia de Tucano Norte (extraído de EPE, 2019).

## 8.2. Vegetação da Bacia de Tucano Norte

Toda a bacia de Tucano Norte está inserida no bioma da Caatinga, onde predomina a fisionomia Savana-Estépica, típica de áreas áridas nordestinas interplanálticas arrasadas (sertão). Esta fisionomia é empregada para designar tipologias vegetais campestres, em geral, com estrato lenhoso decidual e espinhoso. O clima nessas regiões é frequentemente marcado por dois períodos secos anuais, um longo seguido de chuvas intermitentes, e outro curto, que pode passar a torrencialmente chuvoso, mas com chuvas inconstantes, chegando a faltar por anos (IBGE, 2012). Na bacia de Tucano Norte ocorrem as variações Savana Estépica Arborizada e Savana Estépica Parque, além do contato entre savana e savana estépica (Figura 4).



**Figura 4:** Vegetações existentes na Bacia de Tucano Norte (extraído de IBGE, 2012).

A Savana Estépica Arborizada é formada por um estrato arbustivo-arbóreo superior, esparso, com predominância de nanofanerófitas (plantas pequenas e lenhosas), periodicamente decíduas (perdem suas folhas em certas estações do ano), mais ou menos adensadas por troncos grossos profusamente esgalhados e espinhosos ou aculeados. Esse fenótipo pode ser formado por outro estrato, inferior gramíneo lenhoso de relevante importância fitofisionômica. As plantas comumente encontradas na Savana Estépica Arborizada são destacadas pelas espécies *Spondias tuberosa* Arruda (Umbuzeiro), *Commiphora leptophloeos* (Mart.) J. B. Gillett (Imburana do Sertão), *Cnidoscolus quercifolius* Pohl (Faveleira), *Aspidosperma pyrifolium* Mart. (Pereiro), além de várias espécies do gênero *Mimosa* (IBGE, 2012).

O subgrupo da Savana Estépica Parque apresenta características fisionômicas muito típicas, com arbustos e pequenas árvores frequentemente mesma espécie, e distribuição bastante espaçada, como se plantados. Afigura-se com uma pseudo-ordenação de plantas

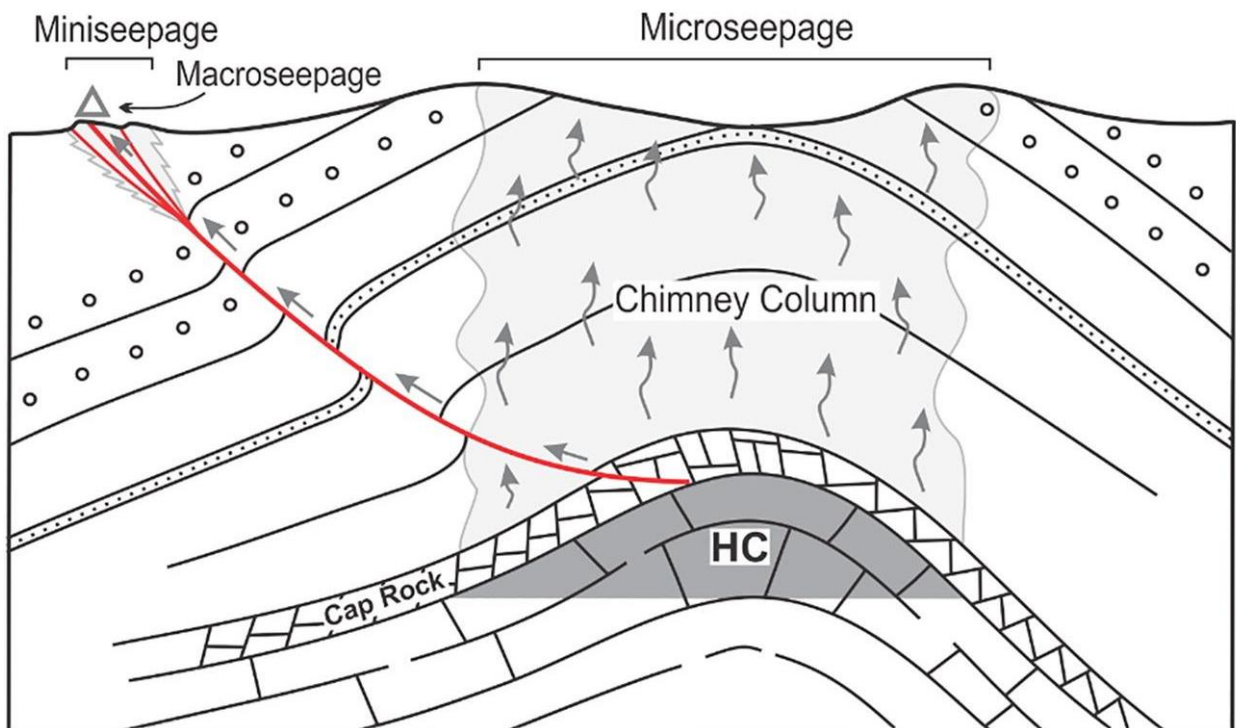
lenhosas sobre um denso tapete, principalmente, de plantas herbáceas e gramíneas. As espécies de plantas que dominam na região são: *Mimosa acutistipula* (Jurema Preta), *Auxemma oncocalyx* (Pau Branco do Sertão), *Auxemma oncocalyx* (Mofumbo) e *Aspidosperma pyrifolium* (Pereiro) (IBGE, 2012).

O contato ecótono existente na região centro-sudeste da bacia representa uma mistura florística entre os dois tipos de vegetação, savana e savana estépica, com estruturas fisionômicas semelhantes e por consequência se tornam difícil de separar ou identificar. Isto ocorre porque os elementos que se misturam são indivíduos isolados e dispersos, formando conjuntos geralmente muito homogêneos ou uniformes (IBGE, 2012). Há também uma área muito significativa da bacia com intensa utilização antrópica, onde a cobertura original foi substituída para dar lugar às atividades da agricultura, agropecuária e pecuária, as quais são caracterizadas por maior presença do solo exposto.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### 9.1. Exsudações de Hidrocarbonetos

Exsudação é o termo utilizado na geologia do petróleo para designar fluídos enriquecidos em hidrocarbonetos que escapam naturalmente de fontes em subsuperfície (Etiope, 2015). Os fluxos são controlados preferencialmente pela permeabilidade das rochas acima do reservatório e descontinuidades tectônicas como falhas, fraturas e juntas (Meer *et al.*, 2002). As exsudações gasosas que se movem através dos estratos são controladas por pelo menos três mecanismos: (1) efusão, devido principalmente ao diferencial de alta pressão que existe no reservatório; (2) difusão de gases, normalmente dissolvidos em água e que migram verticalmente por rochas porosas; (3) movimentação vertical de hidrocarbonetos de baixo peso molecular dissolvidos na água (Meer *et al.*, 2002). Existem duas categorias de exsudações, as macroexsudações (ou *macro-seeps*) e as microexsudações (ou *microseepages*) (Figura 5).



**Figura 5:** Representação esquemática dos conceitos de macroexsudações (englobam os termos *macroseepage* e *miniseepage*) e microexsudações (*microseepage*). A presença de fraturas e microfaturas permite que os gases sejam exsudados para a superfície, seja como fontes pontuais ou difusas (Asadzadeh e Souza Filho, 2017).

As macroexsudações são fluxos visíveis em superfície de hidrocarbonetos provenientes de uma fonte de vazamento, tipicamente relacionada a discontinuidades tectônicas (Etiópe, 2015). Esses fluxos podem ser focalizados (*macroseepage*) ou difusos (*miniseepages*). Os fluxos focalizados, por sua vez, também são subcategorizados em: (1) exsudações gasosas (*gas seeps*), que são manifestações fluídas emitidas apenas na fase gasosa; (2) macroexsudações na forma de óleo (*oil seeps*), frequentemente acompanhadas por uma fase gasosa, especialmente quando óleo e gás coexistem dentro de um reservatório; (3) exsudações gasosas provenientes de fontes de água doce e aquíferos subterrâneos rasos (*gas-bearing springs*), como gases dissolvidos originados por processos microbianos; e (4) vulcões de lama (*mud volcanoes*), que são estruturas geológicas de morfologia cônica produzidas sobre falhas pela ressurgência de sedimentos fluidizados por gás e água, representando a maior expressão superficial da migração de hidrocarbonetos à superfície em bacias petrolíferas. As macroexsudações que ocorrem como fluxos difusos (*miniseepage*) são exalações invisíveis de gás ao redor das zonas visíveis por onde o gás exala. Trata-se de uma espécie de halo que envolve os fluxos canalizados (Etiópe, 2015).

As microexsudações são fluxos difusos, lentos e invisíveis de hidrocarbonetos leves que exalam dos reservatórios petrolíferos e atingem a superfície (Etiópe, 2015). O vazamento a longo prazo de hidrocarbonetos neste sistema provoca uma série transformações físico-químicas e mineralógicas na coluna estratigráfica pela qual percorre (Asadzadeh e Souza Filho, 2017).

## 9.2. Alterações Induzidas por Hidrocarbonetos

As associações de mudanças mineralógicas ocasionadas por exsudações de HCs são conhecidas desde os primórdios da exploração petrolífera. Áreas exploradas evidenciam uma correlação de áreas produtivas com infiltrações, manchas de parafina, águas salinas ou sulfurosas, mineralizações em superfície e altos topográficos (Schumacher, 1996). Atualmente, os vazamentos de HCs, por macro ou microexsudações, podem criar zonas de oxidação-redução próximo à superfície no longo prazo, favorecendo o desenvolvimento de diversas mudanças químicas e mineralógicas (Meer *et al.*, 2002).

Um dos efeitos da presença de HC é indireto e consiste na sua biodegradação por organismos aeróbicos e anaeróbicos. A migração ascendente de moléculas de HCs faz com que ocupem espaços oxigenados nos poros dos solos próximos à superfície. Nestas zonas, bactérias aeróbicas e fungos oxidam seletivamente as parafinas (Jobson *et al.*, 1978 *apud* Oliveira, 1998) e quebram preferencialmente as fracas ligações de carbono, produzindo água e dióxido de carbono. O dióxido de carbono gerado pela biodegradação aeróbica, se combina com a água para formar ácido carbônico e o oxigênio consumido pelos organismos aeróbicos cria um ambiente conveniente para a redução anaeróbica de sulfatos (Oliveira, 1998).

Mudanças mineralógicas e geobotânicas em zonas com ocorrência de microexsudações apresentam assinaturas específicas caracterizadas por carbonatos, descoloração de camadas avermelhadas (*Bleached red beds*), alteração argilominerais e anomalias geobotânicas.

### 9.2.1. Carbonatos

Carbonatos diagenéticos e cimentos de carbonatos representam uma das alterações mais comuns induzidas por exsudações de hidrocarbonetos. São formados próximos à superfície, principalmente como subproduto da oxidação do petróleo, particularmente do metano. O dióxido de carbono reage com a água e produz bicarbonato, que por sua vez, liga-se ao cálcio e ao magnésio das águas subterrâneas e precipita-se como carbonato (principalmente calcita de preenchimento). Esse CO<sub>2</sub> apresenta assinatura isotópica correspondente à dos hidrocarbonetos (Schumacher, 1996).

### 9.2.2. Descoloração de camadas avermelhadas (*Bleached red beds*)

Trata-se de uma manifestação em superfície de sedimentos ferruginosos. Esses sedimentos são tipicamente avermelhados e sofrem descoloração (*bleaching*), em

decorrência da presença de fluídos ácidos ou redutores responsáveis pela remoção do óxido de ferro (hematita) (Schumacher, 1996). Tais condições favorecem a formação de pirita e siderita a partir do ferro liberado durante a dissolução da hematita. Os possíveis agentes redutores responsáveis pela descoloração, bem como a formação de um ambiente redutor acima das acumulações de petróleo, incluem os HCs e os produtos de sua oxidação, como sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S) e CO<sub>2</sub> (Schumacher, 1996).

### 9.2.3. Alteração com produção de argilominerais

A produção de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S e ácidos orgânicos é resultado da oxidação microbiana de hidrocarbonetos em solos e sedimentos próximos à superfície. Esse processo pode criar condições redutoras e ligeiramente ácidas que promovem o intemperismo diagenético de feldspatos, produzindo argilas, e podem levar a conversão de argilas ilíticas normalmente estáveis em caulinita. As argilas formadas permanecem quimicamente estáveis, a menos que seu ambiente seja alterado (Schumacher, 1996).

### 9.2.4. Anomalias Geobotânicas

A contaminação do solo por HCs e compostos associados pode provocar alterações fisiológicas na vegetação. A microexsudação de HCs cria uma zona quimicamente redutora na coluna estratigráfica em profundidades mais rasas. Estimula a atividade de bactérias oxidantes de HCs e, conseqüentemente, a diminuição da concentração de oxigênio no solo enquanto aumenta a concentração de CO<sub>2</sub> e ácidos orgânicos. Essas alterações podem afetar o pH e o Eh dos solos, além da solubilidade dos oligoelementos e suas disponibilidades para a vegetação local (Schumacher, 1996; Van der Meer, 2002). As interações da vegetação em locais com exsudações indicam que HCs em concentrações muito altas são tóxicos para a vegetação, causando degradação mesmo em baixas concentrações (Augusto, 2006).

Os fatores mais importantes que influenciam o desenvolvimento da vegetação são: disponibilidade de oxigênio, concentração de CO<sub>2</sub>, disponibilidade de metais pesados e diminuição do potencial da porosidade dos solos devido à cimentação carbonática (Flower *et al.* 1981 *apud* Oliveira, 1998). Os principais efeitos nas plantas em solos ricos em HCs e compostos associados, de acordo com Lammoglia, *et al.* (2013), são: falta de vegetação, principalmente aquela fotossinteticamente ativa (vegetação verde); variações na densidade da flora; presença de plantas indicadoras; variações na arquitetura do dossel; e mudanças morfológicas nas espécies. Ainda segundo os autores, esses efeitos, somados ou não, influenciam na resposta espectral da vegetação, principalmente quando relacionada ao pigmento da clorofila (na região espectral do visível), a estrutura celular da planta (região do

infravermelho próximo – NIR), e ao conteúdo de água foliar (no infravermelho de ondas curtas – SWIR). As variações espaciais de padrões de vegetação, levando em consideração a fonte central de HC e halos circulares ao seu redor, também podem ser usadas para detectar infiltrações de HC (Noomen *et al.*, 2012 *apud* Lammoglia, 2013).

### **9.3. Imagens e Técnicas**

O estudo para a caracterização de exsudações de hidrocarbonetos na Bacia de Tucano Norte foi realizado através de imagens de satélite multiespectrais que compreendam toda a sua área de ocorrência, isto é, 8.148,316 km<sup>2</sup>. Desse modo, foram adotadas duas etapas para o desenvolvimento do projeto. A primeira corresponde ao pré-processamento de imagens, que consiste na pesquisa das cenas mais atuais e adequadas a fim de limitar a interferência de alvos indesejados, tal como a presença de uma alta quantidade de nuvens. A segunda etapa envolve o processamento das imagens selecionadas, que possui como principal meta a caracterização da vegetação, uma vez que estas se apresentam mais sensíveis aos efeitos de exsudações. Para tanto, serão aplicadas as técnicas de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), Análise de Componentes Principais (PCA) e Classificação Supervisionada utilizando as plataformas QGis 3.20.2 e ENVI 5.3.

#### **9.3.1. Imagens Sentinel-2B**

As imagens Sentinel-2B foram extraídas de forma gratuita no site *EarthExplorer* ([www.earthexplorer.usgs.gov](http://www.earthexplorer.usgs.gov)), pertencente ao Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) em parceria com a Agência Espacial Europeia (ESA). As imagens disponibilizadas no são classificadas como dados Level 1-C, ou seja, possuem pré-processamento com correções radiométrica TOA (*Top of Atmosphere*) e geométrica. O satélite Sentinel-2B foi lançado em 2017 e leva a bordo o sensor multiespectral MSI, com 13 bandas espectrais com resolução de 10 metros para as bandas do visível e do infravermelho (Tabela 1). A resolução temporal do satélite, tempo de revista que o sensor leva para passar no mesmo ponto, é de 5 dias próximo ao Equador e de 2-3 dias em médias latitudes. Para contemplar toda área de estudo foram adquiridas cinco cenas, três de 29/07/2021 e duas de 17/06/2021, ambas correspondem ao período de estiagem. Apenas uma destas imagens de 29/07/2021 abrange aproximadamente 80% da bacia, enquanto as demais complementam as áreas adjacentes.

### 9.3.2. Imagens Landsat-8

As imagens obtidas do satélite Landsat-8, que opera por meio do sensor OLI, se referem à Coleção 2 Nível 1 disponibilizadas também pelo site *EarthExplorer* da USGS. O tempo de revista do satélite ocorre a cada 16 dias. As cenas obtidas foram as mais recentes e com o menor percentual de nuvens possível com intuito de avaliar melhor os resultados. Dessa forma, obteve-se duas cenas do dia 06/02/2021 que correspondem ao período de chuva e compreendem a área parcialmente cada uma delas, mas juntas abrangem toda a bacia. Imagens Landsat-8 consistem em nove bandas espectrais com uma resolução de 30 metros para as bandas 1 a 7 e 9, a resolução da 8 (pancromática) é de 15 metros (Tabela 1).

**Tabela 1:** Resoluções das bandas multiespectrais do sensor OLI/Landsat-8 e do MSI/Sentinel-2. Informações extraídas no site da USGS e da ESA Copernicus, respectivamente.

Sentinel 2-B			Landsat-8		
Banda	Comprimento de Onda (nm)	Resolução Espacial	Banda	Comprimento de Onda (µm)	Resolução Espacial
1 - Aerosol	~ 443nm	60	1 - Aerossol	0,43 - 0,45	30
2 - Azul	~ 493nm	10	2 - Azul	0,45 - 0,51	30
3 - Verde	~ 560nm	10	3 - Verde	0,53 - 0,59	30
4 - Vermelho	~ 665nm	10	4 - Vermelho	0,64 - 0,67	30
5 - Red Edge 1	~ 704nm	20	5 - NIR	0,85 - 0,88	30
6 - Red Edge 2	~ 740nm	20	6 - SWIR 1	1,57 - 1,65	30
7 - Red Edge 3	~ 783nm	20	7 - SWIR 2	2,11 - 2,29	30
8a - Red Edge 4	~ 865nm	20	8 - Pancromática	0,50 - 0,68	15
8 - NIR	~ 833nm)	10	9 - Cirrus	1,36 - 1,38	30
9 - Vapor de água	~ 945nm	60			
10 - Cirrus	~ 1374nm	60			
11 - SWIR 1	~ 1610nm	20			
12 - SWIR 2	~ 2190nm	20			

### 9.3.3. Imagens CBERS-4A

O satélite CBERS-4A, assim como os anteriores, é equipado com câmeras para observação óptica, além disso, possui um sistema de coleta de dados e monitoramento ambiental e resolução temporal a cada 26 dias. As imagens desse satélite foram adquiridas no catálogo de imagens disponíveis no site do INPE para as datas de 05/10/2021 e 10/10/2021. Foi utilizada a câmera multiespectral (MUX) como o instrumento imageador, que apresenta as características indicadas na Tabela 2.

**Tabela 2:** Resoluções das bandas multiespectrais do sensor MUX/CBERS-4A. Informações extraídas do banco de imagens do INPE.

<b>CBERS-4A</b>		
<b>Banda</b>	<b>Comprimento de Onda (nm)</b>	<b>Resolução Espacial (m)</b>
5 - Azul	0,45 - 0,52 $\mu\text{m}$	16,5
6 - Verde	0,52 - 0,59 $\mu\text{m}$	16,5
7 - Vermelho	0,63 - 0,69 $\mu\text{m}$	16,5
8 - NIR	0,77 - 0,89 $\mu\text{m}$	16,5

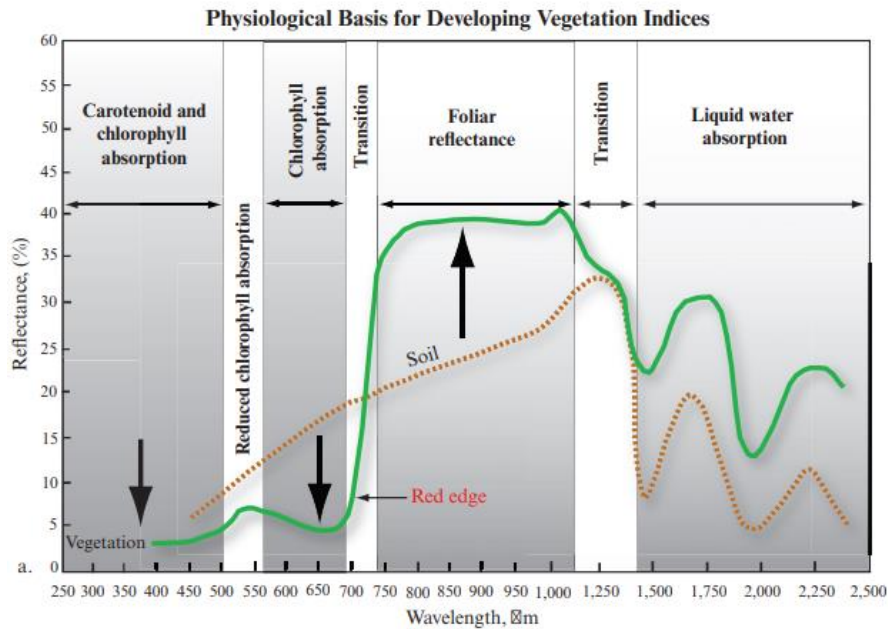
## **9.4. Processamento das Imagens**

### *9.4.1. Índice de Vegetação*

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é uma técnica muito utilizada para detectar não somente a presença de vegetação como também o estado biofísico em que se encontra. Esse índice utiliza a diferença de reflectância (em *pixels*) dos alvos entre o infravermelho próximo (NIR) e bandas do visível (VIS), geralmente, a do vermelho (RED) (Figura 6), dividido pela soma desses mesmos valores (eq. 1).

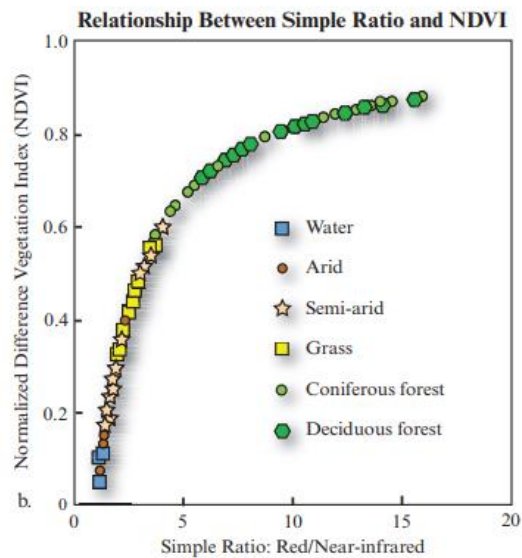
$$NDVI = \frac{(NIR) - (VIS)}{(NIR) + (VIS)} \quad (\text{eq. 1})$$

Essa divisão gera um índice que varia de -1 a 1 e normalizando os valores resultantes. Geralmente, a vegetação no NDVI aparece com valores maiores que 0,3, estando mais saudável e frondosa quanto mais próxima de 1. O solo exposto, sem vegetação ou com vegetação rala e esparsa, apresenta valores positivos, mas não muito elevados. A água, no entanto, por ter uma maior reflectância no espectro visível do que no infravermelho próximo, apresenta valores negativos, mais próximos a -1 no NDVI (Figura 7) (Jensen, 2015).



**Figura 6:** Características típicas de refletância espectral para grama verde saudável e solo seco descoberto para o intervalo de comprimento de onda de 250 - 2.500 nm (extraído de Jensen, 2015).

Segundo Ahmad *et al* (2017), o gás metano ( $\text{CH}_4$ ), geralmente encontrado em exsudações, possui característica de absorção na janela espectral das bandas dos satélites utilizados neste trabalho (0,4 - 2,5  $\mu\text{m}$ ). Dessa forma, o sensoriamento remoto pode detectar evidências indiretas de infiltração de hidrocarbonetos, como alterações botânicas que se desenvolvem devido à presença de hidrocarbonetos no solo. A oxidação bacteriana produtora de  $\text{CH}_4$  e a presença de  $\text{CO}_2$  esgotam o oxigênio do solo (Smith *et al.*, 2004 *apud* Ahmad *et al.*, 2017). Esse esgotamento, por sua vez, afetam a saúde da vegetação em diferentes escalas, considerando as necessidades de cada espécie, podendo culminar, em casos extremos, na morte de espécimes.



**Figura 7:** Valores característicos de NDVI para alguns alvos. O NDVI é funcionalmente equivalente e é uma transformação não linear da razão simples (Jensen, 2015).

#### 9.4.2. *Principal Component Analysis (PCA)*

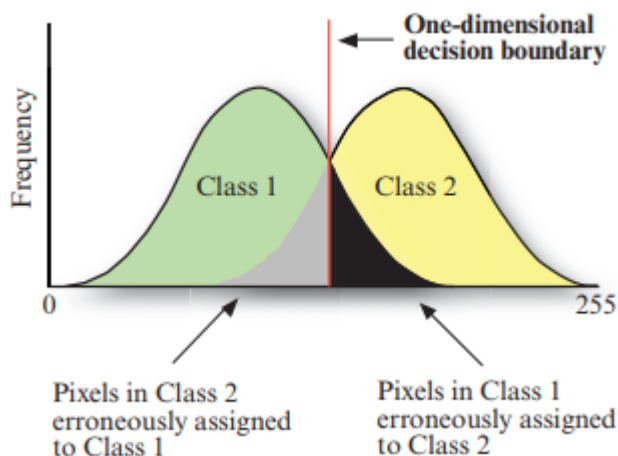
De acordo com Nóbrega (2007), as bandas espectrais originais, derivadas das imagens multiespectrais de sensoriamento remoto, possuem alta correlação decorrente da abundância de informações presente nas mesmas, o que pode demandar maior esforço computacional e resultados ineficientes de classificação. A análise de componentes principais (PCA), segundo Good *et al.* (2012, *apud* Jensen, 2015), é uma técnica estatística que transforma o conjunto de dados de sensoriamento remoto original (bandas) em um conjunto substancialmente menor e mais fácil de interpretar de variáveis não correlacionadas que representam a maioria das informações presentes no conjunto de dados original. Jensen (2015) informa que a capacidade de reduzir a dimensionalidade (ou seja, o número de bandas no conjunto de dados que devem ser analisados para produzir resultados utilizáveis) de N para apenas algumas bandas é uma consideração econômica importante, especialmente se a informação potencial que pode ser recuperada dos dados transformados é tão boa quanto os dados do sensor remoto original.

Dessa forma, mediante aos cálculos estatísticos de correlação e variância, a transformação do componente principal fornece um novo conjunto de bandas (componentes principais) que não estão correlacionadas. Além disso, cada componente tem variância menor do que o componente anterior. Portanto, este é um método eficiente de extração de informações e compactação de dados.

#### 9.4.3. *Classificação Supervisionada*

A Classificação Supervisionada é o processo iterativo e interativo de transformar as informações contínuas vindas das imagens de satélite em informações categóricas nos mapas temáticos. É supervisionada porque o usuário é responsável por indicar amostras ao algoritmo, de modo que o último possa categorizar áreas de assinaturas espectrais análogas. Primeiramente o analista especifica na imagem a região geográfica de interesse (ROI – *Region of Interest*) para cada classe, cuidadosamente definidas em um esquema de classificação. Em seguida, o algoritmo expande essa classificação de acordo com suas características de varredura e análise, respeitando os vínculos definidos pelo usuário que devem incluir limitações do sistema de sensor e ambientais.

A classificação supervisionada opera através de métodos de seleção de características para selecionar quantitativamente qual subconjunto de bandas fornece o maior grau de separação entre duas classes de dados. De acordo com Jensen (2015), o objetivo é aplicar uma técnica que forneça o mínimo de erro possível para evitar que um *pixel* seja atribuído a uma classe à qual não pertence ou não seja atribuído a sua classe apropriada (Figura 8).



**Figura 8:** Apresenta um problema básico na classificação de reconhecimento, quando um pixel está associado erroneamente a uma classe. As áreas cinza e preta representam os possíveis erros de classificação (Jensen, 2015).

Existem vários algoritmos de classificação supervisionada que podem ser usados para atribuir um *pixel* a uma das várias classes possíveis, como: Distância Mínima (*Minimum Distance*), Vizinhos Mais Próximos (*Nearest Neighbours*), Redes Neurais (*Neural Networks*) e Máxima Verossimilhança (*Maximum Likelihood*).

A regra de decisão de Máxima Verossimilhança é baseada na probabilidade e é considerada como paramétrica, por envolver parâmetros da distribuição gaussiana multivariada, como vetor, média e matriz. Ela atribui cada *pixel* com medidas padrão ou características  $X$  para a classe  $i$  cujas unidades são mais prováveis de ter dado origem ao vetor de característica  $X$  (Jensen, 2015). Em outras palavras, a probabilidade de um pixel pertencer a cada um de um conjunto predefinido de  $m$  classes é calculada e o pixel é então atribuído à classe para a qual a probabilidade é mais alta.

De acordo com Jensen (2015), a Distância Mínima requer que o usuário forneça os vetores médios para cada classe em cada faixa a partir dos dados de treinamento. Para realizar a classificação de distância mínima, o programa deve calcular a distância para cada vetor médio de cada *pixel* desconhecido por meio da distância euclidiana com base no teorema de Pitágoras ou medidas de distância. Nesse sentido, ao calcular a distância euclidiana de um ponto para a média de todas as classes, é possível determinar a distância mais curta e estabelecer para qual classe o ponto desconhecido irá se inserir.

Para extração de evidências de hidrocarbonetos será realizada a combinação da técnica NDVI em escala de cinza com a classificação supervisionada por meio do *plugin Semi-Automatic Classification* (SCP) instalado no QGIS. A classificação supervisionada aplicada à imagem em escala de cinza de NDVI, por áreas de treinamento escolhidas de pixels de tons

escuros, pois mostram valores de absorção de hidrocarbonetos entre (0,0519 a 0,0660), os quais estão muito próximos do valor mínimo de absorção de água (0,0207) no estudo realizado por Ahmad *et al* (2017) na região sul do Iraque.

## 10.RESULTADOS OBTIDOS

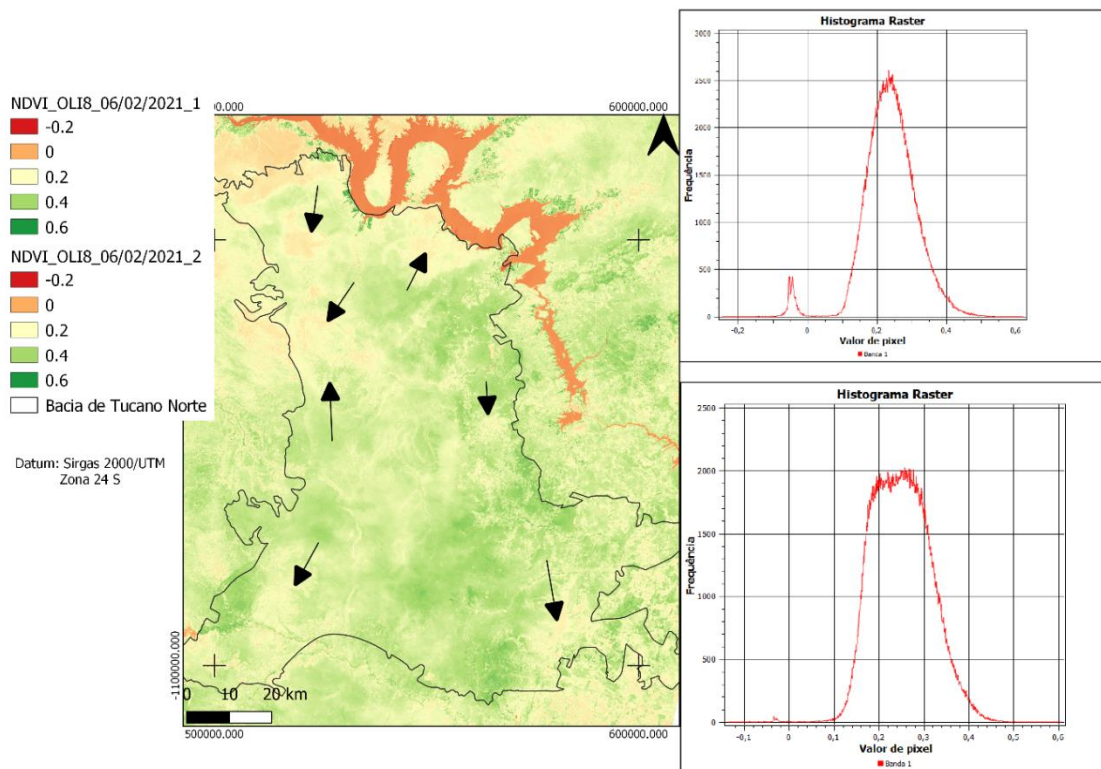
### 10.1. NDVI

Foi realizada a aplicação da técnica NDVI na Sub-Bacia de Tucano Norte para avaliar o comportamento da vegetação com base em imagens multiespectrais dos satélites Landsat-8 (NDVI<sub>OLI</sub>; Figura 9), Sentinel-2B (NDVI<sub>MSI</sub>; Figura 10) e Cbers 4A (NDVI<sub>MUX</sub>; Figura 11). A aplicação do NDVI associada à criação de cinco classes possibilitou o reconhecimento das principais feições existentes na bacia, conforme mostra a Tabela 3.

Vale ressaltar que, as classes foram determinadas por meio do reconhecimento prévio dos alvos nas imagens de satélite do *Google Earth* no ano de 2021; e as cenas utilizadas foram processadas individualmente e posteriormente integradas em uma única figura.

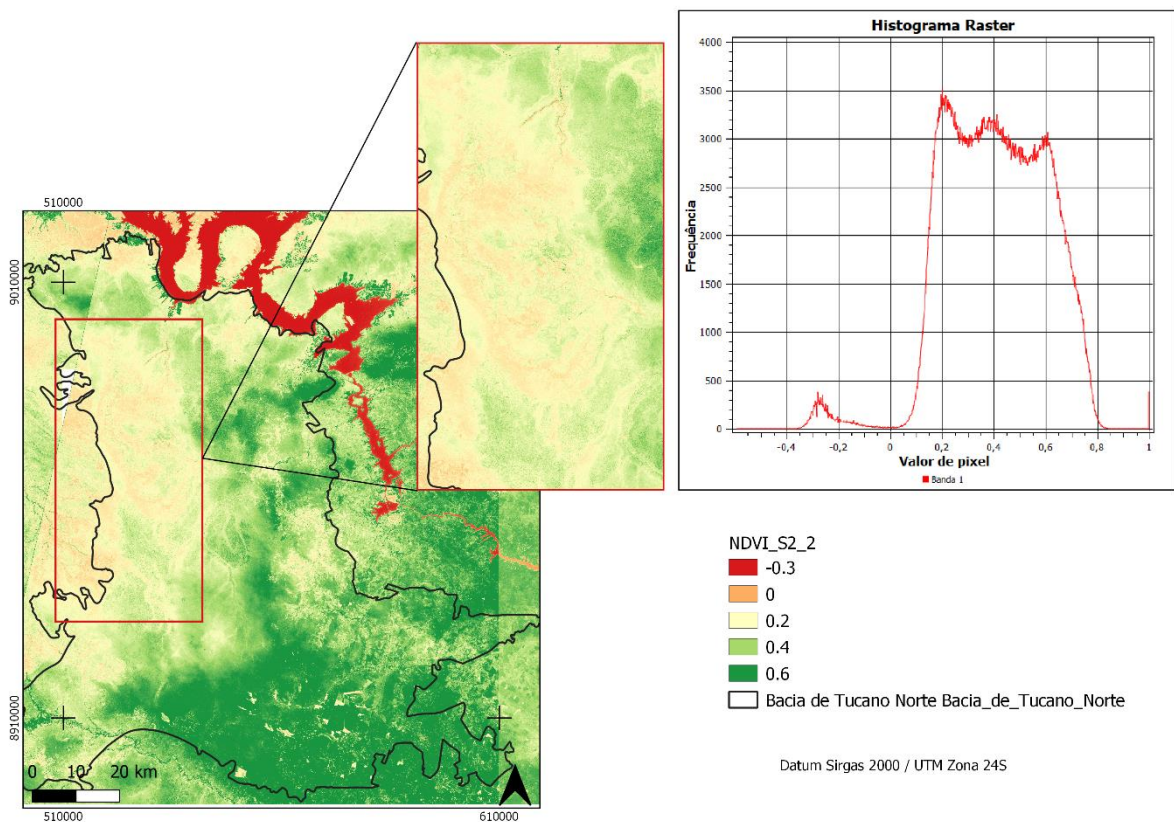
**Tabela 3:** Classes de densidade vegetal e outras feições associadas.

Valores NDVIs aproximados	Associação
-0,2 <	Sem vegetação / água
0	Vegetação muito rala ou ausente/ água / nuvens
0,2	Vegetação rala e presença de solo exposto
0,4	Vegetação arbustiva esparsa de pequeno porte e densidade moderada
> 0,6	Vegetação densa / sadia



**Figura 9:** Imagem NDVI apresentada em falsa cor e calculada a partir das cenas do satélite LANDSAT-8, ambas do dia 06/02/2021. Observa-se a existência de uma variação entre as duas cenas, por isso foram gerados dois histogramas. As setas indicam as regiões com vegetação debilitada.

A maior frequência dos resultados NDVI<sub>OLI</sub>, como visto nos histogramas, aparece entre 0.15 e 0.3 calculados a partir de duas cenas Landsat-8 produzidas durante o período de chuva. Esses valores sugerem que a vegetação se apresentava enfraquecida, esparsa e de densidade muito rala por toda a bacia para o período analisado. Além disso, a vegetação verdadeiramente saudável e densa (>0.6) é praticamente ausente. A exposição dos solos é notada por toda a bacia, com pequenos agrupamentos mais destacados que estão posicionados de forma aleatória. Salienta-se que não foram encontrados cursos d'água no interior da área avaliada e a maioria dos valores entre 0 e -0.2 correspondem ao Rio São Francisco.

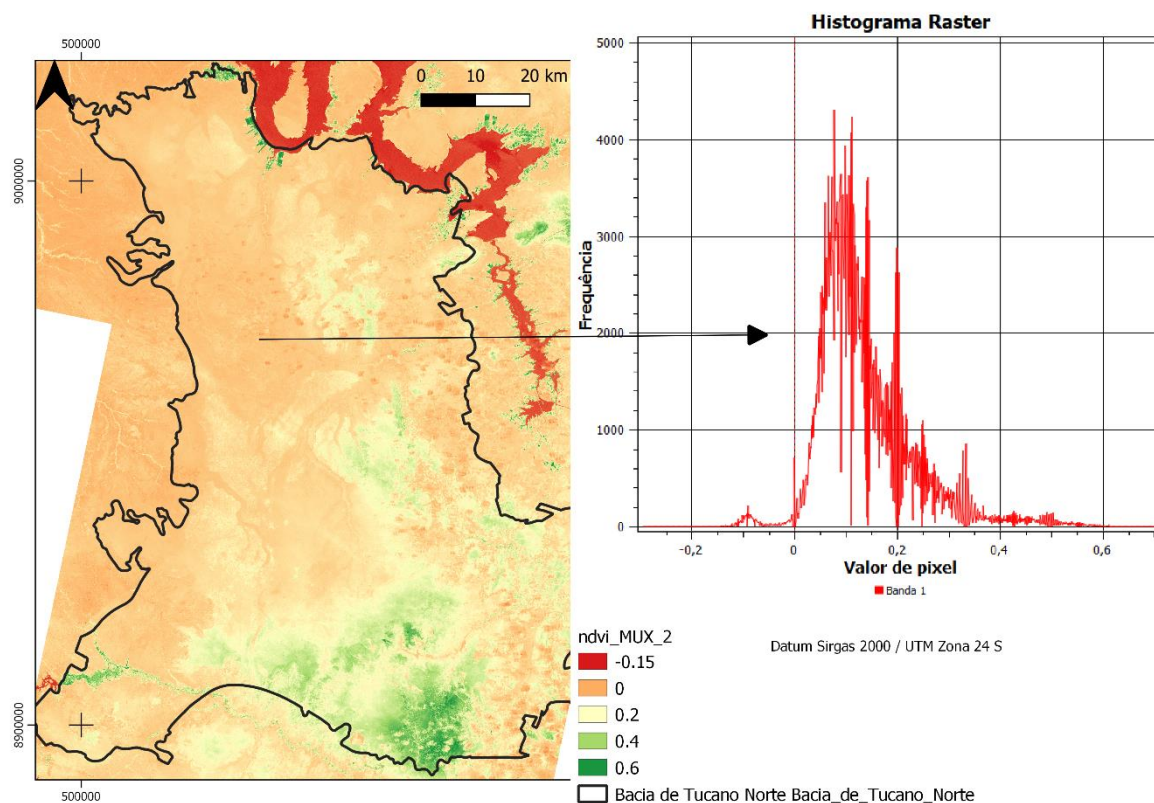


**Figura 10:** Imagem NDVI apresentada em falsa cor e calculada a partir das cenas obtidas do satélite SENTINEL-2 para as datas de 29/07/2021 (cena principal) e 12/06/2021 (cenas complementares). Nota-se através do contorno vermelho no mapa uma ampla região onde a biomassa é pouco desenvolvida (ou ausente) e mais debilitada.

O  $NDVI_{MSI}$  exibe uma vegetação mais vigorosa e um aumento da cobertura vegetal em período de estiagem, principalmente nas regiões sul e sudeste e em algumas porções centro-leste. O histograma calculado através da cena mais representativa para a bacia apresentou as maiores frequências de *pixels* entre 0.15 e 0.8. Possivelmente, essa melhora no vigor da vegetação foi ocasionada devido a mudança de sazonalidade, onde o período chuvoso anterior é refletido na vegetação que agora vigora no período de estiagem. No entanto, a vegetação mais debilitada, isto é, de baixa densidade, arbustiva e esparsa, é vista com maior destaque na parte centro-oeste, em contraste com o restante da bacia. A região oeste também é compreendida por maior quantidade de solo exposto. Não foram visualizados corpos d'água no interior da bacia, mas de acordo com o histograma, destaca-se que as águas do Rio São Francisco apresentaram maior frequência de pixels em torno de -0.3, o que pode indicar alguma alteração físico-químico após o período de chuva, quando comparado com o produto  $NDVI_{OLI}$ .

A partir da imagem CBERS e de seu histograma ( $NVDI_{MUX}$ ; Figura 11), é possível perceber baixa densidade da vegetação por quase toda a Bacia de Tucano Norte, bem como das áreas adjacentes, exceto em uma pequena área restrita situada ao sul, onde predomina uma pequena porção de vegetação densa. O  $NDVI_{MUX}$  para a cena mais representativa

apresentou valores entre -0,18 e 0,6, mas com maior frequência de *pixels* em 0,1, ou seja, confirmando a inexistência de vegetação e/ou vegetação muito rala. Neste caso, o elemento determinante que provocou o estresse e a morte da biomassa foi, provavelmente, a mudança de um período de estiagem para um período de seca por toda região nordeste do país, o que também pode ser comprovado pelas imediações da bacia.



**Figura 11:** Cálculo do NDVI para as imagens do satélite CBERS-4A utilizando imagens da câmera multiespectral (MUX). Apenas a cena a noroeste da bacia foi obtida pelo satélite na data de 05/10/2021 e as demais cenas foram realizadas no da data de 10/10/2021, todas representam o período de seca.

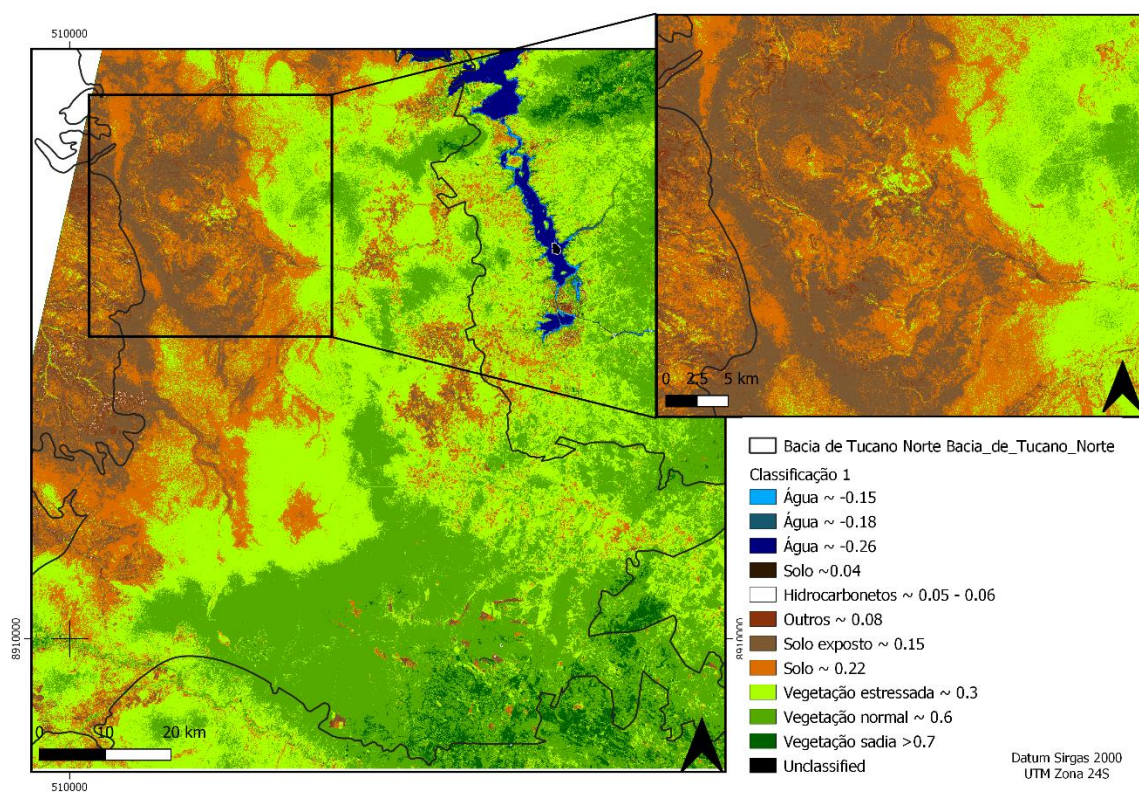
Com base nos resultados dos produtos NDVIs gerados, nota-se que a variação climática juntamente com os períodos chuvosos (NDVI<sub>OLI</sub>), de estiagem (NDVI<sub>MSI</sub>) e secos (NDVI<sub>MUX</sub>) no decorrer do ano, determinaram a qualidade da vegetação florescente nos meses seguintes. No período chuvoso é possível reconhecer que a vegetação é desenvolvida com um padrão irregular em várias partes da bacia, contendo arbustos de baixa densidade e porte pequeno. Em contrapartida, o período de estiagem, logo após a interrupção das chuvas, exibe uma vegetação mais densa e sadia localizada, principalmente, nas regiões sul e sudeste, e em algumas porções a centro-leste. Neste período também é observado a maior exposição do solo no domínio centro-oeste, podendo conter arbustos esparsos em alguns locais. Já no período seco, a bacia é compreendida quase exclusivamente por solo exposto e ausência de vegetação, exceto pela área sul que predomina vegetações mais resistentes às mudanças climáticas (vegetação perene).

Desse modo, a região centro oeste foi a área que mais apresentou baixa densidade de vegetação ou até mesmo, a completa ausência dela em todas as datas analisadas, independentemente da disponibilidade hídrica. Além disso, foi possível determinar, de forma clara, as regiões com presença de água no interior e fora da bacia. No interior são visualizados poucos cursos d'água e pequenas lagoas que são visíveis apenas com o aumento na escala da imagem; e fora dos limites avaliados é visualizado o trajeto do Rio São Francisco.

Apesar das imagens utilizadas serem provenientes de satélites diferentes (Landsat, Sentinel e CBERS) todas apresentaram os mesmos resultados dentro do propósito de interesse, o qual é a identificação dos alvos que informam sobre a qualidade da vegetação, ausência de vegetação, exposição do solo e presença de água.

## 10.2. Classificação Supervisionada

O NDVI<sub>MSI</sub>, gerado através das imagens Sentinel-2, foi escolhido para classificação supervisionada por sua maior variabilidade de pixels, melhor resolução espacial (10 metros) para as bandas utilizadas, e ainda, cobertura da área de interesse quando comparado aos demais satélites, o que facilita no momento da classificação. Dessa forma, a classificação supervisionada sobre o NDVI foi realizada por meio de onze classes de treinamento, as quais foram definidas de acordo com as características observáveis no *Google Earth*. A Figura 12 apresenta os resultados da classificação.



**Figura 12:** Classificação supervisionada com utilização do método da Mínima Distância. Resultados em falsa cor.

O método de classificação utilizado foi o da distância mínima, que usa medidas de distância euclidiana para aplicar aos pontos desconhecidos. Ao calcular a distância euclidiana a partir do ponto desconhecido para a média de todas as classes definidas (Tabela 3), é possível determinar qual a distância mais curta. As assinaturas espectrais dos alvos não foram geradas porque não há bandas separadas no produto NDVI utilizado para a classificação, assim como não foram gerados os valores estatísticos.

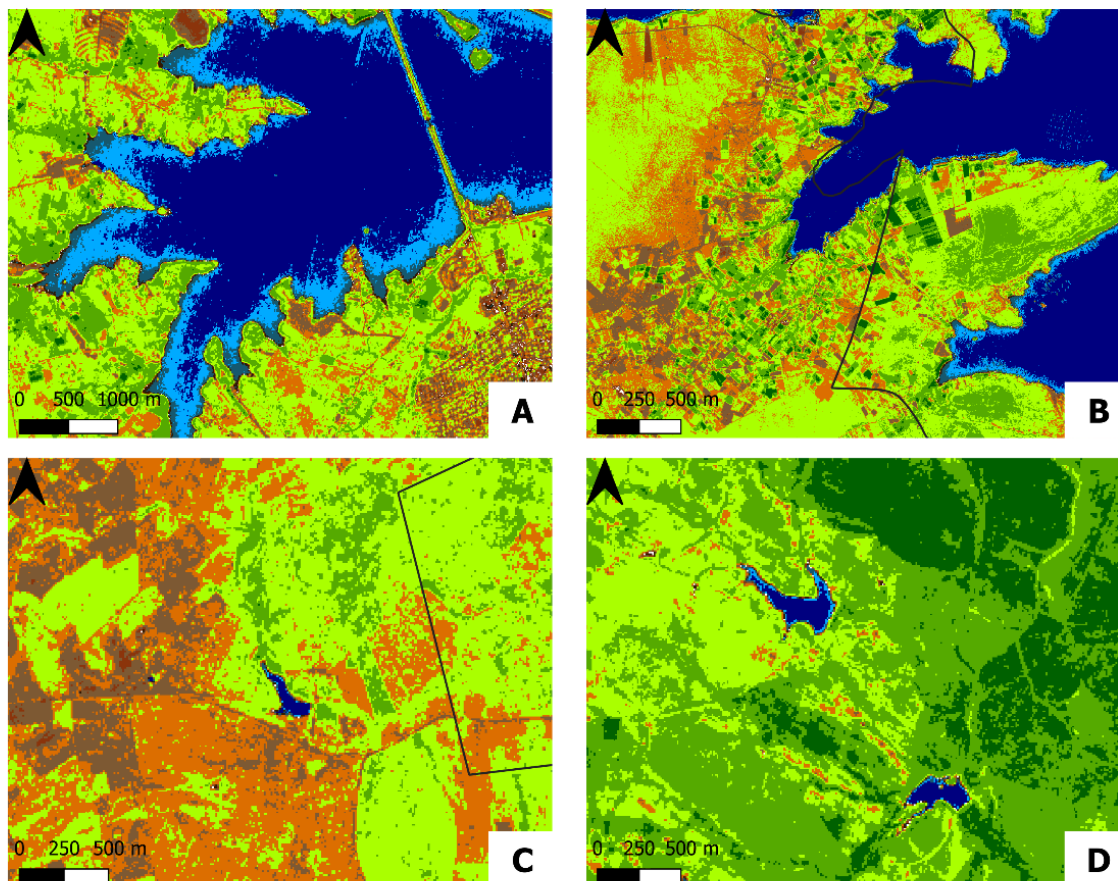
**Tabela 4:** Alvos identificados após o a inserção dos valores de treinamento.

<b>Classes</b>	<b>Subclasses</b>	<b>Valores de treinamento aproximados (em pixels)</b>
Água	Água nas margens do rio ou lagoa	~ -0,14
	Água na interface entre as águas das margens e as profundas.	~ -0,18
	Água nas zonas mais profundas	~ -0,26
Solo (?)	Material semelhante a solo	~ 0,04
Exsudações	Exsudações de hidrocarbonetos <sup>1</sup>	0,05 – 0,06
Solo	Material semelhante a solo (?)	~ 0,08
	Solo exposto sem nenhum tipo de vegetação; estradas de terra sem vegetação; construções	~ 0,15
	Solo parcialmente exposto, com presença de pequenos arbustos separados e/ou vegetação rasteira; e estradas sem pavimentação ou com vegetação rasteira	~ 0,22
Vegetação	Vegetação estressada compreendida por arbustos esparsos; estradas sem pavimentação recoberta de vegetação	~ 0,3
	Vegetação arbustiva de densidade normal	~ 0,6
	Vegetação sadia e alta densidade	> 0,7

<sup>1</sup> Intervalo estipulado com base em Ahmad *et al.* (2017).

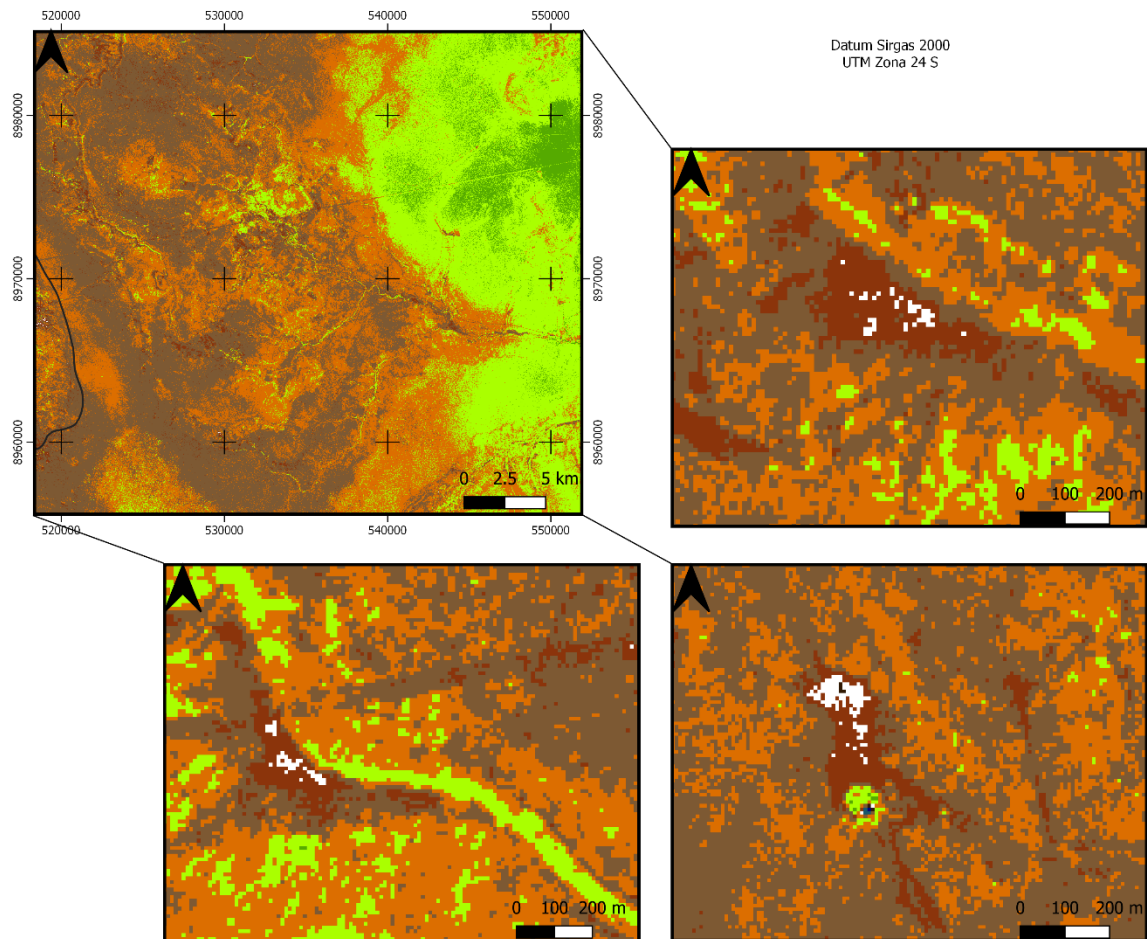
Quanto maiores as variâncias das amostras de treinamento indicadas ao programa, maior a possibilidade de o algoritmo enquadrar um pixel a uma dessas classes. A exemplo disso, temos a água em que exibe variações nos valores de pixels, isso pode ser ocasionado devido à profundidade, presença de solo abaixo da coluna de água, presença de sedimentos em suspensão, matéria orgânica dissolvida, clorofila e presença de fitoplânctons que realizam fotossíntese, e que irão influenciar na maneira que a energia é refletida (Fig. 13). Da mesma forma, ocorre com o solo, o qual apresenta variações em razão de suas características, como a textura, umidade, quantidade de matéria orgânica e óxido de ferro presentes, entre outros. No caso da vegetação, a variação nos valores é gerada porque a bacia compreende grande

diversidade vegetativa, onde as plantas mais saudáveis estão situadas ao sul da área, ocorrendo uma transição na porção central para plantas de qualidade e densidade moderada, e por fim, a porção centro-oeste abrange plantas de crescimento debilitado acompanhadas de baixa densidade, e em alguns casos, a completa ausência da vegetação local.



**Figura 13:** (A e B): Partes do Rio São Francisco fora dos limites da bacia utilizadas para treinamento; (C e D): Pequenos lagos existentes no interior da bacia que foram reconhecidos após a classificação.

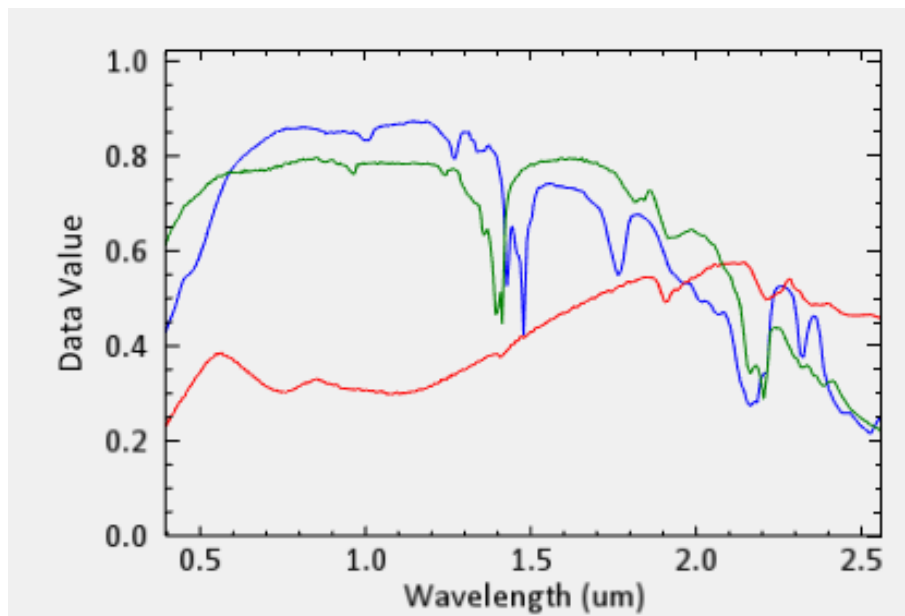
Em relação aos hidrocarbonetos, foi estabelecido um intervalo entre 0,05 e 0,06 para realização da classificação supervisionada, que, conforme o estudo feito por Ahmad *et al.* (2017) na região sul do Iraque compreendida importantes formações para produção de petróleo, esta faixa de valores de absorção indica, com precisão, a infiltração de hidrocarbonetos na área. A Figura 14 mostra alguns locais classificados com presença de hidrocarbonetos.



**Figura 14:** Alguns locais identificados com prováveis exsudações de hidrocarbonetos.

### 10.3. Resultados da Análise de Componentes Principais

A Análise de Componentes Principais foi aplicada para detectar as alterações formadas no solo que foram induzidas por HC, tais como a conversão de ilita para caulinita e o efeito *bleaching* que ocasiona a perda da coloração avermelhada dos solos e rochas. Para análise dos argilominerais, foram consideradas as características espectrais diagnósticas da ilita, caulinita e alanita nas regiões do Vermelho, NIR, SWIR1 e SWIR2 nas imagens do satélite Sentinel-2. A Figura 15 apresenta o comportamento espectral de cada mineral.



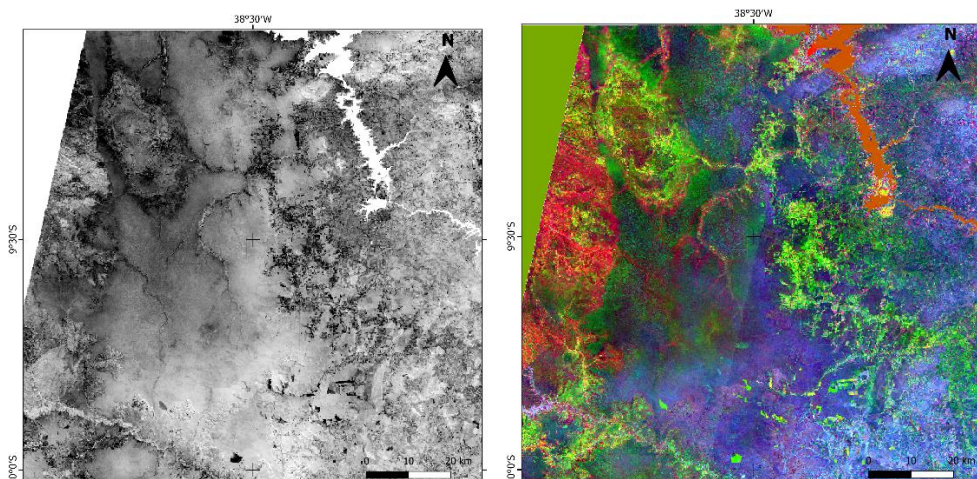
**Figura 15:** Comportamento espectral da alunita (azul), ilita (vermelho) e caulinita (verde).

A caulinita e alunita apresentam alta reflectância nas bandas do vermelho e do SWIR1, enquanto a ilita possui alta reflectância na região do SWIR2. Com base no comportamento espectral dos argilominerais (Figura 15) e na matriz de autovetores da PCA sobre os dados Sentinel-2 (Tabela 4), as bandas que melhor os representam a caulinita e a alunita foram a PC4 e a PC2. Para a ilita, a PC3 teve mais sucesso em seu destaque.

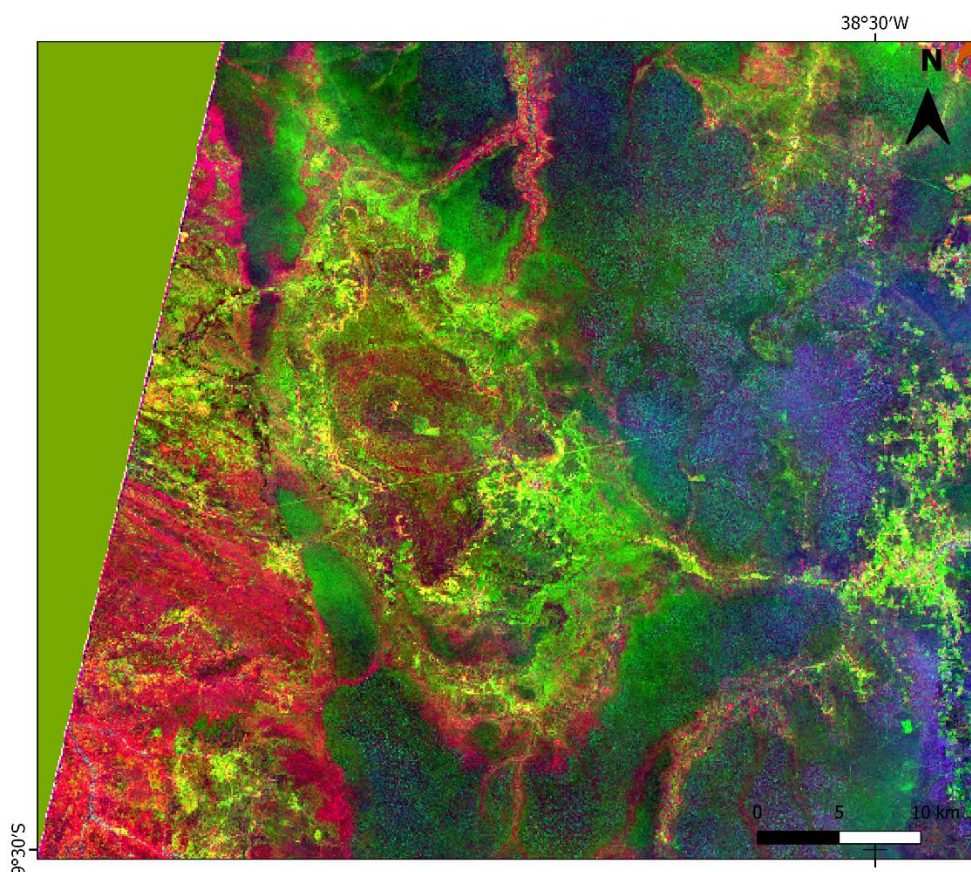
**Tabela 5:** Matriz de autovetores e correlação das Componentes Principais para análise dos argilominerais.

<i>Eigenvector</i>	<b>Vermelho</b>	<b>NIR</b>	<b>SWIR 1</b>	<b>SWIR 2</b>
<b>PC 1</b>	-0.556127	-0.720051	-0.281863	-0.304636
<b>PC 2</b>	-0.303061	-0.067455	<b>0.937850</b>	-0.155049
<b>PC 3</b>	0.155824	-0.526452	0.148469	<b>0.822511</b>
<b>PC 4</b>	<b>-0.758021</b>	0.447018	-0.137648	0.454568
<i>Correlation</i>	<b>Vermelho</b>	<b>NIR</b>	<b>SWIR 1</b>	<b>SWIR 2</b>
<b>PC 1</b>	1.000000	0.964755	0.316476	0.947986
<b>PC 2</b>	0.964755	1.000000	<b>0.496325</b>	0.901325
<b>PC 3</b>	0.316476	0.496325	1.000000	<b>0.322531</b>
<b>PC 4</b>	<b>0.947986</b>	0.901325	0.322531	1.000000

Com isso, foi gerada uma composição RGB para representar as principais componentes PC2, PC3 e PC4 que comportam as informações de interesse. A PC4, por apresentar valor negativo, foi multiplicada por -1 para realçar os minerais de caulinita e alunita.

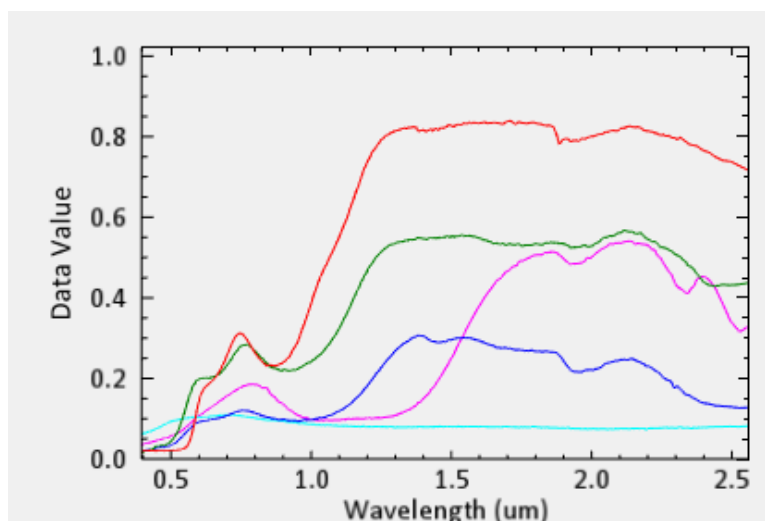


**Figura 16:** Resultado da PCA em escala de cinza (esquerda) e em composição RGB (direita). A composição RGB exhibe a PC2 em azul, a PC3 em vermelho e a PC4 em verde.



**Figura 17:** Resultado da composição RGB em maior detalhe para área de maior exposição de solo. A composição RGB exhibe a PC2 em azul, a PC3 em vermelho e a PC4 em verde.

Para avaliação do efeito *bleaching* foram considerados os minerais de hematita, goetita e limonita por apresentarem uma assinatura espectral alta no SWIR1/SWIR2 decrescendo para a região do visível, especialmente na radiação do azul, em que possuem as menores reflectâncias. Os minerais de pirita e siderita exibem reflectância ligeiramente maiores na faixa do azul em relação aos óxidos/hidróxido de ferro.

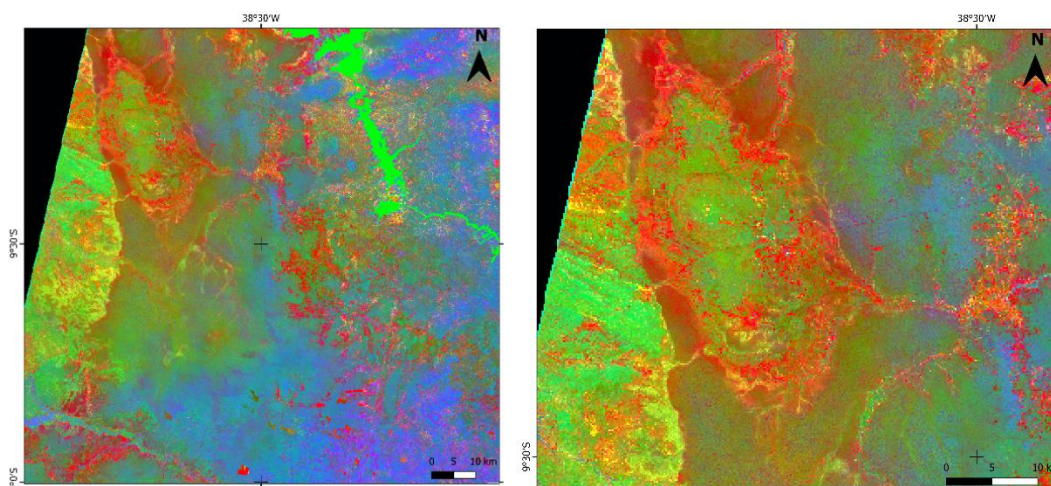


**Figura 18:** Comportamento espectral dos minerais de hematita (vermelho), goetita (verde), limoita (azul), pirita (ciano) e siderita (rosa).

Os espectros do azul, NIR e SWIR-2 foram escolhidos para compor a análise das principais componentes (Tabela 5). Nota-se que a PC2 e a PC3 apresentam altos valores negativos sendo necessário multiplicá-las por -1 para ressaltar as suas feições na imagem. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 19.

**Tabela 6:** Matriz de autovetores e correlação das Componentes Principais para análise dos minerais férricos.

<i>Eigenvector</i>	<b>Azul</b>	<b>NIR</b>	<b>SWIR 2</b>
<b>PC 1</b>	0.268101	0.564176	0.780914
<b>PC 2</b>	0.031162	<b>-0.815244</b>	0.578279
<b>PC 3</b>	<b>-0.962887</b>	0.130702	0.236149
<i>Correlation</i>	<b>Azul</b>	<b>NIR</b>	<b>SWIR 2</b>
<b>PC 1</b>	1.000000	0.571212	0.806993
<b>PC 2</b>	0.571212	1.000000	0.315842
<b>PC 3</b>	0.806993	0.315842	1.000000



**Figura 19:** Resultado da composição RGB para análise dos minerais de ferro. A composição RGB exibe a PC1 em vermelho, a PC2 em azul e a PC3 em verde.

## 11. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O estudo desenvolvido através das imagens dos satélites, principalmente do Sentinel-2, possibilitou reconhecer a qualidade da vegetação por meio da técnica NDVI, em que os resultados gerados foram aplicados na Classificação Supervisionada para mapear, de maneira efetiva, toda a área comprometida ou não por exsudações de hidrocarbonetos.

Todas as imagens NDVIs exibiram acentuadas variações na vegetação ao longo do ano que, certamente, foram induzidas pelas condições climáticas. Isso é confirmado por meio do contraste evidente entre o  $NDVI_{MSI}$  e o  $NDVI_{MUX}$ , ao passo que o primeiro reflete uma vegetação mais densa e vigorosa logo após os períodos chuvosos; o segundo exibe uma área com maior cobertura de solo exposto e baixa densidade vegetativa decorrentes do período de seca na região, mas ainda assim, aparece uma vegetação remanescente ao sul da bacia. O  $NDVI_{OLI}$  apresentou pequenas áreas distribuídas na bacia com baixa densidade vegetativa durante o início do período chuvoso, mas nota-se que elas se recuperaram nos meses seguintes. Ainda que as condições sazonais do clima tenham forte influência sobre a vegetação, é notado que o domínio centro-oeste da bacia é mantido sempre com baixa densidade arbustiva e maior exposição do solo, até mesmo durante o período chuvoso encontrado no  $NDVI_{MSI}$ .

A classificação supervisionada foi gerada a partir dos resultados  $NDVI_{MSI}$  pois apresentaram maior cobertura da vegetação para avaliação. E a técnica empregada foi a da Distância Mínima, a qual calcula o valor médio de todas as classes estabelecidas pelo analista e atribui o pixel desconhecido para a classe de menor distância. Em vista disso, foram determinadas 11 subclasses com seus respectivos intervalos de treinamento (Tabela 3), para que o programa realizasse a classificação por toda área de abrangência. Os resultados obtidos realçaram os tipos de vegetações, os solos e as águas de maneira eficaz, tendo como base as imagens de satélites do Google Earth referentes ao ano de 2021.

A vegetação sadia aparece concentrada no extremo sudeste da bacia, de ocorrência muito menor do que se observava na imagem  $NDVI_{MSI}$ ; a vegetação relativamente normal e de baixa densidade é visualizada no domínio sul e em poucas porções na parte central, e apresenta bastante semelhança com a configuração do contato ecótono entre savana/savana estépica (Figura 4); a vegetação estressada, subdesenvolvida e baixa densidade, ocorre contornando os solos localizados a oeste e também nas áreas destinadas a agropecuária a leste. Nota-se que o domínio oeste da bacia é compreendido sobretudo por solos, em alguns casos, é observado pixels de médio NDVI (cor verde claro), mas que representam arbustos de pequeno porte que ocorrem de forma isolada.

No trabalho desenvolvido por Ahmad (2017) através de imagens OLI na região sul do Iraque, as exsudações de HCs manifestam valores de absorção entre 0,0519 e 0,0660 e representam evidências comprovadas de infiltração. Nesse sentido, portanto, foi gerada uma classe para HCs próximo do intervalo de valores mencionado e os resultados indicam possíveis ocorrências na porção oeste da bacia, em torno da extensa estrutura ovular vista em planta (Figura 14). Os locais classificados como exsudações de HCs apresentam algumas características semelhantes entre eles, como a total ausência de vegetação e/ou vegetação debilitada ao redor; ocorrência dos pixels sempre agrupados e não disseminados; e inexistência desses pixels nas regiões dominadas por vegetação mais densa, estão sempre associados aos solos, especificamente na região oeste. Vale destacar que os valores classificados para exsudações podem não ser exclusivos para HCs, aparecem também na cidade (a leste) e em uma estrutura similar a uma bacia hidrográfica (a oeste), mas que não possui nenhum curso d'água em superfície, ambos os locais estão situados fora da área de estudo.

Em relação aos resultados do solo aplicados à técnica de *Principal Component Analysis* (PCA) para análise de argilominerais no domínio oeste da bacia, observou-se que a terceira Componente Principal (PC3) apresentou alto valor positivo (0.82) de *eigenvectors* na banda do SWIR2, conforme mostrado na Tabela 4. Isso implica que as regiões de tons avermelhados exibidos nas figuras 16 e 17, compreendem o mineral de illita, uma vez que, a sua assinatura espectral reflete alto valor na faixa do SWIR2 (Figura 15). Os argilominerais de alunite e caulinita possuem comportamento espectral semelhantes, porém, o primeiro possui maior reflectância no visível (vermelho) e o segundo na faixa do SWIR1, isso ocasiona maior predominância de alunite na PC4 e maior predominância de caulinita na PC2. Conseqüentemente, a feição oval compreendida por solo exposto na porção oeste da bacia, deverá possuir maior proporção de alunite, mas ainda é possível diagnosticar forte associação com caulinita na Figura 17. Os tons amarelados são resultantes das cores primárias verde e vermelho (PC4+PC3 respectivamente).

A descoloração das camadas avermelhadas (efeito *bleached red beds*) é verificada nas porções de solo expostos. A análise das principais componentes para minerais de ferro evidenciou o predomínio da PC3 na porção oeste, assim como em toda área compreendida por vegetação estressada. A PC3 possui alto valor negativo na faixa do azul (-0.96) que é característico dos minerais de siderita e principalmente pirita, vistos em tons de verde na Figura 19. Em contrapartida, a PC1 possui maior influência da banda SWIR2 o que corresponde a faixa de maior reflectância de hematita, goetita e limonita.

Dessa forma, os resultados sugerem que a região centro-oeste da Bacia de Tucano Norte pode estar sofrendo com exsudações de HCs, que ao interagir com os estratos superiores produz CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S e ácidos orgânicos, conseqüentemente, cria condições ácidas e

reduzidas para o desenvolvimento do intemperismo no solo, a formação de novos minerais e alterações na vegetação, que levam inclusive, a sua morte local.

## 12. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar possíveis regiões submetidas a exsudações de hidrocarbonetos por meio do sensoriamento remoto aplicado na Bacia de Tucano Norte. Estudos anteriores na bacia indicam razoáveis chances de descoberta de petróleo leve e gás natural inseridos no sistema Santa Brígida-Sergi. Diante disso, foram realizadas avaliações sobre o comportamento da vegetação e da composição mineralógica do solo, por meio de técnicas como NDVI, Classificação Supervisionada e Análise das Principais Componentes.

As análises NDVIs, por meio dos satélites Sentinel-2B, Landsat-8 e CBERS-4A juntamente com seus respectivos sensores óticos OLI, MSI e MUX, possibilitaram reconhecer maior estresse na vegetação no domínio centro-oeste da bacia, visto que foi a única região que a vegetação não se recuperou nos períodos pós chuva e se manteve mais debilitada nos períodos secos. Ao comparar os resultados NDVIs com o mapa de vegetação da bacia, nota-se que a Savana-Estépica Arborizada sem palmeiras e sem floresta de galeria, a qual ocorre na porção sudeste, deveria ocorrer também junto à estrutura de formato oval, a oeste, mas ao contrário disso, tem-se maior quantidade de solo exposto, o que pode indicar morte da vegetação local.

Os resultados da classificação supervisionada obtidos por meio da técnica da distância mínima aplicados ao NDVI<sub>MSI</sub> na escala de cinza, proporcionaram melhor caracterização da vegetação, bem como dos solos, água e inclusive, de possíveis áreas com exsudações de HCs, todos obtidos por meio das classes de treinamento. As exsudações de HCs, estimadas entre 0.05 e 0.06, foram reconhecidas sobretudo na porção centro-oeste, onde há maior exposição de solo e vegetação debilitada de baixa densidade.

Os solos expostos foram avaliados por meio da Análise das Principais Componentes, com a finalidade de identificar a presença de argilominerais e óxido e hidróxidos de ferro. Dos argilominerais é possível apontar a presença de alunita associada com caulinita, assim como de illita em menor quantidade. Em relação aos minerais de ferro, foram identificados a pirita e a siderita que possuem assinaturas espectrais bem características na faixa do visível, indicando possível descoloração dos solos avermelhados.

Toda a área da Bacia de Tucano Norte foi avaliada por meio das técnicas empregadas, e através dos resultados obtidos é possível concluir que a porção centro-oeste, especialmente na estrutura de feição oval, apresenta altas chances de exsudações por HCs. Os resultados podem indicar que a região, submetida às exsudações de HCs, produziu CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S e ácidos orgânicos através da oxidação microbiana de HCs e conseqüentemente, a diminuiu a concentração de oxigênio presente nos solos, o que provocou a morte ou estresse da vegetação local, alterações mineralógicas através do intemperismo químico e descoloração dos sedimentos ferruginosos. A forma do fluxo das exsudações pode aparecer combinadas

entre fluxos visíveis e focalizados em superfície como *macroseepage* ou *miniseepages* visto que a região é dominada por falhas; e por fluxos gasosos por *microseepages*, já que os efeitos provocados alteraram todo o solo e vegetação local.

### 13. REFERÊNCIAS

- Aguiar, G.A., Mato, L.F., (1990). Definição das relações estratigráficas da Formação Afligidos nas bacias do Recôncavo, Tucano Sul e Camamu, Bahia, Brasil: Congresso Brasileiro de Geologia, 36. Natal, Anais SBG v.1, p. 157-170.
- Ahmad, W.A., Ahmed, M.A., & Al-Sharia, G.H. (2017). *Using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Identify Hydrocarbon Seepage in Kifl Oil Field and Adjacent Areas South of Iraq*. Journal of environment and earth science, 7, 16-27. Vol.7, N°1, 2017.
- Almeida Filho, R. (2001). Processamento Digital de Imagens Landsat-TM na Detecção de Áreas de Microexsudação de Hidrocarbonetos, Região da Serra do Tonã, Bahia. São José dos Campos - SP: INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Asadzadeh, S., Souza Filho, C. R. (2017). Sensoriamento remoto espectral para caracterização de infiltração onshore: uma visão geral crítica. *Críticas da Earth-Science*, Volume 168(1), 48-72.
- Augusto, V. A. (2006). Processamento de imagens aster na detecção de áreas com microexsudações de hidrocarbonetos. Universidade de Campinas, Instituto de Geociências. Campinas: Unicamp.
- Babinski, N.A., Santos, R.C.R., Bueno, G.V., Guimarães, M.F., Freire, A.F.M., Gouveia, C.A.S., Almeida, M.F., Volpan, A.G. (1993). Prospecção geoquímica de superfície (gasometria e microbiologia de petróleo) na bacia de Tucano Norte. CENPES/SINTEP/MCT, 650–15.106. Relatório Não Publicado, 15 pp.
- Caixeta, J.M., Bueno, G.V., Magnavita, L.P., Feijó, F.J. (1994). Bacias do Recôncavo, Tucano e Jatobá. Rio de Janeiro, Boletim de Geociências da Petrobrás, 8(1), 163-172.
- Chakraborty, S., Weindorf, D.C., Zhu, Y., Li, B., Morgan, C.L.S., Ge, Y., Galbraith, J., 2012. *Spectral reflectance variability from soil physicochemical properties in oil contaminated soils*. *Geoderma* 177–178, 80–89
- CPRM (2021). Limite das Bacias Sedimentares. [S. l.]. Disponível em: <https://geosgb.cprm.gov.br/geosgb/downloads.html>. Acesso em: 11 maio 2021.
- Dent, A., Young, A. (1981). Levantamento e Avaliação do Solo. George Allen & Unwin Publ., Boston, MA.
- Durval, L. G. (2017). Caracterização estratigráfica da formação Marizal (K) na Serra do Tonã, Sub-bacia do Tucano Norte, NE Brasil. Pernambuco: Universidade Federal de Pernambuco.
- EPE. (2019). Zoneamento Nacional de Recursos de Óleo e Gás. Empresa de Pesquisa Energéticas. Brasília: MME/EPE: Ministério de Minas e Energia.
- Etiopie, G. (2015). Natural Gas Seepage: *The Earth's Hydrocarbon Degassing* (1° ed.). Rome, Italy: Springer.

- Flower, F.B., Gilman, E.F., Leone, LA. 1981. *Landfill gas, what does to trees and how its injurious effects may be prevented*. Journal of Arboriculture, p.43-52.
- Forrester, S., Janik, L., and McLaughlin, M. (2010) *In-situ determination of total petroleumhydrocarbon (TPH) contamination: A quick infrared spectroscopic test for TPH at contaminatedsites*. 19th World Congress of Soil Science. Brisbane, Australia, August 1–6
- IBAMA (2021). Manchas de Óleo no Litoral Brasileiro. Ibama, 24 de Abril de 2021 <http://www.ibama.gov.br/manchasdeoleo>, acessado em 07 de Maio de 2021.
- IBGE (2012). Classificação da Vegetação Brasileira. In: MANUAIS Técnicos em Geociências: Manual Técnico da Vegetação Brasileira. 2. ed. rev. Rio de Janeiro: [s. n.], 2012. ISBN 978-85-240-4272-0.
- IBGE (2021). Malhas Territoriais. [S. l.]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?=&t=downloads>. Acesso em: 11 maio 2021.
- Jensen, J. R. (2015). *Introductory Digital Image Processing: a remote sensing perspective*. 4th. ed. University of South Carolina. Geographic Information Science, 2015.
- Jobson, A.M., Cook, F.D., Westlake, D.W.S. 1978. *Interaction of aerobic and anaerobic bacteria in petroleum biodegradation*. Chemical Geology, 24, 355-365.
- Lammoglia, T. (2010). Sensoriamento Remoto Óptico & Exploração Petrolífera Onshore e Offshore. Instituto de Geociências. Campinas - SP: Universidade de Campinas.
- Lammoglia, T., Souza Filho, C.R., Almeida Filho, R. (2007). Caracterização de microexsudações de hidrocarbonetos na Bacia do Tucano Norte (BA) por geoestatística, classificação hiperespectral e redes neurais. Revista Brasileira de Geociências, 1(1), 798-811.
- Lammoglia, T., Souza Filho, C.R., Almeida Filho, R. (2013). *Unraveling Hydrocarbon Microseepages in Onshore Basins Using Spectral–Spatial Processing of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Data*. Springer. 2013.
- Landsat 8-9 Operational Land Imager (OLI). [S. l.]: USGS, 2015. Disponível em: [https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites?qtnews\\_science\\_products=0#qt-news\\_science\\_products](https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites?qtnews_science_products=0#qt-news_science_products). Acesso em: 29 de agosto de 2021.
- Lima, R. P. (2018). Sequências lacustres pós-rifte na Serra Negra (Bacia de Jatobá) e Serra do Tonã (sub-bacia de Tucano Norte): correlações estratigráficas regionais e estruturais. Universidade Federal de Pernambuco, CTG. Recife: Tese (Doutorado).
- Magnavita, L. (1990). Geometry and kinematics of the Recôncavo-Tucano-Jatobá Rift. In: Simpósio sobre a Bacia do Araripe e bacias interiores do Nordeste. Atas. Crato-CE: Simpósio sobre a Bacia do Araripe e bacias interiores do Nordeste.

- Milani, E.J. (1985). Tectônica cisalhante na evolução do rift do Recôncavo-Tucano-Jatobá. *Revista Brasileira de Geociências*, v.15, n.4, p 287-292.
- Nóbrega, R. A. (2007). Detecção da malha viária na periferia urbana de São Paulo utilizando imagens orbitais de alta resolução espacial e classificação orientada a objetos. 2007. 166 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. 2007.
- Oliveira, W.J. (1998). Caracterização das emanações gasosas de hidrocarbonetos na região do Remanso do Fogo (MG), através do uso integrado de sensoriamento remoto, geoquímica, geofísica, geologia estrutural e espectrometria de reflectância. Instituto de Geociências. Campinas, São Paulo: Universidade de Campinas.
- Porsani, M. J. *et al.* (2008). Estudos dos Sistemas Petrolíferos das Bacias do Recôncavo, Tucano e Jatobá (2008). Relatório Final, Salvador, IGEO/CPGG/UFBA/ANP.
- Radiometric Resolutions. [S. l.]: ESA Copernicus, 2016. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-%20guides/sentinel-2-msi/resolutions/radiometric>. Acesso em: 31 agosto de 2021.
- REATE. (2020). Relatório Subcomitê Potencial de Petróleo e Gás Onshore: Resumo Bibliográfico das Bacias Onshore. São Paulo: Empresa de Pesquisa Energética (EPE).
- Santos, D. (2019). O que se sabe até agora sobre o derramamento de óleo no Nordeste. WWF-Brasil, [https://www.wwf.org.br/informacoes/noticias\\_meio\\_ambiente\\_e\\_natureza/?73944/O-que-se-sabe-ate-agora-sobre-o-derramamento-de-oleo-no-Nordeste](https://www.wwf.org.br/informacoes/noticias_meio_ambiente_e_natureza/?73944/O-que-se-sabe-ate-agora-sobre-o-derramamento-de-oleo-no-Nordeste), 12 de Novembro de 2019, acessado em 07 de Maio de 2021.
- Schumacher, D. (1996). *Hydrocarbon-Induced Alteration of Soils and Sediments*. AAPG Memoir 66, 6(1), 71–89.
- Souza Filho, C.R., Augusto, V.A., Oliveira, W.J., Lammoglia, T. (2008). Detecção de Exsudações de Hidrocarbonetos por Geobotânica e Sensoriamento Remoto Multi-Temporal: Estudo de Caso no Remanso do Fogo (MG). *Revista Brasileira de Geociências* 38:228–243
- Van der Meer, F., P. van Dijk, H. van der Werff, and H. Yang. 2002. “*Remote Sensing and Petroleum Seepage: A Review and Case Study*.” *Terra Nova* 14: 1–17.
- Vasconcelos, D. V. F. (2003). Falha de transferência de Caritá: o significado tectônico no Rife do Recôncavo Tucano Jatobá, NE Brasil, Minas Gerais. Tese (Doutorado).