

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

Ana Lua Telles Lima

**Adaptação metodológica para delimitação de áreas estratégicas de gestão dos recursos hídricos subterrâneos: estudo de caso da Bacia do Pratygy.**

Maceió

2022

Ana Lua Telles Lima

**Adaptação metodológica para delimitação de áreas estratégicas de gestão dos recursos hídricos subterrâneos: estudo de caso da Bacia do Pratygy.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientador: Professor Dr. Eduardo Lucena Cavalcante Amorim.

Maceió

2022

**Catlogação na Fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

L732a Lima, Ana Lua Telles.

Adaptação metodológica para delimitação de áreas estratégicas de gestão dos recursos hídricos subterrâneos : estudo de caso da Bacia do Pratagy / Ana Lua Telles Lima. – Maceió, 2022.

60 f. : il., grafs. e tabs. color.

Orientador: Eduardo Lucena Cavalcante Amorim.

Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2022.

Bibliografia: f. 52-60.

1. Águas subterrâneas. 2. Gestão integrada de resíduos. 3. Planejamento urbano sustentável. I. Título.

CDU: 556.168

## **AGRADECIMENTOS**

Até a chegada deste trabalho, pude contar com a ajuda de diversas pessoas durante o trajeto e a elas guardo todo meu carinho e admiração, por cederem seu tempo, conhecimento, e principalmente, apoio.

Agradeço primeiramente a Deus, por nunca ter me deixado sozinha e ainda ter segurado a minha mão em todos os percalços vividos. Não estaria aqui sem ele e nele deposito toda minha fé e confiança, assim como foi depositada em mim.

Aos meus pais, por todo amor incondicional depositado em mim, por sempre acreditarem no meu potencial e que nunca mediram esforços para me proporcionar o melhor.

Ao meu irmão, apenas pelos sorrisos e gargalhadas que fizeram meu coração derreter, seu nascimento me deu um novo propósito de vida e foi de lá que tirei forças quando achei que já não tinha mais.

À minha bisavó, Dona Lindinalva, por ter um orgulho infinito de mim e sempre ligar para a família inteira comunicando minhas conquistas.

Aos meus avós, que estão ao meu lado desde o meu primeiro dia de vida e seguem sendo exemplos incríveis para mim e meu irmão.

Ao restante da minha família, que é numerosa, mas jamais menos importante. Aos meus tios e tias (alguns postiços), primos e primas, meus padrinhos, por toda paciência e carinho que sempre tiveram comigo e por fazerem a minha vida mais leve.

À minha psicóloga, que nesse último ano me manteve sã, gerenciando crises catastróficas existentes apenas na minha cabeça.

Aos meus amigos de longa data, Ana Laura e Leonardo Henrique, por serem meu porto seguro e exemplos de companheirismo. À Mariana Dlumou, por entrar na minha órbita e caminhar junto comigo. Aos meus amigos Bruno Manoel e Giulliane Tereza, do terceirão para a vida. Aos inúmeros amigos que ganhei na graduação, em especial à Ana Letícia, Augusto José, Flávia Fernanda, Johnatas Héber, Letícia Marinho, Mariana Barbosa, Mateus Normande, Nathacha Cavalcante, Pedro Vinícius e outros que, porventura, a minha memória não permitiu lembrar.

Ao CAEAMB e todos os seus integrantes, por terem agregado tanto na minha vida e trazer conhecimentos e experiências que levarei sempre comigo. Aos meus

chefes e colegas que pude ter o prazer de conviver nos anos de estágio na SEMARH e que também agregaram (e muito) na minha vida pessoal e profissional.

Ao CTEC e todo o seu corpo docente e técnico, que se tornou minha casa durante muitos anos. À Universidade Federal de Alagoas, pelas oportunidades geradas durante a minha graduação, através do ensino público e de qualidade ímpar. Espero retornar todo o investimento atribuído a mim por meio do meu trabalho como engenheira.

A todos os professores que passaram por mim durante a minha vida, sendo os verdadeiros responsáveis por todo o meu crescimento intelectual até aqui. Ao meu orientador, Prof. Dr. Eduardo Lucena, por ter aceitado entrar nesta aventura junto comigo e pelos conhecimentos transmitidos durante o curso e neste trabalho de conclusão.

Por fim, quero agradecer a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para que este trabalho de conclusão de curso pudesse ser concretizado.

## RESUMO

A água subterrânea desempenha um papel importante nos processos ambientais, além de ser uma alternativa como fonte de abastecimento d'água para muitas cidades brasileiras. O uso excessivo deste recurso simultaneamente às atividades de alto potencial poluidor em áreas vulneráveis pode contribuir para a degradação do aquífero. Sendo assim, o presente trabalho tem como finalidade analisar a dinâmica espacial na área da bacia hidrográfica do Rio Pratygy, construindo os índices de vegetação e o mapeamento do uso e cobertura do solo, bem como delimitar áreas estratégicas para fins de conservação, uso e manutenção das disponibilidades dos recursos hídricos subterrâneos. Para isso, foram processadas imagens do satélite Landsat 5, sensor *Thematic Mapper* (TM), dos anos de 1998 e 2011, utilizando-se o software QGIS 3.16.11 para aplicar técnicas de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento direcionadas para o estudo. Para avaliar o comportamento espaço-temporal da região da bacia foram aplicados o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI), e a utilização da Classificação Não-Supervisionada nas imagens obtidas. Para fins de comparação, foram classificadas em quatro classes, denominadas por: água, área urbana/solo exposto, cana/pasto e vegetação densa. Como as imagens analisadas foram correspondentes a apenas dois anos distintos, não foi possível indicar um comportamento na região de estudo. Mesmo não sendo possível realizar a análise da dinâmica espaço-temporal, é possível visualizar que em todas as circunstâncias, as áreas destinadas ao cultivo da cana-de-açúcar e para pastagem apresentam valores expressivos. Para a determinação das áreas estratégicas para fins de uso e conservação dos recursos hídricos subterrâneos foi utilizada a metodologia proposto por OHUFIJI (2020), na qual utiliza a integração das características ambientais da bacia. Os temas utilizados foram: potencial de recarga subterrânea; geologia; solo; declividade; localização dos poços e uso da terra. Definiu-se quatro Áreas Estratégicas de Gestão: Área Estratégica I (Proteção Imediata), Área Estratégica II (Restrição e Controle), Área Estratégica III (Prevenção) e Área Estratégica IV (Proteção de Poços destinados ao Abastecimento Doméstico). O presente estudo busca contribuir com elementos para ações futuras de gerenciamento, monitoramento e conservação integrada dos recursos hídricos.

**Palavras-chave:** Águas Subterrâneas, Gestão Integrada, Planejamento Urbano Sustentável.

## **ABSTRACT**

Groundwater plays an important role in environmental processes, as well as being an alternative source of water supply for many Brazilian cities. The excessive use of this resource simultaneously with activities of high polluting potential in vulnerable areas can contribute to the degradation of the aquifer. Therefore, the present work aims to analyze the spatial dynamics in the Pratygy River watershed, building vegetation index and mapping the land use, as well as delimiting Strategic Management Areas considering the conservation, use and maintenance of the availability of water resources in a hydrographic basin. For this, images from the Landsat 5 satellite, Thematic Mapper (TM) sensor, from the years 1998 and 2011, were processed, using the QGIS 3.16.11 software to apply Remote Sensing and Geoprocessing techniques directed to the study. To evaluate the spatio-temporal behavior of the basin region, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) were applied, and the Unsupervised Classification was used in the images obtained. For comparison purposes, they were classified into four classes, named: water, urban area/exposed soil, sugarcane/pasture and dense vegetation. As the images analyzed corresponded to only two different years, it was not possible to indicate a behavior in the study region. Even though it is not possible to carry out the analysis of the space-time dynamics, it is possible to see that in all circumstances, the areas destined for sugarcane cultivation and for pasture present expressive values. To determine the strategic areas for the use and conservation of groundwater resources, the methodology proposed by OHUFIJI (2020) was used, in which it uses the integration of the environmental characteristics of the basin. The themes used were underground recharge potential, geology, soil, slope, underground wells location and land use. Four Strategic Management Areas were defined: Strategic Area I (Immediate Protection), Strategic Area II (Restriction and Control), Strategic Area III (Prevention) and Strategic Area IV (Protection of Wells for Domestic Supply). The present study seeks to contribute with elements for future actions of management, monitoring and integrated conservation of water resources.

**Keywords:** Groundwater, integrated management, sustainable urban planning.

## **SIGLAS E ABREVIATURAS**

AEG – Área Estratégica de Gestão

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento

APA – Área de Proteção Ambiental

CASAL – Companhia de Saneamento de Alagoas

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos

CNS – Classificação Não-Supervisionada

CPRM – Serviço Geológico do Brasil

EVI – Enhanced Vegetation Index

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IMA – Instituto de Meio Ambiente

MDE – Modelo Digital de Elevação

MS – Ministério da Saúde

NDVI – Normalized Difference Vegetation Index

PDRH – Plano Diretor da Região Hidrográfica

PERH – Política Estadual de Recursos Hídricos

PNRH – Política Nacional de Recursos Hídricos

PPP – Perímetro de Proteção de Poços

RMM – Região Metropolitana de Maceió

RVI – Ratio Vegetation Index

SAVI – Soil Adjusted Vegetation Index

SEMARH/AL – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos

SEPLAG/AL - Secretaria do Estado do Planejamento, Gestão e Patrimônio

SIG – Sistema de Informações Geográficas

SNIRH – Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos

UCS – Uso e Cobertura do Solo

USGS – Serviço Geológico dos Estados Unidos



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distinção entre zona de captura e zona de influência de um poço de produção. ....	21
Figura 2: Região Hidrográfica Pratygy. ....	22
Figura 3: Sistemas Aquíferos na Bacia Hidrográfica do Rio Pratygy. ....	23
Figura 4: Fluxograma da metodologia utilizada. ....	25
Figura 5: Metodologia para análise da dinâmica espacial. ....	26
Figura 6: Composição das bandas R3-G2-B1 do Landsat-5/TM. ....	27
Figura 7: Metodologia para delimitação das AEGs. ....	31
Figura 8: Aplicação do NDVI na região da bacia hidrográfica do Rio Pratygy. ....	36
Figura 9: Aplicação do SAVI na região da bacia hidrográfica do Rio Pratygy. ....	37
Figura 10: Mapa de UCS para os anos de 1998 e 2011. ....	39
Figura 11: Quantificação percentual para cada feição de acordo com o método de avaliação de UCS para cada ano. ....	40
Figura 12: Mapa Geológico da bacia. ....	43
Figura 13: Classificação de solos na bacia. ....	44
Figura 14: Mapa de declividade da bacia. ....	45
Figura 15: Potencial de recarga subterrânea na bacia. ....	46
Figura 16: Mapa de uso e ocupação do solo na bacia. ....	47
Figura 17: Áreas Estratégicas de Gestão identificadas na bacia do Rio Pratygy. ....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1:Bandas espectrais do sensor TM e coeficientes de calibração. ....	28
Tabela 2: dados utilizados para calibração das imagens. ....	29
Tabela 3: Valores de máximo e mínimo para o índice NDVI. ....	34
Tabela 4: Medidas de classe em área e percentual para os anos 1998 e 2011 pelo NDVI. ....	34
Tabela 5: Valores de máximo e mínimo para o índice SAVI. ....	35
Tabela 6: Medidas de classe em área e percentual para os anos 1998 e 2011 pelo SAVI. ....	35
Tabela 7: Medidas de classe em área e percentual para os anos 1998 e 2011 pela CNS. ....	38
Tabela 8: Área atribuída para cada feição de acordo com o método de avaliação de UCS para cada ano analisado em km <sup>2</sup> . ....	40
Tabela 9: Quantificação percentual das classes geológicas ....	43
Tabela 10: Quantificação percentual das classes de solo. ....	44
Tabela 11: Quantificação percentual das classes de declividade. ....	45
Tabela 12: Quantificação percentual da classificação do potencial de recarga subterrânea. ....	46
Tabela 13: Quantificação percentual do uso e ocupação do solo na bacia. ....	47

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Condicionantes ambientais das Áreas Estratégicas propostas. ....	32
--	----

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	OBJETIVOS.....	14
2.1	Objetivo Geral .....	14
2.2	Objetivos Específicos .....	14
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	15
3.1	Água subterrânea no ciclo hidrológico .....	15
3.2	Vulnerabilidade da água subterrânea.....	15
3.3	Técnicas de geoprocessamento na gestão de recursos hídricos.....	17
3.4	Aspectos legais .....	18
3.5	Proteção da água subterrânea .....	19
3.6	Área de estudo – Bacia do Rio Pratygy .....	21
4	MATERIAL E MÉTODOS .....	25
4.1	Levantamento de dados.....	25
4.2	Análise dinâmica espaço-temporal da bacia hidrográfica .....	26
4.2.1	Aquisição das imagens.....	26
4.2.2	Pré-processamento das imagens .....	26
4.2.3	Conversões radiométricas e de reflectância .....	28
4.2.4	Índices de Vegetação .....	29
4.2.5	Mapeamento do Uso e Cobertura do Solo .....	30
4.3	Delimitação das áreas estratégicas de gestão.....	31
4.3.1	Produção de Mapas Temáticos .....	31
4.3.2	Determinação das condicionantes ambientais para cada AEG .....	32
4.3.3	Delimitação das Áreas Estratégicas de Gestão.....	33
5	RESULTADOS .....	34
5.1	Índices de Vegetação.....	34
5.1.1	NDVI .....	34
5.1.2	SAVI .....	35
5.2	Classificação Não-Supervisionada.....	38
5.3	Análise da dinâmica espaço-temporal.....	40
5.4	Mapas Temáticos .....	42
5.4.1	Geologia .....	42
5.4.2	Solo .....	43

5.4.3	Declividade .....	44
5.4.4	Potencial de Recarga Subterrânea.....	45
5.4.5	Uso e Ocupação do Solo .....	46
5.5	Áreas Estratégicas de Gestão.....	47
6	CONCLUSÃO .....	50
	REFERÊNCIAS.....	52

## 1 INTRODUÇÃO

A água é um elemento essencial para a garantia da manutenção da vida existente no planeta, sendo utilizada também em praticamente todas as atividades humanas, como fontes de abastecimento d'água para uso doméstico, industrial e agrícola. Sendo assim, devido ao uso desordenado deste recurso, aliado à falta de planejamento das cidades, muitos municípios possuem dificuldades em suprir a demanda por água potável (PAES, 2014).

Destarte, o uso de mananciais hídricos subterrâneos apresenta uma alternativa bastante viável para satisfazer as demandas cada vez mais elevadas. Isso se dá pela garantia de segurança e confiabilidade que a água subterrânea possui, geralmente, quando comparada com a água superficial. Resultante do processo de recarga de aquífero, que são compartimentos geológicos que armazenam e transmitem água, as reservas subterrâneas também são muito utilizadas pela facilidade de extração em locais com escassez de água superficial (NOBRE e NOBRE, 2000; FAZZIO *et. al.*, 2010; PAES, 2014).

Vários fatores podem colocar em risco a qualidade e quantidade da água subterrânea e consequentemente afetar outros sistemas aquáticos que são abastecidos pelos aquíferos como rios, lagos e reservatórios. Durante períodos de seca, a água advinda da descarga dos aquíferos pode assegurar a vazão de mananciais superficiais pelo fluxo de base. Essa interação entre os compartimentos hídricos deve ser levada em conta na consolidação de ações e/ou políticas necessárias para proteção e manutenção deste recurso (HIRATA *et. al.*, 2019).

Segundo GUERRA e CUNHA (1999), o uso e a ocupação desordenada do solo nas bacias hidrográficas são resultados das mudanças provenientes de políticas e de incentivos governamentais, que por sua vez podem estimular ocupações que são desde o uso agrícola das terras, até o processo de urbanização. Sendo assim, faz-se necessário a utilização de instrumentos que podem incorporar ao planejamento ambiental, facilitando a visualização e distribuição dos componentes físicos de uma área e suas relações com outros componentes, favorecendo uma visão integrada que facilite detectar a sua potencialidade ou então a sua fragilidade ambiental.

O geoprocessamento torna-se uma tecnologia fundamental para conhecer a extensão de problemas ambientais, fornecendo apoio nas tomadas de decisões e permitindo um julgamento das alternativas de solução, através da análise dos graus

de benefício e prejuízo que essas alternativas venham a trazer, tendo a capacidade de realizar a integração com dados diversos (TAVARES e FERREIRA NETO, 2017).

Atualmente, a água subterrânea é a principal fonte de abastecimento da cidade de Maceió, essa contribuição corresponde a cerca de 68%. Como o município possui o abastecimento misto, a outra parte corresponde aos sistemas de águas superficiais, sendo 20% proveniente dos Riachos Catolé e Aviação e o restante pelo Sistema Pratagy, que coleta água do Rio Pratagy. Devido a sua importância no abastecimento da capital alagoana o Rio Pratagy merece atenção especial e assim como outros cursos d'água do estado, encontra-se em estado acelerado de degradação. A bacia hidrográfica do Rio Pratagy sofreu ao longo dos anos com o suprimimento da vegetação original para originar canaviais, áreas de pecuária e conjuntos habitacionais (TOLEDO e FREIRE, 2014; CASAL, 2020).

JESUS (2021) identificou as áreas de maior vulnerabilidade à contaminação dos sistemas aquíferos na bacia do Rio Pratagy, destacando como fatores de maior influência as baixas profundidades do lençol freático e o saneamento inadequado na região como principais fatores. SOBRINHO (2021) propôs uma metodologia para determinar as áreas potenciais de recarga da bacia, indicando uma predominância das áreas ribeirinhas aos cursos d'água nas zonas com alto potencial de recarga.

Neste contexto, o presente trabalho tem o objetivo de fornecer subsídios para melhoria da gestão de água subterrânea na Bacia do Rio Pratagy, a partir da análise de alterações da dinâmica espaço-temporal na área da bacia, construindo os índices de vegetação e a mapeamento do uso e cobertura do solo, bem como delimitar áreas estratégicas para fins de conservação, uso e manutenção das disponibilidades dos recursos hídricos subterrâneos, sendo uma continuidade dos estudos realizados por SOBRINHO (2021) e JESUS (2021).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Construir os índices de vegetação e o mapeamento do uso e cobertura do solo, bem como delimitar áreas estratégicas para fins de conservação, uso e manutenção das disponibilidades dos recursos hídricos subterrâneos.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Determinar os índices de vegetação em anos distintos;
- Analisar a modificação da dinâmica espacial da bacia;
- Definir as condicionantes ambientais para cada área estratégica de gestão;
- Delimitar áreas estratégicas de gestão na bacia.

### **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **3.1 Água subterrânea no ciclo hidrológico**

Embora seja um recurso ambiental, a água subterrânea desempenha papéis importantes no ciclo hidrológico e em processos geológicos, sendo fundamental a realização de estudos integrados com as águas superficiais em bacias hidrográficas. Uma das fases do ciclo hidrológico é o escoamento, segmento relativo ao deslocamento da água na bacia. O escoamento pode ser caracterizado como: superficial (realizado sobre a superfície do solo), subsuperficial (logo abaixo da superfície, junto às raízes da vegetação) e subterrâneo (fluxo devido à contribuição do aquífero) (CABRAL, 2008; REBOUÇAS, 2008).

O aquífero pode ser definido como uma formação geológica permeável e porosa, capaz de armazenar e distribuir um grande volume de água (CABRAL, 2008). Tem como característica o fluxo lento de escoamento, desde a zona de recarga, superfícies que possibilitam a infiltração da água, até a zona de descarga, onde a água emerge do sistema e alimenta os corpos de água superficial (HIRATA et. al, 2019).

Como na maioria dos casos os reservatórios de água subterrânea se encontram subjacentes a sistemas de água de superfície, como rios, lagos e reservatórios, uma gestão integrada entre mananciais subterrâneos e superficiais permitem uma avaliação das trocas hidráulicas entre os corpos e da qualidade de suas águas (NOBRE e NOBRE, 2001).

#### **3.2 Vulnerabilidade da água subterrânea**

Segundo FREIRE et. al. (1998), a crescente utilização de águas subterrâneas em grandes cidades se dá pela carência e/ou degradação das fontes superficiais, que acabam mais expostas à contaminação e exploração. Esse processo pode acarretar efeitos negativos, afetando a quantidade e a qualidade da água no aquífero, ou seja, aumentando a vulnerabilidade da água subterrânea.

Cerca de 13% dos municípios brasileiros são abastecidos parcialmente, enquanto aproximadamente 38% têm abastecimento exclusivo por mananciais subterrâneos (SNIRH, 2015). Desta forma, a exploração deste recurso deve ser



fundamentada em estudos preliminares de planejamento e uso sustentável, garantindo assim a preservação do aquífero (NOBRE e NOBRE, 2000).

A deterioração da qualidade da água subterrânea pode se dar por diversas causas, através da contaminação do aquífero, por emissões e lixiviados provenientes de atividades urbanas/industriais, ou através da contaminação junto ao poço ou captação, por intrusão salina ou contaminação natural (FOSTER et.al., 2006). Alguns exemplos de ações que afetam as reservas de água subterrânea são as superexplorações, desmatamento, a impermeabilização em áreas urbanas, poluição derivada de aterros sanitários, lançamentos de efluentes industriais e domésticos, vazamentos em tanques de combustíveis, dentre outros (FREIRE et. al., 1998).

Quando a água subterrânea se torna visivelmente poluída, geralmente grandes volumes do aquífero encontram-se comprometidos. O custo econômico para remediar a contaminação é extremamente elevado e pode apresentar inúmeras dificuldades técnicas (FOSTER et. al., 2006). Mesmo eliminando a fonte de contaminação, algumas décadas serão necessárias para que o aquífero realize a autodepuração caso nenhuma intervenção humana seja realizada (HIRATA et. al., 2019).

A recarga subterrânea pode ser afetada por diversos processos que ocorrem ainda na superfície do terreno, no caminho que a água percorre da superfície até o nível d'água e no próprio aquífero (BARRETO, 2011). Para que haja uma exploração racional dos mananciais subterrâneos é imprescindível analisar as características climatológicas e hidrogeológicas da região onde o aquífero está localizado, bem como estimar parâmetros de recarga, capacidade de armazenamento e transmissividade (NETO et. al., 2013). Desta forma, as regiões de recarga subterrânea apresentam certa vulnerabilidade e para garantir uma exploração duradoura do local torna-se uma necessidade sua preservação e a adequação da forma de uso e ocupação do solo (NETO et. al., 2013).

Diversos métodos de avaliação da vulnerabilidade de aquíferos foram desenvolvidos para avaliar de forma integrada e simplificada as variáveis ambientais, principalmente o emprego de ferramentas do Sistema de Informações Geográficas – SIG. Através do SIG, é possível realizar estudos ambientais que auxiliem a gestão dos recursos hídricos, principalmente com combinação com o Sensoriamento Remoto, permitindo análises cada vez mais complexas (NETO et. al., 2013; OHOFUGI, 2020).

### 3.3 Técnicas de geoprocessamento na gestão de recursos hídricos

São inúmeras as formas e padrões de uso do solo e dos recursos hídricos, e estas interferências antrópicas são intensificadas devido à falta de cuidado com a sustentabilidade do meio. Alguns destes problemas ambientais, sejam terrestres ou aquáticos, acabam sendo irreparáveis, como: perdas de solo, diminuição das áreas destinadas as Áreas de Preservação Permanentes (APPs), nascentes, córregos e rios pela ocupação irregular. Os impactos destas ações podem influenciar na disponibilidade e na qualidade dos recursos naturais, incluindo a água subterrânea. (BRITO e PRUDENTE, 2005; COELHO et. al., 2013; POLLO, 2019).

A conservação dos recursos hídricos representa um dos maiores desafios à comunidade internacional, sobretudo pelos elevados níveis de perturbações antrópicas, bem como seu valor social, econômico e cultural. Os diferentes usos de terra em bacias hidrográficas podem desencadear processos particulares de degradação dos solos, gerando problemas que muitas vezes são de difíceis soluções (TAVARES e FERREIRA NETO, 2017).

Segundo SANTOS e SANTOS (2010), o mapeamento do uso e ocupação do solo é um instrumento importante para um melhor conhecimento das rápidas transformações de paisagens, no qual é possível obter informações para construção de inúmeros cenários ambientais de forma que proporcionem estratégias de conservação e manejo de recursos, visando a sustentabilidade da região. Neste contexto, o levantamento do uso e cobertura do solo torna-se uma ferramenta primordial para o planejamento urbano, permitindo verificar a utilização do solo em uma vasta área e possibilitando a elaboração de melhores políticas de desenvolvimento regional.

Para NOVO (1998), o sensoriamento remoto consiste em utilizar em conjunto modernos instrumentos, equipamentos para processamento e transmissão de dados e plataformas com o objetivo de estudar o ambiente terrestre através do registro e da análise de interações da radiação eletromagnéticas com as substâncias componentes do planeta Terra em suas mais diversas manifestações, podendo se tornar uma ferramenta extremamente útil para o gerenciamento dos recursos hídricos por fornecer informações atualizadas, que facilitam diagnósticos de parâmetros biofísicos e ocupações sustentáveis em bacias hidrográficas (NOVAIS et. al., 2011; COELHO et. al., 2013).. Estas geotecnologias, considerando também o SIG, se mostram

importantes para os estudos aplicados ao mapeamento do uso do solo e para a delimitação de bacias hidrográficas, fornecendo um direcionamento para obtenção de informações sistematizadas com um bom nível de detalhamento. Ainda no mapeamento do uso do solo, é possível realizar uma avaliação da cobertura vegetal com a utilização de imagens de satélites a partir da determinação de índices de vegetação como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), o índice de Área Foliar (IAF), o Índice de Realce da Vegetação (EVI) e o Índice de Vegetação Ajustado por Solo), que fornecem informações a partir de estimativas espectrais para avaliação quantitativa e qualitativa de fatores diretamente relacionados com a cobertura vegetal, sendo bons indicadores de qualidade ambiental (SANTOS e SANTOS, 2010; MELO, 2014).

### **3.4 Aspectos legais**

O Brasil teve como primeira lei voltada diretamente para os recursos hídricos o Código das Águas – Decreto n° 24.643 (BRASIL, 1934), que tinha como principal objetivo o controle público dos rios para o aproveitamento do potencial hidrelétrico e ainda está em vigor, mesmo sendo modificada por leis posteriores.

A Constituição Federal (BRASIL, 1988) definiu como competência dos Estados e do Distrito Federal deliberar sobre os critérios de outorga de direitos de uso de água, fazendo com que a água subterrânea seja regulamentada através de leis estaduais.

Com o intuito de orientar a gestão das águas em todo o território nacional, foi sancionada a Política Nacional de Recursos Hídricos – PNRH, instituída pela Lei Federal n° 9.433 (BRASIL, 1997). Esta lei adotou instrumentos legais e institucionais que complementaram o já existente Código das Águas. Para cumprir com seus objetivos, a PNRH conta com cinco instrumentos: os Planos de Recursos Hídricos, elaborados por bacia hidrográfica e pelo governo de cada Estado; o enquadramento dos corpos d'água em classes segundo os usos preponderantes da água; a outorga de direito de uso; a cobrança pelo uso dos Recursos Hídricos; e o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos (COUCEIRO e HAMADA, 2011).

Ainda no âmbito federal, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH, em suas resoluções específicas, traz os principais documentos disciplinadores relacionados à água subterrânea. A Resolução CNRH n° 15/2001 tem como objetivo a gestão integrada entre águas subterrâneas e superficiais, além de prever que os

municípios devem ser orientados no que diz respeito às diretrizes para promoção da gestão integrada em seus territórios, em consonância com os planos de recursos hídricos. Já a Resolução CNRH nº 92/2008 estabelece critérios e procedimentos gerais para proteção e conservação das águas subterrâneas no território brasileiro, visando identificar, prevenir e reverter processos de superexploração, poluição e contaminação, considerando especialmente as áreas de uso restritivo previstas na Resolução CNRH nº 22/2002, na qual objetiva introduzir as águas subterrâneas nos planos de recursos hídricos (GRANZIERA e GRANZIERA; 2014)

Em Alagoas, a Lei Estadual nº 5.965 (ALAGOAS, 1997) dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos. As diretrizes para conservação e proteção das águas subterrâneas de domínio do Estado são regulamentadas através da Lei Estadual nº 7.094 (ALAGAS, 2009).

### **3.5 Proteção da água subterrânea**

Para FOSTER et. al. (2006), a proteção dos aquíferos contra a contaminação só ocorrerá com a restrição do uso do solo, da emissão de efluentes e das práticas de despejo de resíduos. Como do ponto de vista socioeconômico é um processo impraticável, cabe a definição de estratégias de proteção que admitam concessões entre os interesses conflitantes.

Medidas de controle de uso e ocupação do solo em uma determinada região podem ser estratégias para a proteção da água subterrânea, em escala regional esse controle é passível de ser feito identificando áreas mais suscetíveis, como o mapeamento da vulnerabilidade do aquífero (DIAS et. al., 2004).

Em escala federal, a PNRH propõe em suas diretrizes uma articulação da gestão de recursos hídricos com a do uso de solo (inciso V, Art. 3º), devendo conter propostas para a criação de áreas sujeitas a restrição de uso, com vistas à proteção dos recursos hídricos, nos Planos de Recursos Hídricos (inciso X, Art. 7º) (OHOFUGI, 2020).

No âmbito estadual, a Lei nº 7.094 (ALAGOAS, 2009), em seu Art. 12º orienta aos Municípios a importância do uso e ocupação do solo, em especial às áreas de recarga (direta e indireta) e descarga de aquíferos. A mesma lei, no Art. 14º, também traz a obrigação de realizar a caracterização da hidrogeologia local e regional, bem como medidas de proteção emergencial e de recuperação a serem adotados pelo

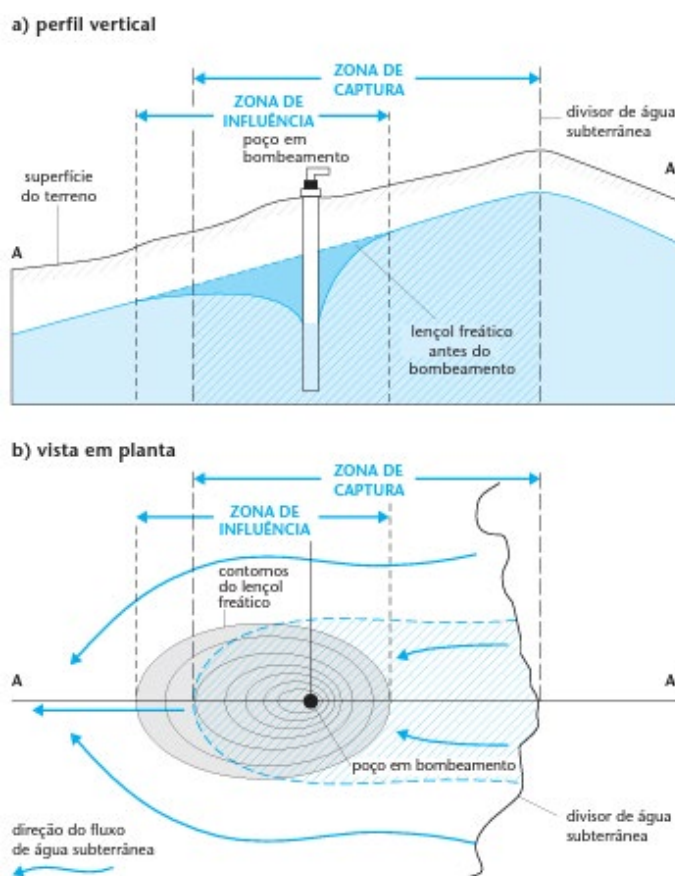
órgão ambiental e pelo órgão gestor de recursos hídricos na implementação ou ampliação de empreendimentos industriais, agropecuários, agroindustriais, aterros sanitários, cemitérios, obras civis subterrâneas ou qualquer outra fonte potencialmente impactantes nas águas subterrâneas, que tragam periculosidade e risco à saúde pública.

Outro enfoque para a proteção da água subterrânea é a proteção pontual, voltada à captação da água, como estabelecimento de perímetros de proteção de poços, em especial aqueles destinados ao abastecimento público. A área a ser protegida é denominada de Zona de Contribuição (ZC) ou Zona de Captura, delimitada pelas linhas de fluxo que convergem ao ponto de captação (DIAS et. al., 2004).

O conceito de perímetros de proteção de fontes de captação subterrânea surgiu nas legislações de países europeus há muitas décadas. Todavia, a constante ampliação dos conhecimentos hidrogeológicos e as frequentes mudanças no tipo de ameaças à qualidade da água subterrânea implicam alterações significativas no conceito, que requerem consolidação (FOSTER et. al., 2006).

Através da Figura 1, é possível distinguir a zona de captura, área de contribuição da fonte de abastecimento, da zona de influência, área afetada pelo bombeamento do poço, causando um rebaixamento do nível do lençol freático.

Figura 1: Distinção entre zona de captura e zona de influência de um poço de produção.



Fonte: FOSTER et. al., 2006.

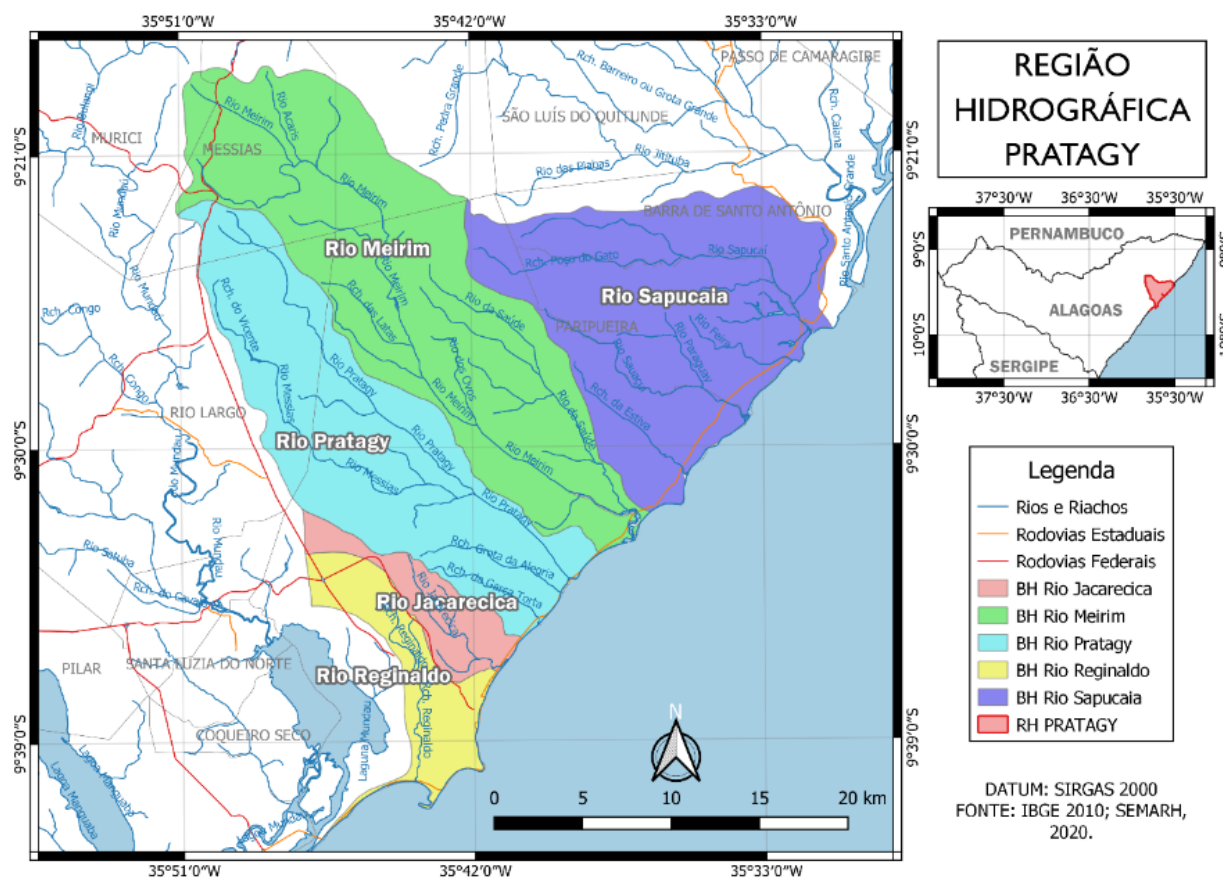
No Brasil, não há legislações no âmbito federal que regulamentem a delimitação do PPP, já que a PNRH (BRASIL, 1997) atribui a responsabilidade de gestão dos recursos hídricos subterrâneos aos estados.

O estado de Alagoas, através da Lei nº 7.094 (ALAGOAS, 2009) em seu Art. 16, determina que as captações de água subterrânea deverão ser dotadas medidas adequadas de proteção, com a instituição de perímetros de proteção sanitária e de alerta. Porém a lei não determina qualquer especificação para a delimitação destas áreas.

### 3.6 Área de estudo – Bacia do Rio Pratagy

A Bacia do Rio Pratagy está localizada na Região Hidrográfica Pratagy, que por sua vez abrange uma série de pequenas bacias hidrográficas, como pode ser observado na Figura 2, que desaguam diretamente no Oceano Atlântico. O principal problema da região, que abrange a Região Metropolitana de Maceió - RMM, é o uso e a ocupação desordenada do solo e dos recursos hídricos (SEMARH, 2006).

Figura 2: Região Hidrográfica Pratagy.



Fonte: Autora, 2022.

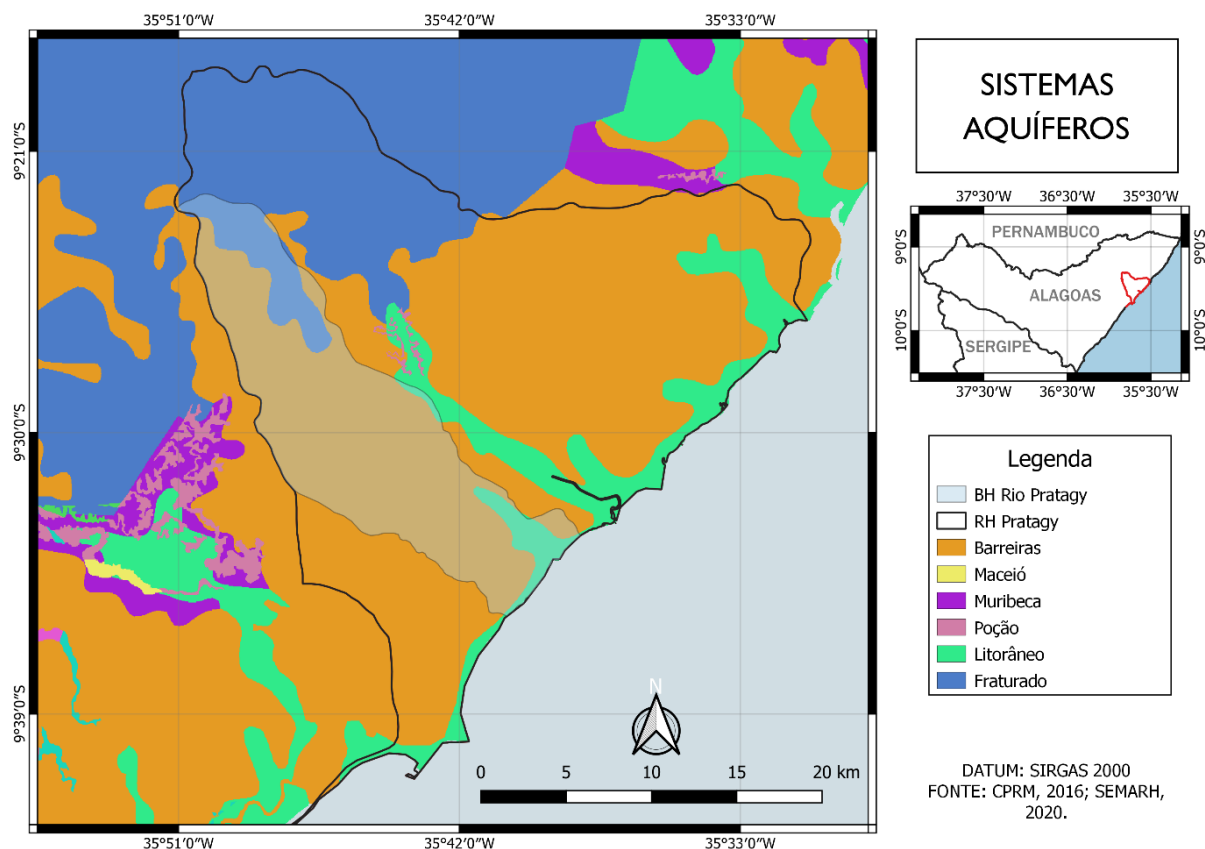
A região de estudo possui uma área com cerca de 194 km<sup>2</sup> e abrange os municípios de Maceió, Rio Largo e Messias. O Rio Pratagy tem suas nascentes na Zona da Mata Alagoana, próxima a sede municipal de Messias, e percorre uma extensão de 31,2 km até sua confluência com o Oceano Atlântico (SEMARH, 2006).

Grande parte da cidade de Maceió é abastecida por mananciais subterrâneos, a captação subterrânea corresponde a 68% do abastecimento do município, incluindo poços pertencentes a sistemas isolados, que atendem a conjuntos habitacionais específicos, ou os que se encontram interligados ao Sistema Pratagy. O Rio Pratagy, através do Sistema Pratagy, corresponde a cerca de 12% do abastecimento, garantindo o fornecimento de água aos bairros localizados na zona baixa (CASAL, 2020).

Na região da Bacia Hidrográfica do Rio Pratagy é possível observar três sistemas aquíferos, como ilustrado na Figura 3. O Aquífero Fraturado tem ocorrência na região alta da bacia, englobando rochas cristalinas e cristalofilianas do Maciço Pernambuco-Alagoas e possui valores baixos da capacidade de armazenamento e da condutividade hidráulica. A maior parte do território da bacia é enquadrada no Aquífero

Barreiras, sob forma de extensos tabuleiros costeiros, sendo ele isolado ou em conjunto com a Formação Marituba e utilizado para o abastecimento público como o principal manancial na região. Por fim, na região de costa é encontrado o Aquífero Litorâneo, incluindo depósitos recentes representados por sedimentos de aluvião, de dunas, de praias e mangues (SEMARH, 2006).

Figura 3: Sistemas Aquíferos na Bacia Hidrográfica do Rio Pratagy.



Fonte: Autora, 2022.

A bacia hidrográfica em estudo é parte integrante na Área de Proteção Ambiental do Pratagy, criada pelo Decreto nº 37.589/1998, com o objetivo de harmonizar as atividades com o equilíbrio ambiental do ecossistema da bacia. A APA do Pratagy possui grande influência do desmatamento causado pela cultura de cana-de-açúcar, comum no território alagoano, e da ocupação desordenada às margens do rio, por povoados ribeirinhos (IMA, 2005).

SILVA (2013), objetivou em seu estudo analisar a vulnerabilidade aquífera à poluição na Região Metropolitana de Maceió, através da determinação das áreas mais propícias à contaminação e dos locais já contaminados. Sendo assim, as áreas que apresentaram maiores índices de vulnerabilidade estavam locadas em áreas urbanizadas ou de especulação imobiliária, já as áreas identificadas como restritas ao



uso das águas subterrâneas se localizavam na parte baixa da cidade, dos bairros de Jatiúca até o Pontal da Barra, além dos bairros que margeiam a orla lagunar.

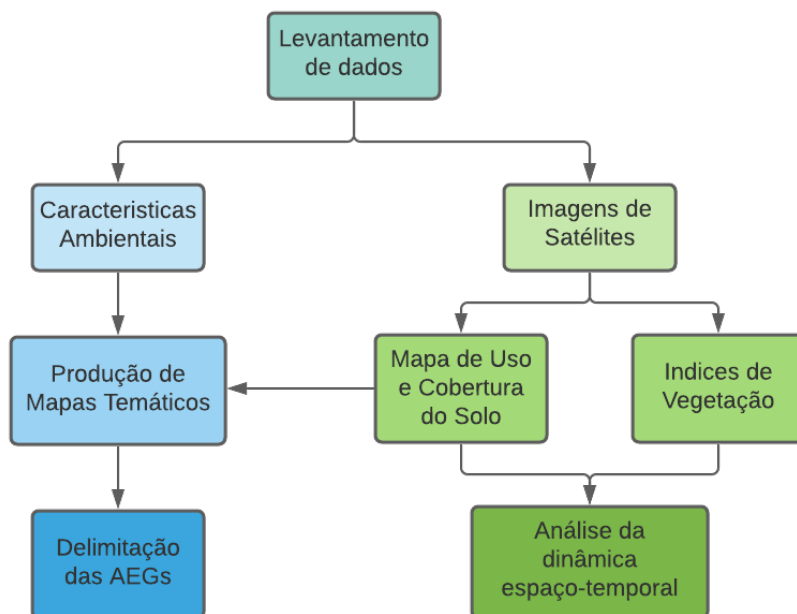
Segundo JESUS (2021), as regiões mais vulneráveis à contaminação da Bacia do Rio Pratagy estão situadas entre os Bairros da Guaxuma a Garça Torta, podendo destacar o grau de confinamento do aquífero, as baixas profundidades do lençol freático e o saneamento inadequado na região como principais fatores de contribuição deste resultado.

SOBRINHO (2021) propôs em seu estudo uma metodologia para identificação de áreas potenciais de recarga subterrânea na bacia do Rio Pratagy, indicando que as áreas caracterizadas com alto potencial de recarga se mostraram predominantes em áreas ribeirinhas aos cursos d'água, sendo de extrema importância à adoção de políticas públicas para proteção destas áreas. As zonas de recarga presentes em áreas urbanas também se tornam áreas de maior vulnerabilidade, visto que uma maior permeabilidade do solo permite a penetração de contaminantes no aquífero. As zonas com baixo potencial também necessitam de atenção em função dos riscos de inundação nestas regiões, já que tendem a serem áreas com baixa ou nenhuma infiltração no solo.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 4 apresenta as etapas que serão executadas buscando alcançar os objetivos do presente estudo, estas serão detalhadas nos itens seguintes.

Figura 4: Fluxograma da metodologia utilizada.



Fonte: Autora, 2022.

### 4.1 Levantamento de dados

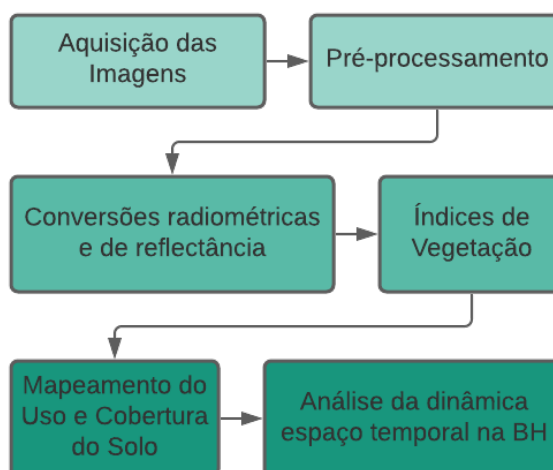
Para realizar o presente estudo foram utilizadas diversas fontes de dados, de modo a serem complementares e permitam um maior detalhamento da área. Obtendo assim, dados referentes as seguintes fontes:

- a) Revisão de literatura: trabalhos desenvolvidos na região de estudo, legislações específicas, dentre outras publicações que contenham informações que possam ser utilizados para subsidiar este estudo;
- b) Dados governamentais: Secretaria do Estado do Planejamento, Gestão e Patrimônio – SEPLAG/AL, Secretaria do Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SEMARH/AL, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, Serviço Geológico do Brasil – CPRM, Sistema Nacional de Informações Hidrológicas - HidroWeb/ANA, Sistema de Informações de Qualidade de Água – SISÁGUA/MS, Earth Explorer/USGS, dentre outros.

## 4.2 Análise dinâmica espaço-temporal da bacia hidrográfica

O processo metodológico para realizar a análise da dinâmica espaço-temporal foi dividido em etapas, que podem ser observadas na Figura 5 e caracterizada nos tópicos abaixo.

Figura 5: Metodologia para análise da dinâmica espacial.



Fonte: Autora, 2022.

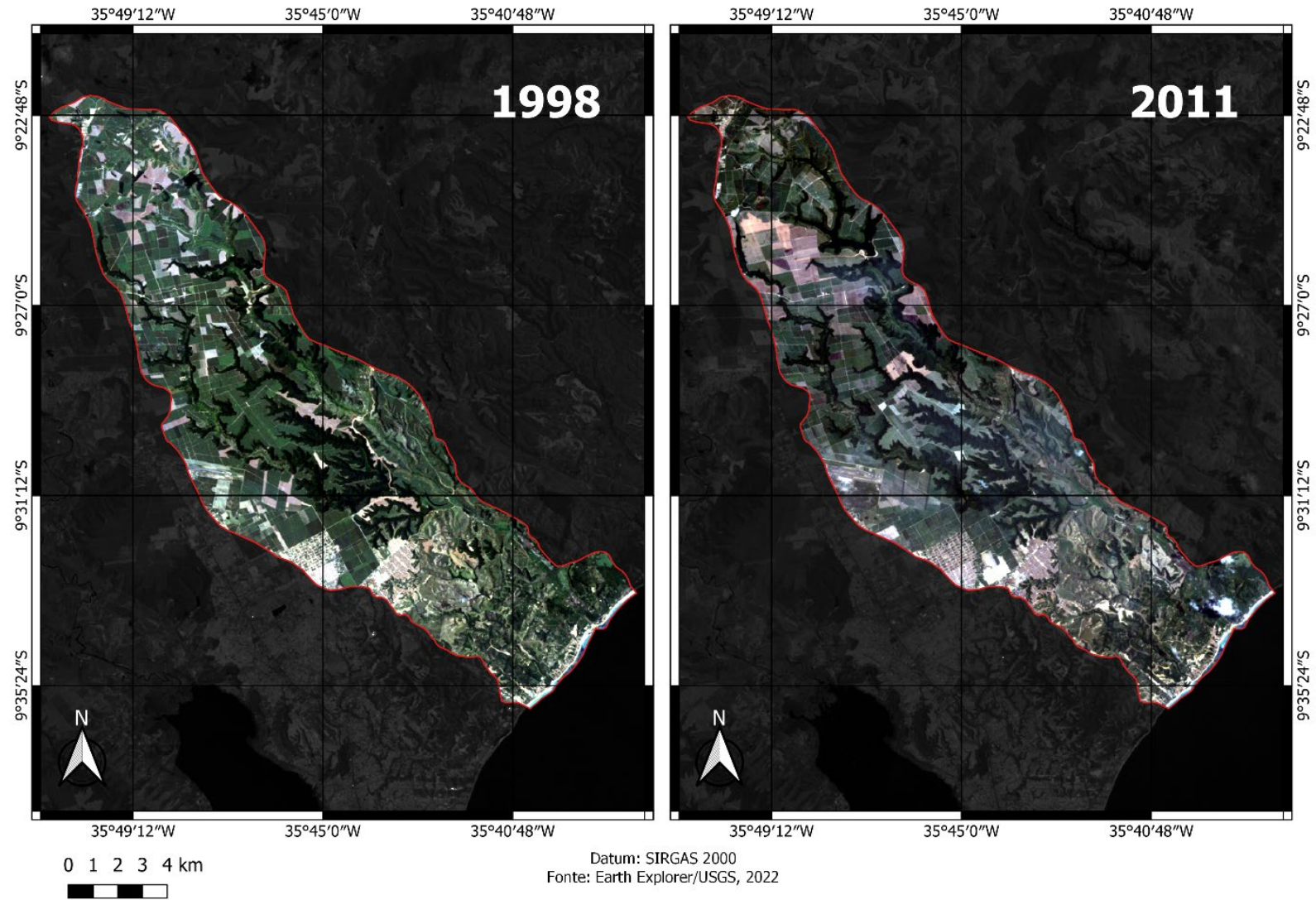
### 4.2.1 Aquisição das imagens

Para realização deste estudo, foram utilizadas imagens sem cobertura de nuvens obtidas pelo sensor TM (Thematic Mapper), a bordo do satélite Landsat-5, de órbita 214 e ponto 67, correspondente aos dias 21/09/1998 e 17/03/2011. As imagens foram obtidas através da plataforma Earth Explorer, do Serviço Geológico dos Estados Unidos - USGS, no qual as cenas são fornecidas gratuitamente em formato *tiff*, ortorretificadas e georreferenciadas, além de fornecer também o arquivo de metadados. O satélite possui resolução espacial de 30x30 metros, com cada pixel cobrindo 900m<sup>2</sup>, resolução temporal de 16 dias e radiométrica de 8 bits.

### 4.2.2 Pré-processamento das imagens

O software QGIS 3.16.11 foi utilizado para localização espacial, na qual realizou-se o empilhamento das bandas 1,2,3,4,5 e 7 e a reprojeção de Datum SAD 69 para o SIRGAS 2000. Na Figura 6 é possível observar a composição das bandas 3, 2 e 1.

Figura 6: Composição das bandas R3-G2-B1 do Landsat-5/TM.



Fonte: Autora, 2022.

#### 4.2.3 Conversões radiométricas e de reflectância

O sensor TM capta a radiância espectral dos alvos e registra-os em pixels de imagens digitais. Cada pixel possui um valor numérico chamado nível de cinza (ND), cujos valores variam de 0 a 255 (8 bits). Na Tabela 1, verificam-se os coeficientes de calibração para conversão dos números digitais propostos por CHANDER e MARKHAM (2003).

Tabela 1: Bandas espectrais do sensor TM e coeficientes de calibração.

Bandas	Faixa espectral (μm)	Coeficiente de Calibração Radiométrica (Wm <sup>-2</sup> μm <sup>-1</sup> )						K <sub>λi</sub> (Wm <sup>-2</sup> μm <sup>-1</sup> )
		De 01/03/1984		De 05/05/2003		Após 02/04/2007		
		Até 04/05/2003		Até 01/04/2007				
		a	b	a	b	a	b	
1 Azul	0,45-0,52	-1,52	152,10	-1,52	193,00	-1,52	169,00	1957
2 Verde	0,52-0,60	-2,84	296,81	-2,84	365,00	-2,84	333,00	1826
3 Vermelho	0,63-0,69	-1,17	204,30	-1,17	264,00	-1,17	264,00	1554
4 Infravermelho Próximo	0,76-0,79	-1,51	206,20	-1,51	221,00	-1,51	221,00	1036
5 Infravermelho Médio	1,55-1,75	-0,37	27,19	-0,37	30,20	-0,37	30,20	215
6 Infravermelho Termal	10,4-12,5	1,2378	15,303	1,2378	15,303	1,2378	15,303	1
7 Infravermelho Distante	2,08-2,35	-0,15	14,38	-0,15	16,50	-0,15	16,50	80,67

Fonte: adaptada MELO (2014).

- Conversão dos números digitais em valores de radiância

Os números digitais em imagens de satélite não possuem valor físico. Para a conversão dos números digitais em valores físicos de radiância ( $L_{\lambda i}$ ), foram utilizados os coeficientes de calibração listados na Tabela 1. O conjunto da radiância, ou calibração radiométrica, é obtido utilizando-se a Equação 1 proposta por MARKHAM e BAKER (1987):

$$L_{\lambda i} = a_i + \frac{(b_i - a_i)}{255} \times ND \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

$a_i$  e  $b_i$  = irradiâncias espectrais mínimas e máximas;

ND = intensidade do pixel (0 a 255);

i = bandas (1,2,3,4,5,6 e 7) do Landsat-5/TM.

- Conversão da radiância em valores de refletância

Após a conversão dos NDs registrados nos pixels das imagens em valores de radiância, o próximo passo foi a obtenção dos valores de refletâncias monocromáticas

de cada banda ( $\rho_{\lambda i}$ ) que pode ser definida como a razão entre o fluxo de radiação refletida e o fluxo de radiação incidente, que é obtido através da Equação 2:

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda i}}{K_{\lambda i} \cdot \cos Z \cdot dr} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

$L_{\lambda i}$  = radiância espectral de cada banda;

$K_{\lambda i}$  = irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera

$Z$  = ângulo zenital solar;

$dr$  = inverso do quadrado da distância percorrida pela radiação eletromagnética proveniente do Sol até a Terra.

Sendo:

$$dr = 1 + \cos \left( DJ \cdot \frac{2\pi}{365} \right) \quad (\text{Equação 3})$$

$$\cos Z = \cos \left( \frac{\pi}{2} - E \right) = \sin E \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

$DJ$  = dia juliano em relação ao primeiro dia de seu mesmo ano;

$E$  = ângulo de elevação do sol.

As informações correspondentes à órbita, ponto, dia, ângulo de elevação do Sol e distância relativa Terra-Sol de cada imagem estão especificadas na Tabela 2.

Tabela 2: dados utilizados para calibração das imagens.

Órbita	Data	Ponto	DJ	E (°)	SEN(E)	dr
214	17/03/2011	67	76	56,41419	0,83315	1,00856
214	21/09/1998	67	264	39,95561	0,64219	0,99449

Fonte: Autor, 2022.

#### 4.2.4 Índices de Vegetação

- Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI

Para determinar o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada, foi utilizado o método proposto por ROUSE et. al. (1973), representado pela Equação 5. O NDVI é a razão entre a diferença das reflectividades das bandas do infravermelho próximo e do vermelho e pela soma dessas mesmas reflectividades, caracterizado por ser um indicador sensível da quantidade e condição da vegetação, cujos valores variam no

intervalo de -1 a 1. Nas superfícies que contêm água ou nuvens, esta variação é sempre menor do que 0 (BORATTO e GOMIDE, 2013) .

$$NDVI = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:  $\rho_3$  e  $\rho_4$  são os valores da refletância das bandas 3 e 4 do Landsat 5 TM.

○ Índice de Vegetação Ajustado ao Solo – SAVI

O Índice de Vegetação Ajustado ao Solo, Equação 6, foi desenvolvido por HUETE (1988a) para minimizar a influência da refletância do solo nos índices de vegetação espectrais que envolvem os comprimentos de onda do vermelho e infravermelho próximo.

$$SAVI = \frac{(1 + L)(\rho_4 - \rho_3)}{(L + \rho_4 + \rho_3)} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde: L é uma constante denominada de fator de ajuste do índice SAVI, podendo assumir valores de 0,25 a 1 dependendo da cobertura do solo. Foi indicado por HUETE (1988b) que para vegetações densas o valor para L seja de 0,25 e para vegetações densas seja de 1,0. O valor de L mais utilizado é 0,5 que corresponde a vegetações intermediárias (BORATTO e GOMIDE, 2013).

#### 4.2.5 Mapeamento do Uso e Cobertura do Solo

O mapeamento das mudanças ocorridas ao longo do tempo se deu por três formas: elaboração de mapas temáticos a partir da classificação dos resultados fornecidos pelos índices NDVI e SAVI e classificação não supervisionada das imagens do Landsat-5/TM. Estas respostas permitem analisar a dinâmica e as modificações em todo o território da bacia hidrográfica em estudo.

Para a classificação não supervisionada, que consiste no agrupamento de pixels segundo suas características espectrais através de um algoritmo de forma automática, foram utilizadas as mesmas imagens que serviram de base à construção dos índices de vegetação, pelo completo KMeansClassification, do Orfeo ToolBox, no software QGIS 3.16.11.

Nas três situações, a divisão foi feita em quatro classes:

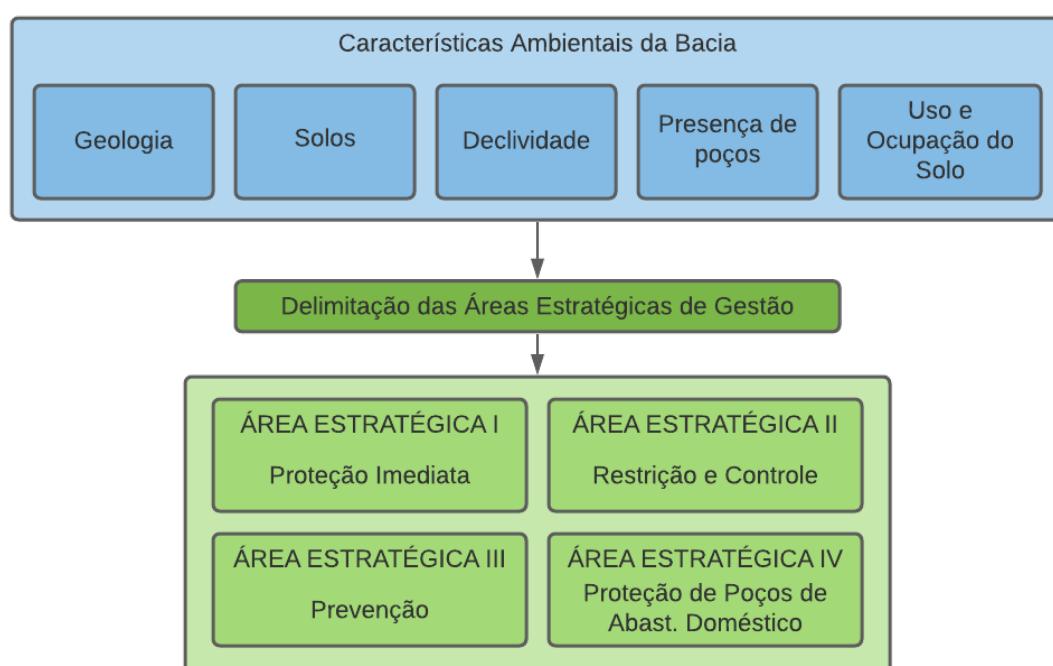
- Vegetação Densa: áreas ocupadas por florestas nativas, incluindo matas ciliares;

- Cana/Pasto: áreas ocupadas pelo cultivo da cana-de-açúcar e pastagens, foram agrupadas por apresentarem o mesmo padrão fisionômico na resolução espacial da imagem adotada, o que dificultou a separação destas classes sem apoio de dados de campo;
- Área Urbana/Solo Exposto: áreas ocupadas por construções, estradas, propriedades rurais e presença de solo exposto;
- Água: engloba todos os corpos hídricos.

### 4.3 Delimitação das áreas estratégicas de gestão

O processo metodológico para realizar a delimitação das áreas estratégicas foi dividido em etapas, que podem ser observadas na Figura 6 e caracterizada nos tópicos abaixo.

Figura 7: Metodologia para delimitação das AEGs.



Fonte: Adaptado OHOFUJI (2020).

#### 4.3.1 Produção de Mapas Temáticos

Nesta etapa do trabalho, foi realizado uma análise das variáveis físicas ambientais que contribuem com o processo de recarga subterrânea em uma bacia, buscando obter informações sobre as condições ambientais básicas da bacia de estudo, de acordo com a metodologia proposta por OHOFUJI (2020). Para a determinação das áreas estratégicas, os temas levantados foram: Potencial de



Recarga Subterrânea, Geologia, Solos, Declividade, Uso e Cobertura do Solo e Poços de Abastecimento Humano.

A delimitação do potencial de recarga subterrânea foi realizada por SOBRINHO (2021), na qual a classificação dividiu-se em alto, médio e baixo potencial. Para a produção do mapa temático de UCS, utilizou-se o delimitado na etapa anterior para o ano de 2011. Os dados de geologia e pedologia foram disponibilizados pela CPRM e IBGE, respectivamente, ambos em arquivos vetorizados (*shape*), que foram convertidos para o formato *raster*. Já o mapa de declividade foi gerado a partir de um Modelo Digital de Elevação – MDE, obtido pela plataforma do TOPODATA, através da função “*r.slope.aspect*” disponível no software QGIS.

A integração e tratamento de dados foi executada por meio de um Sistema de Informações Geográficas – SIG, o software QGIS versão 3.6.11, utilizando técnicas de geoprocessamento para dados *Raster*, com uso de classificação dos dados, a partir do uso da função *Raster Calculator*.

#### 4.3.2 Determinação das condicionantes ambientais para cada AEG

As condicionantes ambientais adotadas para cada AEG foram definidas baseadas na metodologia disposta por OHUFIGI (2020), considerando as características da bacia do Rio Pratygy, na qual foi considerado e proposto a proteção das áreas potenciais de recarga subterrânea, já que não é possível identificar as efetivas localizações das áreas de recarga devido à falta de dados hidrogeológicos da região.

Quadro 1: Condicionantes ambientais das Áreas Estratégicas propostas.

Áreas Estratégicas	Condicionantes Ambientais
Área Estratégica I	a) Áreas de alto potencial de recarga subterrânea; b) Áreas que possuem sistema aquífero granular; c) Áreas com declividade plana e suave ondulada; d) Presença de solos Neossolos e Latossolos; e) Presença de vegetação nativa.

Área Estratégica II	a) Áreas de alto e médio potencial de recarga subterrânea; b) Áreas que possuem sistema aquífero granular e fissural; c) Áreas com declividade plana, suave ondulada e ondulada; d) Presença de solos Neossolos e Latossolos; e) Presença de vegetação nativa e área urbanizada.
Área Estratégica III	a) Áreas de médio e baixo potencial de recarga subterrânea; b) Áreas de sistema aquífero fissural; c) Declividades suave ondulada, ondulada e forte ondulado; d) Presença de solos Neossolos e Latossolos; e) Presença de vegetação nativa e área urbanizada.
Área Estratégica IV	a) Poços de captação subterrânea para abastecimento doméstico.

Fonte: Adaptado OHUFUJI (2020).

#### 4.3.3 Delimitação das Áreas Estratégicas de Gestão

Para a intersecção das áreas estratégicas, baseadas nas condicionantes ambientais determinadas neste estudo, novamente foi utilizado técnicas de geoprocessamento de dados Raster ainda no software QGIS 3.16.11.

Foi atribuído para aos mapas temáticos de cada tema o peso de 1 ou 0, utilizando álgebra de mapas na *Calculadora Raster* do QGIS, para a delimitação de cada área estratégica. O peso 1 foi atribuído para as condicionantes ambientais propostas para cada área, enquanto as áreas que não pertenciam a estas condicionantes receberam o valor de 0. Sendo assim, a multiplicação destes mapas já com a distribuição de pesos possibilitou identificar a intersecção com todas as condicionantes propostas, resultando no mapeamento de cada área estratégica.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Índices de Vegetação

#### 5.1.1 NDVI

Com o resultado da aplicação do NDVI para as imagens referentes aos anos 1998 e 2011 foram obtidos os valores mínimo e máximo das estatísticas de grade para cada ano estudado, faz-se necessário o conhecimento deste intervalo para a análise e definição das classes para cada feição. Na tabela 3 são apresentados os dados obtidos:

Tabela 3: Valores de máximo e mínimo para o índice NDVI.

Anos	Valor de Mínimo	Valor de Máximo
<b>1998</b>	-0,3684	0,9209
<b>2011</b>	-0,1161	0,8856

Fonte: Autora, 2022.

A partir dos valores de máximo e mínimo foram definidos quatro intervalos para as classes de alvos a serem analisados: água, área urbanizada/solo exposto, cana/pasto e vegetação densa. Na Figura 8 é possível visualizar o intervalo distribuído para cada uma das classes, bem como sua distribuição espacial, e na Tabela 4 a área atribuída para cada classe.

Percebe-se que todas as classes apresentam uma certa variação em seus intervalos para os anos analisados, podendo ser justificado pela modificação das respostas espectrais em consequência das mudanças meteorológicas, como a presença de água e o consequente aumento da umidade do solo (FONSECA, 2017). Os valores próximos a 1 indicam a presença de vegetação densa e de umidade do solo, já os valores negativos ou próximos de zero são referentes aos corpos hídricos. Os valores medianos correspondem às áreas com pouca ou nenhuma vegetação.

Tabela 4: Medidas de classe em área e percentual para os anos 1998 e 2011 pelo NDVI.

Classe	1998		2011	
	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentagem	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentagem
<i>Água</i>	0,9034	0,46%	1,6643	0,86%
<i>Área Urbana/Solo Exposto</i>	26,8807	13,82%	49,4024	25,40%
<i>Cana/Pasto</i>	138,9052	71,43%	110,1556	56,64%
<i>Vegetação Densa</i>	27,7836	14,29%	33,2695	17,11%

Fonte: Autora, 2022.

Nota-se que há um aumento quantitativo de Vegetação Densa, porém não necessariamente significa um aumento de vegetação nativa. A modificação pode ser pelas plantações de cana-de-açúcar estarem em fase adulta, no qual permite que

sejam confundidas com a densidade da vegetação nativa presente na região da bacia. Há também um aumento da área para a classe de água, atribuída aos corpos hídricos superficiais da bacia, pela construção de uma barragem no percurso do Rio Pratygy. Mesmo tendo a finalidade de suprir as demandas de irrigação da região, há a possibilidade de o aumento da disponibilidade hídrica na bacia resultar na recuperação de algumas áreas degradadas, aumentando as áreas de vegetação. O aumento significativo de solo exposto na área da bacia pode ter relação com a colheita da cana-de açúcar, que ocorre entre os meses de novembro a abril em Alagoas, já que a imagem utilizada para o ano de 2011 é referente ao mês de março, coincidindo com o período de colheita e início do plantio.

### 5.1.2 SAVI

Diferente do NDVI, o índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) incorpora um valor de ajuste (L), que atua na minimização dos efeitos da reflectância do solo. Sendo assim, também foram adquiridos os dados das estatísticas de grades dos valores de máximo e mínimo, apresentados na Tabela 5:

Tabela 5: Valores de máximo e mínimo para o índice SAVI.

<b>Anos</b>	<b>Valor de Mínimo</b>	<b>Valor de Máximo</b>
<b>1998</b>	-0,4032	1,2961
<b>2011</b>	-0,1474	1,2585

Fonte: Autora, 2022.

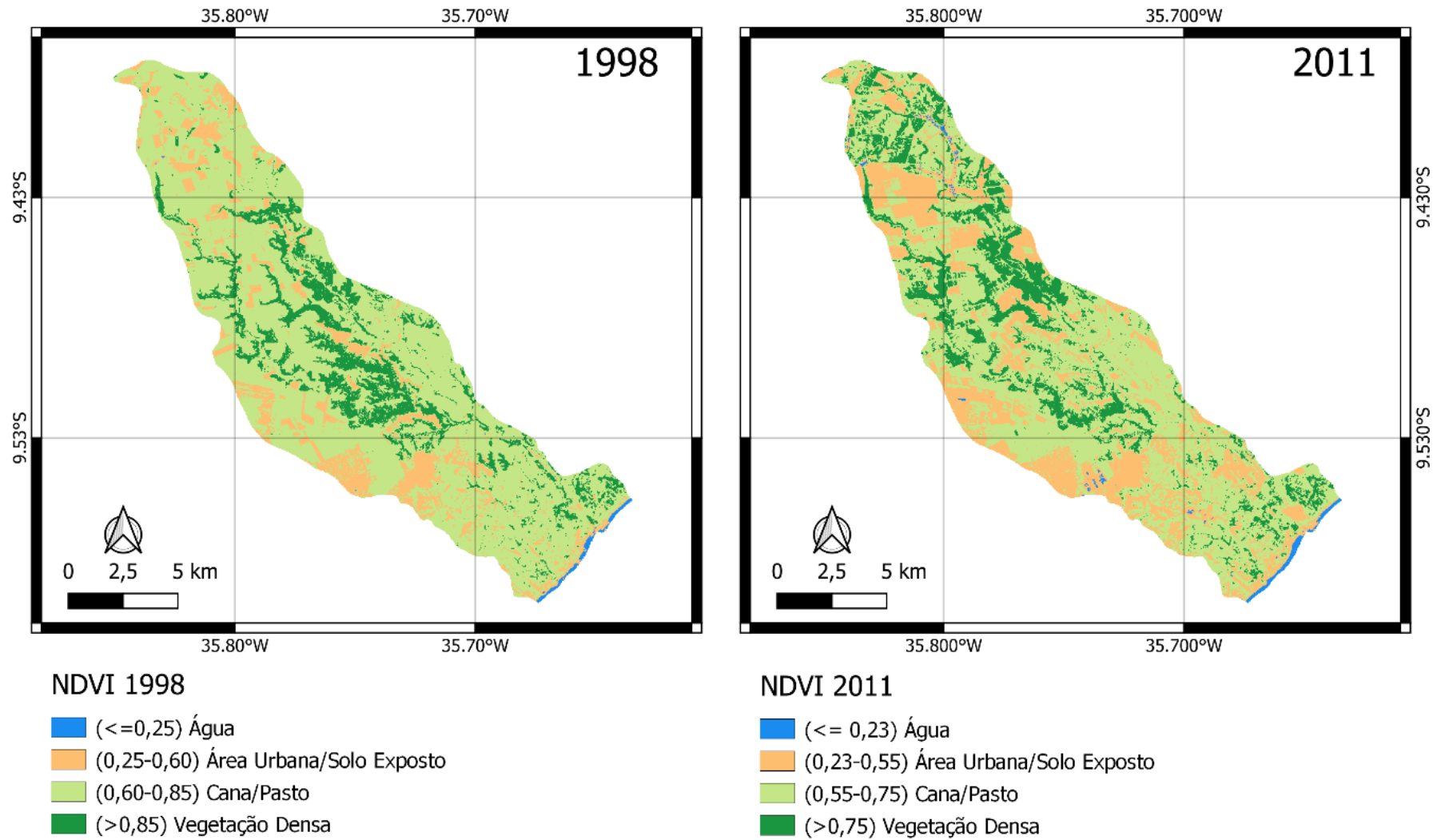
Fazendo o uso desses valores foi definido um intervalo considerando como classes para estudo: água, área urbanizada/solo exposto, cana/pasto e vegetação densa. Na Figura 9 é possível visualizar o intervalo distribuído para cada uma das classes, bem como sua distribuição espacial. Apesar dos intervalos considerados para a classificação das feições obtidos com o SAVI apresentarem similaridade com as definidas pelo NDVI, percebe-se que o SAVI apresentou uma melhor delimitação para os corpos hídricos e um aumento da presença da fisionomia de Vegetação Densa. Na tabela 6 é possível observar as áreas de cada classe para os dois anos analisados.

Tabela 6: Medidas de classe em área e percentual para os anos 1998 e 2011 pelo SAVI.

<b>Classe</b>	<b>1998</b>		<b>2011</b>	
	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentagem</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentagem</b>
<i>Água</i>	1,0512	0,54%	2,1123	1,09%
<i>Área Urbana/Solo Exposto</i>	36,7554	18,90%	43,2196	22,22%
<i>Cana/Pasto</i>	121,2924	62,37%	112,3371	57,76%
<i>Vegetação Densa</i>	35,3740	18,19%	36,8228	18,93%

Fonte: Autora, 2022.

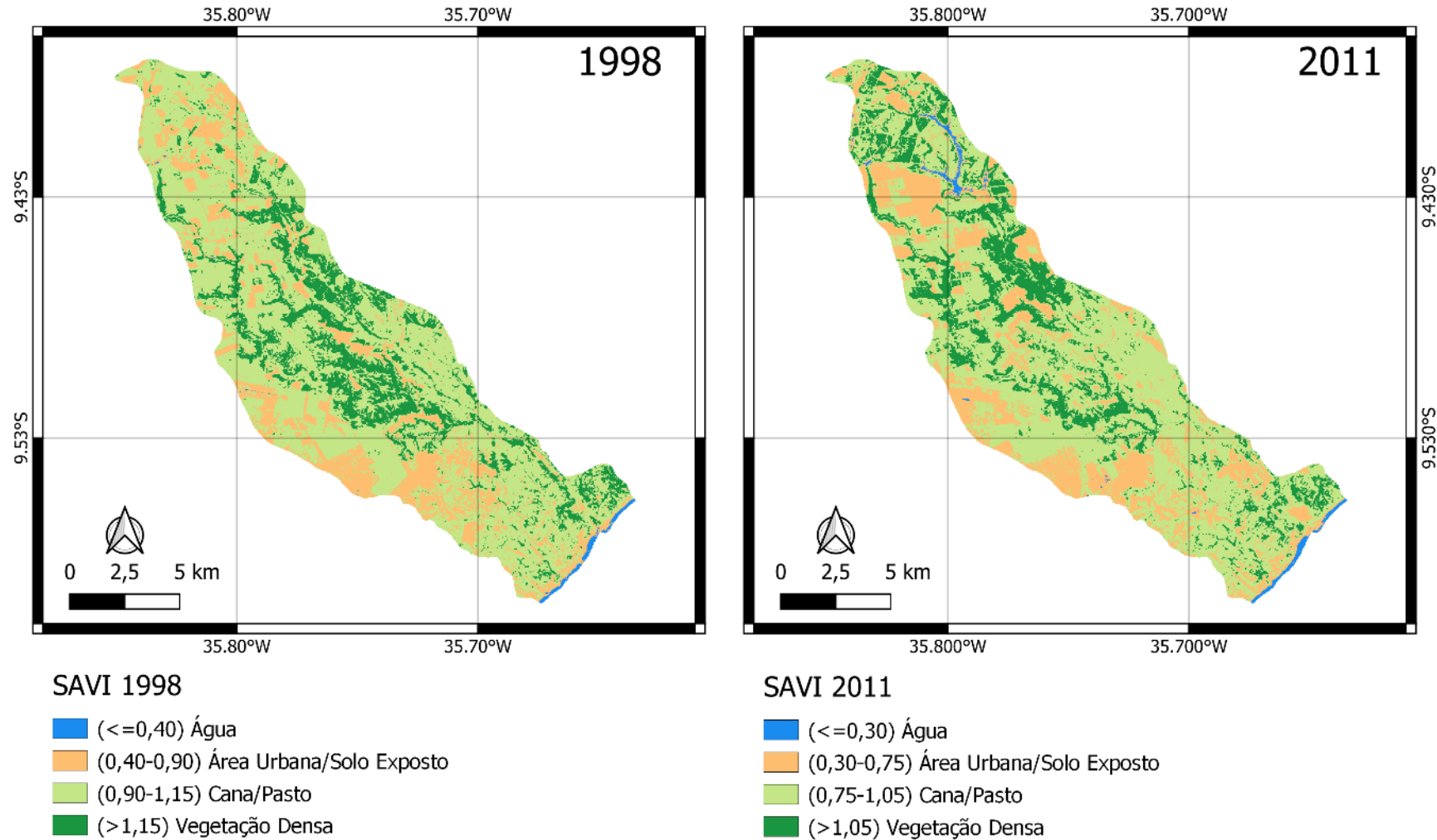
Figura 8: Aplicação do NDVI na região da bacia hidrográfica do Rio Pratygy.



Datum: SIRGAS 2000

Fonte: Autora, 2022.

Figura 9: Aplicação do SAVI na região da bacia hidrográfica do Rio Pratygy.



Datum: SIRGAS 2000

Fonte: Autora, 2022.

## 5.2 Classificação Não-Supervisionada

A tabela 7 mostra os dados quantitativos de cada classe e a Figura 10 representa o mapa de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica

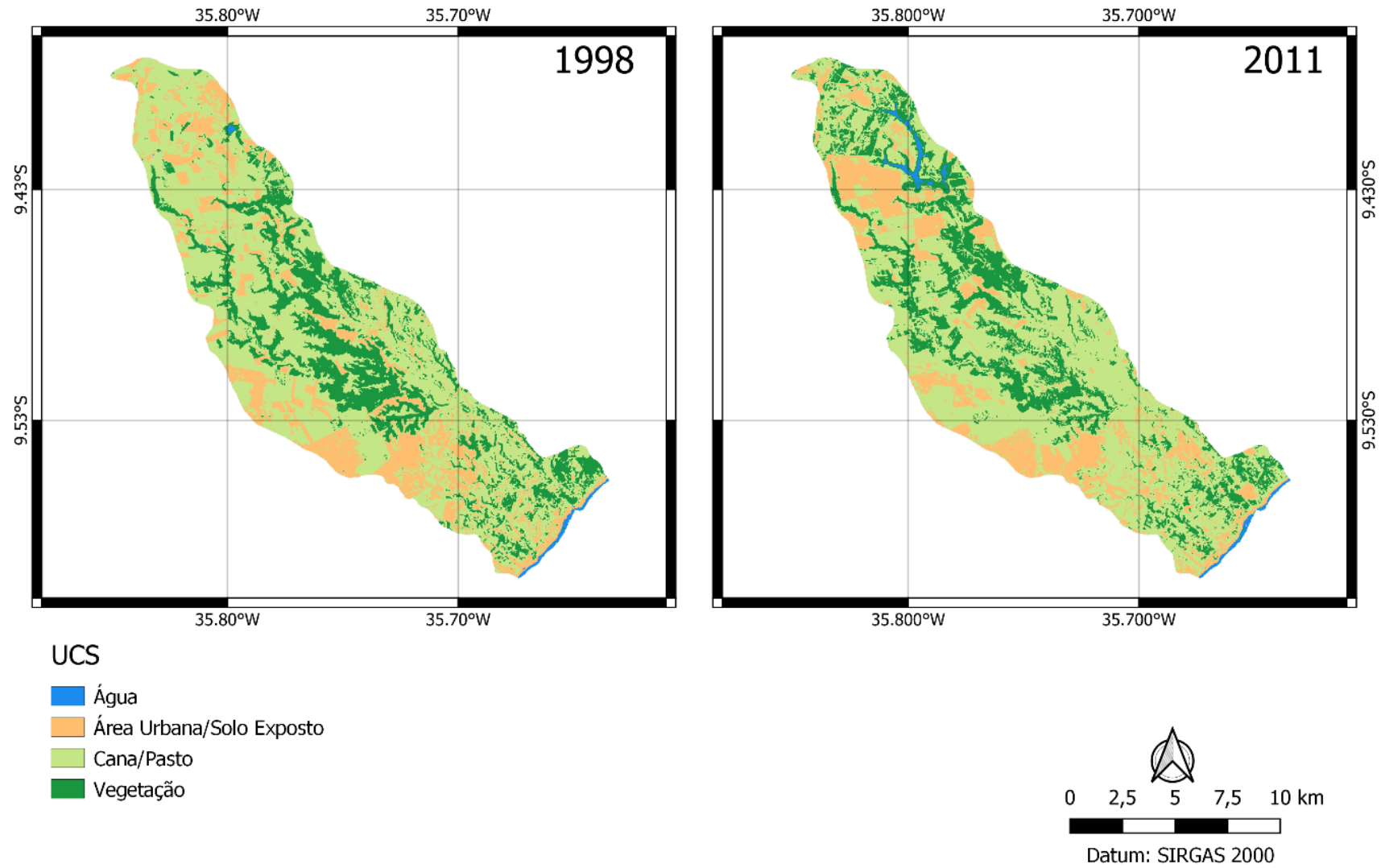
Tabela 7: Medidas de classe em área e percentual para os anos 1998 e 2011 pela CNS.

Classe	1998		2011	
	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentagem	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentagem
<i>Água</i>	0,9214	0,47%	2,0275	1,04%
<i>Área Urbana/Solo Exposto</i>	37,8508	19,47%	36,0592	18,54%
<i>Cana/Pasto</i>	112,7312	58,00%	112,2942	57,74%
<i>Vegetação Densa</i>	42,8537	22,05%	44,1092	22,68%

Fonte: Autora, 2022.

Quando comparados com a classificação realizada por meio da determinação dos índices de vegetação, não houve alterações significativas nos valores de área para as feições analisadas. A classificação não-supervisionada possui vantagens quando equiparada a classificação supervisionada, já que não se faz necessário o conhecimento prévio do local de estudo para sua aplicação. Porém o método pode apresentar confusão na identificação das classes, principalmente quando apresentam respostas espectrais semelhantes.

Figura 10: Mapa de UCS para os anos de 1998 e 2011.



Fonte: Autora, 2022.



### 5.3 Análise da dinâmica espaço-temporal

Os mapas temáticos das imagens processadas com os dois índices estudados e a classificação não supervisionada permitiram detectar e separar em diferentes classes toda a região da bacia hidrográfica analisada. As informações obtidas da cobertura vegetal em ambos os períodos de estudo mostraram modificações de vegetação nas diferentes áreas da região em todas as análises realizadas.

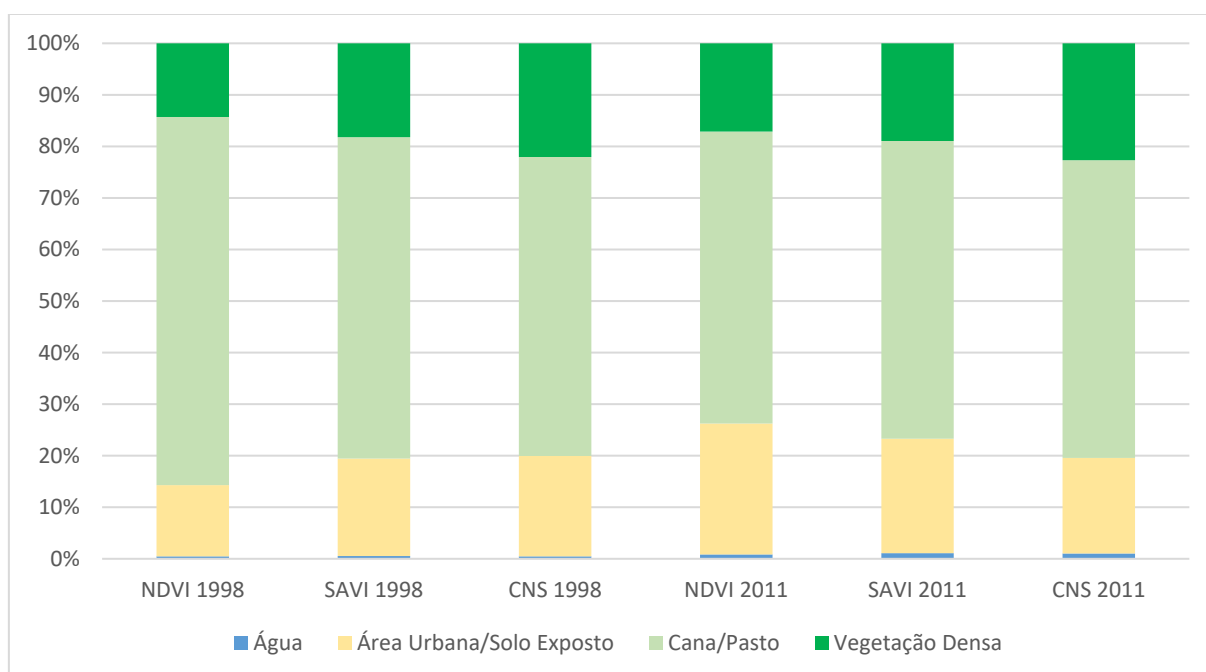
Na Tabela 8 é possível visualizar as áreas atribuídas para cada feição e na Figura 11 sua quantificação percentual, de acordo com o método de mapeamento do uso e cobertura do solo para os anos de 1998 e 2011.

Tabela 8: Área atribuída para cada feição de acordo com o método de avaliação de UCS para cada ano analisado em km<sup>2</sup>.

Classes	NDVI 1998	SAVI 1998	CNS 1998	NDVI 2011	SAVI 2011	CNS 2011
Água	0,9034	1,0512	0,9214	1,6643	2,1123	2,0275
Área Urbana/Solo Exposto	26,8807	36,7554	37,8508	49,4024	43,2196	36,0592
Cana/Pasto	138,9052	121,2924	112,7312	110,1556	112,3371	112,2942
Vegetação Densa	27,7836	35,374	42,8537	33,2695	36,8228	44,1092

Fonte: Autora, 2022.

Figura 11: Quantificação percentual para cada feição de acordo com o método de avaliação de UCS para cada ano.



Fonte: Autora, 2022.

O aumento das áreas de Vegetação Densa entre os anos analisados, quando o mapeamento é feito a partir da determinação dos índices de vegetação, pode ser explicado pelas respostas espectrais das plantações de cana-de-açúcar em fase

adultas serem confundidas com as de vegetação nativa, na qual são caracterizadas por sua alta densidade. O comportamento espectral de cada alvo pode variar de acordo com diversos fatores externos, como a refletância do solo, mediante a época estudada.

Em todos os mapeamentos realizados, é possível notar que há um aumento da área atribuída para os corpos d'água entre os anos analisados. Esse aumento foi causado pela construção da Barragem Canoas, localizada no município de Rio Largo. A construção da barragem ocorreu entre os anos de 2000 e 2002, com a finalidade de suprir as demandas de irrigação da cana-de-açúcar e possui capacidade de 19 hm<sup>3</sup>. A SEMARH/AL, órgão fiscalizador do estado de Alagoas, apontou que a barragem necessita de uma readequação do vertedouro, sendo classificada pela ANA como uma das 122 barragens que mais causam preocupação, como consta em seu Relatório de Seguranças de Barragens de 2020 (SEMARH, 2018; ANA, 2021).

Como as imagens analisadas são correspondentes a apenas dois anos distintos, não é possível indicar um comportamento na região de estudo como a retirada de vegetação nativa em áreas específicas ou aumento das áreas destinadas para o cultivo da cana e pastagem. Seria necessário um maior número de amostras para ter uma análise concreta e mais detalhada, porém há uma certa dificuldade em encontrar imagens de satélites com baixa incidência de nuvens e que permita a avaliação da área estudada.

Mesmo não sendo possível realizar a análise da dinâmica espaço-temporal, é possível analisar que em toda as circunstâncias as áreas destinadas ao cultivo da cana-de-açúcar e para pastagem apresentam valores expressivos. Dependendo do grau de desenvolvimento da cultura canavieira, o solo pode estar tanto exposto quanto protegido, além do impacto atrelado ao manejo agrícola, já que no estado a queima da cana ainda é frequentemente utilizada no período de colheita para facilitar o trabalho manual. A forte utilização do solo para fins agropecuários e a baixa incidência de vegetação nativa faz aumentar a quantidade de áreas degradadas e a retração dos remanescentes vegetais, aumentando o processo de escoamento superficial, diminuindo a infiltração da água e consequentemente afetando o abastecimento dos aquíferos da bacia (OHUFUJI, 2020).

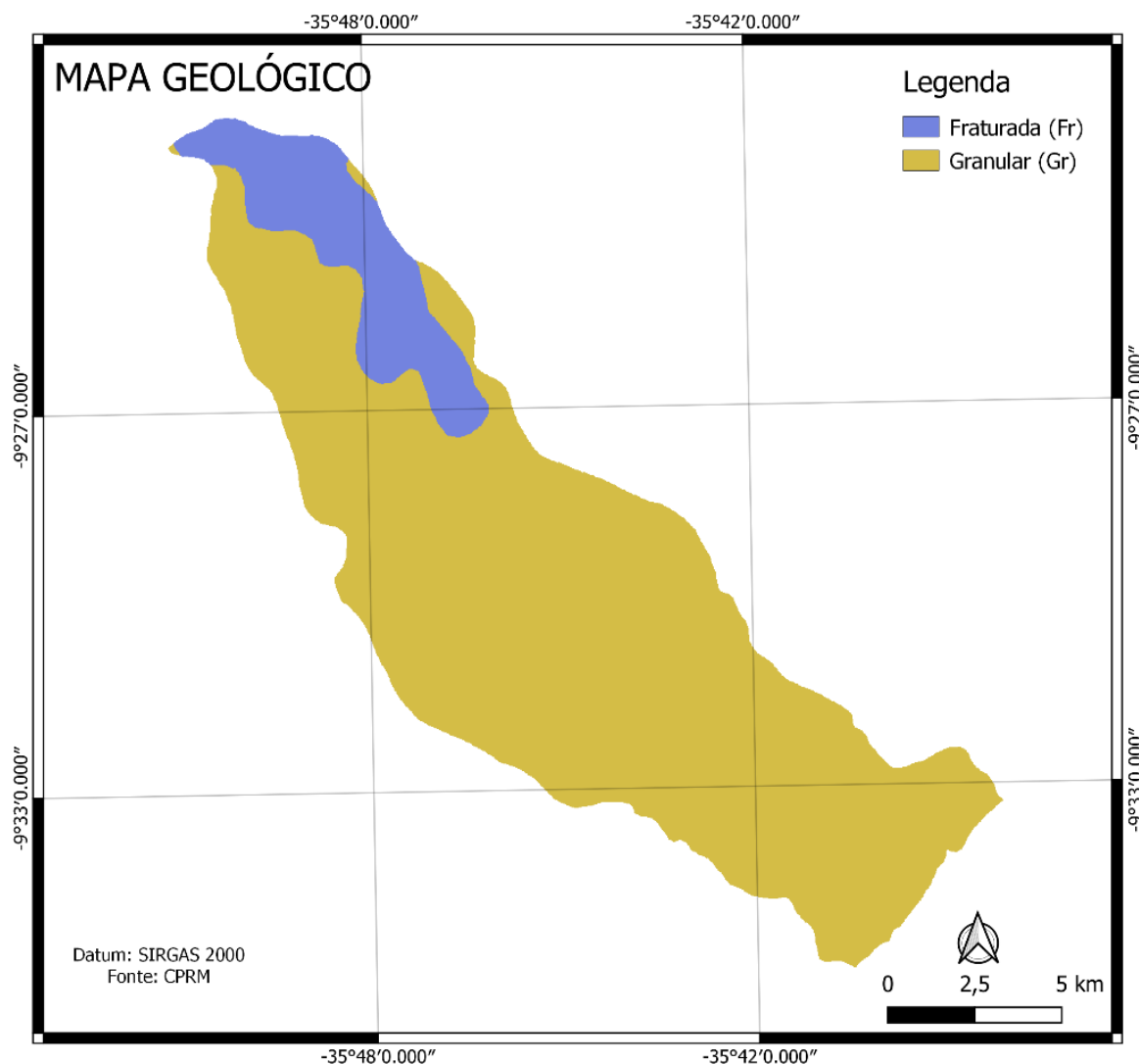
## **5.4 Mapas Temáticos**

### **5.4.1 Geologia**

O território da Bacia Hidrográfica do Rio Pratagy possui um domínio de feições geológicas do tipo granular, composto pela Formação Barreiras (ENb) e pelo Depósito Litorâneo (Ql), e sua outra parcela corresponde ao tipo fraturado (Fr), como mostrado na Figura 12 e quantificados na Tabela 9.

A Formação Barreiras, em sua forma de extensos tabuleiros costeiros e cobre parte do Maciço Pernambuco-Alagoas e Bacia de Alagoas, sua litologia é composta por arenito, conglomerado e argila. O Depósito Litorâneo possui sedimentos recentes de aluvião, dunas, praia e mangues, aflorando em toda a planície costeira e compreende areia, argila, silte e cascalho. Já o Sistema Fissural, também designado por cristalino, é caracterizado pela inexistência ou presença muito reduzida de espaços intergranulares na rocha e englobando todas as rochas cristalinas e cristalofilianas do Maciço Pernambuco-Alagoas (SEMARH, 2006).

Figura 12: Mapa Geológico da bacia.



Fonte: Autora, 2022.

Tabela 9: Quantificação percentual das classes geológicas

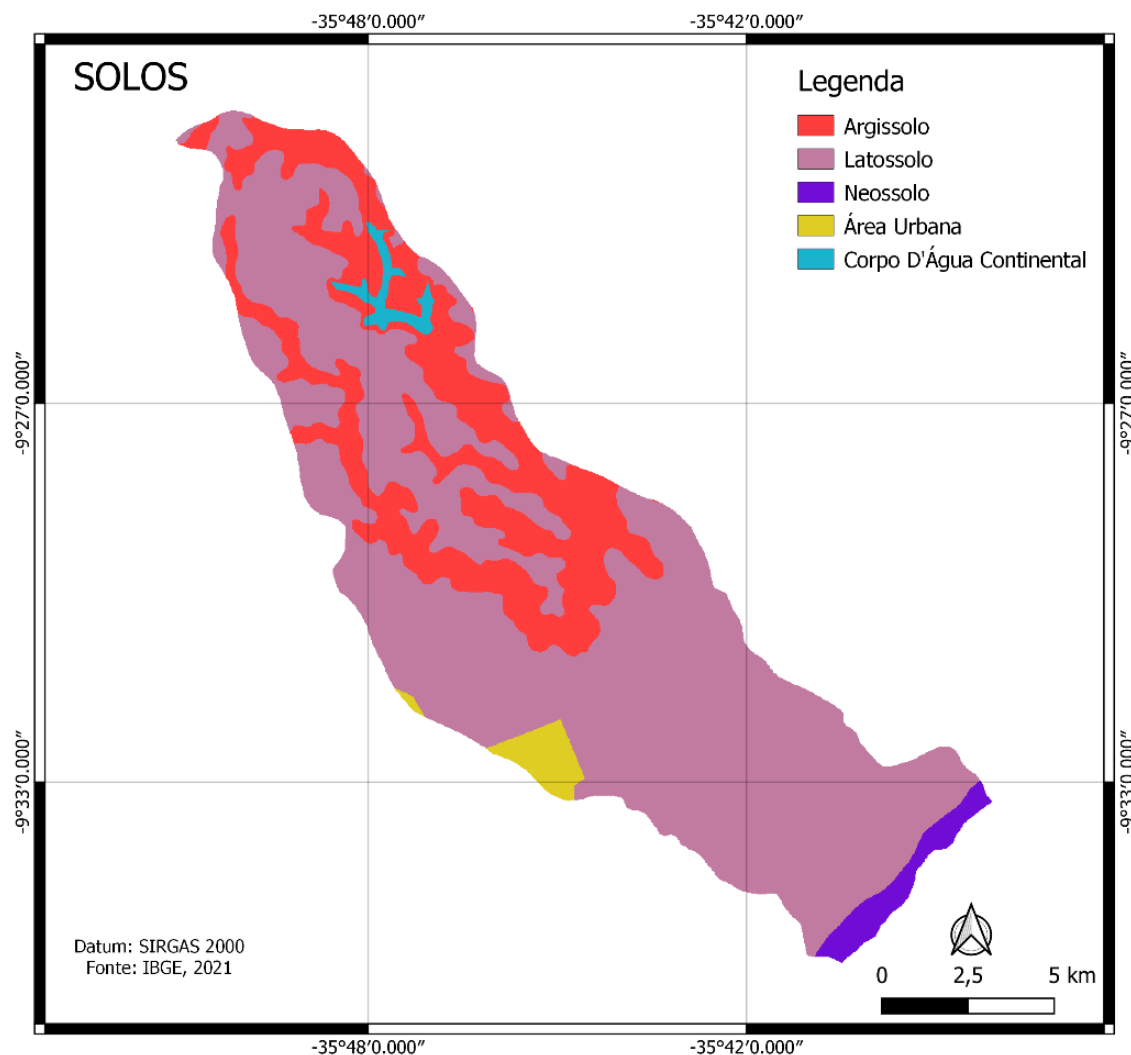
Classe	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentagem
<i>Fraturado</i>	24,064	12,43%
<i>Granular</i>	169,527	87,57%

Fonte: Autora, 2022.

#### 5.4.2 Solo

No que se refere as características do solo, na bacia há predomínio do Latossolo Amarelo Distrocoeso (LAdx), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVAd) e Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo), como pode ser observado na Figura 13 e quantificado na Tabela 10.

Figura 13: Classificação de solos na bacia.



Fonte: Autora, 2022.

Tabela 10: Quantificação percentual das classes de solo.

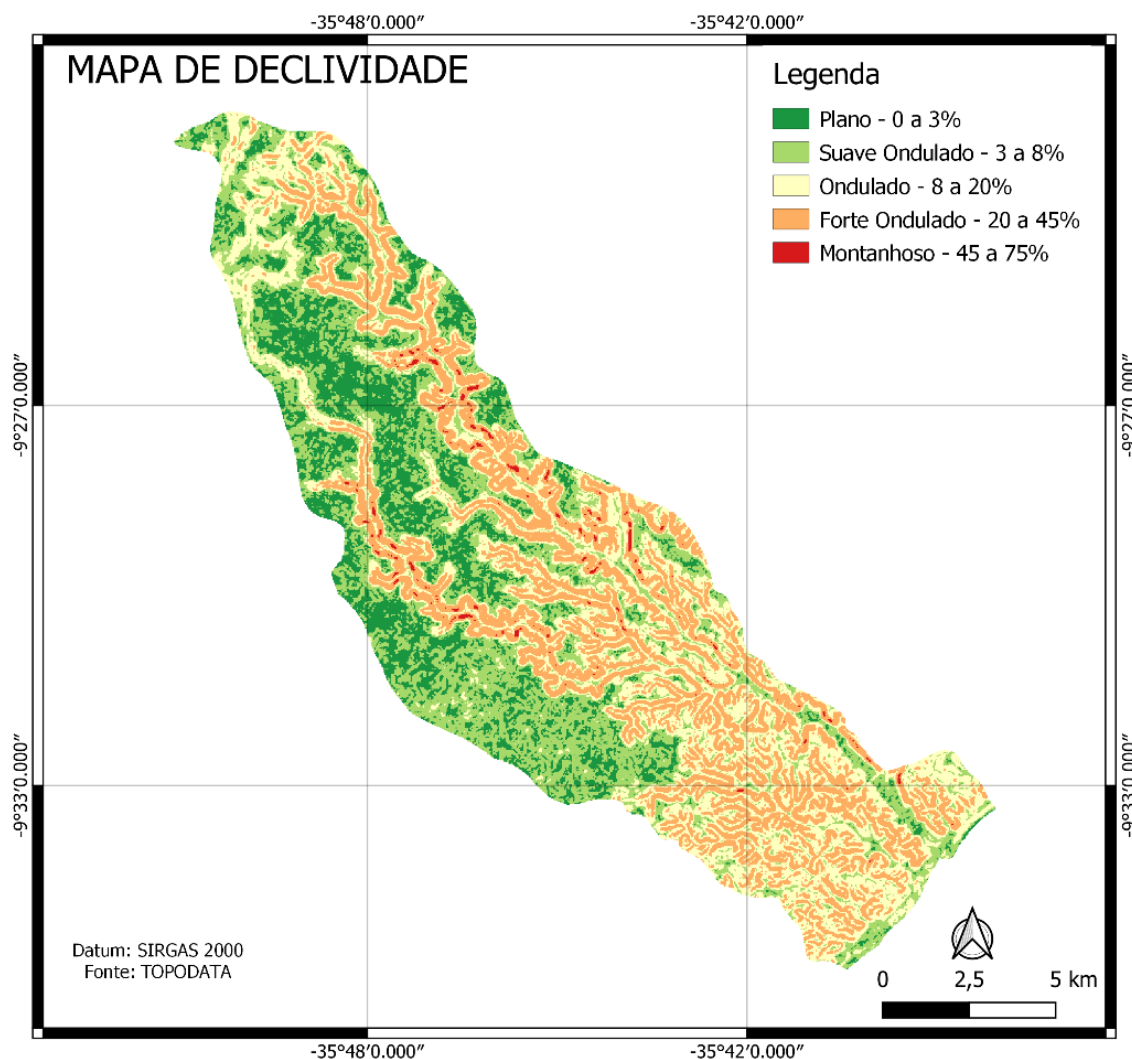
Classe	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentagem
<i>Argissolo</i>	46,545	24,08%
<i>Latossolo</i>	136,488	70,61%
<i>Neossolo</i>	4,562	2,36%
<i>Área Urbana</i>	3,480	1,80%
<i>Corpo D'Água Continental</i>	2,231	1,15%

Fonte: Autora, 2022.

#### 5.4.3 Declividade

As classificações seguiram o modelo proposto pela EMBRAPA (1979): 0 – 3% (relevo plano); 3 – 8% (relevo suave ondulado); 8 – 20% (relevo ondulado); 20 – 45% (fortemente ondulado); e > 45% (relevo montanhoso).

Figura 14: Mapa de declividade da bacia.



Fonte: Autora, 2022.

Tabela 11: Quantificação percentual das classes de declividade.

Classe	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentagem
<i>Plano</i>	32,229	16,57%
<i>Suave Ondulado</i>	55,407	28,49%
<i>Ondulado</i>	53,224	27,36%
<i>Forte Ondulado</i>	52,603	27,04%
<i>Montanhoso</i>	1,039	0,53%

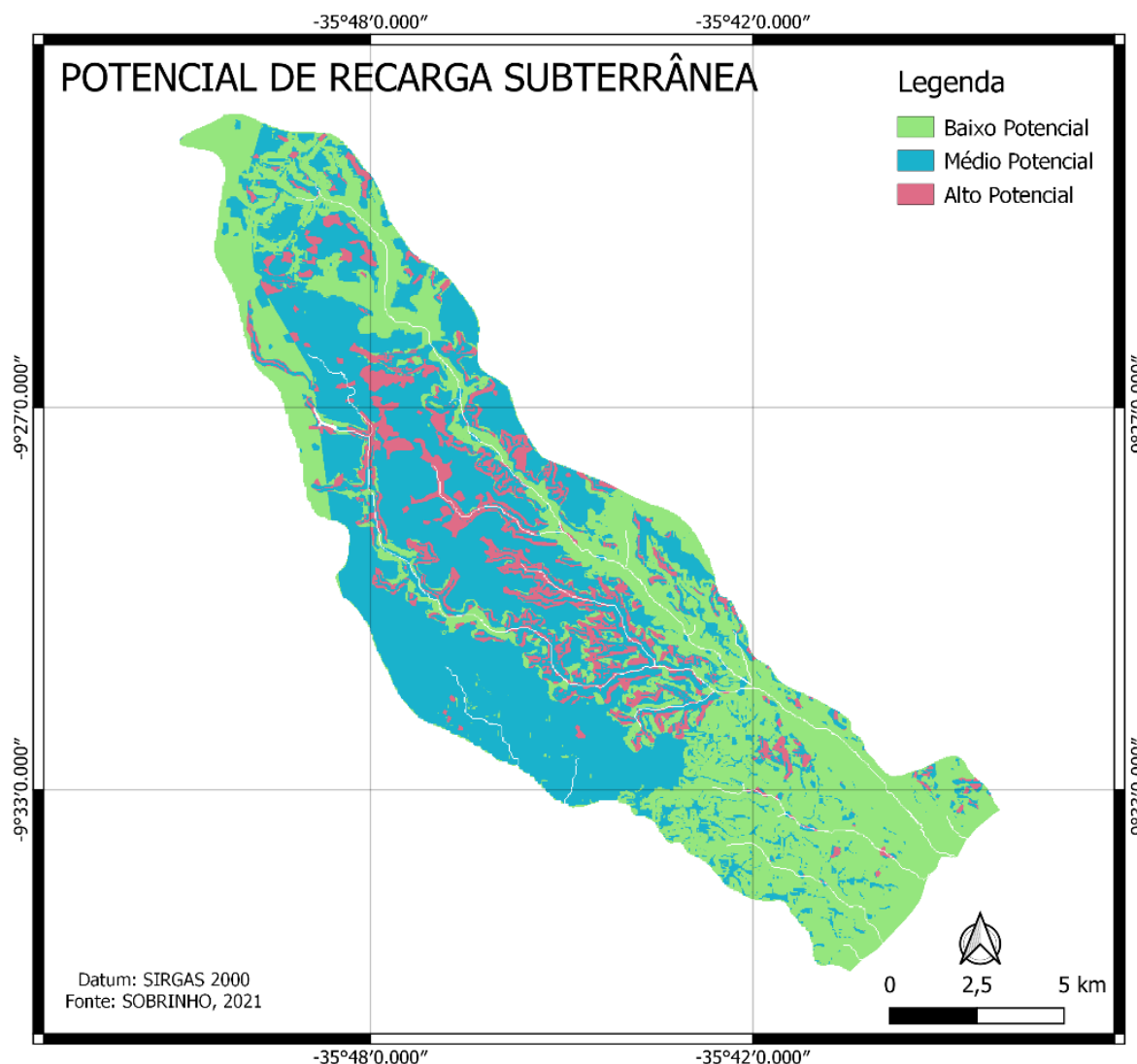
Fonte: Autora, 2022.

#### 5.4.4 Potencial de Recarga Subterrânea

Sobrinho (2021) dividiu a bacia do Rio Pratygy em áreas de acordo com seu potencial de recarga subterrânea baseando nas características hidrogeológicas do local de estudo. A porção que representa um alto potencial abrange aproximadamente 10% do seu território total da bacia, predominando em áreas ribeirinhas aos cursos d'água. As zonas com baixo potencial de recarga, na qual é provável que apresentem uma baixa permissividade para entrada de água no solo, permeiam áreas de plantio

de cana-de-açúcar e pastagem, sendo este, possivelmente um dos fatores que comprometem a infiltração na bacia.

Figura 15: Potencial de recarga subterrânea na bacia.



Fonte: Adaptado de Sobrinho, 2022.

Tabela 12: Quantificação percentual da classificação do potencial de recarga subterrânea.

Classe	Área (km²)	Porcentagem
<i>Baixo Potencial</i>	80,94	43,18%
<i>Médio Potencial</i>	87,28	46,56%
<i>Alto Potencial</i>	19,23	10,26%

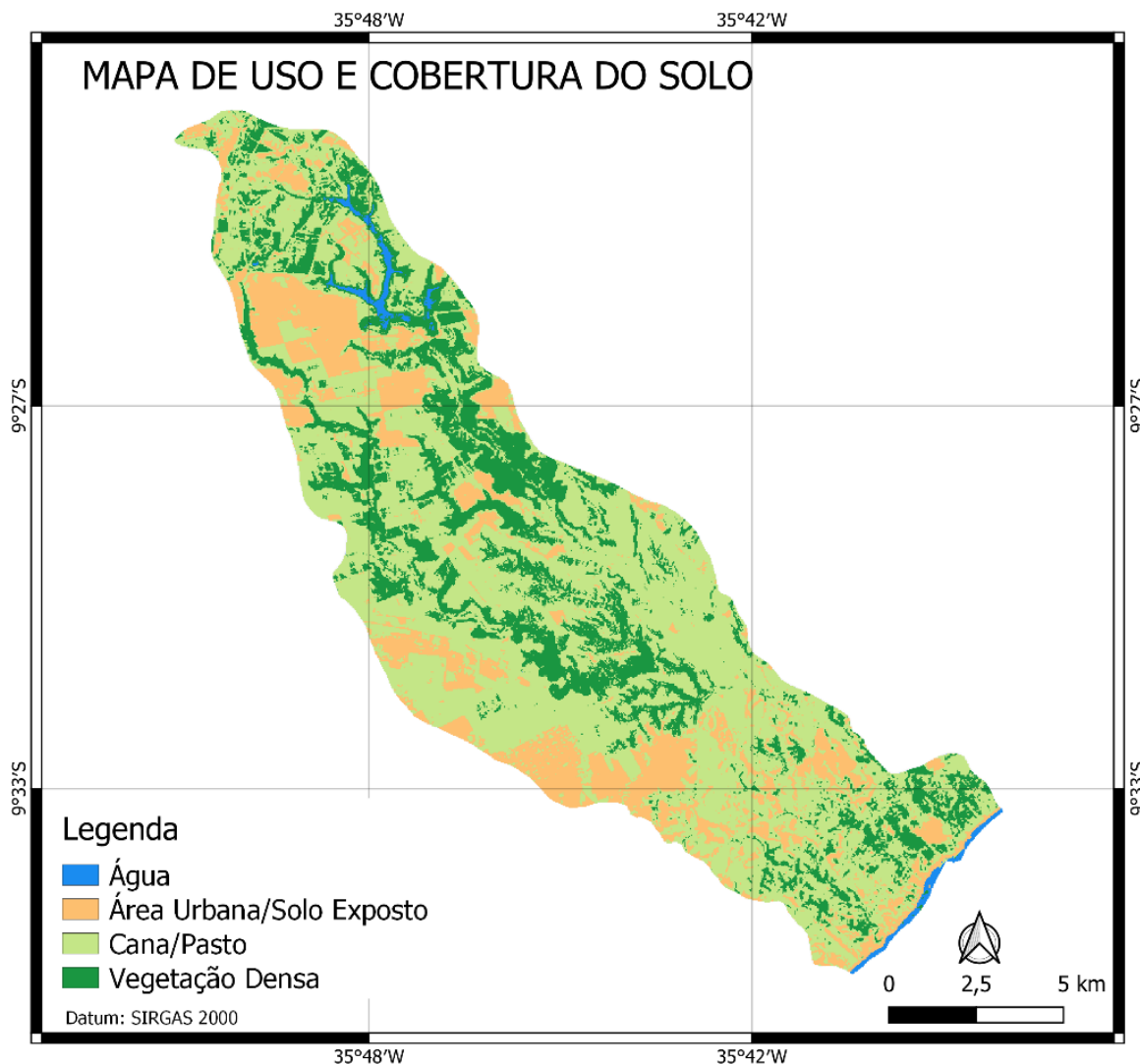
Fonte: Adaptado de Sobrinho, 2022.

#### 5.4.5 Uso e Ocupação do Solo

Para este mapa, foi utilizado o mapa derivado da classificação não supervisionada para o ano de 2011. A Figura 16 e a Tabela 13 demonstram e quantificam as características de uso e ocupação do solo na região da bacia, sendo

possível observar uma presença impactante da cultura de cana-de-açúcar, assim como outras atividades agrícolas e pecuaristas.

Figura 16: Mapa de uso e ocupação do solo na bacia.



Fonte: Autora, 2022.

Tabela 13: Quantificação percentual do uso e ocupação do solo na bacia.

Classe	Área (km²)	Porcentagem
Água	2,0275	1,04%
Área Urbana/Solo Exposto	36,0592	18,54%
Cana/Pasto	112,2942	57,74%
Vegetação Densa	44,1092	22,68%

Fonte: Autora, 2022.

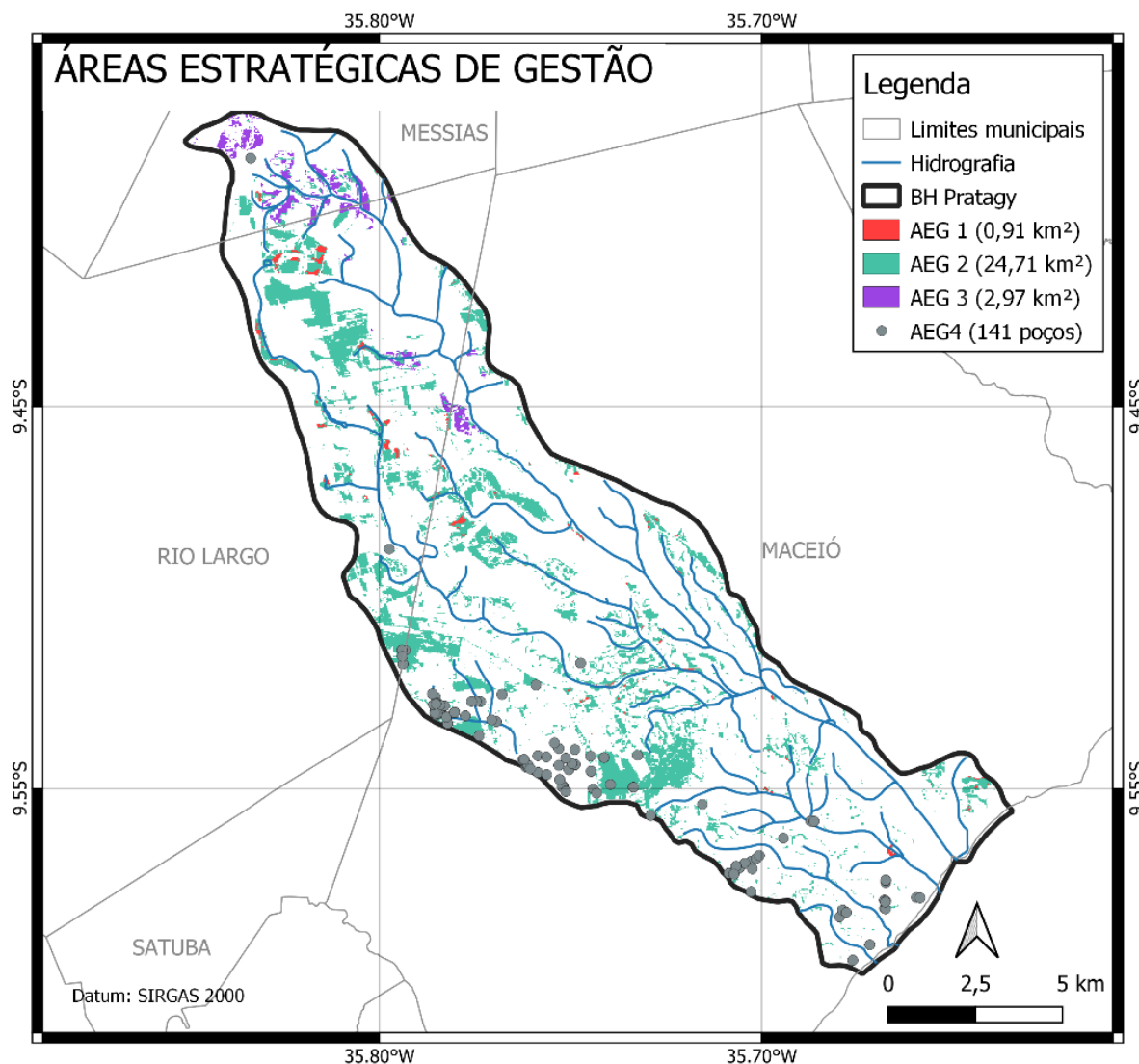
## 5.5 Áreas Estratégicas de Gestão

A metodologia proposta por Ohufuji (2020) possui a finalidade de proteger os recursos hídricos da área de estudo, propondo uma visão integrada e considerando



os aspectos físicos das bacias, bem como as atividades alocadas a partir do uso do solo da região e suas áreas potenciais de recarga subterrânea. Sendo assim, a Figura 17 apresenta o mapa gerado a partir da aplicação desta metodologia.

Figura 17: Áreas Estratégicas de Gestão identificadas na bacia do Rio Pratagy.



Fonte: Autora, 2022.

A Área Estratégica I configura-se como área de importante relevância, já que é uma região que apresenta características ambientais mais susceptíveis a sofrer interferências no processo de recarga subterrânea. Ela totaliza um percentual de aproximadamente 0,5% da área total da bacia, não tendo grande representatividade, estando mais presente no município de Rio Largo.

A Área Estratégica II está presente em 13% da bacia, sendo considerada Áreas de Restrição e Controle, por apresentar características relevantes do ponto de vista da conservação dos recursos hídricos.

A Área Estratégica III representa 1,5% da área da bacia e sua concepção tem o intuito de prezar pela necessidade de prevenção do uso dos recursos hídricos subterrâneos, a partir do disciplinamento das extrações e controle das fontes poluidoras, restringindo novas atividades potencialmente poluidoras a serem instaladas na região.

A Área Estratégica IV é relevante quando se trata da proteção de poços, uma vez que se limita a região ao redor de um poço em que as atividades de uso e ocupação tem influência direta, tanto na qualidade como na quantidade da água subterrânea. São 141 poços de captação subterrânea em que ainda possuem o processo de outorga válido distribuídos na região da bacia. A Lei Estadual nº 7.094 prevê que as captações deverão ser dotadas de medidas adequadas de proteção, mas não especifica quais medidas poderiam ser adotadas ou o raio de proteção do poço.

## 6 CONCLUSÃO

Analizando os índices de vegetação NDVI e SAVI no estudo da dinâmica espaço-temporal da bacia para os anos de 1998 e 2011, foi possível observar diferenças quanto ao comportamento dos alvos. Mesmo com a similaridade dos mapas temáticos, para o ano de 1998 houve uma maior presença da vegetação densa nas imagens geradas pelo SAVI e uma melhor adaptação para delimitar corpos hídricos. A alteração pode ser explicada pela presença de um fator de ajuste em sua fórmula que atua na minimização da reflectância do solo. Porém, ainda assim, nos dois casos nota-se uma confusão para diferenciar a vegetação densa das áreas de cultivo de cana em estágio adulto. O mesmo acontece quando utilizado a técnica de classificação não-supervisionada para mapeamento do uso e cobertura do solo, o que impossibilitou a visualização e quantificação das transformações espaço-temporais entre os anos estudados, já que não foi possível avaliar outros anos pela falta de imagens de satélite sem ou com baixa interferência de nuvens na região da bacia.

Observando o uso do solo, é possível compreender que há uma forte utilização do solo para fins agropecuários e uma baixa incidência de vegetação nativa, o que faz aumentar a quantidade de áreas degradadas e a retração dos remanescentes florestais, o que impacta nos processos de infiltração do solo e consequentemente afeta o abastecimento dos aquíferos da bacia. Há um aumento da área atribuída para os corpos d'água entre os anos analisados, justificado pela construção da Barragem Canoas entre os anos de 2000 e 2002 para fins de irrigação. A barragem apresenta erosão no vertedouro, sendo uma das que mais causam preocupação no território brasileiro por conter algum tipo comprometimento estrutural importante.

Sobre as áreas estratégicas de gestão, a baixa incidência de Áreas de Proteção Imediata se deu pela baixa presença de vegetação nativa na área da bacia, que se configuram como áreas com importante relevância por serem caracterizadas como sensíveis a sofrerem algum tipo de interferência no processo de recarga subterrânea. Uma significativa parcela da bacia foi considerada como Áreas de Restrição e Controle, por apresentarem características relevantes do ponto de vista da conservação dos recursos subterrâneos, já que na região da bacia há uma forte utilização do solo para fins agropecuários, que podem impactar tanto pelo aumento de áreas degradadas como pela disposição indevida dos resíduos provenientes desta atividade. As Áreas de Prevenção prezam pela necessidade de prevenção do uso dos

recursos hídricos subterrâneos com a restrição de novas atividades potencialmente poluidoras que podem ser instaladas na região. A presença de poços para abastecimento doméstico está presente em quase toda totalidade no município de Maceió, na qual cerca de 68% do abastecimento é proveniente de água subterrânea, sendo conveniente salientar a importância da proteção destes poços, que dependem da ação do poder público municipal e dos órgãos ambientais, que tem contribuições sobre o parcelamento do solo e podem resguardar as áreas de proteção em seus planos diretores e ambientais.

A aplicação da metodologia para determinação de áreas estratégicas de gestão dos recursos hídricos subterrâneos pode tornar-se um excelente instrumento para proteção dos recursos hídricos, garantindo a sustentabilidade hídrica das bacias, principalmente porque para sua determinação é levado em conta as características ambientais da área analisada. Sendo assim, é possível levantar as áreas que apresentam maior sensibilidade a sofrerem algum tipo de dano que afete a qualidade e/ou quantidade da água subterrânea. As AEGs possuem o objetivo de impedir ou restringir possíveis atividades potencialmente poluidoras em áreas vulneráveis. Portanto, faz-se necessário ações mais drásticas relacionadas à proteção destas áreas.

Por fim, as ferramentas de geoprocessamento e de sensoriamento remoto se mostraram imprescindíveis em todo o estudo realizado, tornando-se essenciais no monitoramento das variantes ambientais bem como no gerenciamento ambiental e de recursos hídricos por permitir uma integração com diversos fatores. Ainda é possível concluir que o emprego das metodologias utilizadas é válido para a aplicação em diversas escalas de análise, compatibilizando a temática com a área de estudo.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Atlas Brasil: abastecimento urbano de água: panorama nacional**; Engecorps/ Cobrape - Brasília: ANA: Engecorps/Cobrape. 2010.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Relatório de Segurança de Barragens 2020. Brasília: ANA, 2021.
- ALAGOAS. **Lei nº 5.965, de 10 de novembro de 1997**. Institui a Política Estadual de Recursos Hídricos. Maceió, AL. 1997.
- ALAGOAS. **Lei nº 7.094, de 2 de setembro de 2009**. Dispõe sobre a conservação e proteção das águas subterrâneas de domínio no estado de alagoas e dá outras providências. Maceió, AL. 2009.
- ALMEIDA, S. A. S. da; FRANÇA, R. S; CUELLAR, M. Z. **Uso e ocupação do solo no Bioma Caatinga do Estado do Rio Grande do Norte**. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal – RN, Brasil, 25 a 30 de abril de 2009, p. 5555-5561
- ALVES, G. N. et. al. **Análise morfométrica da bacia hidrográfica do rio Pratagy, AL – Uma contribuição para estudos ambientais**. XVIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2019.
- ANDRADE, L. A. et al. **Identificação de áreas com potencial de expansão urbana na bacia hidrográfica do rio Pratagy, Maceió-AL**. In: Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. 2009. n.13., Viçosa.
- ASCIUTTI, Gustavo Augusto Mendonça; STANGANINI, Fábio Noel; MELANDA, Edson Augusto. **Identificação dos diferentes usos e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Rio do Quilombo, São Carlos/SP utilizando imagem do Satélite Sentinel 2 e o complemento SCP do Qgis**. Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2019.
- BARRETO, Ana Beatriz da Cunha. **Avaliação da Recarga e de Sustentabilidade de Recursos Hídricos Subterrâneos de uma Micro-Bacia usando Modelagem Numérica**. Rio de Janeiro, 210 p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

BORTOLIN, Taison Anderson et al. **Estimativas de recarga aquífera com uso de filtros digitais em sub-bacias hidrográficas do Sistema Aquífero Serra Geral no estado do Rio Grande do Sul**. Scientia cum Industria, v. 6, n. 2, p. 21-30, 2018.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**: promulgada em 5 de outubro de 1988. 1988.

BRASIL. **Decreto n 24.643, de 10 de julho de 1934**. Decreta o Código das Águas. 1934.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. 1997.

BRAUN P.D.K et al. **Uso de sistema de informações geográficas (SIG) para identificação de áreas de recarga de aquíferos na bacia do Itajaí**. Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, abril 2007, pp. 3295-3302. 2007.

BRITO, Jorge Luís Silva; PRUDENTE, Tatiana Diniz. **Análise temporal do uso do solo e cobertura vegetal do município de Uberlândia-MG, utilizando imagens ETM+/Landsat 7**. Sociedade & Natureza, v. 17, n. 32, p. 37-46, 2005.

CABRAL, J. J. DA S. P. Movimento das águas subterrâneas. *In*: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. (Eds.). **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. 3a. ed. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. p. 77–91.

CALLADO, R. **Utilização do Geoprocessamento para Determinação de Unidades Ecodinâmicas: Subsídios ao Planejamento Ambiental**. PPGEA/UFSC Florianópolis - SC, 127 p. 2003.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. **Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Post Calibration Dynamic Ranges**. IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing, 41, 2674-2677, 2003.

CHIARANDA, R. **Usos da Terra e Avaliação da Capacidade Potencial de Armazenamento de água na bacia do Rio Cuiabá – MT**. Curitiba: Tese (Doutorado em Eng. Florestal – UFP), 2002.

COELHO, Victor HR et al. **Dinâmica do uso e ocupação do solo em uma bacia hidrográfica do semiárido brasileiro**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 18, p. 64-72, 2014.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DE ALAGOAS. **Capital: Mananciais**. 2020. Disponível em: <<https://www.casal.al.gov.br/capital/>>. Acesso em: 4 de ago. de 2021.

COUCEIRO, Sheyla Marques; HAMADA, Neusa. **Os instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos na Região Norte do Brasil**. Oecologia Australis, v. 15, n. 4, p. 762-774.

DE ALMEIDA, Débora Natália Oliveira et al. **Uso e cobertura do solo utilizando geoprocessamento em municípios do Agreste de Pernambuco**. Revista Brasileira de Meio Ambiente, v. 4, n. 1, 2018.

DE ALMEIDA, Ronaldo Bento Gonçalves; SILVA, Daniel José. **Análise de áreas mais propícias à recarga do Sistema Aquífero Guarani na região hidrográfica do Planalto de Lages (SC): subsídios para a gestão das águas subterrâneas**. 2009. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis.

DE BORATTO, I. M.; GOMIDE, Reinaldo Lúcio. **Aplicação dos índices de vegetação NDVI, SAVI e IAF na caracterização da cobertura vegetativa da região Norte de Minas Gerais**. In: Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. Anais... São José dos Campos: INPE, 2013. p. 7345-7352., 2013.

DIAS C.L.; IRITANI M.A., et. al., 2004. **Restrições de uso e ocupação do solo em áreas de proteção de Aquíferos: Conceitos, Legislação e proposta de aplicação no Estado de São Paulo**. Anais XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 2004.

DORA, A.S. **Quantificação de Reservas Renováveis de Águas Subterrâneas em Bacias Hidrográficas a Partir de Séries Históricas de Vazão: Uma Ferramenta para Gestão de Bacias**. 84p. Trabalho de conclusão de curso – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS. 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. In: REUNIÃO TÉCNICA DE LEVANTAMENTO DE SOLOS, 10, 1979, Rio de Janeiro. Súmula...Rio de Janeiro, 1979. 83p

FAZZIO, A. L.; DA SILVA, F. V.; FERREIRA, I. V. L.; FREIRE, C. C.; DA SILVA, M. L. R.; SAMPAIO, C. D. C. **Potenciais fontes de contaminação e qualidade das águas subterrâneas na cidade de Maceió.** Águas Subterrâneas, [S. l.], 2010. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23133>.

FEITOZA, Igor Carlos Teixeira. **Análise do uso e ocupação do solo no entorno da bacia hidrográfica do Rio Pratagy.** Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil). Centro Universitário CESMAC. Alagoas, 2019.

FERREIRA, Johnny Mayron Santana et al. **Análise Espaço-Temporal da Dinâmica da Vegetação de Caatinga no Município de Petrolina-PE** (Analysis Space-Time from Dynamics of Caatinga Vegetation in the Municipality of Petrolina–PE). Revista Brasileira de Geografia Física, v. 5, n. 4, p. 904-922, 2012.

FONSECA, R. C. da. **Análise de Índices de Vegetação (NDVI e SAVI) no estudo da dinâmica geoespacial e espectro-temporal da vegetação de caatinga, cultura irrigada e solo exposto do município de Petrolina/PE.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Cartográfica). Universidade Federal de Pernambuco. Departamento de Engenharia Cartográfica e Agrimensura, 78 p., 2017.

FOSTER, Stephen et al. **Proteção da Qualidade da Água Subterrânea:** um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. São Paulo: The International Bank For Reconstruction And Development, 2006. 114 p. Disponível em: <[http://siteresources.worldbank.org/INTWRD/Resources/336486-1175813625542/GroundwaterQualityProtectionGuide\\_Portugese.pdf](http://siteresources.worldbank.org/INTWRD/Resources/336486-1175813625542/GroundwaterQualityProtectionGuide_Portugese.pdf)>.

FREIRE, Cleuda Custódio et al. **A importância da gestão dos recursos hídricos subterrâneos.** Simpósio Internacional Sobre Recursos Hídricos (1998: Gramado). [Anais]. Porto Alegre: ABRH, 1998.



GRANZIERA, M.L. M.; GRANZIERA, B. M. **Desafios na gestão da água subterrânea**. In: Suplemento Anais do VXIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Belo Horizonte: ABAS, p.1-14., 2014.

GUERRA, J. T. & CUNHA, S. B. da. **Geomorfologia: Técnicas e Aplicações**. São Paulo: BertrandBrasil, 1999.

HIRATA, Ricardo; SUHOGUSOFF, Alexandra Vieira; MARCELLINI, Silvana Susko; VILLAR, Pilar Carolina; MARCELLINI, Laura. **A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento**. [S.l: s.n.], 2019.

HUETE, A. R. A. **Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)**. Remote Sensing of Environment, v. 25, p. 295-309, 1988a.

HUETE, A. R. **Adjusting vegetation indices for soil influences**. International Agrophysics, v.4, n.4, p.367-376, 1988b.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRÍGUEZ, E.P.; GAO, X.; FERREIRA, L.G. **Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation index**. Remote Sensing of Environment, 83, p.195-213, 2002.

INSTITUTO DO MEIO AMBIENTE DE ALAGOAS. **APA DO PRATAGY**. 2015. Disponível em: <<http://www.ima.al.gov.br/unidades-de-conservacao/uso-sustentavel/apa-do-pratagy/>>.

JACKSON, R; HUETE, R. **Interpreting vegetation indices**. Preventive veterinary Medicine. Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, 11 185-2001, 1991

JESUS, Ingrid da Silva de. **Análise do perigo à contaminação do aquífero compreendido pela Bacia Hidrográfica do Pratagy**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental e Sanitária) – Centro de Tecnologia. Universidade Federal de Alagoas, 2021.

KALISKI, Aline Duarte; FERRER, Tânia Rodrigues; LAHM, Regis Alexandre. **Análise temporal do uso do solo através de ferramentas de geoprocessamento-estudo de caso: município de Butiá/RS**. Para Onde!? - Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia - Instituto de Geociências - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, v. 4, n. 2, 2010. v. 4, n. 2, 2010.

LOPES, A.C. **Comparação de metodologias para delimitação de áreas estratégicas de proteção e recarga de aquíferos.** Universidade de Lisboa. 2014. Disponível em: <http://repositorio.ul.pt/handle/10451/11725>.

LOPES, Luís Henrique Moreira. **Uso e cobertura do solo no município de Tailândia-PA utilizando o TM/LANDSAT e técnica de classificação não-supervisionada.** Engevista, 2008.

MANTELLI, Luiz Rogério. **Sensoriamento remoto como ferramenta para gestão de recursos hídricos: modelagem espaço-temporal dos riscos ecológicos em bacias hidrográficas.** 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MARKHAM, B.L.; BARKER, J.L. **Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures.** Lanham, MD: EOSAT, 1986.

MARKHAM, B.L.; BARKER, L.L. **Thematic mapper bandpass solar exoatmospherical irradiances.** International Journal of Remote Sensing, v. 8, n. 3, p. 517-523, 1987.

MELO, Ewerton Torres; SALES, Marta Celina Linhares; DE OLIVEIRA, José Gerardo Bezerra. **Aplicação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para análise da degradação ambiental da microbacia hidrográfica do Riacho dos Cavalos, Crateús-CE.** Raega-O Espaço Geográfico em Análise, v. 23, 2011.

MELO, José Gustavo da Silva. **Registro das dinâmicas espaciais dos manguezais no baixo curso do Capibaribe.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAC. Desenvolvimento Urbano, 126 p., 2014.

NETO, José de Oliveira Melo; CHAGAS, Rogério Moreira; JÚNIOR, Arisvaldo Vieira Mélo. **Delimitação de áreas potenciais de recarga subterrânea na bacia hidrográfica do Rio Siriri, Sergipe.** Scientia Plena, v. 9, n. 7 (a), 2013.

NOBRE, Manoel de Melo Maia; NOBRE, Rosane Cunha Maia. **Caracterização hidrogeológica para o uso racional e proteção dos mananciais subterrâneos em Maceió-AL.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 6, n. 1, p. 7-20, 2001.

NOBRE, Manoel de Melo Maia; NOBRE, Rosane Cunha Maia. **Uso sustentável de águas subterrâneas na Região Metropolitana de Maceió**. Águas Subterrâneas, 2000.

NOVAIS, L. R. et al. Análise da vegetação da Área de Preservação Ambiental de São Desidério-BA, a partir do NDVI e NDWI. **Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), São José dos Campos, INPE**, p. 2126-2434, 2011.

NOVO, E. M. L. M., **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher, 1989. 308 p.

OHOFUGI, Danielle Soares Magalhaes. **Proposta metodológica para determinação de áreas estratégicas de gestão para fins de uso e conservação dos recursos hídricos das bacias dos rios Iontra e corda**. Doutorado em Tecnologia Ambiental, 2020.

PAES, Claudiane Otilia. **Modelagem espacial de áreas de recarga subterrânea em região de afloramento do sistema aquífero guarani (SAG), em Brotas/sp**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, 2014.

PANTA, Genisson; NOBRE, R. C. M. **Análise multitemporal da cobertura vegetal e uso do solo na APA do Pratagy, Alagoas**. XVIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2019.

PEREIRA, Lúcia Alexandra Castro. **Análise da incidência dos incêndios florestais em áreas estratégicas de proteção e recarga de aquíferos no município de Caminha: contributo para o processo de ordenamento do território**. Dissertação de Mestrado, 2019.

POLLO, Ronaldo Alberto. **EXPANSÃO DO CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR E O IMPACTO SOBRE OS RECURSOS HÍDRICOS**. ENSAIOS NAS CIÊNCIAS AGRÁRIAS E AMBIENTAIS 3, p. 1-388–416.

REBOUÇAS, A. C. Importância da água subterrânea. *In*: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. (Eds.). **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. 3a. ed. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. p. 13-29.

RODRÍGUEZ, Ana Cristina Machado; FO, Hernandez P.; MOREIRA, M. A. **Mapeamento multitemporal do uso e cobertura do solo do município de São Sebastião-SP, utilizando técnicas de segmentação e classificação de imagens TM-Landsat e HRV-SPOT.** São José dos Campos: INPE, 2000.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS.** Third Symposium of ERTS, Greenbelt, Maryland, USA. NASA SP-351, V1:309-317. 1973.

SANTOS, André Luiz Conceição; SANTOS, F. dos. **Mapeamento das classes de uso e cobertura do solo da bacia hidrográfica do Rio Vaza-Barris, Sergipe.** Revista Multidisciplinar da UNIESP: Saber Acadêmico, v. 10, p. 57-67, 2010.

SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. **Plano Diretor da Região Hidrográfica Pratagy.** COHIDRO. Alagoas, 2006.

SILVA, F. B. da; OLIVEIRA, C.W.; NESS, R. L. L.; ARAÚJO, R. S.; ARAÚJO, G. P. de; SILVA, V. **Determinação do índice de área foliar (IAF) e do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) na chapada do Araripe através de imagens de satélite (LandSAT 5 TM), diferentes anos, na estação seca.** VI Encontro Nacional da Anapas, 18-21 de setembro de 2012, Belém –PA –Brasil.

SILVA, J. da; HAMULAK, T. M; RIBEIRO, S. R. A. **Índice de vegetação (NDVI) para identificação de áreas de reflorestamento.** Anais Semana de Geografia, v. 1, n. 1, Ponta Grossa. UEPG, 2012. ISSN 2317-9759.

SILVA, Wilson Francisco da. **Análise da vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação na região metropolitana de Maceió.** 2019. 155 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2013.

SILVA, Wilson Francisco da. **Análise da vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação na região metropolitana de Maceió.** Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2013.

SOBRINHO, Alexandre Barbosa Lopes. **Proposta Metodológica para Identificação de áreas potenciais de recarga subterrânea da Bacia Hidrográfica do Rio Pratagy**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental e Sanitária) – Centro de Tecnologia. Universidade Federal de Alagoas, 2021.

SOUSA, C. J. da S. **Caracterização dos aquíferos na Ilha do Maranhão: reconhecimento, levantamento de áreas estratégicas e contribuições ao processo de gestão**. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica. IG/UnB. Brasília-DF, 273p. 2021.

TAVARES, K. A. S.; FERREIRA NETO, José Vicente. **Mapeamento da susceptibilidade erosiva na Bacia Hidrográfica do Rio Pratagy, Alagoas**. Revista Contexto Geográfico, v. 2, n. 4, p. 42-51, 2017.

TOLEDO, Pedro Henrique de Omena; FREIRE, Cleuda Custódio. **MAPEAMENTO DE ÁREAS DE RISCO PARA A QUALIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS**. XII SRHNE - Simpósio De Recursos Hídricos Do Nordeste. Natal/RN, 2014.

VANZELA, Luiz et al. **Influência do uso e ocupação do solo nos recursos hídricos do Córrego Três Barras, Marinópolis**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 14, p. 55-64, 2010.

WARREN, Morris Scherer et al. **Utilização do Sensoriamento Remoto Termal na Gestão de Recursos Hídricos**. Revista Brasileira de Geografia Física, v.07, n. 01, 2014, 065-082.