

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA EM FREDERICO
WESTPHALEN - RS
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

Fiorella Rosmery Galvez Ccori

**ANÁLISE DE VULNERABILIDADE AMBIENTAL NO MUNICÍPIO DE SÃO
CARLOS - SP POR MEIO DO SATÉLITE SENTINEL**

Frederico Westphalen, RS
2022

Fiorella Rosmery Galvez Ccori

**ANÁLISE DE VULNERABILIDADE AMBIENTAL NO MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS -
SP POR MEIO DO SATÉLITE SENTINEL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheira Ambiental e Sanitarista**.

ORIENTADOR: Prof. Sandro Luciano Barreto Fensterseifer

Frederico Westphalen, RS
2022

Fiorella Rosmery Galvez Ccori

**ANÁLISE DE VULNERABILIDADE AMBIENTAL NO MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS -
SP POR MEIO DO SATÉLITE SENTINEL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheira Ambiental e Sanitarista**.

Aprovado em 1º de fevereiro de 2022:

Sandro Luciano Barreto Fensterseifer, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Fabio Marcelo Breunig, Dr. (UFSM)

Willian Fernando de Borba, Dr. (UFSM)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho á minha família, em especial a minha mãe Carmela Ccori e a minha segunda mãe Alfonsina Ccori por todo o amor incondicional recebido, incentivo nos momentos de desânimo, a minha querida filha Lia e meu amado esposo pelas palavras sábias de encorajamento e motivação e por acreditar em mim..

AGRADECIMENTOS

Gostaria Iniciar Agradecendo a meu orientador o prof. Sandro Luciano Barreto Fensterseifer por ter aceitado ser meu orientador pela paciência e dedicação para a execução do meu trabalho de conclusão de curso.

Agradeço também a minha amiga Anna Carolina Fogaça e Issadora Maciel Lemos pelos inúmeros momentos compartilhados durante a graduação, obrigada pelas jantas, bolos, explicações, saídas e a amizade oferecida a mim.

Agradeço a Professora Eliane Santos, pela recepção oferecida quando cheguei ao campus, pelas palavras de motivação, pelo carinho e por sempre me auxiliar nas minhas dúvidas.

Agradeço a The European Space Agency (ESA) pelas imagens fornecidas disponíveis através dos Serviços de Acesso a Dados e Informação COPERNICUS através das diversas plataformas.

Agradeço aos demais servidores da UFSM-FW que colaboraram para que este momento fosse possível, agradeço à Universidade Federal de Santa Maria, Campus Frederico Westphalen pelo ensino gratuito e de qualidade e a todos os professores que foram fonte de inspiração, obrigada pelo comprometimento e contribuição na minha formação acadêmica

“Que homem é sábio? O que estuda sem cessar. Que homem é forte? O que sabe se dar limites. Que homem é rico? O que é feliz com o que tem.”

(O TALMUDE)

RESUMO

ANÁLISE DE VULNERABILIDADE AMBIENTAL NO MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS - SP POR MEIO DO SATÉLITE SENTINEL

AUTORA: Fiorella Rosmery Galvez Ccori

ORIENTADOR: Sandro Luciano Barreto Fensterseifer

O uso e ocupação do solo de forma indiscriminada e sem planejamento adequado acarretam diversos problemas ambientais que podem ser observados cotidianamente em áreas urbanas, onde a densidade populacional os torna mais graves, como também em áreas rurais. Os sistemas de Informação geográfica através de suas diversas rotinas funcionais auxiliam no planejamento e na tomada de decisão, dentre as funções que este sistema pode executar temos os processos de análise de multicritério, através da ferramenta pode-se realizar o análise de vulnerabilidade ambiental.

No presente estudo de vulnerabilidade ambiental permitiu-se analisar e identificar impactos e, a partir destes seria possível estabelecer políticas públicas para um planejamento adequado. Portanto, o objetivo principal foi a elaboração do mapa de vulnerabilidade ambiental do município de São Carlos, através de análise de multicritério e álgebra de mapas com cruzamento dos planos de informação.

Os resultados deste trabalho foram satisfatórios, em que conseguiu-se identificar quais são as áreas de maior vulnerabilidade ambiental e, assim, adotar medidas mitigadoras compensatórias por meio de instrumentos legais.

Palavras-chave: Álgebra de Mapas. Análise Multicritério. Vulnerabilidade

ABSTRACT

TÍTULO EM INGÊS

AUTHOR: Fiorella Rosmery Galvez Ccori
ADVISOR: Sandro Luciano Barreto Fensterseifer

The use and occupation of land indiscriminately and without adequate planning cause several environmental problems that can be observed daily in urban areas, where population density makes them more serious, as well as in rural. Geographic Information systems, through their various functional routines, help in planning and decision making, among the functions that this system can perform we have the multi-criteria analysis processes, through the tool you can perform the environmental vulnerability analysis.

In the present study of environmental vulnerability, it was possible to analyze and identify impacts, and, from these, it would be possible to establish public policies for adequate planning. Therefore, the main objective was the elaboration of the environmental vulnerability map of the municipality of São Carlos, through multi-criteria analysis and map algebra with crossing the information planes.

The results of this work were satisfactory, in which it was possible to identify which are the areas of greatest environmental vulnerability and, thus, to adopt compensatory mitigating measures through legal instruments

Keywords: Map Algebra, Multicriteria Analysis, Vulnerability

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Mapa Pedológico do Estado de São Paulo	16
Figura 5.1 – Mapa de localização do Município de São Carlos, SP	22
Figura 6.1 – Mapa de Hidrogeologia	30
Figura 6.2 – Mapa de solos de São Carlos	31
Figura 6.3 – Mapa de Declividade de São Carlos	32
Figura 6.4 – Classes de fragilidade Ambiental	33
Figura 6.5 – Mapa de Uso e Ocupação de Solo de São Carlos	34
Figura 6.6 – Mapa de Vulnerabilidade Ambiental do Município de São Carlos	35
Figura 6.7 – Sobreposição do Mapa de vulnerabilidade Ambiental a Imagem do Google Earth	36
Figura 6.8 – Pontos vulneráveis	37
Figura 6.9 – Pesos Calculados para cada Fator na Análise de Vulnerabilidade Ambiental	39
Figura 6.10 – Equação aplicada para calculo de vulnerabilidade	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Categorias Hierárquicas de Hidrogeologia.....	24
Tabela 5.2 – Categorias Hierárquicas de Solos.....	25
Tabela 5.3 – Categorias Hierárquicas de Declividade.....	26
Tabela 5.4 – Categorias Hierárquicas de Uso e Ocupação do solo.....	27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>APP</i>	Área de Preservação Permanente
<i>EMBRAPA</i>	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
<i>IBGE</i>	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<i>UFSM</i>	Universidade Federal de Santa Maria
<i>UFSCAR</i>	Universidade Federal de São Carlos
<i>ESA</i>	The European Space Agency
<i>SiBCS</i>	Sistema Brasileiro de classificação de solos
<i>SIG</i>	Sistema de Informação Geográfica
<i>Sp</i>	São Paulo
<i>SRTM</i>	Shuttle Radar Topography Mission

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICAS	15
3.1	GEOPROCESSAMENTO DE DADOS	15
3.2	SOLOS DO BRASIL	16
3.3	HIDROGEOLOGIA	17
3.4	DECLIVIDADE	17
3.5	USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	18
3.6	VULNERABILIDADE AMBIENTAL	18
3.7	ANÁLISE DE MULTICRITÉRIOS	19
4	MATERIAIS	20
4.1	EQUIPAMENTOS E APLICATIVOS COMPUTACIONAIS	20
5	METODOLOGIA	21
5.1	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	21
5.2	AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS	22
5.2.1	Delimitação de área de interesse - São Carlos	22
5.2.2	Mapa Hidrogeologia	23
5.2.2.1	<i>Inserção de Arquivo Unidade hidrogeológica</i>	23
5.2.2.2	<i>Conversão Imagem Vetor hidrogeológica para Raster</i>	23
5.2.2.3	<i>Extração do Limite do Município do Mapa de Hidrogeologia</i>	23
5.2.2.4	<i>Inserção Imagens do Sentinel-2</i>	23
5.2.2.5	<i>Composição de Bandas e Inversão de Cores</i>	23
5.2.2.6	<i>Reclassificação do Mapa</i>	24
5.2.3	Mapa de Solos	24
5.2.3.1	<i>Inserção o Arquivo Brasil Solos</i>	24
5.2.3.2	<i>Conversão Imagem Vetor (Solos) para Raster</i>	24
5.2.3.3	<i>Extração Limite do Município do Mapa de solos</i>	25
5.2.3.4	<i>Inserção Imagens do Sentinel-2</i>	25
5.2.3.5	<i>Composição de Bandas e Inversão de Cores</i>	25
5.2.3.6	<i>Reclassificação do Mapa</i>	25
5.2.4	Mapa Declividade	25
5.2.4.1	<i>Inserção das imagens SRTM do Município</i>	25
5.2.4.2	<i>Reclassificação do Mapa</i>	26
5.2.5	Mapa Uso e Ocupação de Solo	27
5.2.5.1	<i>Inserção das imagens do sentinel do Município</i>	27
5.2.5.2	<i>Composição de Bandas e Inversão de Cores</i>	27
5.2.5.3	<i>Classificação</i>	27
5.2.5.4	<i>Reclassificação do Mapa</i>	27
5.2.6	Mapa de Vulnerabilidade São Carlos-Sp.	28
5.2.6.1	<i>Geração do Mapa de Vulnerabilidade Ambiental</i>	28
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
6.1	MAPA DE HIDROGEOLOGIA DE SÃO CARLOS	29
6.2	MAPA DE SOLO DE SÃO CARLOS	31

6.3	MAPA DE DECLIVIDADE DE SÃO CARLOS	32
6.4	MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DE SOLO DO MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS	34
6.5	MAPA VULNERABILIDADE AMBIENTAL DO MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS	35
6.6	PONTOS VULNERÁVEIS	37
6.7	DISCUSSÃO	38
7	CONCLUSÃO	40
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

1 INTRODUÇÃO

Vivemos em paisagens cada vez mais povoadas e as cidades encontram-se em constante ampliação. É muito comum ver áreas naturais serem substituídas por áreas urbanas ou agricultura e entrecortadas por rodovias, dutos ou linhas de transmissão. Todos os empreendimentos voltados para a vida do homem, via de regra, se sobrepõem aos espaços e arranjos antes formados pelos elementos naturais, interferindo, de maneira contundente, nas relações e dinâmicas antes estabelecidas. Este fato é facilmente constatado pelo rastro de degradação e pelo comprometimento das funções ecológicas que hoje observamos.(PINHEIRO et al., 2007). De acordo com Tobin e Montz a vulnerabilidade de pessoas e lugares é um fenômeno complexo que é definido pela longa história entre os seres humanos e o meio ambiente(TOBIN; MONTZ, 1997)

A determinação da vulnerabilidade ambiental, que permite avaliar a condição de risco da área em questão à processos geoambientais: erosão; contaminação dos solos; dos recursos hídricos; perda de aproveitamento agrícola; dentre outros(PINESE; RODRIGUES, 2012). De acordo com Miranda Neto e Manoel José (1981) planejamento é um componente essencial para a construção de uma visão sobre as conexões entre os componentes do ambiente natural e o homem que interagem em um mesmo território. Isso, com o objetivo de subsidiar os tomadores de decisão, visto que o planejamento é um processo lógico que auxilia o comportamento humano racional na realização de atividades voltadas para o futuro, mas que necessita de uma análise das condições passadas e presentes com uma visão sistêmica e realista. (MIRANDA NETO ; MANOEL JOSÉ DE. A , 1981)

O município de São Carlos teve um crescimento urbano e rural que não foram acompanhadas por um planejamento territorial, segundo o Barros (2016) são fatos contribuem para o aumento da vulnerabilidade ambiental e interferem na qualidade de vida da população, por estarem interagindo constantemente com os elementos físicos e biológicos do espaço da cidade (BARROS et al., 2016).

Áreas vulneráveis podem ser identificadas por meio de técnicas de geoprocessamento; entre as técnicas de Geoprocessamento, destaca-se o Sistema de Informação Geográfica (SIG) que permite elaborar diagnósticos de situações existentes e prognósticos, gerando mapeamentos que facilitam a avaliação dos impactos. Portanto, o Geoprocessamento possibilita gerar produtos digitais básicos como mapas temáticos aplicados para análise de problemáticas ambientais(DELGADO, 2011)

A partir da utilização da ferramenta de sensoriamento remoto especificamente as imagens de média resolução espacial do satélite sentinel e do Sistema de Informação Geográfico a ARCGIS serão analisadas, processadas e determinadas as áreas de vulnerabilidade ambiental do município de São Carlos.

As bases de dados raster e vetoriais, assim como dados alpha numéricos, foram utilizadas para compor o banco de dados (com dados como a declividade, hidrogeologia, solos, uso e ocupação do solos), como fonte de informação para abastecer o sistema de dados e, conseqüentemente, executar as rotinas de cruzamento de planos de informação.

A determinação das áreas de vulnerabilidade ambiental é muito importante para o planejamento e desenvolvimento dos municípios, sendo realizada a partir das técnicas de geoprocessamento e metodologias para aplicabilidade de diagnósticos que permitem identificar classes de maior ou menor vulnerabilidade ambiental.

Nesse sentido, o objetivo do presente trabalho foi de elaborar um mapa com o índice de vulnerabilidade ambiental do município de São Carlos - SP.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Identificar as áreas que encontram-se vulneráveis no município de São Carlos do estado de São paulo no Brasil.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaboração do mapa de declividade;
- Elaboração do mapa de solos;
- Elaboração do mapa de Hidrogeologia;
- Elaboração do mapa de uso e ocupação do solo; e
- Análise de vulnerabilidade ambiental a partir distribuição espacial.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICAS

3.1 GEOPROCESSAMENTO DE DADOS

O geoprocessamento é um ramo de atividades que utiliza técnicas e métodos teórico - matemáticos e computacionais relacionados à coleta, entrada, armazenamento, tratamento e processamento de dados a finalidade dessas atividades é gerar novos dados ou informações espaciais ou georreferenciadas a partir de informações fornecidas por meio do Sensoramento Remoto e Sistema de Informação Geográfica (SIG), conforme (GUTERRES, 2020).

Na década de 1950, Evelyn Prutt e Walter Bailey definiram o sensoramento remoto como "ciência e a arte de identificar, observar e/ou inferir medições sobre um objeto a distância, sem estar em contato direto com ele", Dita definição é mais completa e reconhecida por muitos pesquisadores (MELO et al., 2021).

Segundo o (CROSTA, 2002) do ponto de vista técnico-científico, as imagens de sensoriamento remoto vem servindo de fontes de dados para estudos e levantamentos geológicos, ambientais agrícolas, cartográficos, florestais, urbanos, oceanográficos, entre outros. Acima de tudo, as imagens de sensoriamento remoto passaram a representar uma das únicas formas viáveis de monitoramento ambiental em escalas locais e globais, devido à rapidez, eficiência, periodicidade e visão sinóptica que as caracterizam.

Desde o ano 2014, a Agência Espacial Europeia lança em órbita uma série de missões satelitais, denominadas Sentinel. Os Sentinels são constelações que realizam o monitoramento da terra e dos oceanos, utilizando sensores de radar. Sua projeção visa coletar dados e imagens fundamentais para o programa Copernicus (dirigido pela agência espacial europeia e a União Europeia, por meio da Agência Europeia do Meio Ambiente). A partir das mesmas, são obtidas imagens ópticas, em alta resolução espacial, para gerar dados de previsão meteorológica, monitoramento da vegetação, desmatamento dos biomas, uso e ocupação dos solos, áreas costeiras, classificação de cobertura do solo, dentre outros (THE COPERNICUS OPEN ACCESS HUB, 2021).

Apos aquisição de dados por meio do sensoramento remoto passa-se a manipular mediante o Sistema de Informação Geográfica (SIG) que consiste na integração de diversos dados obtidos por meio de Sensores Remotos com finalidade de medir, monitorar o meio ambiente,

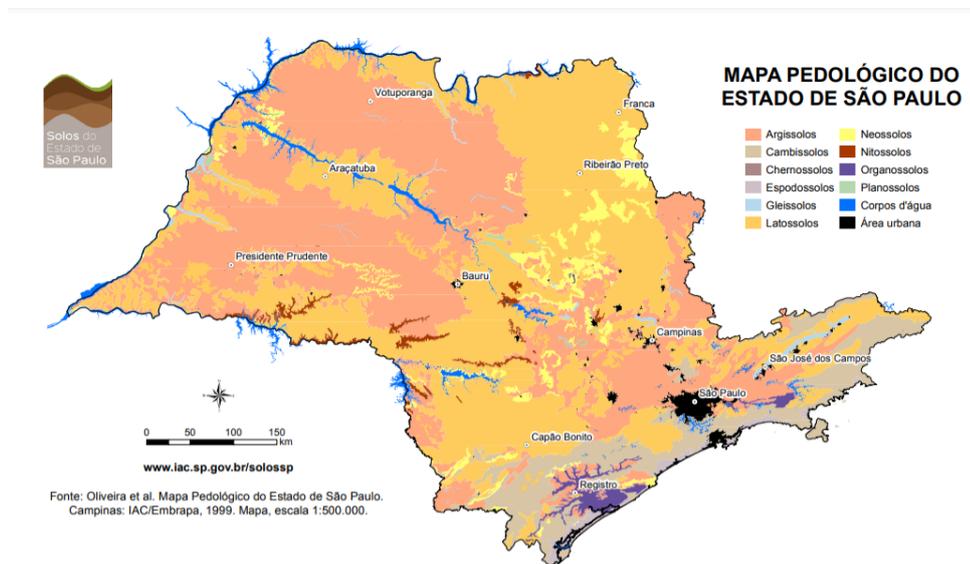
3.2 SOLOS DO BRASIL

Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária (EMBRAPA), o Brasil possui uma grande diversidade de solos em sua extensão continental. A classificação de um solo é obtida a partir da avaliação dos dados morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos. Ditas características são indispensáveis para definir as 13 classes de solos contidas no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS)(SANTOS et al., 2018).

A classificação dos solos é importante, pois nos permite conhecer as qualidades e limitações que o solo de um município, estado ou país possui. O Brasil tem muita diversidade de fatores de formação do solo como material de origem, relevo, clima, organismos vivos que reflete em grande variedade de processos que irão proporcionar a criação dos solos em nosso território(LIMA, 2021).

O estado de São Paulo possui uma variedade de tipos de solos, por consequência da ação climática e também da complexa formação geológica. Encontram-se doze tipos de solos de primeiro nível taxonômico, sendo que os principais tipos de solos são: Argissolo, Cambissolos, Espodossolo, Gleissolo, Latossolo, Neossolo, Nitossolos, Organossolo(GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2020). Na Figura 3.1 pode-se observar o mapa pedológico com os diferentes tipos de solo do estado de São Paulo:

Figura 3.1 – Mapa Pedológico do Estado de São Paulo



Fonte: Oliveira, Instituto Agrônômico.

3.3 HIDROGEOLOGIA

Jean-Baptiste de Lamarck definiu originalmente o termo Hidrogeologia como a ciência que descreve a influência da água na morfologia, e como ela também interfere na superfície da terra(OLIVEIRA, 2017). O estudo da hidrogeologia possui, atualmente, grande relevância, promovendo alternativas frente a diferentes tipos de impactos como suprimento, distribuição da água na superfície da terra e contaminação das águas subterrâneas.

As unidades hidroestratigráficas representam as formações Geológicas ou parte delas que armazenam e transmitem águas subterrâneas de forma parecida e com e com produtividades da mesma ordem de grandeza ou seja considerando os aquíferos nos locais onde os mesmos não sofrem variações em suas produtividades(MANCUZZO; WENLAND, 2018).

Na área de hidrogeologia, existem uma variedade de técnicas como por exemplo medidas de classe, tabulação cruzada, análise de suporte e desição todas elas de processamento digital são cada vez mais aplicadas em feições geológicas de interesse, principalmente quando se faz necessário o conhecimento regional do comportamento estrutural, como na prospecção de água subterrânea(FEITOSA et al., 2008).

3.4 DECLIVIDADE

As formas de relevo podem ser consideradas fatores que exercem grande influência sobre as condições locais nos distintos setores topográficos, a inclinação das vertentes, a rugosidade do terreno ou o entalhamento dos canais caracterizam, dentre outros aspectos, o grau e a potencialidade de uso das terras, juntamente com os solos. A topografia envolve, sobretudo, a declividade do terreno e o comprimento de rampa, fatores que têm papel bastante importante no processo erosivo(SANTOS; BAYER; CARVALHO, 2008).

Os processos de desgaste de degradação do solo e o processo de erosão se fazem de extrema importância nesse campo. De acordo com Silveira, áreas que possuem o maior potencial erosivo são determinadas através da declividade do terreno. Quanto maior for o ângulo de declividade, maior será a concentração do fluxo de escoamento de massas de água e conseqüentemente maior vai ser a sua capacidade de desprendimento e transporte de partículas deste solo. Além de deixar o solo pobre de nutrientes, a enxurrada pode causar sérios danos ao meio ambiente como assoreamento e poluição de rios(SILVEIRA et al., 2012).

O Brasil foi um dos primeiros países a disponibilizar mosaicos de imagens do relevo (SRTM). O uso das imagens SRTM podem ser usadas para gerar curvas de nível, mapas hipsométricos, mapas de relevo sombreado, mapas de declividade, entre outros, eles podem ser aplicados em programas de melhoria da infraestrutura rural, manejo de

bacias hidrográficas, apoio em cumprimento do código florestal, dentre outras finalidades(EMBRAPA TERRITORIAL, 2005).

3.5 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

De acordo com Fiorese e Leite (2018), o planejamento adequado para o uso e ocupação do solo pode evitar problemas ao meio ambiente, como inundações, poluição hídrica e do solo, bem como a aceleração dos processos erosivos. As zonas rurais também necessitam de um ordenamento do uso e ocupação do solo, devido aos diversos tipos de produção aplicados. Portanto, esse mapeamento busca o equilibrar a utilização dos recursos e aplicar o correto manejo socioambiental e econômico.(FIORESE et al., 2021).

Segundo Santos e Petronzio (2011), “os mapas de uso do solo possuem grande importância por demonstrarem a partir da interpretação de imagens de satélites as áreas ocupadas por pastagem, agricultura, vegetação natural nativa, cursos de rios e outras feições”. Além disso, indicam áreas de risco ou que já foram degradadas em determinados locais, como também a distinção entre variações ocorridas devido à evolução da paisagem e as provocadas pelas ações antrópicas. A análise do uso do solo inclui a busca de maneiras de entender a área de interesse a se utilizar, permitindo caracterizar a interação entre o homem e o meio ambiente, se constituindo como uma representação espacial dessas interações. Essa análise pode ser utilizada para apoiar decisões de planejamento e desenvolvimento sustentável, porque o espaço muda constantemente conforme a necessidade e atividades humanas. (SANTOS; PETRONZIO, 2011).

3.6 VULNERABILIDADE AMBIENTAL

A vulnerabilidade ambiental pode ser definida como o nível de suscetibilidade de um sistema natural ou sua incapacidade de lidar com efeitos das interações externas, decorrente de características ambientais naturais ou da pressão causada pelas atividade antrópicas, incluindo sistemas frágeis e de baixa resiliência. Isto é, a capacidade concreta do meio ambiente em retornar ao estado natural de excelência, superando uma situação crítica(AQUINO; PALETTA; ALMEIDA, 2017)

Os problemas ambientais causam desequilíbrio aos ecossistemas, existem diversos fatores que se relacionam entre si por exemplo a perda de solos, contaminação das águas subterrâneas, processos de erosão que podem causar possíveis riscos, porém torna-se necessário estudos que indiquem as áreas que se encontram vulneráveis e assim elaborar planos de conservação destas áreas.

Utilizando SIG, pode-se gerar mapas de vulnerabilidade natural e ambiental a partir de diferentes tipos de base de dados, possibilitando o diagnóstico de áreas mais sensíveis a problemas ambientais e recomendações para um melhor aproveitamento das atividades de controle e proteção. A integração dos dados obtidos a partir dos sistemas e a utilização de ferramentas que agilizem essa integração, compõem a avaliação de vulnerabilidade ambiental, permitindo ao pesquisador a observação do dinamismo desses sistemas e os riscos reais aos quais estão suscetíveis (AQUINO; PALETTA; ALMEIDA, 2017)

3.7 ANÁLISE DE MULTICRITÉRIOS

Conforme o estudo realizado por Santos (2014), a análise de multicritério é uma técnica que surgiu em meados de 1960 e tem sido amplamente empregada como instrumento de apoio à decisão. É definida como um procedimento metodológico no qual é possível realizar o cruzamento de dados, cuja base é a organização das informações em camadas sobrepostas, que são hierarquizadas, assim como seus atributos componentes. Por meio dela, é possível analisar simultaneamente diversas variáveis para a resolução de problemas complexos, uma vez que subsidia a escolha de alternativas de acordo com diferentes critérios e pontos de vista. Nesse sentido, a análise multicritério constitui-se numa importante ferramenta destinada à elaboração de análises espaciais de caracterização e planejamento, inclusive de cenários futuros (SANTOS, 2014).

No estudo apresentado por Trevisan (2018), os pesos atribuídos para o cálculo do índice de vulnerabilidade podem direcionar os resultados em diferentes vertentes de avaliações. O balanceamento desses pesos às diferentes características da paisagem, contribuíram de forma a correlacionar os diversos compartimentos da paisagem, sem considerar que uma ou outra característica possui maior influência em sua vulnerabilidade ambiental Trevisan et al. (2018).

As variáveis analisadas (Critérios e Alternativas) tende a ser subjetiva, pois, pode depender da experiência do avaliador, e de vários outros fatores associados, como a própria relação entre as unidades territoriais do sistema ambiental, por exemplo, uma vegetação densa pode ser muito mais vulnerável em um solo aluvial do que em um Latossolo e uma média aritmética padronizada, acaba não retratando essa realidade (DIAS; SILVA, 2021).

Neste contexto o presente trabalho determinará as áreas de vulnerabilidade do município de São Carlos -SP, utilizando os critérios e procedimentos expostos na literatura como o Uso de metodologia de atribuição de pesos multicritério.

4 MATERIAIS

4.1 EQUIPAMENTOS E APLICATIVOS COMPUTACIONAIS

Para a realização do presente trabalho foi utilizado como equipamento para a análise dos dados um notebook HP PAVILION GAMING com as seguintes especificações técnicas:

- Processador Intel(R) Core(TM) i5-10300H
- Placa Gráfica NVIDIA® GeForce GTX 1650ti 4 gb
- Sistema operacional Windows 10

Os software utilizados para o processamento e escrita do trabalho foram:

- Latex em línea (overleaf)
- Software ARCGIS 10,3 (ESRI TRADEMARKS, 2021)
- Google Earth Pro (GOOGLE LLC., 2021)

5 METODOLOGIA

5.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A cidade de São Carlos está localizada no centro geográfico do estado de São Paulo, a cerca de 231 km de distância da capital, fica localizado nas seguintes coordenadas geográficas 22°1'4" (latitude sul) e 47°53'27" (longitude oeste), o mínimo pluviométrico da região ocorre geralmente de abril a setembro, Possui um área de 1 136,907 km² de extensão, Segundo o IBGE ao ano 2021 tem 256 915 habitantes, a temperatura média anual é de 19,6 °C (graus centígrados) e as altitudes estão entre 800 e 1000 metros acima do nível do mar, tornando o clima da cidade agradável, com diversas cachoeiras e formações geológicas(PREFEITURA DE SÃO CARLOS, 2021).

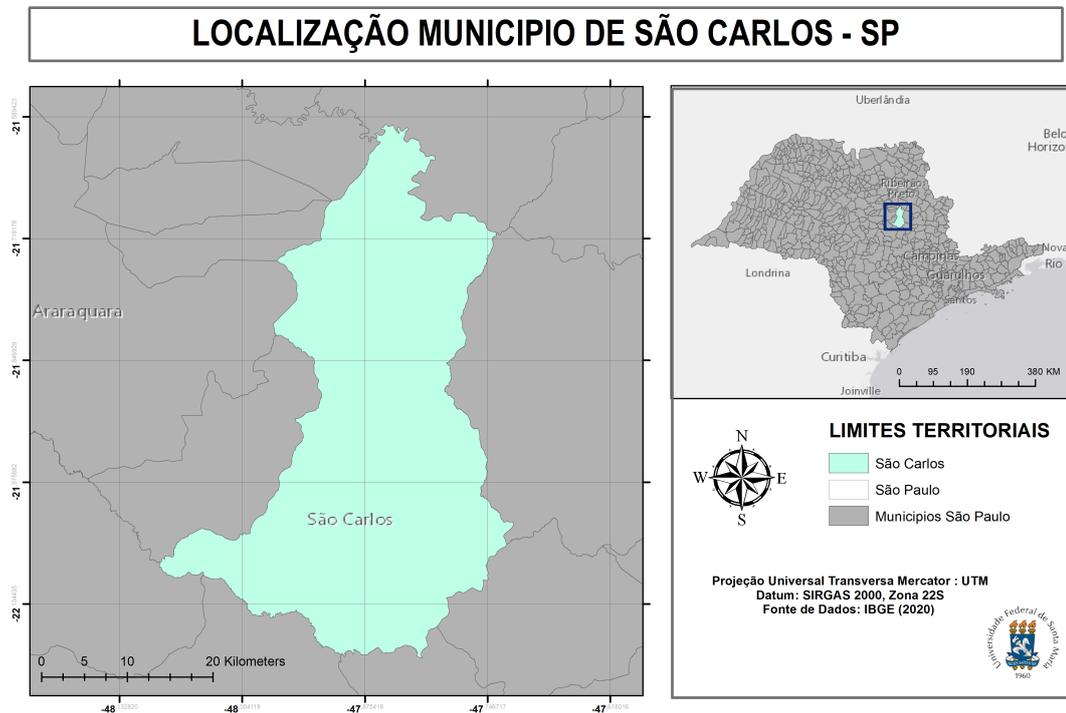
O setor agropecuário se destaca na produção de leite, cana, laranja e frango. A atividade industrial é marcada pela presença de grandes indústrias, como a Volkswagen (motores), Tecumseh (compressores), Faber Castell (lápiz), Electrolux (geladeiras e fogões), além de empresas têxteis, de embalagens, de máquinas, de tintas, de lavadoras e de equipamentos ópticos, como uma grande quantidade de indústrias médias e pequenas dos mais diversos setores de produção.(PREFEITURA DE SÃO CARLOS, 2021).

O Cerrado foi a vegetação original predominante, que ocorre em terrenos arenosos do planalto. Sobre as manchas de solos férteis existia uma vegetação de Mata Atlântica exuberante, onde hoje há áreas de cerrado e fragmentos de mata preservada, incluindo vários exemplares da árvore de araucária de grande porte, símbolo da cidade .(PREFEITURA DE SÃO CARLOS, 2021)

A presença de duas universidades finalmente catalisou a instalação de um parque de alta tecnologia, formado por duas unidades da Embrapa. Além disso tem a presença de instituições de pesquisa voltadas à alta tecnologia e possui grande número de empresas e centros tecnológicos, desenvolvidos em torno de duas das mais destacadas universidades do país: a Universidade Federal de São Carlos (Ufscar), e a Universidade de São Paulo (USP), com dois campi em São Carlos. Além da USP, da Ufscar, e do Instituto Federal de São Paulo (IFSP), a cidade possui duas instituições privadas de ensino superior: o Centro Universitário Central Paulista (Unicep) e a Faculdades Integradas de São Carlos (Fadisc), e os centros de formação profissional do Senai, Sesi, Sesc, Senac, Atheneu e Escola Técnica Estadual Paulino Botelho(Assembléia Legislativa do Estado de São Paulo, 2011).

Na Figura 2 é exibido o mapa de localização da cidade no Estado de São Paulo:

Figura 5.1 – Mapa de localização do Município de São Carlos, SP



Fonte: Construído pela autora a partir de dados do IBGE (2021)

5.2 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS

Para elaboração do presente projeto, foram coletadas as imagens (cena) de média resolução espacial do satélite Sentinel, descarregadas com as datas de aquisição e seguintes órbitas:

- T22KHA (09/08/2021)
- T23KKS (27/08/2021)
- T22KHB (28/08/2021)

Das diferentes imagens coletadas, apenas 3 foram escolhidos porque eram os que tinham pouca presença de nuvens, as nuvens não permitem que as imagens sejam bem processadas, logo é feito um mosaicagem com as melhores imagens.

5.2.1 Delimitação de área de interesse - São Carlos

Os Shapefile do limite do Município de São Carlos foi obtido através do site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) da malha dos municípios de São Paulo,

onde executou-se a seguinte rotina dentro do ARCGis 10.3 : > Add Data > adjunta o Layer > tabela de atributos > seleção a cidade > data > export data

5.2.2 Mapa Hidrogeologia

5.2.2.1 *Inserção de Arquivo Unidade hidrogeológica*

Inserção do Arquivo Unidade hidrogeológica que foi obtido do site de IBGE.

> Botão direito > propriedades > categories: NOMUFAFL (add all values) > aplicar.

5.2.2.2 *Conversão Imagem Vetor hidrogeológica para Raster*

Conversão de vetor para raster é feita com as seguintes rotinas > Conversion tools > to raster > polygon to raster > Input: mapa de hidrogeologia > Value field: comp1 > Substitui 0,16 por 0,001

5.2.2.3 *Extração do Limite do Município do Mapa de Hidrogeologia*

> Arctoolbox > spacial analyst > extract > extract to mask > Input: imagem raster feita de hidrogeologia > Limite do município.

5.2.2.4 *Inserção Imagens do Sentinel-2*

> Add data > abre pasta que criou no disco local > seleciona a pasta da imagem > única pasta que tem > granule > única pasta > IMGDATA> seleciona os arquivos com final b02 b03 b04.

5.2.2.5 *Composição de Bandas e Inversão de Cores*

> ArcToolBox > data management tools > raster > raster processing > composite bandss > Inverter bandas: botão direito na última imagem gerada > propriedades > symbology > Red = 3, Green = 2, Blue = 1

5.2.2.6 *Reclassificação do Mapa*

A reclassificação das formações geológicas e feita segundo o mais propenso a vulnerabilidade na tabela 1, indica onde se encontra maior risco de degradação maior valor, Onde tem menor risco de degradação menor valor.

Tabela 5.1 – Categorias Hierárquicas de Hidrogeologia

Hidrogeologia	Peso
Formação de serra geral	1
Grupo do Passa Dois	2
Formação Itaqueri	3
Formação de Piramboia	4
Formação Botucatu	5

Fonte: Autora (2021).

Na área da cidade de São Carlos, ocorrem em superfície sedimentos clásticos, predominantemente arenosos provenientes da Formação Botucatu, e rochas ígneas basálticas proveniente da Formação Serra Geral, sedimentos cenozoicos vindos da Formação Itaqueri, arenitos finos pertencentes ao Grupo passa Dois e Formação Itaqueri, rochas básicas intrusivas da Formação Piramboia.(PERRONI, 2005). Devido a essas características, elas foram levadas em consideração para a hierarquização na Tabela 5.1 - Categorias hierárquicas de Hidrogeologia.

5.2.3 **Mapa de Solos**

5.2.3.1 *Inserção o Arquivo Brasil Solos*

O arquivo Brasil Solos descarregado da (EMBRAPA, Ricardo Dart, 2020),
> Botão direito no arquivo já inserido > propriedades > symbology > categories > COMP1 > add all values

5.2.3.2 *Conversão Imagem Vetor (Solos) para Raster*

> Conversion tools > to raster > polygon to raster > Input: mapa de hidrogeologia > Value field: comp1 > Substitui 0,16 por 0,001

5.2.3.3 *Extração Limite do Município do Mapa de solos*

Arctobox > spacial analyst > extract > extract to mask > Input: imagem raster solos > Limite do município.

5.2.3.4 *Inserção Imagens do Sentinel-2*

5.2.3.5 *Composição de Bandas e Inversão de Cores*

5.2.3.6 *Reclassificação do Mapa*

Conforme as características físico - química, dos tipos de solos classifica-se hierarquicamente, onde encontra-se o maior risco de degradação coloca-se o valor maior, e onde se tem o menor risco de vulnerabilidade coloca-se o menor valor. > Spatial > reclass > reclassify.

Tabela 5.2 – Categorias Hierárquicas de Solos

Solos	Peso
Argissolos Vermelho-Amarelo Distrofico	1
Neossolos Quartzarenicos Orticos	2
Latossolo Vermelho-Amarelo Distrofico	3
Latossolos vermelho distroferricos	4
Latossolo vermelhos distroficicos	5

Fonte: Autora 2021.

5.2.4 **Mapa Declividade**

5.2.4.1 *Inserção das imagens SRTM do Município*

descarregam-se as imagens SRTM no site da Embrapa (BRASIL EM RELEVO, 2021).

> Imagem SRTM > Spacial analyst tools > surface > slope > SRTM > percent rise (output) > 1 (Z factor) > Propriedades > symbology> classified > label > rate > factor (1.000.000) > label > numeric options (2 casas após a vírgula)

5.2.4.2 Reclassificação do Mapa

As áreas situadas em declividade superior a 45° são muito vulneráveis a ocorrência de processos erosivos, quando não possuem a cobertura vegetal nativa. De acordo com o Novo Código Florestal Brasileiro são Áreas de Preservação Permanente (APP), as encostas ou partes destas com declividade superior a 45°. (CALCAVANTE; BATISTA; LISBOA, 2016)

Segundo as características de declividade, classifica-se hierarquicamente, onde encontra-se o maior risco de vulnerabilidade coloca-se o valor maior, e onde se tem o menor risco de vulnerabilidade o valor menor.

> Spatial > reclass > reclassify.

Tabela 5.3 – Categorias Hierárquicas de Declividade

Declividade	Peso
0 - 3,4	1
3,5 - 6,2	2
6,3 - 9,1	3
9,2 - 12,8	4
12,9 - 17,5	5
17,6 - 23,1	6
23,2 - 29,5	7
29,6 - 37,4	8
37,5 - 62,7	9

Fonte: Autora (2021)

5.2.5 Mapa Uso e Ocupação de Solo

5.2.5.1 Inserção das imagens do sentinel do Município

Imagens sentinel do município descarregadas do site Copernicus (THE COPERNICUS OPEN ACCESS HUB, 2021)

> Imagem Sentinel > Add data > Agregam as imagens

5.2.5.2 Composição de Bandas e Inversão de Cores

> ArcToolBox > data management tools > raster > raster processing > composite bands (todas juntas)

> Inverter bandas: botão direito na última imagem gerada > propriedades > symbology > Red = 3, Green = 2 , Blue = 1

5.2.5.3 Classificação

> Classification > isocluster não supervisionado

5.2.5.4 Reclassificação do Mapa

Conforme as características de Uso e Ocupação do solo, classifica-se hierarquicamente, onde encontra-se o maior risco de vulnerabilidade coloca-se o valor maior, e onde se tem o menor risco de vulnerabilidade coloca-se o menor valor

> Spatial > reclass > reclassify.

Tabela 5.4 – Categorias Hierárquicas de Uso e Ocupação do solo

Uso e Ocupação do Solo	Peso
Área Urbana e solo Exposto 4	1
Área Urbana e solo Exposto 3	2
Área Urbana e solo Exposto 2	3
Área Urbana e solo Exposto 1	4
Pastagem	5
Área de plantio	6
Cerrado, Floresta e Mata Nativa	7

Fonte: Autora (2021)

Não foi realizado levantamento de campo, mas foi feita uma análise visual do mapa de uso e ocupação do solo, razão pela qual, em relação às áreas urbanas com solo exposto 1, área urbana com solo exposto 2, área urbana com solo exposto 3, área urbana com solo exposto 4, esses solos expostos podem ser culturas que já foram coletadas e o solo ficou exposto, elas podem ser: cana-de-açúcar, milho, mandioca, tomate, amendoim, são culturas que predominam na região, por isso recomenda-se a coleta de dados in loco.

As áreas de pastagem são áreas destinadas à criação de gado de corte e leite, pois na região há influência da criação de gado para a indústria alimentícia. (PREFEITURA DE SÃO CARLOS, 2021). recomenda-se a coleta de dados in loco.

As áreas de plantio podem ser áreas com árvores segundo a Prefeitura (PREFEITURA DE SÃO CARLOS, 2021), na região existem plantações de laranja, Silvicultura, assim como árvores nativas e frutíferas, para uma melhor identificação recomenda-se a coleta de dados in loco.

As áreas de Cerrado, Floresta e Mata Nativa são áreas que precisam ser preservadas, pois são vulneráveis aos impactos antrópicos ou ambientais, razão pela qual a Tabela 5.4 - Categorias Hierárquicas de uso e ocupação do solo atribui-se o maior peso.

5.2.6 Mapa de Vulnerabilidade São Carlos-Sp.

5.2.6.1 Geração do Mapa de Vulnerabilidade Ambiental

> Spatial > map álgebra > raster calculator

Inserção da seguinte fórmula na tabela que foi aberta:

(declividade * 0,30) + (geologia * 0,10) + (solos * 0,20) + (uso e ocupação do solo * 0,40)

A seguinte equação mostra os pesos que foram estabelecidos com base na Análise Multicritério e o conhecimento geral de vários autores e diferentes bibliografias.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Obteve-se como resultados das rotinas de processamento do sistema de informação geográfico.

6.1 MAPA DE HIDROGEOLOGIA DE SÃO CARLOS

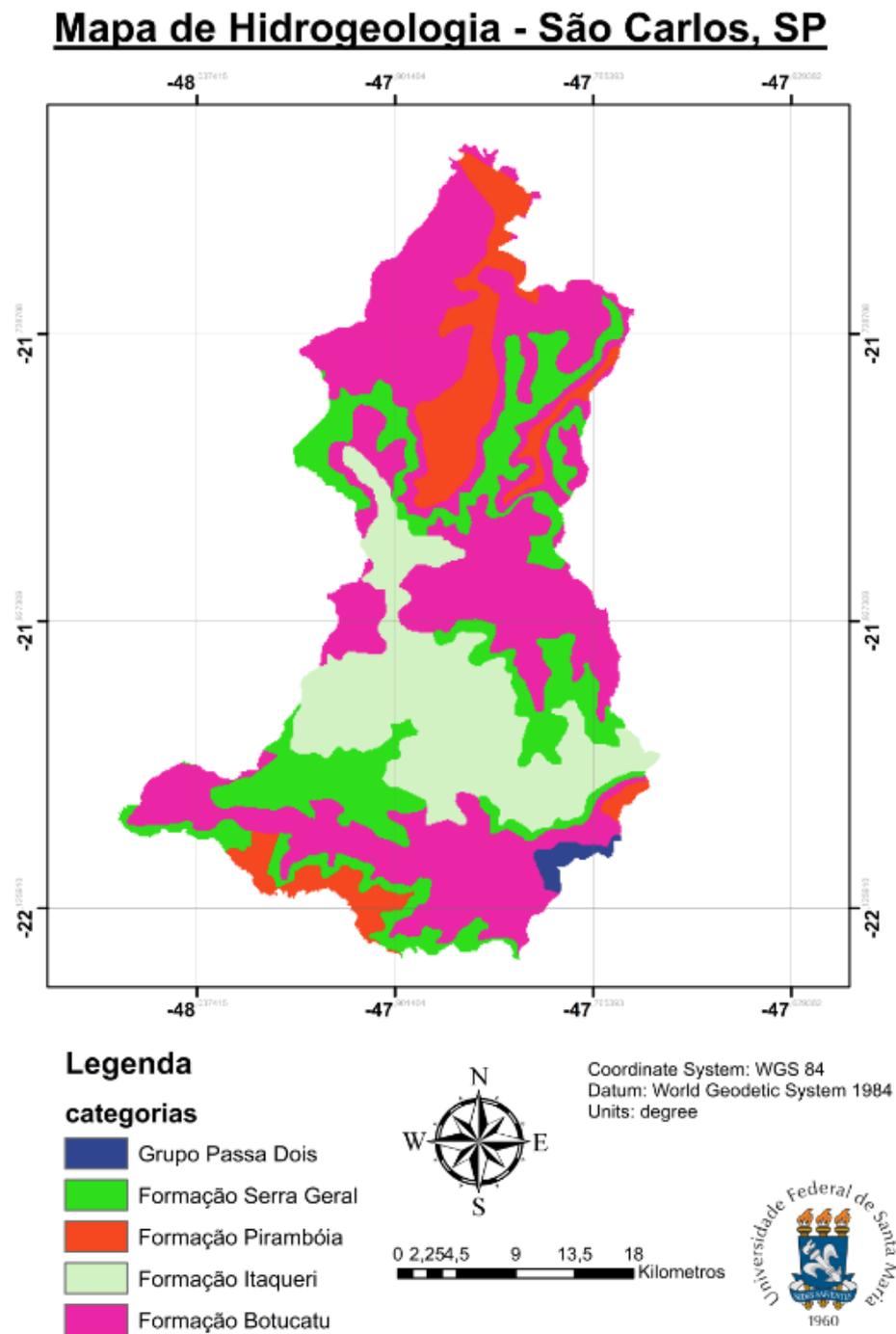
Na figura 6,1, pode-se observar o mapa de Hidrogeologia do Município de São Carlos, composto pela formação da Serra Geral, Formação Piramboia, Formação Itaqueri, Formação Botucatu e Grupo Passa Dois.

De acordo com as informações presentes no mapa de Hidrogeologia do Município de São Carlos, nota-se que a formação predominante é a Botucatu. Essa formação apresenta 30 arenitos de granulação fina a média, solo arenoso com baixa capacidade de reter poluentes. Além disso, as rochas do arenito são porosas e funcionam como uma esponja gigante no subsolo, absorvendo a água da chuva e dos rios (NETO et al., 2020).

Essa zona corresponde à área de recarga do aquífero Guarani, o aquífero guarani esta formado pelas formações Botocatu e Piramboia sendo a área de onde a empresa fornecedora de Serviço Autônomo de Água e Esgoto(SAAE), retira a água, utilizando 28 poços profundos(SAAE, 2021).

Em função ao contexto geológico são identificados 3 Aquíferos na região, além do Aquífero Botocatu, encontra-se o Aquífero Serra geral e o Aquífero Bauru, este ultimo propicia ocorrência de nascentes na região, os 3 Aquíferos mencionados que se encontram na região possuem a característica de ser Aquíferos livres e semi-confinados (PERRONI, 2005).

Figura 6.1 – Mapa de Hidrogeologia

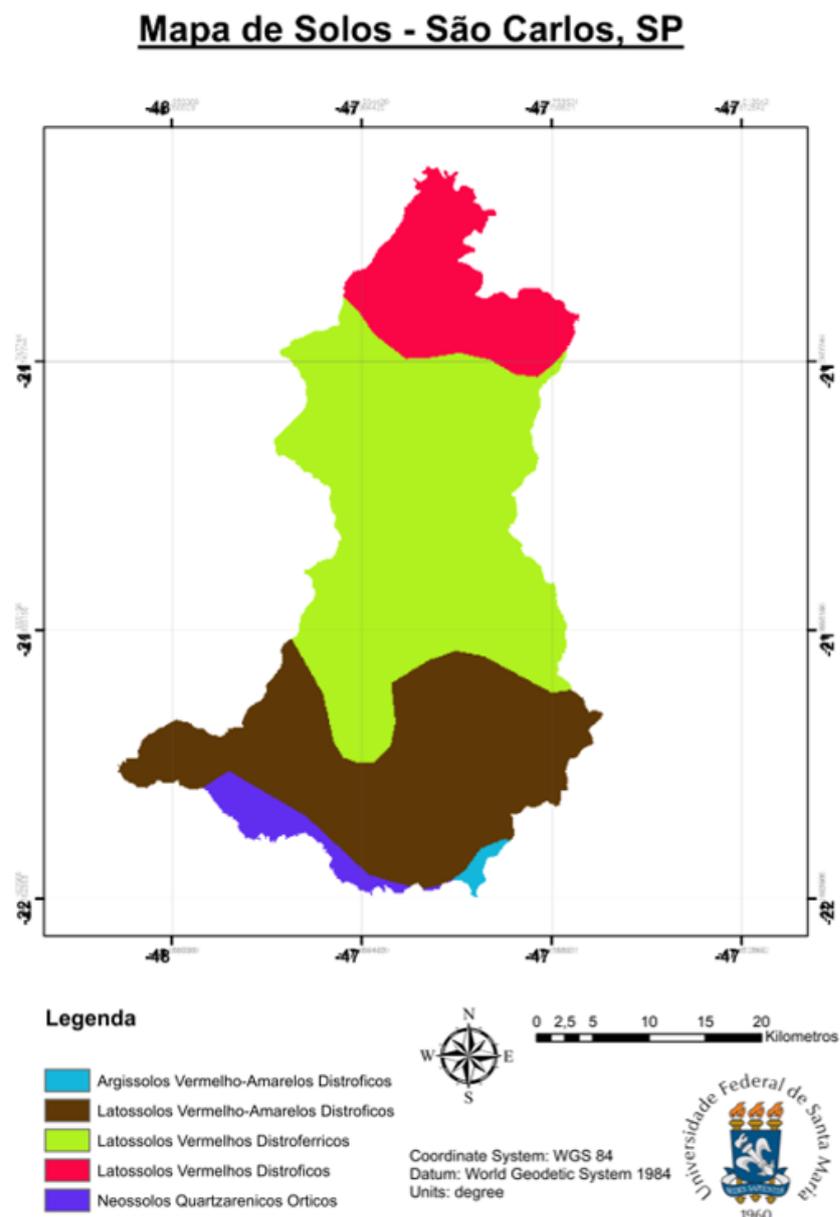


Fonte: Construído pela autora a partir de dados de IBGE.

6.2 MAPA DE SOLO DE SÃO CARLOS

Conforme apresentado na figura 6,2, o município de São Carlos conta com 5 tipos de solos: Argissolo Vermelho - Amarelo Distrófico , Latossolo Vermelho - Amarelo Distrófico, Latossolo vermelho distroferrico , Latossolo Vermelho Distrófico, Neossolo quartzarênico, porém, o solo que possui maior predominância é o Latossolo. Os latossolos possuem aptidão para a agricultura, porém o município de São Carlos tem predomínio de agricultura extensiva.

Figura 6.2 – Mapa de solos de São Carlos



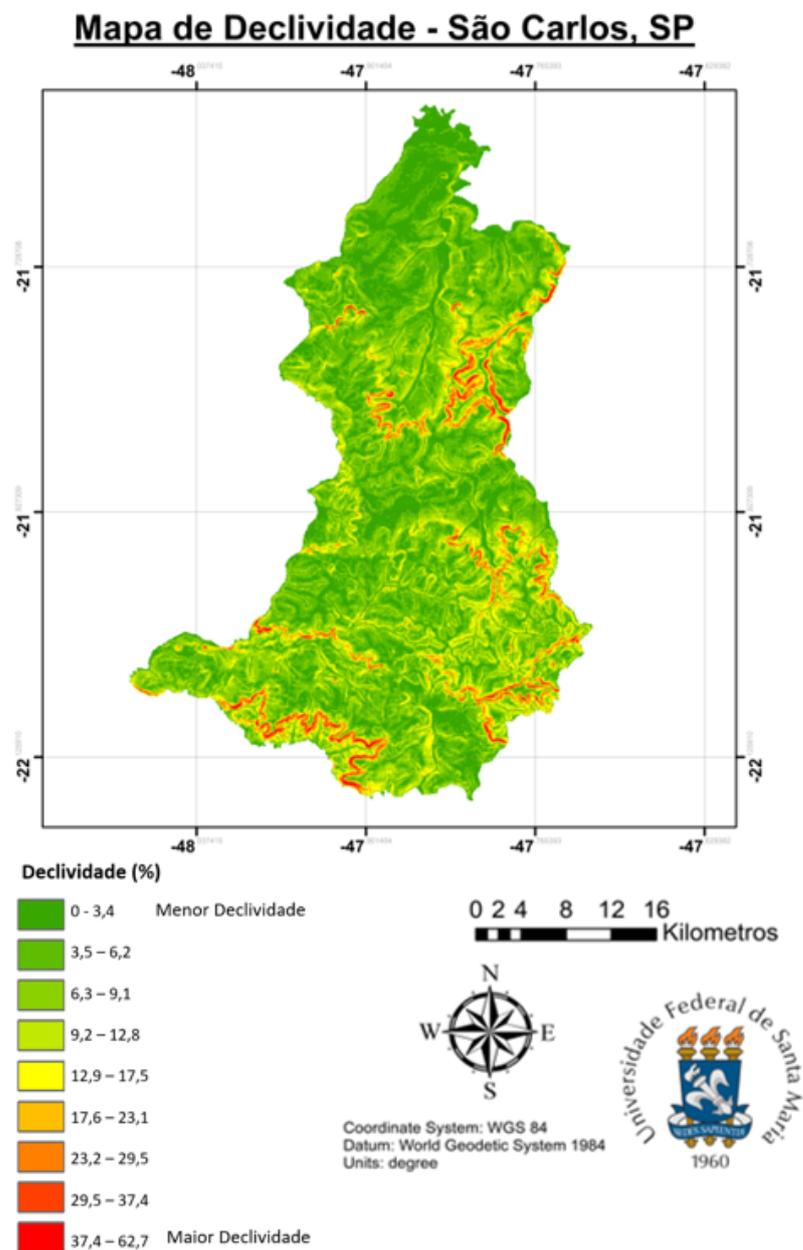
Fonte: Construído pela autora a partir de dados de (EMBRAPA, Ricardo Dart, 2020)

6.3 MAPA DE DECLIVIDADE DE SÃO CARLOS

É importante conhecer a declividade do terreno sendo um fator fundamental no processo erosivo quanto maior for a rampa de escoamentos superficial maior sera a velocidade de escoamento da água provocando a erosão pela enxurrada o que pode causar muitos danos. Foram Identificadas as partes de maior declividade pequenas áreas que estão perto de encostas dos rios principais do município (AMBIENTE BRASIL, 2021).

Na figura 6.3 pode-se observar o Mapa de Declividade do município de São Carlos

Figura 6.3 – Mapa de Declividade de São Carlos



Fonte: Construído pela autora a partir de dados de (BRASIL EM RELEVO, 2021)

Segundo a Ross (JURANDIR LUCIANO SANCHES ROSS , 2011) existem classes de declividade associados aos levantamentos geológicos para o entendimento da relação relevo/solo/rocha entre outros fatores o que serve para análise de fragilidade ambiental deste modo as classes que definiu são as apresentadas na figura 6.4

Figura 6.4 – Classes de fragilidade Ambiental

Classes de Declividade (%)	Fragilidade Ambiental
0 a 2	Muito Baixa
2 a 3	
3 a 6	
6 a 9	Baixa
9 a 12	
12 a 15	Média
15 a 20	
20 a 30	Alta
Acima de 30	Muito Alta

Fonte: Adaptado (JURANDIR LUCIANO SANCHES ROSS , 2011)

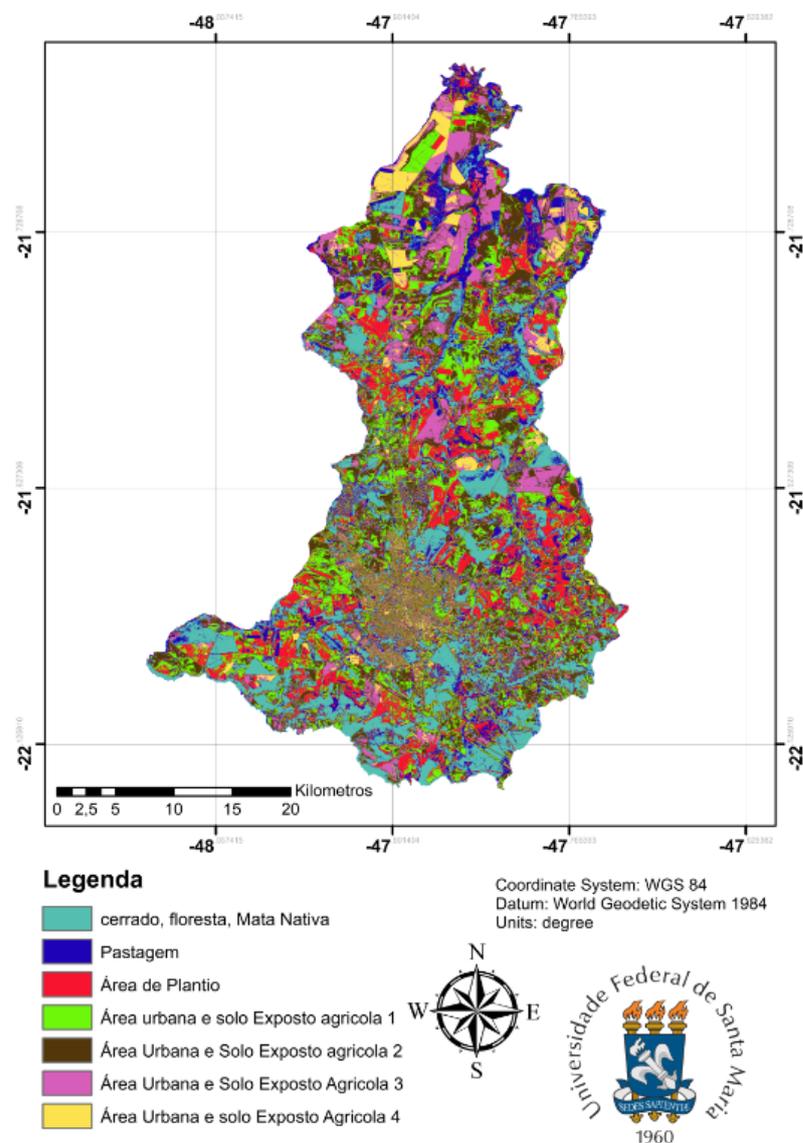
de acordo a classificação do (JURANDIR LUCIANO SANCHES ROSS , 2011) pode-se afirmar que o município de São Carlos possui uma fragilidade ambiental de muito baixa a muito alta devido aos valores que apresenta no mapa de declividade,

6.4 MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DE SOLO DO MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS

O mapa de uso e ocupação do solo conforme se mostra na Figura 6,5 permite inferir que, no município de São Carlos, existem áreas de ocupação para fins urbanos, também predominam áreas agrícolas, Áreas de Plantio, áreas de cerrado, floresta e mata Nativa,

Figura 6.5 – Mapa de Uso e Ocupação de Solo de São Carlos

Mapa de Uso e Ocupação do solo - São Carlos, SP



Fonte: Construído pela autora a partir de dados de (THE COPERNICUS OPEN ACCESS HUB, 2021)

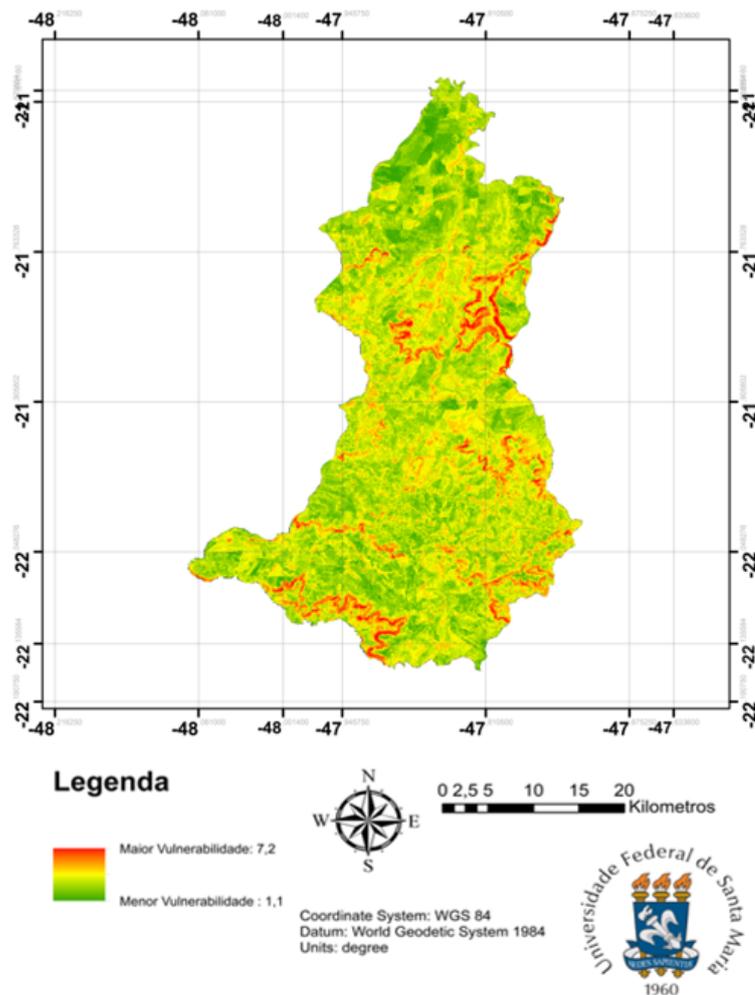
6.5 MAPA VULNERABILIDADE AMBIENTAL DO MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS

Após aplicação das rotinas e da álgebra de mapas, o mapa de vulnerabilidade foi obtido e está exposto na figura 6.6, Pode se Observar que as zonas de maior vulnerabilidade estão indicadas com a cor vermelha e as zonas de menor vulnerabilidade são representadas pela cor verde. A partir da sobreposição do mapa indicado na figura 6,7 com a imagem retirada do Google Earth Pro, identificam-se os locais de maior risco ambiental.

Essa sobreposição pode ser observada na figura 6,7 e os indicadores em vermelho indicam as áreas de maior risco:

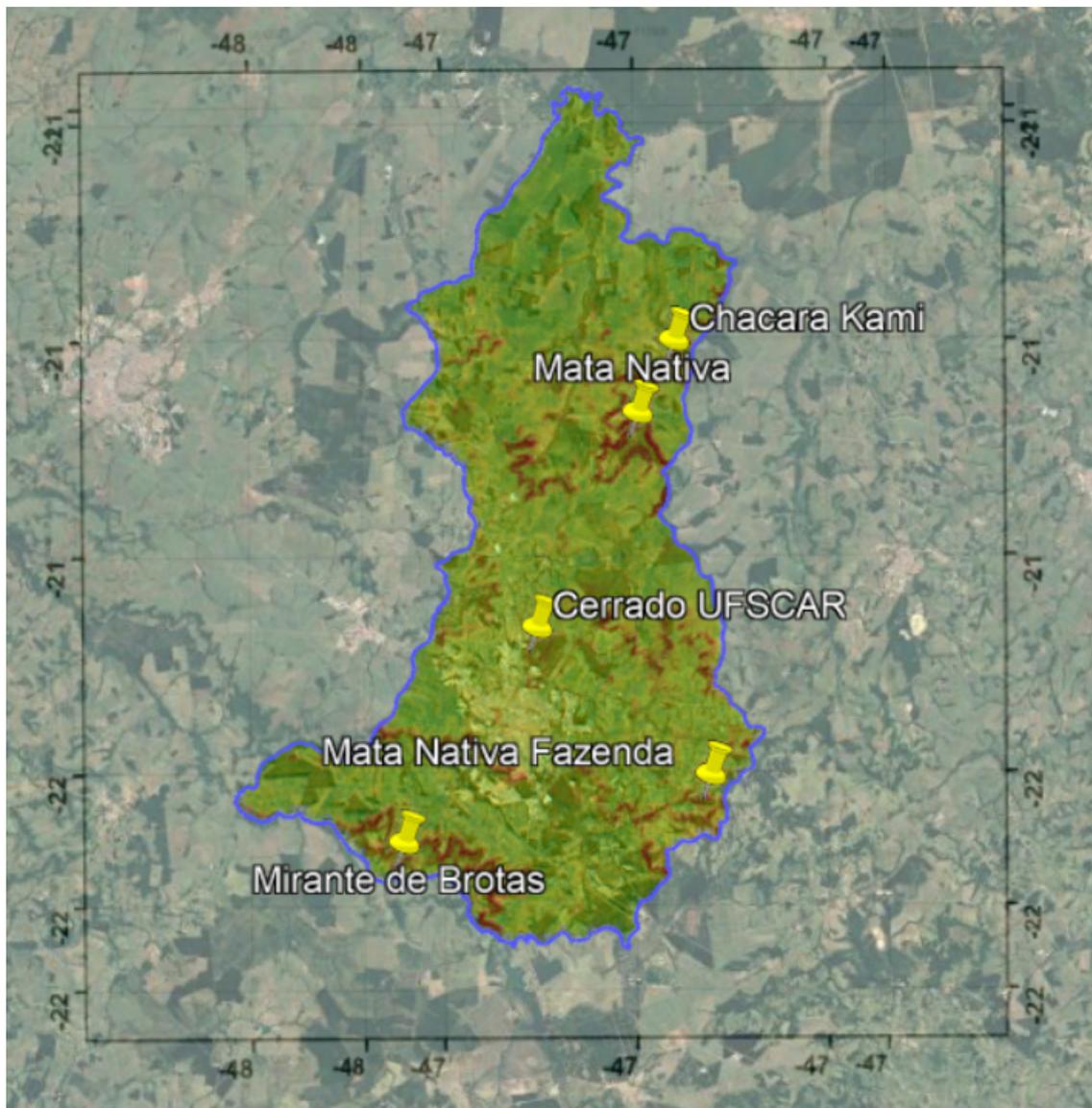
Figura 6.6 – Mapa de Vulnerabilidade Ambiental do Município de São Carlos

Mapa de Vulnerabilidade Ambiental - São Carlos, SP



Fonte: Autora (2021)

Figura 6.7 – Sobreposição do Mapa de vulnerabilidade Ambiental a Imagem do Google Earth



Fonte: Adaptado (GOOGLE LLC., 2021)

6.6 PONTOS VULNERÁVEIS

Os pontos identificados coincidem com as áreas que apresentam maior risco de vulnerabilidade e são áreas de fácil degradação. Além disso, fornecem informação para análise interpretativa dos pontos em que existe vulnerabilidade. Portanto, essas informações auxiliam na tomada de decisão dos órgãos competentes.

As áreas que possuem maior vulnerabilidade e maior declividade são aquelas em que há florestas, cerrados e mata nativa, como mostrado na figura 6.8, as mesmas são identificadas como áreas de maior risco, como o cerrado da Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR), onde está localizada uma área de preservação permanente. Essas áreas são de suma importância para garantir a preservação e proteção do bioma.

Figura 6.8 – Pontos vulneráveis



Fonte: Imagens adaptadas do (GOOGLE LLC., 2021)

6.7 DISCUSSÃO

Uma alternativa para integrar variáveis com pertinência a vulnerabilidade ambiental sem recorrer a experimentação na construção de um modelo empírico, é empregar um modelo de conhecimento de suporte a decisão (DELGADO, 2011).

Os pesos atribuídos na equação para obter o Mapa de Vulnerabilidade Ambiental do Município de São Carlos-SP, foram distribuídos tendo em conta os seguintes critérios:

- O parâmetro de declividade foi multiplicado por 0,30, isso foi feito porque os processos erosivos ocorrem quando há maior declividade, afetando aos solos expostos.

- O parâmetro do solo que indica a composição em relação às rochas e componentes de areia, silte e argila foi multiplicado por 20, pois possui alto índice de lixiviação e alto índice de desagregação quando há chuvas fortes.

- No parâmetro geologia foi multiplicado por 0,10 por ser a parte rochosa, a rocha não é tão importante quanto o solo em termos de processos de lixiviação.

- O parâmetro de uso e ocupação do solo foi multiplicado por 0,40 atribuiu-se um peso maior porque quando há desmatamento de determinada área, produz uma diminuição da porosidade, o que causa uma redução na drenagem e perda de estabilidade: como consequência, ocorre crostas na superfície e, portanto, aumenta o escoamento então quando Maior for a cobertura vegetal menor será o processo erosivo.

Existem vários autores que utilizam diferentes equações para encontrar zonas vulneráveis, atribuindo pesos de acordo com o grau de importância que o autor determina (Análise Multicritério). Segundo a metodologia da Costa (2006) consiste na integração lógica dos diferentes dados disponíveis, conhecendo-se previamente os terrenos do ponto de vista físico, biótico e ambiental. O conjunto de todas essas informações foi integrado para gerar e armazenar uma base de dados georreferenciados as informações armazenadas, podem ser gerenciadas para dar início ao cruzamento dos dados que resulta nos mapas de Vulnerabilidade Natural e Vulnerabilidade Ambiental. aplicado o método de ponderação de fatores, que permite a possibilidade de compensação entre os fatores através de um conjunto de pesos que indicam a importância relativa de cada fator. Os pesos de compensação indicam a importância de qualquer fator em relação aos demais(COSTA et al., 2006) na Figura 6.9 pode se observar os pesos que ele atribuiu.

Figura 6.9 – Pesos Calculados para cada Fator na Análise de Vulnerabilidade Ambiental

TABELA 4: PESOS CALCULADOS PARA CADA FATOR NA ANÁLISE DE VULNERABILIDADE AMBIENTAL

FATOR				
Geomorfologia	Geologia	Solos	Vegetação	Uso e Ocupação do Solo
0,2	0,1	0,1	0,1	0,5

Fonte: (COSTA et al., 2006)

Há outro modelo feito por Crepani et al (2001), ele estabelece 21 classes de vulnerabilidade à perda de solo, distribuídas entre as situações onde há o predomínio dos processos de pedogênese (valores próximos de 1,0), passando por situações intermediárias (às quais se atribuem valores ao redor de 2,0) e situações de predomínio dos processos de morfogênese (às quais se atribuem valores próximos de 3,0). Onde o modelo é individual aos temas (Geologia, Geomorfologia, Solos, Vegetação e Clima) que compõem cada unidade territorial básica, que recebe posteriormente um valor final, resultante da média aritmética dos valores individuais segundo uma equação empírica que busca representar a posição desta unidade dentro da escala de vulnerabilidade natural à perda de solo. Dentro desta escala de vulnerabilidade as unidades que apresentam maior estabilidade são representadas por valores mais próximos de 1,0, as unidades de estabilidade (CREPANI et al., 2001)

Figura 6.10 – Equação aplicada para cálculo de vulnerabilidade

$$V = \frac{(G + R + S + Vg + C)}{5}$$

onde:

- V = Vulnerabilidade
- G = vulnerabilidade para o tema Geologia
- R = vulnerabilidade para o tema Geomorfologia
- S = vulnerabilidade para o tema Solos
- Vg = vulnerabilidade para o tema Vegetação
- C = vulnerabilidade para o tema Clima

Fonte: (CREPANI et al., 2001)

7 CONCLUSÃO

A partir da análise dos resultados, pode-se afirmar que os mesmos foram satisfatórios e que a metodologia de análise multicritério demonstrou-se eficiente para a geração do mapa de vulnerabilidade ambiental segundo os critérios adotados.

A utilização de sistemas de Informação Geográfica para identificar áreas que se encontram vulneráveis foi eficiente, os resultados encontrados usando a sobreposição de mapa de vulnerabilidade com a imagem do Google Earth pro foram coerentes pois mostra resultados que estão na realidade do município de São Carlos.

A partir desses dados, foi possível identificar áreas vulneráveis que estão sujeitas a sofrer impactos antrópicos, porém exortando a importância de estudos mais profundos, com coleta de dados in loco a fim de obter dados e análises com alto grau de confiabilidade e propiciando o manejo adequado.

O geoprocessamento de dados é uma ferramenta que se pode usar na fiscalização, monitoramento, ordenamento territorial, implementação para a Gestão de políticas públicas, ele se mostra eficiente em um curto espaço de tempo.

Salienta-se, ainda, a importância das imagens do Sentinel, fornecendo informações que podem ser utilizadas para auxiliar em elaboração de projetos como , análise de risco para elaboração a avaliação de impacto ambiental, análise de Uso e ocupação do solo, assim controlar o uso do espaço urbanístico e rural, monitoramento de Biomas, Estudo de caracterização de bacias hidrográficas entre outros,

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GUTERRES . *O que é geoprocessamento?: Tudo o que você precisa saber!* [S.l.]: Viçosa, 2020. Disponível em: <<http://https://agropos.com.br/o-que-e-geoprocessamento>>. Acesso em 20 outubro 2021.

MIRANDA NETO ; MANOEL JOSÉ DE. A . *A crise do planejamento*. [S.l.]: Nordica, 1981. Disponível em: <<http://www.ijsn.es.gov.br/bibliotecaonline/Record/1876>>. Acessado em 20 janeiro 2022.

AMBIENTE BRASIL. **Erosão do Solo:** Declividade e comprimento da rampa. [S.l.]: Ambiente Brasil, 2021. Disponível em: <<https://ambientes.ambientebrasil.com.br/agropecuaria/erosaosolo.html>>. Acessado em 10 novembro 2021.

AQUINO, A. R. de; PALETTA, F. C.; ALMEIDA, J. R. de. **Vulnerabilidade Ambiental**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2017. 113 p.

Assembléia Legislativa do Estado de São Paulo. **São Carlos, capital do conhecimento e da tecnologia**. [S.l.]: Just Brasil, 2011. Disponível em: <<https://al-sp.jusbrasil.com.br/noticias/2784381/sao-carlos-capital-do-conhecimento-e-da-tecnologia>>. Acesso em 29 de fevereiro 2022.

BARROS, J. D. et al. Avaliação de metodologias de vulnerabilidade ambiental para zonas costeiras. **Revista de Geografia da Universidade Federal de Goiás**, v. 18, n. 2, p. 53–66, 2016.

BRASIL EM RELEVO. **Miranda, Embrapa Monitoramento por Satélite**. [S.l.]: Campinas, 2021. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 15 de outubro 2021.

CALCAVANTE; BATISTA; LISBOA. Contecc 2016. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DE ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 2016, Foz de Iguazu. **Mapeamento de Áreas de Preservação Permanente (APP) por Declividade em uma Bacia Hidrográfica**. Foz de Iguazu, 2016. Disponível em: <<https://www.confea.org.br/sites/default/files/uploads-imce/contecc2016/agronomia/mapeamentopdf:10/11/2021>>.

COSTA, F. H. dos S. et al. Determinação da vulnerabilidade ambiental na bacia potiguar, região de macau (rn), utilizando sistemas de informações geográficas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 58, n. 2, p. 119–127, 2006.

CREPANI, E. et al. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais** ,, p. 2–124, 2001.

CROSTA, A. P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto: Sensoramento remoto**. 2. ed. Campinas: Instituto de Geociências Departamento de Metalogênese e Geoquímica, 2002. V. 2, 140 p.

DELGADO, N. A. S. M. **GEOPROCESSAMENTO NA ANÁLISE DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL DESENCADEADA PELA MONOCULTURA DE CANA-DE-AÇÚCAR NA BACIA DO DISTRITO SANTA OLÍMPIA (PIRACICABA/SP)**. 2011. 55 p. Dissertação (Trabalho de Conclusão de curso) — Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2011.

DIAS, V. S. B.; SILVA, A. de Barros da. Ahp na modelagem da vulnerabilidade ambiental do mini corredor ecológico serra das onças (ba). **Revista Brasileira de Cartografia**, n. N0 66/6, p. 1363–1377, 2021.

EMBRAPA, Ricardo Dart. **Mapa de solos do Brasil**: Brasil solos. [S.l.]: Embrapa, 2020. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia.html>>. Acesso em 22 de novembro 2021.

EMBRAPA TERRITORIAL. **Soluções tecnológicas**: Brasil relevo. [S.l.]: Embrapa, 2005. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/376/brasil-em-relevo>>. Acesso em 22 de novembro 2021.

ESRI TRADEMARKS. **ARCGIS 10,3**: versão 10,3. [S.l.]: ArcMap, 2021. Disponível em: <<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/get-started/installation-guide/installing-on-your-computer.html>>. Acessado em 10 junho 2021.

FEITOSA, F. A. C. et al. **hidrogeologia conceitos e aplicações**: evolução histórica do conhecimento. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. V. 1, 812 p.

FIORESE, C. H. U. et al. Dinâmica espaço-temporal das áreas verdes urbanas na cidade de castelo, estado do espírito santo, brasil. **Sociedade Brasileira de arborização urbana**, v. 16, n. 1, p. 35–50, 2021.

GOOGLE LLC. **Google Eart Pro**: São carlos-sp. [S.l.]: Google LLC, versão 7,3, 2021. Disponível em: <<https://www.google.com/intl/es/earth/download/gep/agree.html>>. Acessado em 22 dezembro 2021.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Solos do estado de São Paulo**: Mapa de solos do estado de são paulo. [S.l.]: São Paulo, 2020. Disponível em: <<https://www.iac.sp.gov.br/solosp/>>. Acesso em 28 outubro 2021.

JURANDIR LUCIANO SANCHES ROSS . **Análise Empírica de Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados**: Etapas e produtos intermediários. [S.l.]: Revista do Departamento de Geografia - Usp, 2011. Disponível em: <<https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/365/o/Ross.pdf>>. Acessado em 20 janeiro 2022.

LIMA, M. R. de. **Principais classes de solos do Brasil**. Paraná: universidade Federal de Paraná, 2021. 28 p.

MANCUZZO; WENDLAND. Bacia hidrográfica do rio jacare-pepira: Mapeamento de la hidrogeologia, hidrolitologia, hipsometria e população. **Serviço Geológico do Brasil**, 2018.

MELO, D. H. C. T. B. et al. Evolução da observação da terra por sensoramento remoto. **Revista Brasileira de Sensoramento Remoto**, v. 2, n. 2, p. 23, 2021.

NETO, A. S. de A. et al. Atlas histórico socioambiental das regiões hidrográficas de são carlos - sp. **Diagrama Editorail**, v. 2, p. 166, 2020.

OLIVEIRA, P. C. N. de. **Protótipos de Modelos Didáticos para o Ensino de Hidrogeologia Aplicada**. 2017. 38 p. Trabalho de Conclusão de Curso — Curso de Graduação em Geologia, Universidade Federal do Parana, Parana, 2017.

PERRONI, J. C. A. **Avaliação do consumo de energia elétrica para produção de água subterrânea : o caso do abastecimento público da cidade de São Carlos - SP**. 2005. 130 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

PINESE; RODRIGUES. O método de análise hierárquica – ahp – como auxílio na determinação da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio piedade (mg). **Revista Do Departamento De Geografia**, v. 23, 2012.

PINHEIRO, A. et al. **Vulnerabilidade Ambiental desastres Naturais ou fenômenos Induzidos?** Brasília: DInstituto do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 2007. , 192 p.

PREFEITURA DE SÃO CARLOS. **A cidade de São Carlos**: Conhecimento a cidade. [S.l.]: São Carlos, SP., 2021. Disponível em: <<http://www.saocarlos.sp.gov.br/index.php/conheca-sao-carlos/115268-a-cidade-de-sao-carlos.html>>. Acesso em 12 outubro 2021.

SAAE. **Serviço Autônomo de Água e Esgoto**: Mananciais. [S.l.]: São Carlos, 2021. Disponível em:<<https://www.saaesaocarlos.com.br/saaesc/index.php/agua/mananciais>>. Acessado em 25 setembro 2021.

SANTOS, A. B. dos; PETRONZIO, J. A. C. Mapeamento de uso e ocupação do solo do município de uberlândia-mg utilizando técnicas de geoprocessamento. **XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, n. 1, p. 6185–6196, 2011.

SANTOS, F. P. dos; BAYER, M.; CARVALHO, T. M. de. Compartimentação pedológica da bacia do rio dos bois, municípios de cazarina, varjão, guapó e palmeiras de goiás (go), e sua relação com a suscetibilidade e risco a erosão laminar.1. **Revista de Geografia da Universidade Federal de Goiás**, v. 28, n. 2, p. 103–124, 2008.

SANTOS, H. G. dos et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**: Classificação do solos. 5. ed. Brasília, Df: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Solos Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2018. 355 p.

SANTOS, M. F. S. **Geoprocessamento aplicado ao estudo da vulnerabilidade ambiental da Serra da Calçada - MG**. 2014. 45 p. Dissertação (curso de especialização) — Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2014.

SILVEIRA, C. T. et al. Simposio nacional. In: VI SIMPOSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 6., 2006, Goiania. **Mapeamento de declividade de vertentes: Aplicação na Apa de Guaratuba/Parana**. Paraná: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2012. Disponível em: <<http://www.sbmet.org.br/cbmet2012/pdfs/64ZA.pdf>>. Acesso em 20 outubro 2021.

THE COPERNICUS OPEN ACCESS HUB. **Sentinel online**: sentinel 2. [S.l.]: European Space Agency, 2021. Disponível em: <<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/about-sentinel-online>>. Acesso em 25 setembro 2021.

TOBIN, G.; MONTZ, B. Natural hazards, explanation and integration. new york,. **The Guildford Press**, v. 3, 1997.

TREVISAN, D. P. et al. Avaliação de vulnerabilidade ambiental do município de são carlos – sp. **Ra'ega o espaço geográfico em analise**, n. 44, p. 273–288, 2018.