26º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR)
49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

FERRAMENTA DE INFRAESTRUTURAS RESILIENTES: PLANEJAMENTO E MONITORAMENTO FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Rafael Grinberg Chasles[1]; Matheus Amaral Prates[1]; Gean Kenid Sifronio Franco[1], Vinicius do Prado Capanema[1], José Luiz Fuzaro Rodrigues[1], Carolina Iris Brasil Mariano[1], Bruna Donegá Alves[1], Daniel Matos[1] & Anderson Barbosa Esteves[1]

RESUMO
O clima está mudando devido a ações antropogênicas. As mudanças climáticas estão modificando os padrões de chuva e temperatura no globo e, com isso, influenciando na frequência dos eventos extremos, aumento do nível do mar, nos escorregamentos, incêndios florestais e inundações. Para além das consequências socioambientais e econômicas, as infraestruturas também são afetadas com a mudança do clima. Por isso, é necessário buscar medidas de mitigação e minimização destes impactos. Infraestruturas resilientes são infraestruturas adaptadas, planejadas, operadas e/ou reabilitadas às mudanças climáticas. O presente artigo tem como objetivo apresentar ferramenta em construção, pelo Departamento de Estadas de Rodagem de São Paulo
(DER-SP), que cria indicadores ambientais relacionados a vegetação, água, fogo, uso e ocupação do solo, emissões atmosféricas e temperatura de superfície das rodovias do Estado de São de Paulo, com dados geoespaciais e de sensoriamento remoto e realiza análises por segmentos homogêneos. Com esta ferramenta é possível observar todos estes indicadores por segmentos homogêneos das rodovias estaduais listados em mapas dinâmicos, tabelas e gráficos. Espera-se que esta ferramenta seja utilizada pelos técnicos, tomadores de decisão, gerenciadores e planejadores, além da comunidade científica e público em geral. Almeja-se que, no desenvolvimento do sistema, sejam aprimoradas as análises e cruzamentos de dados e que haja inclusão de novos dados, como: projeções climáticas, qualidade do ar, áreas queimadas, dados socioeconômicos e de gênero.

PALAVRAS-CHAVE: Infraestruturas Resilientes; Mudanças Climáticas; Sensoriamento Remoto; Geoprocessamento; Eventos Extremos.

ABSTRACT
Climate change, driven by human activities, alters global precipitation and temperature patterns, increasing extreme weather events, sea level rise, and other environmental impacts. Infrastructure, including roadways, is particularly vulnerable to these changes. To address this challenge, resilient infrastructure adapted to climate change is crucial. In this context, the present study aims to introduce a tool developed by DER-SP for monitoring environmental indicators along state highways in São Paulo, Brazil. The tool integrates geospatial and remote sensing data to assess vegetation, water resources, fire risk, land use, atmospheric emissions, and road surface temperature. By providing dynamic maps, tables, and graphs, the tool enables stakeholders, including technicians, decision-makers, managers, planners, and the scientific community, to visualize and analyze environmental indicators for homogeneous segments of the state highways. Future developments of the tool aim to enhance data analysis, incorporate additional datasets such as climate projections, air quality, socioeconomic factors, and gender-related data, and improve accessibility for a broader range of users. This tool represents a valuable contribution to infrastructure resilience planning and climate change adaptation efforts in São Paulo and beyond.

KEY WORDS: Resilient Infrastructures; Climate Change; Remote Sensing; GIS; Extreme Events.

[1] DER-SP – Diretoria de Planejamento (DP) - Coordenadoria de Estudo e Pesquisa (CEP), e-mail: rgchasles@der.sp.gov.br; maprates@der.sp.gov.br, gksfranco@der.sp.gov.br, vpcapanema@der.sp.gov.br, jlfrodrigues@der.sp.gov.br, cibmariano@der.sp.gov.br, bdalves@der.sp.gov.br, dmatos@der.sp.gov.br, andersonesteves@der.sp.gov.br

INTRODUÇÃO

A alteração climática emerge como um dos principais desafios globais do século XXI, acarretando consequências e prejuízos para a sociedade. Para além do aumento da temperatura média global, essas mudanças ocasionam variações no padrão de chuvas, resultando em secas, inundações e escorregamento de terra, além do aumento do nível do mar e do incremento na frequência e intensidade de tempestades e outras adversidades climáticas. Tais eventos podem gerar impactos diretos e indiretos em diversos setores econômicos (BRASIL, 2016) e populações. Um estudo do Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) revela um aumento um pouco superior a 50% na frequência dos eventos climáticos extremos no período recente, passaram de 0,2 eventos por ano, entre 1980-2000, para 0,3 eventos, entre 2001 e 2019.

Para além dos setores econômicos e das populações afetadas pelas mudanças climáticas, as infraestruturas estão sendo fortemente afetadas pelos impactos físicos da variabilidade climática e dos eventos extremos. As rodovias desempenham um papel central na estrutura socioeconômica, proporcionando um meio vital de transporte e comércio. No entanto, muitas dessas vias foram concebidas com base em modelos climáticos antiquados, que não refletem mais as condições atuais, onde se assume a condição de estacionalidade, ou seja, constância, no entanto, existe um consenso de que os padrões climáticos estão mudando (IPCC, 2022). Diante desse cenário, é imperativo adotar medidas proativas para mitigar os riscos associados e garantir a resiliência das rodovias frente aos desafios ambientais emergentes. Globalmente, existe enorme lacuna de entendimento sobre a maneira específica e a intensidade que as infraestruturas serão afetadas pelas mudanças do clima, demandando abordagens novas e criativas (BRASIL, 2016).

Além desses impactos na infraestrutura, os impactos da mudança do clima no setor de transportes podem afetar de forma direta ou indireta as condições de deslocamento das pessoas e a distribuição de insumos e de serviços, além de aumentar a probabilidade de ocorrência de acidentes de tráfego (EVANS et al., 2009).

A suscetibilidade ao risco climático das infraestruturas depende de fatores como sua localização, características de sua construção e operação, também das tendências climáticas e da incidência e intensidade dos eventos climáticos extremos. É evidente que o grande desafio é como medir esses componentes (BRASIL, 2016). Diante deste cenário, o Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP) vem desenvolvendo uma ferramenta de planejamento e monitoramento de infraestruturas resilientes a partir de dados espaciais e de Sensoriamento Remoto para realizar análises ambientais por segmentos homogêneos.

O sistema surge para contribuir com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), propostos pela ONU, principalmente, do ODS 9 – Indústria, Inovação e Infraestrutura e ODS 13 – Ação contra a Mudança Global do Clima. Especialmente das metas: 9.1 - Desenvolver infraestrutura de qualidade, confiável, sustentável e resiliente, incluindo infraestrutura regional e transfronteiriça, para apoiar o desenvolvimento econômico e o bem-estar humano, com foco no acesso equitativo e a preços acessíveis para todos; 9.4 - Até 2030, modernizar a infraestrutura e reabilitar as indústrias para torná-las sustentáveis, com eficiência aumentada no uso de recursos e maior adoção de tecnologias e processos industriais limpos e ambientalmente corretos; com todos os países atuando de acordo com suas respectivas capacidades; 13.1 - Reforçar a resiliência e a capacidade de adaptação a riscos relacionados ao clima e às catástrofes naturais em todos os países e,13.2 - Integrar medidas da mudança do clima nas políticas, estratégias e planejamentos nacionais.

Instituições internacionais como o BID oferecem empréstimos para financiar projetos de infraestrutura (resiliente) em países em desenvolvimento, visando torná-los mais preparados para as

mudanças climáticas. O indicador de Nível 2 avalia o impacto financeiro desses investimentos, que visam fortalecer a capacidade das infraestruturas de resistir a eventos climáticos extremos e reduzir as emissões de carbono. “Investimentos em infraestrutura resiliente referem-se a ativos de infraestrutura que incorporem ou sejam modernizados de modo a incorporar medidas para fortalecer sua capacidade física para suportar os impactos de eventos climáticos extremos, riscos geofísicos, elevações do nível do mar e aumento da temperatura”.

INFRAESTRUTURAS RESILIENTES

A característica definidora da resiliência das infraestruturas implica que seja uma infraestrutura planejada, projetada, construída e operada de uma forma que antecipa, prepara e adapta às mudanças climáticas, podendo suportar, responder e recuperar-se rapidamente das perturbações causadas por estas condições, sendo, a garantia da resiliência das infraestruturas, um processo contínuo.

Infraestruturas resistentes às alterações climáticas reduzem, mas podem não eliminar totalmente o risco de perturbações relacionadas com o clima. (EUFIWACC, 2016):

Avaliar até que ponto as alterações climáticas se traduzem em riscos para a infraestrutura depende da interação dos perigos climáticos com a exposição (localização das infraestruturas) e vulnerabilidade (a propensão ou predisposição para ser afetado) (Agard et al., 2014). Riscos climáticos para infraestrutura podem ser reduzidos construindo em áreas que são menos expostas aos perigos climáticos (por exemplo, evitando novas construções em planícies aluviais), e criando infraestruturas mais capazes de lidar com os impactos climáticos.

A gestão de riscos exige realizar *trade-offs* entre minimização de riscos e custos, onde se torna mais caro e cada vez mais desafiador tecnicamente se preparar para eventos que são muito improváveis de ocorrer. Resiliência significa que os riscos foram considerados e gerenciados para alcançar um nível aceitável de desempenho, dado às informações disponíveis e as capacidades para resistir e recuperar-se de choques (OCDE, 2014).

Esforços para garantir a resiliência do projeto devem ser incorporados em uma abordagem estratégica para a infraestrutura que leva em conta os efeitos diretos e indiretos das alterações climáticas. Esta definição de resiliência climática para infraestruturas centra-se no processo utilizado e nos resultados alcançados para avaliar se os impactos das alterações climáticas foram considerados e, se necessário, gerenciados. Dada a natureza específica do contexto da adaptação climática, as medidas utilizadas para alcançar isso irão variar amplamente e onde alterações são necessárias, elas podem ser agrupadas em duas categorias (EUFIWACC, 2016):

Medidas de adaptação estrutural: por exemplo, mudar a composição das superfícies das estradas para não se deformar em altas temperaturas, construindo paredões ou usando superfícies de pavimentação permeáveis para reduzir o escoamento durante fortes chuvas. Abordagens baseadas em ecossistemas usando infraestrutura natural para projetar adaptação também são alternativas importantes a serem consideradas juntamente com medidas de adaptação estrutural.

Medidas de adaptação gerencial (ou não estrutural): por exemplo, alterar o momento de manutenção para levar em conta a mudança de padrões da procura e da oferta de energia, o investimento em sistemas de alerta precoce ou compra de seguro para enfrentar as consequências financeiras da variabilidade do clima. Estas medidas também podem incluir monitoramento aprimorado das infraestruturas existentes para reduzir o risco de fracasso à medida que as condições climáticas mudam.

O SISTEMA

O sistema de planejamento e monitoramento de infraestruturas resilientes está sendo desenvolvido em linguagem de programação Python, em processamento em nuvem através do *Google Earth Engine* (GEE) e disponibilizado de forma online. A plataforma GEE possui mais de 100 petas bytes de dados de sensoriamento remoto e dados espaciais com possibilidades de diferentes tipos de análises.

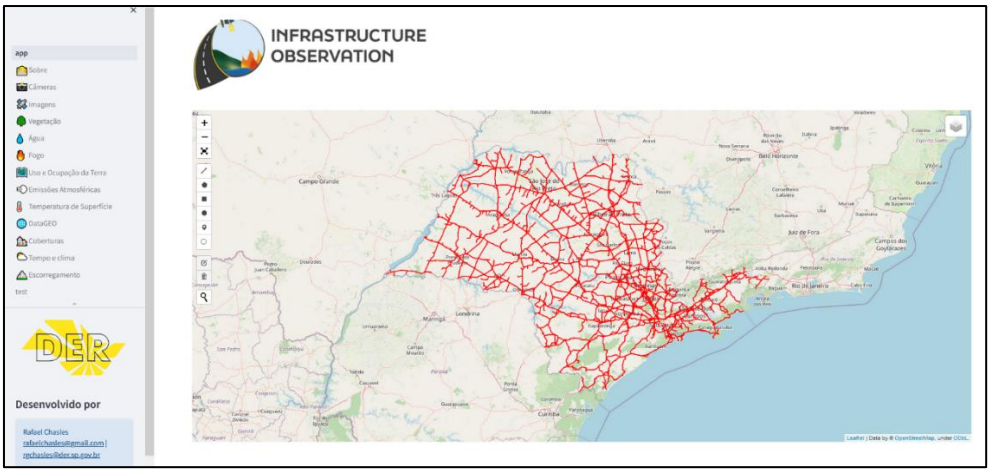

Figura 1. Print da tela inicial do sistema com os dados da malha rodoviária em mapa dinâmico. (AUTOR, 2024).

O sistema tem como objetivo auxílio no planejamento e monitoramento da infraestrutura do estado de São Paulo através de indicadores ambientais como vegetação, água, fogo, uso e ocupação do solo, temperatura de superfície (*Land Surface Temperature* - LST) e emissões atmosféricas. Além de conexões com bancos de dados públicos como da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), Agência Nacional das Águas (ANA), Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE), Secretaria de Meio Ambiente Infraestrutura e Logística do Estado de São Paulo (SEMIL), entre outros.

Este sistema é direcionado à técnicos especializados, tomadores de decisão, gestores e responsáveis pelo planejamento, comunidade científica e público em geral. Através do sistema é possível observar, de forma dinâmica, e em alguns casos em tempo quase real, indicadores ambientais supracitados.

MATERIAIS

Dados Satelitais

O sistema de planejamento e monitoramento de infraestruturas resilientes em desenvolvimento pelo DER-SP utilizou-se de dados satelitais de fontes de dados públicas e gratuitas, de órgãos e instituições internacionais, entre estes, *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e *European Space Agency* (ESA), Google, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e Infraestrutura de Dados Espaciais Ambientais do Estado de São Paulo (IDEA-SP) através do DataGEO.

A funcionalidade “Imagens” (Fig. 1) possibilita a visualização de um mosaico imagem de satélite sintética, construída a partir das datas de início e fim do satélite Sentinel-2 (Level-2ª – *Surface Reflectance*), sensor *Multispectral Instrument* (MSI), com 10 metros de resolução espacial nas bandas do visível (RGB) e Infravermelho Próximo (NIR), com cobertura de nuvens máxima definidas pelo usuário (nuvens em imagens de satélite prejudicam a visualização dos alvos terrestres). Com essa

funcionalidade é possível visualizar como é a resposta espectral da área de análise. Ou seja, é possível identificar alvos como vegetação, pastagem, área construída, solo exposto, água etc.

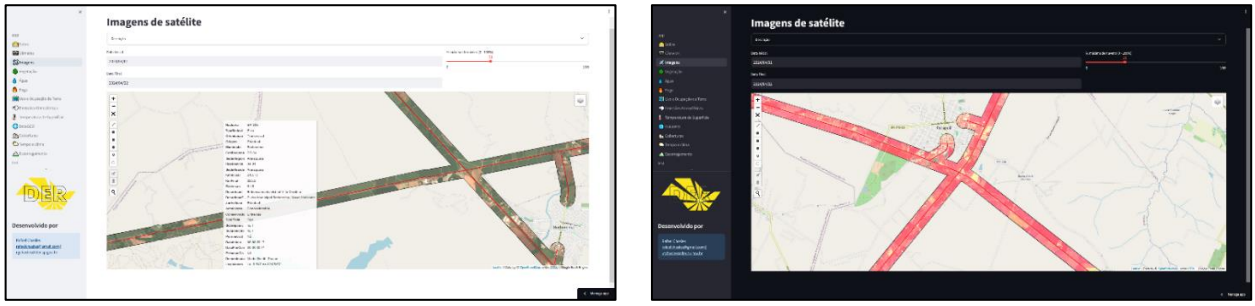

Figura 1. Esq.: Print da funcionalidade de imagens de satélite do sistema de infraestruturas resilientes, cor verdadeira; Dir.: Print da funcionalidade de imagens de satélite do sistema de infraestruturas resilientes, falsa cor. (AUTOR, 2024).

Dados Cadastrais

Como base do sistema e, consequentemente, suas análises, foi utilizado o atual Sistema Rodoviário Estadual (SRE) do Estado de São Paulo. O SRE possui uma extensão de aproximadamente 21405,2km em 4736 trechos homogêneos. Seus atributos principais são: quilômetro inicial e final do trecho, sua denominação, extensão, administração, concessão, diretoria regional, tipo de pista, identificação com código.

Área de Análise

Adotou-se uma área de análise para a aplicação da ferramenta de infraestrutura resiliente de 250 metros de *buffer* (ou área de influência). A escolha de área de análise foi adotada para entendimento dos fenômenos que ocorrem na área imediata a rodovia, sua faixa de domínio, sua faixa não-edificante e contexto geográfico de entorno.

MÉTODOS

Todas as análises se utilizam dos princípios do geoprocessamento e sensoriamento remoto, com o uso de ambientes computacionais de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) desktop e processamento de dados em nuvem.

***Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI)**

O NDVI (Rouse et al.,1974) é um índice espectral amplamente utilizado na literatura científica como medidor de atividade fotossintética e biomassa a partir de dados de sensoriamento remoto (Eq. 1). Para esta análise foi utilizado o sensor MSI a bordo do satélite Sentinel-2 A/B com o nível de processamento *Surface Reflectance* (Level-2A).

É calculado a partir de medidas de reflectância na porção do espectro vermelho e infravermelho próximo (NIR), como demonstrado na equação abaixo. Seu resultado varia entre -1 e 1, onde, quanto mais próximo de -1 ausência ou baixa atividade fotossintética, e quanto mais próximo de 1 maior a atividade fotossintética, vegetação mais abundante e saudável.

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red}} \quad (1)$$

Onde, R_{NIR} é a reflectância da radiação NIR e R_{Red} é a reflectância da radiação vermelha visível.

***Normalized Difference Water Index* (NDWI)**

O NDWI (Eq. 2) é utilizado para monitorar mudanças relacionadas ao conteúdo de água em corpos d'água. Como os corpos d'água absorvem fortemente a luz no espectro eletromagnético visível ao infravermelho, o NDWI utiliza bandas verdes e infravermelhas próximas para destacar corpos d'água. Ele é sensível a áreas urbanizadas e pode resultar em uma superestimação dos corpos d'água. O índice foi proposto por McFeeters em 1996.

$$NDWI = \frac{R_G - R_{NIR}}{R_G + R_{NIR}} \quad (2)$$

Onde, R_G é a reflectância da radiação da banda do verde e R_{NIR} é a reflectância da radiação NIR. Seu resultado varia entre -1 e 1, onde valores mais próximos de -1 ausência de água e quanto mais próximo de 1, presença de água. Pode-se adotar o limiar acima de 0,5 para identificação de água. Para esta análise foi utilizado o sensor MSI a bordo do satélite Sentinel-2 A/B com o nível de processamento *Surface Reflectance* (Level-2A).

***Fire Information for Resource Management System* (FIRMS)**

FIRMS distribui dados de incêndios ativos em tempo quase real (NRT, na sigla em inglês) do Espectroradiômetro de Imagem de Resolução Moderada (MODIS) a bordo dos satélites Aqua e Terra, e do Conjunto de Radiômetros de Imagem Infravermelha Visível (VIIRS) a bordo dos satélites S-NPP, NOAA 20 e NOAA 21 (anteriormente conhecidos como JPSS-1 e JPSS-2). Globalmente, esses dados estão disponíveis dentro de 3 horas da observação pelo satélite. A ferramenta (Fig. 2) possibilita seleção do satélite e intervalo temporal (7h, 24h ou 48h).

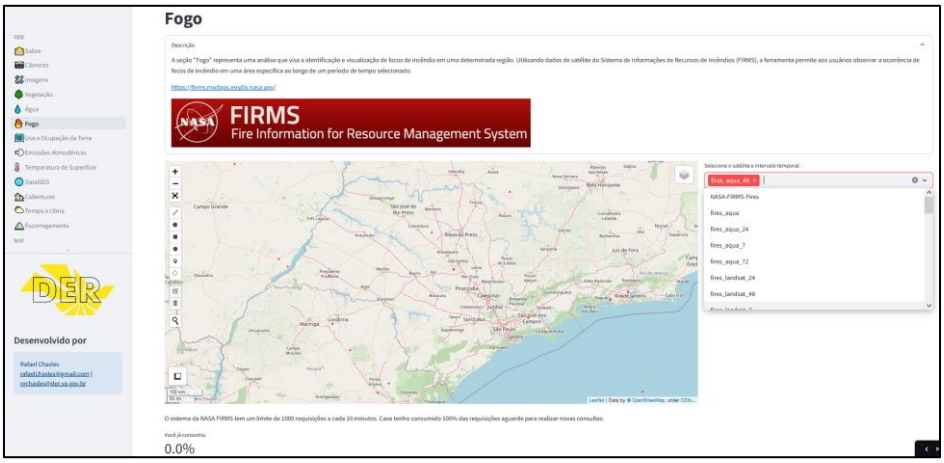

Figura 2. Tela de monitoramento de focos de incêndio (quadrados vermelhos) das últimas 48h de acordo com o sensor Aqua – MODIS. (AUTOR, 2024).

Temperatura de Superfície (*Land Surface Temperature* – LST)

O LST (ou Temperatura de Superfície) mede a emissão de radiação térmica da superfície terrestre, onde a energia solar incidente interage e aquece o solo, ou a superfície do dossel em áreas vegetadas.

Essa característica faz do LST um bom indicador da partição de energia na fronteira entre a superfície terrestre e a atmosfera e sensível a mudanças nas condições superficiais (Nemani et al., 1996; Wan et al., 2004; Lambin et al., 1995; Mildrexler et al., 2009). Em escalas espaciais que variam do nível foliar à paisagem, o conhecimento fornecido pelo LST sobre a redistribuição de energia nos fluxos de calor latente e sensível torna-o um dos parâmetros mais importantes nos processos físicos dos balanços de energia e água na superfície (Li et al., 2013; Teskey et al., 2014). Sua recuperação a partir de dados térmicos infravermelhos (TIR) obtidos por sensoriamento remoto fornece medições contínuas de LST com cobertura global para examinar a heterogeneidade térmica da superfície terrestre e o impacto nas temperaturas superficiais resultantes de mudanças naturais e induzidas pelo ser humano (Jin et al., 2010; Li et al., 2015). Para este estudo foi utilizado o satélite MODIS, com 250 metros de resolução espacial e altíssima resolução temporal.

Uso e Ocupação da Terra (*Land Use Land Cover* - LULC)

Foram utilizadas duas bases principais para mapeamento do Uso e Cobertura da Terra. A primeira, o mapeamento de 2020 da ESA com dados dos satélites Sentinel-1 e Sentinel-2 (Fig. 3 Esq.). Este mapeamento utilizou-se de metodologia de aprendizado de máquina para o mapeamento sistemático. Utiliza-se as classes de Vegetação, Vegetação Arbustiva, Pastagem, Agricultura, Área Construída, Solo Exposto e Vegetação Esparsa, Água, Área Úmida, Manguezais e Musgos e Líquens. O segundo *dataset* utilizado foi um mapeamento sistemático em tempo quase real do Google (Fig. 3 Dir.) chamado Dynamic World. Esse mapeamento disponibiliza o LULC assim que uma nova imagem do Sentinel-2 é disponibilizada. Possui as classes: Água, Vegetação, Pastagem Vegetação Inundável, Agricultura, Vegetação rasteira, Área Urbana e Solo Exposto. Ambos os mapeamentos possuem resolução espacial de 10 metros.

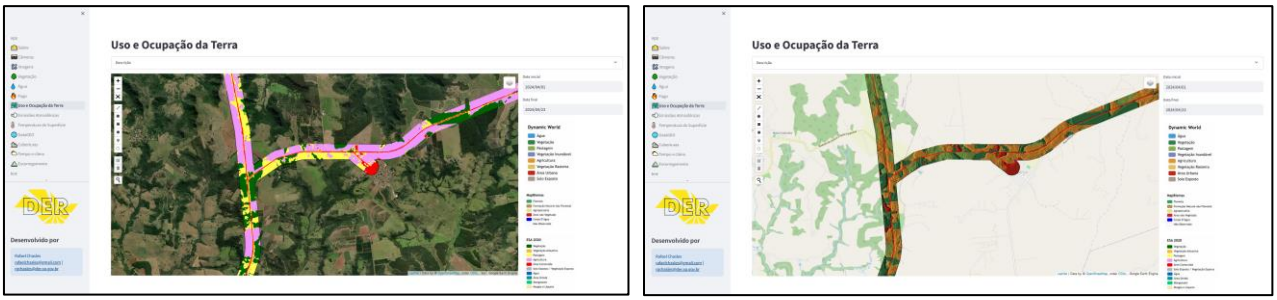

Figura 3. Esq.: Mapa de Uso e Ocupação do Solo de trecho exemplo – ESA, 2020. Dir.: Mapa de Uso e Ocupação do Solo de trecho exemplo – Google, Dynamic World. (AUTOR, 2024).

Emissões Atmosféricas (Metano - CH_4)

Esta análise utilizou dados do satélite Sentinel-5P, sensor TROPOMI, da ESA. Possui resolução espacial de 1113,2 metros e sua concentração é medida pela razão de mistura média de ar seco, expressa em partes por bilhão.

RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados para as análises de NDVI, NDWI, LST e Emissões atmosféricas. Os outros indicadores são tratados de forma diferenciada (apenas visualização ou informações pontuais).

NDVI

A análise realizada compreende 01 de janeiro de 2023 a 31 de dezembro de 2023, com cobertura máxima de nuvem de 5%, por imagem. Abaixo (Fig. 4) é apresentado mapa de NDVI de trecho exemplo. Quanto mais próximo do verde escuro maior o índice NDVI, quanto mais próximo do laranja, amarelo vermelho e branco, menor o valor de NDVI, ou seja, menor a atividade fotossintética/ biomassa.

Figura 4. Mapa de NDVI de trecho exemplo. (AUTOR, 2024).

As rodovias que obtiveram maior valor mediano de NDVI (Fig. 5) foram, respectivamente, SP 125 dos quilômetros 78.95 a 94.5, SPA 055/193 do km 0 ao 13.2 e SP 079 do km 154 ao km 182.5.

Rodovias	Km Inicial	Km Final	NDVI Mediana
SP 125	78.95	94.5	0.5406
SPA 055/193	0	13.2	0.5341
SP 079	154	182.5	0.5336
SPA 294/250	15.5	20.5	0.5334
SP 098	82.4	98.1	0.5325
SPA 004/131	3.7	11.03	0.5321
SP 077	33.7	33.81	0.5303
SP 294	402.28	403.144	0.5281
BR 383	25.5	33.3	0.5255
SP 098	75	82.4	0.5245

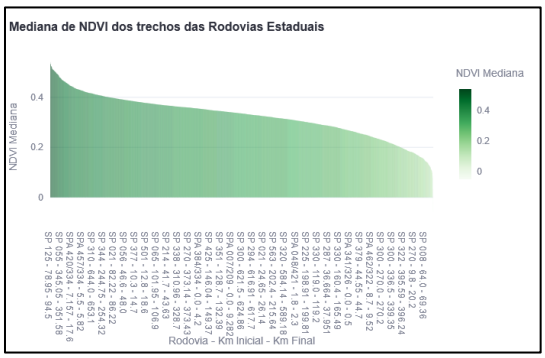

Figura 5. Esq.: Resultados em formato tabular dos dez melhores NDVI dos trechos das rodovias estaduais; Dir.: Gráfico do NDVI de todas os trechos das rodovias estaduais. (AUTOR, 2024).

NDWI

A análise temporal compreendeu o ano de 2023 (de 01 de janeiro de 2023 a 31 de dezembro de 2023). É possível observar que a maior parte das rodovias não possui valores significativos de água (Fig. 6) em seu entorno. O trecho que possui maior valor da mediana NDWI é a SP 326 com valor de 0,1328, seguida da SP 255 com valor de 0,1165.

Rodovias	Km Inicial	Km Final	MEDIAN NDWI
SP 326	468	468.3	0.1328
SP 255	277.538	278.76	0.1165
SP 320	637.765	639.7	0.089
SP 131	0	4.8	0.0573
SPA 079/613	5.572	7.15	0.022
SP 160	69.58	70	0.0094
SPA 654/270	0	5.9	-0.0486
SP 463	59.46	60.3	-0.0575
SP 280	29.52	30.651	-0.0965
SP 036	21.1	24.5	-0.1022

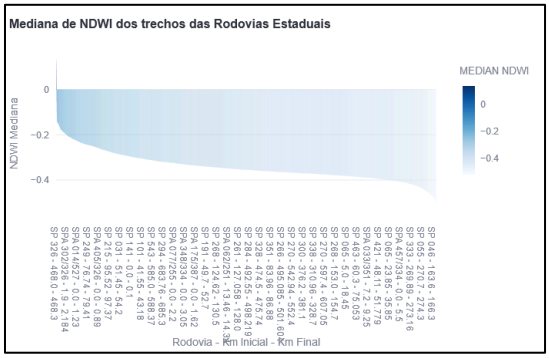

Figura 6. Esq.: Resultados em formato tabular dos dez maiores valores de NDWI dos trechos das rodovias estaduais; Dir.: Gráfico do NDWI de todas os trechos das rodovias estaduais. (AUTOR, 2024).

LST

A análise de temperatura de superfície compreendeu o ano de 2023 (01 de janeiro de 2023 à 31 de dezembro de 2023) com cobertura de nuvens máxima de 5% (Fig. 7). Os resultados apontam que o trecho com maior valor médio de LST, neste ano, foi a SPA 318/330 do km 0 ao km 1,5 com 34,0635ºC (graus Celsius) (Fig. 8).

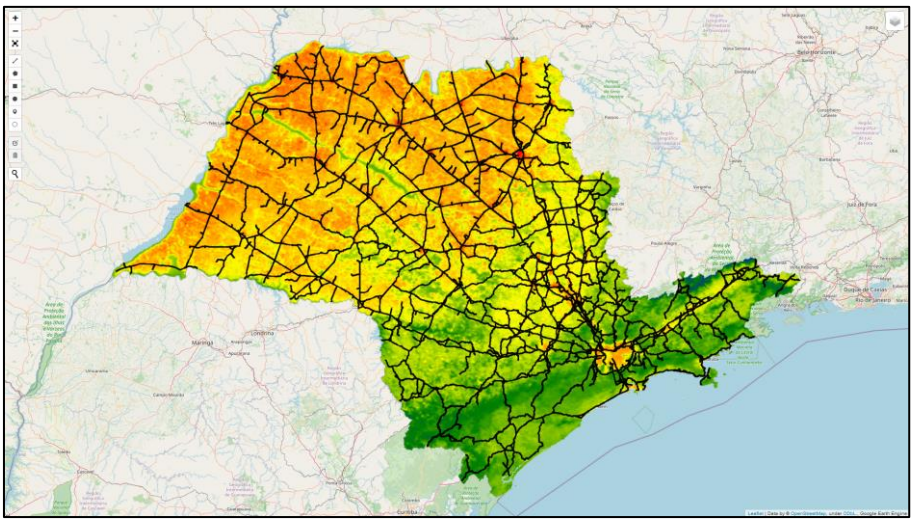

Figura 7. Mapa da média de LST do Estado de São Paulo, no ano de 2023. (AUTOR, 2024).

Rodovias	Km Inicial	Km Final	LST Média
SPA 318/330	0	1.5	34.0635
SP 427	7.2	12.6	33.8145
BR 153	59.48	60.8	33.7934
SP 425	184.4	187.6	33.7715
SP 310	436.4	440	33.7105
SP 425	187.9	190.5	33.6895
BR 153	64	64.3	33.6895
SP 322	391.46	395.59	33.6481
SP 330	307.59	318.5	33.6244
SPA 421/326	0	1.32	33.5905

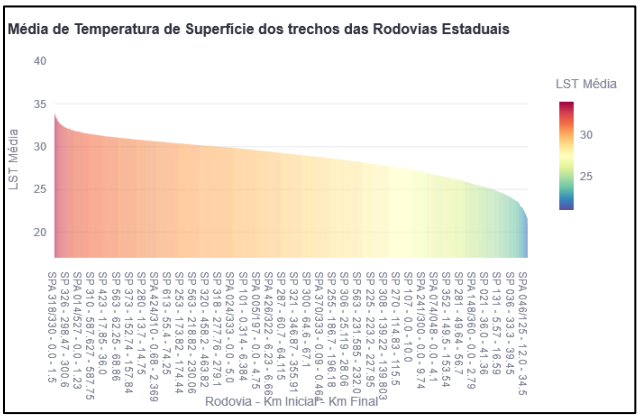

Figura 8. Esq.: Resultados em formato tabular dos dez maiores médias LST dos trechos das rodovias estaduais; Dir.: Gráfico do LST de todas os trechos das rodovias estaduais. (AUTOR, 2024).

Emissões Atmosféricas (Metano - CH_4)

A análise de concentração de CH_4 compreendeu o ano de 2023 (01 de janeiro de 2023 a 31 de dezembro de 2023) com cobertura de nuvens máxima de 5% (Fig. 9). Os resultados apontam que o trecho com maior valor mediana de CH4, neste ano, foi a SPA 175/055 do km 0 ao km 6,3 com 1893,9311 fração mol, seguido do trecho da mesma SPA do km 6,3 ao km 9.335 com concentração de mesmo valor (Fig. 10).

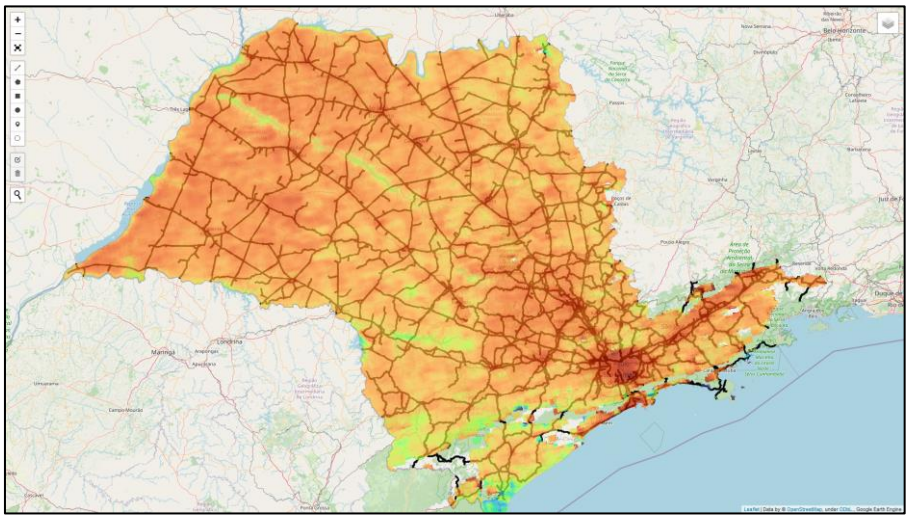

Figura 9. Mapa de concentração de CH4 do Estado de São Paulo. (AUTOR, 2024).

Rodovias	Km Inicial	Km Final	CH4 Mediana
SPA 175/055	0	6.3	1,893.9311
SPA 175/055	6.3	9.335	1,893.931
SP 055	176.2	185.9	1,893.931
SPA 086/021	1.387	4.35	1,892.5085
SP 055	286.72	291	1,892.3537
SP 055	291	292.2	1,892.3537
SP 150	18.4	29.42	1,889.5119
SPA 086/021	0	1.387	1,889.0923
BR 381	79.34	90.4	1,888.5674
SPA 291/055	0.5	11	1,888.1325

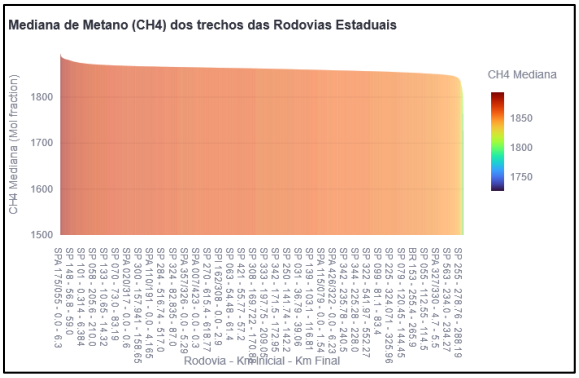

Figura 10. Esq.: Tabela de concentração de CH_4 dos dez trechos com maior concetração das rodovias no Estado de São Paulo. Dir.: Gráfico de concentração de CH_4 de todos os trechos das rodovias no Estado de São Paulo. (AUTOR, 2024).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ferramenta possibilita uma análise de dados precedentes, monitoramento em tempo quase real e avaliação de cenários futuros de indicadores ambientais que podem contribuir para a transação para uma infraestrutura resiliente. O uso destas análises pode auxiliar tomadores de decisão a atuar e planejar sobre a malha rodoviária direcionado a inteligência de dados (*data-driven intelligence*).

Infraestruturas resilientes só serão possíveis quando houver integração entre os diversos setores da sociedade como terceiro setor, iniciativa pública e privada, além dos organismos internacionais. A infraestrutura resiliente ao clima tem o potencial de melhorar a confiabilidade na prestação de serviços, aumentar a vida útil dos ativos e proteger os retornos dos investimentos. Construir resiliência climática pode envolver um conjunto de medidas de gestão (como alterar os cronogramas de manutenção e incluir gestão adaptativa para lidar com a incerteza do futuro) e medidas estruturais (ex.: elevar a altura de pontes para lidar com a elevação do nível do mar, construção de taludes, barreiras contra inundações ou usar infraestrutura natural, como proteger ou aprimorar sistemas naturais de drenagem, proteger manguezais, matas ciliares, florestas úmidas etc.)

Os responsáveis pela tomada de decisões devem ter acesso a dados confiáveis e habilidades para utilizar essas informações na formulação de planos. É essencial comunicar e valorizar as incertezas, além de disponibilizar ferramentas para apoiar a tomada de decisões em ambientes incertos. O uso de plataformas e ferramentas online pode fornecer informações claras, confiáveis e transparentes sobre o comportamento climático presente e futuro. O acesso à informação deve ser acompanhado pelo desenvolvimento de capacidades técnicas e institucionais para gerenciar os riscos climáticos. Estudos indicam que os benefícios de investir em resiliência superam os custos, com altas relações de benefício-custo. Abordagens baseadas na natureza, flexíveis ou inovadoras para infraestrutura resiliente ao clima podem até ser mais baratas do que abordagens tradicionais.

Os próximos passos da construção da ferramenta será a adoção de modelos climáticos e cenários futuros e avaliação de outras áreas de influência como 300 metros, 500 metros e 1 quilômetro. No futuro espera-se poder observar a porcentagem do uso e ocupação da terra por trecho selecionado e filtrado, assim como novos dados de emissões atmosféricas (Monóxido de Carbono – CO, Formaldehyde (CH_2O), Dióxido de Nitrogênio - NO_2 e Dióxido Sulfúrico – SO_2), de uso e ocupação da terra (MapBiomas), dados socioeconômicos e de gênero, assim como, novos índices espectrais e análises mais aprofundadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Ministério da Infraestrutura. Portaria nº 5, de 31 de janeiro de 2020. Aprova as Diretrizes de Sustentabilidade do Ministério da Infraestrutura. Diário Oficial da União, Brasília, DF, Edição nº 23, Seção 1, p. 58, 03 de fevereiro de 2020.Disponível:<https://www.gov.br/transportes/ptr/assuntos/sustentabilidade/diretrizesdesustentabilidade#:~:text=As%20Diretrizes%20de%20Sustentabilidade%20aprovadas,valor%20incorporado%20pelo%20Minist%C3%A9rio%20da > Acesso em: 17 abril 2024.

CARVALHO, Celso Santos; MACEDO, Eduardo Soares de; OGURA, Agostinho Tadashi (Orgs.). Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios. Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Brasília, 2007.

GUIMARÃES, David Franklin da Silva; VASCONCELOS, Mônica Alves de; ALEGRIA, Jhonny Martin Manrique; FERREIRA, Fernanda Sousa; SENA, Tony Everton Alves de; PEDROZA DA SILVA, Suzy Cristina; OLIVEIRA, Maria Antônia Falcão de; PEREIRA, Henrique dos Santos. Aplicação de geotecnologias em estudos de desastres naturais na Amazônia: o caso das terras caídas na Costa do Catalão, AM. In: XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. Anais... INPE: Santos, 2019.

IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis (Relatório de Avaliação do Quinto Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - AR5). Genebra,

2013.Disponível<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL.pdf> Acesso em: 17 abril 2024

IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

McFeeters, S.K. (1996). The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features. International Journal of Remote Sensing, 17(7), p.1425–1432.

Rouse Jr., J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., and Deering, D.W. (1974). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. In: Freden, S.C., Mercanti, E.P., and Becker, M.A. (Eds.), Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium: Vol. I. Washington, D.C.: NASA, pp. 309–317.

TRAVASSOS, Luciana; TORRES, Paulo Henrique Campello; DI GIULIO, Gabriela; JACOBI, Pedro Roberto; FREITAS, Edmilson Dias de; SIQUEIRA, Isabela Christina; AMBRIZZI, Tércio. (2020) Why do extreme events still kill in the São Paulo Macro Metropolis Region? Chronicle of a death foretold in the global south. Journal of Urban SustainableDevelopment, v.1,2020. p.1-16.