

## **ANEXO V – Resumo Técnico do Projeto**

### **P315 - Desenvolvimento de módulo de Sistema de Suporte à Decisão (SSD) para Concessionárias de Gás Ciclo 2023/2024**

Autores: <sup>1</sup>Rafael Gonzalez Ruiz; <sup>2</sup>Naiara Rinco de Marques e Carmo; <sup>2</sup>Renata Martins;  
<sup>2</sup>Carolina Lourenço Portella; <sup>2</sup>João Eliakin Mota de Oliveira & <sup>2</sup>Igor Santos

#### **Resumo**

As mudanças climáticas têm provocado impactos crescentes sobre a logística de serviços e empreendimentos de infraestrutura, especialmente devido ao aumento da frequência e da intensidade de eventos extremos. No setor de gás natural encanado, fenômenos como chuvas intensas, ondas de calor e ventos fortes comprometem diretamente os cronogramas operacionais e a segurança das equipes em campo. Nesse contexto, torna-se essencial antecipar condições meteorológicas adversas que possam inviabilizar atividades ao ar livre. Este estudo apresenta o desenvolvimento de um módulo de suporte à decisão voltado à gestão de riscos operacionais, com aplicação em parte do Estado de São Paulo. A ferramenta estabelece limiares de risco com base em variáveis meteorológicas críticas — precipitação, sensação térmica e velocidade do vento — e fornece subsídios técnicos para o planejamento de atividades externas. A metodologia inclui a análise histórica de indicadores climáticos e a construção de uma matriz de criticidade que fundamenta a plataforma digital proposta. Os resultados evidenciam o potencial da solução como instrumento estratégico para a mitigação de riscos e o aumento da resiliência no setor de gás natural encanado. A ferramenta demonstra potencial de replicação em outros contextos operacionais que exijam tomada de decisão baseada em variáveis meteorológicas. Trata-se de uma proposta inovadora no contexto brasileiro por combinar índices climatológicos reconhecidos, normas técnicas e validação operacional para apoiar decisões em tempo quase real.

#### **1. INTRODUÇÃO**

As mudanças climáticas vêm intensificando a ocorrência de eventos meteorológicos extremos, como tempestades severas, ondas de calor e chuvas intensas, que representam riscos significativos à infraestrutura crítica, à segurança da população e à continuidade de operações em setores estratégicos (Lengert et al., 2018). Esses fenômenos têm gerado impactos crescentes sobre o planejamento e a execução de serviços ao ar livre, com destaque para os segmentos de infraestrutura energética e logística. Nesse contexto, observa-se uma lacuna relevante na existência de mecanismos

operacionais que antecipem e quantifiquem riscos meteorológicos de forma sistemática, prejudicando a capacidade de resposta e planejamento das empresas.

No Brasil, o cenário de vulnerabilidade é agravado por lacunas na implementação de políticas de adaptação climática. Segundo Vieira de Andrade (2017), embora diversas unidades federativas tenham aprovado diretrizes relacionadas às mudanças do clima, a execução de ações práticas permanece limitada. Essa fragilidade institucional amplia a exposição de sistemas urbanos e operacionais aos efeitos adversos do clima.

Estudos recentes, como o de Regoto et al. (2021), demonstram um aumento expressivo na frequência de extremos térmicos no país entre 1961 e 2018, com padrões heterogêneos de precipitação. Esses padrões vêm se confirmando em eventos recentes, como os desastres provocados por chuvas intensas no Rio Grande do Sul. Situações como essas ressaltam a necessidade de mecanismos técnicos de antecipação e resposta, especialmente em setores com alta exposição climática.

No contexto do setor de gás natural encanado, atividades de campo — como obras de expansão, manutenção e inspeção — são particularmente sensíveis às condições meteorológicas. Variáveis como precipitação, rajadas de vento e conforto térmico afetam diretamente a segurança das equipes e a continuidade dos cronogramas operacionais (Young et al., 2017). A ausência de ferramentas específicas para integrar essas variáveis ao planejamento de curto prazo evidencia uma lacuna relevante entre conhecimento meteorológico e aplicação operacional.

Diante desse cenário, este trabalho visa desenvolver uma matriz de risco meteorológico operacional, baseada em dados históricos e normas técnicas, e integrá-la a uma plataforma digital de suporte à decisão. A ferramenta foi

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 O impacto do clima no setor de óleo e gás**

O gás natural é considerado uma das fontes de energia de menor impacto ambiental entre os combustíveis fósseis. Atualmente, é responsável por cerca de

aplicada em ambiente real no setor de gás natural encanado, com validação funcional junto a uma empresa concessionária, buscando ampliar a previsibilidade, a segurança e a resiliência das operações ao ar livre.

### **Objetivos**

Este estudo tem como objetivo desenvolver um Sistema de Suporte à Decisão (SSD) voltado à gestão de riscos meteorológicos em atividades operacionais realizadas ao ar livre no setor de gás natural encanado, com aplicação em parte do Estado de São Paulo. A proposta envolve a definição de limiares críticos para variáveis meteorológicas — como precipitação, vento e conforto térmico — a partir da análise de dados históricos e parâmetros normativos. Esses limiares fundamentam a construção de uma matriz de criticidade, que serve de base para o desenvolvimento de uma plataforma digital de apoio ao planejamento e à tomada de decisão em campo.

Ao cumprir esses objetivos, o estudo busca não apenas mitigar riscos imediatos, mas também contribuir para uma cultura organizacional orientada à antecipação e à resiliência climática, com potencial de replicação em outros contextos sensíveis às condições meteorológicas.

um quarto da oferta global de energia (IEA, 2025), e representa aproximadamente 10% da Oferta Interna de Energia no Brasil (EPE, 2024). Dada sua relevância na matriz energética, a operação e manutenção da infraestrutura associada ao gás natural exigem atenção especial, sobretudo diante da crescente influência de condições meteorológicas extremas.

Estudos apontam que alterações climáticas afetam não apenas a

infraestrutura física do setor, mas também os padrões de consumo de energia. Timmer e Lamb (2007) analisaram a relação entre temperatura ambiente e consumo de gás natural encanado nos Estados Unidos durante os meses frios (novembro a março), observando correlações superiores a 0,8 entre os indicadores de temperatura e os volumes consumidos, o que evidencia a sensibilidade do setor às variações climáticas.

Viana et al. (2022) propuseram um modelo de análise multicritério para atividades de manutenção, considerando o histórico de falhas e as condições meteorológicas. A abordagem associa o orçamento das atividades ao seu nível de criticidade, permitindo otimizar alocações e reduzir custos operacionais.

No contexto de impactos diretos na infraestrutura, Tscherning (2022) discutiu como o aquecimento regional — impulsionado pelo derretimento do permafrost — pode aumentar a incidência de eventos severos, como incêndios florestais e precipitações intensas, comprometendo a integridade de gasodutos.

Esses desafios operacionais e infraestruturais reforçam a necessidade de ferramentas específicas que integrem dados climáticos ao processo decisório. Nesse contexto, Sistemas de Suporte à Decisão (SSD) surgem como alternativas promissoras para antecipar riscos meteorológicos, orientar ações preventivas e garantir maior resiliência no setor de gás natural.

## **2.2 Sistemas de Suporte à Decisão (SSD)**

Sistemas de Suporte à Decisão (SSD) são ferramentas computacionais que integram dados provenientes de diversas fontes — modelos analíticos, sensores, softwares e observações ambientais — com o objetivo de auxiliar a tomada de decisão em cenários complexos e incertos.

Na indústria de gás natural, que opera com grande volume de dados e em horizontes temporais curtos, os SSDs se mostram particularmente relevantes. Seus benefícios incluem melhoria na precisão das decisões, aumento da eficiência operacional, adequação a exigências regulatórias e redução de riscos e impactos ambientais.

Mete et al. (2019) desenvolveram um SSD voltado à avaliação de riscos ocupacionais em obras de gasodutos, considerando a segurança de trabalhadores, o meio ambiente e o tipo de operação. O sistema classifica as atividades com base em seus riscos associados, como derramamento de óleo ou contaminação do solo, gerando indicadores que orientam prioridades.

No contexto da previsão meteorológica operacional, Jinqiu et al. (2021) aplicaram um SSD para alertas em gasodutos na China. A ferramenta integrou previsões horárias de vento, chuva e incidência de raios com dados operacionais de subestações, processados por uma rede bayesiana. O sistema estimou probabilidades de falha e identificou os subsistemas mais vulneráveis.

Outros estudos ampliaram esse escopo ao incorporar métodos de aprendizado de máquina e tomada de decisão multicritério. Ali et al. (2023) revisaram os principais algoritmos usados em SSDs inteligentes, destacando sua capacidade de lidar com

múltiplas variáveis e incertezas. Já Ahmad et al. (2023) propuseram o método MCBWM, que aperfeiçoa decisões em grupo ao permitir múltiplas escolhas simultâneas, aumentando a consistência frente à divergência entre especialistas.

Tran et al. (2024) demonstraram a aplicação prática de um SSD no Exército dos Estados Unidos, com foco na decisão de fechamento de instalações expostas a riscos meteorológicos, como granizo, ventos fortes e inundações. O sistema utiliza critérios ponderados por severidade e probabilidade, aplicados a zonas geográficas específicas, permitindo ações localizadas e mais seguras.

Apesar de seus benefícios, a implementação de SSDs meteorológicos

### 3 METODOLOGIA

Este estudo foi desenvolvido a partir de uma abordagem aplicada e estruturada em quatro etapas principais:

#### 3.1 Entendimento de demandas do setor

Inicialmente, foi conduzido um diagnóstico interno junto à empresa, com o objetivo de compreender como as variáveis meteorológicas influenciam o planejamento e a execução de atividades externas. Foram realizadas entrevistas com equipes de campo e analisados documentos técnicos como manuais de segurança e protocolos operacionais. A partir disso, identificaram-se quatro variáveis críticas: precipitação, rajada de vento, velocidade média do vento e conforto térmico.

#### 3.2 Construção de bases de dados e análise de informações

apresenta desafios relevantes. Destacam-se a necessidade de dados em alta resolução temporal e espacial, a integração com sistemas corporativos já existentes, e a interpretação de incertezas associadas às previsões climáticas, especialmente em cenários extremos.

Essas abordagens demonstram o potencial dos SSDs como ferramentas estratégicas para setores sensíveis ao clima, como o de gás natural. A capacidade de integrar múltiplas variáveis ambientais ao processo decisório reforça a relevância da solução proposta neste estudo, baseada em dados históricos e adaptada à realidade brasileira.

Com base nas variáveis identificadas, foi construída uma base de dados climatológicos abrangendo o período de 2013 a 2023 para a área de concessão da empresa. A análise foi dividida em três frentes:

- i) Cruzamento entre dados meteorológicos e registros operacionais reais de paralisação de atividades devido à chuva, entre março e novembro de 2023;
- ii) Cálculo de índices climatológicos reconhecidos (CDD, CWD, Rx1day, Rx5day e SDII) (ETCCDI, 2009), utilizando o modelo CHIRPS - Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station data) (COSTA et al, 2019), com resolução horária;
- iii) Análise estatística das variáveis vento e conforto térmico, com base em dados do modelo de reanálise ERA5, em resolução horária e no período de 2013 a 2023.

Um dos principais avanços deste estudo é a integração direta entre dados climáticos e registros operacionais reais da concessionária. Esse cruzamento permitiu validar, com base empírica, os limiares críticos de risco meteorológico, conferindo maior robustez e aplicabilidade prática à matriz de criticidade proposta.

A seguir, foram definidos limiares quantitativos de risco (baixo, moderado e alto) com apoio em normas técnicas, como os critérios do INMET e da NR-35, além de referências da literatura.

### **Precipitação**

Os critérios de alerta do INMET foram utilizados como referência para classificação dos eventos de chuva, conforme demonstrado na Tabela 1. Foram considerados ainda os seguintes índices da literatura climatológica (ETCCDI, 2009):

- **CDD** (Consecutive Dry Days): maior número de dias consecutivos com precipitação < 1 mm;
- **CWD** (Consecutive Wet Days): maior número de dias consecutivos com precipitação  $\geq$  1 mm;
- **Rx1day**: precipitação máxima diária em um dado mês;
- **Rx5day**: precipitação máxima acumulada em cinco dias consecutivos;
- **SDII**: média da intensidade da precipitação nos dias chuvosos.

Esses indicadores foram cruzados com as ocorrências de paralisações reportadas pela empresa em 2023, possibilitando a identificação de faixas críticas de precipitação diária e horária. As análises foram feitas com dados do modelo ERA5, e cada evento foi localizado espacialmente para gerar mapas e extrair padrões recorrentes.

**Tabela 1: Critérios para avisos meteorológicos - INMET.**

Evento previsto	Perigo potencial	Perigo	Grande perigo
Acumulado de chuva	20 a 30 mm/h ou até 50 mm/dia	30 a 60 mm/h ou 50 a 100 mm/dia	Maior que 60 mm/h ou maior que 100 mm/dia. Verificar outros fatores.
Chuva intensa	Ventos intensos (40-60km/h). Precipitação entre 20 e 30 mm/h ou até 50 e 100mm/dia	Ventos intensos (60-100 km/h). Precipitação entre 30 e 60 mm/h ou entre 50 mm/dia	Ventos maiores que 100 km/h, precipitação maior que 60mm/h ou 100 mm/dia.
Temporal/tempestade	Ventos entre 40 e 60km/h, precipitação entre 20 e 30 mm/h ou até 50 mm/dia e granizo	Ventos entre 61 e 99 km/h, precipitação entre 30 e 60 mm/h ou entre 50 mm/dia e granizo.	Ventos maiores que 100 km/h, precipitação maior que 60mm/h ou 100 mm/dia e granizo.
Vento	40 - 60km/h	61 - 99 km/h	Maior que 100 km/h

### **Velocidade do vento e rajada**

A análise das variáveis de vento foi fundamentada na NR 35 – Trabalho em Altura (BRASIL, 2012), que estipula o limite de 40 km/h para interrupção obrigatória de atividades com acesso por corda. Para ventos entre 40 e 46 km/h, a norma permite a execução condicionada à implementação de medidas adicionais de segurança, conforme descrito em parecer técnico. Os dados de vento utilizados foram tratados estatisticamente para extrair médias, máximos e mínimos mensais ao longo do período 2013–2023, com base no ERA5.

### **Índice de Temperatura Efetiva (TEv)**

O conforto térmico foi avaliado por meio do Índice de Temperatura Efetiva (TEv), que considera temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento. A equação utilizada foi proposta por Leal et al. (2017) e está representada a seguir:

$$TEv = 37 - (37 - T)/(0,68 - 0,0014RH + (1,76 + 1,4v^{0,75})^{-1} - 0,29T(1 - RH/100))$$

Onde:

- T = temperatura do ar (°C)
- RH = umidade relativa (%)
- v = velocidade do vento (m/s)

As faixas de risco fisiológico associadas ao TEv foram classificadas conforme Tabela 2.

**Tabela 2: Faixas de sensação térmica TEv.**

TEv (°C)	Sensação térmica	Grau de estresse fisiológico
<05	Muito frio	Extremo estresse ao frio
05 -10	Frio	Extremo estresse ao frio
10 -13	Moderadamente frio	Tiritar
13 -16	Ligeiramente frio	Resfriamento do corpo
16 -19	Pouco frio	Ligeiro resfriamento do corpo
19 -22	Ligeiramente fresco	Vasoconstrição
22 -25	Confortável	Neutralidade térmica
25 -28	Ligeiramente quente	Ligeiro suor, vasodilatação
28 -31	Quente moderado	Suando
31 -34	Quente	Suor em profusão
>34	Muito quente	Falha na termorregulação

### **3.3 Desenvolvimento da plataforma**

A matriz de criticidade construída a partir das análises serviu como base para o desenvolvimento de um módulo web de suporte à decisão. A plataforma permite

visualizar os níveis de risco para os próximos 15 dias, com sistema de alertas codificados por cores e filtros adaptáveis às atividades da empresa.

Após validação funcional junto ao cliente, foram realizados ajustes finais para disponibilização da ferramenta em ambiente real.

### 3.4 Monitoramento de uso

Um período piloto de três meses foi iniciado para acompanhar a utilização da ferramenta em campo. Durante esse tempo, são realizados:

- Suporte técnico aos usuários;
- Monitoramento da eficácia das recomendações de risco;
- Avaliação de possíveis ajustes nos limiares estabelecidos com base em novos eventos.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISE

Esta seção apresenta os principais resultados da análise histórica das variáveis meteorológicas de interesse (precipitação, vento e conforto térmico) e discute sua relação com os níveis de criticidade operacional. Os dados são organizados por variável, com destaque para os limiares de risco identificados e sua posterior incorporação na matriz de criticidade.

### 4.1 Precipitação

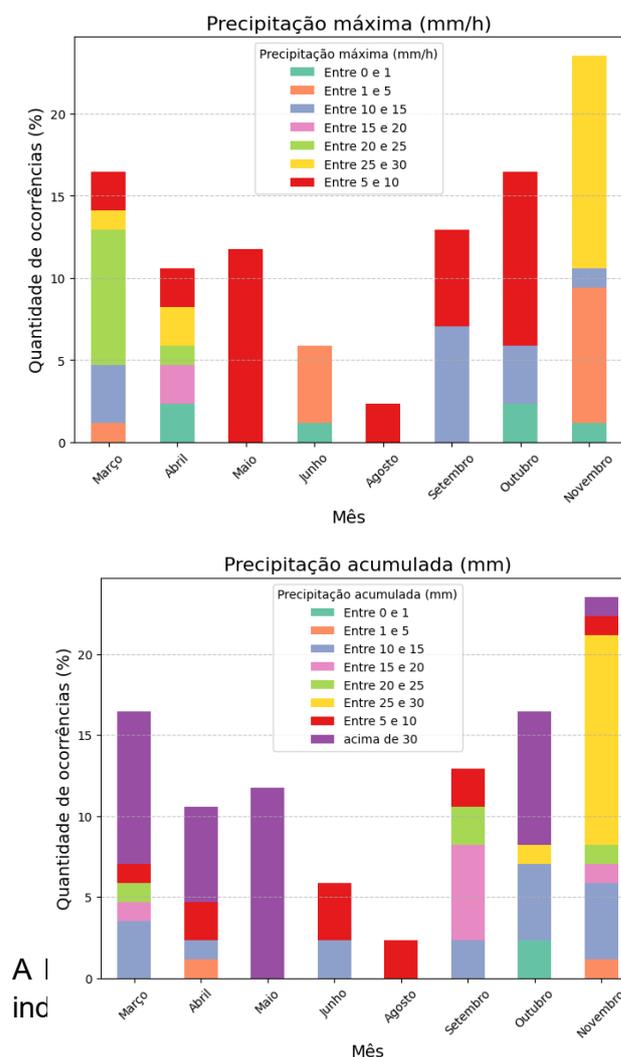
#### 4.1.1 Eventos Operacionais e distribuição mensal

#### 4.1.2 Indicadores CDD e CWD

A Figura 1 apresenta a distribuição das ocorrências mensais de paralisação por faixas de precipitação diária acumulada e precipitação horária máxima entre março e novembro de 2023.

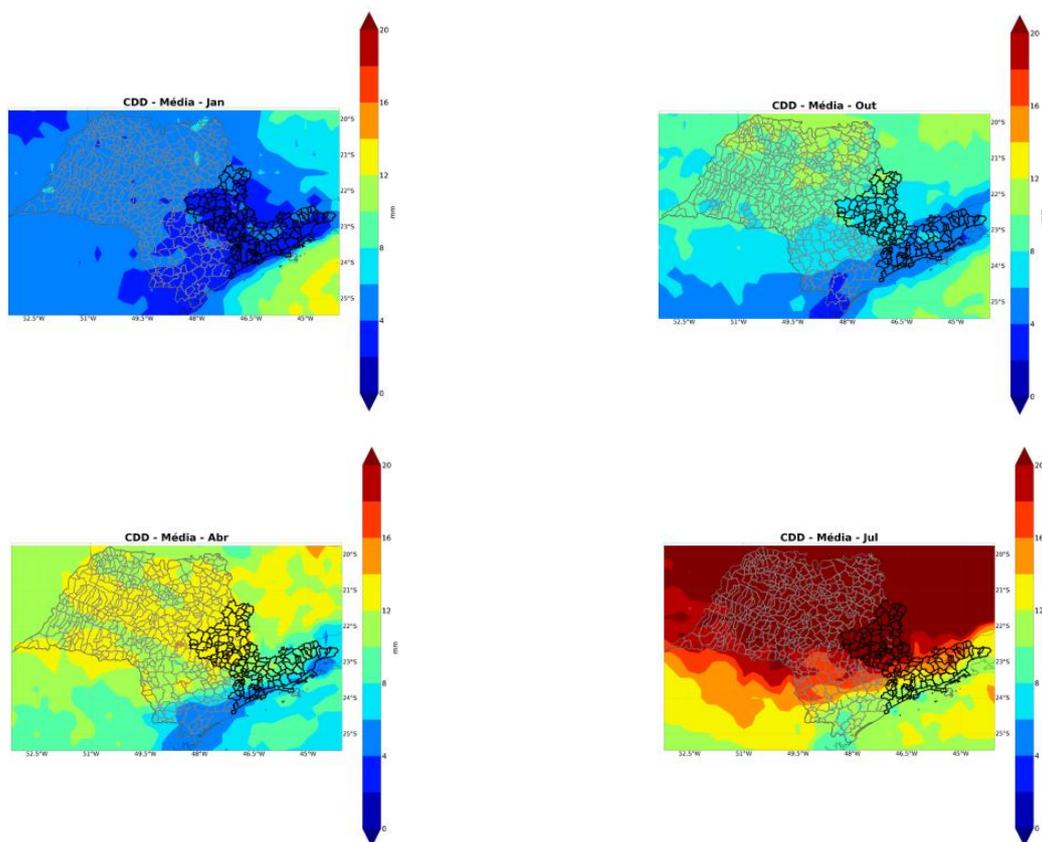
Observa-se que os eventos mais frequentes se situaram nas faixas entre 25 e 30 mm/dia e acima de 30 mm/dia, especialmente nos meses mais quentes. Em termos de precipitação horária, as faixas de 5–10 mm/h e acima de 20 mm/h foram predominantes, sendo adequadas como referências iniciais de risco baixo e alto, respectivamente.

**Figura 1: Ocorrências mensais (em termos percentuais) por faixa de precipitação diária (mm) e horária (mm/h), março a novembro de 2023.**



quatro meses representativos. A Tabela 3 compara os valores médios mensais de CDD e CWD entre municípios do litoral e do interior.

**Figura 2: Mapas mensais de CDD para quatro meses representativos (2013–2023).**



**Tabela 3: Médias mensais de dias secos (CDD) e dias chuvosos (CWD) por região (2013–2023).**

Mês	CDD Litoral	CDD Interior	CWD Litoral	CWD Interior
Janeiro	Entre 2 e 4	Entre 2 e 6	Entre 12 e 18	Entre 6 e 12
Fevereiro	Entre 2 e 6	Entre 2 e 8	Entre 12 e 18	Entre 6 e 12
Março	Entre 2 e 6	Entre 4 e 8	Entre 10 e 14	Entre 6 e 10
Abril	Entre 4 e 8	Entre 8 e 14	Entre 4 e 8	Entre 2 e 6
Maio	Entre 8 e 10	Entre 10 e 16	Entre 4 e 6	Entre 2 e 4
Junho	Entre 8 e 10	Entre 10 e 20	Entre 4 e 6	Entre 2 e 4
Julho	Entre 10 e 14	Entre 12 e acima	Entre 2 e 4	Entre 0 e 4

		de 20		
Agosto	Entre 8 e 12	Entre 10 e 20	Entre 4 e 6	Entre 2 e 4
Setembro	Entre 8 e 12	Entre 10 e 18	Entre 4 e 6	Entre 2 e 4
Outubro	Entre 4 e 6	Entre 4 e 12	Entre 6 e 8	Entre 4 e 8
Novembro	Entre 2 e 6	Entre 4 e 6	Entre 8 e 14	Entre 4 e 8
Dezembro	Entre 2 e 4	Entre 2 e 6	Entre 10 e 16	Entre 8 e 14

A análise revela que os meses de inverno concentram mais dias secos, especialmente no interior, enquanto o verão apresenta maior continuidade de dias chuvosos no litoral.

A Tabela 4 apresenta os valores médios mensais de precipitação máxima em 1 dia (Rx1day) e em 5 dias consecutivos (Rx5day), comparando regiões litorâneas e do interior. Os dados apontam maior intensidade acumulada no litoral, com destaque para o verão.

#### 4.1.2 Rx1day e Rx5day

**Tabela 4: Precipitação máxima diária (Rx1day) e em 5 dias consecutivos (Rx5day) por região (2013–2023).**

Mês	Rx1day		Rx5day	
	Litoral	Interior	Litoral	Interior
Janeiro	Entre 30 e acima de 45	Entre 30 e 45	Acima de 80mm	Entre 70 e acima de 80mm
Fevereiro	Entre 30 e acima de 45	Entre 25 e 40	Acima de 80mm	Entre 50 e 70mm
Março	Entre 30 e acima de 45	Entre 20 e 40	Acima de 80mm	Entre 45 e 70mm
Abril	Entre 20 e 45	Entre 15 e 25	Entre 45 e 60mm	Entre 20 e 30mm
Maio	Entre 15 e 30	Entre 10 e 25	Entre 35 e 60mm	Entre 20 e 45mm
Junho	Entre 15 e 25	Entre 5 e 15	Entre 30 e 45mm	Entre 20 e 30mm
Julho	Entre 15 e 25	Entre 5 e 15	Entre 15 e 35mm	Entre 10 e 15mm
Agosto	Entre 20 e 30	Entre 10 e 25	Entre 35 e 60mm	Entre 15 e 35mm
Setembro	Entre 20 e 30	Entre 15 e 25	Entre 45 e 60mm	Entre 30 e 45mm
Outubro	Entre 20 e 30	Entre 15 e 30	Entre 45 e 70mm	Entre 30 e 45mm

Novembro	Entre 30 e acima de 45	Entre 25 e 40	Entre 60 e acima de 80mm	Entre 50 e 70mm
Dezembro	Entre 30 e acima de 45	Entre 20 e 40	Entre 60 e acima de 80mm	Entre 50 e 70mm

#### 4.1.3 Índice de Intensidade Simples de Precipitação (SDII)

Figura 3 mostra o padrão espacial observado no mês de junho, destacando áreas com ausência de dias chuvosos.

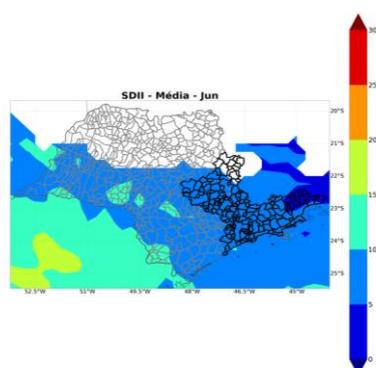
A Tabela 5 apresenta os valores mensais do SDII (Simple Daily Intensity Index). A

**Tabela 5: Índice de intensidade simples de precipitação (SDII) mensal (2013–2023).**

Mês	SDII	Observações
Janeiro	Entre 5 e 15mm	No litoral: entre 10 e 15mm
Fevereiro	Entre 5 e 15mm	No litoral: entre 10 e 15mm
Março	Entre 5 e 15mm	No litoral: entre 10 e 15mm
Abril -	Entre 5 e 10mm	-
Maio	Entre 5 e 10mm	-
Junho	Entre 5 e 10mm	-
Julho	Entre 5 e 10mm	-
Agosto	Entre 5 e 10mm	-
Setembro	Entre 5 e 10mm	-
Outubro	Entre 5 e 10mm	-
Novembro	Entre 5 e 15mm	-
Dezembro	Entre 5 e 15mm	-

A Figura 3 exibe o mapa do SDII para junho, evidenciando áreas com ausência de precipitação regular, indicadas por regiões em branco devido à inexistência de dias chuvosos no mês.

**Figura 3: Mapa de distribuição do SDII para o mês de junho (2013–2023).**



#### 4.1.4 Conclusões parciais

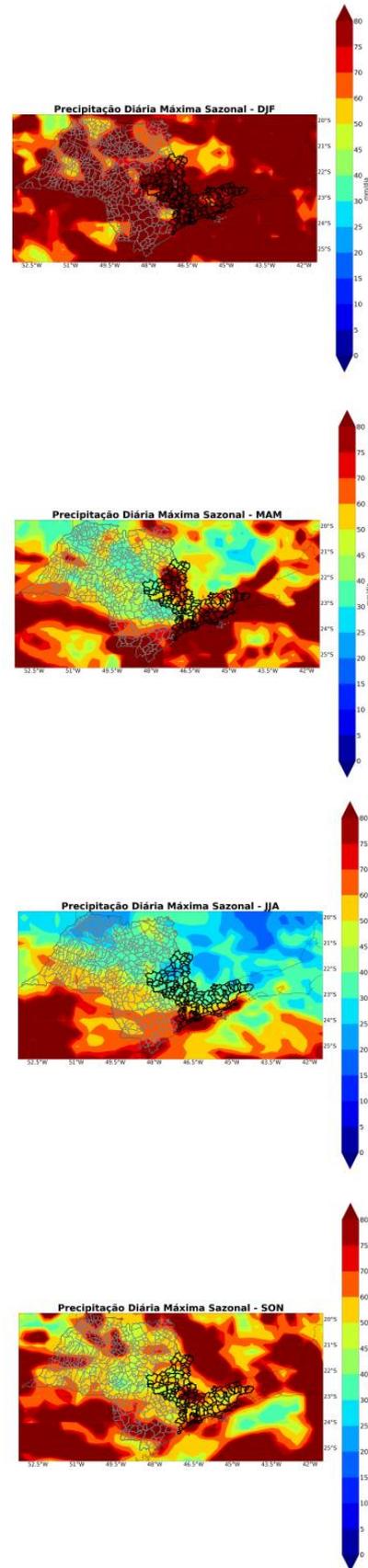
Em relação à variável precipitação, nota-se que, de modo geral, o período entre outubro e março tende a apresentar menos dias disponíveis devido à chuva, inclusive com maior volume. A maior parte das atividades podem ser, então, planejadas para o período entre abril e setembro.

Além disso, os intervalos apresentados pelas análises de indicadores mensais coincidem com os intervalos de eventos diários registrados na Seção 4.a, indicando que tais valores podem ser um importante marco inicial para uma matriz de criticidade.

Outro ponto que merece destaque é que nenhum mês apresentou uma precipitação média dentro dos limiares de periculosidade do INMET, tornando este critério pouco relevante à definição de limiares de criticidade. Com base nestes critérios, os limiares de 10mm/h e 20mm/h são um indicativo preliminar adequado para a matriz de criticidade quanto a precipitação.

É importante salientar a variabilidade climática da precipitação ao longo do ano. Na Figura 4 é mostrada a variação da precipitação diária ao longo das estações do ano. Nota-se uma grande diferença no perfil de precipitação nos meses de verão (que tendem a ser mais chuvosos), do que nos meses de inverno.

**Figura 4: Média sazonal da precipitação acumulada diária máxima (mm/dia).**



## 4.2 Velocidade e rajada de vento

### 4.2.1 Máxima mensal da rajada e velocidade de vento máxima

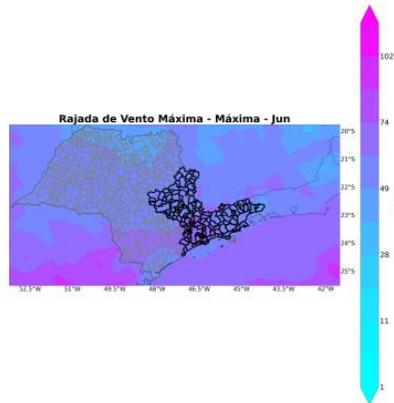
A Tabela 6 apresenta os valores mensais da rajada máxima e da velocidade média

diária do vento entre 2013 e 2023. Todas as rajadas excederam o limite de 40 km/h estipulado pela NR-35. A Figura 5 mostra o padrão espacial da rajada máxima para o mês de junho.

**Tabela 6: Máxima mensal da rajada e velocidade de vento máxima (km/h) entre 2013 e 2023.**

Mês	Rajada máxima (km/h)	Categoria	Velocidade de vento máxima (km/h)	Categoria
Janeiro	49 a 74	Vento forte a Ventania	Entre 11 e 39	Brisa fraca a Brisa forte
Fevereiro	49 a 88	Vento forte a Ventania forte	Entre 11 e 39	Brisa fraca a Brisa forte
Março	49 a 74	Vento forte a Ventania	Entre 11 e 39	Brisa fraca a Brisa forte
Abril	49 a 88	Vento forte a Ventania forte	Entre 11 e 39	Brisa fraca a Brisa forte
Maio	49 a 88	Vento forte a Ventania forte	Entre 11 e 39	Brisa fraca a Brisa forte
Junho	49 a 88	Vento forte a Ventania forte	Entre 11 e 39	Brisa fraca a Brisa forte
Julho	49 a 88	Vento forte a Ventania forte	Entre 11 e 39	Brisa fraca a Brisa forte
Agosto	49 a 88	Vento forte a Ventania forte	Entre 20 e 49	Brisa moderada a Vento fresco
Setembro	49 a 74	Vento forte a Ventania	Entre 11 e 39	Brisa fraca a Brisa forte
Outubro	62 a 88	Ventania a Ventania forte	Entre 11 e 39	Brisa fraca a Brisa forte
Novembro	49 a 88	Vento forte a Ventania forte	Entre 11 e 39	Brisa fraca a Brisa forte
Dezembro	49 a 74	Vento forte a Ventania	Entre 11 e 39	Brisa fraca a Brisa forte

**Figura 5: Máxima mensal da rajada de vento máxima (km/h) em Junho.**



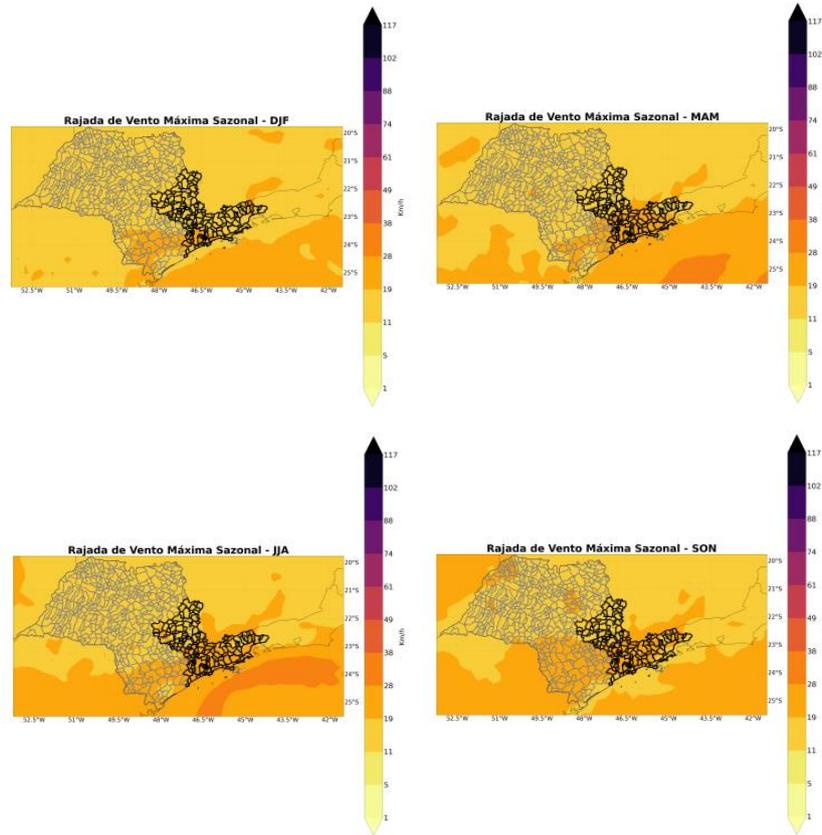
#### **4.2.2 Conclusões preliminares**

Esta análise mostrou que rajadas e velocidades de vento são mais preocupantes (mais intensas e mais frequentes) em regiões mais centrais da área de concessão. Além disso, seu comportamento atinge limiares preocupantes para atividades em altura ao longo de todo o ano, conforme o comportamento climatológico previamente descrito dada a característica climatológica da região.

Isto posto, adotar os limiares de 40 e 46km/h na matriz de risco parece ser o mais adequado em primeira análise, tanto para a velocidade de vento quanto para a rajada.

É importante salientar também a variabilidade climática do vento ao longo do ano. Na Figura 6 é mostrada a variação da rajada máxima diária ao longo das estações do ano. Nota-se uma grande diferença no perfil de rajada nos meses de primavera, especialmente quando comparados aos meses de verão, onde a região de rajadas mais intensas tende a ser menor.

**Figura 6: Média sazonal da rajada de vento máxima (km/h).**



### 4.3 Conforto térmico

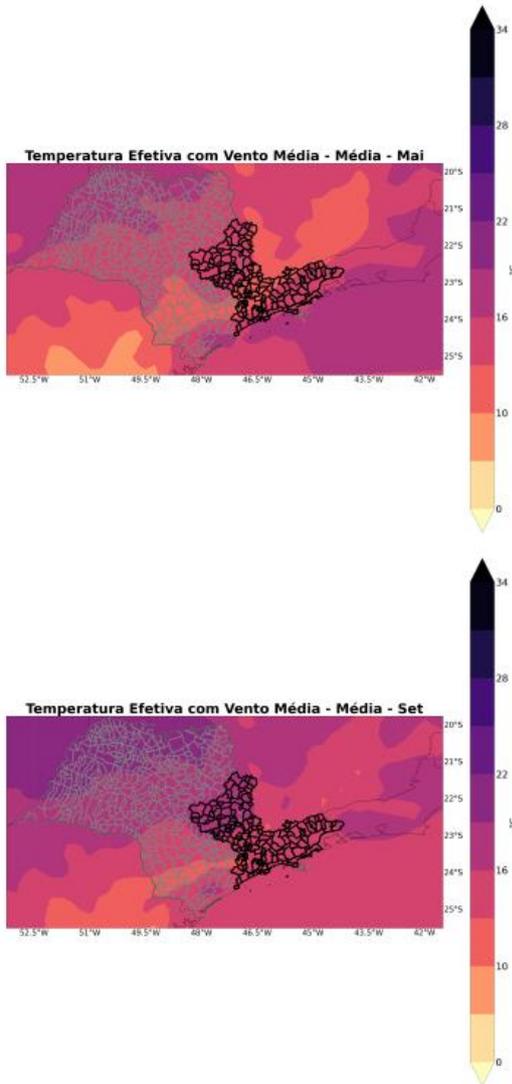
#### 4.3.1 TEv máximo mensal médio

A Tabela 7 apresenta os valores médios mensais do TEv máximo, médio e mínimo e TEv máxima mensal entre 2013 e 2023. A Figura 7 mostra a variação espacial do TEv médio em dois meses representativos.

**Tabela 7: Média mensal do TEv (°C) máximo, médio e mínimo entre 2013 e 2023.**

Mês	Média das máximas	Significado	Média das médias	Significado	Média das mínimas	Significado
Janeiro	25 a 31	Ligeiramente quente a Quente moderado	16 a 22	Pouco frio a Ligeiramente fresco	05 a 13	Frio a Moderadamente frio
Fevereiro	25 a 31	Ligeiramente quente a Quente moderado	16 a 22	Pouco frio a Ligeiramente fresco	05 a 13	Frio a Moderadamente frio
Março	25 a 28	Ligeiramente quente	16 a 22	Pouco frio a Ligeiramente fresco	05 a 13	Frio a Moderadamente frio
Abril	22 a 28	Confortável a Ligeiramente quente	13 a 19	Ligeiramente frio a Pouco frio	<05 a 10	Muito frio a Frio
Maio	22 a 25	Confortável	10 a 16	Moderadamente frio a Ligeiramente frio	<05	Muito frio
Junho	19 a 25	Ligeiramente fresco a Confortável	10 a 16	Moderadamente frio a Ligeiramente frio	<05	Muito frio
Julho	19 a 25	Ligeiramente fresco a Confortável	10 a 13	Moderadamente frio	<05	Muito frio
Agosto	22 a 28	Confortável a Ligeiramente quente	10 a 16	Moderadamente frio a Ligeiramente frio	<05 a 10 °C	Muito frio a Frio
Setembro	25 a 31	Ligeiramente quente a Quente moderado	16 a 22	Pouco frio a Ligeiramente fresco	<05 a 10	Muito frio a Frio
Outubro	25 a 31	Ligeiramente quente a Quente moderado	13 a 19	Ligeiramente frio a Pouco frio	<05 a 10	Muito frio a Frio
Novembro	25 a 31	Ligeiramente quente a Quente moderado	13 a 19	Ligeiramente frio a Pouco frio	<05 a 10	Muito frio a Frio
Dezembro	25 a 31	Ligeiramente quente a Quente moderado	16 a 22	Moderadamente frio a Ligeiramente frio	10 a 16	Moderadamente frio a Ligeiramente frio

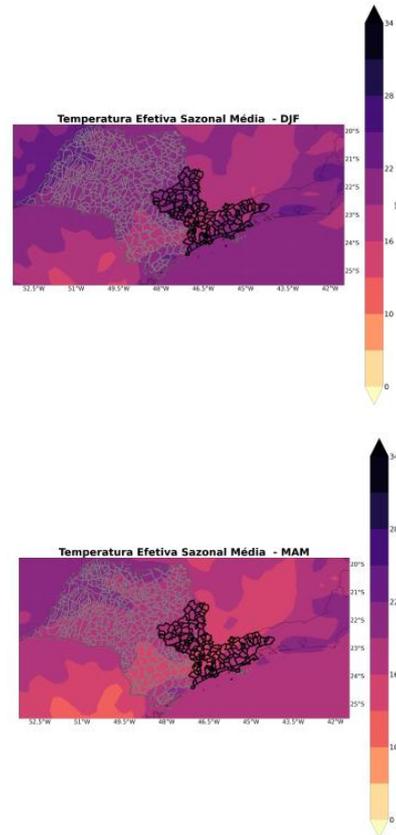
**Figura 7: Média mensal do TEv (°C) médio entre 2013 e 2023 para o mês de maio (à esquerda) e para o mês de setembro (à direita).**



Isto posto, adotar os limiares de TEv entre "Ligeiramente fresco"(até 19°C) e "Ligeiramente quente"(Maior que 28 °C) parece razoável para os níveis baixo, moderado e alto de criticidade.

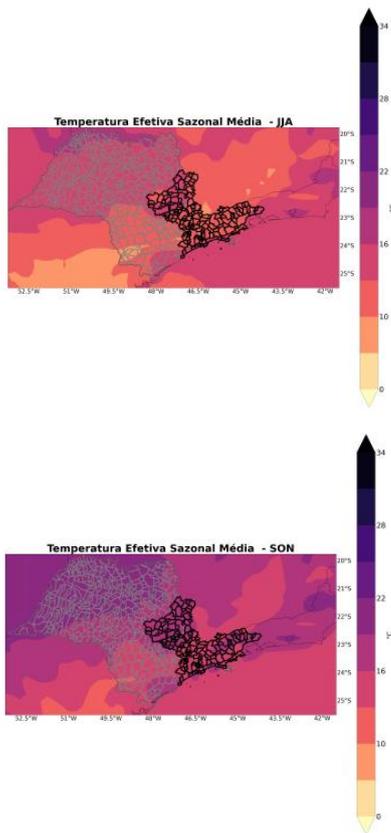
É importante salientar a variabilidade climática do TEv ao longo do ano. Na Figura 8 é mostrada a variação do TEv médio diário ao longo das estações do ano. Nota-se uma grande diferença no perfil deste índice, especialmente entre os meses de verão, mais quentes e úmidos, e nos meses de inverno, mais secos.

**Figura 8: Média sazonal do TEv médio (°C).**



### 4.3.2 Conclusões parciais

Nota-se que a TEv média mensal em todos os meses atinge limiares entre o fresco e o frio, de modo que adotar o limiar "Confortável"estipulado não seria plausível dentro do contexto abordado. Já a máxima mensal da TEv máxima atinge frequentemente ao longo do ano faixas mais altas de estresse térmico, como "Quente moderado"e "Quente", o que apresentam maior impacto potencial segundo os parâmetros estabelecidos.



#### 4.4 Matriz de criticidade

Com base nas análises, foi construída uma matriz de criticidade (Figura 9) integrando os limiares de risco das três variáveis. Para o nível de risco baixo, a combinação entre variáveis exige que todas estejam dentro de faixas seguras (uso de "E"). Já para níveis moderado e alto, adota-se o critério de "OU", atribuindo alerta mesmo que apenas uma variável ultrapasse o limiar.

**Figura 9: Matriz de criticidade com limiares operacionais para precipitação, vento e TEV.**



Para ilustrar a aplicação prática dessa matriz, considere os seguintes cenários:

- Cenário 1 – Alerta de risco alto: previsão de precipitação de 25 mm/h, TEV de 26 °C e rajadas de vento de 32 km/h. Mesmo com TEV e vento dentro de faixas seguras, o excesso de chuva já configura risco elevado devido à regra do “ou”.
- Cenário 2 – Alerta de risco moderado: TEV de 29 °C (acima do limiar superior), com vento e precipitação dentro dos padrões. Apesar de apenas uma variável crítica, o sistema classifica como risco moderado.
- Cenário 3 – Sem restrições operacionais (risco baixo): todas as variáveis dentro dos intervalos de conforto: TEV de 24 °C, vento de 25 km/h e precipitação de 8 mm/h.

Neste caso, a condição “E” se cumpre, e o sistema libera a execução da atividade.

Esses exemplos reforçam a lógica conservadora adotada e a capacidade da ferramenta de fornecer suporte preventivo à decisão operacional. Esse modelo busca garantir maior aversão ao risco e foi validado junto à operação da empresa.

Apesar dos avanços apresentados na construção da matriz de criticidade e na consolidação dos indicadores meteorológicos, é importante destacar que o objetivo de desenvolvimento de um Sistema de Suporte à Decisão ainda requer maior aprofundamento técnico. Aspectos como a arquitetura da plataforma, o modelo de visualização adotado, as tecnologias utilizadas e o grau de automação implementado não foram detalhados. Além disso, recomenda-se que futuras versões do estudo incluam uma validação cruzada da matriz com eventos operacionais reais não utilizados no processo de calibração, de forma a verificar sua eficácia preditiva em campo.

## 5 DISCUSSÃO

Com base nos resultados obtidos, esta seção discute as principais implicações operacionais do estudo, suas limitações e perspectivas futuras de aprimoramento da solução proposta.

Do ponto de vista técnico, o estudo evidenciou que:

- O período entre outubro e março concentra a maior frequência de chuvas, com limiares operacionais sugeridos de 10 mm/h para risco baixo e 20 mm/h para risco elevado;
- Os índices climáticos CDD, CWD, Rx1day, Rx5day e SDII reforçam a

sazonalidade da precipitação na região de estudo;

- Rajadas de vento superiores a 40 km/h ocorrem em todos os meses do ano, especialmente em regiões centrais da área de concessão, o que justifica sua adoção como parâmetro crítico;
- O Índice de Temperatura Efetiva (TEv) demonstrou boa sensibilidade para avaliar o conforto térmico em campo, com limiares abaixo de 19 °C e acima de 28 °C representando condições operacionais de menor e maior risco, respectivamente.

- Esses parâmetros fundamentaram a construção da matriz de criticidade, que utiliza uma lógica conservadora na classificação dos níveis de risco: a combinação de múltiplas variáveis meteorológicas eleva automaticamente o nível de alerta. Essa abordagem foi adotada com o objetivo de maximizar a segurança operacional, mesmo que à custa de uma possível superestimativa do risco em cenários marginais. Tal postura é estratégica em contextos de alta exposição e baixa tolerância a falhas, como no setor de gás natural.

Do ponto de vista gerencial, a implementação de um Sistema de Suporte à Decisão (SSD) com base nessa matriz representa ganhos expressivos em previsibilidade e segurança. A ferramenta pode contribuir para a redução de paralisações inesperadas, otimização de cronogramas e racionalização de recursos em campo. Além disso, o modelo mostra-se escalável e adaptável a outras regiões ou setores, desde que ajustado às especificidades meteorológicas e operacionais locais.

Entretanto, algumas limitações devem ser consideradas. A matriz foi construída com

base em dados históricos e registros operacionais de uma única concessionária, o que restringe sua validade externa. Ainda não foi realizada uma validação cruzada com eventos não incluídos na etapa de calibração, o que é fundamental para testar sua robustez preditiva.

Além disso, a ferramenta atual não integra dados em tempo real nem adota modelos de previsão probabilística, o que pode comprometer a capacidade de resposta dinâmica em cenários críticos. Também se destaca a limitação espacial das reanálises meteorológicas utilizadas (como o ERA5), que não captam com precisão microclimas urbanos ou variações locais em áreas complexas.

Para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Realizar validação externa da matriz com eventos independentes;
- Incorporar dados em tempo real e modelos de previsão por ensembles;
- Automatizar o sistema em ambientes operacionais integrados, como plataformas de despacho de equipes;
- Explorar algoritmos de aprendizado de máquina para refinar os limiares de risco com base em dados operacionais contínuos.

Este estudo contribui, assim, não apenas com uma ferramenta aplicada, mas também com uma proposta metodológica robusta para a incorporação de variáveis meteorológicas na gestão de riscos operacionais, fomentando uma cultura organizacional orientada à resiliência climática.

## 6 CONCLUSÕES

Este estudo apresentou o desenvolvimento de uma ferramenta de suporte à decisão voltada à gestão de riscos meteorológicos em atividades ao ar livre no setor de gás natural encanado, com aplicação na região metropolitana de São Paulo. O trabalho partiu do diagnóstico de variáveis críticas à operação — precipitação, rajadas de vento, velocidade do vento e conforto térmico — e avançou na definição de limiares de risco com base em dados históricos, normas técnicas e evidências empíricas.

Os resultados confirmaram a relevância dessas variáveis para o contexto operacional analisado e permitiram a construção de uma matriz de criticidade, estruturada em níveis de risco e integrada a uma plataforma digital. A ferramenta permite consultar, de forma visual e filtrável, o risco associado aos próximos 15 dias, representando um avanço significativo na previsão e prevenção de interrupções de campo por condições meteorológicas adversas.

Atualmente em fase final de testes, a solução tem demonstrado elevado potencial de aplicabilidade, tanto no setor de gás natural como em outros segmentos que operam sob alta sensibilidade climática.

Entre as limitações do estudo, destaca-se a necessidade de validação externa da matriz com eventos não utilizados na calibração, além da ausência de integração com dados em tempo real. Para futuras pesquisas, recomenda-se incorporar modelos dinâmicos de previsão e testar a adaptabilidade do sistema em novos contextos territoriais.

Sugestões para trabalhos futuros incluem a análise de anomalias das variáveis meteorológicas em questão para analisar

mudanças de padrão, além de análises cruzadas entre variáveis.

De forma geral, este trabalho contribui para a consolidação de abordagens baseadas em evidências meteorológicas no apoio à tomada de decisão operacional, promovendo maior segurança, eficiência e capacidade de adaptação diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

## Referências

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. NR 35 – Trabalho em Altura. Brasília: MTE, 2012. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/inspecao-do-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-35>. Acesso em: 2 jun. 2025.

Costa, Julio, et al. "Validação dos dados de precipitação estimados pelo CHIRPS para o Brasil." *Revista Brasileira de Climatologia* 24 (2019).

Cruz, A.M. and Krausmann, E. (2013) Vulnerability of the Oil and Gas Sector to Climate Change and Extreme Weather Events. *Climatic Change*, 121, 41-53. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0891-4>

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional - Relatório Síntese - Ano base 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2024>. Acesso em junho de 2024.

G1. Alerta amarelo, laranja ou vermelho para chuva? entenda o que significam as cores do inmet. <https://g1.globo.com/meio-ambiente/noticia/2022/02/18/alerta->

[laranja-para-chuva-entenda-o-que-significam-as-cores-do-inmet.ghtml](https://g1.globo.com/meio-ambiente/noticia/2022/02/18/alerta-laranja-para-chuva-entenda-o-que-significam-as-cores-do-inmet.ghtml), 2024. Acesso em: 19 ago. 2024

Gobo, João & Galvani, Emerson. (2012). APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE TEMPERATURA EFETIVA COM VENTO (TEv) NOS ESTUDOS DE CONFORTO TÉRMICO PARA O ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. *Revista Geonorte*. Volume 1. 403.

IEA - International Energy Agency. Greenhouse Gas Emissions from Energy Data Explorer. 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/greenhouse-gas-emissions-from-energy-data-explorer>. Acesso em maio de 2025.

Jinqiu Hu, Chuangang Chen, Zeyu Liu, Early warning method for overseas natural gas pipeline accidents based on FDOOBN under severe environmental conditions, *Process Safety and Environmental Protection*, Volume 157, 2022, Pages 175-192, ISSN 0957-5820, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.10.046>

Leal, L. R., Palaoro, L. B., Xavier, T. C., Oliveira, W. D., Fialho, E. S., & Alvarez, C. E. (2017). Análise de Índices de Conforto Térmico Urbano associados às Condições Sinóticas de Vitória (ES), Brasil. In *Anais do II Encontro Nacional Sobre Reabilitação Urbana e Construção Sustentável: do edifício para a escala urbana*.

Lengert, M., Zanovello, R., & de Moraes, C. H. Danos, perigos, enfrentamentos e conflitos: uma análise discursiva das reportagens de mudança climática e eventos extremos na Folha de São Paulo e O Globo1, 2018.

Mete, Suleyman; Serin, Faruk; Oz, Nurdan Ece; Gul, Muhammet. A decision-support

system based on Pythagorean fuzzy VIKOR for occupational risk assessment of a natural gas pipeline construction, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Volume 71, 2019, 102979, ISSN 1875-5100, <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.102979>.

Q. S. Ahmad, M. F. Khan, e N. Ahmad, "A Group Decision-Making Approach in MCDM: An Application of the Multichoice Best–Worst Method", *Applied Sciences*, vol. 13, nº 12. MDPI AG, p. 6882, jun. 06, 2023. doi: 10.3390/app13126882.

Regoto, P., Dereczynski, C., Chou, S. C., & Bazzanella, A. C. (2021). Observed changes in air temperature and precipitation extremes over Brazil. *International Journal of Climatology*, 41(11), 5125-5142.

Tscherning, R.: Climate Risk and Physical Resilience: Adapting Natural Gas Pipeline Infrastructure for the Clean Energy Transition in Canada. In D. S. Olawuyi & E. G. Pereira (Eds.), *The Palgrave Handbook of Natural Gas and Global Energy Transitions*. Cham. 2022.

Comciência: revista eletrônica de jornalismo científico. Campinas, 10 mar. 2007.

Timmer, R. P., and P. J. Lamb, 2007: Relations between Temperature and Residential Natural Gas Consumption in the Central and Eastern United States. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 46, 1993–2013, <https://doi.org/10.1175/2007JAMC1552.1>.

Viana, Francisco Filipe Cunha Lima Viana, et al. A hybrid multicriteria decision model for selecting a portfolio of risk-based maintenance actions in natural gas pipelines, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Volume 103, 2022, 104655, ISSN 1875-5100, <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104655>.

Vieira de Andrade, H. (2017). MAPEAMENTO DAS POLÍTICAS ESTADUAIS DE ADAPTAÇÃO DAS CIDADES ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BRASIL. *REVISTA GEOGRÁFICA ACADÊMICA*, 11(2), 24–49. Recuperado de <https://revista.ufr.br/rga/article/view/4358>

Young, Carlos Eduardo Frickmann; Steffen, Priscila Geha. Consequências econômicas das mudanças climáticas.