

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

LUCIMARA FERREIRA DA SILVA

**Acidentes de trabalho e estresse térmico na agricultura:
uma abordagem de clusterização de dados**

Maringá
2025

LUCIMARA FERREIRA DA SILVA

**Acidentes de trabalho e estresse térmico na agricultura:
uma abordagem de clusterização de dados**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia de Produção, Centro de Tecnologia da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.
Área de concentração: Engenharia de Produção

Orientadora: Profa. Dra. Gislaine Camila Lapasini Leal

Coorientador: Prof. Dr. Bruno Samways dos Santos

Maringá
2025

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

S586a

Silva, Lucimara Ferreira da

Acidentes de trabalho e estresse térmico na agricultura : uma abordagem de clusterização de dados / Lucimara Ferreira da Silva. -- Maringá, PR, 2025.
117 f. : il. color.

Orientadora: Profa. Dra. Gislaine Camila Lapasini Leal.

Coorientador: Prof. Dr. Bruno Samways dos Santos.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Produção, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2025.

1. Saúde e segurança ocupacional - Agricultura. 2. Estresse térmico. 3. Mudanças climáticas - Impactos sociais. 4. Risco ocupacional. 5. Clusterização. I. Leal, Gislaine Camila Lapasini, orient. II. Santos, Bruno Samways dos, coorient. III. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia de Produção. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. IV. Título.

CDD 23.ed. 363.11

Síntique Raquel de C. Eleutério - CRB 9/1641

FOLHA DE APROVAÇÃO

LUCIMARA FERREIRA DA SILVA

Acidentes de trabalho e estresse térmico na agricultura: uma abordagem de clusterização de dados

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Centro de Tecnologia da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção pela Banca Examinadora composta pelos membros:

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



GISLAINE CAMILA LAPASINI LEAL

Data: 13/01/2026 08:10:31-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Gislaïne Camila Lapasini Leal
Presidente Orientadora
Universidade Estadual de Maringá – PGP/UEM

Documento assinado digitalmente



EDWIN VLADIMIR CARDOZA GALDAMEZ

Data: 28/11/2025 17:17-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Edwin Vladimir Cardoza Galdamez
Membro examinador interno
Universidade Estadual de Maringá – PGP/UEM

Documento assinado digitalmente



LUCAS ANTONIO RISSO

Data: 28/11/2025 15:46:52-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Lucas Antonio Risso
Membro examinador externo
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

Documento assinado digitalmente



BRUNO SAMWAYS DOS SANTOS

Data: 03/12/2025 09:13:32-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Bruno Samways dos Santos
Coorientador
Universidade Estadual de Maringá – PGP/UEM

Aprovada em: 28 de novembro de 2025.

Local da defesa: Sala 02, Bloco 19, *campus* da Universidade Estadual de Maringá.

AGRADECIMENTOS

Minha gratidão mais sincera vai para os meus pais, Maria e Irani, dois pequenos agricultores que, mesmo sem acesso à educação formal, sempre me incentivaram a estudar. Com trabalho árduo e dignidade, me ensinaram o valor do esforço e foram fundamentais para que eu pudesse chegar até aqui. Este trabalho também é de vocês.

Agradeço, em especial, à minha orientadora Camila, por todo o suporte, pelos ensinamentos valiosos e pelo incentivo constante ao longo da minha trajetória acadêmica. Estendo meus agradecimentos aos professores Bruno Santos e Rafael Lima, pelo apoio essencial durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao meu namorado André, agradeço profundamente pelo suporte emocional e por acreditar em mim em todos os momentos deste ciclo. Aos meus amigos, em especial Jéssica, Tatiane, Diana e Danielly, obrigada pela amizade e presença nos momentos mais desafiadores.

Agradeço também ao Programa de Pós-Graduação (PGP) pelo apoio institucional, essencial ao desenvolvimento e à concretização desta pesquisa, bem como à CAPES pelo incentivo e fomento à pesquisa.

EPÍGRAFE

“Educação não transforma o mundo.
Educação muda as pessoas.
Pessoas transformam o mundo.”

(PAULO FREIRE)

Acidentes de trabalho e estresse térmico na agricultura: uma abordagem de clusterização de dados

RESUMO

As mudanças climáticas configuram um dos maiores desafios contemporâneos para a sustentabilidade e o bem-estar humano, caracterizando-se por projeções futuras alarmantes e impactos cada vez mais evidentes sobre a saúde, a economia e a segurança global. O aumento contínuo das temperaturas médias ao longo das últimas décadas intensifica os riscos à saúde ocupacional, especialmente entre trabalhadores expostos a ambientes externos ou não climatizados, que enfrentam jornadas extenuantes, falta de pausas e elevada demanda física. Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo investigar os impactos das mudanças climáticas e do aumento das temperaturas na saúde e segurança dos trabalhadores brasileiros. Estruturada em formato de artigo, a dissertação é composta por dois artigos complementares: o primeiro estabelece um modelo metodológico para a integração de dados climáticos e ocupacionais em nível nacional, utilizando técnicas de mineração de dados e o algoritmo K-Protótipos; o segundo aplica a metodologia ao contexto regional do estado do Paraná, identificando padrões de risco associados ao estresse térmico e avaliando a influência das condições ambientais sobre a incidência de acidentes agrícolas. Em ambos os estudos, a base de dados da Comunicação de Acidentes de Trabalho (CAT) foi combinada com variáveis meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), abrangendo o período de junho de 2018 a junho de 2024. Os resultados reforçam a importância de incorporar variáveis ambientais à análise de saúde e segurança no trabalho, oferecendo subsídios para ações preventivas, políticas públicas e estratégias de adaptação ao contexto das mudanças climáticas no meio rural.

Palavras-chave: Segurança Ocupacional. Setor Agrícola. Estresse Térmico. Aprendizado de Máquina. Clusterização.

Occupational accidents and heat stress in agriculture: a data clustering approach

ABSTRACT

Climate change stands as one of the greatest contemporary challenges to sustainability and human well-being, characterized by alarming future projections and increasingly evident impacts on health, the economy, and global safety. The continuous rise in average temperatures over recent decades has intensified occupational health risks, particularly among workers exposed to outdoor or non-acclimatized environments, who often face exhausting workdays, insufficient rest periods, and high physical demands. In this context, the present study aims to investigate the impacts of climate change and rising temperatures on the health and safety of Brazilian workers. Structured in a multipaper format, this dissertation comprises two complementary articles: the first establishes a methodological framework for integrating climatic and occupational data at the national level, using data mining techniques and the K-Prototypes clustering algorithm; the second applies this methodology to the regional context of the state of Paraná, identifying risk patterns associated with heat stress and evaluating the influence of environmental conditions on the incidence of agricultural accidents. In both studies, the Work Accident Communication (CAT) database was combined with meteorological variables from the National Institute of Meteorology (INMET), covering the period from June 2018 to June 2024. The results reinforce the importance of incorporating environmental variables into occupational health and safety analyses, providing valuable insights for preventive measures, public policies, and adaptation strategies in the context of climate change in rural environments.

Keywords: *Occupational Safety. Agricultural Sector. Thermal Stress. Machine Learning. Clustering.*

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Síntese dos objetivos dos artigos	16
Quadro 1 - Principais índices de estresse térmico	28
Quadro 2 - Caracterização dos atributos do conjunto de dados	38
Quadro 3 - Registros de acidentes por região	41
Quadro 4 - Responsáveis pela abertura da CAT	45
Quadro 5 - Distribuição dos dados por cluster	48
Quadro 6 - Estatísticas descritivas para o IBUTG Interno e Externo por cluster	49
Quadro 1 - Distribuição dos dados por cluster	84
Quadro 2 - Responsáveis pela abertura da CAT	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Método de pesquisa	33
Figura 2 – Seleção e tratamento dos dados de acidentes de trabalho	40
Figura 3 – Ocorrências relacionadas com o tipo e o gênero	42
Figura 4 – Ocorrência por faixa etária	44
Figura 5 – Ocorrência por faixa etária e gênero	44
Figura 6 – Ocorrências por agente causador de acidente	46
Figura 7 – Ocorrências por natureza da lesão	47
Figura 8 – Ocorrências relacionadas com a parte do corpo atingida	47
Figura 9 – Média de IBUTG Interno e Externo por Cluster	50
Figura 10 - Proporção de Óbito e Sexo por Cluster	51
Figura 11 - Proporção por Emitente, Região e Faixa Etária e Cluster	52
Figura 12 - Tipo de Acidente, Parte do Corpo Atingida e Natureza da Lesão por Clusters	53
Figura 1 – Variância acumulada por componente	83
Figura 2 – Método da Silhueta e Método do Cotovelo	84
Figura 3 – Ocorrências relacionadas com o tipo e o gênero	86
Figura 4 – Ocorrência por faixa etária	87
Figura 5 – Ocorrência por faixa etária e gênero	87
Figura 6 – Ocorrências por agente causador de acidente	89
Figura 7 – Ocorrências por natureza da lesão	89
Figura 8 – Ocorrências relacionadas com a parte do corpo atingida	90
Figura 9 – Média de IBUTG Interno e Externo por Cluster	91
Figura 10 - Proporção de Sexo por Cluster	92
Figura 11 - Proporção por Faixa Etária e Cluster	93
Figura 12 - Tipo de Acidente por Clusters	94
Figura 13 - Parte do Corpo Atingida por Clusters	94
Figura 14 - Natureza da Lesão por Clusters	95
Figura 15 - Agente Causador por Clusters	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACM/MCA	<i>Análise de Correspondência Múltipla / Multiple Correspondence Analysis</i>
AEAT	<i>Anuário Estatístico de Acidentes do Trabalho</i>
CAT	<i>Comunicação de Acidentes de Trabalho</i>
CLT	<i>Consolidação das Leis do Trabalho</i>
CNA	<i>Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil</i>
CNAE	<i>Classificação Nacional de Atividades Econômicas</i>
CONAB	<i>Companhia Nacional de Abastecimento</i>
DATAPREV	<i>Empresa de Tecnologia e Informações da Previdência</i>
IBGE	<i>Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística</i>
IBUTG	<i>Índice de Bulbo Úmido e Termômetro de Globo</i>
INMET	<i>Instituto Nacional de Meteorologia</i>
INSS	<i>Instituto Nacional do Seguro Social</i>
IPCC	<i>Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas</i>
KDD	<i>Knowledge Discovery in Databases</i>
MPT	<i>Ministério Público do Trabalho</i>
MTE	<i>Ministério do Trabalho e Emprego</i>
MTP	<i>Ministério do Trabalho e Previdência</i>
NR	<i>Normas Regulamentadoras</i>
ODS	<i>Objetivo de Desenvolvimento Sustentável</i>
OIT	<i>Organização Internacional do Trabalho</i>
OMS	<i>Organização Mundial da Saúde</i>
ONU	<i>Organização das Nações Unidas</i>
PIB	<i>Produto Interno Bruto</i>
SST	<i>Saúde e Segurança do Trabalho</i>

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	14
Integração de Dados Climáticos e Ocupacionais no Brasil: Uma Abordagem de Mineração de Dados Aplicada à Saúde e Segurança do Trabalho	19
2.1 INTRODUÇÃO	19
2.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
2.2.1 SAÚDE E SEGURANÇA DO TRABALHO	23
2.2.2 SAÚDE E SEGURANÇA DO TRABALHO NA AGRICULTURA.....	26
2.2.3 ESTRESSE TÉRMICO	27
2.2.4 MINERAÇÃO DE DADOS.....	31
2.2.5 CLUSTERIZAÇÃO	32
2.2.6 TESTES ESTATÍSTICOS	33
2.3 MÉTODO DE PESQUISA	34
2.3.1 INVESTIGAÇÃO DAS BASES DE DADOS.....	36
2.3.1.1 BASE DE SEGURANÇA E SAÚDE DO TRABALHO	37
2.3.1.2 BASE METEOROLÓGICA	37
2.3.2 COLETA E PRÉ-PROCESSAMENTO	39
2.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
2.4.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS	42
2.4.2 APLICAÇÃO E ANÁLISE DO K-PROTÓTIPOS.....	49
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
Mudanças Climáticas e Saúde Ocupacional: Padrões de Risco na Agricultura Tropical Brasileira	74
3.1 INTRODUÇÃO	74
3.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	77
3.3 MÉTODO DE PESQUISA	79
3.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	86
3.4.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA.....	86
3.4.2 APLICAÇÃO E ANÁLISE DO K-MEANS.....	90
3.4.3 COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS DO CENÁRIO NACIONAL	98
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	102
4.1 CONTRIBUIÇÕES.....	107
4.2 DIFICULDADES E LIMITAÇÕES	109

4.3 TRABALHOS FUTUROS.....	109
REFERÊNCIAS	110
APÊNDICE A – Base 06/24 a 12/20	113
APÊNDICE B – Base 01/21 a 06/24.....	114
APÊNDICE C – Divisão do CBO.....	115
APÊNDICE D – Categorização Agente Causador	116
APÊNDICE E – Categorização Natureza da Lesão	117

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas configuram-se como um dos maiores desafios contemporâneos para a humanidade, com implicações diretas sobre os sistemas ecológicos, econômicos e sociais em escala global. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), criado em 1988 pela Organização das Nações Unidas (ONU), tem sido a principal fonte de evidências científicas sobre as causas e consequências desse fenômeno. Em seus relatórios mais recentes, o IPCC (2021, 2022) aponta que a última década foi o período mais quente já registrado em mais de 125 mil anos e que a temperatura média global poderá atingir um aumento entre 1,5°C e 2°C até o final do século XXI. Esse aquecimento não é apenas uma questão ambiental, mas um problema de saúde pública e de sustentabilidade produtiva, afetando diretamente populações vulneráveis, como os trabalhadores rurais expostos às intempéries climáticas (IPCC, 2021; WATTS *et al.*, 2023).

O aumento das temperaturas médias globais e a intensificação das ondas de calor têm repercussões profundas sobre o trabalho humano. Estudos da Organização Internacional do Trabalho (OIT, 2019) estimam que, até 2030, cerca de 2% do total de horas de trabalho em todo o mundo poderão ser perdidas em razão do estresse térmico, equivalente a mais de 80 milhões de empregos em tempo integral. No caso brasileiro, país de clima predominantemente tropical e grande dependência do setor agropecuário, os impactos do calor extremo são particularmente relevantes. A OIT e a Organização Mundial da Saúde (OMS) reconhecem que a agricultura é uma das atividades mais vulneráveis ao aumento da temperatura global, tanto pela natureza física do trabalho quanto pela escassez de infraestrutura de mitigação térmica (ILO, 2015; WHO, 2021).

O estresse térmico, entendido como a sobrecarga de calor que o organismo humano não consegue dissipar adequadamente, é um dos principais riscos ambientais ocupacionais em

países de baixa e média renda (KJELLSTROM; LEMKE; OTTO, 2017). O corpo humano mantém uma temperatura interna próxima de 37°C, e a exposição prolongada a condições de calor excessivo pode levar à fadiga, desidratação, exaustão, câimbras, síncope térmica e, em casos mais graves, ao colapso cardiovascular e à morte (TAKAKURA *et al.*, 2018; VARGHESE *et al.*, 2019). Além dos efeitos diretos sobre a saúde, a literatura tem destacado a relação entre o calor ambiental e o aumento do risco de acidentes de trabalho, especialmente em atividades que demandam esforço físico e atenção contínua (XIANG *et al.*, 2014; ZANDER *et al.*, 2015; MARTÍNEZ-SOLANAS *et al.*, 2018).

Essa problemática assume relevância crescente no contexto da saúde e segurança ocupacional (SST), pois as mudanças climáticas agravam fatores já críticos no ambiente de trabalho agrícola, como jornadas longas, uso de roupas de proteção impermeáveis e ausência de pausas regulares (BITENCOURT; MAIA; ROSCANI, 2020). Trabalhadores rurais, frequentemente submetidos a calor intenso, umidade elevada e exposição direta ao sol, estão entre os primeiros grupos a sofrer os efeitos fisiológicos do aquecimento global, enfrentando fadiga precoce, queda de atenção e maior propensão a acidentes com maquinários, ferramentas e animais (MEENAKSHI; PANNEER, 2020; RAMIREZ *et al.*, 2025).

Pesquisas internacionais têm demonstrado uma correlação positiva entre a elevação das temperaturas e o aumento de acidentes e doenças ocupacionais (MCINNES *et al.*, 2017; LEE *et al.*, 2019; VARGHESE *et al.*, 2023; HU *et al.*, 2023). Estudos conduzidos na Austrália, Itália, China e Estados Unidos mostram que o risco de acidentes cresce de forma não linear com o aumento da temperatura, atingindo picos em faixas entre 30°C e 35°C (SCHIFANO *et al.*, 2019; MCINNES *et al.*, 2017; SPECTOR *et al.*, 2016). No Brasil, o trabalho de Bitencourt, Maia e Roscani (2020) aplicou o Índice de Bulbo Úmido e Termômetro de Globo (IBUTG) em dados meteorológicos históricos e constatou que as regiões Norte e Nordeste apresentam os níveis mais críticos de sobrecarga térmica, com potencial de ultrapassar os limites de tolerância previstos na Norma Regulamentadora nº 15 do Ministério do Trabalho e Previdência (MTP, 2021). Resultados semelhantes foram observados por Roscani, Maia e Monteiro (2019) na análise de trabalhadores rurais do Nordeste, revelando a urgência de medidas adaptativas, como revezamento de tarefas e sistemas de alerta térmico.

Embora a literatura internacional tenha avançado em modelos estatísticos e preditivos para compreender a relação entre clima e acidentes, os estudos brasileiros ainda são pontuais, limitados geograficamente e baseados em amostras reduzidas. Essa lacuna contrasta com a ampla disponibilidade de bases públicas nacionais, como os registros de Comunicação de

Acidentes de Trabalho (CAT), administrados pela Empresa de Tecnologia e Informações da Previdência (DATAPREV), e as séries meteorológicas horárias do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A integração dessas bases permite construir análises robustas e especialmente detalhadas sobre os impactos do calor nas ocorrências de acidentes de trabalho, algo até então pouco explorado em escala nacional.

Considerando essa oportunidade metodológica, esta dissertação propõe a aplicação de técnicas de **mineração de dados** como a **clusterização** para identificar padrões de risco ocupacional relacionados ao estresse térmico em acidentes de trabalho agrícolas. O primeiro estudo (Artigo 1) aborda o contexto **nacional**, aplicando o modelo *Knowledge Discovery in Databases* (KDD) e o algoritmo K-Protótipos, adequado à análise de variáveis mistas (numéricas e categóricas). O segundo estudo (Artigo 2) foca o estado do Paraná, aplicando o algoritmo K-Means e comparando os agrupamentos regionais com os perfis nacionais. A abordagem busca responder à questão central: **“Quais padrões de risco ocupacional relacionados ao estresse térmico emergem no setor agrícola brasileiro?”** e **“Em que medida eles diferem conforme a escala geográfica e climática?”**

O recorte paranaense justifica-se pela relevância do estado no cenário agropecuário nacional e pela diversidade de condições climáticas internas, do norte subtropical ao sul temperado, que o tornam um campo empírico ideal para verificar variações microclimáticas e ocupacionais. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2025), o Paraná lidera o abate de frangos e destaca-se na produção de soja, milho e trigo, o que envolve grande contingente de trabalhadores rurais e elevado número de registros de acidentes. Essas condições reforçam a pertinência de análises regionais que permitam compreender a distribuição espacial dos riscos e fundamentar políticas públicas específicas.

Do ponto de vista teórico, a investigação dialoga com a literatura de Saúde e Segurança do Trabalho, integrando perspectivas sobre produtividade, condições térmicas e sustentabilidade. Autores como Kjellstrom *et al.* (2016), Takakura *et al.* (2018) e Venugopal *et al.* (2020) ressaltam que o estresse térmico não apenas compromete a saúde, mas também reduz a capacidade laboral e a eficiência produtiva, com implicações econômicas significativas. A Organização Internacional do Trabalho (ILO, 2019) reforça que os países em desenvolvimento, como o Brasil, estão mais vulneráveis a perdas de produtividade e aumento de acidentes decorrentes do calor, devido à limitada infraestrutura de mitigação térmica e à baixa implementação de medidas de adaptação.

Portanto, compreender as interações entre clima e trabalho agrícola, a partir de uma perspectiva quantitativa e multiescalar, constitui uma contribuição científica e prática relevante. A metodologia proposta permite identificar padrões nas relações entre variáveis climáticas e ocupacionais, subsidiando a formulação de estratégias preventivas e fundamentadas em evidências. Assim, esta dissertação pretende preencher uma lacuna na literatura ao aplicar técnicas de mineração de dados a bases públicas de abrangência nacional, oferecendo um panorama sobre o estresse térmico no contexto agrícola brasileiro e suas implicações para a segurança, saúde e produtividade dos trabalhadores.

A dissertação está estruturada em capítulos, cada um dedicado a um dos artigos que a compõem. O Quadro 1 apresenta os artigos desenvolvidos e seus respectivos objetivos.

Quadro 1 – Síntese dos objetivos dos artigos

Artigo	Objetivo
Integração de Dados Climáticos e Ocupacionais no Brasil: Uma Abordagem de Mineração de Dados Aplicada à Saúde e Segurança do Trabalho	Objetivo geral: Identificar padrões e categorias de risco ocupacional relacionados ao estresse térmico em acidentes de trabalho do setor agrícola brasileiro, integrando dados da CAT e variáveis meteorológicas do INMET. Objetivos específicos: (i) Aplicar a técnica de clusterização K-Protótipos para identificar agrupamentos de risco; (ii) Interpretar os clusters gerados, destacando os perfis de risco térmico e suas implicações para a saúde e segurança do trabalhador rural.
Mudanças Climáticas e Saúde Ocupacional: Padrões de Risco na Agricultura Tropical Brasileira	Objetivo geral: Identificar padrões e categorias de risco ocupacional relacionados ao estresse térmico no setor agrícola paranaense, por meio da aplicação de técnicas de clusterização em dados integrados da CAT e do INMET. Objetivos específicos: (i) Empregar o algoritmo de clusterização K-means para identificar agrupamentos de acidentes de trabalho que compartilhem características semelhantes relativas ao contexto ocupacional e às condições climáticas;

	(ii) Interpretar os clusters, evidenciando perfis de exposição térmica e suas implicações para a saúde e segurança dos trabalhadores rurais.
--	--

Fonte: Autoria própria (2025)

Os dois artigos são complementares e seguem uma progressão metodológica. O primeiro artigo estabelece a base técnica e metodológica da pesquisa, realizando a integração entre bases de dados climáticas e ocupacionais em nível nacional e validando o uso de técnica de mineração de dados para o estudo de riscos relacionados ao estresse térmico. Já o segundo artigo aprofunda essa abordagem em escala regional, delimitando a análise ao estado do Paraná, com o intuito de identificar diferenças territoriais, climáticas e ocupacionais que influenciam os padrões de risco observados. Assim, o primeiro estudo fornece a estrutura analítica e validação metodológica, enquanto o segundo amplia a compreensão contextual e aplicada.

Integração de Dados Climáticos e Ocupacionais no Brasil: Uma Abordagem de Mineração de Dados Aplicada à Saúde e Segurança do Trabalho

2.1 INTRODUÇÃO

Os acidentes de trabalho são evitáveis e provocam um grande impacto sobre a produtividade e economia, além do abalo causado para o acidentado e seus familiares. No Brasil, os impactos são expressivos: entre 2012 e 2022, foram registradas 25.492 mortes por acidentes laborais, com uma morte ocorrendo a cada 3 horas e 47 minutos (OBSERVATÓRIO DIGITAL DE SEGURANÇA E SAÚDE NO TRABALHO, 2024).

As lesões, doenças e mortes ocupacionais resultam em grandes despesas não apenas para os trabalhadores e empregadores, mas também para o estado e a sociedade. Segundo o Observatório de Segurança e Saúde no Trabalho (2024), com base em estimativas globais da Organização Internacional do Trabalho (OIT), anualmente a economia perde cerca de 4% do Produto Interno Bruto (PIB) em razão de doenças e acidentes de trabalho, ocasionando perdas humanas e perdas de produtividade provocada por ambientes de trabalho inadequados.

Entre os diversos riscos ocupacionais, o estresse térmico se destaca como um tema central deste estudo, pois pode comprometer o desempenho produtivo e expor os trabalhadores a uma série de riscos, incluindo acidentes, doenças ocupacionais e, em casos extremos, morte (LINDSLEY; CADORETTE, 2015; ROSA; LIMA, 2019). Em condições extremas, os

trabalhadores agrícolas estão mais suscetíveis à fadiga, desidratação e redução dos reflexos, fatores que elevam significativamente a ocorrência de acidentes, como quedas, cortes e manuseio incorreto de equipamentos (SPECTOR *et al.*, 2020; DI BLASI *et al.*, 2023). Além disso, temperaturas elevadas afetam a coordenação motora e o equilíbrio, tornando atividades como a colheita em árvores e o uso de escadas ainda mais perigosas. O estudo de Riccò *et al.* (2020) reforça essa correlação, demonstrando que o risco de acidentes aumenta proporcionalmente à elevação das temperaturas ambientais, com um pico de incidência durante ondas de calor prolongadas.

Os efeitos do estresse térmico no ambiente ocupacional podem desencadear problemas crônicos de saúde, como distúrbios cardiovasculares, doenças renais e transtornos metabólicos, especialmente em trabalhadores expostos de forma contínua ao calor intenso (VENUGOPAL *et al.*, 2020). Tais agravos impactam diretamente na qualidade de vida e na capacidade produtiva desses indivíduos, além de acarretar custos adicionais para os sistemas de saúde pública. Estudos realizados em países tropicais demonstram que trabalhadores em áreas rurais, principalmente aqueles em ocupações informais e sem acesso a equipamentos de proteção adequados, estão entre os mais vulneráveis aos efeitos do calor extremo (KJELLSTROM; LEMKE; OTTO, 2017; BITENCOURT; MAIA; ROSCANI, 2020).

Esse cenário se agrava diante das mudanças climáticas, que têm intensificado a frequência e duração das ondas de calor, ampliando os riscos ocupacionais na agricultura. Estudos indicam que, na Itália, tanto o primeiro dia de uma onda de calor quanto períodos prolongados de calor extremo estão diretamente associados ao aumento das taxas de lesões (RICCÒ *et al.*, 2020). Esse efeito ocorre porque, além do calor externo, o esforço físico intenso gera calor metabólico adicional, intensificando o estresse térmico.

O impacto das variações térmicas não se restringe apenas ao calor extremo. O estudo de Riccò *et al.* (2020) também identificou que, embora dias frios registrem um menor número de acidentes, as lesões tendem a ser mais graves e apresentar um prognóstico mais prolongado. Esse fenômeno pode estar relacionado a condições adversas, como superfícies escorregadias, terrenos instáveis e a menor capacidade fisiológica dos trabalhadores idosos, que representam uma parcela significativa da força de trabalho agrícola.

As mudanças climáticas são amplamente reconhecidas como um dos maiores desafios que a humanidade já enfrentou, resultando em consequências sem precedentes que colocam em risco a saúde e a segurança de todos os ecossistemas do planeta (CAMINADE; MCINTYRE; JONES, 2019; FERRARI *et al.*, 2023).

Até o final deste século projeta-se que a temperatura da superfície global continuará a aumentar, com uma elevação média entre 1,5°C e 2°C (IPCC, 2021). Essa elevação tem implicações diretas na saúde da população mundial, afetando não apenas o bem-estar geral, mas também as condições de trabalho (FERRARI *et al.*, 2023).

Além dos riscos associados ao ambiente de trabalho, os trabalhadores do setor agrícola estão especialmente expostos às consequências das mudanças climáticas. Eles costumam lidar com calor extremo e prolongado, o que afeta diretamente sua saúde e segurança (KIEFER *et al.*, 2016). Os efeitos do estresse térmico vão além da saúde dos trabalhadores; também podem impactar negativamente sua capacidade de trabalho e eficiência, resultando em prejuízos econômicos (KJELLSTROM; LEMKE; OTTO, 2017; FERRARI *et al.*, 2023).

O estresse térmico é um fator crítico que pode influenciar significativamente a ocorrência de acidentes de trabalho, especialmente no setor agrícola, onde os trabalhadores frequentemente estão expostos a condições climáticas extremas. Estudos apontam que a exposição prolongada ao calor pode comprometer a capacidade cognitiva e física dos trabalhadores, reduzindo a concentração, aumentando o tempo de reação e elevando o risco de falhas operacionais (ACHARYA; BOGGESS; ZHANG, 2018; APPLEBAUM *et al.*, 2016). Essas condições tornam as atividades rotineiras mais perigosas, principalmente quando envolvem o uso de ferramentas cortantes, tratores ou andaimes, comuns na agricultura. Além disso, o esforço físico necessário para as tarefas agrícolas eleva a produção de calor metabólico, o que agrava os efeitos da temperatura externa e dificulta a regulação térmica do organismo (KJELLSTROM; LEMKE; OTTO, 2017). Esse cenário pode levar à exaustão térmica, insolação, desidratação e até mesmo à morte súbita por hipertermia.

A vulnerabilidade ao estresse térmico não é homogênea entre os trabalhadores. Fatores como idade avançada, sexo, condições de saúde preexistentes, baixa escolaridade e informalidade agravam os riscos associados à exposição ao calor (VENUGOPAL *et al.*, 2020; BITENCOURT; MAIA; ROSCANI, 2020). No setor agrícola brasileiro, essas condições se sobrepõem à precarização das relações de trabalho, à ausência de medidas de proteção adequadas e à limitada cobertura dos serviços de saúde ocupacional nas áreas rurais.

A atividade agrícola compreende o conjunto de práticas relacionadas ao cultivo do solo, plantio, manejo e colheita de produtos vegetais, sendo uma das bases fundamentais para a segurança alimentar, o desenvolvimento econômico e a manutenção do emprego em zonas rurais. De acordo com a Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE), essa atividade insere-se no setor primário e engloba tanto a agricultura familiar quanto o agronegócio

em larga escala (IBGE, 2023). No contexto brasileiro, a agricultura possui papel estratégico, representando parcela significativa do Produto Interno Bruto (PIB), além de concentrar um contingente expressivo de trabalhadores expostos a condições ambientais adversas.

Estudar os acidentes de trabalho na agricultura torna-se, portanto, relevante não apenas pela importância econômica e social do setor, mas principalmente pelas características laborais que o tornam altamente vulnerável aos efeitos das mudanças climáticas, especialmente ao aumento das temperaturas e à exposição direta à radiação solar. Trabalhadores agrícolas realizam, em sua maioria, atividades físicas intensas, ao ar livre e durante longas jornadas, muitas vezes sem acesso a infraestrutura adequada de proteção térmica (MAIA; BITENCOURT; ROSCANI, 2020; FERRARI *et al.*, 2023).

Embora existam estudos que tratam dos impactos do estresse térmico na saúde e na produtividade dos trabalhadores, ainda são escassas as pesquisas que, com base em dados empíricos extensos, utilizam técnicas de mineração de dados para identificar padrões de risco em condições reais de trabalho. O presente estudo avança nesse sentido ao aplicar a técnica de clusterização de dados sobre acidentes de trabalho no setor agrícola brasileiro entre 2018 e 2024, associando-os a variáveis meteorológicas e sociais, com o intuito de identificar grupos de maior vulnerabilidade térmica.

Este período de análise é particularmente relevante, pois compreende anos de aumento significativo da temperatura média em diversas regiões do país, com recordes históricos de calor, além de mudanças estruturais importantes na legislação trabalhista, nos padrões de cultivo e na expansão do agronegócio (VIOLA; MENDES, 2022; ALMEIDA *et al.*, 2023; FERRARI *et al.*, 2023).

Este estudo tem como objetivo identificar padrões e categorias de riscos ocupacionais relacionados ao estresse térmico em acidentes de trabalho no setor agrícola brasileiro, por meio da aplicação de técnicas de clusterização em dados da Comunicação de Acidentes de Trabalho (CAT) e variáveis meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), no período de junho de 2018 a junho de 2024. Para tal, os objetivos específicos da pesquisa são:

- Aplicar a técnica de clusterização K-Protótipos;
- Interpretar os clusters gerados, destacando os perfis de risco térmico e suas implicações para a saúde e segurança do trabalhador rural.

2.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.2.1 SAÚDE E SEGURANÇA DO TRABALHO

Os acidentes de trabalho continuam a ser um desafio persistente, mesmo em meio aos avanços tecnológicos e às políticas de segurança implementadas nas últimas décadas. No contexto brasileiro, a ocorrência frequente de acidentes e doenças ocupacionais reflete não apenas falhas na adoção de medidas preventivas, mas também a necessidade de maior conscientização e valorização da saúde do trabalhador (FILGUEIRAS, 2015; SILVA, 2018). Estudos mais recentes, como o de Moraes *et al.* (2021), apontam que as falhas na gestão de riscos e a carência de cultura preventiva em muitos setores continuam a ser fatores determinantes para a elevada taxa de acidentes no país.

A SST tornou-se uma área primordial para assegurar os direitos dos trabalhadores, minimizando os riscos presentes no ambiente ocupacional (ILO, 2020). Essa discussão é especialmente relevante em países em desenvolvimento, onde as políticas nacionais de SST ainda enfrentam desafios estruturais para implementação efetiva. Conforme ressalta Kawakami (2025), o fortalecimento dos programas nacionais de segurança e saúde ocupacional na Ásia e em outras regiões em desenvolvimento exige integração intersetorial, ampliação da fiscalização e investimento em capacitação técnica dos trabalhadores.

Com o avanço das inovações tecnológicas e a capacidade ampliada de processamento de dados para monitorar e prevenir riscos, torna-se cada vez mais importante adotar práticas que integrem a saúde e o bem-estar dos trabalhadores como parte da estratégia organizacional (JÚNIOR *et al.*, 2025; SCANDELA, 2025). Nesse contexto, a valorização da qualidade de vida no trabalho é essencial, reconhecendo que ambientes saudáveis e seguros não apenas evitam acidentes, mas também melhoram o desempenho e engajamento dos funcionários (ALMEIDA; NASCIMENTO; NUNES, 2018).

A área de Saúde e Segurança do Trabalho tem como principal objetivo assegurar a integridade física e mental do trabalhador, por meio de um conjunto de normas e procedimentos legalmente exigidos às organizações e aos operadores, visando a prevenção de acidentes e doenças ocupacionais (MUTLU; ALTUNTAS, 2019).

A relevância desse conjunto normativo é ainda mais evidente no contexto do trabalho agrícola, em que os riscos ocupacionais estão associados à exposição direta a agentes físicos, químicos e biológicos. Estudos recentes reforçam a importância da alfabetização em segurança

e saúde no campo, destacando que o baixo nível de conhecimento sobre riscos e práticas preventivas entre agricultores aumenta a vulnerabilidade a acidentes (LEE; PARK, 2025).

Conforme a legislação previdenciária brasileira, considera-se acidente de trabalho aquele que ocorre no exercício das atividades laborais a serviço da empresa, resultando em lesão corporal ou perturbação funcional capaz de provocar a morte, ou a perda ou redução, permanente ou temporária, da capacidade para o trabalho. Esses acidentes são classificados em três categorias: acidente típico, acidente de trajeto e doença ocupacional. O acidente típico ocorre durante a execução das atividades laborais; o de trajeto refere-se ao ocorrido no percurso entre a residência e o local de trabalho, ou vice-versa; já a doença do trabalho decorre das condições específicas do exercício profissional, sendo consequência da exposição a ambientes insalubres ou atividades nocivas à saúde (CAVALCANTE *et al.*, 2015). Dados atualizados do Ministério do Trabalho e Emprego (MTE, 2023) apontam que os setores com maior incidência de notificações continuam sendo a construção civil, a agropecuária e a indústria de transformação, segmentos nos quais os riscos ocupacionais se mantêm elevados devido à natureza das atividades desempenhadas.

Acidentes de trabalho constituem um importante problema de saúde pública no Brasil. Além dos impactos físicos, esses eventos geram consequências emocionais e psicossociais significativas, afetando tanto o trabalhador quanto seu entorno. Em casos mais graves, os acidentes podem resultar em óbito, ampliando ainda mais as repercussões sociais e econômicas associadas (BORDIGNON, 2009; SCHAEFER; LOBO; KRISTESEN, 2012).

Segundo estudo de Ferrari *et al.* (2023), a associação entre estressores ambientais, como calor extremo, e a ocorrência de acidentes amplia o escopo das intervenções necessárias, exigindo ações multidimensionais que integrem saúde pública, meio ambiente e segurança ocupacional.

Os acidentes de trabalho impactam não apenas os empregados, mas também geram prejuízos significativos para os empregadores e a sociedade. Esses eventos resultam em custos elevados para os cofres públicos, envolvendo o custeio de auxílios previdenciários, aposentadorias por invalidez e pensões destinadas às famílias dos trabalhadores que faleceram em decorrência desses acidentes (CARVALHO *et al.*, 2020).

Conforme a legislação vigente de Segurança e Medicina do Trabalho, é obrigatório notificar todo acidente de trabalho, independentemente de ter resultado em afastamento do trabalhador (SCHAEFER; LOBO; KRISTESEN, 2012). Essa notificação é essencial para criar um registro oficial, permitindo não apenas o controle e a prevenção de futuros acidentes, mas também o monitoramento da saúde e segurança dos trabalhadores. Por meio desses registros,

órgãos competentes conseguem identificar situações de risco, acompanhar a frequência e gravidade dos acidentes e desenvolver estratégias de intervenção mais eficazes para minimizar ocorrências. A notificação desses incidentes é de grande importância para o controle dos acidentes ocupacionais e proteção à saúde do trabalhador (RODRIGUES *et al.*, 2015). Recentemente, o relatório da Organização Internacional do Trabalho (OIT, 2022) reforçou que o fortalecimento de sistemas de notificação e a digitalização dos registros são estratégias-chave para avançar na prevenção de riscos laborais em países em desenvolvimento.

Para estabelecer parâmetros que orientem as práticas de segurança nas instituições, o Ministério do Trabalho instituiu as Normas Regulamentadoras (NR) por meio da Portaria nº 3.214, de 8 de junho de 1978 (BRASIL, 1978). Essas normas complementam o capítulo V da Consolidação das Leis do Trabalho (CLT) e são de observância obrigatória para todas as organizações, tanto públicas quanto privadas, incluindo órgãos dos poderes Legislativo, Judiciário e Ministério Público, desde que possuam empregados regidos pela CLT (BRASIL, 2020).

Adicionalmente, a Lei nº 8.213, de 24 de julho de 1991, determina que o empregador deve comunicar qualquer acidente de trabalho ao INSS até o primeiro dia útil após o evento. Em caso de óbito, a notificação deve ser feita imediatamente a uma autoridade competente (BRASIL, 1991).

Um dos instrumentos e fontes de dados para compor indicadores relacionados à situação de trabalho é a Comunicação de Acidentes de Trabalho (CAT), sendo a ferramenta oficial de registro de acidente de trabalho no Brasil, reconhecida pelo Instituto Nacional do Seguro Social (INSS). Os dados emitidos pela CAT são agrupados e disponibilizados na Empresa de Processamento de Dados da Previdência Social (Dataprev), com abrangência nacional e de acesso público (REIS *et al.*, 2020).

No Brasil, embora existam diversos estudos voltados para a análise de acidentes de trabalho, a investigação específica sobre o óbito de empregadores é escassa. A maioria das pesquisas e registros concentra-se nos acidentes envolvendo trabalhadores segurados, o que limita o entendimento das condições e riscos enfrentados por empregadores, especialmente em setores de maior exposição a acidentes (SANTANA; NOBRE; WALDVOGEL, 2005; BATISTA, 2016). De acordo com o Observatório de Segurança e Saúde no Trabalho (2024), os registros envolvendo empregadores permanecem subnotificados, o que dificulta a elaboração de políticas públicas que contemplem a totalidade das vítimas de acidentes laborais no país.

2.2.2 SAÚDE E SEGURANÇA DO TRABALHO NA AGRICULTURA

O Brasil consolidou-se como um dos principais pólos agrícolas globais, com a agropecuária brasileira ocupando uma posição de destaque no cenário internacional, impulsionada por sua elevada capacidade produtiva, que permitem a expansão constante do setor (SANTOS *et al.*, 2021). O Produto Interno Bruto (PIB) do agronegócio brasileiro, calculado pelo Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (Cepea) da Esalq/USP, em parceria com a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA), representou 23,2% do PIB nacional em 2024 (CNA, 2025). Considerando o desempenho acumulado ao longo do ano, o setor alcançou R\$ 2,58 trilhões, com R\$ 1,84 trilhão proveniente da agricultura e R\$ 744 bilhões da pecuária (CNA, 2025).

O agronegócio brasileiro, embora essencial para a economia e responsável por uma grande parcela do emprego no país, traz consigo desafios significativos em relação à saúde e segurança dos trabalhadores. As condições de trabalho no campo muitas vezes expõem esses profissionais a longas jornadas e às adversidades climáticas, além de um conjunto de riscos ocupacionais específicos (MELLER; REOLON-COSTA; CEOLIN, 2021; SANTOS *et al.*, 2021; BENTES; TEIXEIRA; COLUCCI, 2023).

O agronegócio, sendo um dos setores com maior número de trabalhadores, apresenta altos índices de acidentes e doenças ocupacionais, principalmente devido à falta de treinamento adequado e às condições de trabalho adversas (SANTOS *et al.*, 2021). No setor agrícola, essas dificuldades são ainda mais intensas, pois a atividade é caracterizada por ser uma das mais penosas e exigentes, com jornadas árduas, ausência de postos de trabalho fixos e a necessidade de realizar tarefas variadas e fisicamente demandantes (IIDA; GUIMARÃES, 2016).

O avanço tecnológico trouxe ao campo novas técnicas e equipamentos agrícolas que, embora tenham elevado a produtividade, também introduziram diferentes tipos de riscos e acidentes. A mecanização e o uso intensivo de defensivos agrícolas, por exemplo, exigem conhecimentos e habilidades específicas para um manuseio seguro, competências que muitos trabalhadores rurais ainda não possuem (SIMON, *et al.*, 2022; BENTES; TEIXEIRA; COLUCCI, 2023).

De acordo com o Anuário Estatístico de Acidentes do Trabalho (AEAT), o Brasil registrou aproximadamente 576.951 acidentes de trabalho em 2018. Desse total, 16.651 ocorrências, correspondendo a cerca de 2,88%, foram registradas no setor agrícola (BRASIL, 2024).

Os trabalhadores agrícolas frequentemente realizam suas atividades em posturas inadequadas, o que exige um esforço muscular intenso, além de enfrentar condições climáticas adversas, como sol forte, chuva e frio. Muitos acidentes no campo são consequência de uma combinação de fatores ambientais e humanos, como a utilização inadequada de maquinário, condições ergonômicas desfavoráveis, fadiga e problemas psicológicos, que aumentam significativamente os riscos no trabalho rural. A baixa escolaridade, somada à falta de treinamento especializado, torna esses trabalhadores ainda mais vulneráveis (NASCIMENTO *et al.*, 2016, CARVALHO; SANTOS, 2020, SANTOS *et al.*, 2021).

2.2.3 ESTRESSE TÉRMICO

O estresse térmico é uma condição em que o corpo humano enfrenta dificuldades para manter a termorregulação devido à exposição a temperaturas extremas (ROSA; LIMA, 2019). Esse fenômeno pode ser agravado por fatores como a umidade do ar, a velocidade do vento e a radiação solar. Estudos recentes destacam a importância de monitorar essas variáveis para prevenir os efeitos adversos do estresse térmico, especialmente em trabalhadores expostos a ambientes externos (BITENCOURT *et al.*, 2023).

As condições térmicas do ambiente impactam significativamente o trabalho humano (SETTE; RIBEIRO, 2011). O estresse térmico ocupacional compromete a capacidade dos trabalhadores, afetando tanto a saúde quanto a produtividade. Ambientes de trabalho com climas quentes e úmidos, tarefas fisicamente exigentes e/ou o uso de roupas de proteção criam um cenário exaustivo e potencialmente perigoso para os trabalhadores (LUCAS; EPSTEIN; KJELLSTROM, 2014; FLOURIS *et al.*, 2018; FARIA; ANDRADE; OLIVEIRA, 2024).

Trabalhadores agrícolas frequentemente enfrentam condições climáticas adversas por longos períodos (HAMED *et al.*, 2018). Os riscos à saúde associados ao aumento do calor incluem exposição a produtos químicos perigosos e outras doenças transmitidas por vetores. Além disso, diversos fatores representam riscos adicionais (fatores individuais, organizacionais e ambientais) que aumentam a suscetibilidade dos trabalhadores aos perigos ocupacionais relacionados ao clima. Devido ao aquecimento dos ambientes de trabalho, é necessário dar mais atenção ao bem-estar e desempenho dos trabalhadores, considerando também o estresse psicossocial, a queda de produtividade, as longas jornadas de trabalho, o aumento dos custos de produção, acidentes, lesões, absenteísmo, presenteísmo e aumento nos pedidos de prêmios de seguro (HABIBI *et al.*, 2021; ANSAH *et al.*, 2021).

O estudo de Ferrari *et al.* (2025) amplia a discussão ao analisar mais de 400 mil registros de acidentes de trabalho no Brasil, correlacionando-os a oito índices distintos de estresse térmico. Os resultados revelaram padrões consistentes de associação entre temperaturas elevadas e aumento do risco de acidentes, especialmente nas regiões Norte e Nordeste. A pesquisa também indica que o estresse térmico não deve ser tratado como variável isolada, mas como um fenômeno multifatorial que interage com vulnerabilidades socioeconômicas e características ocupacionais, como baixa escolaridade e informalidade laboral. Esses achados corroboram a urgência de incorporar variáveis climáticas às políticas públicas de segurança do trabalho e reforçam a necessidade de atualização das Normas Regulamentadoras brasileiras diante do avanço das mudanças climáticas.

O estresse térmico é um fator crítico que afeta diretamente a segurança dos trabalhadores no setor agrícola. A exposição prolongada a altas temperaturas e condições climáticas extremas pode resultar em uma série de consequências adversas para a saúde dos trabalhadores, aumentando o risco de acidentes. Entre os principais efeitos do estresse térmico, destacam-se a desidratação, a exaustão e a diminuição da capacidade de concentração, que são essenciais para a execução de tarefas (GUBERNOT; ANDERSON; HUNTING, 2015; WANG *et al.*, 2019; YEOMAN *et al.*, 2022).

O estresse térmico não apenas afeta a saúde física dos trabalhadores, mas também tem um impacto significativo em suas capacidades cognitivas. Os trabalhadores expostos a condições extremas demonstram uma diminuição na atenção e na capacidade de tomar decisões, aumentando a probabilidade de erros operacionais. A fadiga induzida pelo calor, aliada à falta de hidratação, pode levar a lapsos de atenção que resultam em acidentes graves, como quedas ou lesões por ferramentas e equipamentos. A combinação de condições climáticas adversas e a necessidade de executar tarefas fisicamente exigentes torna os trabalhadores mais suscetíveis a esses riscos (LIU; TIAN; TAO, 2022; SHARMA *et al.*, 2022).

Além de compreender os impactos do estresse térmico sobre a saúde e a segurança dos trabalhadores, é fundamental utilizar instrumentos que possibilitem o monitoramento e a avaliação desse fenômeno nos ambientes de trabalho. Para isso, diversos índices de estresse térmico foram desenvolvidos com o objetivo de estimar o grau de desconforto térmico e subsidiar ações de prevenção nos diferentes contextos ocupacionais (FUNDACENTRO, 2017; ISO, 2017; ROTHFUSZ, 1990; OLIVEIRA *et al.*, 2018).

O **Quadro 1** apresenta uma síntese dos principais índices utilizados para a avaliação do estresse térmico e suas aplicações.

Quadro 1 – Principais índices de estresse térmico

Índice	Aplicação
Índice de Bulbo Úmido e Termômetro de Globo (IBUTG / WBGT)	Muito utilizado em ambientes ocupacionais (internos e externos); recomendado pela ISO 7243 e pela NR-15 no Brasil (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2017; BRASIL, 2020).
Índice de Tensão Térmica (<i>Heat Stress Index</i> - HSI)	Avaliação do balanço térmico; exige cálculos mais complexos e detalhados. Mais utilizado em ambientes controlados ou estudos científicos (BELDING, H. S.; HATCH, T. F., 1955).
Índice de Desconforto Térmico (DI - <i>Discomfort Index</i>)	Aplicado em estudos ambientais e de conforto térmico, menos preciso para ambientes ocupacionais extremos (THOM, E. C., 1959).
Índice de Tensão Fisiológica (PSI - <i>Physiological Strain Index</i>)	Avaliação da resposta fisiológica direta do corpo ao calor. Muito usado em pesquisas com monitoramento em tempo real (MORAN, D. S. <i>et al.</i> , 1998).
Temperatura Equivalente (ET - <i>Effective Temperature</i>)	Usado para avaliar conforto térmico em ambientes internos climatizados (HOUGHTEN, F. C.; YAGLOU, C. P., 1923).

Fonte: Autoria própria (2025)

As diretrizes relativas à exposição ocupacional ao calor, especialmente no setor agrícola e em atividades correlatas, estão regulamentadas pela Norma Regulamentadora nº 31 (NR-31) e seu Anexo 31.15, bem como pela NR-15, Anexo 3. Esta última define os limites de tolerância à exposição ao calor com base no Índice de Bulbo Úmido Termômetro de Globo (IBUTG), que considera a temperatura do ar, a umidade relativa e a radiação térmica. Os limites de tolerância variam conforme a intensidade da atividade física: 30,0 °C para trabalho leve, 26,7 °C para trabalho moderado e 25,0 °C para trabalho pesado (BRASIL, 2025a; BRASIL, 2025b).

A NR-31, por sua vez, estabelece que os empregadores devem assegurar condições térmicas adequadas ao desempenho das atividades laborais, considerando tanto o tipo de atividade quanto as variações climáticas do ambiente. Essas normas visam prevenir agravos à saúde decorrentes da exposição ao calor excessivo, especialmente em setores com predominância de atividades realizadas ao ar livre (BRASIL, 2025a; BRASIL, 2025b).

Para avaliar o risco de estresse térmico, este estudo aplicou o cálculo do IBUTG com base na metodologia proposta por Bitencourt, Maia e Roscani (2020), que define as equações: uma para ambientes externos e outra para ambientes internos ou sombreados.

As equações aplicadas para o cálculo do IBUTG são:

1. **IBUTG Externo:**

$$IBUTG = (0,7 * T_n) + (0,1 * T) + (0,2 * T_g)$$

2. **IBUTG Interno:**

$$IBUTG = (0,7 * T_n) + (0,3 * T_g)$$

onde:

- T_n (°C) representa a temperatura de bulbo úmido natural, calculada pela Equação 3;
- T (°C) é a temperatura do ar, obtida diretamente dos dados meteorológicos;
- T_g (°C) é a temperatura de globo, calculada pela Equação 4.

As equações para determinar T_n e T_g são as seguintes:

3. **Temperatura de Bulbo Úmido Natural (T_n):**

$$T_n = (0,57175 * T_p) + (0,19447 * T) - (0,26523 * V) - (0,05134 * UR) + 10,44966$$

4. **Temperatura de Globo (T_g):**

$$T_g = (1,374385 * T) + (0,083627 * UR) - (1,021632 * V)$$

onde:

- T_p (°C) é a temperatura do ponto de orvalho,
- V (m/s) é a velocidade do vento, e
- UR (%) é a umidade relativa do ar.

Essa abordagem permite estimar de forma mais acurada as condições de exposição ao calor nas atividades agrícolas, conforme também recomendado por Bitencourt, Ruas e Maia (2012) e Ferrari (2022).

2.2.4 MINERAÇÃO DE DADOS

Devido aos avanços das tecnologias computacionais, houve um crescimento exponencial na quantidade de dados gerados e armazenados, não se limitando à internet. De forma geral, as empresas também ampliaram significativamente suas bases de dados (FERRARI; SILVA, 2017). Dentre as novas tecnologias desenvolvidas para auxiliar a extração de informações dessas bases de dados, destacam-se o *Knowledge Discovery in Database* (KDD) e a *Data Mining* (DM) (ZHAO *et al.*, 2020).

O KDD envolve uma sequência de etapas para identificação de padrões compreensíveis, válidos, novos e potencialmente úteis a partir de grandes conjuntos de dados (FAYYAD *et al.*, 1996; FAYYAD *et al.*, 2002; LIU *et al.*, 2019). No processo de KDD, a mineração de dados é considerada o núcleo de processo de descoberta de conhecimento, pois consiste na aplicação de análise de dados e algoritmos de descobrimento que produzem uma enumeração de padrões ou modelos sobre os dados (FAYYAD *et al.*, 1996).

O desenvolvimento das técnicas de Mineração de Dados está ligado ao campo de Aprendizado de Máquina (*Machine Learning*), que tem como objetivo criar algoritmos capazes de identificar padrões complexos e realizar previsões com base em grandes volumes de dados. O processo de Aprendizado de Máquina pode ser classificado em aprendizado supervisionado ou aprendizado não supervisionado (ZHAO *et al.*, 2020).

A aprendizagem supervisionada se baseia em dados preparados para treinamento quando se sabe o desfecho de cada registro do conjunto de dados (FERNANDES; CHIAVEGATTO FILHO, 2019). Já na aprendizagem não supervisionada, os algoritmos buscam padrões em registros com características similares, comparando os valores de seus atributos, mas sem a presença de uma variável resposta supervisionada (FERNANDES; CHIAVEGATTO FILHO, 2019; JIANG; GRADUS; ROSELLINI, 2020).

A Mineração de Dados é frequentemente classificada pela sua capacidade em efetuar determinadas tarefas (LAROSE, 2005). A tarefa de **classificação** refere-se a um aprendizado supervisionado, consistindo em examinar as características dentre várias classes previamente definidas, qual classe um determinado dado se enquadra (CAMILO; SILVA, 2009; GONZALEZ; FIACCHINI; IAGNEMMA, 2018). Assim como a classificação, a regressão também é considerada uma aprendizagem supervisionada. A técnica de **regressão** é considerada quando o resultado e todos os atributos são numéricos, sendo muito utilizado para prever valores, entender relações entre variáveis, e auxiliar na tomada de decisões informadas (JIANG; GRADUS; ROSELLINI, 2020).

Agrupamento é um aprendizado não-supervisionado, necessitando de classes ou valores previamente categorizados. O **agrupamento** (*clustering*) são algoritmos usados para dividir um conjunto de dados em grupos que possuem registros semelhantes, construção de conjuntos de dados com base nas similaridades, de forma que os grupos obtidos sejam os mais homogêneos e bem separados possíveis (CASTRO, 2003; CAMILO; SILVA, 2009; HOOD; CRACKNELL; GAZLEY, 2018).

2.2.5 CLUSTERIZAÇÃO

A tarefa de clusterização, ou agrupamento, consiste em organizar um conjunto de dados em grupos de elementos semelhantes. Um *cluster* é formado por um conjunto de amostras que possuem características em comum, sendo diferentes de elementos em outros *clusters*. Ao contrário de modelos de classificação que requerem uma variável alvo, a clusterização é um método exploratório que permite agrupar dados sem a necessidade de uma referência específica, criando segmentos com maior semelhança interna e menor similaridade externa (LAROSE, 2014; SANTOS, 2020).

A análise de *clusters* é uma das atividades mais importantes na análise de dados, pois facilita a categorização de objetos em grupos significativos e úteis. Os algoritmos de clusterização particionam os dados em um número determinado de clusters, onde cada grupo representa um subconjunto de dados com características similares. Apesar de não haver uma definição universal de "*cluster*", ele é geralmente descrito pela homogeneidade interna e separação externa, ou seja, os objetos dentro de um cluster devem ser semelhantes entre si, mas diferentes de objetos em clusters distintos (JAIN; DUBES, 1988; GORDON, 1999; OLIVEIRA, 2018).

Os métodos de clusterização podem ser categorizados como métodos de particionamento, métodos hierárquicos, métodos baseados em densidade e métodos baseados em grades (CAMILO; SILVA, 2009).

Os métodos de particionamento, como *k-means* e *k-medoids*, organizam os dados em um número fixo de clusters, onde cada objeto pertence exclusivamente a um grupo. Esses métodos são eficazes para dados de pequeno e médio porte com clusters aproximadamente esféricos, mas enfrentam limitações ao lidar com dados de maior escala ou clusters de forma complexa. O objetivo é minimizar a soma das distâncias dos dados ao centro do cluster em um processo iterativo (BLASHFIELD; ALDENDERFER, 1978).

Métodos hierárquicos criam uma estrutura em que os dados são agrupados em diferentes níveis, formando uma hierarquia visualizável em um dendograma. A abordagem aglomerativa começa com cada ponto como um cluster individual e os funde até formar um único grupo, enquanto a divisiva começa com todos os pontos juntos, dividindo-os sucessivamente. Esses métodos são úteis para explorar proximidades em várias escalas, mas podem ser menos eficientes para grandes conjuntos de dados (KAUFMAN; ROUSSEAU, 2009).

Nos métodos de densidade, como o DBSCAN, os clusters são formados com base na densidade de pontos em uma região específica, o que permite a formação de clusters com formas arbitrárias. Esse método é eficaz para lidar com ruídos, pois exclui pontos que não atendem ao critério de densidade, sendo ideal para dados complexos e distribuídos de forma não uniforme (KRIEGER *et al.*, 2011).

Por fim, os métodos baseados em grades dividem o espaço de dados em células, agrupando os pontos de acordo com sua localização em uma estrutura de grade. Essa abordagem permite uma análise em várias resoluções e é eficiente para grandes volumes de dados, pois o processamento depende do número de células, não das observações (XU; TIAN, 2015).

2.2.6 TESTES ESTATÍSTICOS

Testes paramétricos assumem que os dados seguem uma distribuição normal e que as variâncias entre os grupos são homogêneas. Antes de aplicar esses testes, é comum realizar verificações dessas premissas. O teste de *Shapiro-Wilk*, por exemplo, é amplamente utilizado para avaliar a normalidade dos dados, especialmente em amostras pequenas a moderadas (SHAPIRO; WILK, 1965). Já o teste de Levene é aplicado para testar a homogeneidade de variâncias entre dois ou mais grupos (LEVENE, 1960).

Quando essas suposições são violadas, opta-se por testes não paramétricos, que não exigem distribuição normal dos dados. Um exemplo é o teste de *Kruskal-Wallis*, uma alternativa ao teste ANOVA, apropriado para comparar mais de dois grupos independentes com dados ordinais ou não normalmente distribuídos (KRUSKAL; WALLIS, 1952). Em casos onde o teste indica diferenças significativas, procedimentos *post hoc* como o teste de *Dunn* com correção de *Bonferroni* são empregados para identificar os pares de grupos que diferem estatisticamente (DUNN, 1964).

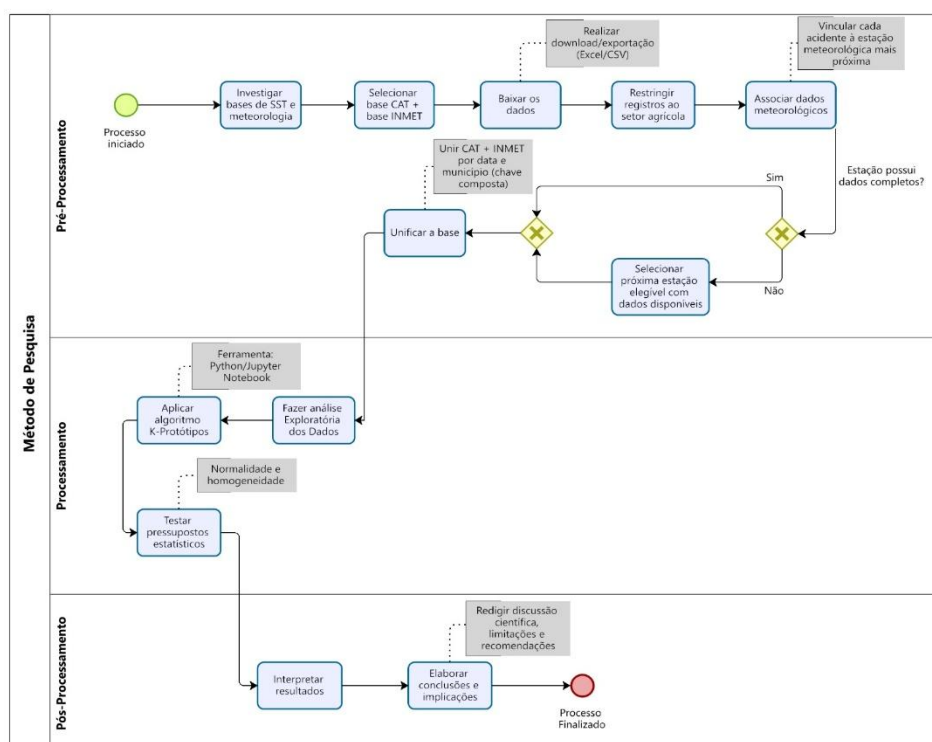
Para variáveis categóricas, o teste do Qui-quadrado de *Pearson* é um dos métodos mais utilizados para avaliar a associação entre categorias, por meio da comparação entre frequências observadas e esperadas em tabelas de contingência (AGRESTI, 2007). No entanto, quando as

frequências esperadas em alguma célula da tabela são muito baixas, alternativas como o Teste Exato de Fisher são preferíveis, especialmente para tabelas 2x2 (FISHER, 1922). Para tabelas com múltiplas categorias e contagens esparsas, pode-se utilizar o Qui-quadrado com correção de Monte Carlo, aumentando a precisão do resultado (MEHTA; PATEL, 1996).

2.3 MÉTODO DE PESQUISA

A abordagem metodológica adotada neste estudo foi fundamentada no modelo de *Knowledge Discovery in Databases* (KDD), proposto por Fayyad *et al.* (1996), com foco nas etapas de mineração e análise interpretativa dos dados. A escolha por esse modelo se justifica pela sua estrutura sistemática e robusta, que permite transformar grandes volumes de dados brutos em conhecimento útil e interpretável. Inicialmente, procedeu-se à identificação e integração de duas fontes principais de dados nacionais, uma fonte referente à saúde e segurança do trabalho (SST) e outra contendo informações meteorológicas. A seleção considerou critérios como abrangência territorial e compatibilidade temporal. Após a coleta, as bases passaram por um processo de tratamento e cruzamento, com o objetivo de permitir análises exploratórias voltadas à identificação de possíveis correlações entre fatores climáticos e a ocorrência de acidentes laborais. A Figura 1 apresenta a representação esquemática da metodologia adotada no estudo.

Figura 1 – Método de pesquisa



Fonte: Autoria própria (2025)

Inicialmente, foram realizadas consultas em diferentes órgãos federativos com dados sobre SST, visando identificar e selecionar as bases de dados mais adequadas. Fontes como o Instituto Nacional do Seguro Social (INSS), que mantém registros de Comunicação de Acidente de Trabalho (CAT), e o Ministério Público do Trabalho (MPT), responsável pelo Observatório de Saúde e Segurança no Trabalho, foram exploradas para avaliação da qualidade, consistência, abrangência e disponibilidade dos dados em nível nacional e temporal. Durante esta etapa, foram encontradas algumas limitações, como lacunas regionais, dificuldade de acesso a downloads completos e inconsistências entre fontes. Após esta análise, selecionou-se a base de dados CAT pela sua cobertura nacional, detalhamento dos dados e facilidade de acesso.

A coleta de dados foi realizada virtualmente, sendo exportada em formato de planilha Excel para processamento subsequente. A etapa de pré-processamento incluiu a remoção de valores ausentes, além de um filtro para restringir a análise ao setor agrícola.

Em seguida, as duas bases de dados foram então integradas, associando os registros de acidentes de trabalho aos dados meteorológicos da estação automática mais próxima de cada ocorrência, resultando em uma base unificada para análise. Durante esse processo, identificou-se que diversas estações não apresentavam registros completos para todas as variáveis e datas dentro do período estudado. As lacunas envolviam a ausência de informações essenciais, como temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento, justamente nas datas dos acidentes. Para contornar essa limitação, cada ocorrência foi vinculada à estação meteorológica mais próxima com dados disponíveis, assegurando a presença das variáveis necessárias ao cálculo do Índice de Bulbo Úmido - Termômetro de Globo (IBUTG).

Após o tratamento inicial dos dados, procedeu-se à integração das bases por meio de uma chave composta, considerando a data do acidente e o município correspondente. Com isso, foi possível vincular cada registro da base da CAT aos dados meteorológicos provenientes do INMET. Para os casos em que não havia dados climáticos disponíveis no município do evento, adotou-se a estratégia de utilizar a estação meteorológica automática mais próxima, assegurando a cobertura climática de todos os registros. Essa associação resultou em uma base integrada, que permitiu investigar as condições térmicas presentes no momento de cada acidente de trabalho.

Com a base integrada consolidada, foi aplicada a técnica de *clusterização K-Protótipos*, desenvolvida por Huang (1998), indicada para dados que combinam variáveis categóricas e numéricas. A metodologia mescla a distância euclidiana, típica do *K-Means*, para dados

contínuos, com a métrica de dissimilaridade utilizada no *K-Modes* para variáveis qualitativas, baseada em coincidência de categorias. Essa combinação possibilitou uma segmentação mais adequada às características heterogêneas da base analisada. A aplicação do algoritmo foi realizada utilizando *Python*, em ambiente *Jupyter Notebook*.

Concluído o processo de agrupamento, foram conduzidas análises estatísticas para investigar a diferença nos níveis de exposição ao estresse térmico entre os clusters formados. Primeiramente, aplicou-se o teste de *Shapiro-Wilk* para verificação da normalidade das variáveis IBUTG Interno e Externo. Em sequência, utilizou-se o teste de *Levene* para avaliar a homogeneidade das variâncias entre os grupos. Diante da rejeição das premissas de normalidade e homogeneidade ($p < 0,05$), optou-se pelo uso de testes não paramétricos.

Para comparar os níveis de estresse térmico entre os grupos, foi empregado o teste de *Kruskal-Wallis*. Na presença de diferenças estatisticamente significativas, realizou-se o teste de *Dunn* com ajuste de *Bonferroni* como análise *Post Hoc*, permitindo identificar entre quais pares de clusters as diferenças se mantinham significativas. As análises estatísticas foram realizadas em ambiente *Python*, com apoio das bibliotecas *scipy* e *scikit-posthocs*.

Adicionalmente, buscou-se avaliar se as variáveis categóricas apresentavam associações relevantes com os agrupamentos formados. Para isso, foram elaboradas tabelas de contingência entre os clusters e as categorias de cada variável. Quando as frequências esperadas em células da tabela eram inferiores a 5 em variáveis dicotômicas, adotou-se o Teste Exato de Fisher. Para variáveis com múltiplas categorias e contagens reduzidas, foi utilizado o teste do Qui-quadrado com correção de Monte Carlo, enquanto nas demais situações aplicou-se o teste do Qui-quadrado de Pearson.

Foram analisadas as seguintes variáveis categóricas: órgão emissor da CAT, tipo do acidente, sexo, parte do corpo atingida, natureza da lesão, ocorrência de óbito, agente causador do acidente, região geográfica e faixa etária do trabalhador. Considerou-se nível de significância estatística para $p < 0,05$. A Figura 1 apresenta a representação esquemática da metodologia adotada no estudo.

2.3.1 INVESTIGAÇÃO DAS BASES DE DADOS

Foram selecionadas duas bases de dados nacionais: uma sobre saúde e segurança ocupacional dos trabalhadores e outra com informações meteorológicas. Ambas possuem registros diários, abrangem o mesmo período e cobrem todo o território brasileiro. Essas bases foram tratadas e

integradas para aplicar técnicas de mineração de dados e identificar correlação entre as variáveis de acidentes de trabalho e condições climáticas.

Inicialmente, foram selecionadas as bases de dados relacionadas à SST, detalhando-se o processo de extração, as variáveis e suas características. Em seguida, foram selecionados os dados meteorológicos, abordando o processo de escolha e tratamento, assim como o cálculo do Índice de Bulbo Úmido - Temperatura de Globo (IBUTG) para avaliar os níveis de estresse térmico. Após a etapa de preparação, as bases foram integradas, permitindo que os registros climáticos fossem associados aos acidentes de trabalho.

2.3.1.1 BASE DE SEGURANÇA E SAÚDE DO TRABALHO

O conjunto de dados utilizado nesta pesquisa foi obtido a partir dos dados abertos disponibilizados pela Empresa de Tecnologia e Informações da Previdência (DATAPREV), vinculada ao Ministério da Economia do Brasil. Entre os conjuntos acessíveis ao público, foram selecionados especificamente os dados relativos aos acidentes registrados por meio da Comunicação de Acidente de Trabalho (CAT).

A base CAT é responsável pelo registro de doenças ocupacionais e acidentes de trabalho no Brasil. Ela é um instrumento utilizado não apenas pelo empregador, mas também por outros órgãos além do INSS para comunicar acidentes de trabalho, acidentes de trajeto e doenças relacionadas ao trabalho. Em caso de não cumprimento dessa obrigação pela empresa, o registro da CAT pode ser feito pela própria pessoa acidentada, seus dependentes, entidades sindicais, médicos ou autoridades públicas.

Essa base de dados abrange registros de todos os estados brasileiros e, até julho de 2022, era atualizada trimestralmente; a partir dessa data, passou a ser disponibilizada mensalmente no formato CSV (*Comma-Separated Values*). O registro mais antigo acessível é de junho de 2018. Para esta pesquisa, foram utilizados os dados da CAT no período de junho de 2018 a junho de 2024.

2.3.1.2 BASE METEOROLÓGICA

No Brasil, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) administra mais de 750 estações meteorológicas, distribuídas entre seis Distritos de Meteorologia, cobrindo todo o território nacional. As estações automáticas realizam coletas de dados meteorológicos a cada hora, enquanto as estações convencionais registram dados três vezes ao dia. Os dados

coletados são inicialmente recebidos e processados nos distritos meteorológicos, sendo posteriormente enviados para a sede do INMET em Brasília-DF, onde são armazenados em um banco de dados oficial, processados e integrados, além de transmitidos via satélite para uso internacional.

O INMET oferece um portal de acesso ao banco de dados meteorológicos, onde o usuário pode informar seu e-mail para receber os arquivos e escolher as especificidades dos dados desejados — incluindo a frequência (horária, diária ou mensal), o tipo de estação (Automática ou Convencional), a abrangência (nacional ou por estado), o período e as variáveis meteorológicas necessárias. Após o preenchimento das informações, o usuário recebe um e-mail de confirmação com instruções adicionais para o download dos dados em formato CSV.

As variáveis climáticas disponíveis incluem:

- Precipitação total (horária);
- Pressão atmosférica ao nível da estação (horária);
- Pressão atmosférica reduzida ao nível do mar;
- Pressão atmosférica máxima e mínima da hora anterior, radiação global;
- Temperatura do ar (bulbo seco, horária);
- Temperatura do ponto de orvalho;
- Temperaturas máxima e mínima da hora anterior;
- Tensão da bateria da estação;
- Umidade relativa máxima e mínima da hora anterior;
- Umidade relativa do ar (horária);
- Vento (direção, rajada máxima e velocidade horária).

Para este estudo, foram selecionados dados horários de todas as Estações Meteorológicas Automáticas, abrangendo o mesmo período da base de dados de acidentes de trabalho, ou seja, de junho de 2018 a junho de 2024, incluindo todas as variáveis climáticas mencionadas. Os dados foram enviados por e-mail e disponibilizados em planilhas para análise.

Algumas estações meteorológicas não possuem registros para todos os dias do período analisado e, além disso, certas variáveis apresentam lacunas em alguns intervalos. Essas limitações dificultaram a criação de uma base de dados completa, tornando necessário localizar

a estação meteorológica mais próxima para cada ocorrência de acidente de trabalho e garantir que os dados dessa estação estivessem disponíveis para a data do evento.

Com as variáveis climáticas coletadas das estações, foi realizado o cálculo do Índice de Bulbo Úmido - Termômetro de Globo (IBUTG), utilizado para avaliar o risco de exposição ao estresse térmico ao qual o trabalhador pode estar sujeito (BITENCOURT, RUAS; MAIA, 2012; FERRARI, 2022). Para esse cálculo, foi adotada a metodologia proposta por Bitencourt, Maia e Roscani (2020), que apresenta duas fórmulas: uma para atividades ao ar livre e outra para atividades em ambientes internos ou sob sombra. Em ambos os casos, os valores de temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento foram extraídos da base de dados meteorológicos.

2.3.2 COLETA E PRÉ-PROCESSAMENTO

Os dados analisados foram extraídos do Portal Brasileiro de Dados Abertos, que disponibiliza informações da Comunicação de Acidente de Trabalho (CAT). Esse conjunto de dados inclui registros de óbitos, acidentes e doenças ocupacionais. Nos arquivos da CAT de julho de 2018 a dezembro de 2020, há 25 atributos disponíveis (APÊNDICE A), enquanto os arquivos de janeiro de 2021 a junho de 2024 contêm 24 atributos (APÊNDICE B). Aplicando o filtro para a CNAE Seção A – que abrange agricultura, pecuária, produção florestal, pesca e aquicultura – obteve-se um total de 85.911 registros de acidentes de trabalho.

Para melhorar a clareza dos dados e focar nas informações mais relevantes, foi realizado um processo de tratamento nos registros de acidentes. Os dados foram importados de planilhas em Excel para o *Power Query*, onde se procedeu a uma seleção criteriosa de variáveis e valores significativos para o estudo. Um resumo dos atributos selecionados para a pesquisa é apresentado no Quadro 2, assim como sua descrição.

Quadro 2 – Caracterização dos atributos do conjunto de dados

Atributo	Descrição	Valores
Idade	Idade inteira do trabalhador até a data do acidente	{15 a 91}
Sexo	Gênero do trabalhador	{Feminino, Masculino}
IBUTG Externo	Índice de Bulbo Úmido - Termômetro de Globo Externo	{4,85 a 36,23}
IBUTG Interno	Índice de Bulbo Úmido - Termômetro de Globo Interno	{4,21 a 38,09}

UF empregador	Unidade Federativa de inscrição do empregador	{26 estados e Distrito Federal}
Tipo de acidente	Classificação do acidente	{Típico, Trajeto ou Doença}
Agente causador	Agente (podendo ser objeto, substância ou ambiente) que provocou o acidente	{273 categorias}
Parte de corpo atingida	Região no corpo do trabalhador atingida pelo acidente	{41 categorias}
Natureza da lesão	Identificação da lesão segundo suas características principais	{28 categorias}
Óbito	Indica morte do trabalhador relacionado ao acidente ou doença	{Sim, Não}

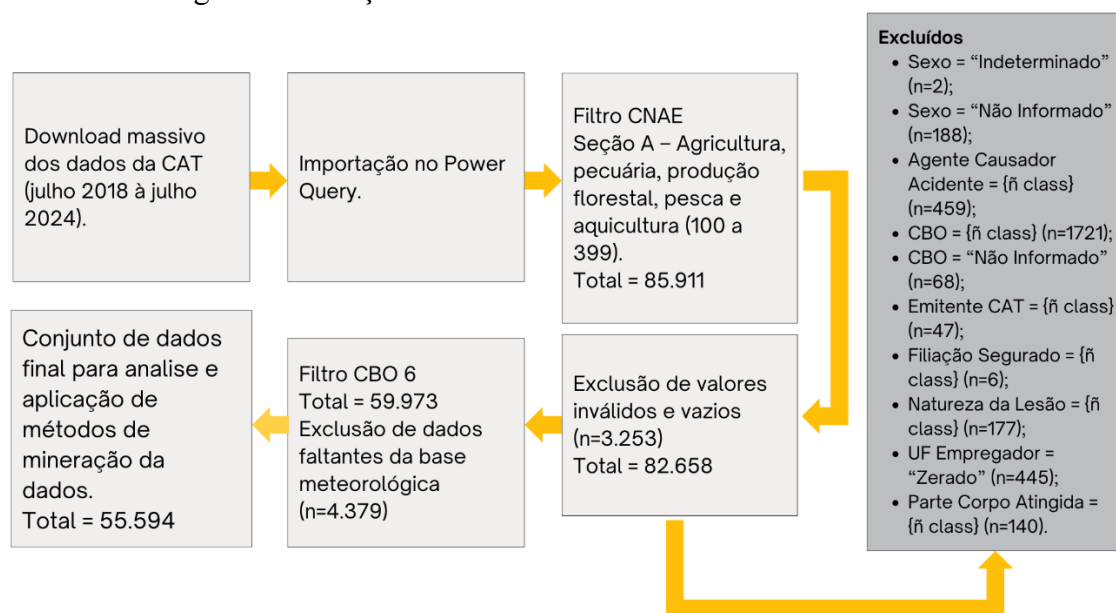
Fonte: Autoria própria (2025)

A idade do trabalhador foi uma variável que precisou ser calculada, assim como o IBUTG externo e interno, pois esses dados não estavam diretamente disponíveis no conjunto inicial. O cálculo da idade foi realizado subtraindo a data de nascimento do trabalhador da data do acidente, ambas fornecidas na base original. Os demais atributos já estavam disponíveis.

O número de variáveis foi reduzido de 25 para 10, após a exclusão de informações redundantes ou excessivamente detalhadas. Por exemplo, a variável "data" aparecia em três formatos distintos, e foi mantida apenas a versão mais completa. Da mesma forma, a variável "local do acidente" incluía unidade federativa, município, bairro e unidade de saúde, mas foram mantidos apenas o município e o estado, essenciais para combinar os dados com as informações climáticas.

Após selecionar as variáveis relevantes, realizou-se o tratamento dos dados, eliminando valores classificados como "Ignorado", "ñ class" (não classificado) e outros considerados inválidos para o estudo. Com esse processo, o conjunto inicial de 85.911 registros foi reduzido para aproximadamente 55.594 registros. A Figura 2 ilustra o processo de coleta e processamento dos dados da CAT.

Figura 2 – Seleção e tratamento dos dados de acidentes de trabalho



Fonte: Autoria própria (2025)

As faixas etárias foram segmentadas conforme a classificação do IBGE: jovens, do nascimento até 19 anos; adultos, de 20 a 59 anos; e idosos, a partir de 60 anos. O sexo do trabalhador foi representado por uma escala binária, onde zero (0) corresponde ao sexo biológico masculino e um (1) ao sexo feminino. Embora o Código Brasileiro de Ocupação (CBO) inclua 2.511 ocupações em seu nível hierárquico mais detalhado, esta pesquisa utilizou apenas o primeiro nível, dividido em dez grandes grupos conforme a classificação do Ministério do Trabalho e Emprego (APÊNDICE C). Após análise dos dados, verificou-se que mais de 90% dos registros pertenciam ao CBO 6, referente aos trabalhadores agropecuários, florestais e da pesca, razão pela qual este grupo foi o foco do estudo.

Para a unidade federativa, consideraram-se os 26 estados brasileiros e o Distrito Federal, organizados de acordo com as cinco regiões do país: Sul, Norte, Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste. Quanto aos tipos de acidentes, foram analisadas três categorias principais: acidentes típicos, acidentes de trajeto e doenças ocupacionais.

O atributo "parte do corpo atingida" foi reorganizado de 41 categorias para seis grupos principais: cabeça, membros inferiores, membros superiores, partes múltiplas, sistemas e aparelhos, e tronco, seguindo essa ordem. Os atributos "agente causador" e "natureza da lesão" também foram agrupados em categorias mais amplas, reduzindo o primeiro de 273 para 32 possibilidades e o segundo de 28 para 23. As classificações detalhadas desses atributos podem ser consultadas nos APÊNDICES D e E deste trabalho. Por fim, o atributo "óbito" foi

convertido em uma variável binária, onde o valor zero (0) representa acidentes sem óbito e o valor um (1) indica a ocorrência de óbito do trabalhador.

2.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

2.4.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS

Ao avaliar as cidades do empregador responsável pelo acidente, foram apresentadas no conjunto de dados 3.052 opções de cidades, todos com seus respectivos códigos, como descrito pelo IBGE e seus nomes parcialmente descritos. Para a análise deste estudo, os acidentes foram agrupados por regiões, conforme ilustrado no Quadro 3.

Quadro 3 – Registros de acidentes por região

Região	População (IBGE, 2023)	Qtd. Acidentes	% Acidentes	Acidentes por 100 mil hab.
Sudeste	84.840.113	23.661	42,56%	27,89
Centro-Oeste	16.289.538	12.678	22,80%	77,86
Sul	29.937.706	8.987	16,17%	30,01
Nordeste	54.658.515	6.029	10,84%	11,03
Norte	17.354.884	4.239	7,62%	24,42

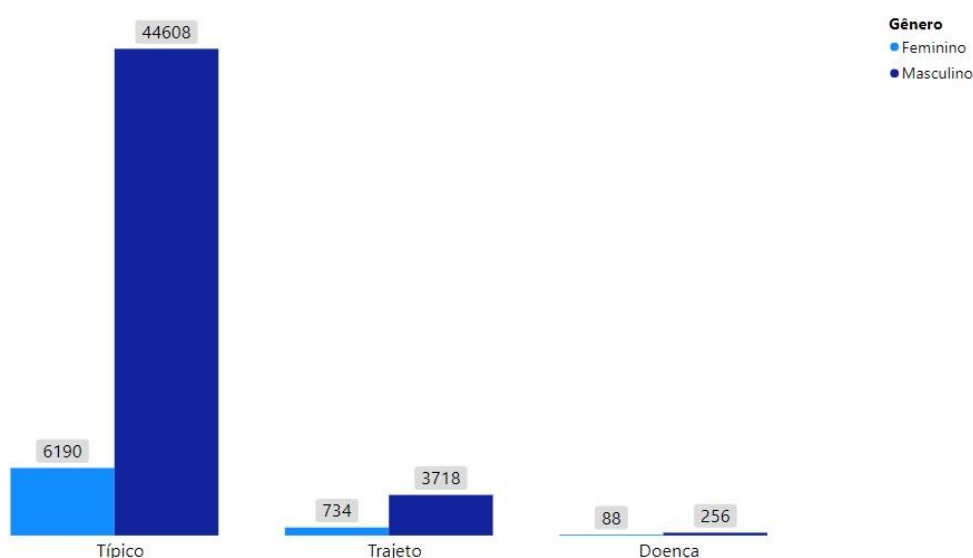
Fonte: Autoria própria (2025)

A região Sudeste destacou-se como o maior número de registros de acidentes, abrangendo 1.266 cidades do conjunto de dados e totalizando 23.661 ocorrências, o que equivale a 42,56% do total. As demais regiões tiveram os seguintes números: Centro-Oeste com 12.678 ocorrências (22,80%), Sul com 8.987 (16,17%), Nordeste com 6.029 (10,84%) e Norte com 4.239 (7,62%). A análise dos acidentes de trabalho por 100 mil habitantes nas regiões brasileiras revela desigualdades significativas, indicando que o risco não está diretamente associado apenas ao número absoluto de ocorrências. O Centro-Oeste, apesar de ter uma população menor, apresenta o maior índice proporcional de acidentes (77,86), sugerindo elevada exposição a riscos ocupacionais, especialmente no setor agropecuário. O Sul e o Sudeste, com 30,01 e 27,89 respectivamente, também apresentam índices expressivos, refletindo tanto a concentração industrial quanto a eficiência nos registros. Em contrapartida,

as regiões Norte (24,42) e Nordeste (11,03) registram os menores índices proporcionais, o que pode refletir não necessariamente menores riscos, mas sim subnotificação, acesso limitado aos meios de registro e alta informalidade no trabalho. Estudos apontam que a subnotificação de acidentes de trabalho no Brasil é alarmante, atingindo até 90% nos casos não fatais e 70% nos fatais, devido à subutilização da CAT, burocracia e receio das consequências legais. Além disso, a alta informalidade, especialmente entre profissionais autônomos, torna os acidentes praticamente invisíveis nos dados oficiais (MACHADO, 2021; GARCIA; CHIAVEGATO FILHO, 2022).

No conjunto de variáveis relacionadas a ocorrências, destaca-se a classificação dos acidentes de trabalho conforme a **Consolidação das Leis do Trabalho (CLT)**. Segundo o artigo 19 da CLT, acidente de trabalho é aquele que “ocorre pelo exercício do trabalho a serviço da empresa, provocando lesão corporal ou perturbação funcional que cause a morte, a perda ou redução, permanente ou temporária, da capacidade para o trabalho” (BRASIL, 1943). Ainda, a CLT estabelece três categorias principais: o **acidente típico**, que ocorre no local de trabalho ou fora dele, desde que a serviço da empresa; o **acidente de trajeto**, que ocorre no deslocamento entre a residência do trabalhador e o local de trabalho; e a **doença ocupacional**, equiparada ao acidente de trabalho, que decorre das condições em que o trabalho é realizado (BRASIL, 1943). As ocorrências relacionadas ao tipo de acidente estão apresentadas na Figura 3.

Figura 3 – Ocorrências relacionadas com o tipo e o gênero



Fonte: Autoria própria (2025)

O acidente típico registrou 44.608 ocorrências para as vítimas do sexo masculino e

6.190 para o feminino, representando 91,37% dos casos. Seguido do acidente de trajeto que registrou 3.718 ocorrências para as vítimas do sexo masculino e 734 para o feminino, representando 8,01% dos casos. A doença, com menor número de registros, 256 ocorrências para as vítimas do sexo masculino e 88 para o feminino, representando 0,62% dos casos.

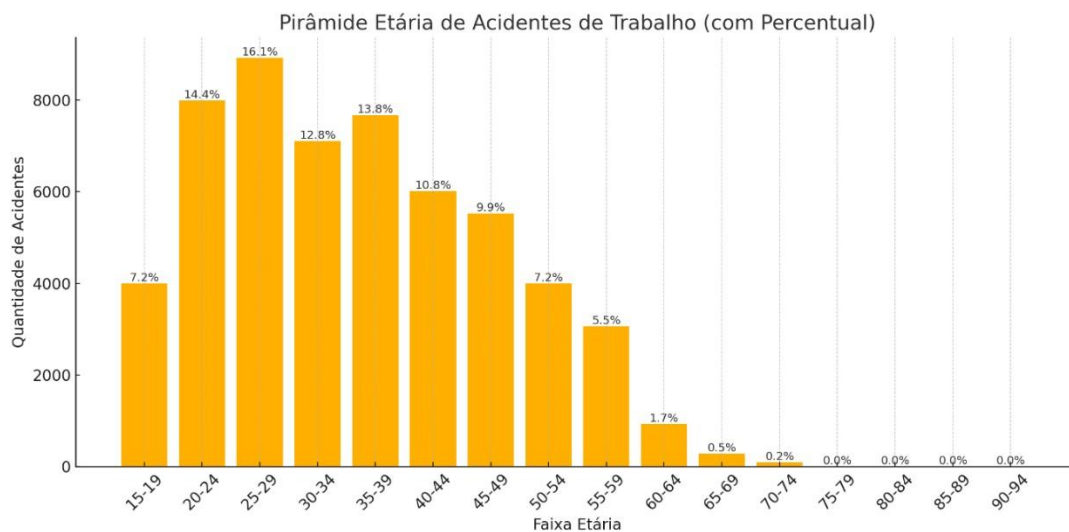
O setor agrícola é predominantemente masculino devido a uma combinação de fatores históricos, culturais e estruturais. Muitas atividades agrícolas exigem esforço físico intenso, como o manejo de máquinas pesadas e a colheita manual, tradicionalmente associada aos homens. Além disso, a divisão de funções nas zonas rurais frequentemente direciona as mulheres para atividades de suporte ou menos mecanizadas. A desigualdade de gênero no acesso a recursos, como terras, financiamento e treinamento técnico, também limita a participação feminina (BREITENBACH, CORAZZA, DEBASTIANI, 2021; RODRIGUES *et al.* 2021; MONTEIRO *et al.* 2024).

No entanto, essa menor presença feminina no setor formalizado da agricultura não implica ausência de riscos. O estudo de Beserra, Hennington e Pignatti (2023) destaca que as mulheres costumam ser contratadas de forma temporária e flexível, com baixa remuneração, longas jornadas e exposição direta a agrotóxicos. Além disso, enfrentam dupla jornada, pois acumulam o trabalho produtivo com tarefas domésticas (SILVA; GATTO; COSTA, 2022). Em algumas atividades, como as realizadas em estufas ou galpões com baixa ventilação, a exposição térmica pode ser ainda mais acentuada. Pesquisas também indicam diferenças fisiológicas que podem tornar as mulheres mais suscetíveis a determinadas condições de trabalho em ambientes extremos (KJELLSTROM *et al.*, 2016), embora essas relações ainda demandem maior aprofundamento.

Apesar dos desafios, observa-se um crescimento contínuo da participação feminina na agricultura, principalmente no contexto da agricultura familiar, onde as mulheres exercem papéis centrais na produção, gestão e comercialização, embora muitas vezes invisibilizadas pelas estatísticas oficiais. Políticas públicas voltadas ao fortalecimento da equidade de gênero no campo têm contribuído para esse avanço, mas ainda são necessários esforços para garantir condições de trabalho mais seguras, igualitárias e sustentáveis (FAO, 2020; BRASIL, 2019).

Para a idade do trabalhador, as faixas etárias foram definidas de acordo com a segmentação imposta pelo IBGE: jovens (até 19 anos), adultos (20 a 59 anos) e idosos (60 anos ou mais). Além disso, realizou-se uma análise mais detalhada em faixas etárias de 4 anos. A Figura 4 apresenta a relação entre as variáveis de faixa etária e a quantidade de ocorrências.

Figura 4 – Ocorrência por faixa etária

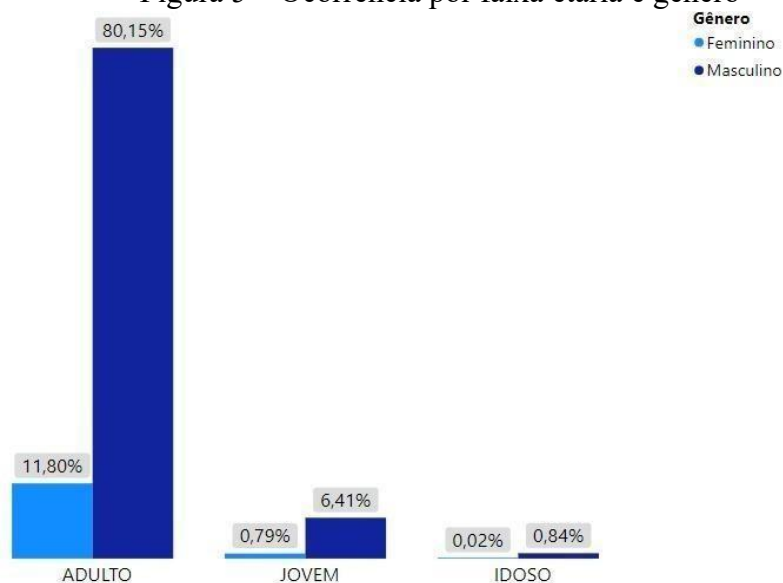


Fonte: Autoria própria (2025)

A análise da distribuição dos acidentes de trabalho por faixa etária revela uma clara concentração de ocorrências entre os 20 e 39 anos, período em que os trabalhadores estão mais inseridos em atividades laborais de maior risco. Esse grupo representa mais de 50% do total de acidentes registrados.

A Figura 5 apresenta a relação entre as variáveis de faixa etária, gênero e a quantidade de ocorrências.

Figura 5 – Ocorrência por faixa etária e gênero



Fonte: Autoria própria (2025)

A maioria dos acidentes envolve trabalhadores adultos, que representam 91,95% das ocorrências, seguidos pelos jovens, com 7,20%, e pelos idosos, com 0,86%.

Em relação ao tipo de filiação do segurado, a CAT dispõe de três classificações: empregado, trabalhador avulso e segurado especial. Na análise dos dados, a categoria “empregado” corresponde à grande maioria dos casos, representando 99,95% das ocorrências. A categoria "trabalhador avulso" registrou apenas 28 casos (0,05%), enquanto não foram identificados registros para a categoria "segurado especial".

Os responsáveis pela emissão da CAT são distribuídos em cinco categorias: empregador, médico, segurado ou dependente, sindicato e autoridade pública. O Quadro 4 apresenta a distribuição dessas categorias nos dados analisados, evidenciando a representatividade de cada classe.

Quadro 4 – Responsáveis pela abertura do CAT

Emitente	Qtd. Acidentes	% Acidentes
Empregador	55.723	99,00%
Segurado/Dependente	314	0,56%
Sindicato	124	0,22%
Médico	93	0,18%
Autoridade Pública	23	0,04%

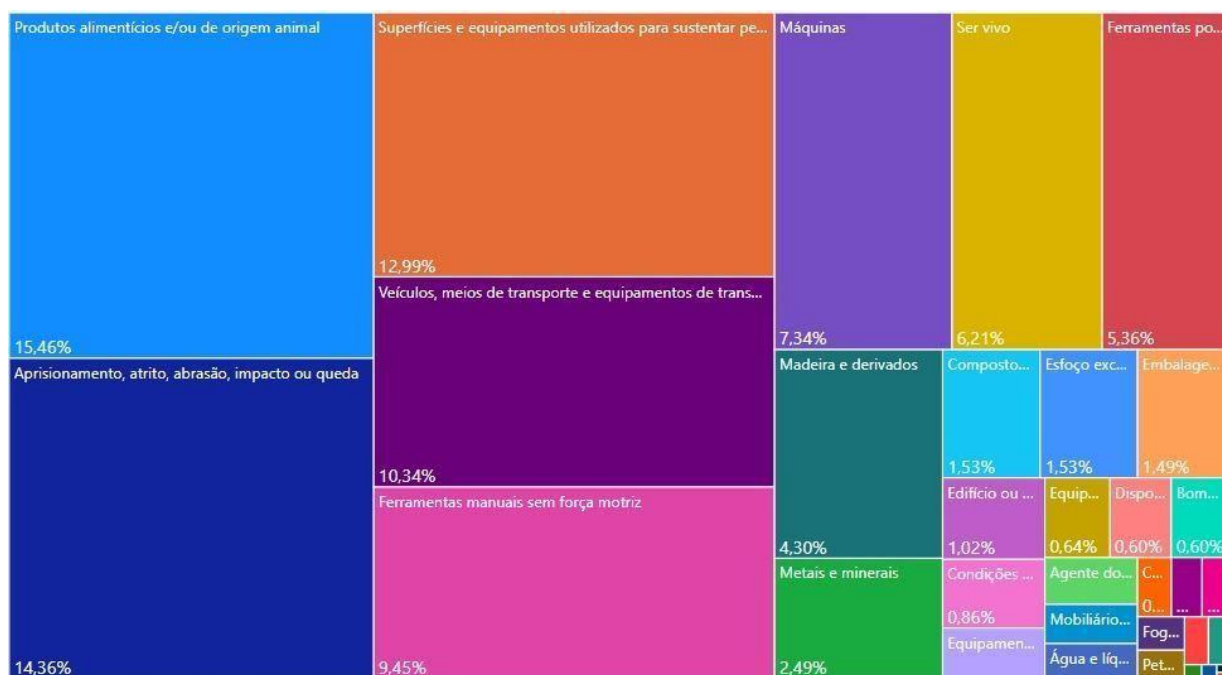
Fonte: Autoria própria (2025)

Pelo Quadro 4 é possível observar que a grande maioria das formalizações de CAT é realizada pelos empregadores, representando 99% dos casos. As demais categorias apresentam uma participação significativamente menor: seguros ou seus dependentes responderam por 314 registros (0,56%), sindicatos por 124 ocorrências (0,22%), médicos por 93 registros (0,17%) e, por fim, autoridades públicas, com 23 ocorrências (0,04%).

Com base no atributo que indica a ocorrência de óbito nos acidentes registrados, observa-se que na maioria dos casos não houve falecimento do trabalhador. Dos acidentes incidentes, 99,26% não resultaram em óbito, enquanto apenas 0,74% culminaram no falecimento do trabalhador.

O agente causador informa o fator diretamente relacionado ao acidente, podendo ser agentes físicos, biológicos, máquinas, ferramentas ou aditivo químico. A Figura 6 mostra os maiores agentes.

Figura 6 – Ocorrências por agente causador de acidente

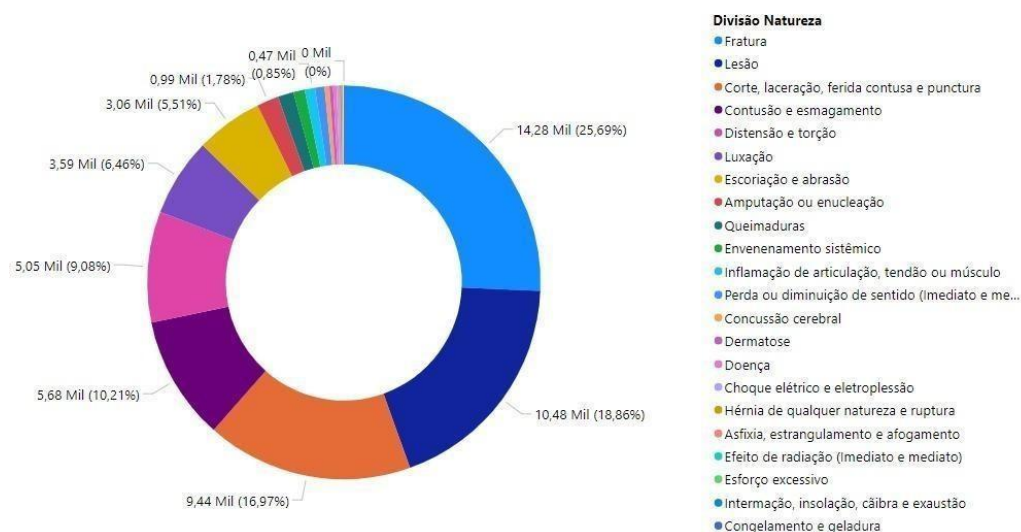


Fonte: Autoria própria (2025)

A categoria de agente causador com maior número de ocorrências está relacionada com acidentes e doenças ocasionadas por produtos alimentícios e/ou de origem animal, correspondendo a 8.594 ocorrências (15,46%). É seguida pelos agentes causadores “Aprisionamento, atrito, abrasão, impacto ou queda” com 7.986 ocorrências (14,36%), “Superfície e equipamentos utilizados para superfície de pessoas” com 7.219 ocorrências (12,99%), “Veículos, meios de transportes e equipamentos de transporte” com 5.746 (10,34%) e “Ferramentas manuais sem força motriz” com 5.254 ocorrências (9,45%).

A natureza da lesão refere-se à maneira pela qual o colaborador foi lesionado, os dados analisados apresentam 23 categorias. A Figura 7 apresenta a relação entre a quantidade de ocorrências e as categorias de lesões.

Figura 7 – Ocorrências por natureza da lesão

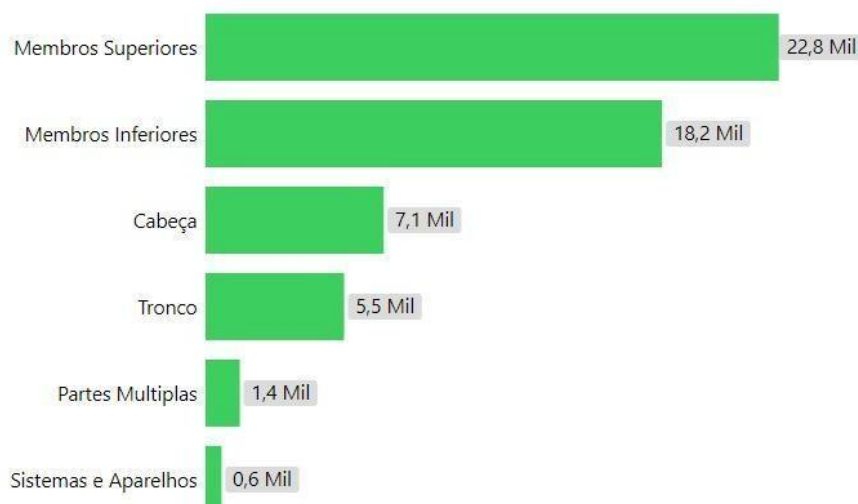


Fonte: Autoria própria (2025)

A categoria de lesão mais recorrente foi “Fratura”, representando 25,69% das ocorrências, seguida de “Lesão” (18,86%), “Corte, laceração, ferida contusa e punctura” (16,97%) e “Contusão e esmagamento” (10,21%).

O conjunto de dados referente às partes do corpo atingidas em acidentes apresenta 72 classificações diferentes. Para este estudo, essas classificações foram agrupadas em seis categorias principais: Cabeça, Membros Inferiores, Membros Superiores, Partes Múltiplas, Sistemas e Aparelhos, e Tronco. A Figura 8 destaca as partes do corpo frequentemente atingidas em acidentes.

Figura 8 – Ocorrências relacionadas com a parte do corpo atingida



Fonte: Autoria própria (2025)

Os membros superiores são as partes do corpo mais frequentemente atingidas, correspondendo a 41,03% dos casos, seguidos pelos membros inferiores, com 32,68%. Juntas, essas categorias representam 73,71% do total de doenças e acidentes de trabalho. As demais ocorrências estão distribuídas entre a cabeça (12,76%), o tronco (9,93%), partes múltiplas (2,46%) e sistemas e aparelhos (1,15%).

2.4.2 APLICAÇÃO E ANÁLISE DO K-PROTÓTIPOS

A técnica de Clusterização *K-Protótipos* foi aplicada com o objetivo de agrupar observações heterogêneas, considerando de forma simultânea variáveis categóricas e numéricas. Para determinar o número ideal de clusters, foram testados o Método do Cotovelo e do Método da Silhueta (KASSAMBARA, 2017), porém, essas abordagens não forneceram um ponto de inflexão claro que determinasse o número ótimo de agrupamentos. Em função disso, foram realizados testes empíricos variando a quantidade de clusters de dois a cinco e analisando a coerência dos agrupamentos. O Quadro 5 apresenta a distribuição dos dados para cada número de clusters testados.

Quadro 5 – Distribuição dos dados por cluster

Número de Clusters	Distribuição por Cluster
2 Clusters	0: 48.582 1: 7.012
3 Clusters	0: 32.493 1: 7.012 2: 16.089
4 Clusters	0: 7.012 1: 16.089 2: 5.754 3: 26.739
5 Clusters	0: 3.976 1: 16.089 2: 3.036 3: 5.754 4: 26.739

Fonte: Autoria própria (2025)

Após uma análise preliminar, optou-se pela definição de três clusters, pois essa configuração proporcionou a melhor interpretação dos dados e destacou padrões relevantes para a análise.

Foram testadas as premissas de normalidade e homogeneidade de variâncias para as variáveis IBUTG Interno e IBUTG Externo. O teste de *Shapiro-Wilk* indicou que os dados não seguem distribuição normal em nenhum dos clusters ($p < 0,05$). Adicionalmente, o teste de *Levene* rejeitou a hipótese de homogeneidade das variâncias entre os grupos ($p < 0,001$ para ambas as variáveis). Diante disso, optou-se por utilizar testes não paramétricos para a comparação entre os clusters.

Com o objetivo de verificar se os níveis de exposição térmica diferem significativamente entre os clusters identificados, aplicou-se o teste de *Kruskal-Wallis*, adequado para dados não paramétricos. Os resultados mostraram diferenças estatisticamente significativas entre os grupos, tanto para o IBUTG Interno ($H = 33400,93$; $p < 0,001$) quanto para o IBUTG Externo ($H = 33387,51$; $p < 0,001$). Esses resultados confirmam que os trabalhadores alocados em diferentes clusters apresentam níveis distintos de exposição ao estresse térmico, o que reforça a validade da segmentação feita por meio da técnica de clusterização.

Após a verificação das diferenças globais entre os grupos, foi aplicado o teste *Post Hoc* de Dunn com correção de *Bonferroni* para identificar quais pares de clusters apresentavam diferenças significativas. Os resultados mostraram que todas as comparações entre os clusters foram estatisticamente significativas ($p < 0,001$) para ambas as variáveis analisadas (IBUTG Interno e Externo). Isso indica que os três grupos representam perfis distintos de exposição térmica, o que fortalece a robustez da análise. O Quadro 6 apresenta as estatísticas descritivas para o IBUTG Interno e Externo para cada cluster.

Quadro 6 – Estatísticas descritivas para o IBUTG Interno e Externo por cluster

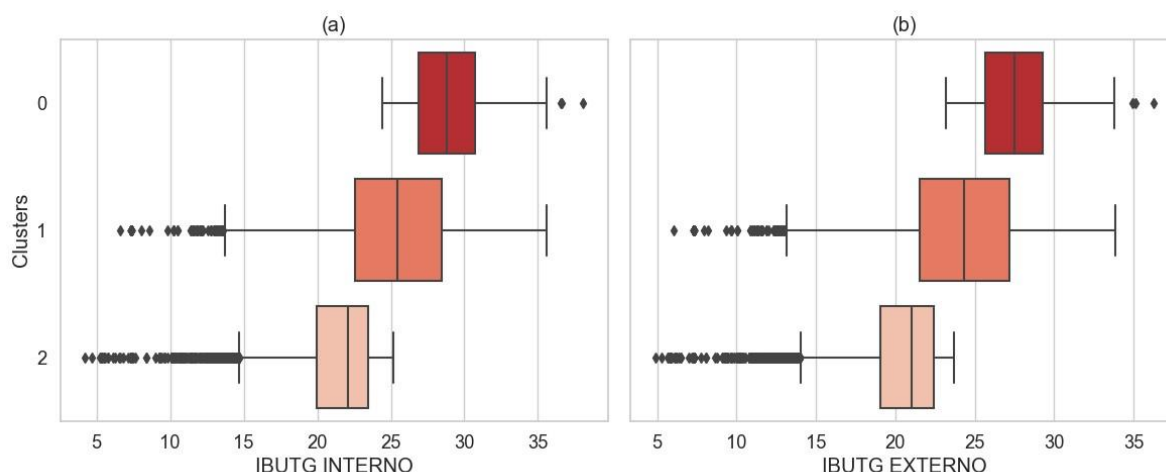
Cluster	IBUTG Interno			IBUTG Externo			Total
	Média	Mediana	Desvio Padrão	Média	Mediana	Desvio Padrão	
0	28,84	28,82	2,34	27,52	27,52	2,22	32.493
1	25,15	25,47	4,40	24,00	24,32	4,20	7.012
2	21,29	22,05	3,02	20,32	21,02	2,87	16.089

Fonte: Autoria própria (2025)

Observa-se que o Cluster 0 concentra os trabalhadores com maior exposição ao calor, com média de IBUTG Interno de 28,84 e IBUTG Externo de 27,52. O Cluster 1 apresenta nível intermediário de exposição, com médias de 25,15 (Interno) e 24,00 (Externo). Já o Cluster 2 agrupa trabalhadores com menor exposição térmica, registrando médias de 21,29

(Interno) e 20,32 (Externo). Esses resultados corroboram os achados dos testes de *KruskalWallis* e *Dunn*, indicando que as diferenças entre os clusters são estatisticamente significativas, sendo relevantes do ponto de vista prático, uma vez que os níveis de exposição térmica influenciam diretamente o tipo e a gravidade dos acidentes registrados. A Figura 9 ilustra a média de IBUTG por Cluster.

Figura 9 – Média de IBUTG Interno e Externo por Cluster



Fonte: Autoria própria (2025)

Conforme apresentado na Figura 9a, o Cluster 0 apresenta a maior média de IBUTG interno (~30), indicando condições de trabalho em ambientes internos com maior exposição térmica. O Cluster 1 apresenta uma média intermediária (~25), sugerindo ambientes com exposição moderada ao calor. Por outro lado, o Cluster 2 possui a menor média (~20), possivelmente predominante em ambientes internos mais controlados e confortáveis. Dessa forma, o Cluster 0 está relacionado a locais de trabalho com condições mais severas de calor, enquanto o Cluster 2 reflete ambientes internos com maior regulação térmica e conforto.

Já na Figura 9b, observa-se a análise do IBUTG externo, onde o Cluster 0 novamente apresenta a maior média (~27), indicando maior exposição ao calor em ambientes externos. O Cluster 1 possui uma média intermediária (~24), representando uma exposição moderada, enquanto o Cluster 2 registra a menor média (~20), sugerindo condições externas com menor exposição térmica. Assim, de forma similar à análise anterior, o Cluster 0 apresenta predominância de trabalhos externos com maior exposição ao calor, enquanto o Cluster 2 reflete ambientes externos mais amenos e com menor intensidade térmica.

Para identificar possíveis diferenças entre os clusters em relação às variáveis categóricas, foram aplicados testes de associação baseados no **teste do Qui-quadrado de**

independência, que avalia se há relação estatística entre duas variáveis categóricas, neste caso, as categorias das variáveis analisadas e os grupos (clusters) formados.

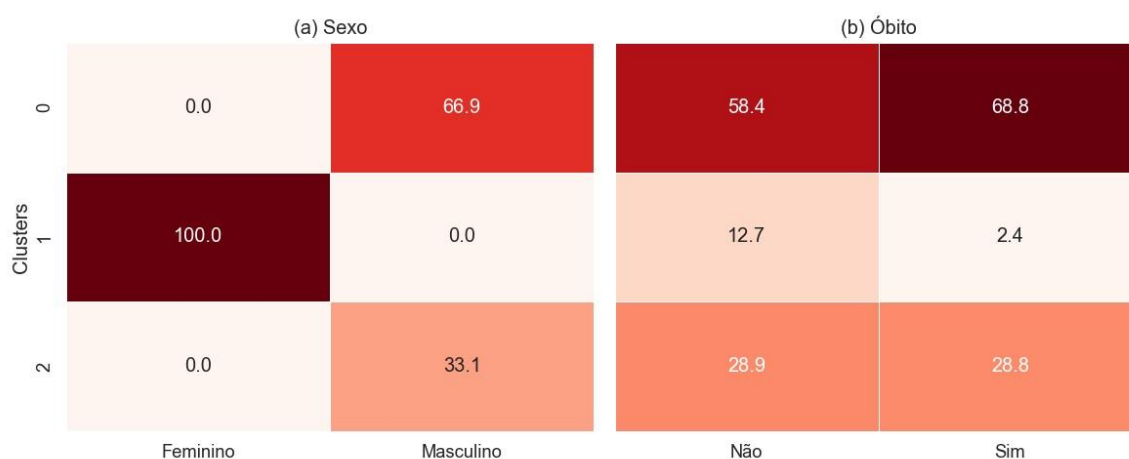
Quando as tabelas de contingência apresentaram células com frequências esperadas muito baixas, foram utilizados procedimentos alternativos, como o **teste Qui-quadrado com correção de Monte Carlo** (para variáveis com muitas categorias) ou o **teste exato de Fisher** (para variáveis binárias com baixas frequências), a fim de garantir a robustez dos resultados.

Os testes indicaram **associações estatisticamente significativas ($p < 0,001$)** entre os clusters e quase todas as variáveis categóricas analisadas, incluindo: tipo de acidente, sexo, parte do corpo atingida, natureza da lesão, ocorrência de óbito, agente causador, região geográfica e faixa etária do trabalhador. Esses achados sugerem que os perfis dos grupos identificados são distintos não apenas em relação à exposição térmica, mas também quanto às características sociodemográficas, clínicas e ocupacionais.

A única variável que não apresentou associação estatisticamente significativa com os clusters foi o "emitente da CAT" ($p = 0,0904$). Embora o resultado não tenha alcançado o nível de significância estabelecido ($p < 0,05$), observou-se uma tendência de variação entre os grupos que pode merecer investigação complementar.

Na Figura 10a o Cluster 1 apresenta exclusivamente a trabalhadoras do gênero feminino. Em contraste, os Clusters 0 e 2 apresentam uma predominância de trabalhadores do gênero masculino. Na Figura 10b, referente ao Óbito e Sexo, o Cluster 0 apresentou uma maior concentração de registros tanto de casos com óbitos quanto sem óbitos. O Cluster 1 demonstra que a maioria dos registros desse grupo não envolve óbitos, representando eventos ou acidentes de menor gravidade, sem fatalidades. Já o Cluster 2 apresentou uma concentração igual entre os registros com óbitos e sem óbitos.

Figura 10 - Proporção de Óbito e Sexo por Cluster



Fonte: Autoria própria (2025)

Observa-se na Figura 11a uma alta concentração no Cluster 0, predominantemente associada a registros emitidos por "Segurado/Dependente". O Cluster 2 apresenta uma concentração intermediária, enquanto o Cluster 1 exibe a menor representatividade nesse aspecto.

Na Figura 11b o Cluster 0 apresenta uma alta concentração de trabalhadores provenientes das regiões Centro-Oeste, Nordeste e Norte, destacando-se como os principais grupos regionais desse Cluster. O Cluster 1 apresenta uma baixa concentração geral nas regiões, com uma leve predominância em relação ao Cluster 2 na região Nordeste. Já o Cluster 2 é caracterizado por uma maior concentração de trabalhadores das regiões Sul e Sudeste.

Na Figura 11c o Cluster 0 apresenta uma alta proporção, representando a maioria dos registros deste grupo. Já o Cluster 1 possui uma proporção muito baixa, indicando uma baixa representatividade de jovens e adultos, com praticamente nenhuma presença de idosos. Por outro lado, o Cluster 2 exibe uma proporção intermediária, sendo caracterizado principalmente pela maior parte de seus registros relacionados a indivíduos idosos.

Figura 11 - Proporção por Emitente, Região e Faixa Etária e Cluster

Clusters	(a) Emitente CAT					(b) Região					(c) Faixa Etária		
	Autoridade Pública	Empregador	Médico	Segurado/Dependente	Sindicato	Centro-Oeste	Nordeste	Norte	Sudeste	Sul	Adulto	Idoso	Jovem
0	56.5	58.4	51.6	65.3	54.0	82.9	79.3	97.1	42.0	35.0	58.4	60.0	58.9
1	13.0	12.6	21.5	11.1	16.1	4.2	17.9	1.9	16.4	15.9	12.8	2.5	11.0
2	30.4	29.0	26.9	23.6	29.8	12.9	2.8	1.0	41.6	49.1	28.8	37.5	30.1

Fonte: Autoria própria (2025)

No Cluster 0, na Figura 12a, observa-se uma alta concentração de registros relacionados aos tipos de acidentes, destacando-se como o Cluster predominante nesse aspecto. O Cluster 1 apresenta uma baixa concentração geral, enquanto o Cluster 2 mostra uma concentração intermediária, com um leve destaque para o tipo de acidente classificado como "Doença".

Na Figura 12b o Cluster 0 apresenta uma alta concentração em relação às partes do corpo atingidas, sendo o mais representativo nesse aspecto. O Cluster 1 exibe uma baixa concentração

geral, enquanto o Cluster 2 apresenta uma concentração intermediária, com um leve destaque para a categoria "Sistemas e Aparelhos".

Na Figura 12c o Cluster 0 apresenta uma alta concentração geral em relação às naturezas de lesões, destacando-se como o mais representativo. Entretanto, o Cluster 2 predomina especificamente nas categorias de "Congelamento e Geladura" e "Efeito de Radiação". Além disso, o Cluster 2, juntamente com o Cluster 1, se destaca nas categorias relacionadas a "Esforço Excessivo" e "Pneumoconiose".

Figura 12 - Tipo de Acidente, Parte do Corpo Atingida e Natureza da Lesão por Clusters

(a) Tipo do Acidente				(b) Parte do Corpo Atingida									
Clusters		0	1	2	Doença	Trajeto	Típico	Cabeça	Membros Inferiores	Membros Superiores	Partes Múltiplas	Sistemas e Aparelhos	Tronco
		54.9	58.0	58.5				59.9	56.8	59.3	57.6	52.6	59.4
		25.6	16.5	12.2				11.2	14.6	11.3	15.3	28.8	10.8
		19.5	25.5	29.3				28.9	28.6	29.4	27.1	18.6	29.8

(c) Natureza da Lesão																											
Clusters		0	1	2	Amputação ou enucleação	Asfixia, estrangulamento e afogamento	Choque elétrico e eletroplessão	Concussão cerebral	Congelamento e geladura	Contusão e esmagamento	Corte, laceração, ferida contusa e punctura	Dermatose	Distensão e torção	Doença	Efeito de radiação (Imediato e mediato)	Envenenamento sistêmico	Escoriação e abrasão	Esforço excessivo	Fratura	Hérnia de qualquer natureza e ruptura	Inflamação de articulação, tendão ou músculo	Intoxicação, insolação, câibra e exaustão	Lesão	Luxação	Perda ou diminuição de sentido (Imediato e mediato)	Pneumoconiose	Queimaduras
		64.0	60.0	73.9	65.7	20.0	51.6	60.4	47.6	49.1	60.2	40.0	50.7	56.3	22.2	62.1	61.5	49.1	66.7	60.5	59.4	60.0	0.0	54.4			
		3.2	5.3	6.5	5.2	0.0	18.4	7.5	20.8	23.7	18.0	0.0	23.6	14.5	33.3	7.6	9.0	26.0	0.0	13.8	15.5	12.7	50.0	14.0			
		32.8	34.7	19.6	29.1	80.0	30.0	32.1	31.5	27.2	21.7	60.0	25.7	29.2	44.4	30.3	29.5	24.9	33.3	25.7	25.1	27.3	50.0	31.6			

Fonte: Autoria própria (2025)

A pneumoconiose, predominante no Cluster 1, está associada à exposição prolongada a materiais particulados, como poeira, sílica e agentes suspensos no ar. Na agricultura, atividades como o preparo do solo (aragem e capina) e o manuseio de grãos (transporte e processamento de culturas como soja, milho e trigo) liberam partículas inaláveis. Queimadas, sejam para manejo agrícola ou acidentais, e a aplicação de fertilizantes ou defensivos em pó também aumentam a exposição, especialmente sem proteção respiratória adequada. Em algumas regiões, a mineração em áreas agrícolas agrava o risco de contato com poeiras minerais, intensificando o risco de pneumoconiose entre os trabalhadores.

No Cluster 2, predominante nas regiões Sul e Sudeste, há uma alta incidência de lesões relacionadas ao frio, como congelamento e geladura, além de efeitos de radiação. Essas lesões refletem as condições climáticas e as atividades características dessas regiões. Trabalhos ao ar livre em temperaturas muito baixas, especialmente durante madrugadas, como na colheita de maçã, uva e tabaco, aumentam a vulnerabilidade dos trabalhadores. Atividades de armazenamento e manipulação de produtos perecíveis em câmaras frias também intensificam a exposição ao frio extremo. O manejo de culturas de inverno, como trigo e cevada, exige longos períodos de trabalho em baixas temperaturas. Além disso, mesmo em climas frios, a exposição à radiação ultravioleta é significativa em áreas abertas, especialmente em altitudes elevadas ou superfícies refletivas, como neve em regiões montanhosas do Sul.

A aplicação da técnica de *K-Protótipos* identificou três Clusters distintos, com o **Cluster 0** se destacando por características específicas. Este grupo reúne trabalhadores localizados em regiões mais quentes, como Centro-Oeste, Nordeste e Norte, expostos a maiores índices de IBUTG (estresse térmico). O principal emitente de registros desse Cluster é o "Segurado/Dependente", e ele abrange todas as faixas etárias, partes do corpo atingidas e tipos de acidentes, com predominância de trabalhadores do gênero masculino. No que se refere à natureza das lesões, o Cluster 0 destaca-se tanto por lesões diretamente relacionadas à exposição térmica, como queimaduras, quanto por lesões de natureza indireta, como cortes, lacerações e fraturas.

O estresse térmico apresenta impactos profundos não apenas na saúde física dos trabalhadores, mas também em suas capacidades cognitivas. Estudos indicam que trabalhadores expostos a condições extremas demonstram redução na atenção e na capacidade de tomar decisões, aumentando o risco de erros operacionais (WANG, MENASSA, KAMAT, 2019; IOANNOU *et al.*, 2021). A combinação de condições climáticas adversas e a necessidade de

realizar tarefas fisicamente exigentes torna os trabalhadores significativamente mais vulneráveis a esses riscos (GUBERNOT, ANDERSON, HUNTING, 2015).

O **Cluster 1** apresenta menor representatividade geral, sendo composto predominantemente por trabalhadoras do gênero feminino, tanto adultas quanto jovens, com exposição térmica moderada. Esse Cluster destaca-se nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste, com maior número de registros emitidos por médicos. O principal tipo de acidente predominante ao Cluster 1 é classificado como "Doença", sendo a pneumoconiose a natureza de lesão mais prevalente. Essa condição está diretamente relacionada à inalação de partículas, como poeira ou agentes tóxicos, frequentemente encontradas em atividades industriais, como mineração, construção civil e agricultura. A predominância de pneumoconiose sugere que os trabalhadores desse Cluster estão expostos a ambientes com ventilação inadequada ou ausência de proteção respiratória eficaz.

O maior destaque para registros emitidos por médicos no Cluster 1 está alinhado ao perfil do tipo de acidente predominante ("Doença") e às lesões relacionadas aos sistemas e aparelhos. Registros médicos geralmente indicam acompanhamento de condições crônicas ou diagnósticos que exigem maior intervenção clínica, em contraste com acidentes típicos que podem ser registrados por segurados ou empregadores.

O **Cluster 2** é composto predominantemente por trabalhadores do gênero masculino, idosos, localizados em regiões de clima mais ameno, como o Sul e Sudeste, que apresentam os menores índices de exposição térmica (IBUTG interno e externo). Essa menor exposição está diretamente relacionada às condições climáticas controladas dessas regiões e pode refletir um esforço para mitigar riscos adicionais para trabalhadores idosos, que são mais vulneráveis a condições extremas de calor ou frio. Conforme Coelho, Veras e Saldiva (2022), alterações fisiológicas relacionadas à idade comprometem a capacidade de adaptação térmica, tornando os idosos mais suscetíveis a esses extremos.

A predominância de lesões como "Congelamento e Geladura" no Cluster 2 reflete as temperaturas mais baixas típicas do Sul e Sudeste, onde o frio pode ser um fator de risco ocupacional significativo. A menor exposição ao calor observada neste Cluster está alinhada com a prevalência de lesões causadas pelo frio, destacando o papel crucial das condições ambientais na definição da natureza das lesões registradas.

Assim, o Cluster 2 representa um grupo de trabalhadores idosos alocados em regiões de menor exigência térmica, como o Sul e Sudeste, mas que ainda enfrentam riscos específicos associados ao frio. Apesar de o calor não ser um problema significativo nesse contexto, a

ocorrência de lesões relacionadas ao frio evidencia a necessidade de medidas preventivas, como o uso de equipamentos de proteção adequados e o controle das condições ambientais.

Os resultados deste estudo mostram consonância com achados prévios na literatura internacional e nacional que apontam o estresse térmico como um fator de risco significativo à saúde e segurança ocupacional, especialmente no setor agrícola. A pesquisa de Ferrari *et al.* (2023), ao mapear sistematicamente os impactos das mudanças climáticas na saúde do trabalhador, destaca que os trabalhadores agrícolas e da construção civil são os mais afetados por variações térmicas extremas, sobretudo pelo calor. O presente estudo, ao aplicar a técnica de clusterização, identificou um padrão semelhante: trabalhadores localizados em regiões mais quentes (Centro-Oeste, Norte e Nordeste) apresentaram maior incidência de acidentes relacionados ao calor. Isso reforça a relação entre exposição térmica e risco ocupacional, especialmente em atividades realizadas ao ar livre, como também indicado por Kjellstrom *et al.* (2016) e pelo relatório da OIT (2019), que projetam perdas significativas de produtividade devido ao estresse térmico, particularmente na agricultura tropical.

Ao mesmo tempo, a análise dos dados reforça a importância de se considerar as desigualdades estruturais na exposição aos riscos climáticos. Ferrari *et al.* (2023) evidenciam que trabalhadores racializados estão mais vulneráveis aos efeitos do estresse térmico, com maior incidência de sintomas como exaustão, tontura, perda de concentração e até mesmo mortalidade. Essas vulnerabilidades são agravadas por barreiras no acesso a equipamentos de proteção, infraestrutura de apoio e condições adequadas de trabalho. Complementarmente, Kjellstrom, Holmer e Lemke (2009) demonstram que os impactos sobre a saúde e a produtividade são ainda mais severos em países de baixa e média renda, onde predominam atividades informais e a ausência de políticas efetivas de mitigação térmica. Nesses contextos, trabalhadores com menor escolaridade, renda reduzida e proteção social limitada enfrentam riscos mais elevados de adoecimento, incluindo distúrbios osteomusculares, transtornos mentais e doenças renais. Gênero, etnia, idade e informalidade, portanto, constituem eixos centrais na amplificação das desigualdades frente às mudanças climáticas.

O estudo amplia a compreensão sobre a diversidade dos riscos térmicos ao evidenciar que, além do calor, o frio também representa um fator relevante nas regiões Sul e Sudeste do Brasil. Esses resultados dialogam com a pesquisa de Silveira (2014), que demonstrou a frequência e a duração significativas de eventos extremos de frio no Rio Grande do Sul, com impactos acentuados sobre populações socioespacialmente vulneráveis. A autora aponta que as desigualdades regionais e sociais intensificam os efeitos dos extremos térmicos, ao revelar que

a exposição ao estresse térmico é desigual, sendo agravada por condições laborais e por fatores individuais, como a idade avançada. Assim, mesmo em contextos climáticos considerados mais amenos, trabalhadores idosos permanecem expostos a riscos térmicos, o que reforça a necessidade de políticas públicas específicas voltadas à sua proteção.

Outro aspecto relevante refere-se ao perfil dos trabalhadores mais afetados, revelando desigualdades estruturais de gênero, idade e vínculo formal de trabalho. A predominância de homens nos registros analisados está em consonância com dados do IBGE (2021) e com os estudos da FAO (2020), que evidenciam a masculinização do setor agrícola formal. Contudo, o presente estudo avança ao demonstrar que as mulheres aparecem com maior frequência em registros classificados como “doença”, como no caso da pneumoconiose, cujas notificações foram majoritariamente realizadas por profissionais de saúde. Essa diferença de perfil sugere não apenas uma segmentação das atividades desempenhadas, mas também reforça o argumento de Beserra *et al.* (2023), que destacam a invisibilidade histórica do trabalho feminino no campo. Muitas vezes, as atividades realizadas por mulheres são classificadas como ajuda familiar, o que dificulta seu reconhecimento formal, contribuindo para sua exclusão das estatísticas oficiais e limitando seu acesso à proteção social e previdenciária.

Os resultados deste estudo contribuem para fortalecer a agenda de políticas públicas voltadas à saúde e segurança no trabalho agrícola, especialmente diante dos impactos crescentes das mudanças climáticas. A identificação de padrões distintos de risco, como a exposição ao calor extremo nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste; a vulnerabilidade de trabalhadores idosos ao frio no Sul e Sudeste; e a prevalência de doenças ocupacionais entre mulheres, evidencia a necessidade de ações públicas específicas, territorializadas e interseccionais.

Esses resultados podem subsidiar o aprimoramento do Plano de Adaptação Setorial da Saúde e alinham-se às metas da Agenda 2030 (ODS 8.8), que visam promover ambientes de trabalho seguros e saudáveis. Entre as recomendações práticas destaca-se a necessidade de criação de protocolos nacionais de proteção térmica no trabalho rural, com diretrizes específicas para pausas, revezamento e hidratação baseadas nos níveis de IBUTG e adaptadas às realidades regionais e ao tipo de cultivo. Além disso, sugere-se a inclusão de indicadores climáticos nos sistemas nacionais de vigilância em saúde do trabalhador, como o SINAN e o Observatório de SST, possibilitando ações preventivas e alertas precoces em períodos críticos de calor ou frio.

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam a relevância de considerar o estresse térmico como um risco ocupacional significativo no setor agrícola brasileiro. Embora a Norma Regulamentadora nº 15 (NR 15) estabeleça os limites de tolerância para exposição ao calor

(BRASIL, 1978), observa-se que tais limites, em muitos casos, não contemplam as especificidades regionais, climáticas e culturais que caracterizam o setor agrícola no Brasil. A NR 15 define limites de IBUTG de 26 a 30 (dependendo da atividade e do tipo de trabalho), acima dos quais medidas de controle e pausas devem ser adotadas. Entretanto, conforme os dados analisados, trabalhadores agrícolas, principalmente no Centro-Oeste, Norte e Nordeste, frequentemente enfrentam níveis de IBUTG superiores a 28, evidenciando uma exposição contínua ao calor que pode impactar tanto a saúde quanto a produtividade.

Além disso, a NR 15 não distingue realidades regionais que influenciam a adaptabilidade dos trabalhadores, como aclimação, disponibilidade de infraestrutura, uso de equipamentos de proteção individual e acesso a hidratação. Por exemplo, regiões como o Centro-Oeste apresentaram índices médios de IBUTG acima do limite recomendado em grande parte do período analisado, sem que isso fosse acompanhado de medidas de adaptação específicas. Mesmo em regiões com índices médios de IBUTG mais baixos, como Sul e Sudeste, identificaram-se riscos ocupacionais relacionados ao frio extremo, lesões e quedas, que não estão contemplados na atual NR 15. Isso reforça a necessidade de regulamentações mais adaptadas às realidades regionais, com protocolos específicos de proteção térmica para cada contexto climático.

Portanto, ainda que a NR 15 sirva como referência para controle da exposição ao calor, os dados revelam que sua aplicação isolada não é suficiente para mitigar completamente os riscos a que estão sujeitos os trabalhadores agrícolas. É necessário avançar em diretrizes regionais mais detalhadas e estratégias de mitigação que considerem as características locais e o perfil etário da força de trabalho.

Nesse contexto, recomenda-se a formulação de **planos de ação preventiva** para reduzir a incidência de acidentes de trabalho no setor agrícola, considerando o IBUTG, as regiões e a faixa etária dos trabalhadores. Esses planos podem incluir:

- **Monitoramento climático contínuo**, com uso de estações meteorológicas locais e alertas para ondas de calor ou frio extremo.
- **Adoção de pausas regulares** em horários críticos, conforme IBUTG, e rotinas de revezamento para evitar exposição contínua ao calor intenso.
- **Capacitação técnica** dos trabalhadores sobre o reconhecimento dos sintomas de estresse térmico e a importância da hidratação adequada.
- **Ajuste das jornadas de trabalho**, priorizando atividades mais pesadas em horários com temperaturas mais amenas.

- **Fornecimento de equipamentos de proteção individual e coletiva**, como chapéus, roupas leves, sombreamento em áreas de colheita e ventilação natural em galpões.
- **Campanhas de conscientização**, especialmente em regiões com maior índice de acidentes, sobre os riscos específicos de cada faixa etária, com foco em trabalhadores jovens (20-39 anos) que concentram a maioria dos acidentes.
- **Integração de dados meteorológicos** e IBUTG nos sistemas de vigilância em saúde do trabalhador, permitindo a antecipação de medidas protetivas em períodos críticos.

A pesquisa também reforça a importância da incorporação do estresse térmico nos programas de fiscalização do trabalho rural realizados por auditores do Ministério do Trabalho e Emprego, especialmente em períodos de maior risco climático. Igualmente relevante é a ampliação da cobertura dos programas de saúde do trabalhador nas regiões rurais, com estratégias que contemplem a atenção primária, a capacitação de agentes comunitários e a prevenção de agravos térmicos. Também se recomenda o fomento a programas de educação climática e ocupacional no meio rural, por meio de campanhas informativas desenvolvidas em parceria com sindicatos, cooperativas e comunidades agrícolas, a fim de difundir boas práticas de adaptação ao calor e ao frio.

Do ponto de vista da infraestrutura, torna-se essencial ampliar o acesso a subsídios e linhas de crédito para que agricultores possam investir em melhorias, como sombreamento em áreas de colheita, sistemas de ventilação natural em galpões e estufas, e equipamentos de proteção térmica apropriados. A criação de protocolos de vigilância ativa para grupos vulneráveis, como idosos e trabalhadoras temporárias, deve considerar suas especificidades fisiológicas, sociais e laborais. Por fim, recomenda-se a integração de dados meteorológicos ao planejamento agrícola e às normas de SST, de modo que atividades possam ser reprogramadas em dias críticos, e safras, planejadas com menor exposição ao estresse térmico.

Tais recomendações estão em consonância com o marco legal brasileiro vigente e podem ser articuladas a políticas públicas já existentes, como a Política Nacional de Saúde do Trabalhador e da Trabalhadora (PNSTT), o Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima e o Plano Safra. Sua implementação tem o potencial de não apenas reduzir acidentes e agravos relacionados ao trabalho, mas também fortalecer a resiliência climática no setor agrícola e promover maior justiça social no campo.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa teve como foco a análise de acidentes de trabalho no setor agrícola brasileiro, buscando compreender como fatores ocupacionais, características sociodemográficas e condições térmicas se inter-relacionam na ocorrência desses eventos. Através da integração de dados da CAT com registros meteorológicos do INMET, foi possível aplicar técnicas de mineração de dados, especialmente o algoritmo *K-Protótipos*, para detectar padrões relacionados ao estresse térmico. Essa abordagem revelou agrupamentos relevantes de risco e contribuiu para ampliar o entendimento sobre os determinantes climáticos e sociais que influenciam os acidentes no campo.

Os resultados evidenciam que tanto as condições ambientais quanto os perfis ocupacionais estão diretamente associados à incidência de acidentes. Trabalhadores homens, adultos e atuantes em regiões como o Centro-Oeste, Nordeste e Norte foram os mais afetados. O estudo também apontou desigualdades persistentes, como a vulnerabilidade de idosos em ambientes frios e a predominância masculina nas notificações, indicando lacunas na equidade de proteção laboral.

Apesar da robustez metodológica e da abrangência das bases utilizadas, a pesquisa enfrentou algumas limitações. A ausência de registros meteorológicos em determinados municípios exigiu a utilização de dados da estação mais próxima, o que pode não representar com precisão as condições climáticas reais do local do acidente. Além disso, lacunas e valores ausentes em variáveis importantes reduziram parte da base analisada, comprometendo, em certa medida, a completude da amostra.

Outro ponto crítico foi a exclusão dos trabalhadores informais, dado que a base CAT contempla apenas empregados formais vinculados ao INSS. Este fator representa uma subrepresentação importante, já que a informalidade é significativa na agricultura. Trabalhadores não formalizados, muitas vezes expostos a condições adversas e sem acesso a equipamentos de proteção, acabam ficando invisíveis nas estatísticas oficiais, o que pode distorcer a percepção real do impacto climático sobre a saúde e segurança no trabalho rural.

A utilização do algoritmo *K-Protótipos* mostrou-se eficaz na identificação de padrões em dados mistos, mas possui limitações ao lidar com relações de alta complexidade e variáveis interdependentes. Interações dinâmicas entre fatores ambientais, organizacionais e individuais podem ter sido parcialmente subestimadas. A ausência de variáveis como etnia, escolaridade ou indicadores socioeconômicos restringiu a capacidade analítica para mapear desigualdades mais profundas nas condições de trabalho.

Para pesquisas futuras é importante ampliar o escopo das bases de dados utilizadas, incorporando informações referentes a trabalhadores informais e autônomos, que frequentemente estão ausentes nas estatísticas oficiais. Adicionalmente, a inclusão de variáveis que abordem aspectos psicossociais, condições de saúde e fatores socioeconômicos contribuiria para uma análise mais integrada e realista dos determinantes dos acidentes de trabalho. No que diz respeito aos dados climáticos, a utilização de fontes com maior resolução espacial, bem como a aplicação de métodos mais sofisticados de interpolação, pode aprimorar a acurácia das análises e oferecer um panorama mais preciso sobre os efeitos do estresse térmico nas dinâmicas ocupacionais.

Adicionalmente, a utilização de abordagens analíticas mais robustas, como redes neurais e algoritmos de *deep learning*, pode ampliar a capacidade de identificação de padrões complexos e aperfeiçoar modelos preditivos. Seria igualmente relevante promover estudos comparativos entre setores econômicos distintos, diferentes regiões do país ou entre nações, com o objetivo de explorar como variáveis locais e globais influenciam os índices de acidentes ocupacionais. Por fim, a construção de ferramentas práticas, como sistemas preditivos e diretrizes personalizadas, pode apoiar a formulação de políticas públicas mais eficazes, especialmente voltadas à proteção de grupos em situação de maior vulnerabilidade, como trabalhadores idosos, mulheres e populações em situação de informalidade.

REFERÊNCIAS

ACHARYA, P.; BOGGESS, B.; ZHANG, K. Assessing heat stress and health among construction workers in a changing climate: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 15, n. 2, 2018. <https://doi.org/10.3390/ijerph15020347>.

AGRESTI, A. **Categorical data analysis**. John Wiley & Sons, 2013.

ALMEIDA, C. G.; NASCIMENTO, T.; NUNES, N. M. S. A importância da Segurança no Trabalho Para as Organizações. **Revista Científica Interdisciplinar Múltiplos Acessos**, [s.l], v 3, n 2, p. 85-98, jul./dez. 2018.

ALMEIDA, N. C. D., SANTOS, R. P., PACHECO, C. S. G. R., & MOREIRA, M. B. As Implicações Das Mudanças Climáticas Na Agricultura Familiar: O Pnae E Os Seus Riscos No Futuro. In: **MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SEUS IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS CONCEPÇÕES, FUNDAMENTOS, TEORIAS E PRÁTICAS MITIGADORAS**. Editora Científica Digital, 2023. p. 90-103.

ANSAH, E. W.; ANKOMAH-APPIAH, E.; AMOADU, M.; SARFO, J. O. Climate change, health and safety of workers in developing economies: A scoping review. **The Journal of Climate Change and Health**, v. 3, p. 100034, 2021.

APPLEBAUM, K. M. et al. An overview of occupational risks from climate change. *Current Environmental Health Reports*, v. 3, n. 1, p. 13–22, 2016. <https://doi.org/10.1007/s40572-0160081-4>

BATISTA, A. G.; SANTANA, V. S.; FERRITE, S. Registro de dados sobre acidentes de trabalho fatais em sistemas de informação no Brasil. **Revista Ciência e Saúde Coletiva**, v.24, p. 693-704, 2019.

BELDING, H. S.; HATCH, T. F. Index for evaluating heat stress in terms of resulting physiological strains. *Heating, Piping and Air Conditioning*, v. 27, p. 129–136, 1955.

BENTES, F.; TEIXEIRA, E.; COLUCCI, A. L. A agricultura familiar no Brasil e seus riscos laborais: Uma abordagem prevencionista. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 8, p. e6812842919-e6812842919, 2023.

BESERRA, L.; HENNINGTON, É. A.; PIGNATTI, M. G. Condições de trabalho e saúde de trabalhadoras rurais: uma revisão integrativa. *Saúde em Debate*, v. 47, n. 137, p. 298–315, 2023.

BITENCOURT, D. P.; MAIA, P. A.; ROSCANI, R. C. The heat exposure risk to outdoor workers in Brazil. **Archives of Environmental and Occupational Health**, v. 75, n. 5, p. 281–288, 2020.

BITENCOURT, D. P.; MAIA, P. A.; RUAS, Á. C.; CUNHA, I. D. Â. D. Trabalho a céu aberto: passado, presente e futuro sobre exposição ocupacional ao calor. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, v. 48, p. edcinq13, 2023.

BITENCOURT, D. P.; RUAS, Á. C.; MAIA, P. A. Análise da contribuição das variáveis meteorológicas no estresse térmico associada à morte de cortadores de cana-de-açúcar. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 28, n. 1, p. 65–74, 2012.

BLASHFIELD, R. K; ALDENDERFER, M. S. Computer programs for performing iterative partitioning cluster analysis. **Applied Psychological Measurement**, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, v. 2, n. 4, p. 533–541, 1978.

BRASIL. Consolidação das Leis do Trabalho. Decreto-Lei nº 5.452, de 1º de maio de 1943. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 9 ago. 1943. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/del5452.htm. Acesso em: 08 jun. 2025.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Previdência Social. Portaria nº 3.214, de 08 de junho de 1978. Aprova as Normas Regulamentadoras –NR –do Capítulo V, Título II, da Consolidação das Leis do Trabalho, relativas a Segurança e Medicina do Trabalho. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 8 jun. 1978. Disponível em: http://www.trtsp.jus.br/geral/tribunal2/ORGAOS/MTE/Portaria/P3214_78.html. Acesso em: 02 nov. 2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Mulheres rurais: empoderamento e políticas públicas*. Brasília: MAPA, 2019.

BRASIL. Lei nº 8.213, de 24 de julho de 1991. Dispõe sobre os Planos de Benefícios da Previdência Social e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 1991. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l8213cons.htm. Acesso em: 02 nov. 2024.

BRASIL. Ministério da Economia. Secretaria Especial de Previdência e Trabalho. Portaria Nº 6.730, de 09 de Março de 2020. Aprova a nova redação da Norma Regulamentadora nº 01 - Disposições Gerais e Gerenciamento de Riscos Ocupacionais. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ed. 49, p. 17, 12 mar. 2020. Disponível em: <http://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-6.730-de-9-de-marco-de-2020-247538988>. Acesso em: 02 nov. 2024.

BRASIL. Ministério da Economia. Secretaria do Trabalho. *Norma Regulamentadora nº 15 – Atividades e Operações Insalubres. Anexo 3 – Limites de Tolerância para Exposição ao Calor*. Brasília: Ministério da Economia, 2020.

BRASIL. **Ministério da Previdência Social**. Anuário Estatístico de Acidentes do Trabalho – AEAT. Disponível em: <https://www.gov.br/previdencia/pt-br/assuntos/previdenciasocial/dados-estatisticos-previdencia-social-e-inss>. Acesso em: 2 nov. 2024.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 15 – Atividades e operações insalubres**. Portaria nº 3.214, de 8 de junho de 1978. Atualizada pela Portaria MTP nº 1.359, de 9 de dezembro de 2022 (BRASIL, 2025a).

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 31 – Segurança e saúde no trabalho na agricultura, pecuária, silvicultura, exploração florestal e aquicultura**. Portaria nº 3.214, de 8 de junho de 1978. Atualizada pela Portaria MTP nº 1.410, de 21 de dezembro de 2022. (BRASIL, 2025b).

BREITENBACH, R.; CORAZZA, G.; DEBASTIANI, L. Sucessão familiar na agricultura: cenário internacional. **Inter disciplina**, v. 9, n. 25, p. 115-138, 2021.

BORDIGNON, L. **Estudo de caso: o trabalhador e o acidente de trabalho**. Porto Alegre, Faculdade de Medicina – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2009.

CAMILO, C. O.; SILVA, J. C. Mineração de Dados: Conceitos, Tarefas, Métodos e Ferramentas. **Technical Report - RT-INF_001-09 - Relatório Técnico**, 2009.

CAMINADE, C.; MCINTYRE, K. M.; JONES, A. E. Impact of recent and future climate change on vector-borne diseases. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1436, n. 1, p. 157–173, 2019.

CARVALHO, C. A. da S.; SILVA, J. C. da; LIMA, J. L. L. P. C. de; BRUM, S. da S. Saúde e Segurança no Trabalho: um relato dos números de acidentes do trabalho e doenças ocupacionais no Brasil (2012-2018). **Brazilian Journal of Business**, [S. l.], v. 2, n. 3, p. 2909–2926, 2020.

DOI: 10.34140/bjbv2n3-070. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJB/article/view/16488>. Acesso em: 28 out. 2024.

CASTRO, M. A. T. A. **Agrupamento – “Clustering”**. Engenharia Informática, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2003.

CAVALCANTE, C. A. A.; COSSI, M. S.; COSTA, R. R. O.; MEDEIROS, S. M.; MENEZES, R. M. P. Análise crítica dos acidentes de trabalho no Brasil. **Revista de Atenção à Saúde**, v. 13, n. 44, p. 100-109, abr./jun. 2015.

CARVALHO, L. F.; SANTOS, P. V. S. A ergonomia no contexto das atividades rurais: uma revisão bibliográfica. **INOVAE-Journal of Engineering, Architecture and Technology Innovation (ISSN 2357-7797)**, v. 8, n. 1, p. 251-269, 2020.

CNA - CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL. **PIB do Agronegócio**. 2025. Disponível em: https://www.cepea.org.br/upload/kceditor/files/CT-PIBAGRO_08.ABR.25-1.pdf. Acesso em: 1 junho de 2025.

COELHO, M. Z.; VERAS, M. M.; SALDIVA, P. Saúde e Clima: a Hora da medicina. **ANAIS da ACADEMIA NACIONAL DE MEDICINA**, v. 193, p. 2, 2022.

DI BLASI, C.; MARINACCIO, A.; GARIAZZO, C.; TAIANO, L.; BONAFEDE, M.; LEVA, A.; MORABITO, M.; MICHELOZZI, P.; DE' DONATO, F. K. Effects of temperatures and heatwaves on occupational injuries in the agricultural sector in Italy. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 20, n. 4, p. 2781, 2023.

DUNN, O. J. Multiple comparisons using rank sums. *Technometrics*, v. 6, n. 3, p. 241–252, 1964.

FARIA, J. A. A.; ANDRADE, E. T.; OLIVEIRA, F. S. Occupational Risks of Agricultural Workers Exposed to Heat: Literature Review. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 18, n. 1, p. e07468-e07468, 2024.

FARO, K. C. Entraves logísticos ao desenvolvimento agrícola brasileiro à luz da Nova Economia Institucional. *Diversitas Journal*, 6(4), 4043–4066. <https://doi.org/10.48017/dj.v6i4.1992>, 2021.

FAYYAD, U.; PIATETSKY-SHAPIRO, G.; SMYTH, P. From Data Mining to Knowledge Discovery in databases. **AI Magazine**. v. 17, no. 3, p. 37–54, 1996.

FAYYAD, U.; GRINSTEIN, G. G.; WIERSE, A. Information Visualization. In: **Data Mining And Knowledge Discovery**. Morgan Kaufmann Publishers Inc, San Francisco, CA, USA, 2002.

FERNANDES, F. T.; CHIAVEGATTO FILHO, A. D. P. Perspectivas do uso de mineração de dados e aprendizado de máquina em saúde e segurança no trabalho. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, v. 44, 2019.

FERRARI, D. G.; SILVA, L. N. C. **Introdução a mineração de dados**. Saraiva, 2017.

FERRARI, G. N.; LEAL, G. C. L.; THOM DE SOUZA, R. C.; GALDAMEZ, E. V. C. Impact of climate change on occupational health and safety: a review of methodological approaches. *Work*, v. 74, n. 2, p. 485–499, 2023.

FERRARI, G.N.; DOS SANTOS, G.C.; OSSANI, P.C.; LEAL, G.C.L.; GALDAMEZ, E.V.C. *Analysis of the Climate Impact on Occupational Health and Safety Using Heat Stress Indexes. International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 22, n. 1, p. 130, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph22010130>

FERRARI, G. N.; OSSANI, P. C.; THOM DE SOUZA, R. C.; LEAL, G. C. L.; GALDAMEZ, E. V. C. Impact of rising temperatures on occupational accidents in Brazil in the period 2006 to 2019: a multiple correspondence analysis. *Safety Science*, v. 161, p. 106078, 2023.

FILGUEIRAS, V. A. **Saúde e segurança do trabalho na construção civil brasileira**. 1 ed. Aracaju: J. Andrade, 2015.

FISHER, R. A. On the interpretation of χ^2 from contingency tables, and the calculation of P. *Journal of the Royal Statistical Society*, v. 85, n. 1, p. 87–94, 1922.

FLOURIS, A. D.; DINAS, P. C.; IOANNOU, L. G.; NYBO, L.; HAVENITH, G.; KENNY, G. P.; KJELLSTROM, T. Workers' health and productivity under occupational heat strain: a systematic review and meta-analysis. *The Lancet Planetary Health*, v. 2, n. 12, p. e521e531, 2018.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). *Gender and land rights database*. Rome: FAO, 2020. Disponível em: <https://www.fao.org/gender-landrights-database>. Acesso em: 15 mar. 2025.

FUNDACENTRO. **Norma de Higiene Ocupacional NHO 06 – Avaliação da exposição ao calor**. São Paulo: Fundacentro, 2017.

GALVÃO, N. D. **Aplicação da mineração de dados em bancos da segurança e saúde pública em acidentes de transporte**. Tese (Doutorado) Universidade Federal de São Paulo. Escola Paulista de Medicina. Programa de Pós Graduação em Enfermagem. São Paulo, 2009.

GARCIA, D. B.; CHIAVEGATO FILHO, L. G.. Notificações de acidentes de trabalho e informalidade: análise em São João del-Rei (MG). In: *Encena – Revista de Evidências em Saúde do Trabalhador*, UFT, 2022.

GONZALEZ, R.; FIACCHINI, M.; IAGNEMMA, K. Slippage prediction for off-road mobile robots via machine learning regression and proprioceptive sensing. *Robotics and Autonomous Systems*, v. 105, p. 85–93, 2018.

GORDON, A. David. **Classification**. CRC Press, 1999.

GUBERNOT, D. M.; ANDERSON, G. B.; HUNTING, K. L. Characterizing occupational heat-related mortality in the United States, 2000–2010: An analysis using the census of fatal

occupational injuries database. **American journal of industrial medicine**, v. 58, n. 2, p. 203211, 2015.

GUBERNOT, D. M.; ANDERSON, G. B.; HUNTING, K. L. Characterizing occupational heat-related mortality in the United States, 2000–2010: an analysis using the census of fatal occupational injuries database. **American Journal of Industrial Medicine**, v. 58, n. 2, p. 203–211, 2015.

HABIBI, P; MORADI, G; MORADI, A, HEYDARI, A. The impacts of climate change on occupational heat strain in outdoor workers: A systematic review. **Urban Climate**, v. 36, p. 100770, 2021.

HAMED, A. R.; EGELA, M. E.; MOSA, S. E.; SHAHATA, Y. A.; ALLAM, H. K.; YOUNIS, F. E. Effect of heat stress on agricultural field workers safety. **Egyptian Journal of Agricultural Research**, v. 96, n. 4, p. 1515-1527, 2018.

HOOD, S. B.; CRACKNELL, M. J.; GAZLEY, M. F. Linking protolith rocks to altered equivalents by combining unsupervised and supervised machine learning. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 186, p. 270–280, 2018.

HOUGHTEN, F. C.; YAGLOU, C. P. Determining lines of equal comfort. *ASHVE Transactions*, v. 29, p. 163–176, 1923.

HU, J. et al. Temperature-related mortality in China from specific injury: a national timeseries study. *Nature Communications*, v. 14, n. 1, 2023. DOI: 10.1038/s41467-022-35462-4.

HUANG, Z. Extensions to the k-means algorithm for clustering large data sets with categorical values. **Data Mining and Knowledge Discovery**, v. 2, p. 283–304, 1998.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **De 2010 a 2022, a população brasileira cresce 6,5% e chega a 203,1 milhões**. Agência de Notícias IBGE, 25 set. 2023. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/37237-de-2010-a-2022-populacao-brasileira-cresce-6-5-e-chega-a-203-1-milhoes>. Acesso em: 24 nov. 2024.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Classificação Nacional de Atividades Econômicas – CNAE*. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://cnae.ibge.gov.br>. Acesso em: 6 jun. 2025.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Panorama do Censo 2022*. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>. Acesso em: 08 jun. 2025.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Estatísticas de gênero: indicadores sociais das mulheres no Brasil*. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101784>. Acesso em: 29 mar. 2025.

IIDA, I; GUIMARÃES, L. B. M. **Ergonomia: Projeto e Produção**. 3 ed. São Paulo: Blucher, 2016.

ILO - International Labour Organization (2020). Quick guide on sources and uses of statistics on occupational safety health. Disponível em: < https://www.ilo.org/global/statistics-and-databases/publications/WCMS_759401/lang--en/index.htm >. Acesso em: 28 Out 2024.

ILO - International Labour Organization. *Working on a warmer planet: the impact of heat stress on labour productivity and decent work*. Geneva: ILO, 2019.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. Dados meteorológicos históricos. 2024. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/> . Acesso em: 10 abr. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 7243:2017 – Ergonomics of the thermal environment – Assessment of heat stress using the WBGT (wet bulb globe temperature) index*. Geneva: ISO, 2017.

IOANNOU L.G.; MANTZIOS K.; TSOUTSOUBI L.; NINTOU E.; VLIORA M.; GKIATA P.; DALLAS C.N.; GIKAS G.; AGALITIS G.; SFAKIANAKIS K.; KAPNIA A.K.; TESTA D.J.; AMORIM T.; DINAS P.C.; MAYOR T.S.; GAO C.; NYBO L.; FLOURIS A.D. Occupational heat stress: multi-country observations and interventions. **International journal of environmental research and public health**, v. 18, n. 12, p. 6303, 2021.

IPCC. Technical Summary. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis.**, v. 1, n. 1, p. 3949, 2021.

ISO. **ISO 7243: Ergonomics of the thermal environment - Assessment of heat stress using the WBGT index**. Geneva: International Organization for Standardization, 2017.

JAIN, A. K.; DUBES, R. C. **Algoritmos para agrupamento de dados**. Prentice-Hall, Inc., 1988.

JIANG, T.; GRADUS, J. L.; ROSELLINI, A. J. Supervised machine learning: A brief primer. **Behavior Therapy**, v. 51, n. 5, p. 675-687, 2020.

JÚNIOR, C. J. D. S. *et al.* Políticas públicas de segurança e saúde no trabalho (SST) no Brasil: sistematização das ações federais vigentes em 2023. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 30, supl. 1, e14452023, 2025. DOI: — (estudo exploratório de políticas públicas).

KAUFMAN, L.; ROUSSEEUW, P. J. **Encontrando grupos em dados: uma introdução à análise de cluster**. John Wiley & Sons, 2009.

KASSAMBARA, A. *Practical guide to cluster analysis in R: unsupervised machine learning*. [S.l.]: STHDA, 2017.

KAWAKAMI, T. *Developing national programs for occupational safety and health in South Asia*. *Journal of Occupational Health*, v. 67, n. 1, p. e24-013, 2025. DOI:10.57523/jaohlev.rep.24-013.

KIEFER, M.; RODRÍGUEZ-GUZMÁN, J.; WATSON, J.; VAN WENDEL DE JOODE, B.; MERGLER, D.; DA SILVA, A. S. Worker health and safety and climate change in the Americas: issues and research needs. **REVISTA PANAMERICANA DE SALUD**

PUBLICA-PAN AMERICAN JOURNAL OF PUBLIC HEALTH, v. 40, n. 3, p. 192–197, 2016.

KJELLSTROM, T.; BRIGGS, D.; FREYBERG, C.; LEMKE, B.; OTTO, M.; HYATT, O. Heat, human performance, and occupational health: a key issue for the assessment of global climate change impacts. **Annual Review of Public Health**, v. 37, p. 97–112, 2016.

KJELLSTROM, T.; HOLMER, I.; LEMKE, B. Workplace heat stress, health and productivity – an increasing challenge for low and middle-income countries during climate change. **Global Health Action**, v. 2, p. 2047, 2009.

KJELLSTROM, T.; LEMKE, B.; OTTO, M. Climate conditions, workplace heat and 66 occupational health in South-East Asia in the context of climate change. **WHO South-East Asia journal of public health**, v. 6, n. 2, p. 15–21, 2017.

KRIEGEL, H. P; KRÖGER, P.; SANDER, J.; ZIMEK, A. Density-based clustering. **Wiley interdisciplinary reviews: data mining and knowledge discovery**, Wiley Online Library, v. 1, n. 3, p. 231–240, 2011.

KRUSKAL, W. H.; WALLIS, W. A. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*, v. 47, n. 260, p. 583–621, 1952.

LAROSE, D. T. **Discovering Knowledge in Data: An Introduction to Data Mining**. John Wiley and Sons, Inc, 2005.

LAROSE, D. T.; LAROSE, C. D. **Discovering knowledge in data: an introduction to data mining**. John Wiley & Sons, 2014.

LEE, G.-Y.; PARK, K.-S. *Development and validation of an Agricultural Safety and Health Literacy (ASHL) tool*. *Journal of Multidisciplinary Healthcare*, v. 18, p. 4061-4071, 2025. DOI:10.2147/JMDH.S528979.

LEE, W.; KANG, M.-Y.; KIM, J.; LEE, S.; KIM, Y. Association between exposure to extreme temperature and injury at the workplace. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 16, n. 24, p. 4955, 2019. DOI: 10.3390/ijerph16244955.

LEVENE, H. Robust tests for equality of variances. In: OLKIN, Ingram et al. (Org.). *Contributions to probability and statistics: essays in honor of Harold Hotelling*. Stanford: Stanford University Press, 1960. p. 278–292.

LINDSLEY, M.; CADORETTE, M. Preventing heat-related illness in the workplace. **Workplace Health & Safety**, Thousand Oaks, CA, USA, v. 63, n. 4, p. 192-192, 2015.

LIU, J.; KONG, X.; ZHOU, X.; WANG, L.; ZHANG, D.; LEE, I.; XU, B.; XIA, F. Data Mining and Information Retrieval in the 21st century: A bibliographic review. **Computer Science Review**, v. 34, p. 100193, 2019.

LIU, W.; TIAN, X.; TAO, M. A model to quantify the relation between cognitive performance and thermal responses in high temperature at a moderate activity level. **Building and Environment**, v. 207, p. 108431, 2022.

LUCAS, R. A.; EPSTEIN, Y.; KJELLSTROM, T. Excessive occupational heat exposure: a significant ergonomic challenge and health risk for current and future workers. **Extreme physiology & medicine**, 3, 14, 2014.

MACHADO, A. A. *Análise da subnotificação de acidentes de trabalho fatais no Brasil*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2021.

MAIA, R.; BITENCOURT, D. P.; ROSCANI, F. Índice de bulbo úmido e termômetro de globo (IBUTG): uma proposta de cálculo a partir de dados meteorológicos públicos. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, São Paulo, v. 45, e19, 2020.

MCINNES, J. A. *et al.* Association between high ambient temperature and acute work-related injury: a case-crossover analysis using workers' compensation claims data. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, v. 43, n. 1, p. 86-94, 2017. DOI: 10.5271/sjweh.3602.

MEHTA, C. R.; PATEL, N. R. Exact inference for contingency tables with a large sample space. *Statistics in Medicine*, v. 15, n. 7-9, p. 649–663, 1996.

MELLER, F.; REOLON-COSTA, A.; CEOLIN, S.. Uso de agrotóxicos e os riscos à saúde humana: panorama da área rural do município de Independência-RS. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 13, p. e454101321161-e454101321161, 2021.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO (MTE). **Relatório Anual de Acidentes de Trabalho no Brasil**. Brasília: MTE, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego>. Acesso em: 14 abr. 2025.

MONTEIRO, E. P. *et al.* Sucessão na agricultura familiar brasileira: uma revisão sistemática da literatura. **Revista Brasileira de Educação do Campo**, v. 9, p. 15729-15729, 2024.

MORAES, L. T. *et al.* **Análise dos acidentes de trabalho no Brasil: causas e desafios para a prevenção**. *Revista Brasileira de Saúde Ocupacional*, v. 46, e7, 2021.

MORAN, D. S. *et al.* An environmental stress index (ESI) as a substitute for the wet bulb globe temperature (WBGT). *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, v. 73, n. 1, p. 58–63, 1998.

MUTLU, N. G.; ALTUNTAS, S. Risk analysis for occupational safety and health in the textile industry: Integration of FMEA, FTA, and BIFPET methods. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 72, p. 2019.

NASCIMENTO, D. C. G. A.; PIGNATTI, M. G.; LEÃO, L. H. C.; OLIVEIRA, Â, L. P.; SILVA, A. M. C. Health, work, and development: agribusiness and accidents in a state in the Brazilian Amazon region. **Cadernos Saúde Coletiva**, v.24, n.3, p.286-293, 2016.

OBSERVATÓRIO DIGITAL DE SAÚDE E SEGURANÇA NO TRABALHO. 2024, online. Disponível em: <https://smartlabbr.org/sst>. Acesso em: 27 out. 2024.

OLIVEIRA, A. G. Contribuições ao estudo da dinâmica na teoria da informação: aplicações em clustering dinâmico. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e de Computação) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

OLIVEIRA, R. M. *et al.* **Índice de estresse térmico como ferramenta para avaliação de ambientes de trabalho no Brasil.** Revista Brasileira de Saúde Ocupacional, São Paulo, v. 43, 2018.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO TRABALHO (OIT). **Building a preventative safety and health culture: Report 2022.** Geneva: ILO, 2022.

REIS, B. L.; RAFAEL, C.; LEAL, G. C. L.; SOUZA, R. C. T.; GALDAMEZ, E. V. C. Doenças e acidentes de trabalho no Brasil: uma análise exploratória de dados. In: X Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. Anais eletrônicos do ConBRepro, p. 1-12, 2020.

RICCÒ, M.; VEZZOSI, L.; BALZARINI, F.; GUALERZI, G.; VALENTE, M.; BRAGAZZI, N. L. Air temperatures and occupational injuries in the agricultural settings: a report from Northern Italy (Po River Valley, 2013–2017). **Acta Biomedica**, v. 91, n. 4, p. e2020094, 2020.

RODRIGUES, F. M. S.; NOGUEIRA-JÚNIOR, C.; AMARAL, E. M. S.; FERNANDES, A. C. P. Notificação de acidentes de trabalho com perfurocortantes: Experiências de uma equipe de enfermagem. **Rev. Enf-UFJF**; 1(2):145-152, 2015.

RODRIGUES, H. E. *et al.* Mulheres na agricultura familiar: uma análise no estado do Pará. **Guaju**, v. 7, n. 2, p. 237-263, 2021.

ROSA, V. C.; LIMA, L. E. M. O estresse térmico visto como um risco ocupacional. **Revista Gestão Industrial**, v. 15, n. 2, 2019.

ROTHFUSZ, L. P. **The Heat Index Equation.** National Weather Service Technical Attachment, Fort Worth, Texas, 1990.

SANTANA, V.; NOBRE, L.; WALDVOGEL, B. C. Acidentes de trabalho no Brasil entre 1994 e 2004: uma revisão. *Ciência e Saúde Coletiva*, v. 10, n. 4. 2005.

SANTOS, A. A. R.; DA SILVA, E. P.; PEREIRA, T. G. T.; MARZOQUE, H. J. Acidentes de trabalho nas principais atividades do setor agrícola no Brasil entre 2013 e 2018. **Scire Salutis**, v. 11, n. 1, p. 134-145, 2021.

SANTOS, A. C. P. C. **Técnicas de Data mining: análise ao cesto de compras e segmentação de clientes de um supermercado.** Dissertação de Mestrado (Mestrado em Gestão de Informação). Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2020.

SCANDELAI, N. T. Tecnologias e inovação em saúde e segurança ocupacional: avançando a prevenção por meio de monitoramento e big-data. *Brazilian Journal of Development*, v. 11, n. 5, p. 78096, 2025. DOI: — (artigo técnico-metodológico sobre inovação em SST).

SCHAEFER, L. S.; LOBO, B. O. M.; KRISTESEN, C. H. Transtorno de estresse pós-traumático decorrente de acidente de trabalho: implicações psicológicas, socioeconômicas e jurídicas. Estudo de Psicologia (Natal). 2012.

SETTE, D. M.; RIBEIRO, H. Interações entre o clima, o tempo e a saúde humana. **InterfacEHS-Revista de Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 6, n. 2, 2011.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, v. 52, n. 3/4, p. 591–611, 1965.

SHARMA, M.; SURI, N. M.; KANT, S.; ALAM, M. S. A sensor-based monitoring solution. **Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries**, v. 32, n. 5, p. 389-405, 2022.

SIEGEL, S.; CASTELLAN, N. J. Jr. *Estatística não-paramétrica para ciências do comportamento*. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006.

SILVA, J. L. “Caiu no meu íntimo”: repercussões dos acidentes de trabalho na vida dos trabalhadores (Dissertação de Mestrado). Pontifícia Universidade Católica de Campinas. 2018.

SILVA, L. C. B.; GATTO, M. F.; COSTA, A. M. Desigualdade de gênero: uma análise sobre a dupla jornada de trabalho da mulher. 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/361344074_Desigualdade_de_genero_uma_analise_sobre_a_dupla_jornada_de_trabalho_da_mulher. Acesso em: 1 jun. 2025.

SILVEIRA, R. D. *Risco climático, vulnerabilidade socioespacial e eventos climáticos extremos relacionados ao calor e ao frio no estado do Rio Grande do Sul - Brasil*. 2014. 377 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2014.

SIMON, P. C.; CECATTO, A. P.; REOLON-COSTA, A.; CAMERA, J. N.; CATTANEO, R. Environment and health: perspective of rural producers against the use of agricultural pesticide. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 11, n. 8, p. e49611831394, 2022.

SPECTOR, J. T.; BONAUTO, D.; SHEPPARD, L.; BUSCH-ISAKSEN, T.; CALKINS, M.; ADAMS, D.; LIEBLICH, M.; FENSKE, R. A. A case-crossover study of heat exposure and injury risk in outdoor agricultural workers. **PLoS One**, v. 11, n. 10, p. e0164498, 2016.

THOM, E. C. The discomfort index. *Weatherwise*, v. 12, n. 2, p. 57–61, 1959.

VARGHESE, B. M. et al. The burden of occupational injury attributable to high temperatures – Australia 2014–19. *Medical Journal of Australia*, v. 219, n. 11, p. 531-536, 2023. DOI: 10.5694/mja2.52098.

VENUGOPAL, V. et al. *Occupational heat stress induced health impacts: A cross-sectional study from South Indian working population*. **Advances in Climate Change Research**, v. 11, n. 1, p. 31–39, 2020.

VIOLA, E.; MENDES, V. Agricultura 4.0 e mudanças climáticas no Brasil. **Ambiente & Sociedade**, v. 25, p. e02462, 2022.

WANG, X.; LI, D.; MENASSA, C.C.; KAMAT, V.R. Investigating the effect of indoor thermal environment on occupants' mental workload and task performance using electroencephalogram. **Building and Environment**, v. 158, p. 120-132, 2019.

XU, D.; TIAN, Y. A comprehensive survey of clustering algorithms. **Annals of Data Science**, Springer, v. 2, n. 2, p. 165–193, 2015.

YEOMAN, K.; WEAKLEY, A.; DUBOSE, W.; HONN, K.; MCMURRY, T.; EITER, B.; BAKER, B.; POPLIN, G. Effects of heat strain on cognitive function among a sample of miners. **Applied ergonomics**, v. 102, p. 103743, 2022.

ZHAO, Y.; ZHANG, C.; ZHANG, Y. WANG, Z.; LI, J. A review of data mining technologies in building energy systems: Load prediction, pattern identification, fault detection and diagnosis. **Energy and Built Environment**, v. 1, no. 2, p. 149–164, 2020.

Mudanças Climáticas e Saúde Ocupacional: Padrões de Risco na Agricultura Tropical Brasileira

3.1 INTRODUÇÃO

A agricultura é uma das atividades econômicas mais antigas e fundamentais para a subsistência humana, sendo responsável pela produção de alimentos, fibras e matérias-primas em escala global. Os trabalhadores agrícolas estão entre os mais vulneráveis do ponto de vista da saúde ocupacional, especialmente em países em desenvolvimento, onde as condições laborais são frequentemente precárias e marcadas por longas jornadas, exposição direta às intempéries, uso intensivo de agrotóxicos e acesso limitado a medidas de proteção e assistência à saúde (ILO, 2015; MEENAKSHI e PANNEER, 2020).

Diversos estudos têm destacado os riscos ocupacionais enfrentados pelos trabalhadores do campo, com ênfase nas exposições ambientais, como o calor extremo, que podem provocar estresse térmico, desidratação, exaustão, perda de produtividade e aumento da incidência de acidentes de trabalho (ZANG e KIM, 2025; FERRARI *et al.*, 2023). O aquecimento global e a intensificação das ondas de calor, conforme discutem Bentes (2024) e Ramirez *et al.* (2025), elevam de forma significativa a carga térmica sobre trabalhadores expostos ao ar livre, aumentando os riscos fisiológicos e a incidência de doenças ocupacionais. A exposição prolongada ao calor intenso, especialmente em locais sem ventilação ou sob radiação solar

direta, tem sido associada ao aumento da mortalidade e morbidade, além de comprometer a capacidade laboral e a segurança operacional.

Tais riscos tendem a se intensificar diante das mudanças climáticas, que elevam as temperaturas médias e ampliam a frequência de eventos climáticos extremos, sobretudo em regiões tropicais como o Brasil (MOREIRA *et al.*, 2025; ZHANG; KIM, 2025). Segundo Sæbjørnsen *et al.* (2024), as desigualdades sociais e geográficas ampliam a vulnerabilidade, afetando de forma mais intensa trabalhadores informais, migrantes e pequenos agricultores, frequentemente invisíveis nas estatísticas e excluídos de políticas de adaptação climática.

No cenário agrícola nacional, o estado do Paraná possui importantes cadeias produtivas, como a soja, milho, trigo, leite e frango. Dados oficiais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) indicam que, em 2024, o Paraná liderou o ranking nacional no abate de frangos, com 34,2% da participação no total do país, seguido por Santa Catarina e Rio Grande do Sul (IBGE, 2025). Adicionalmente, o estado consolidou-se como vice-líder no abate de suínos, representando 21,5% do total nacional (IBGE, 2025). Além disso, levantamentos da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) reforçam o protagonismo paranaense, evidenciando sua participação expressiva nas safras de soja, milho e trigo, consolidando o estado como um dos principais polos de produção agrícola do Brasil (CONAB, 2024).

Com uma expressiva força de trabalho envolvida em atividades rurais, o Paraná também apresenta um elevado número de notificações de acidentes de trabalho no setor, o que evidencia a necessidade de análises regionais mais aprofundadas sobre os fatores associados a esses eventos. Além disso, como salientam Martins *et al.* (2010), fatores estruturais do meio rural, como infraestrutura deficiente, limitada mecanização em pequenas propriedades e carência de políticas públicas climáticas adaptadas, reduzem a capacidade de resposta a riscos térmicos e outros agravos ocupacionais.

A literatura aponta que as análises em escala nacional podem mascarar heterogeneidades importantes, como diferenças climáticas, socioeconômicas e estruturais, que impactam diretamente nas condições de trabalho e nos níveis de exposição dos trabalhadores (VIELMA *et al.*, 2024; FARIA, ANDRADE; OLIVEIRA, 2024).

Diante desse contexto, a análise exploratória para uma perspectiva regional permite compreender com mais profundidade como os fatores ambientais e ocupacionais interagem em realidades específicas. Conforme destacam Meenakshi e Panneer (2020), o estudo das condições de saúde dos trabalhadores agrícolas deve considerar recortes territoriais que possibilitem o desenvolvimento de políticas públicas adaptadas às particularidades locais.

Nesse sentido, as políticas públicas ativas de segurança e saúde ocupacional no Brasil, sistematizadas em categorias como Previdência, Trabalho e Emprego, Saúde, Gestão e Fiscalização, configuram um arcabouço institucional que pode apoiar a tradução dos resultados deste estudo em elaboração de políticas públicas de prevenção da saúde ocupacional no âmbito regional, conforme identificado por Santos Júnior *et al.* (2025).

Na agricultura tropical e subtropical, variações microclimáticas, diferentes sistemas produtivos, estrutura fundiária heterogênea e a predominância de pequenas propriedades familiares influenciam de forma significativa a exposição dos trabalhadores ao estresse térmico e, conseqüentemente, aos acidentes de trabalho. Estudos como o de Bentes (2024) reforçam a necessidade de adoção de sistemas de alerta, protocolos de pausas, adequação de jornadas e uso efetivo de equipamentos de proteção individual como estratégias fundamentais para a mitigação de riscos.

Além disso, a literatura também ressalta a importância de métodos robustos de análise de dados que consigam lidar com a complexidade e heterogeneidade das informações ocupacionais. O uso de técnicas de mineração de dados permite agrupar registros com características semelhantes, mesmo quando se trata de variáveis mistas (numéricas e categóricas), oferecendo uma compreensão mais refinada dos padrões ocultos nos dados (FAYYAD *et al.*, 1996; FERRARI *et al.*, 2023).

Considerando tais premissas, este trabalho científico tem como propósito aplicar a metodologia desenvolvida no primeiro capítulo, fundamentada no modelo de *Knowledge Discovery in Databases* (KDD) e na técnica de clusterização K-Protótipos, especificamente aos registros do estado do Paraná, no período de junho de 2018 a junho de 2024. O objetivo central é identificar padrões regionais de associação entre variáveis climáticas e acidentes de trabalho no setor agrícola, avaliando se os agrupamentos gerados a partir do recorte estadual apresentam comportamentos distintos daqueles observados na análise nacional. Dessa forma, as questões de pesquisa que orienta este estudo são: **“Quais padrões de risco ocupacional relacionados ao estresse térmico emergem quando a análise de acidentes de trabalho agrícolas é conduzida em um contexto de agricultura tropical-subtropical?”** e **“Em que medida esses padrões diferem daqueles identificados no cenário nacional?”**. Ao responder essas questões, busca-se aprofundar a compreensão sobre a distribuição dos riscos ocupacionais em nível regional, favorecendo análises mais contextualizadas e aderentes às condições típicas desses sistemas agrícolas.

Neste contexto, o presente artigo visa identificar padrões e categorias de risco ocupacional relacionados ao estresse térmico em acidentes de trabalho ocorridos no setor agrícola paranaense, por meio da aplicação de técnicas de clusterização em registros da Comunicação de Acidentes de Trabalho (CAT) integrados a variáveis meteorológicas provenientes do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), no período de junho de 2018 a junho de 2024. Os objetivos específicos são:

- Empregar o algoritmo de clusterização K-means para identificar agrupamentos de acidentes de trabalho que compartilhem características semelhantes relativas ao contexto ocupacional e às condições climáticas;
- Interpretar os clusters resultantes, evidenciando perfis de exposição ao estresse térmico e suas implicações para a saúde e segurança dos trabalhadores rurais.

3.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As mudanças climáticas têm provocado transformações significativas nos sistemas produtivos e nas condições de trabalho, especialmente em setores com forte dependência de fatores ambientais, como a agricultura. Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023), o aumento da temperatura média global em mais de 1,1°C desde o período pré-industrial tem intensificado eventos climáticos extremos, como ondas de calor, secas e tempestades. Esses fenômenos impactam diretamente a saúde humana, elevando os riscos de estresse térmico, exaustão e doenças relacionadas ao calor (VARADHARAJAN; BHASKARAN; LEE, 2024).

No contexto agrícola, os trabalhadores estão entre os mais vulneráveis aos efeitos do aquecimento global, devido à exposição prolongada ao ar livre, à radiação solar direta e à alta umidade (FERRARI *et al.*, 2025). Estudos recentes demonstram que o calor excessivo reduz a capacidade produtiva e aumenta a probabilidade de acidentes ocupacionais, especialmente em regiões tropicais e subtropicais (HU *et al.*, 2023; VARGHESE *et al.*, 2023).

A exposição ocupacional ao calor deve ser compreendida como um fenômeno multifatorial, resultante da interação entre variáveis ambientais, fisiológicas e organizacionais (LEE *et al.*, 2019). Além dos fatores climáticos, aspectos como intensidade de trabalho, tempo de exposição, uso inadequado de equipamentos de proteção e ausência de pausas regulares amplificam os efeitos do estresse térmico (MOREIRA *et al.*, 2025). Tais condições reforçam a importância da integração entre dados meteorológicos e registros ocupacionais para identificar

padrões de risco específicos, especialmente em regiões agrícolas com diferentes microclimas e estruturas produtivas.

A saúde e segurança do trabalho (SST) tem sido reconhecida como um dos pilares do desenvolvimento sustentável, estando diretamente associada ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) nº 8 da Agenda 2030, que preconiza o trabalho decente e o crescimento econômico (REIS *et al.*, 2020). No entanto, o avanço das mudanças climáticas impõe novos desafios à Saúde e Segurança do Trabalho (SST), exigindo a incorporação de variáveis ambientais nos modelos de prevenção, vigilância e monitoramento ocupacional. Estudos recentes têm demonstrado que as variações térmicas associadas ao aquecimento global influenciam diretamente a ocorrência de acidentes de trabalho, sobretudo entre trabalhadores expostos a ambientes externos e sem condições adequadas de aclimação (AL-AHMAD *et al.*, 2025).

Pesquisas baseadas em dados climáticos de alta resolução, obtidos por meio de redes meteorológicas automáticas e integrados a registros de acidentes laborais, evidenciam a relação positiva entre aumento da temperatura e elevação dos índices de lesões e doenças ocupacionais, reforçando a necessidade de políticas preventivas orientadas por evidências climáticas (ROSSI, 2025). Essa integração de dados permite não apenas a identificação de correlações lineares, mas também a detecção de padrões espaciais e temporais complexos, capazes de antecipar riscos emergentes. Conforme afirmam Sæbjørnsen *et al.* (2024), a análise sistemática de dados climáticos e ocupacionais é uma ferramenta estratégica para o planejamento de políticas públicas, especialmente em países em desenvolvimento, onde a vulnerabilidade laboral é acentuada pela informalidade e pela escassez de infraestrutura preventiva.

A literatura evidencia que os efeitos das variações térmicas não são homogêneos entre diferentes contextos regionais (VIELMA *et al.*, 2024). As características microclimáticas, a estrutura fundiária e o grau de mecanização agrícola influenciam significativamente o nível de exposição térmica e, consequentemente, a probabilidade de ocorrência de acidentes. A análise realizada neste estudo, portanto, busca compreender a interação entre clima e trabalho a partir de um recorte geográfico representativo da agricultura tropical/subtropical brasileira.

A agricultura em regiões tropicais apresenta características próprias que intensificam os riscos ocupacionais enfrentados pelos trabalhadores rurais, as exposições prolongadas ao calor e demandas físicas intensas em ambientes com alta umidade e radiação solar. Estudos que abordam os distúrbios ocupacionais em agricultores de países em desenvolvimento destacam que os trabalhadores rurais em zonas tropicais enfrentam uma combinação de exposição

térmica, uso de agrotóxicos e esforços repetitivos que contribuem para a prevalência de envenenamento por pesticidas, problemas biomecânicos e outras condições de saúde relacionadas ao trabalho agrícola (RAINBIRD; O'NEILL, 1995).

A investigação sobre trabalhadores rurais na agricultura tropical evidencia que estressores ambientais, calor, umidade e cargas físicas, são determinantes no risco à saúde e segurança dos envolvidos nessas atividades. Uma pesquisa de caso com trabalhadores da colheita de cana-de-açúcar mostrou que, em ambientes com condições térmicas adversas típicas de trópicos, a avaliação ergonômica e climática é essencial para entender a sobrecarga física e térmica no trabalho, ressaltando a necessidade de estratégias de mitigação como pausas adequadas e atenção à hidratação (BARKOKÉBAS *et al.*, 2019).

O avanço das tecnologias de análise de dados tem ampliado as possibilidades de investigação em saúde ocupacional, permitindo extrair conhecimento relevante de grandes bases heterogêneas. A metodologia de Descoberta de Conhecimento em Bases de Dados (KDD), proposta por Fayyad *et al.* (1996), constitui um referencial metodológico essencial para pesquisas que envolvem integração de dados ocupacionais e ambientais. Essa abordagem compreende as etapas de seleção, pré-processamento, mineração e interpretação dos dados, sendo amplamente utilizada em estudos de segurança do trabalho, epidemiologia e climatologia (CHEN; XU; HUANG, 2023).

As análises quantitativas multivariadas e os modelos de aprendizado não supervisionado vêm sendo incorporados em sistemas de vigilância ocupacional inteligente, permitindo o monitoramento contínuo de riscos associados às variações térmicas e às condições de trabalho (HUANG *et al.*, 2024). Tais métodos ampliam a capacidade de gestão preditiva da SST, transformando dados brutos em conhecimento estratégico para decisões de políticas públicas e empresariais.

3.3 MÉTODO DE PESQUISA

A estratégia metodológica seguiu os princípios do *modelo Knowledge Discovery in Databases* (KDD), proposto por Fayyad *et al.* (1996), concentrando-se nas etapas de tratamento, integração, mineração e análise interpretativa dos dados.

Para este estudo, foram selecionadas duas bases públicas de dados nacionais que oferecem ampla cobertura territorial e temporal: (1) a base de Comunicação de Acidente de Trabalho (CAT), proveniente dos registros da previdência social, e (2) a base de dados meteorológicos horários do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A escolha dessas

bases se justifica por sua confiabilidade, periodicidade de atualização e pela possibilidade de integração entre eventos ocupacionais e variáveis climáticas, o que é essencial para avaliar o risco de estresse térmico.

A base de dados da Comunicação de Acidente de Trabalho (CAT) é disponibilizada pela Empresa de Tecnologia e Informações da Previdência (DATAPREV) por meio do Portal Brasileiro de Dados Abertos. Esta base contém informações sobre acidentes típicos, de trajeto e doenças ocupacionais que foram oficialmente registrados por empregadores, sindicatos, médicos ou pelo próprio trabalhador, conforme prevê a legislação brasileira.

Desde junho de 2018, os dados são divulgados em formato CSV (*Comma-Separated Values*), com atualizações mensais a partir de julho de 2022 (antes eram trimestrais). Os arquivos são separados por período e incluem uma ampla gama de atributos, como sexo, idade, data do acidente, município, natureza da lesão, parte do corpo atingida, agente causador, entre outros.

No presente estudo, foi utilizado o período de junho de 2018 a junho de 2024. Inicialmente, os dados foram filtrados para contemplar apenas registros da Seção A da CNAE (Classificação Nacional de Atividades Econômicas), que corresponde às atividades de agricultura, pecuária, produção florestal, pesca e aquicultura. Em seguida, aplicou-se um filtro adicional para manter apenas os acidentes registrados no estado do Paraná.

Os dados climáticos utilizados no estudo foram obtidos do portal oficial do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que disponibiliza informações meteorológicas coletadas em mais de 750 estações automáticas distribuídas em todo o território nacional. Essas estações registram variáveis meteorológicas com frequência horária, incluindo:

- Temperatura do ar (°C);
- Umidade relativa do ar (%);
- Velocidade e direção do vento (m/s);
- Temperatura do ponto de orvalho (°C);
- Radiação solar e pressão atmosférica.

Para acessar os dados, é necessário realizar um cadastro gratuito com e-mail válido no sistema BDMET (Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa). Após a confirmação, os usuários recebem um link de acesso para download dos dados em formato CSV (*Comma-Separated Values*) podendo selecionar período, tipo de estação, frequência e variáveis desejadas.

Foram extraídos os dados horários de todas as estações automáticas do estado do Paraná, cobrindo o mesmo período da base da CAT: junho de 2018 a junho de 2024. Essa abordagem garantiu a compatibilidade temporal entre os eventos ocupacionais e as condições climáticas locais no momento de cada ocorrência.

A integração entre as duas bases foi realizada utilizando a data do acidente e a localização geográfica (município) do evento registrado na CAT. Como nem todos os municípios possuem uma estação meteorológica automática do INMET, adotou-se o critério de proximidade geográfica, utilizando para cada registro de acidente a estação mais próxima com dados climáticos completos disponíveis para a data do evento.

Para viabilizar a integração, foi criada uma chave composta com a data do acidente e o código do município. A localização das estações e dos acidentes foi georreferenciada por meio de coordenadas geográficas, permitindo calcular a distância entre os pontos. Em casos de ausência de dados meteorológicos completos na data específica do acidente (por falha na coleta ou lacuna na série), foi selecionada a segunda estação mais próxima com dados válidos.

As variáveis meteorológicas extraídas (temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento) foram utilizadas para calcular o Índice de Bulbo Úmido - Termômetro de Globo (IBUTG), de acordo com a metodologia proposta por Bitencourt, Maia e Roscani (2020). O IBUTG foi calculado para cada registro, considerando tanto a exposição ao ar livre (IBUTG Externo) quanto em ambientes cobertos ou sombreados (IBUTG Interno).

Com o objetivo de concentrar a análise especificamente no **estado do Paraná**, reconhecido por sua **agricultura de base tropical-subtropical**, marcada por alta produtividade, diversidade de sistemas produtivos e significativa participação de pequenas e médias propriedades, foi aplicado um filtro geográfico adicional, resultando em uma base composta por 4.062 registros. Esse recorte permite examinar padrões de risco ocupacional em um ambiente agrícola cuja combinação entre condições climáticas variáveis e intensa atividade econômica torna a exposição térmica especialmente relevante.

A estrutura da base de dados, após o processo de limpeza, organização e padronização das informações, foi composta por dez variáveis consideradas essenciais para a análise dos acidentes de trabalho no setor agrícola paranaense. As variáveis selecionadas foram: **idade**, correspondente à idade do trabalhador no momento do acidente; **sexo**, categorizado como masculino ou feminino; **IBUTG externo e IBUTG interno**, que representam os índices de estresse térmico calculados para ambientes ao ar livre e sombreados; **unidade federativa do empregador**, restrita ao estado do Paraná; **tipo de acidente**, classificado como típico, de trajeto

ou doença ocupacional; **agente causador**, que abrange 273 categorias distintas relacionadas às causas dos acidentes, incluindo objetos, substâncias e condições ambientais; **parte do corpo atingida**, que contempla 41 diferentes regiões corporais lesionadas; **natureza da lesão**, com 28 classificações distintas das características do trauma; e, por fim, o atributo **óbito**, que indica se houve ou não morte do trabalhador em decorrência do acidente. Essas variáveis foram escolhidas por sua relevância para a caracterização dos acidentes e por sua aplicabilidade nas análises de agrupamento com base em estresse térmico e perfil ocupacional.

A variável "idade" foi calculada a partir da diferença entre as datas de nascimento e do acidente. O IBUTG, por sua vez, não constava na base original e foi derivado a partir dos dados meteorológicos (temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento), conforme metodologia de Bitencourt, Maia e Roscani (2020).

Para facilitar as análises, algumas variáveis foram recategorizadas. O campo "parte do corpo atingida" foi agrupado em seis grandes grupos: cabeça, membros superiores, membros inferiores, tronco, sistemas/aparelhos e múltiplas partes. O "agente causador" foi reduzido de 273 para 32 categorias, e a "natureza da lesão", de 28 para 23 categorias.

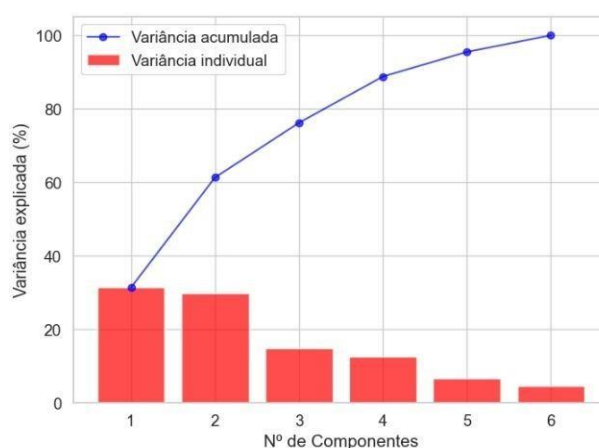
As faixas etárias foram classificadas com base nos critérios do IBGE: jovens (até 19 anos), adultos (20 a 59 anos) e idosos (a partir de 60 anos). O Código Brasileiro de Ocupações (CBO) foi considerado em seu primeiro nível hierárquico, sendo identificado o predomínio de registros no grupo 6, trabalhadores agropecuários, florestais e da pesca, foco central da análise.

Durante a etapa exploratória dos dados, observou-se que algumas variáveis apresentaram baixa variabilidade, concentrando quase todas as suas ocorrências em uma única categoria, o que reduz sua capacidade discriminativa em análises de agrupamento. Esse foi o caso das variáveis **Emitente da CAT**, **Óbito** e **Filiação**, que apresentaram distribuição altamente assimétrica. Conforme indicado por Hair *et al.* (2009), variáveis com baixa variância contribuem pouco para a diferenciação entre grupos e podem introduzir viés no processo de clusterização. Assim, optou-se por remover essas variáveis antes da aplicação dos algoritmos de agrupamento.

Para aprimorar o desempenho do algoritmo e reduzir a influência de categorias pouco representativas, realizou-se uma filtragem nas variáveis categóricas **Natureza da Lesão** e **Agente Causador**, removendo todas as categorias com menos de 15 ocorrências. Essa etapa buscou evitar a formação de clusters baseados em eventos raros, conforme recomendado em análise multivariada para aumentar a interpretabilidade dos agrupamentos (HAIR *et al.*, 2009). Após essa etapa, obteve-se uma base consolidada com **3.966 registros**.

As variáveis categóricas foram codificadas inicialmente por Análise de Correspondência Múltipla (ACM/MCA), utilizando o pacote *prince*. A MCA foi empregada com o objetivo de reduzir a dimensionalidade e preservar a estrutura das relações entre categorias em um espaço contínuo, conforme proposto por Greenacre (2017). A seleção do número de componentes foi realizada com base na variância acumulada, sendo retidas três componentes, que explicaram aproximadamente 80% da inércia total (Figura 1).

Figura 1 – Variância acumulada por componente



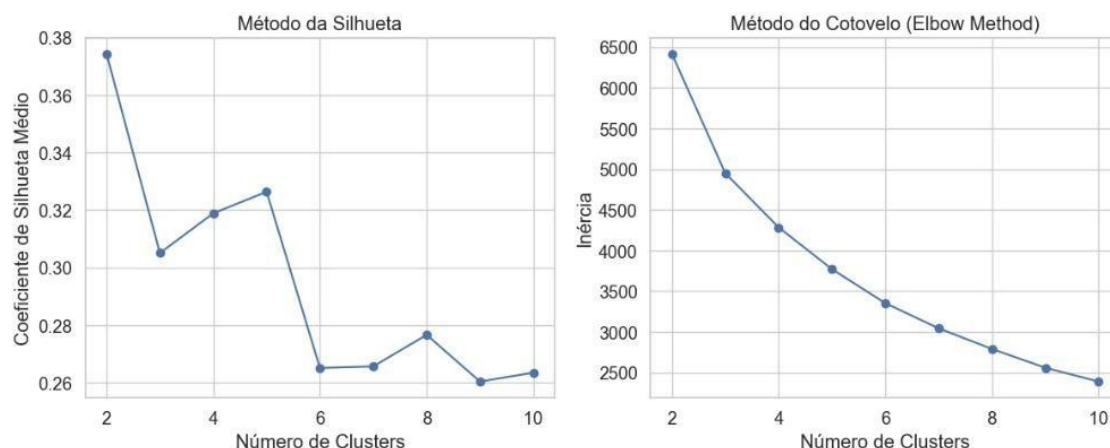
Fonte: Autoria própria (2025)

Essas componentes foram posteriormente combinadas às variáveis numéricas padronizadas por meio do método *Standard Scaler*, garantindo comparabilidade entre escalas.

A etapa de clusterização foi realizada utilizando o algoritmo **K-means**, introduzido por MacQueen (1967) e posteriormente formalizado por Lloyd (1982). Esse método baseia-se na definição de k centróides e realocação iterativa das observações de forma a minimizar a variância intra-cluster, produzindo grupos internamente homogêneos e externamente distintos. Considerando que o K-means é sensível a diferenças de magnitude entre variáveis, aplicou-se **normalização Min-Max** nas variáveis numéricas, garantindo que todas operassem na mesma faixa de valores entre 0 e 1, evitando distorções no cálculo da distância euclidiana utilizada pelo método.

Para a definição do número de clusters, inicialmente foram aplicados o **método do cotovelo**, proposto por Thorndike (1953), e o **coeficiente de silhueta**, introduzido por Rousseeuw (1987), visando identificar o ponto de estabilização da redução da variância intragrupo e o grau de separação entre os clusters. Entretanto, ambos os métodos apresentaram resultados inconclusivos, fenômeno comum em bases heterogêneas e com predominância de variáveis categóricas (Figura 2).

Figura 2 – Método da Silhueta e Método do Cotovelo



Fonte: Autoria própria (2025)

Diante dessa indefinição técnica, optou-se pela **avaliação comparativa de modelos com 3, 4 e 5 clusters**, considerando três critérios analíticos principais: distribuição das observações entre os clusters, interpretabilidade dos agrupamentos e equilíbrio entre nível de detalhamento e complexidade. A distribuição obtida está presente no Quadro 1.

Quadro 1 – Distribuição dos dados por cluster

Número de Clusters	Distribuição por Clusters
3 Clusters	0: 1.751 1: 1.315 2: 900
4 Clusters	0: 127 1: 1.683 2: 884 3: 1.272
5 Clusters	0: 124 1: 1.206 2: 349 3: 844 4: 1.443

Fonte: Autoria própria (2025)

O modelo com três clusters gerou apenas dois perfis claramente definidos, além de um grupo intermediário pouco caracterizado, o que restringiu a identificação de padrões relevantes entre as variáveis climáticas e ocupacionais. Por outro lado, o modelo com cinco clusters,

embora apresentasse maior detalhamento, não proporcionou ganhos significativos de interpretação, uma vez que alguns grupos exibiram características muito semelhantes ou baixa representatividade numérica, dificultando comparações consistentes.

Dessa forma, optou-se pelo modelo com quatro clusters, por oferecer uma segmentação mais equilibrada, capaz de evidenciar diferenças significativas entre os perfis de acidentes, mantendo, ao mesmo tempo, coerência analítica e relevância prática para a compreensão da relação entre condições térmicas e características ocupacionais no setor agrícola.

Após a definição do número ótimo de agrupamentos, procedeu-se à verificação da associação entre os clusters formados e as variáveis categóricas do conjunto de dados. Para essa etapa, aplicou-se o **teste do qui-quadrado de independência**, com o objetivo de avaliar se a distribuição das categorias das variáveis diferia significativamente entre os grupos identificados pelo algoritmo de clusterização.

Foram incluídas na análise as seguintes variáveis categóricas: *Tipo de Acidente*, *Sexo*, *Divisão da Parte do Corpo Atingida*, *Divisão da Natureza da Lesão*, *Divisão do Agente Causador* e *Faixa Etária*. Para cada variável, foi construída uma tabela de contingência cruzando suas categorias com os clusters obtidos, a partir da qual foram calculados os valores do qui-quadrado e o respectivo *p*-valor.

Antes da aplicação do teste, verificou-se se as frequências esperadas em cada célula da tabela eram adequadas (≥ 5). Quando identificadas células com frequências esperadas inferiores a esse limite, adotaram-se estratégias específicas conforme a natureza dos dados:

- Para variáveis dicotômicas com baixas contagens, aplicou-se o **teste exato de Fisher**, apropriado para pequenas amostras;
- Para variáveis com múltiplas categorias e baixa frequência em algumas células, utilizou-se a **correção de Monte Carlo** no teste do qui-quadrado, assegurando maior robustez dos resultados;
- Nos demais casos, foi utilizado o **teste do qui-quadrado de Pearson** convencional.

O nível de significância adotado foi de **5% ($\alpha = 0,05$)**. Assim, valores de *p* inferiores a esse limite indicaram **diferença estatisticamente significativa** entre os clusters, evidenciando que as distribuições das variáveis categóricas não eram independentes dos agrupamentos formados.

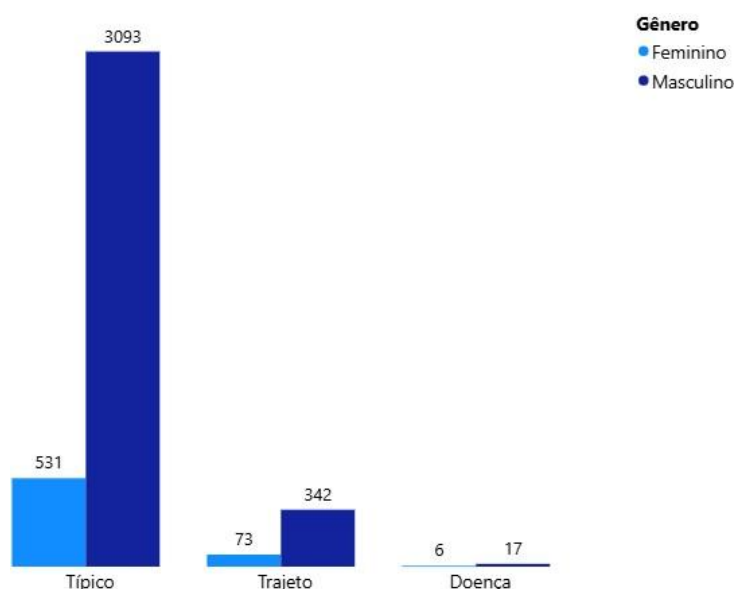
3.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.4.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA

A análise dos municípios vinculados aos empregadores responsáveis pelos acidentes revelou a presença de registros em 320 cidades do estado do Paraná, conforme os códigos oficiais estabelecidos pelo IBGE. Ao todo, foram contabilizadas 4.062 ocorrências de acidentes de trabalho relacionadas ao setor agrícola nesse conjunto.

Entre as variáveis categóricas analisadas, destaca-se o tipo de acidente, cuja classificação segue os parâmetros definidos na Consolidação das Leis do Trabalho (CLT). Segundo o artigo 19 da CLT, acidente de trabalho é aquele que ocorre "pelo exercício do trabalho a serviço da empresa, provocando lesão corporal ou perturbação funcional que cause a morte, a perda ou redução, permanente ou temporária, da capacidade para o trabalho" (BRASIL, 1943). Com base nessa definição, a legislação brasileira reconhece três categorias principais: (1) o acidente típico, que ocorre no exercício direto da atividade laboral; (2) o acidente de trajeto, ocorrido no percurso entre residência e trabalho; e (3) a doença ocupacional, resultante das condições em que o trabalho é realizado. A distribuição dos tipos de acidentes e o perfil por gênero estão presentes na Figura 3.

Figura 3 – Ocorrências relacionadas com o tipo e o gênero



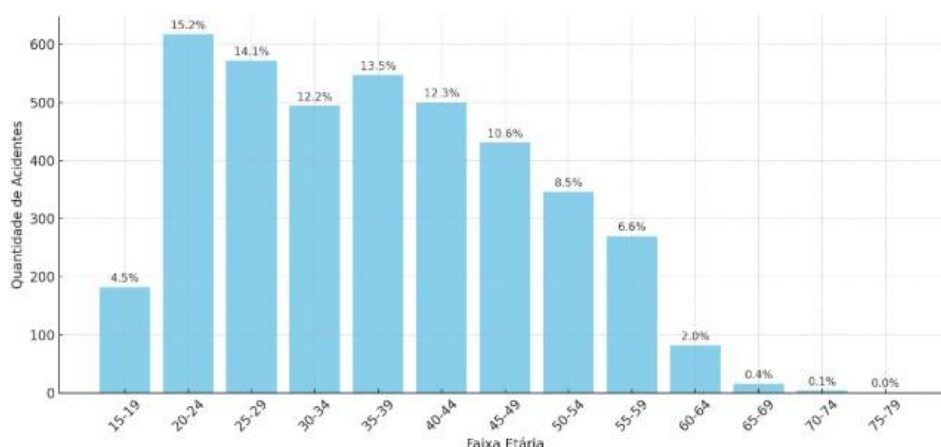
Fonte: Autoria própria (2025)

Os dados indicam predominância expressiva do acidente típico, que responde por 89,22% das ocorrências (3.093 envolvendo homens e 531 mulheres). Em seguida, aparecem os

acidentes de trajeto, com 10,22% (342 masculinos e 73 femininos), e as doenças ocupacionais, com 0,57% (17 registros entre homens e 6 entre mulheres).

A variável “faixa etária” foi analisada com base nos critérios do IBGE, sendo dividida em três grandes grupos: jovens (até 19 anos), adultos (de 20 a 59 anos) e idosos (60 anos ou mais). Também foi realizada uma análise mais detalhada em intervalos de 4 anos. A Figura 4 mostra a distribuição das ocorrências conforme a faixa etária.

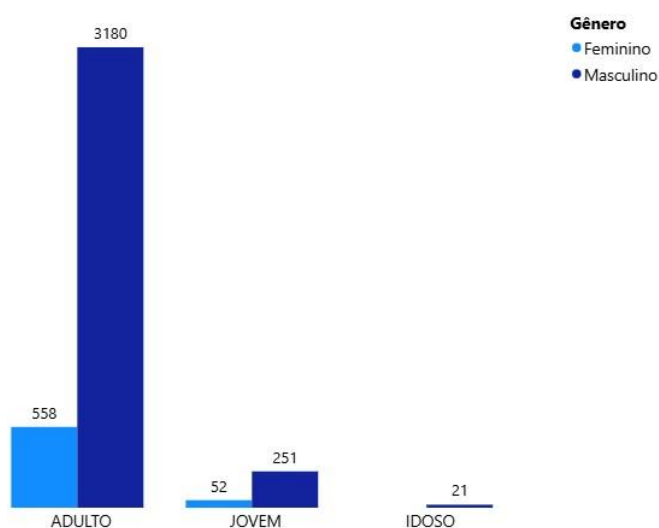
Figura 4 – Ocorrência por faixa etária



Fonte: Autoria própria (2025)

A concentração de acidentes é mais evidente na faixa entre 20 e 39 anos, faixa que compreende trabalhadores em maior atividade laboral e que representa mais da metade dos registros. Na segmentação mais ampla, os adultos (20 a 59 anos) correspondem a 92,02% das ocorrências, enquanto os jovens representam 7,46% e os idosos apenas 0,52%, conforme Figura 5.

Figura 5 – Ocorrência por faixa etária e gênero



Fonte: Autoria própria (2025)

Em relação à emissão da CAT, cinco categorias foram identificadas como responsáveis pelo registro dos acidentes: empregador, médico, segurado ou dependente, sindicato e autoridade pública. A grande maioria (99,29%) foi emitida por empregadores, evidenciando o papel central da empresa nesse processo (Quadro 2). As demais categorias somam juntas menos de 1% dos registros.

Quadro 2 – Responsáveis pela abertura do CAT

Emitente	Qtd. Acidentes	% Acidentes
Empregador	4.033	99,29%
Segurado/Dependente	17	0,42%
Sindicato	6	0,15%
Médico	5	0,12%
Autoridade Pública	1	0,02%

Fonte: Autoria própria (2025)

No que tange à gravidade dos acidentes, foi verificado que apenas 0,89% dos casos resultaram em óbito. A maioria absoluta dos registros (99,11%) corresponde a acidentes sem desfecho fatal.

A análise dos agentes causadores dos acidentes revelou que as principais causas estão relacionadas a fatores mecânicos e físicos. As categorias mais recorrentes foram: aprisionamento, atrito, abrasão, impacto ou queda (14,35%); ferramentas manuais sem força motriz (14,25%); superfícies e equipamentos utilizados para deslocamento (12,31%); veículos e meios de transporte (10,36%); e produtos alimentícios ou de origem animal (8,71%), conforme apresentado na Figura 6.

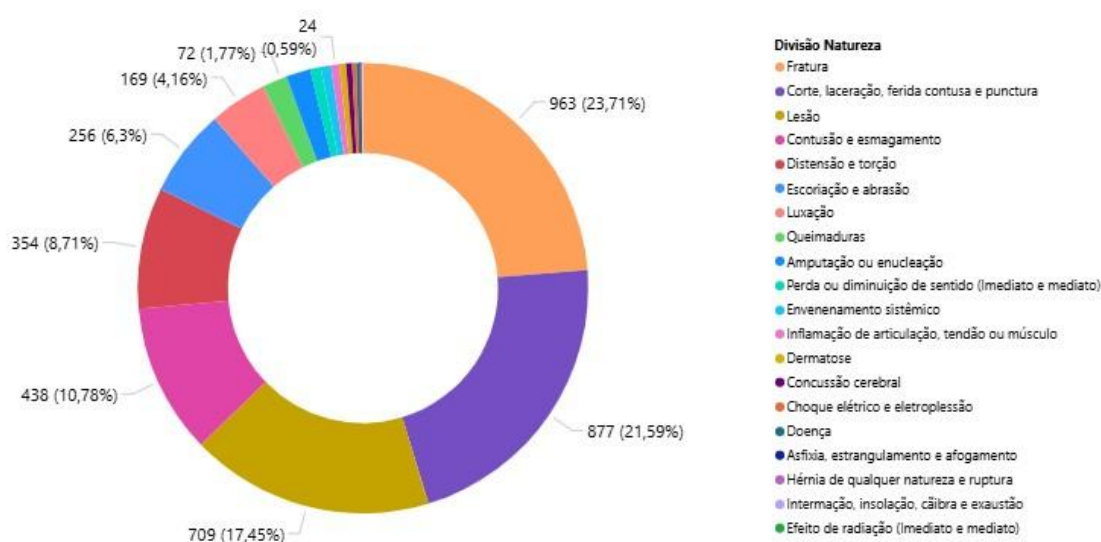
Figura 6 – Ocorrências por agente causador de acidente



Fonte: Autoria própria (2025)

Quanto à natureza da lesão, destacaram-se as fraturas (23,71%), seguidas por cortes, lacerações, feridas contusas e puncturas (21,59%), lesões gerais (17,45%) e contusões ou esmagamentos (10,78%) (Figura 7).

Figura 7 – Ocorrências por natureza da lesão

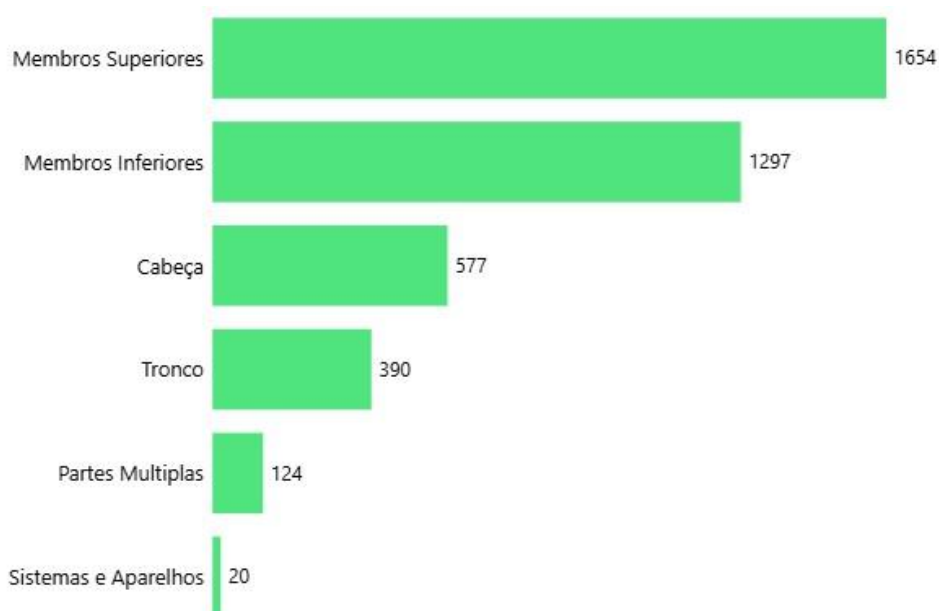


Fonte: Autoria própria (2025)

A parte do corpo atingida foi reagrupada em seis categorias principais para fins analíticos: cabeça, membros superiores, membros inferiores, tronco, sistemas/aparelhos e partes múltiplas. Os membros superiores lideram em número de ocorrências (40,72%), seguidos pelos

membros inferiores (31,93%), o que totaliza mais de 70% dos registros. As demais regiões afetadas incluem cabeça (14,20%), tronco (9,60%), múltiplas partes (3,05%) e sistemas/aparelhos (0,49%), conforme Figura 8.

Figura 8 – Ocorrências relacionadas com a parte do corpo atingida

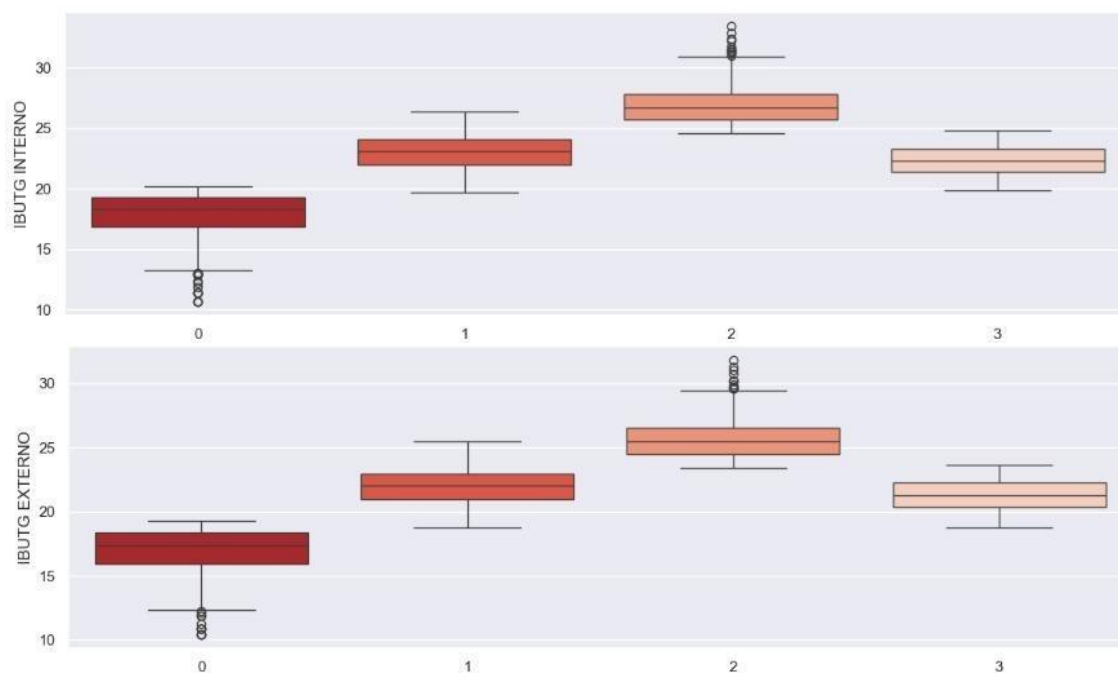


Fonte: Autoria própria (2025)

3.4.2 APLICAÇÃO E ANÁLISE DO K-MEANS

A aplicação do algoritmo K-means permitiu identificar agrupamentos de acidentes de trabalho no setor agrícola a partir de variáveis climáticas e ocupacionais, possibilitando a observação de padrões e tendências que relacionam as condições térmicas aos tipos de ocorrência. Nesta subseção, são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos, iniciando-se pela análise das variáveis meteorológicas. A Figura 9 ilustra a média de IBUTG por Cluster.

Figura 9 – Média de IBUTG Interno e Externo por Cluster



Fonte: Autoria própria (2025)

A análise dos valores médios de IBUTG obtidos para cada agrupamento evidencia variações relevantes nas condições térmicas associadas aos acidentes de trabalho. O **Cluster 0** apresenta os **menores índices de estresse térmico**, com **IBUTG interno médio de 17,86 °C** e **externo de 17 °C**, caracterizando ambientes de temperatura amena, com baixa probabilidade de sobrecarga térmica. O **Cluster 1** representa condições **moderadas de calor**, com **IBUTG interno de 23,1 °C** e **externo de 21,96 °C**, indicando situações em que a exposição ao calor pode começar a afetar o conforto térmico e a produtividade. O **Cluster 2**, por sua vez, agrupa os registros com **maior exposição térmica**, apresentando **IBUTG interno médio de 26,86 °C** e **externo de 25,67 °C**, compatíveis com cenários de **estresse térmico elevado**, especialmente em atividades externas ou com ventilação insuficiente. Já o **Cluster 3** mostra **condições intermediárias**, com **IBUTG interno de 22,32 °C** e **externo de 21,29 °C**, sugerindo ambientes de risco térmico moderado.

Para verificar a existência de associações significativas entre as variáveis categóricas e os agrupamentos formados pelo algoritmo K-means, aplicou-se o **teste do Qui-quadrado de independência**. Quando as contagens esperadas em algumas células foram baixas, utilizou-se a **correção de Monte Carlo**, garantindo maior robustez estatística aos resultados.

Os resultados indicam que as variáveis **“Tipo de Acidente”**, **“Sexo”**, **“Parte do Corpo Atingida”**, **“Natureza da Lesão”** e **“Agente Causador”** apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre os clusters ($p < 0,001$). Isso evidencia que a distribuição

dessas categorias não ocorre de forma aleatória, mas está relacionada aos diferentes perfis de agrupamento identificados, o que reforça a **coerência substantiva** da segmentação obtida.

Por outro lado, a variável “**Idade**” apresentou **p-valor de 0,3261**, indicando **ausência de diferença estatisticamente significativa entre os clusters**. Esse resultado sugere que, embora haja pequenas variações na proporção de adultos, jovens e idosos em cada grupo, a idade não foi um fator determinante na formação dos agrupamentos, o que é coerente com a predominância de trabalhadores adultos no setor agrícola brasileiro.

De forma geral, os resultados do teste do Qui-quadrado confirmam que as **principais variáveis ocupacionais e ambientais diferem significativamente entre os clusters**, sustentando a **validade interpretativa dos perfis identificados**.

Na Figura 10 o **Cluster 2** concentra a **maior proporção de trabalhadores do sexo masculino (35%)**, indicando que os acidentes nesse grupo estão predominantemente associados a atividades realizadas por homens, o que é coerente com a composição majoritariamente masculina da força de trabalho agrícola no Brasil. Já o **Cluster 0** apresenta a **maior participação feminina (30%)**, sugerindo a presença de ocupações com maior representatividade de mulheres, possivelmente ligadas a tarefas de beneficiamento, triagem ou processamento de produtos agrícolas, tradicionalmente desempenhadas por trabalhadoras. O **Cluster 3**, embora também apresente participação feminina (28%), mostra uma distribuição equilibrada, enquanto o **Cluster 1** não apresenta predominância expressiva de nenhum dos sexos, com **21% das mulheres e 22% dos homens**, configurando um perfil mais heterogêneo.

Figura 10 - Proporção de Sexo por Cluster



Fonte: Autoria própria (2025)

A análise da variável referente à faixa etária, apresentada na Figura 11, revela diferenças sutis, mas relevantes, na distribuição dos acidentes entre os grupos etários nos quatro clusters formados. O **Cluster 0** apresenta a **maior concentração de trabalhadores idosos (50%)**,

embora este grupo represente um número absoluto reduzido de ocorrências (20 registros). Esse mesmo cluster concentra cerca de **um terço dos adultos (32%) e jovens (33%)**, indicando uma composição relativamente mista.

O **Cluster 2** apresenta distribuição semelhante, com **adultos e jovens igualmente representados (33%)**, o que pode refletir a predominância de trabalhadores em idade produtiva atuando nas atividades agrícolas de maior intensidade, compatível com os padrões do setor. Já o **Cluster 1** e o **Cluster 3** não apresentam destaque expressivo de nenhum grupo etário, com distribuições mais equilibradas entre as faixas etárias, embora com percentuais mais baixos de representatividade.

Figura 11 - Proporção por Faixa Etária e Cluster

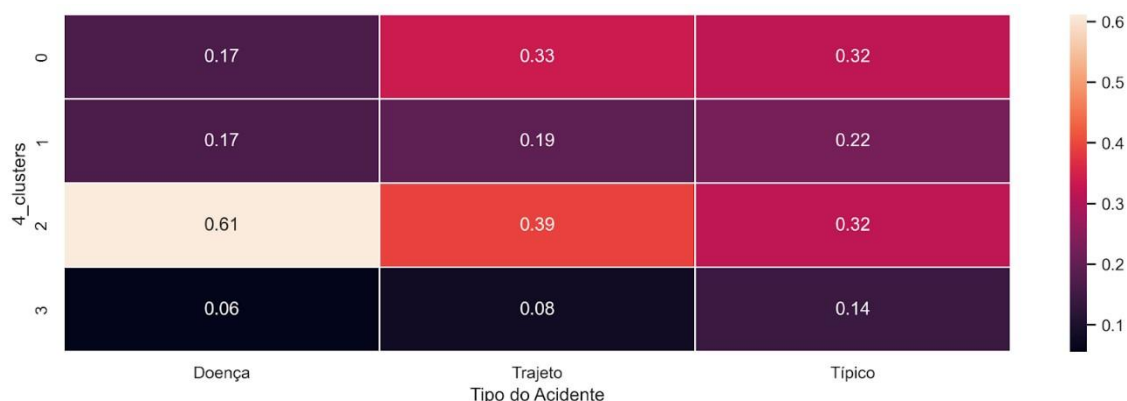


Fonte: Autoria própria (2025)

A análise do **tipo de acidente** (Figura 12) evidencia que a maior parte das ocorrências está associada a **acidentes típicos**, distribuídos principalmente entre os **Clusters 0 e 2**, que concentram **32%** desse tipo de evento. O **Cluster 2**, além de reunir a maior proporção de acidentes típicos, também concentra **61% das doenças ocupacionais e 39% dos acidentes de trajeto**, configurando um agrupamento de perfil mais diversificado e de maior complexidade.

Nos **Clusters 1 e 3**, não se observam padrões predominantes, apresentando distribuição mais homogênea entre os tipos de ocorrência, embora com menor representatividade numérica. Essa dispersão sugere contextos menos caracterizados, possivelmente associados a situações de menor frequência ou a grupos heterogêneos de trabalhadores.

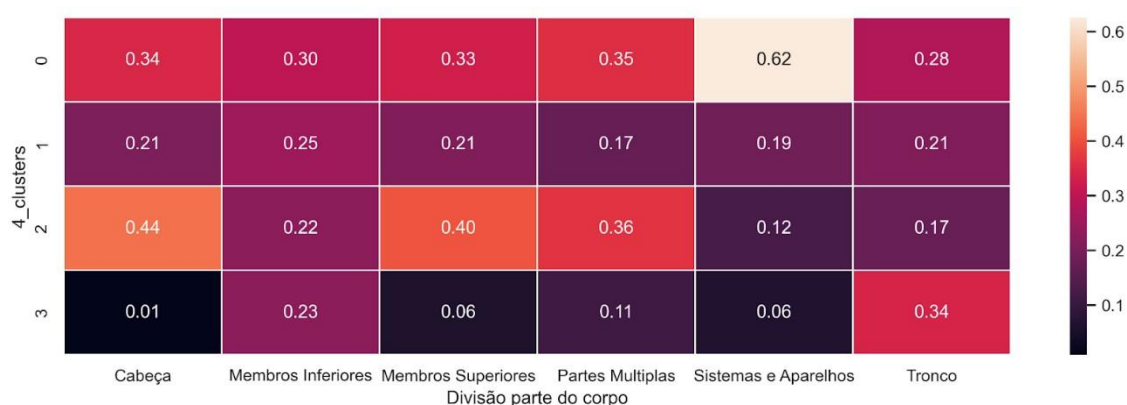
Figura 12 - Tipo de Acidente por Clusters



Fonte: Autoria própria (2025)

Observa-se na Figura 13 que o **Cluster 0** concentra a maioria das ocorrências relacionadas a **sistemas e aparelhos** (62%), sugerindo a presença de casos mais graves ou sistêmicos, possivelmente associados a agravos à saúde decorrentes de exposição prolongada a condições adversas. No **Cluster 2**, há predominância de lesões em **cabeça** (44%), **membros superiores** (44%) e **partes múltiplas** (36%), o que pode indicar acidentes decorrentes de atividades manuais intensas ou do manuseio de ferramentas e máquinas agrícolas, características típicas do trabalho no campo. O **Cluster 3** apresenta destaque para lesões em **tronco** (34%), possivelmente relacionadas a esforços físicos excessivos, quedas ou impactos diretos. Já o **Cluster 1** não apresentou concentração expressiva em nenhuma das categorias, refletindo uma distribuição mais dispersa dos tipos de lesão corporal.

Figura 13 - Parte do Corpo Atingida por Clusters

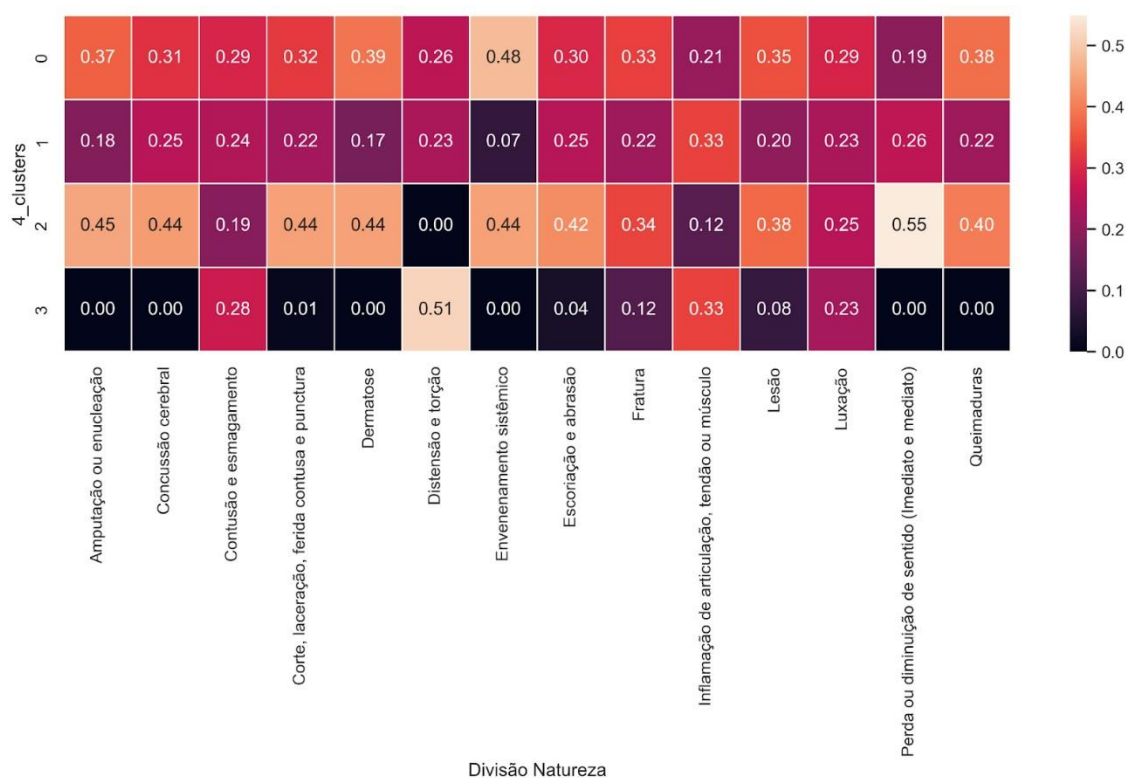


Fonte: Autoria própria (2025)

Na Figura 14 observa-se que o **Cluster 0** destaca-se pela concentração de casos de **envenenamento sistêmico** (48%), o que pode estar associado à exposição a agrotóxicos e produtos químicos utilizados nas atividades agrícolas, evidenciando riscos ocupacionais característicos do setor. O **Cluster 2** reúne a maior diversidade e gravidade de lesões, com

predominância de **amputações ou enucleações** (45%), **concussões cerebrais** (44%), **cortes, lacerações, feridas contusas e puncturas** (44%), além de **fraturas** (34%), **escoriações e abrasões** (42%), **perda ou diminuição de sentidos** (55%), **dermatoses** (44%) e **queimaduras** (40%). Esse conjunto de resultados sugere que o **Cluster 2** agrupa acidentes de maior severidade, possivelmente relacionados ao uso de maquinário, ferramentas cortantes ou situações de risco elevado, típicas do trabalho agrícola mecanizado. Já o **Cluster 3** apresenta predominância de **distensões e torções** (51%), indicando a ocorrência de lesões associadas a esforços físicos, posturas inadequadas e movimentos repetitivos. O **Cluster 1** não apresentou destaque expressivo em nenhuma categoria, sugerindo uma distribuição mais homogênea das lesões.

Figura 14 - Natureza da Lesão por Clusters



Fonte: Autoria própria (2025)

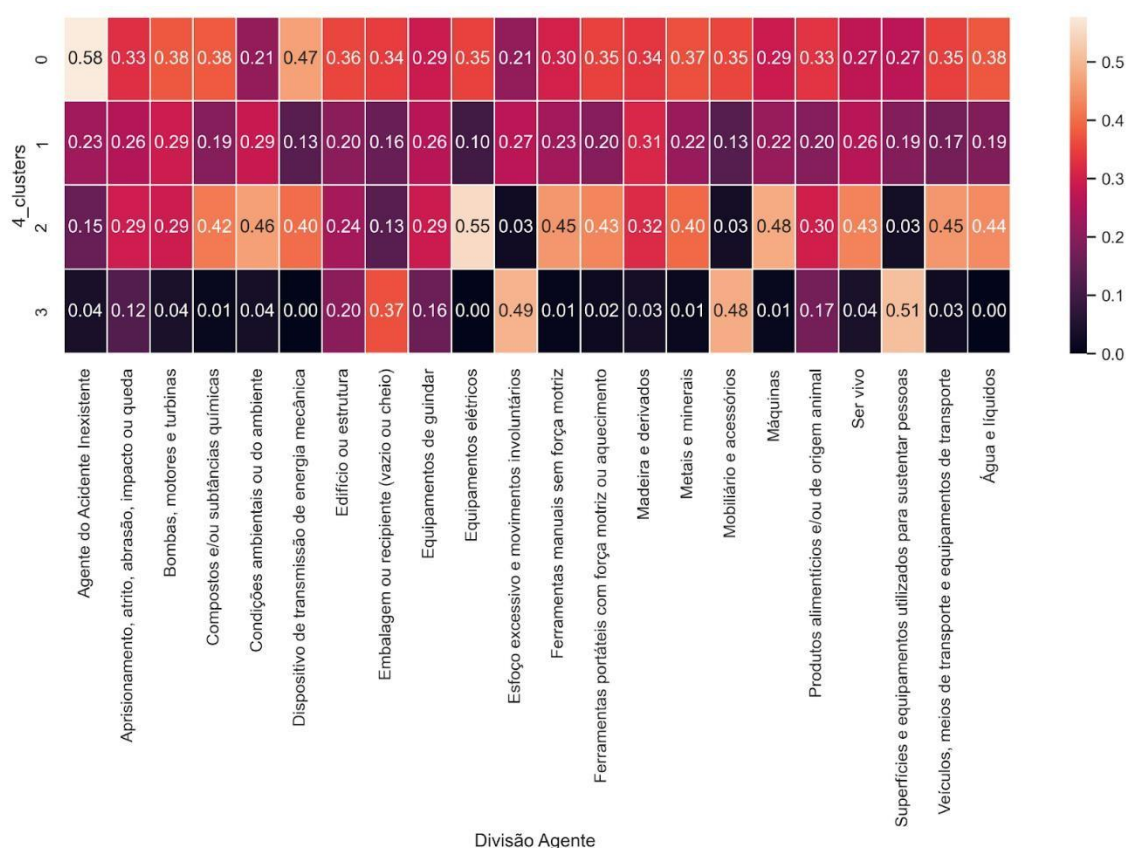
Na Figura 15 o **Cluster 0** concentra uma diversidade de agentes relacionados a mecanismos mecânicos e de contato físico, como **dispositivos de transmissão de energia mecânica** (47%), **bombas, motores e turbinas** (38%) e **compostos ou substâncias de energia mecânica** (38%). Além disso, chama atenção a presença de **agentes inexistentes** (58%), possivelmente associada a registros incompletos, e de **acidentes por aprisionamento, atrito, abrasão, impacto ou queda** (33%), indicando situações típicas de contato direto com máquinas e superfícies.

O **Cluster 2** apresenta maior concentração de agentes relacionados à operação de ferramentas e equipamentos, como **máquinas** (48%), **ferramentas manuais sem força motriz** (45%), **veículos e equipamentos de transporte** (45%), **ferramentas portáteis com força motriz ou aquecimento** (43%) e **equipamentos elétricos** (55%). Também aparecem **condições ambientais** (46%) e **substâncias químicas** (42%), reforçando o caráter multifatorial dos acidentes nesse grupo, que reúne exposições tanto a riscos mecânicos quanto ambientais e químicos, frequentemente observados em atividades agrícolas mecanizadas ou em operações de transporte e manutenção.

Já o **Cluster 3** destaca-se por agentes associados ao esforço físico e interação com o ambiente de trabalho, como **superfícies e equipamentos utilizados para sustentar pessoas** (51%), **esforço excessivo e movimentos individuais** (49%) e **mobiliários e acessórios** (48%). Esses resultados sugerem acidentes de natureza ergonômica e biomecânica, muitas vezes relacionados a sobrecarga muscular, posturas inadequadas ou quedas durante a execução de tarefas manuais.

Por fim, o **Cluster 1** não apresentou predominância expressiva de nenhum agente específico, indicando uma distribuição mais equilibrada entre diferentes tipos de acidentes.

Figura 15 - Agente Causador por Clusters



Fonte: Autoria própria (2025)

A aplicação da técnica de K-means identificou três Clusters distintos, com o Cluster 0 se destacando por características específicas. Este grupo reúne trabalhadores localizados em regiões mais quentes, como Centro-Oeste, Nordeste e Norte, expostos a maiores índices de IBUTG (estresse térmico). O principal emitente de registros desse Cluster é o "Segurado/Dependente", e ele abrange todas as faixas etárias, partes do corpo atingidas e tipos de acidentes, com predominância de trabalhadores do gênero masculino. No que se refere à natureza das lesões, o Cluster 0 destaca-se tanto por lesões diretamente relacionadas à exposição térmica, como queimaduras, quanto por lesões de natureza indireta, como cortes, lacerações e fraturas.

Com base na análise conjunta das variáveis climáticas, demográficas e ocupacionais, é possível traçar perfis distintos para os quatro agrupamentos identificados pelo algoritmo Kmeans, que representam diferentes contextos de risco e exposição no trabalho agrícola.

O **Cluster 0** caracteriza-se por apresentar as **menores temperaturas médias de IBUTG** (17,86 °C interno e 17 °C externo), indicando **ambientes de baixa sobrecarga térmica**. Esse grupo concentra **maior proporção de trabalhadoras do sexo feminino (30%)** e destaca-se pela ocorrência de **envenenamentos sistêmicos (48%)** e **lesões em sistemas e aparelhos (62%)**, o que sugere **exposição a agentes químicos**, possivelmente relacionados ao **manuseio de defensivos agrícolas** ou substâncias tóxicas. A predominância de **idosos (50%)** e **adultos (32%)** reforça a presença de trabalhadores com maior tempo de experiência, possivelmente envolvidos em **atividades de apoio, beneficiamento ou triagem**. Assim, o perfil desse cluster aponta para um **cenário de acidentes associados a tarefas menos extenuantes do ponto de vista térmico, mas com riscos químicos relevantes**.

O **Cluster 1**, por sua vez, apresenta **condições térmicas moderadas** (IBUTG interno de 23,01 °C e externo de 21,96 °C) e **distribuição equilibrada entre os sexos e faixas etárias**, sem predominância expressiva em nenhuma categoria de acidente, parte do corpo ou agente causador. Essa configuração indica um **grupo heterogêneo**, possivelmente composto por trabalhadores atuando em diferentes etapas do processo produtivo, sob condições intermediárias de exposição e risco.

O **Cluster 2** destaca-se como o grupo de **maior risco térmico e ocupacional**, com **IBUTG interno médio de 26,86 °C e externo de 25,67 °C**, correspondendo às **condições de maior estresse térmico** entre os agrupamentos. Esse cluster concentra **a maior proporção de trabalhadores do sexo masculino (35%)**, predominância de **adultos e jovens (33% cada)** e elevada ocorrência de **acidentes típicos (32%)**, **doenças ocupacionais (61%)** e **acidentes de trajeto (39%)**. As lesões mais frequentes envolvem **cabeça, membros superiores e partes**

múltiplas, além de **amputações, fraturas, cortes e queimaduras**, indicando **acidentes graves relacionados a máquinas, ferramentas e equipamentos de transporte**. A composição do cluster e o conjunto de variáveis analisadas evidenciam um **perfil de trabalhadores expostos a altas cargas térmicas, riscos mecânicos e agentes ambientais**, típicos de atividades **mecanizadas ou de campo**.

Por fim, o **Cluster 3** apresenta **condições térmicas intermediárias** (IBUTG interno de 22,32 °C e externo de 21,29 °C) e **maior incidência de lesões no tronco (34%)**, além de **distensões e torções (51%)**, associadas a **esforço físico e movimentação inadequada**. Os agentes predominantes incluem superfícies de sustentação, mobiliários e esforço excessivo, indicando **acidentes de natureza ergonômica e biomecânica**. Esse perfil sugere trabalhadores envolvidos em tarefas manuais ou de apoio operacional, em que o esforço físico e as posturas inadequadas representam fatores de risco mais relevantes que o calor ambiental.

3.4.3 COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS DO CENÁRIO NACIONAL

Ao analisar conjuntamente os resultados obtidos no estado do Paraná e no cenário nacional, observa-se uma semelhança entre **o Cluster 2 do Paraná e o Cluster 0 identificado na análise nacional**. Ambos representam perfis de trabalhadores expostos a elevadas cargas térmicas e riscos ocupacionais múltiplos, configurando o grupo de **maior vulnerabilidade combinada ao estresse térmico e aos agentes mecânicos**.

Nos dois contextos, o perfil predominante é composto por **homens adultos**, inseridos em atividades **mecanizadas ou de campo**, onde a exposição ao calor se associa a riscos físicos intensos, como o uso de máquinas, ferramentas e equipamentos de transporte. As lesões mais frequentes, fraturas, cortes, lacerações e queimaduras, reforçam o caráter grave e traumático dos acidentes, frequentemente relacionados à sobrecarga térmica, esforço físico e falhas de proteção em ambientes produtivos de alta demanda.

Essa correspondência entre os dois agrupamentos indica que, mesmo em um estado de clima mais ameno como o Paraná, há um subconjunto de trabalhadores agrícolas submetidos a condições ambientais e ocupacionais semelhantes às encontradas em regiões de maior calor no país. Esse achado sugere que o estresse térmico não é um fenômeno restrito às regiões tropicais, mas um risco transversal às atividades agrícolas intensivas, especialmente quando combinadas à mecanização e ao trabalho ao ar livre.

Assim, o paralelismo entre esses dois clusters reforça que os riscos térmicos e mecânicos tendem a se sobrepor, configurando um perfil recorrente de acidentes graves no setor agrícola brasileiro.

Observa-se uma semelhança significativa entre o **Cluster 0 do Paraná** e o **Cluster 1 do cenário nacional**, ambos caracterizados pela **predominância de lesões que afetam sistemas e aparelhos corporais**. Essa correspondência sugere a presença de **riscos ocupacionais de natureza química e fisiológica**, que se manifestam em contextos de **baixa sobrecarga térmica**, mas com **exposição contínua a agentes nocivos**.

No cenário nacional, o Cluster 1 é marcado pela ocorrência de pneumoconiose, doença associada à inalação de partículas sólidas ou poeiras tóxicas, frequentemente presente em atividades agrícolas e industriais realizadas em ambientes com ventilação inadequada ou sem proteção respiratória eficiente. Já no Paraná, o Cluster 0 evidencia envenenamentos sistêmicos e lesões em sistemas e aparelhos, indicando exposição direta a defensivos agrícolas e outras substâncias tóxicas, especialmente em tarefas relacionadas ao manuseio, beneficiamento ou aplicação de insumos químicos.

Embora os mecanismos de exposição sejam distintos, inalação prolongada de agentes particulados no cenário nacional e absorção química direta no contexto paranaense, ambos os perfis convergem quanto à natureza dos danos à saúde: comprometimento de sistemas fisiológicos internos, exigindo diagnóstico médico especializado e acompanhamento prolongado. Essa semelhança reforça a necessidade de políticas de monitoramento ambiental, controle da exposição a agentes tóxicos e capacitação técnica dos trabalhadores, com ênfase em práticas seguras no uso de produtos químicos e no manejo de ambientes potencialmente contaminantes.

Em contraste com os agrupamentos que apresentaram padrões semelhantes, observa-se que o **Cluster 2 do cenário nacional** e o **Cluster 3 do Paraná** não compartilham características em comum, representando **contextos ocupacionais e condições de risco distintas**.

No âmbito nacional, o Cluster 2 reúne **trabalhadores idosos**, predominantemente **do sexo masculino**, atuando em **regiões de clima mais ameno**, como o Sul e o Sudeste, sob **baixa exposição térmica**. As lesões predominantes nesse grupo, **congelamentos e geladuras**, estão associadas à **exposição ao frio**, revelando que, embora o calor não represente um risco relevante nesse contexto, as baixas temperaturas também configuram um desafio ocupacional para trabalhadores mais vulneráveis.

Já no contexto paranaense, o Cluster 3 delinea um grupo de trabalhadores **expostos a condições térmicas intermediárias**, em que o **esforço físico, a movimentação inadequada e as posturas incorretas** se destacam como principais fatores de risco. As **distensões, torções e lesões no tronco** predominam, associadas a **acidentes de natureza ergonômica e biomecânica**, muitas vezes relacionados a tarefas manuais repetitivas ou atividades de apoio operacional.

Dessa forma, enquanto o cenário nacional evidencia riscos ambientais associados ao frio entre trabalhadores mais velhos, o contexto do Paraná aponta para riscos ocupacionais de ordem ergonômica em faixas etárias mais amplas.

Com base na correspondência entre os perfis de risco identificados nos clusters do estado do Paraná e aqueles observados no cenário nacional, e à luz das diretrizes apresentadas no relatório *OSH Pulse 2025*, elaborado pela Agência Europeia para a Segurança e Saúde no Trabalho (EU-OSHA), é possível propor um conjunto de medidas preventivas alinhadas aos domínios de risco associados às alterações climáticas. No contexto europeu, observa-se a consolidação de respostas institucionais voltadas à mitigação de riscos ocupacionais emergentes, com destaque para a exposição ao calor extremo, à radiação solar, à deterioração da qualidade do ar e à intensificação de eventos climáticos adversos, priorizando intervenções de natureza organizacional, ações de capacitação e a adequação de equipamentos de proteção individual e coletiva (EU-OSHA, 2025). Essas diretrizes mostram elevada convergência com os perfis de risco identificados na população trabalhadora agrícola analisada neste estudo.

No caso do perfil caracterizado por elevada exposição térmica combinada a riscos mecânicos, representado pelo Cluster 2 no Paraná e pelo Cluster 0 no cenário nacional — recomenda-se a incorporação de estratégias preventivas amplamente adotadas em países europeus. Entre essas estratégias destacam-se os ajustes na organização do trabalho, como a implementação de pausas regulares, flexibilização de jornadas e rotação de tarefas, reconhecidas como as principais medidas de mitigação do estresse térmico e adotadas em aproximadamente 58% dos ambientes de trabalho analisados na União Europeia (EU-OSHA, 2025). Adicionalmente, o uso de equipamentos de proteção individual adaptados às condições climáticas, incluindo vestimentas com maior respirabilidade, dispositivos de sombreamento e tecnologias de resfriamento corporal, constitui uma prática complementar relevante, presente em cerca de 54% dos locais de trabalho europeus.

Outro eixo fundamental refere-se à adequação da infraestrutura laboral, por meio da instalação de sistemas de ventilação, áreas sombreadas e pontos de hidratação, medidas

consideradas essenciais em setores como agricultura, construção civil e mineração, que figuram entre os mais expostos ao calor e à radiação solar (EU-OSHA, 2025). Tais recomendações apresentam elevada aderência ao perfil dos trabalhadores agrícolas identificados nos clusters de maior gravidade, sobretudo aqueles inseridos em atividades mecanizadas e ao ar livre, nas quais o estresse térmico se associa a riscos traumáticos. A adoção dessas estratégias pode contribuir simultaneamente para a redução da sobrecarga térmica e para a diminuição da incidência de acidentes envolvendo máquinas, ferramentas e equipamentos de transporte, recorrentes nesses agrupamentos.

De modo semelhante, o perfil associado a riscos químicos e fisiológicos, correspondente ao Cluster 0 no Paraná e ao Cluster 1 no cenário nacional, encontra respaldo nas recomendações europeias voltadas à gestão da qualidade do ar e ao controle da exposição a contaminantes. O relatório *OSH Pulse 2025* indica que trabalhadores do setor agrícola figuram entre os grupos com maior autorrelato de exposição a poeiras, fumaça e partículas suspensas, alcançando cerca de 30% dos casos analisados (EU-OSHA, 2025). Diante desse cenário, a União Europeia enfatiza medidas como a oferta de informação e treinamento para o manejo seguro de agentes químicos, adotadas em aproximadamente 30% dos ambientes laborais, além do estímulo ao diálogo ativo com os trabalhadores, prática presente em cerca de 25% dos locais de trabalho, visando à identificação precoce de riscos ambientais e operacionais. Soma-se a isso a recomendação do uso de sistemas de ventilação adequados, controle da dispersão de partículas e fornecimento de equipamentos de proteção respiratória, especialmente em atividades que envolvem a manipulação de substâncias tóxicas.

Essas medidas mostram-se particularmente pertinentes ao contexto paranaense, no qual se observa a predominância de envenenamentos sistêmicos e lesões em sistemas e aparelhos, reforçando a necessidade de protocolos mais estruturados para o manuseio de defensivos agrícolas e para a vigilância da qualidade do ar em atividades de aplicação, preparo de caldas e beneficiamento.

Por fim, mesmo para os perfis que não apresentaram correspondência direta entre os cenários analisados, como o cluster nacional associado à exposição ao frio e o cluster paranaense marcado por lesões de natureza ergonômica, o domínio europeu de riscos climáticos oferece subsídios relevantes para a formulação de ações preventivas. O relatório destaca que ajustes organizacionais, capacitação contínua e reestruturação das tarefas constituem estratégias transversais, aplicáveis a contextos caracterizados por esforço físico intenso, movimentos repetitivos e sobrecarga biomecânica (EU-OSHA, 2025).

Dessa forma, a articulação entre os achados deste estudo e o referencial preventivo europeu evidencia que a caracterização dos clusters não apenas contribui para a compreensão dos perfis de risco ocupacional, mas também subsidia a proposição de intervenções alinhadas a padrões internacionais, com ênfase na reorganização do trabalho, na adequação da infraestrutura climática, na capacitação técnica e na participação ativa dos trabalhadores — dimensões consideradas centrais pela União Europeia para o enfrentamento dos impactos das mudanças climáticas sobre a saúde e segurança ocupacional.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dessa forma, enquanto o cenário nacional evidencia riscos ambientais associados ao frio entre trabalhadores mais velhos, o contexto do Paraná aponta para riscos ocupacionais de ordem ergonômica em faixas etárias mais amplas.

O presente estudo buscou identificar padrões de risco ocupacional relacionados ao estresse térmico em acidentes de trabalho no setor agrícola do estado do Paraná, comparando-os com tendências observadas em nível nacional. A análise, baseada na integração entre dados da Comunicação de Acidentes de Trabalho (CAT) e informações meteorológicas do INMET, permitiu compreender como variáveis climáticas, demográficas e ocupacionais se articulam na ocorrência de acidentes no contexto agrícola.

Os resultados evidenciaram a complexidade das interações entre o ambiente térmico e as condições de trabalho no campo, revelando perfis distintos de risco que refletem tanto as características das atividades desempenhadas quanto as especificidades climáticas regionais. No cenário paranaense, os padrões identificados apontaram para diferentes combinações de fatores de vulnerabilidade, nos quais o estresse térmico interage com aspectos ergonômicos, biomecânicos e organizacionais. Observou-se, ainda, que a predominância de trabalhadores adultos do sexo masculino, expostos a condições de calor moderado e envolvidos em tarefas fisicamente exigentes, constitui um perfil de risco recorrente, enquanto grupos com maior idade ou inseridos em atividades de apoio apresentaram outros tipos de vulnerabilidade.

Os achados reforçam a importância de políticas públicas e práticas preventivas direcionadas ao monitoramento das condições térmicas no ambiente agrícola, especialmente diante do agravamento previsto das ondas de calor em função das mudanças climáticas.

Entretanto, o estudo apresenta limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. A principal refere-se à subnotificação dos acidentes de trabalho na agricultura, setor caracterizado por alta informalidade e por dificuldades no registro oficial dos eventos, o

que implica possível sub-representação de determinados grupos de trabalhadores. Ademais, a base da CAT abrange apenas vínculos formais, deixando de contemplar uma parcela expressiva da força de trabalho rural. Outra limitação está relacionada à cobertura meteorológica: embora o estado do Paraná possua boa distribuição de estações automáticas, nem todos os municípios contam com registros contínuos, o que pode ter gerado lacunas em determinadas datas ou localidades. Por fim, a quantidade reduzida de ocorrências registradas no estado, em comparação ao volume nacional, restringe a generalização dos resultados e a robustez estatística de alguns agrupamentos.

Apesar dessas limitações, a pesquisa oferece contribuições relevantes para o campo da SST, ao integrar evidências empíricas sobre a relação entre estresse térmico e acidentes agrícolas em um recorte regional. Os resultados obtidos podem subsidiar a formulação de estratégias de mitigação e adaptação, como o fortalecimento do Plano Setorial de Adaptação à Saúde, o desenvolvimento de protocolos de vigilância térmica no trabalho rural e a capacitação de gestores e trabalhadores sobre práticas seguras em ambientes expostos ao calor.

Como perspectiva para estudos futuros, recomenda-se expandir a análise para outros estados e segmentos do setor agropecuário, bem como incorporar técnicas de modelagem preditiva capazes de antecipar riscos ocupacionais diante de cenários climáticos extremos. Esses avanços podem fortalecer a formulação de políticas públicas mais equitativas e sustentáveis, orientadas à proteção da saúde dos trabalhadores e à adaptação das condições laborais frente ao agravamento das mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA EUROPEIA PARA A SEGURANÇA E SAÚDE NO TRABALHO (EU-OSHA). *OSH Pulse 2025: climate change and digitalisation impacts on occupational safety and health*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2025. Disponível em: <https://osha.europa.eu/en/facts-and-figures/osh-pulse/climate-digital-change>. Acesso em: 13 dez. 2025.

AL-AHMAD, B.; KESSLER, W.; ALWADI, Y.; SCHWARTZ, J.; WAGNER, G. R.; MICHAELS, D. A nationwide analysis of heat and workplace injuries in the United States. *Environmental Health*, v. 24, art. 65, 2025. DOI:10.1186/s12940-025-01231-1.

BARKOKÉBAS JÚNIOR, Béda; LAGO, Eliane Maria Gorga; MARTINS, Ana Rosa; ZLATAR, Tomi; CRUZ, Felipe Mendes da; VASCONCELOS, Bianca M.; CAMPOS, Felipe Moreira; CAMPOS, Carlos Roberto. *Health risks in tropical climate agriculture: a set of case studies of sugarcane workers*. **International Journal of Occupational and Environmental Safety**, v. 3, n. 3, p. 44–52, 2019. DOI: 10.24840/2184-0954_003.003_0005.

BENTES, J. A. Aquecimento global, mudanças climáticas, ondas de calor e seus impactos na vida dos trabalhadores sob a ótica da prevenção. *Revista RECIMA21*, v. 5, n. 4, p. e4775, 2024. DOI: <https://doi.org/10.47820/recima21.v5i4.4775>.

BITENCOURT, D. P.; MAIA, P. A.; ROSCANI, R. C. The heat exposure risk to outdoor workers in Brazil. *Archives of Environmental and Occupational Health*, v. 75, n. 5, p. 281–288, 2020.

CHEN, H.; XU, C.; HUANG, Y. Integrating occupational and environmental data through machine learning for predictive risk assessment: advances and challenges. *Safety Science*, v. 165, p. 106255, 2023. DOI: 10.1016/j.ssci.2023.106255.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. *Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos – Safra 2024/25*, v. 12, n. 6. Brasília: Conab, fev. 2025. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras>. Acesso em: 18 set. 2025.

FARIA, J. A. A. de; ANDRADE, E. T. de; OLIVEIRA, F. da S. de. Occupational Risks of Agricultural Workers Exposed to Heat: Literature Review. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, v. 18, n. 1, e07468, 2024.

FAYYAD, U.; PIATETSKY-SHAPIO, G.; SMYTH, P. From data mining to knowledge discovery: an overview. *AI Magazine*, v. 17, n. 3, p. 37–54, 1996.

FERRARI G.N.; LEAL G.C.L.; THOM DE SOUZA R.C.; GALDAMEZ E.V.C. Impact of climate change on occupational health and safety: a review of methodological approaches. *Work*, v. 74, n. 2, p. 485–499, 2023. <https://doi.org/10.3233/WOR-211303>.

FERRARI, G.N.; DOS SANTOS, G.C.; OSSANI, P.C.; LEAL, G.C.L.; GALDAMEZ, E.V.C. *Analysis of the Climate Impact on Occupational Health and Safety Using Heat Stress Indexes. International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 22, n. 1, p. 130, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph22010130>

GREENACRE, M. **Correspondence Analysis in Practice**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2017. HAIR, J. F. et al. **Análise Multivariada de Dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

HU, J.; et al. Temperature-related mortality in China from specific injury. *Nature Communications*, v. 14, Art. n.º 37, p. 1-11, 2023. DOI:10.1038/s41467-022-35462-4.

HUANG, L.; ZHANG, J.; LI, X.; WU, C. Unsupervised machine learning for occupational heat stress surveillance: integrating environmental and physiological data. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 21, n. 2, p. 230, 2024. DOI: 10.3390/ijerph21020230.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *Paraná lidera amplamente o ranking das UFs no abate de frangos em 2024, com 34,2% de participação nacional; e é vice-líder no abate de suínos, com 21,5%*. Agência de Notícias IBGE, 27 fev. 2025. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-denoticias/releases/42898-2024-registra-recorde-no-abate-de-bovinos-frangos-e-suinos>. Acesso em: 18 set. 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change – Summary for Policymakers*. Lee, H.; Romero, J. (eds.). Geneva: IPCC, 2023. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.

INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION. Decent and Productive Work in Agriculture. Geneva: ILO, 2015. Disponível em: https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/@ed_dialogue/@sector/documents/publication/wcms_437173.pdf. Acesso em: 13 jul. 2025.

LEE, J.; *et al.* *Heat exposure and workers' health: a systematic review*. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 18, 2021. [PubMed](#)

LLOYD, S. **Least squares quantization in PCM**. *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 28, n. 2, p. 129–137, 1982. (Trabalho originalmente apresentado em 1957).

MACQUEEN, J. **Some methods for classification and analysis of multivariate observations**. In: *Proceedings of the 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*. Berkeley: University of California Press, 1967. p. 281–297.

MARTINS, R. D. *et al.* Mudanças climáticas e vulnerabilidade na agricultura. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, n. 15, p. 33-45, 2010. DOI: <https://doi.org/10.5327/Z217694782010000215>.

MEENAKSHI, J. R.; PANNEER, S. Occupational health of agricultural women workers in India. *Indian Journal of Community Medicine*, v. 45, p. 546–549, 2020. https://doi.org/10.4103/ijcm.IJCM_397_19.

MOREIRA, M. F. R.; MEIRELLES, L. C.; CORADIN, C. M.; PORTELLA, S.; OLIVEIRA, S. S. Mudanças climáticas e suas implicações para a saúde de trabalhadores e trabalhadoras, produção agrícola e ambiente. *Revista Brasileira de Saúde Ocupacional*, v. 50, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2317-6369/13024pt2025v50eddsst5>. Acesso em: 13 jul. 2025.

RAINBIRD G; O'NEILL D. Occupational disorders affecting agricultural workers in tropical developing countries: results of a literature review. *Appl Ergon.* 1995 Jun;26(3):187-93. doi: 10.1016/0003-6870(95)00016-6. PMID: 15677017.

RAMIREZ, A. *et al.* Climate change and occupational health: a scoping review. *Environmental Research*, v. 252, p. 118700, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.118700>.

REIS, B. L.; RAFAEL, C.; LEAL, G. C. L.; SOUZA, R. C. T.; GALDAMEZ, E. V. C. Doenças e acidentes de trabalho no Brasil: uma análise exploratória de dados. In: X Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. Anais eletrônicos do ConBRepro, p. 1-12, 2020.

ROSSI, M. F. Climate Change and Occupational Risks in Outdoor Workers: a systematic review. *Atmosphere*, v. 16, n. 7, art. 839, 2025. DOI:10.3390/atmos16070839.

ROUSSEEUW, P. J. **Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis**. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, v. 20, p. 53–65, 1987.

SÆBJØRNSSEN, S. E. *et al.* The unequal burden of climate change on occupational health. *BMC Public Health*, v. 24, n. 1, p. 1836, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12889-024-19212-3>.

SANTOS JÚNIOR, J. G. *et al.* Public policies for occupational safety and health in Brazil. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 30, supl. 1, p. e14452023, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/14138123202530sup1.14452023>.

THORNDIKE, R. L. **Who belongs in the family?** *Psychometrika*, v. 18, n. 4, p. 267–276, 1953.

VARADHARAJAN, R.; BHASKARAN, R.; LEE, S. Global warming and occupational heat exposure: implications for worker health and safety. *Journal of Occupational Health*, 2024.

VARGHESE, C.; *et al.* The burden of occupational injury attributable to high ambient temperatures in Australia. *Medical Journal of Australia*, v. 218, n. 2, p. 76-83, 2023. DOI:10.5694/mja2.52171. [Wiley Online Library+1](#)

VIELMA, C.; ACHEBAK, H.; QUIJAL-ZAMORANO, M.; LLOYD, S. J.; CHEVANCE, G.; BALLESTER, J. Temperature-related occupational injuries across Spain: spatiotemporal and socioeconomic effect modifiers. *Environment International*, v. 192, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.109006>

ZHANG, M.; KIM, R. Occupational health in agriculture: a re-emerging frontier in worker protection. *Global Health Journal*, 2025. DOI: 10.1016/j.glohj.2025.06.001.

CONCLUSÕES

4.1 CONTRIBUIÇÕES

Esta dissertação foi desenvolvida diante da crescente preocupação global com os efeitos das mudanças climáticas sobre os sistemas produtivos e a saúde humana, reconhecendo que as alterações térmicas representam um desafio para a segurança e o bem-estar dos trabalhadores. No contexto brasileiro, marcado pela forte presença do setor agrícola e pela exposição direta a condições ambientais extremas, compreender a relação entre o estresse térmico e os acidentes de trabalho é essencial para o avanço das políticas de saúde e segurança ocupacional. Assim, com o objetivo de explorar essa temática sob uma perspectiva analítica e aplicada, esta pesquisa foi estruturada no formato de artigo, composta por dois artigos complementares que, juntos, buscaram responder às questões centrais: **“Quais padrões de risco ocupacional relacionados ao estresse térmico emergem no setor agrícola brasileiro?”** e **“Em que medida eles diferem conforme a escala geográfica e climática?”**

O primeiro artigo abordou a problemática em escala nacional, integrando bases de dados meteorológicos e de acidentes de trabalho para identificar padrões de risco relacionados ao calor extremo. A aplicação do modelo KDD e do algoritmo K-Protótipos permitiu classificar diferentes grupos de exposição e apontar que regiões com maiores índices de calor e umidade, especialmente o Norte e o Nordeste, apresentaram maior concentração de acidentes em atividades agrícolas e de produção intensiva. Esses resultados reforçam a influência direta das

condições térmicas sobre a frequência e gravidade dos acidentes, bem como a necessidade de políticas preventivas adaptadas às realidades regionais.

O segundo artigo, com foco no estado do Paraná, aprofundou a análise regional utilizando o algoritmo K-Means para investigar a variação espacial dos riscos dentro do próprio estado. Os resultados revelaram que, embora o Paraná apresente médias térmicas inferiores às regiões mais quentes do país, as áreas com maior intensidade produtiva agrícola também concentram altos índices de acidentes relacionados a exposição térmica. Essa constatação evidencia que o impacto do estresse térmico não depende apenas da temperatura absoluta, mas também de fatores associados à intensidade do trabalho, tempo de exposição, uso de equipamentos e ausência de pausas adequadas. Assim, o estudo regional complementou o panorama nacional, demonstrando que a vulnerabilidade térmica pode ocorrer mesmo em regiões de clima mais ameno, quando as condições de trabalho não são ajustadas ao esforço físico exigido.

A partir da integração dos dois estudos, foi possível constatar que a análise de dados climáticos e ocupacionais constitui uma abordagem promissora para compreender fenômenos que envolvem o desempenho humano, o ambiente e a produtividade. A utilização de métodos quantitativos avançados, como a clusterização aplicada a dados mistos, possibilitou identificar padrões. Tais evidências fortalecem o argumento de que o calor ambiental deve ser tratado como variável estratégica na gestão da produção agrícola, com impactos diretos na qualidade, segurança e eficiência operacional.

Do ponto de vista científico, esta dissertação contribui ao preencher uma lacuna na literatura nacional sobre mudanças climáticas e segurança ocupacional, especialmente ao propor um modelo de integração entre dados meteorológicos e registros de acidentes de trabalho. Ao desenvolver e validar uma metodologia capaz de cruzar informações heterogêneas, temperatura, umidade, pressão atmosférica, localização e tipo de acidente, o estudo oferece uma base de conhecimento replicável para futuras pesquisas em diferentes setores econômicos. Além disso, consolida o uso do Índice de Bulbo Úmido e Termômetro de Globo (IBUTG) como ferramenta viável para o monitoramento térmico a partir de dados secundários, ampliando seu potencial de aplicação em análises de larga escala.

Sob a perspectiva prática, os resultados desta pesquisa reforçam a importância da adoção de medidas de mitigação térmica nos ambientes de trabalho agrícolas. Políticas de prevenção, tais como pausas programadas, rodízio de tarefas, fornecimento de hidratação adequada e utilização de vestimentas termicamente eficientes, devem ser adaptadas às especificidades

regionais identificadas pelos modelos propostos. Além disso, recomenda-se a incorporação do monitoramento climático em tempo real como parte das rotinas de gestão da produção e segurança, favorecendo respostas rápidas a condições extremas e reduzindo o risco de acidentes e doenças ocupacionais.

4.2 DIFICULDADES E LIMITAÇÕES

Entre as principais dificuldades encontradas durante o desenvolvimento da pesquisa, destacam-se a heterogeneidade e incompletude das bases de dados nacionais, especialmente no que se refere à CAT. Foram observadas subnotificações, lacunas temporais e inconsistências regionais, que restringem a generalização dos resultados em âmbito nacional.

Além disso, a cobertura desigual das estações meteorológicas do INMET comprometeu a uniformidade das análises, uma vez que determinadas regiões, sobretudo áreas rurais do Norte e Centro-Oeste, carecem de medições contínuas e de alta resolução temporal. Outro desafio foi a ausência de dados sobre trabalhadores informais, grupo expressivo no setor agrícola e altamente vulnerável ao estresse térmico, mas ainda invisível nos registros oficiais.

4.3 TRABALHOS FUTUROS

Entre as perspectivas para pesquisas futuras, destaca-se a necessidade de aplicação de modelos preditivos e regressões multivariadas que permitam quantificar o impacto térmico sobre diferentes categorias profissionais e regiões do país. Além disso, sugere-se a ampliação da análise para outros índices climáticos, como o *Humidex* e o *Heat Index*, a fim de comparar diferentes formas de estimar o estresse térmico em condições tropicais. Também se recomenda a investigação da relação entre o calor ocupacional e indicadores de produtividade, absenteísmo e custos econômicos, aproximando a discussão das dimensões estratégicas.

Em síntese, os resultados alcançados demonstram que o estresse térmico é um fator determinante na ocorrência de acidentes de trabalho no setor agrícola brasileiro e que sua compreensão exige uma abordagem interdisciplinar, integrando ciências do clima e saúde ocupacional.

REFERÊNCIAS

BITENCOURT, D. P.; MAIA, R. F.; ROSCANI, J. A. Avaliação do estresse térmico ocupacional no Brasil a partir de dados meteorológicos: aplicação do índice IBUTG e comparação com os limites de tolerância da NR-15. *Revista Brasileira de Saúde Ocupacional*, v. 45, n. 20, p. 1–14, 2020. DOI: 10.1590/2317-6369000014420.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Pesquisa da Pecuária Municipal 2025: Abate de frangos, suínos e bovinos e produção agrícola no Brasil*. Rio de Janeiro: IBGE, 2025. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>.

ILO – International Labour Organization. *Working on a warmer planet: The impact of heat stress on labour productivity and decent work*. Geneva: ILO, 2019.

ILO – International Labour Organization. *Safety and health in agriculture*. Geneva: ILO, 2015.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. DOI: 10.1017/9781009157896.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. DOI: 10.1017/9781009325844.

KJELLSTROM, T.; LEMKE, B.; OTTO, M. Climate change and occupational health: a South African perspective. *African Newsletter on Occupational Health and Safety*, v. 27, n. 3, p. 71–78, 2017.

KJELLSTROM, T. et al. Working on a warmer planet: the effect of heat stress on productivity and health. *Global Health Action*, v. 9, n. 1, 29758, 2016. DOI: 10.3402/gha.v9.29758.

MARTÍNEZ-SOLANAS, E. et al. Temperature and work-related injuries in Spanish workers: a time-series analysis. *Environmental Health Perspectives*, v. 126, n. 6, 067002, 2018. DOI: 10.1289/EHP2590.

MARTINS, M. L. et al. Acidentes de trabalho no meio rural e sua relação com a organização do trabalho. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 15, supl. 3, p. 3271–3280, 2010. DOI: 10.1590/S141381232010000900010.

MCINNES, J. A. et al. The association between temperature and work-related injuries in Australia: time-series analysis of 2001–2010 compensation claims. *Occupational and Environmental Medicine*, v. 74, n. 5, p. 317–323, 2017. DOI: 10.1136/oemed-2016-103597.

MEENAKSHI, M.; PANNEER, S. Occupational heat exposure among agricultural workers in India: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 27, p. 27465–27475, 2020. DOI: 10.1007/s11356-020-08890-9.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA (Brasil). *Norma Regulamentadora nº 15 – Atividades e operações insalubres*. Brasília: MTP, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br>.

OBSERVATÓRIO DIGITAL DE SEGURANÇA E SAÚDE NO TRABALHO. *Acidentes de trabalho no Brasil: estatísticas 2012–2022*. Brasília: Ministério Público do Trabalho / Organização Internacional do Trabalho, 2024. Disponível em: <https://observatoriosst.mpt.mp.br/>.

OIT – Organização Internacional do Trabalho. *Trabalhar em um planeta mais quente: o impacto do estresse térmico na produtividade e no trabalho decente*. Genebra: OIT, 2019. Disponível em: https://www.ilo.org/global/publications/books/WCMS_711919/lang--pt/index.htm.

RAMIREZ, F. J. et al. Climate change, occupational heat stress, and health in agricultural workers: a regional perspective from South America. *Science of the Total Environment*, v. 906, 167897, 2025. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.167897.

ROSCANI, J. A.; MAIA, R. F.; MONTEIRO, M. Heat stress assessment among rural workers in Northeastern Brazil: challenges for adaptation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 16, n. 24, 5021, 2019. DOI: 10.3390/ijerph16245021.

SCHIFANO, P. et al. Relationship between temperature and work-related injuries: a casecrossover study in three Italian cities. *Occupational and Environmental Medicine*, v. 76, p. 818– 824, 2019. DOI: 10.1136/oemed-2019-105894.

SPECTOR, J. T. et al. Associations between heat exposure, human health, and productivity in agricultural settings: review of the literature and implications for future research. *Environmental Research Letters*, v. 11, n. 12, 123001, 2016. DOI: 10.1088/1748-9326/11/12/123001.

TAKAKURA, J. et al. Climate change and heat-related occupational health impacts in South-East Asia. *Environmental Health and Preventive Medicine*, v. 23, n. 42, 2018. DOI: 10.1186/s12199018-0739-5.

VENUGOPAL, V. et al. Occupational heat stress profiles in agricultural sectors in India. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 17, n. 14, 4957, 2020. DOI: 10.3390/ijerph17144957.

VARGHESE, B. M. et al. Heat exposure and occupational injuries: a systematic review and metaanalysis. *Environment International*, v. 130, 104849, 2019. DOI: 10.1016/j.envint.2019.104849.

WATTS, N. et al. The 2023 report of the Lancet Countdown on health and climate change: the imperative for a health-centred response in a world facing irreversible harms. *The Lancet*, v. 402, p. 2340–2381, 2023. DOI: 10.1016/S0140-6736(23)02541-4.

WHO – World Health Organization. *Climate Change and Health*. Geneva: WHO, 2021.

Disponível em: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>.

XIANG, J. et al. Association between high temperature and work-related injuries in Adelaide, South Australia, 2001–2010. *Occupational and Environmental Medicine*, v. 71, n. 4, p. 246–252, 2014. DOI: 10.1136/oemed-2013-101584.

ZANDER, K. K. et al. Heat stress causes substantial labour productivity loss in Australia. *Nature Climate Change*, v. 5, p. 647–651, 2015. DOI: 10.1038/nclimate2623.

APÊNDICE A – Base 06/24 a 12/20

Índice	Atributo	Exemplo de Instância
1	Agente Causador Acidente	Chao - Superficie Ut
2	Data Acidente	201801
3	CBO	784205
4	CBO.1	784205-Alimentador d
5	CID-10	S836
6	CID-10.1	S83.6 Entorse Disten
7	CNAE2.0 Empregador	4930
8	CNAE2.0 Empregador.1	Transporte Rodoviari
9	Emitente CAT	Empregador
10	Espécie do benefício	Pa
11	Filiação Segurado	Empregado
12	Indica Óbito	Não
13	Munic Empr	316970-Turmalina-Mg
14	Natureza da Lesão	Distensao, Torcao
15	Origem de Cadastramento CAT	Internet
16	Parte Corpo Atingida	Joelho
17	Sexo	Masculino
18	Tipo do Acidente	Típico
19	UF Munic. Acidente	Rondônia
20	UF Munic. Empregador	Minas Gerais
21	Data Afastamento	2018/07
22	Data Despacho Benefício	0
23	Data Acidente.1	15/01/2018
24	Data Nascimento	25/03/1976
25	Data Emissão CAT	30/07/2018

APÊNDICE B – Base 01/21 a 06/24

Índice	Atributo	Exemplo de Instância
1	Agente Causador Acidente	Empilhadeira
2	Data Acidente	2021/09
3	CBO	783220-Estivador
4	CID-10	S92.4 Frat do Halux
5	CNAE2.0 Empregador	5231
6	CNAE2.0 Empregador.1	Gestao de Portos e Terminais
7	Emitente CAT	Empregador
8	Espécie do benefício	Pa
9	Filiação Segurado	Empregado
10	Indica Óbito	Não
11	Munic Empr	420845-Itapoá
12	Natureza da Lesão	Fratura
13	Origem de Cadastramento CAT	Internet
14	Parte Corpo Atingida	Dedo
15	Sexo	Masculino
16	Tipo do Acidente	Típico
17	UF Munic. Acidente	Tocantins
18	UF Munic. Empregador	Rio de Janeiro
19	Data Acidente.1	2021/09
20	Data Despacho Benefício	0000/00
21	Data Acidente.2	29/09/2021
22	Data Nascimento	18/12/1982
23	Data Emissão CAT	01/10/2021
24	CNPJ/CEI Empregador	19.013.929.356.826

APÊNDICE C – Divisão do CBO

Código	Ocupação	Descrição
0	Membros das forças armadas, policiais e bombeiros militares	1 a 99.999
1	Membros superiores do poder público, dirigentes de organizações de interesse público e de empresas, gerentes	100.000 a 199.999
2	Profissionais das ciências e das artes	200.000 a 299.999
3	Técnicos de nível médio	300.000 a 399.999
4	Trabalhadores de serviços administrativos	400.000 a 499.999
5	Trabalhadores dos serviços, vendedores do comércio em lojas e mercados	500.000 a 599.999
6	Trabalhadores agropecuários, florestais e da pesca	600.000 a 699.999
7	Trabalhadores da produção de bens e serviços industriais	700.000 a 799.999
8	Trabalhadores da produção de bens e serviços industriais	800.000 a 899.999
9	Trabalhadores em serviços de reparação e manutenção	900.000 a 999.999

APÊNDICE D – Categorização Agente Causador

Código (atributo)	Descrição	Nº de atributos agrupados
0	Veículos, meios de transporte e equipamentos de transporte	19
1	Produtos alimentícios e/ou de origem animal	13
2	Ferramentas manuais sem força motriz	21
3	Ferramentas portáteis com força motriz ou aquecimento	15
4	Mobiliário e acessórios	8
5	Superfícies e equipamentos utilizados para sustentar pessoas	13
6	Edifício ou estrutura	16
7	Embalagem ou recipiente (vazio ou cheio)	5
8	Dispositivo de transmissão de energia mecânica	6
9	Condições ambientais ou do ambiente	20
10	Compostos e/ou substâncias químicas	16
11	Equipamentos de guindar	11
12	Equipamentos elétricos	11
13	Equipamentos ou substâncias emissoras de radiação (ionizante e não ionizante)	8
14	Petróleo, combustíveis e derivados	10
15	Equipamentos para trabalho em ambiente de pressão anormal	4
16	Máquinas	21
17	Cerâmica, utensílios e materiais derivados	7
18	Fornos e caldeiras	3
19	Vestuário e têxteis	2
20	Bombas, motores e turbinas	5
21	Agente infeccioso, produto biológico e medicamentos	3
22	Metais e minerais	3
23	Equipamentos sob pressão	2
24	Ser vivo	4
25	Aprisionamento, atrito, abrasão, impacto ou queda	8
26	Madeira	1
27	Água e líquidos	3
28	Vidro	1
29	Fogo e materiais inflamáveis	1
30	Esforço excessivo e movimentos involuntários	3
31	Outros	8

APÊNDICE E – Categorização Natureza da Lesão

Código (atributo)	Descrição	Nº de atributos agrupados
0	Amputação ou enucleação	1
1	Asfixia, estrangulamento e afogamento	1
2	Choque elétrico e eletroplessão	1
3	Concussão cerebral	1
4	Congelamento e geladura	1
5	Contusão e esmagamento	1
6	Corte, laceração, ferida contusa e punctura	1
7	Dermatose	1
8	Distensão e torção	1
9	Doença	2
10	Efeito de radiação (Imediato e mediato)	1
11	Envenenamento sistêmico	1
12	Escoriação e abrasão	1
13	Esforço excessivo	1
14	Fratura	1
15	Hérnia de qualquer natureza e ruptura	1
16	Inflamação de articulação, tendão ou músculo	1
17	Intermação, insolação, câibra e exaustão	1
18	Lesões	4
19	Luxação	1
20	Perda ou diminuição de sentido (Imediato e mediato)	1
21	Pneumoconiose	1
22	Queimaduras	2