

Tese apresentada à Pró-Reitoria de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica, Área de Infraestrutura Aeroportuária.

José Carlos de Moura Xavier

**RISCOS DE EVENTOS NA-TECH SOB MUDANÇAS
CLIMÁTICAS NA REGIÃO COSTEIRA DO
ESTADO DE SÃO PAULO**

Tese aprovada em sua versão final pelos abaixo assinados:



Prof. Dr. Wilson Cabral de Sousa Junior
Orientador

Prof. Dr. Pedro Teixeira Lacava
Pró-Reitor de Pós-Graduação

Campo Montenegro
São José dos Campos, SP – Brasil
2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Divisão de Informação e Documentação

Xavier, José Carlos de Moura

Riscos de eventos na-tech sob mudanças climáticas na região costeira do estado de São Paulo /

José Carlos de Moura Xavier

São José dos Campos, 2017.

112f.

Tese de doutorado – Curso de Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica, Área de Infraestrutura Aeroportuária – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2017. Orientador: Prof. Dr. Wilson Cabral de Sousa Junior.

1. avaliação quantitativa de risco. 2. AQR. 3. risco tecnológico. 4. na-tech. 5. mudança do clima. 6. planejamento do uso do solo. 7. licenciamento ambiental. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Riscos de eventos na-tech sob mudanças climáticas na região costeira do estado de São Paulo

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

XAVIER, José Carlos de Moura. **Riscos de eventos na-tech sob mudanças climáticas na região costeira do estado de São Paulo**. 2017. 112f. Tese de doutorado em Infraestrutura Aeroportuária – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: José Carlos de Moura Xavier

TÍTULO DO TRABALHO: **Riscos de eventos na-tech sob mudanças climáticas na região costeira do estado de São Paulo**.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Tese / 2017

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias desta tese e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese pode ser reproduzida sem a sua autorização.

José Carlos de Moura Xavier
Rua Alfredo Zunkeller, 117, apto. 41
CEP: 02421-070. Parque Mandaqui, São Paulo.

**RISCOS DE EVENTOS NA-TECH SOB MUDANÇAS
CLIMÁTICAS NA REGIÃO COSTEIRA DO
ESTADO DE SÃO PAULO**

José Carlos de Moura Xavier

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr.	Paulo Ivo Braga de Queiroz	Presidente	ITA
Prof. Dr.	Wilson Cabral de Sousa Junior	Orientador	ITA
Prof. Dra.	Nadiane Smaha Kruk		ITA
Prof. Dra.	Adelaide Cassia Nardocci		USP
Prof. Dra.	Celia Regina de Gouveia Souza		USP

ITA

Dedicatória

À Laís, minha filha, meu encanto.

Agradecimentos

Há sempre a quem agradecer. Pessoas que ao longo deste ciclo contribuíram de diversas formas e em momentos distintos para este trabalho.

Ao professor Wilson Cabral de Sousa Junior, mestre, amigo, agradeço pela confiança e a orientação.

Ao meu amigo Vitor Baccarin, agradeço pela parceria nos trabalhos de campo e pelo apoio na consecução das imagens.

Aos meus colegas de CETESB Jun e Ricardo, agradeço pelo apoio na tabulação e no tratamento dos dados.

À minha amiga Chou, agradeço pela orientação nas questões de modelagem do clima.

Ao jornal A Tribuna, de Santos, agradeço por me permitir consultar seu valioso acervo, tão bem cuidado por Eliete dos Santos, a quem serei sempre grato.

Agradeço também a todos aqueles que em algum momento participaram do trabalho com opiniões, sugestões, perguntas ou, simplesmente, dedicaram algum tempo a me ouvir falar dos na-techs.

Minha mãe e minha irmã estão entre aqueles a quem devo agradecer pela paciência, apoio, carinho e tantas coisas mais.

Desde 2007, incorporei ao meu vocabulário diário a palavra ITA. Com muito respeito, agradeço a todos os que fazem o Instituto Tecnológico de Aeronáutica ser relevante neste País.

Meu encontro com a CETESB é anterior, de 1992. Longa e feliz parceria. Meu agradecimento é presente e será eterno a todos aqueles que a fazem viva.

Minha formação acadêmica sempre passou pela escola pública. Desde o primário lá na década de 1960 até o doutoramento neste 2017, ocupei um espaço que poucos tiveram a oportunidade de ocupar. Sou, por isso, profundamente agradecido ao povo deste Brasil.

Resumo

Acidentes ambientais de origem tecnológica vêm sendo estudados há pelo menos 50 anos por meio de ferramentas tradicionais de modelagem matemática com o objetivo de minimizar perdas humanas, econômicas e de outros bens de interesse ambiental. Essas ferramentas se baseiam em hipóteses acidentais críveis decorrentes de falhas humanas e de equipamentos, na estimação dos seus impactos, das suas frequências de ocorrência e na expressão do risco imposto ao ser humano, à economia e ao ambiente, entre outros. Até recentemente, causas naturais não eram consideradas na formulação dessas hipóteses pelos guias dos países que adotam a Avaliação Quantitativa de Risco (AQR) em seus processos de decisão na ocupação do solo e no licenciamento de empreendimentos que manipulam substâncias perigosas. Acidente ambiental de origem tecnológica cuja causa seja um evento natural é conhecido como na-tech. Esta pesquisa investigou a ocorrência de na-techs na região costeira do estado de São Paulo entre 1940 e 2015. Identificou 15, dez deles em Cubatão, e caracterizou outros 12 como sugestivos. A frequência de ocorrência em Cubatão é crescente, embora os impactos registrados sejam similares ao longo do período investigado. Evidenciou-se a correlação entre na-tech e precipitação intensa. Treze dos 15 na-techs foram precedidos ou ocorreram durante forte chuva. Para Cubatão, determinou-se a probabilidade de ocorrência de um na-tech dada a ocorrência de precipitação de intensidade determinada. Investigou-se a tendência da precipitação para futuro próximo, 2040, considerando a possibilidade de aumento no número de na-techs. Dois testes não indicaram tendência ao nível de significância de 5%. Considerando as métricas risco individual e risco social da AQR vigentes no estado de São Paulo, o risco adicional decorrente de hipóteses na-tech é negligenciável e decorre da ausência de hipótese na-tech crível que levasse à fatalidade. Os vazamentos decorrentes de na-techs atingiram predominantemente corpos d'água próximos às empresas, requerendo gerenciamento apropriado. Bancos de dados brasileiros de acidentes e desastres devem ser adaptados para registrar na-techs. Sobre uma estrutura existente, pode-se ampliar a capacidade de identificá-los, seus impactos econômico e à imagem da empresa e lições aprendidas.

Palavras – chave: Avaliação quantitativa de risco, AQR, risco tecnológico, na-tech, mudança do clima, planejamento do uso do solo, licenciamento ambiental.

Abstract

Environmental accidents of technological origin have been studied for at least 50 years. Traditional tools of mathematical modeling have been employed to reduce the loss of human life and economic assets, as well as other environmental assets. These tools are based on credible accident hypothesis due to either human or equipment failures. Consequently, impacts and frequency estimates are made to express risk imposed on the human being, economy, environment, and others. Until recently, international guidelines for Quantitative Risk Assessment (QRA) did not consider natural causes in accident hypothesis formulation. The QRA is employed for land-use planning and operational licensing purposes for companies that handle hazardous substances. Natural hazards triggering technological accidents are denominated as na-tech events. This research investigated the occurrence of na-tech events on the state shoreline of São Paulo between 1940 and 2015. It identified 15 na-techs, 10 being in Cubatão, and characterized 12 others as suggestive. An increasing trend has been observed in the na-tech rate in Cubatão, although registered impacts have remained similar throughout that period. A correlation between the na-tech and intense precipitation was also observed. Thirteen out of 15 na-techs were preceded by or occurred during intense rain. The conditional probability of occurrence of na-tech given a certain precipitation intensity was determined for Cubatão. A precipitation trend for the near future, namely 2040, was also investigated as it can influence na-tech rates. At the significance level of 5%, neither of two trend tests suggested a trend in that period. Considering the individual risk and societal risk metrics of the QRA in force in the state of São Paulo, the additional risk due to na-tech hypothesis is negligible, stemming from the absence of credible hypothesis which would lead to fatalities. The na-tech spills predominantly affected bodies of water near companies, requiring appropriate management measures. Accident and disaster Brazilian databases must be adapted to record na-techs. Based on existing framework, the capacity to identify na-techs can be improved, as well as their economic and company's image impacts and lessons learned.

Keywords: Quantitative risk assessment, QRA, technological risk, na-tech, climate change, land-use planning, environmental licensing.

Lista de Figuras e Quadros

Figura 2.1	Espaço amostral dos valores de h (adaptado e modificado de JENNINGS e BENSON, 1969)	29
Figura 2.2	Representação da estimativa de probabilidade de ocorrência de na-tech condicionada ao limiar de precipitação h_0 $[P(N = 1 h > h_0)]$	35
Figura 2.3	Estimação da probabilidade de dano de equipamentos a partir da altura máxima da lâmina d'água e velocidade máxima da água (adaptado de ANTONIONI et al., 2009)	50
Figura 3.1	Municípios da região costeira do estado de São Paulo	53
Figura 3.2	Localização dos postos pluviométricos	56
Figura 3.3	Fluxograma das etapas para estimar o risco na-tech	57
Figura 3.4	Representação dos métodos adotados para a estimativa do risco na-tech ..	58
Figura 3.5	Demarcação das células para simulações do modelo Eta	64
Figura 4.1	Localização dos na-techs na região costeira do estado de São Paulo	70
Figura 4.2	Localização dos na-techs em Cubatão	70
Figura 4.3	Localização das empresas em Cubatão	71
Figura 4.4	Tendência da frequência de ocorrência de na-techs acumulada em Cubatão	73
Figura 4.5	Probabilidade de exceder $[P(h>h_0)]$ baseada na distribuição Weibull por posto	74
Figura 4.6	Probabilidade de exceder $[P(h>h_0)]$ baseada na distribuição Weibull para combinações de postos	75
Figura 4.7	Probabilidade de exceder $[P(h>h_0)]$ baseada na distribuição Weibull para a série regionalizada	78
Figura 4.8	Probabilidade de exceder $[P(h>h_0)]$ baseada na distribuição Weibull para as células C2, C3, C9 e Central, período histórico	81

Quadro 2.1	Modos de danos observados em tanques e equipamentos de processo durante inundações e categorias de lançamento estimadas	25
Quadro 2.2	Etapas do desenvolvimento de uma AQR para na-techs.....	49
Quadro 3.1	Características dos postos pluviométricos.....	55
Quadro 3.2	Meses investigados no jornal A Tribuna (in loco) e na Hemeroteca de Santos (jornais regionais do litoral paulista e jornais de circulação estadual/nacional)	59
Quadro 3.3	Fontes de informação de na-techs	61
Quadro 4.1	Na-techs identificados	67
Quadro 4.2	Decisão de rejeitar a hipótese nula (H_0) de ausência de tendência para os períodos histórico (1961-2005) e futuro (2007-2040, com os cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5) mediante aplicação dos testes de Mann-Kendall e Spearman	83
Quadro 4.3	Pontos de rejeição da hipótese nula (H_0) de ausência de tendência mediante aplicação dos testes de Mann-Kendall e Spearman	84
Quadro 4.4	Equipamentos e substâncias envolvidos nos na-techs	87

Lista de Tabelas

Tabela 4.1	Frequência de ocorrência de na-techs acumulada no tempo e normalizada pelo número de empresas (TN_i)	72
Tabela 4.2	Valores dos parâmetros α e β da distribuição Weibull por posto	74
Tabela 4.3	Valores dos parâmetros α e β da distribuição Weibull para medições agregadas dos (i) postos de Cubatão, (ii) demais postos e (iii) postos de Cubatão e demais postos	75
Tabela 4.4	Precipitação regionalizada para janeiro de 1940	77
Tabela 4.5	Valores dos parâmetros α e β da distribuição Weibull para a série regionalizada	78
Tabela 4.6	Precipitação regionalizada (h , mm) para o dia da ocorrência do na-tech (0h) e intervalo de $\pm 96h$	79
Tabela 4.7	Probabilidade de ocorrência de na-tech condicionada ao limiar de precipitação h_0	79
Tabela 4.8	Valores dos parâmetros α e β da distribuição Weibull para as células C2, C3, C9 e Central relativas ao período 1961-2005	80
Tabela 4.9	Número de vezes em que o limiar de precipitação h_0 é excedido na célula C1, período futuro, cenário RCP4.5	82

Lista de Abreviaturas e Siglas

AIChE	American Institute of Chemical Engineers
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
AQR	Avaliação Quantitativa de Risco
BARPI	Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industriels
Cetesb	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental até 06.08.2009
Cetesb	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo a partir de 07.08.2009
CONCAWE	European Petroleum Refiners Association
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
EGIG	European Gas Pipeline Incident Data Group
HSE	Health and Safety Executive
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
Petrobras	Petróleo Brasileiro S.A.
RMBS	Região Metropolitana da Baixada Santista
Sabesp	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
Transpetro	Petrobras Transporte S.A.
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UGRHI	Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	A pergunta e a resposta	16
1.2	Relevância e originalidade	18
1.3	Objetivos	19
1.4	Organização da pesquisa	19
2	DISCUSSÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Na-tech	20
2.1.1	Pesquisa de opinião: ponto de partida para conhecer os na-techs	21
2.1.2	Bancos de dados de na-techs	23
2.2	Frequência de ocorrência de na-techs	26
2.2.1	Estimativa baseada em registros	26
2.2.2	Estimativa condicionada à intensidade da precipitação	27
2.2.2.1	Análise das séries temporais de precipitação	28
2.2.2.2	Regionalização das medições de precipitação	34
2.2.2.3	Na-techs condicionados à intensidade regionalizada da precipitação	35
2.2.3	Tendência de precipitação sob a ótica das alterações do clima	35
2.2.3.1	Teste de Spearman	39
2.2.3.2	Teste de Mann-Kendall	40
2.3	Risco na-tech	41
2.3.1	Conceitos e estrutura metodológica da AQR	42
2.3.1.1	Descrição do empreendimento e do seu entorno	43
2.3.1.2	Identificação dos perigos e consolidação das hipóteses acidentais	43
2.3.1.3	Estimativa dos efeitos físicos e avaliação de vulnerabilidade	43

2.3.1.4	Estimativa de frequências	44
2.3.1.5	Estimativa e avaliação do risco	44
2.3.2	Decisão baseada em risco	46
2.3.3	Risco na-tech e sua inserção na AQR tradicional	48
3	MATERIAIS E MÉTODOS	52
3.1	Caracterização do objeto da pesquisa	52
3.1.1	Empreendimentos industriais	52
3.1.2	Região costeira do estado de São Paulo	52
3.2	Caracterização das fontes de dados	53
3.2.1	Jornais e bancos de dados	53
3.2.2	Postos pluviométricos	54
3.2.3	Projeções de precipitações	56
3.3	Métodos	57
3.3.1	Identificação dos na-techs	59
3.3.2	Frequência baseada em registros	61
3.3.3	Ocorrência de na-tech condicionada à intensidade da precipitação	62
3.3.4	Tendência da precipitação até 2040	63
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
4.1	Na-techs	66
4.1.1	Identificação	66
4.1.2	Frequência de ocorrência	71
4.2	Na-techs e precipitação	73
4.2.1	A distribuição regionalizada	76
4.2.2	Na-tech condicionado à intensidade da precipitação regionalizada	78
4.3	Tendência da precipitação até 2040	80
4.4	Risco na-tech	84
4.5	Observações sobre na-techs	87

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	90
REFERÊNCIAS	94
APÊNDICE A – Extrato dos registros de ocorrências 1940 – 2015	102
APÊNDICE B – As empresas de Cubatão e seus períodos de operação	105
APÊNDICE C – Comparação entre a função de distribuição acumulada empírica e funções teóricas obtidas a partir de dados dos 14 postos de Cubatão e região	108
APÊNDICE D – Comparação entre a função de distribuição acumulada empírica e funções teóricas obtidas a partir de dados regionalizados de precipitação de Cubatão	111
APÊNDICE E – Resultados dos testes de tendência para as séries histórica e futura da célula C5	112

1 Introdução

Desastres originados por causas naturais afligem indistintamente continentes, culturas, religiões e economias mais ou menos favorecidas. Entre 2005 e 2014, anualmente, 76 mil pessoas faleceram e 199,2 milhões foram vitimadas no planeta, com perdas econômicas de US\$ 159,7 bilhões. Em 2015, 67,6% das fatalidades e 69,9% dos vitimados pertenciam a países classificados como de renda baixa ou média inferior. Em contrapartida, 70,7% das perdas econômicas foram atribuídas a países de renda média superior e elevada. O continente americano foi o segundo mais afetado em número de desastres e em perdas econômicas e o terceiro em número de fatalidades e vítimas (GUHA-SAPIR; HOYOIS; BELOW, 2016).

No Brasil, entre 2005 e 2014, anualmente, 219 pessoas faleceram e 4 milhões foram vitimadas, com perdas econômicas de US\$ 1,1 bilhões (GUHA-SAPIR, 2017). No estado de São Paulo, entre 2005 e 2012, anualmente, 12 pessoas faleceram e 204 mil foram vitimadas, com perdas econômicas de R\$ 250 milhões ou cerca de US\$ 83 milhões (UFSC, 2013, 2016).

O olhar sobre o efeito direto de eventos naturais intensos no ser humano prevalece na literatura científica, nos bancos de dados oficiais e nos meios de comunicação. Menos presente é o olhar sobre o efeito indireto, que tem a participação da atividade industrial. Inundações, escorregamentos e terremotos, entre outros, podem se tornar desastres pelo efeito direto desses eventos no ser humano. Esse efeito pode ser ampliado devido à liberação para o ambiente de substâncias perigosas utilizadas na atividade industrial, atingindo os meios ar, água e solo e, eventualmente, o ser humano (KRAUSMANN et al., 2011).

No Brasil, em 2015, estavam instaladas cerca de 6500 indústrias químicas (IBGE, 2017, tabela 10), três centrais petroquímicas, 17 refinarias, 19.700km de dutos (petróleo, derivados e gás natural), 14 polos de processamento de gás natural e uma produção diária de 2,4 milhões de barris de petróleo e 90 mil barris de gás natural liquefeito (GNL), predominantemente a partir de poços marítimos (ANP, 2016, p. 77, 118, 239 a 241). Aproximadamente 81% da indústria química e 69% da indústria do coque, petróleo, derivados e biocombustíveis estão concentradas nas regiões Sul e Sudeste (IBGE, 2017, tabela 10), parte delas próximas as portos do Rio de Janeiro, São Sebastião, Santos e Paranaguá.

Ao se examinar o litoral das regiões Sul e Sudeste, observa-se concentração de empreendimentos industriais na região costeira paulista, notadamente na Região

Metropolitana da Baixada Santista (RMBS)¹. Nos municípios de Cubatão, Guarujá e Santos, há terminais marítimos de produtos químicos, de petróleo e derivados, indústrias químicas, de fertilizantes, siderurgia e uma refinaria de petróleo. Há uma rede de dutos que liga as indústrias aos terminais, entre eles o de São Sebastião, no litoral norte do Estado.

A região costeira do Brasil compreende aproximadamente 8000km. Na costa sudeste, que inclui os estados do Rio de Janeiro, São Paulo e parte do Espírito Santo e do Paraná e é a mais acidentada do litoral brasileiro, se registram precipitações anuais médias entre 1100mm a 1500mm, com máximas anuais acima de 4000mm no litoral paulista. As encostas, cobertas pela floresta tropical e com sobreposição de solos, estão sujeitas à erosão intensa (Ab'SÁBER, 2005a, p. 47, 49, 60; Ab'SÁBER, 2005b, p. 9, 32, 176).

Precipitação elevada, propensão a escorregamentos e concentração industrial sugerem a possibilidade de eventos envolvendo a liberação para o ambiente de substâncias perigosas decorrentes de causas naturais na região costeira paulista. Aliando-se a esse cenário a presença de diversos rios e de intensa ocupação humana, é razoável antever danos ao ser humano e ao ambiente (o efeito indireto já mencionado) decorrentes desses eventos.

Evento que envolve a perda de contenção de recipientes que armazenam substâncias químicas e radiológicas motivada por causa natural é identificado na literatura científica como evento na-tech, abordado em detalhes na seção 2.1.

Esta pesquisa investiga a ocorrência de eventos na-tech na região costeira paulista² e seus desdobramentos na indústria e no ambiente, ser humano inclusive. Sua abordagem busca oferecer indicadores numéricos que possam ser usados na avaliação quantitativa de risco (AQR), ferramenta utilizada na gestão de risco de empreendimentos que manipulam substâncias potencialmente causadoras de danos ao ambiente (CETESB, 2003; NAIME, 2010), cujos conceitos básicos são apresentados na subseção 2.3.1. Busca também estimar esses indicadores a partir de projeções climáticas de precipitação, com tendência de aumento para boa parte da costa brasileira (MARENGO et al., 2011).

1.1 A pergunta e a resposta

Acidentes ambientais de origem tecnológica, ou simplesmente acidentes tecnológicos, são estudados (diagnóstico e prognóstico) há pelo menos 50 anos por meio de ferramentas tradicionais de modelagem matemática como a avaliação quantitativa de risco (AQR) e o

¹ Vide municípios que a compõem na subseção 3.1.2.

² Vide municípios que a compõem na subseção 3.1.2.

estudo probabilístico de falhas, com o objetivo de minimizar perdas econômicas, humanas e de outros bens de interesse ambiental (FARMER, 1967).

Esses estudos se baseiam na formulação de hipóteses acidentais críveis, na estimação dos seus impactos e das suas frequências de ocorrência e, a partir da combinação destes (hipótese, impacto e frequência), na expressão qualitativa ou quantitativa do risco imposto ao ser humano, à economia e ao ambiente, entre outros.

Estimar a frequência com que uma hipótese acidental ocorre pressupõe conhecer, entre outras, a frequência de ocorrência do seu evento iniciador, em geral a perda de contenção de substâncias químicas perigosas, como gases e líquidos, tóxicos ou inflamáveis, sendo essa frequência comumente associada a causas como falhas humanas e de equipamentos. Causas naturais como tremores, maremotos, descargas elétricas e chuvas, entre outras, não eram consideradas nos guias de orientação para elaborar AQR (RIVM, 2009; CHINA, 2008; CETESB, 2014), situação modificada na Europa com a entrada em vigor em 2012 da diretiva SEVESO III, que estabelece regras para o gerenciamento dos perigos de instalações que manipulam substâncias perigosas (UNIÃO EUROPEIA, 2012, p. 3).

Esse entendimento pode se alterar no Brasil ao se observar os eventos na-tech ocorridos na Serra do Mar, em Cubatão, São Paulo, em 22 de fevereiro e em 17 março de 2013. No primeiro, precipitação da ordem de 200mm propiciou a movimentação significativa de massa, que atingiu a estação de tratamento de água (ETA) Pilões, da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) e arrastou cinco cilindros de cloro (Cl_2) com capacidade individual de 900kg para os rios Pilões e Cubatão. Após dias, um foi encontrado vazio próximo à Vila dos Pescadores, a 17km da ETA, e outro foi localizado no distrito de Vicente de Carvalho, Guarujá, no canal do Porto de Santos, a 29km da ETA. A intensidade da precipitação motivou a inundação da refinaria Presidente Bernardes (RPBC), da Petróleo Brasileiro S. A. (Petrobras), na porção próxima ao rio Cubatão e o transbordamento da Estação de Tratamento de Despejos Industriais (ETDI), carreando material oleoso para o rio. No segundo evento, de março, precipitação da ordem de 150mm levou à nova inundação da Refinaria, transbordamento da ETDI e arraste de material oleoso para o rio Cubatão (CETESB, 2017)³.

Na região costeira paulista, com precipitações intensas, grande número de empreendimentos industriais na sua porção central e elevada ocupação humana, entende-se relevante investigar o risco adicional imposto ao ser humano decorrente de eventos na-tech.

³ Parte do relato decorre de contato pessoal com o gestor do banco de dados de registros de emergências químicas da Cetesb denominado Sistema de Informações sobre Emergências Químicas – SIEQ.

Sendo assim, pergunta-se:

O risco adicional decorrente de eventos na-tech e imposto ao ser humano por empreendimento que manipula substâncias perigosas localizado na região costeira paulista, estimado de acordo com as métricas presentes em CETESB (2014), é significativo?

A hipótese a ser testada é que o risco adicional não é significativo.

1.2 Relevância e originalidade

Autorizar a expansão industrial em locais de adensamento populacional é desafiador para os órgãos licenciadores brasileiros. No contexto ambiental, ferramentas de risco são utilizadas desde o final dos anos 1980 para apoiar essa decisão e, mais recentemente, adota-se a AQR para esse fim pelo órgão licenciador federal e por alguns estaduais, entre eles o do estado de São Paulo.

Conhecer as causas dos acidentes é essencial para a formulação das hipóteses acidentais que compõem a AQR. Ampliar a investigação sobre as causas e incorporar as de origem natural, pode ser importante em locais propensos, como a região costeira paulista, considerando também o aumento da precipitação decorrente de mudanças do clima em parte do litoral brasileiro.

Portanto, a relevância da pesquisa está em poder subsidiar órgãos governamentais na formulação ou na revisão de políticas públicas associadas à prevenção de acidentes ambientais, entre elas a estruturação de planos de ação de emergência e o planejamento do uso do solo no entorno desses empreendimentos que manipulam substâncias perigosas, incorporando nas políticas a necessidade de previsão da ocorrência de eventos na-tech.

Empresas privadas também podem, proativamente, internalizar os métodos e, eventualmente, os resultados da pesquisa em suas políticas de segurança e de meio ambiente, otimizando suas ações de gerenciamento de risco.

O que torna a pesquisa original é a possibilidade de incorporar novas hipóteses acidentais à AQR, mantendo sua estrutura metodológica, com destaque para o processo de decisão onde ocorre a comparação do risco estimado com os critérios de tolerabilidade vigentes. No Brasil, não se encontrou na literatura científica e técnica relatos que mostrassem iniciativa semelhante. Entende-se também original o método de estimativa da frequência de ocorrência do evento iniciador da perda de contenção, o qual incorpora ferramentas estatísticas conhecidas.

1.3 Objetivos

O objetivo geral é conhecer o risco adicional imposto ao ser humano por empreendimentos localizados na região costeira do estado de São Paulo que manipulam substâncias químicas perigosas decorrente de eventos iniciadores que tenham como causa básica precipitação.

Como objetivos específicos, temos:

- a) Identificar eventos na-tech na região de interesse da pesquisa;
- b) Estimar suas frequências de ocorrência;
- c) Associar os eventos à intensidade da precipitação com base em análise de séries temporais (passado) e em projeções do clima até 2040;
- d) Identificar impactos ao ser humano e ao ambiente.
- e) Estimar o risco adicional ao ser humano.

1.4 Organização da pesquisa

O capítulo 2 apresenta a base teórica que suportou a realização dos objetivos específicos (b) a (e) da seção 1.3. Nesse capítulo discorre-se sobre (i) evento na-tech, (ii) sua frequência de ocorrência e (iii) estimativa e avaliação do risco utilizando a AQR.

No capítulo 3, delimita-se e caracteriza-se o objeto da pesquisa e as fontes de dados. Também se descrevem os métodos empregados para a consecução dos objetivos específicos (a) a (e) da seção 1.3.

O capítulo 4 apresenta e discute os resultados da pesquisa, com conclusões e recomendações no quinto capítulo.

2 Discussão teórica e revisão bibliográfica

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica relativa à estimativa quantitativa do risco imposto ao ser humano por empreendimentos que manipulam substâncias perigosas decorrente de eventos na-tech. São exemplos desses empreendimentos indústrias, refinarias, terminais marítimos, bases de distribuição de combustíveis, dutos e ferrovias, doravante denominados empreendimento industrial. Por simplificação, evento(s) na-tech será(ão) denominado(s) na-tech(s).

Na seção 2.1, se discute o na-tech, sua origem, seus potenciais impactos e como pode ser incluído em uma AQR. Na seção 2.2, se discute a frequência de ocorrência dos na-techs a partir das perspectivas histórica, da correlação com intensidade de chuva e das mudanças do clima. Na seção 2.3, se discute seus impactos e como estimar e avaliar o risco usando a AQR.

2.1 Na-tech

O termo na-tech, do inglês *natural-technological*, é empregado na literatura científica como sinônimo de perda de contenção de recipientes que armazenam substâncias químicas e radiológicas motivada pela ação de eventos naturais.

Algumas publicações mais recentes destacam a origem desse termo nos trabalhos de Showalter e Myers (1992, 1994), que o empregaram em pesquisa sobre a percepção das agências de gerenciamento de emergências dos 50 estados americanos (Estados Unidos da América) quanto à relação entre desastres naturais e emergências tecnológicas. Ao longo do texto, discutindo os resultados da pesquisa, as autoras empregaram o termo evento na-tech quando se referiam à ocorrência de evento natural (terremotos, furacões, inundações, tornados) e o efeito secundário de liberação para o ambiente de substância química perigosa, inclusive de origem nuclear, fazendo clara distinção entre evento natural, evento tecnológico e evento na-tech.

Cozzani et al. (2010) apontaram tanques atmosféricos e pressurizados como predominantemente envolvidos nessa liberação, seguidos por tubulações. Entre as substâncias liberadas, predominaram petróleo e seus derivados líquidos e gasosos.

Petrova (2011) apontou os tanques de petróleo e derivados como os mais vulneráveis

ao impacto de inundações, escorregamentos, terremotos e raios, mencionando a inundação catastrófica de 2011 em Lensk, República da Sakha, Rússia.

Na-tech ganhou amplitude incorporando no seu ramo tecnológico (*technological*) abordagens sobre danos em linhas de energia elétrica, de aquecimento, de água potável, de água para combate a incêndio, ou ainda danos no transporte de massa (trens, metrô, aeronaves) (PETROVA, 2011). Também ganhou amplitude conceitual ao ser utilizado no termo risco na-tech, que busca discutir o risco ao ambiente, ser humano inclusive, decorrente de na-techs.

O ramo natural (*natural*) traz relação direta com a região geográfica do planeta onde a pesquisa é realizada. Petrova (2011), que discutiu a ocorrência de na-techs na Rússia, citou avalanches de neve e congelamento do solo como causadores de ruptura em dutos, além de inundações, terremotos e furacões. Milazzo et al. (2013) abordaram os efeitos da cinza expelida por vulcões em indústrias localizadas no seu entorno, com foco em danos estruturais e mau funcionamento de tanques atmosféricos contendo substâncias inflamáveis.

A possibilidade de ocorrência de múltiplos vazamentos decorrentes de um único evento iniciador foi destacada por Krausmann et al. (2011) e atribuída aos na-techs. A simultaneidade dos vazamentos pode ampliar os danos ao ser humano e ao ambiente, seja pelo impacto direto do efeito físico, por exemplo, da radiação decorrente de um incêndio ou da sobrepressão decorrente de uma explosão, seja pelas restrições às ações de emergência decorrentes de danos às linhas de energia elétrica ou de água de combate a incêndio, dificuldade de acesso das equipes de emergência ou mesmo competição por estas, dada a ocorrência simultânea com o evento natural, por exemplo, uma inundação.

Há muitos exemplos que ilustram essa simultaneidade. Petrova (2011) destacou o terremoto de Neftegorsk, de maio de 1995 na Rússia, que causou cerca de 200 rupturas de dutos de óleo (petróleo e derivados), com centenas de milhares de toneladas de óleo vazadas na parte norte da Ilha Sakalina.

Neste momento, pode-se perguntar como identificar, recuperar e conhecer na-techs no Brasil. As subseções 2.1.1 e 2.1.2 propõem alguns caminhos.

2.1.1 Pesquisa de opinião: ponto de partida para conhecer os na-techs

Showalter e Myers (1992, 1994) empregaram um questionário com dez perguntas que objetivavam: (i) conhecer o número de na-techs de cada estado americano no período de 1980 a 1989 e o desastres declarados pelos estados ou pela federação, (ii) identificar códigos e

guias que regulamentam e orientam como materiais perigosos são manipulados e se estes consideram eventos naturais como possíveis causas de lançamentos, (iii) ranquear intuitivamente a suscetibilidade a na-techs e a satisfação com as medidas adotadas para evitá-los, (iv) solicitar comentários sobre porque na-techs parecem ser incomuns e (v) sugestões para mitigar esses eventos. Respostas completas retornaram de 25 estados; outros 17 responderam parcialmente, que permitiu às autoras elaborar alguma estatística descritiva do encontrado e discorrer sobre a percepção das agências de gerenciamento de emergências acerca da possibilidade de ocorrência de um na-tech no seu estado e a existência de medidas de gerenciamento dos mesmos.

Destacam-se os comentários acerca da dificuldade em recuperar dados sobre na-techs e da percepção sobre a pequena frequência de ocorrência dos mesmos. As autoras afirmaram que a percepção sobre a suscetibilidade do estado a um na-tech aumentou em estados onde a informação era claramente organizada e disponibilizada. Destacaram ainda a satisfação dos respondentes acerca da capacidade do estado (município, estado, federação) em reconhecer o evento e estabelecer medidas de mitigação.

Krausmann e Baranzini (2012) destacaram a conscientização crescente na Europa acerca do emergente risco na-tech. Contudo, apontaram que a pouca informação sobre o status de redução desse risco na União Europeia motivou o Joint Research Centre (JRC), centro de pesquisa dessa União, a enviar questionário aos 27 países membros perguntando sobre regulamentos e normas específicos para prevenir na-techs, objetivando avaliar sua efetividade, identificar boas práticas de gerenciamento e observar pontos fracos e necessidades. Quatorze países responderam, sendo doze instituições públicas e duas acadêmicas. Predominaram respostas abordando a falta de orientações específicas para esse tipo de evento, embora programas de prevenção estivessem em elaboração. A pesquisa destacou que raios, inundações e baixa temperatura respondem por cerca de 65% dos eventos. Quando a pergunta abordou a suscetibilidade a eventos naturais e o potencial para gerar na-techs, as respostas destacaram que os principais perigos são inundações de rios, tormentas (vento a alta velocidade), chuva forte, enxurradas e raios. As autoras associaram esse grupo de respostas com as mudanças do clima do planeta, que poderiam levar a aumento da frequência e da severidade de eventos hidrometeorológicos. A pesquisa também identificou a ausência de mapas de risco na-tech, que poderiam auxiliar no gerenciamento da ocupação do solo e na elaboração de planos de emergência. Sobre a afirmação de que métodos de avaliação de risco adotados pela indústria abordam adequadamente na-techs, seis de treze respostas foram discordantes. Outro destaque da pesquisa foi a proposta de desenvolvimento de pesquisa

sobre impactos das mudanças do clima na estimativa do risco na-tech.

O mesmo questionário foi enviado para os membros do grupo de trabalho em acidentes químicos da Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento (OECD). Os 20 países representados no grupo (onze deles também membros da União Europeia) retornaram o questionário totalmente respondido, com 40% deles apontando raios, inundações e baixas temperaturas como os geradores mais frequentes de na-techs, que levaram as autoras a apontar discrepâncias entre percepção e ocorrido, com subestimação dos acidentes motivados por raios e baixas temperaturas.

As autoras observaram a necessidade de avanços no conhecimento dos efeitos dos na-techs na Europa e sugeriram temas de pesquisa para órgãos públicos, indústria e comunidade científica, entre eles a necessidade de entender o impacto das mudanças do clima no risco na-tech no futuro.

2.1.2 Bancos de dados de na-techs

Informações sobre a liberação de produtos químicos para o ambiente são tradicionalmente recolhidas, organizadas e divulgadas por instituições de pesquisa, órgãos públicos e órgãos privados. São os chamados bancos de dados de acidentes – independentemente do entendimento sobre o termo acidente.

Bancos como EM-DAT (Guha-Sapir, 2017), EMARS (European Commission, 2017), ARIA (BARPI, 2017), EGIG (EGIG, 2015), CONCAWE (CONCAWE, 2017) e SIEQ (CETESB, 2017) trazem informações como data e local da ocorrência, substância envolvida, bens ambientais afetados, perdas financeiras, entre outros. O universo dos bancos se reduz quando o enfoque são as causas dos acidentes, mesmo as imediatas, quiçá as causas raízes.

Para uma busca por na-techs, o desejável seria encontrar uma chave de pesquisa que permitisse a localização direta desses eventos, no período e local de interesse. Significa dizer que o banco precisaria ser planejado para essa aquisição da informação.

Krausmann e Baranzini (2012), na pesquisa abordada na subseção 2.1.1, identificaram a ausência de banco de dados específico para na-techs em 13 países que responderam à pesquisa. Desses, 11 responderam que mantêm bancos de dados de acidentes e que os motivados por eventos naturais podem ser recuperados. As autoras manifestaram alguma preocupação com essa estratégia, notadamente quanto à consistência e confiabilidade do registro de um na-tech em bancos de acidentes com químicos.

A ausência de banco de dados específico para na-tech também pode ser observada na

Rússia, onde um banco de dados de acidentes recentemente iniciado coleta informações sobre acidentes tecnológicos diversos, como ruptura de linhas de transmissão de energia elétrica, descarrilamento de trens ou incêndios e explosões em minas de carvão. Entre as causas, as naturais eram cerca de 10% entre 1991 e 2010, sendo que os na-techs eram cerca de 8% desse total (0,10 x 0,08) (PETROVA, 2011).

A experiência de Santella, Steinberg e Aguirra (2011), que analisaram bancos de dados americanos⁴, ou de Cozzani et al. (2010), que pesquisaram em bancos europeus⁵ e norte-americano⁶, indicam a necessidade de estruturá-los para que os na-techs sejam satisfatoriamente caracterizados. Ainda assim, esses autores identificaram informações sobre esses eventos que suportaram a proposta de modelos determinísticos (Landucci et al., 2012) e probabilísticos (Santella, Steinberg e Aguirra, 2011), para estimar o risco na-tech.

Mais detalhadamente, Cozzani et al. (2010) buscaram dois aspectos essenciais em na-techs associados a inundações: os modos de falha dos equipamentos nas inundações e os aspectos dos cenários após os lançamentos. A intenção foi desenvolver uma cadeia sistemática de eventos que auxiliasse na estimativa quantitativa do risco na-tech.

Para um pequeno número de relatos, foi possível saber a altura máxima (h_w) atingida pela lâmina d'água e/ou velocidade (v_w) da água, sugerindo que mais de 50% dos danos aos equipamentos acontecem quando $h_w > 1\text{m}$. Quanto aos equipamentos, os mais afetados pelas inundações foram tubulações (17%) e tanques de armazenamento (74%), com predominância dos atmosféricos (33%), pressurizados (13%) e de teto flutuante (22%).

Os modos de falha observados que levaram às perdas de contenção foram: rompimento de conexões (41%), deslocamento dos tanques (26%), falha do teto flutuante dos tanques (21%) e implosão/colapso (12%). O quadro 2.1 correlaciona esses modos e as categorias de lançamento observadas.

Entre as tipologias acidentais, foram encontradas explosões (5%), incêndios (15%), ignições sem formação de poça (16%), dispersões atmosféricas (7%) e contaminação da água (57%), esta última evidenciando que as substâncias vazadas podem se espalhar e causar efeitos em áreas amplas, com possível contaminação do solo e da água subterrânea. O estudo também encontrou casos de substâncias que reagiram com a água e geraram nuvens tóxicas (cianeto de hidrogênio – HCN) ou incêndios e explosões (acetileno), aspecto também

⁴ National Response Center (NRC), Incident Reporting Information System (IRIS) e EPA Emergency Response Notification System (ERNS).

⁵ Analyse, Recherche et Information sur les Accidents (ARIA), Hazardous Materials Accident Knowledge Base (FACTS), Major Accident Reporting System (MARS), Major Hazard Incident Data Service (MHIDAS).

⁶ National Response Center (NRC).

destacado por Antonioni et al. (2009).

Quadro 2.1 – Modos de danos observados em tanques e equipamentos de processo durante inundações e categorias de lançamento estimadas (adaptado e modificado de COZZANI et al., 2010).

Modalidade do impacto da água	Tipo de dano estrutural	Categoria de lançamento
Submersão lenta	Colapso por instabilidade (falha catastrófica)	Lançamento instantâneo de todo o inventário (R1)
	Falha completa da tubulação conectada	Lançamento contínuo de todo o inventário em tempo limitado devido à ruptura do costado (R2)
	Falhas de flanges e conexões	Vazamentos pequenos decorrentes de ruptura parcial de conexões ou de ruptura total de tubulações de pequeno diâmetro (R3)
Onda com velocidade moderada	Falhas de flanges e conexões Danos de conexões devido a objetos flutuantes	R3
Onda com velocidade elevada	Impacto com/dos tanques adjacentes	R1
	Falha do teto e/ou ruptura do costado	R2
	Falha completa da tubulação conectada	R2
	Falha de flanges e conexões	R3

Estes autores também adotaram a pesquisa a bancos de dados de acidentes para quantificar a extensão do dano e a frequência dos na-techs e será discutida à frente.

Santella, Steinberg e Aguirra (2011) delimitaram a pesquisa entre 1990 e 2006 buscando a perda de contenção de equipamentos que armazenavam petróleo, seus derivados e outros materiais perigosos no âmbito industrial associada à ocorrência de eventos naturais como furacões, terremotos, tornados e inundações. Identificaram 16.600 na-techs entre 550.000 vazamentos registrados, com predominância para os decorrentes de terremotos e furacões. Então, construíram curvas de fragilidade para representar a relação entre o número de lançamentos e a velocidade do vento no caso de furacões ou a aceleração máxima para os

terremotos. Para inundações, os autores sugeriram incorporar algumas das suas características, como altura da lâmina d'água, já propostas por Cozzani et al. (2010).

Dutos estão entre os empreendimentos industriais de interesse na investigação de na-techs, visto que, em geral, transportam substâncias perigosas. Girgin e Krausmann (2016) investigaram a ocorrência de na-techs na rede de dutos “on-shore” de transporte de líquidos perigosos dos Estados Unidos da América. Identificaram 387 na-techs no período 1986-2012. No período de 2004-2012 e extensão anual média de 261,3 mil km, estimaram a frequência de na-techs em $3,4E-05\text{km}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$. Com os dados coletados de diferentes fontes americanas, construíram um banco específico para na-techs em dutos.

No Brasil, Xavier e Sousa Junior (2016) também identificaram a ausência de banco de dados específico para o registro de na-techs. Os bancos de dados existentes, planejados para o registro de acidentes de origem natural e tecnológica, não têm ferramentas que possibilitem convergir para a busca de na-techs.

As subseções 2.1.1 e 2.1.2 mostraram que o conhecimento sobre na-techs pode advir de estratégias de busca que incluem a pesquisa a bancos de dados de acidentes com substâncias perigosas ou a consulta a órgãos de governo e associações que representem os empreendimentos industriais. Mostraram ainda a possibilidade de caracterizar quantitativamente os na-techs a partir de estimadores de frequência de ocorrência e de impacto e, conseqüentemente, de discutir a contribuição desses eventos ao risco imposto pelo empreendimento industrial ao seu entorno. Na seção 2.2, discute-se algumas alternativas para a estimativa da frequência de ocorrência de na-techs.

2.2 Frequência de ocorrência de na-techs

Esta seção traz alternativas metodológicas para estimar a frequência de ocorrência de na-techs. A primeira, apresentada na subseção 2.2.1, considera a disponibilidade de registros de ocorrência dos na-techs com informação mínima como data, local e substâncias envolvidas. A segunda alternativa aborda a ocorrência de na-tech condicionada à intensidade da precipitação. A subseção 2.2.2 a apresenta.

2.2.1 Estimativa baseada em registros

Na AQR para dutos, Cetesb (2014) adota a frequência das hipóteses acidentais a partir

da frequência de vazamentos estimada por bancos de dados como EGIG e CONCAWE (CETESB, 2014), que referem vazamentos em dutos de gás natural (GN) e de petróleo e derivados, respectivamente, na Europa.

Sob o aspecto metodológico, a frequência decorre do número de vazamentos relativizado pelo período de observação e pela extensão dos dutos. Por exemplo, EGIG (2015) informa uma frequência de ocorrência de 0,33 ocorrências anuais por 1000km de duto. Essa estimativa decorre do registro de 1309 ocorrências durante o período de 1970-2013 em cerca de 143 mil km de dutos (extensão atual), equivalendo à exposição total de 3,98 milhões km.ano.

Seguindo raciocínio similar ao presente em EGIG e CONCAWE, onde o número de vazamentos é relativizado pela extensão dos dutos, a equação 2.1 permite estimar a frequência de ocorrência de na-techs acumulada no tempo e relativizada pelo número de empresas (TN_i) a partir de registros de bancos de dados.

$$TN_i = \left(\sum_{i=1}^n \frac{N_i}{E_i} \right) \left(\sum_{i=1}^n P_i \right)^{-1} \quad (2.1)$$

onde (i) intervalo de interesse, (N_i) número de na-techs no intervalo i, (E_i) número de empresas no intervalo i e (P_i) número de anos em cada intervalo i.

Divide-se o período de interesse em intervalos regulares e verifica-se quantos na-techs e empresas estão cada intervalo. Então, calcula-se a frequência a partir da equação 2.1.

2.2.2 Estimativa condicionada à intensidade da precipitação

Inicialmente, e buscando similaridade com pesquisas que discutiam a ocorrência de na-techs associada a inundações, planejou-se identificar correlação entre na-techs e as variáveis hidrológicas vazão, volume e duração, comumente utilizadas para descrever inundações (YUE et al., 1999; BEN AISSIA et al., 2014).

A prospecção por dados fluviométricos para a região costeira do estado de São Paulo identificou medições de vazão e cota provenientes do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), vinculado à Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos do estado de São Paulo. Há medições em oito postos de medição de Caraguatatuba, Ilha Bela e Ubatuba, entre os anos de 1949 a 1990, com extensão máxima de 23 anos. Em Cananéia e Iguape, há medições em cinco postos entre os anos de 1959 a 1973, com extensão máxima de cinco anos.

Para a RMBS, há medições em doze postos entre os anos de 1953 a 1993, com extensão máxima de 21 anos. Entre esses postos, há medições de um posto no rio Cubatão, no período 1966-1973. Outros dois no rio Mogi, com medições entre 1972 e 1974. Outro posto no rio Perequê tem medições no período 1973-1975.

Já a disponibilidade de medições pluviométricas é farta e extensa, oriundas de sete postos em Cubatão e mais sete no seu entorno, com séries de medições diárias a partir de 1936 (SÃO PAULO, 2017c).

Dada a limitada extensão das séries fluviométricas, optou-se por identificar correlação entre na-techs e precipitação.

As subseções a seguir apresentam a fundamentação teórica para expressar a probabilidade de ocorrência de na-tech dada a ocorrência de precipitação de intensidade h_0 .

2.2.2.1 Análise das séries temporais de precipitação

Yue et al. (1999), Caballero e Rahman (2014) e Gul et al. (2014) adotaram a abordagem tradicional, baseada em frequência, para a análise das séries pluviométricas, descrevendo o comportamento das medições por meio de modelos probabilísticos.

Aspectos relevantes são a qualidade e a extensão das séries. Madsen et al. (2013), que abordaram o projeto COST Action ES0901 sobre comparação e avaliação de métodos para estimativa de frequência de enchentes na Europa, indicaram a necessidade de trabalhar com dados cuja qualidade seja controlada e apontaram para a redução da potência dos testes estatísticos decorrentes da heterogeneidade das medições, que pode ser um problema com dados antigos.

Os mesmos autores apontaram que séries longas de medições aumentam a potência dos testes estatísticos de tendência, ou seja, há maior probabilidade de rejeitar a hipótese nula quando ela é falsa (MONTGOMERY; RUNGER, 2009, p.487). Yue et al. (1999), Caballero e Rahman (2014) e Gul et al. (2014) utilizaram séries hidrológicas de 32, 45 e 60 anos, respectivamente.

Quanto aos modelos probabilísticos, Gul et al. (2014) e Zhang et al. (2014) testaram ao menos seis deles em dados hidrológicos, adotando aquele com melhor aderência aos dados. Madsen et al. (2013) informaram a aplicação de sete modelos às vazões máximas anuais provenientes de modelos matemáticos de precipitação-escoamento.

Entre esses modelos, as distribuições Gama, Weibull e Pearson tipo 3 são hábeis em representar a distribuição das medições de altura pluviométrica 24h, caracterizada pela

presença de caudas superior e inferior. As caudas são observadas em histogramas, elaborados a partir do procedimento proposto por Sturges (1926).

O método de máxima verossimilhança (SOONG, 2004, p. 287) está entre os adotados na estimativa dos parâmetros das distribuições a partir dos valores amostrais (GUL et al., 2014; MADSEN et al., 2013). Quando há medições nulas (zeros) na amostra, seus logaritmos tornam-se $-\infty$ e a solução para o método não pode ser calculada. Kite (1978) discute diferentes alternativas para zeros na amostra, entre elas a presente em Jennings e Benson (1969). Os autores consideraram o conceito de probabilidade condicional, aqui desenvolvido com apoio da figura 2.1.

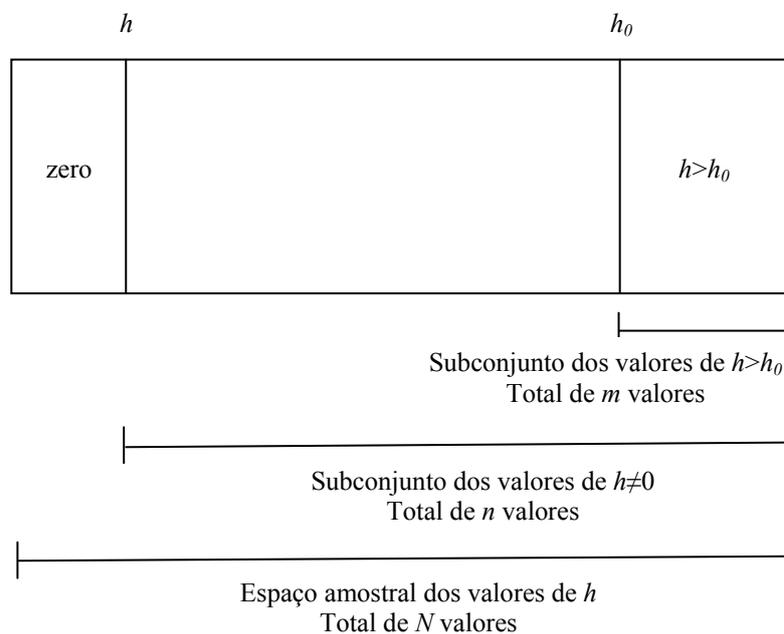


Figura 2.1 – Espaço amostral dos valores de h (adaptado e modificado de JENNINGS e BENSON, 1969).

A probabilidade de ocorrer uma precipitação maior que um limiar [$P(h > h_0)$] pode ser obtida a partir da equação 2.2, referente à probabilidade condicional de ocorrência de $h > h_0$ dado que h é diferente de zero.

$$P[h > h_0 \mid h \neq 0] = \frac{P[(h > h_0)(h \neq 0)]}{P(h \neq 0)} \quad (2.2)$$

Da figura 2.1, verificou-se que a intersecção $P[(h > h_0)(h \neq 0)]$ é igual a $P(h > h_0)$ e que $P(h \neq 0)$ é igual a n/N , resultando na equação 2.3.

$$P[h > h_0 | h \neq 0] = \frac{P(h > h_0)}{P(h \neq 0)}$$

$$P(h > h_0) = P[h > h_0 | h \neq 0] \cdot P(h \neq 0)$$

$$P(h > h_0) = \frac{n}{N} P[h > h_0 | h \neq 0] \quad (2.3)$$

Quando um modelo probabilístico é ajustado às medições, a probabilidade condicional $P[h > h_0 | h \neq 0]$ pode ser definida pela função de distribuição acumulada (*FDA*) do modelo em análise, como mostra a equação 2.4.

$$P(h > h_0) = \frac{n}{N} (1 - FDA_{h \neq 0}) \quad (2.4)$$

As equações 2.5 a 2.20 permitem estimar as $FDA_{h \neq 0}$ das distribuições Gama, Weibull e Pearson tipo 3.

As equações 2.5 e 2.6 referem-se à função densidade de probabilidade e à função de distribuição acumulada da distribuição Gama biparamétrica, respectivamente.

$$f_X(x) = \begin{cases} \frac{\lambda^\eta}{\Gamma(\eta)} x^{\eta-1} e^{-\lambda x}, & \text{para } x \geq 0 \\ 0, & \text{qualquer outro} \end{cases} \quad (2.5)$$

$$F_X(x) = \frac{\Gamma_i(\eta, \lambda x)}{\Gamma(\eta)} \quad (2.6)$$

onde η (fator de forma) e λ (inverso do fator de escala θ) são parâmetros da distribuição e Γ (função gama) e Γ_i (função gama incompleta).

A solução da equação 2.6 não é trivial. Maione e Moisello (2003 apud NAGHETTINI; PINTO, 2007, p. 148) aproximaram a equação 2.6 pela distribuição normal padrão $\Phi(u)$, calculada no ponto u , definido pela equação 2.7.

$$u = 3\sqrt{\eta} \left(\sqrt[3]{\frac{\lambda x}{\eta}} - 1 + \frac{1}{9\eta} \right) \quad (2.7)$$

Estimou-se os parâmetros $\hat{\eta}$ e $\hat{\lambda}$ pelo método de máxima verossimilhança, conforme as

equações 2.8 e 2.9 (NAGHETTINI; PINTO, 2007, p.231).

$$\ln \eta - \frac{\partial}{\partial \eta} \ln \Gamma(\eta) = \ln \bar{x} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln x_i \quad (2.8)$$

$$\frac{1}{\lambda} = \hat{\theta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\eta}} \quad (2.9)$$

A solução da equação 2.8 não é trivial e pode ser aproximada por:

$$\hat{\eta} = \frac{0,5+0,1649y-0,0544y^2}{y} \text{ se } 0 \leq y \leq 0,5772, \text{ ou} \quad (2.10)$$

$$\hat{\eta} = \frac{8,899+9,060y-0,9775y^2}{y(17,7973+11,9685y+y^2)} \text{ se } 0,5772 < y \leq 17$$

onde $y = \ln \bar{x} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln x_i$.

As equações 2.11 e 2.12 referem-se à função densidade de probabilidade e à função de distribuição acumulada da distribuição Weibull biparamétrica, respectivamente.

$$f(t) = \alpha \beta t^{\beta-1} e^{-\alpha t^\beta}, t > 0 \quad (2.11)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\alpha t^\beta} \quad (2.12)$$

Estimou-se os parâmetros $\hat{\alpha}$ e $\hat{\beta}$ pelo método de máxima verossimilhança, conforme as equações 2.13 e 2.14 (ROSS, 2004, p. 602).

$$\hat{\alpha} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n x_i^{\hat{\beta}}} \quad (2.13)$$

$$n + \hat{\beta} \ln(\prod_{i=1}^n x_i) = \frac{n \hat{\beta} \sum_{i=1}^n x_i^{\hat{\beta}} \ln x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^{\hat{\beta}}} \quad (2.14)$$

As equações 2.15 e 2.16 referem-se à função densidade de probabilidade e à função de distribuição acumulada da distribuição Pearson tipo 3, triparamétrica, respectivamente.

$$f_X(x) = \frac{1}{\theta\Gamma(\eta)} \left(\frac{x-\gamma}{\theta}\right)^{\eta-1} e^{-\frac{x-\gamma}{\theta}} \text{ para } \gamma < x < \infty \quad (2.15)$$

$$F_X(x) = \frac{1}{\theta\Gamma(\eta)} \int_{\gamma}^{\infty} \left(\frac{x-\gamma}{\theta}\right)^{\eta-1} e^{-\frac{x-\gamma}{\theta}} dx \quad (2.16)$$

onde θ (fator de escala), η (fator de forma) e γ (fator de posição) são parâmetros da distribuição e Γ (função gama).

A solução da equação 2.16 não é trivial. Naghettini e Pinto (2007, p. 173) aproximam a equação 2.16 pela distribuição normal padrão $\Phi(u)$, calculada no ponto u , definido pela equação 2.17.

$$u = 3\sqrt{\eta} \left(\sqrt[3]{\frac{x-\gamma}{\theta\eta}} - 1 + \frac{1}{9\eta} \right) \quad (2.17)$$

Estimou-se os parâmetros $\hat{\eta}$, $\hat{\theta}$ e $\hat{\gamma}$ pelo método de máxima verossimilhança, conforme as equações 2.18 a 2.20 (NAGHETTINI; PINTO, 2007, p. 236; MATALAS, 1963, p. A11).

$$\sum_{i=1}^N (x_i - \gamma) = N\theta\eta \quad (2.18)$$

$$N \frac{\Gamma'(\eta)}{\Gamma(\eta)} = \sum_{i=1}^N \ln\left[\frac{x_i-\gamma}{\theta}\right] \quad (2.19)$$

$$N = \theta(\eta - 1) \sum_{i=1}^N \frac{1}{x_i-\gamma} \quad (2.20)$$

onde $\frac{\Gamma'(\eta)}{\Gamma(\eta)}$, segundo Abramowitz e Stegun (1972, p. 259) e Naghettini e Pinto (2007, p. 236) pode ser aproximada por:

$$\frac{\Gamma'(\eta)}{\Gamma(\eta)} \cong \ln\eta - \frac{1}{2\eta} - \frac{1}{12\eta^2} + \frac{1}{120\eta^4} - \frac{1}{252\eta^6} + \frac{1}{240\eta^8} - \frac{1}{132\eta^{10}}$$

Yue et al. (1999), Caballero e Rahman (2014), Gul et al. (2014) e Zhang et al. (2014) aplicaram os testes Chi-quadrado (C-S), Kolmogorov-Smirnov (K-S) e Anderson-Darling (A-D) a séries hidrológicas para verificar a aderência de modelos probabilísticos às medições.

Como os parâmetros desses modelos não são previamente conhecidos, ou seja, são

estimados a partir das amostras, os testes sofreram modificações.

Segundo Soong (2004, p. 322), a equação 2.21 apresenta a estatística teste (D) do teste qui-quadrado (C-S).

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{N_i^2}{n\hat{p}_i} - n \quad (2.21)$$

onde n representa o total de medições, N_i é o número de medições em cada intervalo e \hat{p}_i é um estimador para p_i , probabilidade observada de cada intervalo.

Estabeleceu-se o nível de significância (α) do teste e o grau de liberdade ($k-r-1$), onde k representa o número de intervalos e r o número de parâmetros da distribuição. Então, a partir de tabelas disponíveis na literatura, determinou-se o valor de $\chi_{k-r-1, \alpha}^2$. A hipótese nula (H_0) de que os dados seguem a distribuição em teste é rejeitada se o valor da estatística teste (d) é maior que $\chi_{k-r-1, \alpha}^2$. De outra forma, não há evidência para rejeitar H_0 .

Segundo Naghettini e Pinto (2007, p. 275), a equação 2.22 apresenta a estatística teste (D_N) do teste Kolmogorov-Smirnov (K-S).

$$D_N = \max |F_N(x) - F_X(x)| \quad (2.22)$$

onde $-\infty < x < \infty$, N representa o total de medições, $\{x_{(1)}, x_{(2)}, x_{(3)}, \dots, x_{(m)}, \dots, x_{(N)}\}$ representam as observações ordenadas em modo crescente, a distribuição empírica é calculada pela proporção de valores amostrais que não excedem $x_{(m)}$ [$F_N(x_m) = m/N$], F_X é a função de distribuição acumulada da distribuição teórica.

Segundo Soong (2004, p. 327), não há método rigoroso de ajuste dos valores críticos quando os parâmetros das distribuições são estimados a partir da amostra. Nesse caso, os autores sugeriram a redução desses valores. A hipótese nula (H_0) de que os dados seguem a distribuição em teste é rejeitada se o valor da estatística teste (D_N) é maior que o valor crítico. De outra forma, não há evidência para rejeitar H_0 .

Segundo Naghettini e Pinto (2007, p. 278) a equação 2.23 apresenta a estatística teste (A^2) do teste Anderson-Darling (AD).

$$A^2 = -N - \sum_{i=1}^N \frac{(2i-1)\{\ln F_X(x_{(i)}) + \ln[1 - F_X(x_{(N-i+1)})]\}}{N} \quad (2.23)$$

onde $\{x_{(1)}, x_{(2)}, x_{(3)}, \dots, x_{(m)}, \dots, x_{(N)}\}$ representam as observações ordenadas em modo crescente, F_X é a função acumulada de probabilidade da distribuição teórica.

D'Agostino e Stephens (1986 apud NAGHETTINI; PINTO, 2007, p. 279, tab. 7.6 e 7.7) mostraram valores críticos de A^2 associados ao nível de significância (α) do teste para algumas distribuições. Para a distribuição Weibull, corrigiu-se A^2 pelo fator $(1 + 0,2/\sqrt{N})$. Para as distribuições Gama e Pearson tipo 3 não há fator de correção. A hipótese nula (H_0) de que os dados seguem a distribuição em teste é rejeitada se o valor corrigido da estatística teste (A^2) é maior que o valor crítico. De outra forma, não há evidência para rejeitar H_0 .

Matalas (1963) e Naghettini e Pinto (2007, p. 271) mostraram que os testes de aderência não são apropriados para escolher a distribuição que melhor representa um conjunto de dados. Já Yue et al. (1999), ao avaliarem o ajuste da distribuição conjunta de vazão e volume aos dados amostrais, compararam os resultados da função de distribuição acumulada conjunta teórica com os da função distribuição acumulada conjunta empírica para valores de vazão e volume de interesse.

2.2.2.2 Regionalização das medições de precipitação

Segundo Blöschl e Sivapalan (1995), o processo de transferência de parâmetros de bacias monitoradas para outra de interesse (em geral não monitorada) é conhecido como regionalização.

Merz e Blöschl (2004) compararam oito métodos de regionalização e apontaram melhor performance daqueles baseados em proximidade espacial, quando comparados a métodos baseados nos atributos das bacia.

Entre os métodos de proximidade, Thiessen (1911) propõe estimar a precipitação média de uma bacia a partir da combinação linear dos valores de precipitação dos postos de medição próximos. Derivou-se o peso de cada posto a partir da rede de polígonos de Thiessen. Determinou-se os polígonos traçando-se linhas unindo os postos próximos e suas mediatrizes. A interceptação das mediatrizes entre si e com o limite da bacia determina o conjunto de polígonos e, conseqüentemente, a área de influência de cada posto (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013, p. 61). Como princípio, o método assume que em qualquer ponto da bacia a precipitação é a mesma do posto de medição mais próximo (BLÖSCHL; SIVAPALAN, 1995).

2.2.2.3 Na-techs condicionados à intensidade regionalizada da precipitação

A probabilidade de ocorrência de na-tech condicionada à ocorrência de precipitação maior que um limiar h_0 [$P(N = 1 | h > h_0)$] pode ser visualizada na figura 2.2, que representa o espaço amostral dos valores de h e os valores de h quando ocorrem na-techs, entre eles aqueles quando $h > h_0$.

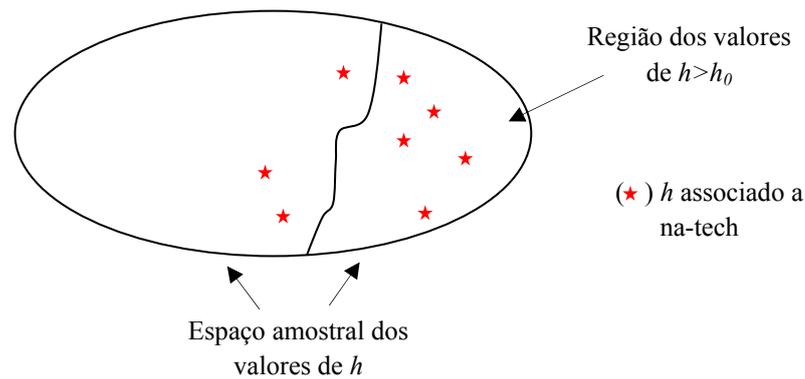


Figura 2.2 – Representação da estimativa de probabilidade de ocorrência de na-tech condicionada ao limiar de precipitação h_0 [$P(N = 1 | h > h_0)$].

Essa probabilidade condicional pode ser expressada por $\frac{N}{M}P(h > h_0)$, onde N é número de na-techs associado a cada $h > h_0$, M é o número de valores de precipitação $> h_0$ e $P(h > h_0)$ advém da equação 2.4.

2.2.3 Tendência da precipitação sob a ótica das alterações do clima

O aumento da frequência de precipitações intensas, que pode estar associado às alterações do clima do planeta, pode levar ao aumento da frequência de na-techs.

De acordo com IPCC (2015, p. 2 a 6), entre essas alterações, o aumento da temperatura do Planeta devido às ações antrópicas é inequívoca, com aquecimento da atmosfera e dos oceanos, diminuição da neve e do gelo e aumento do nível do mar. A causa extremamente provável e dominante do aquecimento é a emissão provocada pelo ser humano de gases como dióxido de carbono, metano e óxido nitroso.

Outras alterações, como o aumento de extremos de precipitação em algumas regiões do Planeta e do nível do mar vêm sendo investigadas e a influência humana nessas alterações é considerada provável.

Os impactos no ser humano e no ambiente das mudanças do clima são observados em todos os continentes e nos oceanos independentemente das causas. No Brasil, há contribuição importante dos impactos na produção de alimentos, na manutenção da vida humana, saúde e economia (IPCC, 2015, p. 7).

A preocupação com o aumento da frequência e da intensidade dos fenômenos hidrometeorológicos está presente na literatura que aborda na-techs. Já na metade da década passada, ao examinar a relação entre na-techs e inundações na Itália, OECD (2006, p. 15) apontou para os prováveis aumentos da frequência e da severidade de inundações em partes da Europa devidos à mudança do clima e que a influência da mudança aumentaria nas décadas seguintes. Apontou ainda para o aumento nos episódios de precipitação intensa, especialmente no inverno, aumentando a possibilidade de inundações.

Krausmann e Cruz (2008) e Steinberg; Sengul; Cruz (2008) também apontaram inundações como um dos eventos naturais possivelmente ampliados com as mudanças então observadas no clima, subsidiados por furacões, ventos intensos e elevação do nível do mar.

Posteriormente, Krausmann e Baranzini (2012), em pesquisa já abordada na subseção 2.1.1, mostraram que a percepção de representantes de governos europeus sobre os perigos naturais que levavam a na-techs apontava para inundações fluviais, ventos intensos, chuva intensa, inundações rápidas e raios, todos eventos hidrometeorológicos.

Cruz e Krausmann (2013) discutiram a vulnerabilidade do setor de produção de petróleo e gás natural aos eventos naturais extremos e às alterações do clima e a influência destes na ocorrência de na-techs. Apontaram as alterações no regime de precipitação, a elevação do nível do mar e os eventos extremos, agora observados mais frequentemente, como os eventos que impõem desafios ao setor, alertando para os possíveis danos ao ser humano e ao ambiente, o potencial impacto negativo na imagem do setor e o aumento dos custos de seguros.

Inundações decorrem predominantemente de intensa precipitação. Alterações na frequência e na intensidade da precipitação podem ser verificadas a partir de projeções oriundas de modelos matemáticos. Quando o interesse são as projeções para o futuro, é desejável realizá-las no contexto dos cenários que envolvem a quantidade de gases de efeito estufa emitidos pela atividade humana e o uso do solo. IPCC (2015, p. 8) propôs quatro cenários denominados Caminhos Representativos de Concentração (do inglês *Representative Concentration Pathways* – RCP) associados com o esforço na mitigação das emissões. O cenário RCP 2.6 indica a maior mitigação; RCP 4.5 e RCP 6.0 indicam média mitigação e RCP 8.5 indica elevada emissão.

O uso de modelos matemáticos está presente na literatura em aplicações sobre mudanças do clima do Planeta. Como estratégia comum, parte-se de modelos que simulam o clima do planeta (ou modelos globais de clima). Esses modelos apresentam resolução entre 1° a 3° (ou algo próximo a 110-330km), insuficiente quando se deseja investigar as mudanças aos níveis regional e local.

Ao simularem o comportamento da temperatura e da precipitação para o período 1961-1990 na América do Sul, Chou et al. (2012) empregaram o modelo Eta, com resolução horizontal de 40km, forçado pelas simulações do modelo global de clima HadCM3, proveniente do UK Met Office Hadley Centre, com resolução de 2,5° latitude e 3,75° longitude. O cenário de emissão de gases foi o A1B (IPCC, 2008, p. 44), que representa elevado crescimento econômico, pico de população na metade do século e uso de tecnologias que equilibram fontes de energia fósseis e não fósseis. Os resultados mostraram proximidade com as medições, com subestimação da precipitação em algumas regiões, entre elas a região costeira paulista.

O modelo Eta é utilizado pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em previsões de tempo desde 1997 e, mediante atualizações, para estudos de mudança do clima (CHOU et al., 2014a).

Para períodos futuros entre 2011-2100, entre eles 2011-2040, Marengo et al (2011) utilizaram os mesmos modelos e condições adotadas por Chou et al. (2012), incluindo o cenário A1B. Além da América do Sul, as análises focaram sobre três bacias de rios no Brasil, entre elas a do rio Paraná, a mais próxima da região costeira paulista. Os resultados mostraram aumento da temperatura e diminuição da precipitação para as três bacias. Para a bacia do Paraná, estimou-se a aumento de 1,8°C na temperatura anual média e diminuição de 2mm/dia na precipitação anual média, com mudanças mais intensas a partir de 2040.

A busca pela melhor representação do clima no âmbito regional requer, entre outras, aumentar a resolução dos modelos. Chou et al. (2014a) e Chou et al. (2014b) apresentaram resultados das simulações do modelo Eta para os climas presente (1961-1990) e futuro (2011-2100), respectivamente, sobre as Américas do Sul e Central e o Caribe. A resolução do Eta foi de 20km, acoplado aos modelos globais BESM, HadGEM2-ES e MIROC5 para o período presente e os dois últimos para o período futuro, com cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5.

Para o período presente, os resultados de temperatura e precipitação mostraram boa concordância entre as simulações e as medições. Para o período futuro, os resultados mostraram redução da precipitação, com ampliação da área apresentada em Marengo et al.

(2011), alcançando a região sul do Brasil, com máxima redução de precipitação nas regiões central e sudoeste do Brasil.

Recentemente, Lyra et al. (2017) apresentaram resultados de simulações na resolução espacial de 5km para três metrópoles do sudeste brasileiro, entre elas Santos. As simulações advêm do modelo Eta, com condições de contorno dadas pelas simulações do próprio modelo com resolução de 20km e, para este, as condições de contorno vêm do modelo HadGEM2-ES. Simulou-se os climas presente (1960-2005) e futuro (2006-2100). Para os cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5, os resultados indicaram aumento de temperatura e redução significativa da precipitação nas três metrópoles.

A maior redução na precipitação ocorreu entre os meses de novembro a março, de 3 a 6mm/dia no período 2011-2040, no cenário RCP4.5. A redução se manteve até o final do século, porém ocupando maior área no cenário RCP8.5. Ao final do século, a precipitação anual total projetada deve se reduzir entre 40-45% em Santos.

Os autores concluíram que temperatura e precipitação foram melhor representados pelo modelo Eta com resolução de 5km quando comparado com o de resolução 20km. Ainda assim, ambos subestimaram precipitações, não capturando valores maiores que 150mm/dia.

Pode-se projetar o aumento da ocorrência de na-techs no futuro a partir da incorporação da variável tempo nas variáveis que descrevem a distribuição da precipitação. Para que essa incorporação corresponda à tendência da precipitação decorrente de projeções, deve-se conhecer numericamente essa tendência, que pode ser investigada utilizando testes estatísticos.

Gul et al. (2014) utilizaram Mann-Kendall para investigar tendência das séries de medições hidrológicas de oito estações de monitoramento nas bacias de Seyhan e Iyidere, Turquia. Han et al. (2015) utilizaram Mann-Kendall para investigar tendência anual e sazonal de extremos de precipitação a partir de séries de medições diárias de 16 estações de monitoramento no delta do rio Yangtze. Naghetini e Pinto (2007, p. 266) utilizaram Spearman para verificar a correlação entre uma série hidrológica e o tempo. Ben Aissia et al. (2014) expressam a dependência de variáveis hidrológicas das bacias do reservatório de Baskatong e do rio Romaine, Quebec, Canadá, por meio da coeficiente tau (τ) de Kendall e do coeficiente rho (ρ) de Spearman. Madsen et al. (2013) mostraram os testes de Mann-Kendall e Spearman fazendo parte de uma estrutura de análise de tendência de séries hidrometeorológicas, no âmbito do projeto COST Action ES0901.

Os testes de Mann-Kendall e de Spearman prevêm o ranqueamento das variáveis de interesse (neste caso intensidade da precipitação e tempo) e a verificação da correlação entre

elas. São testes não paramétricos, não requerem normalidade dos dados e são aptos a capturar correlação significativa entre as variáveis.

Discussões detalhadas dos testes estão em Kendall (1975) e Naghetini e Pinto (2007).

2.2.3.1 Teste de Spearman

As equações para a estimativa de ρ provêm de Kendall (1975, p. 8, p. 38) e de Naghetini e Pinto (2007, p. 267). Considerando que há elementos repetidos na amostra, as equações 2.24 a 2.27 possibilitam estimar ρ .

$$\rho = \frac{\frac{1}{6}(n^3 - n) - S(d^2) - T' - U'}{\sqrt{\left\{ \left[\frac{1}{6}(n^3 - n) - 2T' \right] \left[\frac{1}{6}(n^3 - n) - 2U' \right] \right\}}}$$

$$S(d^2) = \sum_{t=1}^N (m_t - T_t)^2 \quad (2.24)$$

$$T' = \frac{1}{12} \sum_{t_*} (t_*^3 - t_*) \quad (2.25)$$

$$U' = \frac{1}{12} \sum_u (u^3 - u) \quad (2.26)$$

ou, sendo $A = \frac{1}{6}(n^3 - n)$

$$\rho = \frac{A - S(d^2) - T' - U'}{\sqrt{\{[A - 2T'] [A - 2U']\}}} \quad (2.27)$$

onde n representa o número de pares tempo (t) e intensidade da precipitação (h); m_t a ordem de classificação de h em relação a t (T_t); t_* número de repetições de t e u número de repetições de h .

Kendall (1975, p. 58), discutindo a significância do teste, apontou a ausência de método simples na presença de repetições e quando n varia entre 11 e 20. Segundo Naghetini e Pinto (2007, p. 267), na ausência de repetições, para $n > 10$ e sob a hipótese nula de ausência de correlação entre m_t e T_t , a distribuição de ρ pode ser aproximada por uma distribuição normal de média zero e variância dada pela equação 2.28. A equação 2.29 mostra a estatística T do teste. Por se tratar de um teste bilateral, a um nível de significância α , a decisão de

rejeitar a hipótese nula ocorre se $|T| > z_{1-\alpha/2}$ (NAGHETINI E PINTO, 2007, p. 267).

Na ausência de correlação entre as variáveis, $\rho = 0$. Valores próximos de 1(-1) indicam correlação positiva (negativa).

$$\text{Var}[\rho] = \frac{1}{n-1} \quad (2.28)$$

$$T = \frac{\rho}{\sqrt{\text{Var}[\rho]}} \quad (2.29)$$

2.2.3.2 Teste de Mann-Kendall

As equações para a estimativa de τ provêm de Kendall (1975, p. 35). Considerando que há elementos repetidos na amostra, as equações 2.30 a 2.33 possibilitam estimar τ .

$$\tau = \frac{S}{\sqrt{\left[\frac{1}{2}n(n-1) - T\right] \sqrt{\left[\frac{1}{2}n(n-1) - U\right]}}}$$

$$S = P - M \quad (2.30)$$

$$T = \frac{1}{2} \sum_{t_*} (t_*^2 - t_*) \quad (2.31)$$

$$U = \frac{1}{2} \sum_u (u^2 - u) \quad (2.32)$$

ou, sendo $A = \frac{1}{2}(n^2 - n)$

$$\tau = \frac{S}{\sqrt{[A-T] \sqrt{[A-U]}}} \quad (2.33)$$

onde n representa o número de pares tempo (t) e intensidade da precipitação (h); P o número de vezes em que h aumenta quando t aumenta; M o número de vezes em que h diminui quando t aumenta; t_* número de repetições de t e u número de repetições de h .

Kendall (1975, p. 52), informou que os testes de significância de τ e de S são equivalentes, pois as variáveis são múltiplas entre si. Preferiu o de S por ser mais conveniente

aritmeticamente. Sob a hipótese nula de ausência de correlação entre P e M , $n > 10$ e presença de repetições em apenas um ranque, a distribuição de S pode ser aproximada por uma distribuição normal de média zero e variância dada pela equação 2.34. A equação 2.35 mostra a estatística Z_s do teste. Por se tratar de um teste bilateral, a um nível de significância α , a decisão de rejeitar a hipótese nula ocorre se $|Z_s| > z_{1-\alpha/2}$ (KENDALL, 1975, p. 53 a 55).

Na ausência de correlação entre as variáveis, $S = 0$. Valores próximos de 1(-1) indicam correlação positiva (negativa).

$$\text{var } S = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{t_*} t_*(t_*-1)(2t_*+5)] \quad (2.34)$$

$$Z_s = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var } S}} & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var } S}} & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (2.35)$$

2.3 Risco na-tech

Decisões baseadas em risco desafiam cotidianamente a ciência e a técnica quanto à abordagem apropriada para casos onde os perigos e os bens a proteger são distintos.

Quando se requer decidir sobre a ocupação humana no entorno de um empreendimento industrial ou a implantação deste próximo a uma região com ocupação humana, pode-se usar a Avaliação Quantitativa de Risco (AQR), que possibilita estimar o risco imposto ao ser humano por um empreendimento que manipula substâncias perigosas. Porém, se o bem a proteger for uma espécie animal, por exemplo, uma espécie de peixe que habita um corpo d'água próximo ao empreendimento, a AQR não dará resposta, visto que sua métrica não contempla a avaliação de efeito nesse bem.

Usar a AQR em decisões que envolvem a formulação de hipóteses acidentais que se originaram devido a falhas humanas, de equipamentos e de gestão é fato antigo e descrito nas subseções seguintes. Esse uso se dá, por exemplo, nos processos de licenciamento dos Órgãos Ambientais brasileiros. Usar a AQR em decisões que envolvem hipóteses acidentais originadas de eventos naturais é recente, por exemplo, na União Europeia (UNIÃO EUROPEIA, 2012, p. 3), e ausente no Brasil (Xavier e Sousa Junior, 2016).

As subseções a seguir mostram alguns conceitos intrínsecos à aplicação da AQR, sua estrutura metodológica e seu uso para apoiar decisões baseadas em risco. Mostram ainda as

iniciativas para estimar risco decorrente de na-techs, entre elas a inserção deste [risco na-tech] na abordagem da AQR tradicional.

2.3.1 Conceitos e estrutura metodológica da AQR

A AQR é um método que permite **estimar e avaliar o risco** imposto por um **perigo** a um **bem a proteger**. Os termos destacados em negrito são discutidos a seguir no contexto do chamado risco tecnológico, qual seja: o risco associado à manipulação de substâncias perigosas em empreendimentos industriais.

Uijt de Haag e Ale (1999), AIChE (2000), HSE (2001, 2009) e CETESB (2014) apresentam definições levemente distintas para o termo **risco**, as quais convergem para a representação matemática:

$$R = \text{função}(c, f, N) \quad (2.36)$$

onde R = risco; c = cenário⁷; f = frequência de ocorrência do cenário; N = número de fatalidades associada ao cenário.

Pode-se ler a equação 2.36 da seguinte forma: o risco decorrente da manipulação de substâncias perigosas é função dos cenários acidentais (c) considerados na estimativa, das frequências de ocorrência (f) e das fatalidades (N) de cada cenário.

Dessa leitura, captura-se o sentido do termo **perigo**, qual seja: a possível perda de contenção (vazamento) para o ambiente de substância perigosa com potencial para gerar fatalidade do ser humano, no caso o **bem a proteger** comumente considerado na AQR.

Estimar o risco pressupõe conhecer as variáveis c , f e N . AIChE (2000) e HSE (2001) abordaram diversas métricas, entre elas risco individual (RI) e risco social (RS). **Avaliar** o risco que esse empreendimento industrial impõe ao ser humano significa comparar as expressões de RI e de RS com critérios de tolerabilidade previamente estabelecidos.

Para estimar RI e RS, passa-se por diversas etapas, algumas compostas por mais de uma técnicas. A seguir apresenta-se as etapas, em consonância com CETESB (2014).

⁷ Cenário é o desdobramento da hipótese. A partir de uma hipótese, pode-se ter mais de um cenários.

2.3.1.1 Descrição do empreendimento e do seu entorno

Descreve-se o empreendimento industrial e onde este se insere geograficamente. Desenhos, fluxogramas e texto descritivo são utilizados. Caracterizar as propriedades físicas, químicas e toxicológicas das substâncias químicas (matérias primas, intermediários e produtos acabados) é essencial, pois estas estão associadas, em caso de perda de contenção, ao comportamento das substâncias no ambiente e à severidade dos danos.

2.3.1.2 Identificação dos perigos e consolidação das hipóteses acidentais

Identificar os perigos de um empreendimento industrial objetiva encontrar situações onde possíveis falhas humanas, de equipamentos e de gerenciamento levam à perda de contenção para a atmosfera de substância cujas características intrínsecas de toxicidade ou de inflamabilidade podem causar danos severos, inclusive fatalidade, ao ser humano ou a outro bem ambiental de interesse.

Técnicas qualitativas como Análise Preliminar de Perigos (APP), Análise de Perigos e de Operabilidade (HazOp), Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA) são utilizadas para identificar perigos e estão detalhadamente descritas em AIChE (1992).

Decorrem dessas técnicas situações envolvendo a ruptura total ou parcial de tanques, tubulações, válvulas e outros dispositivos, transbordamentos de tanques e reações descontroladas (*runaway reactions*), motivadas pela mistura de substâncias incompatíveis ou ainda por condições operacionais que excedem às especificadas. São então formuladas hipóteses acidentais, as quais são tratadas quantitativamente, com o objetivo de conhecer (i) a extensão e magnitude do dano e (ii) a frequência de ocorrência.

2.3.1.3 Estimativa dos efeitos físicos e avaliação de vulnerabilidade

Para se conhecer a extensão e magnitude do dano, utiliza-se modelos matemáticos que calculam a taxa do vazamento e a dispersão no ambiente do produto considerando, por exemplo, condições meteorológicas e topográficas. Se for inflamável, calcula-se a intensidade da radiação térmica decorrente de incêndios em poça ou em nuvem, jato e bola de fogo, ou da sobrepressão decorrente de explosões. AIChE (1999) e Bosch e Weterings (2005) discutiram o comportamento de líquidos e gases, inflamáveis e tóxicos, no ambiente, predominantemente na atmosfera, e apresentaram modelos matemáticos que representaram esse comportamento.

Conhecidos a extensão e a magnitude dos danos de cada hipótese acidental, verifica-se os seus efeitos de radiação térmica, de sobrepressão ou de concentração tóxica sobre o ser humano. A essa sub-etapa denomina-se “avaliação de vulnerabilidade”.

A exposição do ser humano à radiação térmica com intensidade de 10kW/m^2 , por cerca de 20s, implica em probabilidade de fatalidade de 1%. Para 30kW/m^2 , a probabilidade alcança 50% para a mesma duração. Valores de referência como os citados provêm de estudos de casos reais de incêndios, intencionais ou não, e são úteis na verificação de modelos matemáticos que correlacionam tempo e intensidade de exposição à radiação com probabilidade de fatalidade (BOSCH et al., 1992).

O ser humano também pode sofrer danos decorrentes de explosões. Sobrepressão próxima a 0,3bar é suficiente para destruir estruturas rígidas como casas e prédios. De acordo com CETESB (2014, p. 50), para pessoas no interior de edificações, atribui-se à região de sobrepressão $\geq 0,3\text{bar}$ a probabilidade de fatalidade de 75%. Para a região com sobrepressão entre 0,1bar e 0,3bar, atribui-se a probabilidade de fatalidade de 25%.

Operacionalmente, a estimativa do número de fatalidades pode ser realizada mediante a sobreposição de um contorno de nuvem (por exemplo, de um incêndio em nuvem) a uma foto aérea do entorno da empreendimento industrial. Conjuga-se a densidade populacional previamente levantada (subseção 2.3.1.1), a distribuição da população dentro e fora de edificações e a intensidade do efeito físico estudado. Para cada hipótese acidental e seus cenários são computadas fatalidades, que compõem o estimador risco social (RS).

2.3.1.4 Estimativa de frequências

Para cada hipótese acidental, estima-se a sua frequência de ocorrência, ou seja, o número esperado de vezes em que ela acontece no intervalo de um ano. AIChE (2000) e Schuller et al. (2005) apresentaram técnicas como análise por árvore de falhas (AAF) e análise por árvore de eventos (AAE), que cumprem esse objetivo.

Especificamente, para o caso de dutos, adota-se as frequências presentes em bancos de dados como EGIG (2015) e CONCAWE (2017), vistos na subseção 2.1.2. Na seção 2.2 estão os métodos utilizados para estimar a frequência de ocorrência de na-techs.

2.3.1.5 Estimativa e avaliação de risco

No âmbito do risco tecnológico, risco individual (RI) e risco social (RS) são as

métricas comumente utilizadas para expressar risco. Como construir esses indicadores está diretamente ligado a como são expressados os valores de referência (ou critérios de tolerabilidade) contra os quais são comparados, em geral para apoiar autorizações, permissões ou licenciamentos, nos campos ocupacional, ambiental ou de segurança. Em outras palavras, indicadores e critérios devem ser comparáveis.

Risco individual, definido em Jones (1992) como a frequência com que uma pessoa sustenta certo nível de dano, a partir de um perigo determinado, tem caráter espacial e representa uma região no espaço (ou ponto x,y) de probabilidade de fatalidade humana. Estimar e expressar RI significa delimitar essa região (por facilidade, opta-se por uma região de duas dimensões) atribuída ao cenário (c) em estudo. A equação 2.37 mostra como estimar RI de cada cenário acidental (CETESB, 2014).

$$RI_{x,y,i} = F_i \cdot p_{f,x,y,i} \quad (2.37)$$

onde:

$RI_{x,y,i}$ = risco individual de fatalidade no ponto x,y devido ao cenário i (chance de fatalidade por ano ou ano⁻¹);

F_i = frequência de ocorrência do cenário i ;

$p_{f,x,y,i}$ = probabilidade que o cenário i resulte em fatalidade no ponto x,y , de acordo com os efeitos esperados.

AICHe (2000) e HSE (2001) mostraram detalhadamente como realizar essa estimativa, bem como discutiram a ideia de que a região pode receber contribuições de diversos cenários, sejam eles do próprio empreendimento industrial, sejam de terceiros. As parcelas de RI na região (ou célula em modelos computacionais) advindas de cada cenário são adicionadas, obtendo-se o risco individual que representa essa região. A equação 2.38 mostra como estimar o RI da região ou do ponto a partir da contribuição de cada cenário (CETESB, 2014).

$$RI_{x,y} = \sum_{i=1}^n RI_{x,y,i} \quad (2.38)$$

onde:

$RI_{x,y}$ = risco individual total de fatalidade no ponto x,y (chance de fatalidade por ano ou ano⁻¹);

n = número total de cenários considerados na análise.

Jones (1992) definiu risco social como uma relação entre a frequência de ocorrência de um perigo e o número de pessoas de uma população definida que sofrem determinado nível de dano. Stallen, Geerts e Vrijling (1996) indicaram que *RS* é representado graficamente por diagramas *F-N*, ou seja, plota-se em gráfico com escala bilogaritma os pares número de fatalidades (*N*) de cada cenário (eixo das abcissas) e frequência acumulada dos cenários com *N* ou mais fatalidades (eixo das ordenadas). É comum ligar esses pontos e denominar a curva obtida de curva *F-N*.

Para um tomador de decisão, essa curva é de utilidade limitada se não houver um critério que estabeleça um máximo de risco tolerado. Em texto que remete às origens históricas das legislações as diferenças entre as regulamentações de risco do Reino Unido e da Holanda, Ale (2005) indica que um limite de tolerabilidade é estabelecido em um contexto político e que fatos relevantes do passado como acidentes comumente servem como referências (ou *anchor points*) para delimitar regiões de risco tolerável e intolerável.

Então, risco individual e risco social são indicadores de risco de um empreendimento industrial. Em um processo de decisão baseado em risco, esses indicadores são comparados com critérios de tolerabilidade, os quais devem obedecer aos mesmos preceitos dos indicadores, para que a comparação faça sentido.

2.3.2 Decisão baseada em risco

Nos Estados Unidos da América, a publicação em 1975 de relatório que avaliou a segurança das plantas comerciais americanas de geração de energia por meio de reatores nucleares marca o início do uso da AQR para suportar processos de comunicação e de decisão baseados em risco (PASMAN; RENIERS, 2014). Início com significativa resistência nesse ramo da indústria, como mostraram Kadak e Matsuo (2007), que traçaram um perfil histórico do uso da AQR no país, onde a base legal foi alterada sucessivamente para suportar decisões baseadas em risco, como licenças de operação, ao invés de visão anterior, prescritiva, baseada em avaliações determinísticas de pior caso. Indicaram que foram necessários 30 anos para que as empresas e órgãos reguladores se adequassem à visão probabilística, que requer mudança na forma de pensar segurança, como não apenas atender às regras vigentes, mas buscar a melhoria contínua.

O poder da AQR foi percebido rapidamente por outros segmentos industriais e governamentais como apoio em momentos de crise, por exemplo, após a ocorrência de acidentes em empreendimentos industriais, que levaram a perdas de vidas, econômicas e de

imagem.

Na Europa, políticas baseadas em risco têm origem na década de 1970 no Reino Unido e na Holanda e sucedem as explosões de Flixborough, Inglaterra, 1974, e de Limburg, Holanda, 1975, com 28 e 14 fatalidades, respectivamente (ALE, 2005). Embora elaboradas proximamente, as políticas apresentam aspectos que as distinguem, como o grau de aversão à ocorrência de eventos com grande número de fatalidades.

Stallen, Geerts e Vrijling (1996) mostraram que a sociedade holandesa apontou essa aversão ao Parlamento e que o critério de risco social com inclinação de -2^8 procurou compensá-la. Também mostraram estudos britânicos que, alegando aspectos culturais e econômicos da sociedade britânica, defenderam o critério de risco social com inclinação -1 .

Como já dito, acidentes com múltiplas fatalidades estão na origem das decisões baseadas em risco. Não foi diferente na França, após a explosão em Toulouse, 2001, com 31 fatalidades e 2442 hospitalizados. Charvet et al. (2011) e Lenoble e Durand (2011) apontaram a mudança da legislação francesa na direção da avaliação probabilística de cenários de empresas abrangidas pela Diretiva Seveso. Destacaram o esforço para transferir a cultura vigente na área nuclear para a indústria, mas também ponderaram aspectos culturais e de longa data em favor da abordagem de pior caso, vigente até 2003.

Mas a mudança não seguiu na direção do padrão holandês, bastante pragmático, ou o britânico, menos direto, mas com critérios quantitativos de risco individual estabelecidos. Lenoble e Durand (2011) mostraram certo grau de ambivalência ao apontarem a relevância da AQR para processos de tomada de decisão, contudo sem que houvesse um critério de tolerabilidade estabelecido. Indicaram que o Ministério do Meio Ambiente editou vários guias para a condução da avaliação de risco, contudo o empreendimento industrial pode propor método alternativo. Há claramente forte hesitação na adoção de procedimentos que tenham por base a abordagem probabilística tradicional, que utiliza dados genéricos de falhas, presentes em bancos de dados, para construir hipóteses acidentais.

No Brasil, decisões baseadas em risco fazem parte do universo ambiental. A AQR tradicional, com critérios de risco individual e social, é ferramenta de apoio a decisões de licenciamento ambiental no âmbito federal, como mostra Naime (2010), em estudo sobre o processo regulatório ambiental brasileiro. Também, estados como Rio de Janeiro, Minas Gerais, Rio Grande do Sul, Bahia e São Paulo guiam o licenciamento de empreendimentos potencialmente geradores de grandes acidentes por meio de AQR tradicional.

⁸ Se um evento X (ou cenário) tem 10 vezes mais fatalidades que outro evento Y, o risco de ambos se equivale quando a frequência de X é 100 vezes menor que a de Y.

O modelo de AQR adotado em São Paulo se alinha ao praticado na Holanda. Sua origem remonta a 1988, pouco após a promulgação da resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 01, de 1986, que estabeleceu diretrizes para a elaboração do estudo de impacto ambiental (EIA) (XAVIER; MINNITI, 2017). A aplicação da Resolução no estado de São Paulo foi acrescida da AQR, entendida como apropriada para a prevenção de acidentes durante a operação de um empreendimento industrial (CETESB, 2003).

A decisão sobre a viabilidade de um empreendimento industrial no tocante ao risco tecnológico baseia-se nas estimativas de risco individual e de risco social e na comparação com critérios estabelecidos. O empreendimento é aprovado quando esses indicadores demonstram risco tolerável ou a ser reduzido, o que demanda aplicar medida física para a redução do risco e demonstrar sua eficácia quantitativamente (CETESB, 2014).

2.3.3 Risco na-tech e sua inserção na AQR tradicional

A base conceitual para a estimativa do risco na-tech é recente, embora a literatura científica mencione estudos que relatam ocorrências, prospectam bancos de dados e propõem modelos determinísticos e probabilísticos desde os anos 1980.

A literatura científica dessa época é predominantemente americana e voltada para na-techs provenientes de terremotos. Os trabalhos de Shih (1981) e Kiremidjian et al. (1985) sobre modelos determinísticos e probabilísticos, respectivamente, para danos em instalações industriais decorrentes de terremotos exemplificam a pesquisa realizada à época.

A Europa sinalizou interesse pelo tema com o trabalho de Rasmussen (1995), do JRC, que investigou a ocorrência de na-techs no continente a partir de pesquisa a bancos de dados europeus e americano de acidentes. O interesse se consolidou nos anos 2000 e será evidenciado nos próximos parágrafos.

Cruz et al. (2004), ao investigarem o estado da arte no gerenciamento do risco na-tech durante encontro promovido pelo JRC, mostraram que dos artigos apresentados por representantes de seis países europeus e dos Estados Unidos da América, cinco indicaram que o país não apresentava sistema específico de gerenciamento desse risco. Mostraram a ausência de legislação específica embora apontassem diversas iniciativas que indiretamente abrangiam o tema, caso da Diretiva Seveso II (98/82/EC). Os autores não mencionaram a presença de método para estimativa do risco na-tech.

Antonioni, Spadoni e Cozzani (2007) propuseram método para estimar o risco decorrente de terremotos alinhado à AQR tradicional. Formula-se hipóteses, estima-se os seus

danos e as suas frequências e expressa-se o risco por meio dos indicadores risco individual e risco social. Na etapa de estimativa das frequências, o método considera que a frequência da hipótese depende da frequência do evento sísmico (ou evento iniciador), caracterizada pelo seu tempo de retorno, e a probabilidade de dano no equipamento afeito à hipótese decorrente da intensidade do evento sísmico.

Campedel (2008) investigou na-techs associados a inundações. Propôs estrutura de estimativa do risco similar à de Antonioni, Spadoni e Cozzani (2007), contudo indicou limitações para determinar a probabilidade de dano ao equipamento de interesse. Embora não apresentasse formulação matemática, a autora sugeriu considerar o período de retorno e a severidade da inundação para caracterizar o vetor impacto da inundação.

Antonioni et al. (2009) propuseram modelos de danos para equipamentos envolvidos em na-techs decorrentes de terremotos e de inundações, além de um procedimento geral para desenvolver uma AQR relacionada com esses eventos (quadro 2.2). Também propuseram caracterizar as inundações de referência a partir do tempo de retorno e de dois parâmetros que expressam a severidade da inundação: altura máxima da lâmina d'água e velocidade máxima da água, que expressa a energia da inundação. Os estados de danos dos equipamentos estão associados aos parâmetros de severidade e à classificação baseada na característica estrutural dos mesmos.

Quadro 2.2 – Etapas do desenvolvimento de uma AQR para na-techs (adaptado e modificado de ANTONIONI et al., 2009).

Nº	Passo	Necessidade
1	Caracterização do evento externo	Parâmetros de frequência e de severidade
2	Identificação do equipamento alvo	Lista dos equipamentos alvo
3	Identificação dos estados de dano e hipóteses de referência	Árvores de eventos que definem estados de danos
4	Estimação da probabilidade de dano (dado um vetor impacto)	Modelos de dano de equipamentos
5	Avaliação de efeitos físicos da hipótese de referência	Modelos de análise de consequências
6	Identificação das combinações críveis de eventos	
7	Estimativa de frequências e de probabilidades para cada combinação	
8	Estimativa de efeitos físicos para cada combinação	
9	Estimativa de indicadores de risco	

Para estimar a probabilidade de dano aos equipamentos, os autores propuseram um modelo simplificado, baseado nos parâmetros de severidade citados. A figura 2.3 apresenta as regiões e as respectivas probabilidades de dano. Por exemplo: se uma inundação tem período de retorno de 1000 anos, ou frequência esperada de 10^{-3} ano⁻¹, altura da lâmina d'água máxima de 1m e velocidade negligenciável, a probabilidade de dano ao equipamento é 55% e, portanto, a frequência do vazamento é $5,5 \cdot 10^{-4}$ ano⁻¹.

Santella, Steinberg e Aguirra (2011) estimaram a probabilidade condicional de ocorrência de na-techs nos Estados Unidos da América a partir de registros em diferentes bases de dados. O método adotado relativiza o número de na-techs pelo número de instalações industriais presentes na região de interesse e pela intensidade do evento natural. Por exemplo, para terremotos, estimou-se a probabilidade condicional de um vazamento na região MMI (Escala de Mercalli Modificada) VI igual a $0,7 \cdot 10^{-2}$ enquanto que na região MMI VII é de $4,2 \cdot 10^{-2}$. As estimativas decorreram de dados agrupados dos terremotos Northridge (1994), Loma Prieta (1989) e Nisqually (2001).

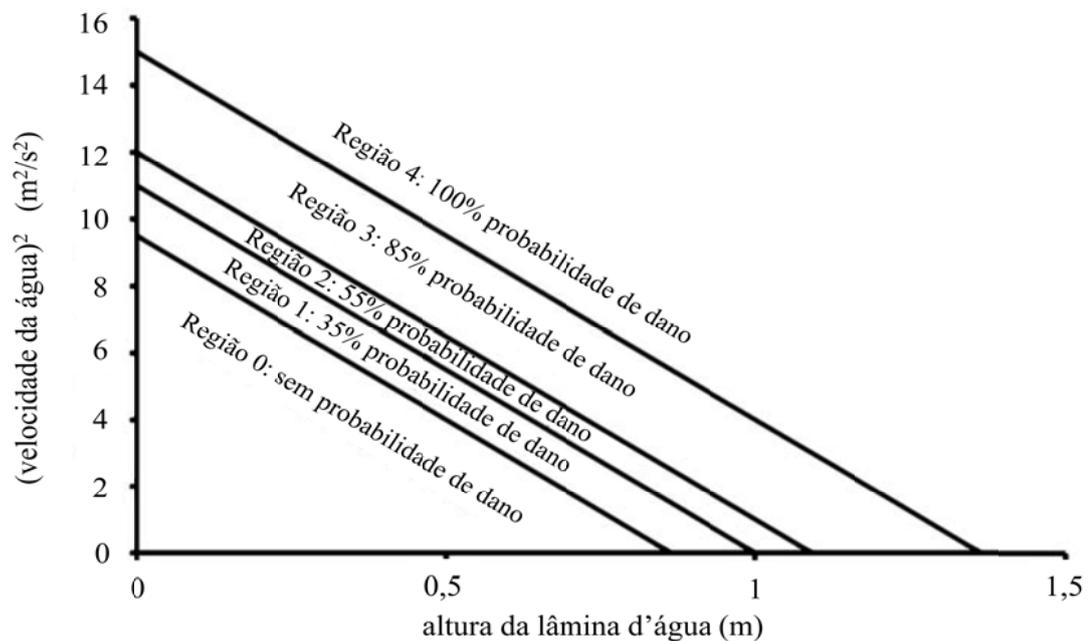


Figura 2.3 - Estimação da probabilidade de dano de equipamentos a partir da altura máxima da lâmina d'água e velocidade máxima da água (adaptado de ANTONIONI et al., 2009).

Para inundações, os autores analisaram dados das dez maiores inundações entre 1990 e 2008. Alertaram para o fato de que essas inundações representam pequena fração das ocorrências do período e que os vazamentos representam cerca de 10% dos na-techs

relacionados a inundações e registrados no período. Mostraram que as estimativas variaram muito (entre zero e 30 vazamentos por 100 instalações), possivelmente em razão das características das inundações como altura da lâmina d'água e velocidade da água.

Landucci et al. (2012) e Landucci et al. (2013) propuseram modelos quantitativos simplificados para determinar a probabilidade de dano a tanques atmosféricos verticais e tanques pressurizados horizontais, respectivamente, a partir dos parâmetros altura máxima da lâmina d'água (h_w) e velocidade máxima da água (v_w) atribuídos a uma inundação. Para tanques atmosféricos, o adernamento (buckling) é o principal modo de falha observado quando o tanque é submetido à pressão externa no seu costado. No caso dos tanques pressurizados, a resistência da conexão entre o tanque e o solo é determinante para a ocorrência de ruptura e perda de contenção em decorrência de uma inundação.

Os autores desenvolveram expressões matemáticas simples para estimar a capacidade de resistência dos tanques e a frequência de perda de contenção do tanque (f_{LOC}). A equa o 2.39 mostra como estimar essa frequência.

$$f_{LOC} = \Psi f \quad (2.39)$$

onde f é a frequência de ocorrência de uma inundação com a intensidade caracterizada por (h_w, v_w) e Ψ expressa a probabilidade de dano no tanque decorrente do balanço entre as forças de resistência e de deslocamento do tanque.

Os anos 2010 consolidaram a estrutura lógica de incorpora o de hipóteses acidentais decorrentes de na-techs na AQR tradicional. Essa estrutura, proposta por Antonioni et al. (2009), foi testada por alguns dos autores citados nos parágrafos anteriores, sendo aplicada a na-techs decorrentes de terremotos, inundações e raios. Os modelos que representam o impacto e a frequência dos na-techs ainda são tema de interesse e aperfeiçoamento.

Esta pesquisa contribui para esse aperfeiçoamento, predominantemente na abordagem da estimativa da frequência de ocorrência dos na-techs, objeto da se o 2.2.

3 Materiais e Métodos

A seguir caracteriza-se o objeto da pesquisa e as fontes de dados a ela afeitas e apresenta-se os métodos nela adotados.

3.1 Caracterização do objeto da pesquisa

O objeto são os empreendimentos industriais da região costeira do estado de São Paulo.

Delimitou-se a pesquisa ao período 1940-2015 (76 anos). A razão para 1940 foi poder investigar a presença de na-techs anteriormente a 1955, data do início da operação da Refinaria Presidente Bernardes (RPBC), que motivou intensa industrialização em Cubatão nas décadas seguintes. Entre 1940 e 1955 havia poucas indústrias na região costeira de São Paulo, quatro ou cinco em Cubatão. Outra razão foi a disponibilidade de medições de precipitação a partir de 1936.

3.1.1 Empreendimentos industriais

Para fins desta pesquisa, são aqueles que manipulam substâncias perigosas, como define CETESB (2014, p. 10), e cujo funcionamento é regulamentado por legislação ambiental federal e estadual.

3.1.2 Região costeira do estado de São Paulo

A região costeira em estudo compreende os municípios de Bertioga, Cananéia, Caraguatatuba, Iguape, Ilha Bela, Ilha Comprida, São Sebastião e Ubatuba, além de Cubatão, Guarujá, Itanhaém, Mongaguá, Peruíbe, Praia Grande, São Vicente e Santos, que também compõem a RMBS. A figura 3.1 mostra a localização desses municípios.

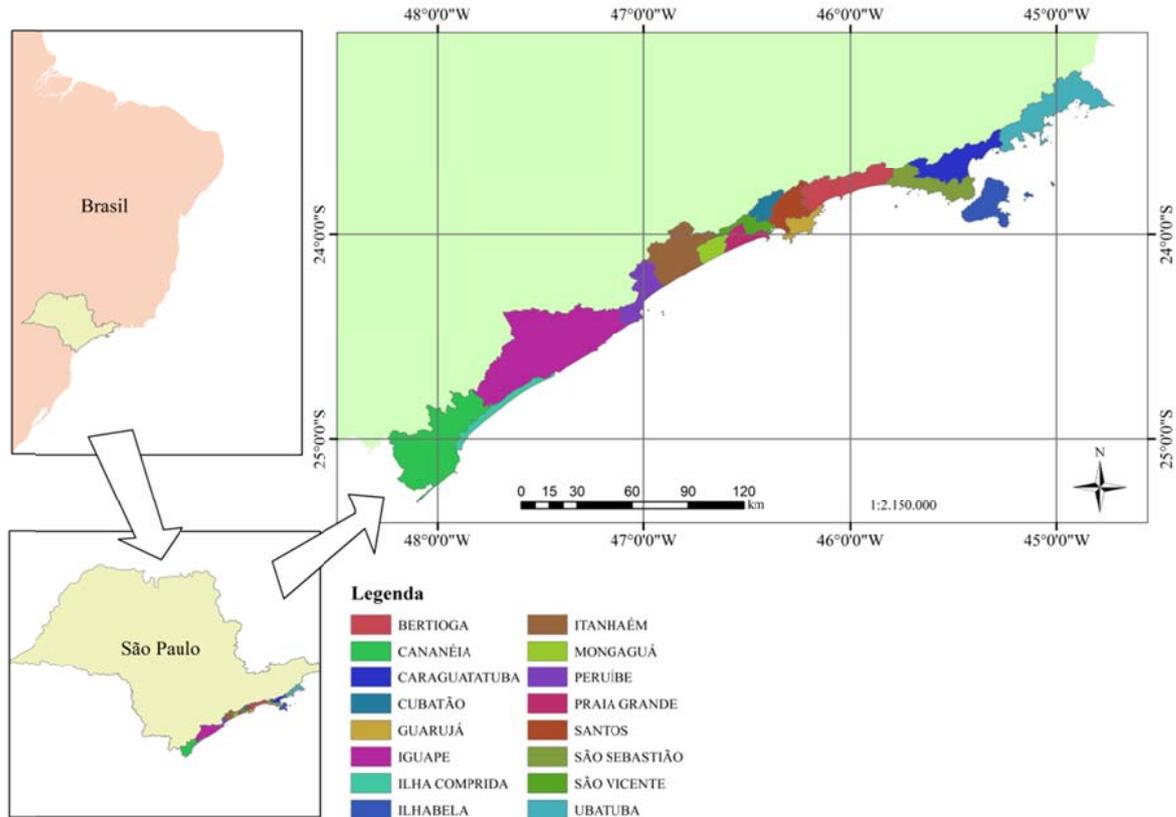


Figura 3.1 – Municípios da região costeira do estado de São Paulo.

3.2 Caracterização das fontes de dados

A principal fonte para a pesquisa de na-techs foram os jornais regionais do litoral paulista e os de abrangência estadual/nacional. Foi complementada pelos bancos de dados da Defesa Civil Nacional, Defesa Civil Estadual, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb) e Organização Mundial da Saúde.

As medições de precipitação provêm do sítio eletrônico do DAEE.

As projeções de precipitações para o Brasil até 2040 provêm do CPTEC/INPE.

A seguir, detalha-se essas fontes.

3.2.1 Jornais e bancos dados

Acessou-se presencialmente o setor de pesquisa do jornal A Tribuna, de Santos, entre abril de 2015 e julho de 2017.

Acessou-se a Hemeroteca Roldão Mendes Rosa, ligada à Prefeitura Municipal de Santos, entre abril e maio de 2015 e em março de 2016. A Hemeroteca assina e recebe

periódicos. Após serem disponibilizados para consulta pública, os periódicos têm suas notícias separadas e dispostas em pastas temáticas. Esse procedimento teve início em 1992 e se mantém até o presente.

Acessou-se presencialmente o setor de pesquisa do jornal Folha de São Paulo e o banco de dados disponível na sua página eletrônica (FOLHA DE SÃO PAULO, 2017).

Acessou-se o banco de dados disponível na página eletrônica do jornal O Estado de S. Paulo (O ESTADO DE S. PAULO, 2017).

Acessou-se o banco de dados disponível na página eletrônica da Defesa Civil Nacional (BRASIL, 2017).

Acessou-se o banco de dados disponível na página eletrônica da Defesa Civil Estadual (SÃO PAULO, 2017a).

Acessou-se o banco de dados Sistema de Informações sobre Emergências Químicas – SIEQ da Cetesb, disponível na sua página eletrônica (CETESB, 2017), e a sua biblioteca, presencialmente.

Acessou-se o banco de dados EM-DAT disponível na página eletrônica do Centro para Pesquisa em Epidemiologia de Desastres (ou Centre for Research on the Epidemiology of Disasters – CRED) (GUHA-SAPIR, 2017).

3.2.2 Postos pluviométricos

A busca por na-techs na região costeira de São Paulo encontrou registros referentes à RMBS e a São Sebastião. Para expressar a frequência de ocorrência de na-techs, delimitou-se a quantificação aos registros de Cubatão. A razão é o número maior de registros (dez) em um só município e as características dos eventos naturais iniciadores– inundações e escorregamentos – decorrentes predominantemente de precipitação.

Dada essa delimitação, utilizou-se os acumulados diários de precipitação de 14 postos pluviométricos de Cubatão e de municípios próximos, identificados no quadro 3.1 e localizados na figura 3.2.

Quanto à extensão, as séries são distintas. As de Bertioga, Santos e São Vicente abrangeram o período da pesquisa, qual seja janeiro de 1940 a dezembro de 2015, ou 76 anos, com algumas interrupções. Guarujá se assemelha às anteriores. Já Cubatão tem séries que variaram de 21 anos a 61 anos, com interrupções. No período de março de 1972 a março de 1982, há medições de seis das sete séries, com pequenas interrupções.

Quanto à qualidade, há medições consistidas entre 1958 e 1992.

Quadro 3.1 – Características dos postos pluviométricos (adaptado de SÃO PAULO, 2017c).

Município	Posto		Coordenadas		Altitude (m)	Extensão da série	Número de medições	Medições consistidas
	Prefixo	Nome	latitude	longitude				
Bertioga	E3-040	Usina Itatinga	23°46'00"	46°07'00"	10	01/1940 a 12/2015	27696	01/1958 a 12/1992
	E3-042	Represa Itatinga	23°45'00"	46°08'00"	720	01/1940 a 12/2015	27660	01/1970 a 12/1991
Cubatão	E3-038	Piaçaguera	23°52'00"	46°23'00"	5	01/1940 a 10/2000	21226	01/1972 a 12/1992
	E3-101	Cubatão	23°53'00"	46°25'00"	6	07/1944 a 12/1999	17030	01/1969 a 12/1992
	E3-104	Terceiro Plano Serra Nova	23°48'00"	46°19'00"	670	11/1960 a 03/1982	7302	01/1972 a 12/1975
	E3-143	Rodovia Anchieta (cota 400)	23°53'00"	46°29'00"	400	01/1950 a 04/1994	16052	01/1970 a 12/1991
	E3-144	Morro do Piche	23°53'00"	46°27'00"	105	11/1949 a 05/1989	8959	Não consta
	E3-153	Curva da Onça	23°53'00"	46°29'00"	500	09/1952 a 10/1996	13893	01/1958 a 12/1991
	E3-236	Pilões	23°54'00"	46°30'00"	100	03/1972 a 03/1992	7282	03/1972 a 12/1991
Guarujá	E3-043	Perequê	23°57'00"	46°11'00"	3	04/1942 a 12/2015	24762	01/1970 a 12/1970 e 01/1972 a 12/1992
	E3-070	Ponta da Praia	24°00'00"	46°17'00"	3	01/1941 a 12/2015	25222	01/1970 a 12/1992
Santos	E3-041	Caetê	23°53'00"	46°13'00"	200	01/1940 a 12/2015	27038	01/1970 a 12/1991
São Vicente	E3-056	São Vicente	23°58'00"	46°22'00"	10	01/1940 a 12/2015	23552	01/1969 a 12/1991
	E3-228	Humaitá	23°57'16"	46°27'00"	10	01/1940 a 12/2015	21291	01/1972 a 12/1992

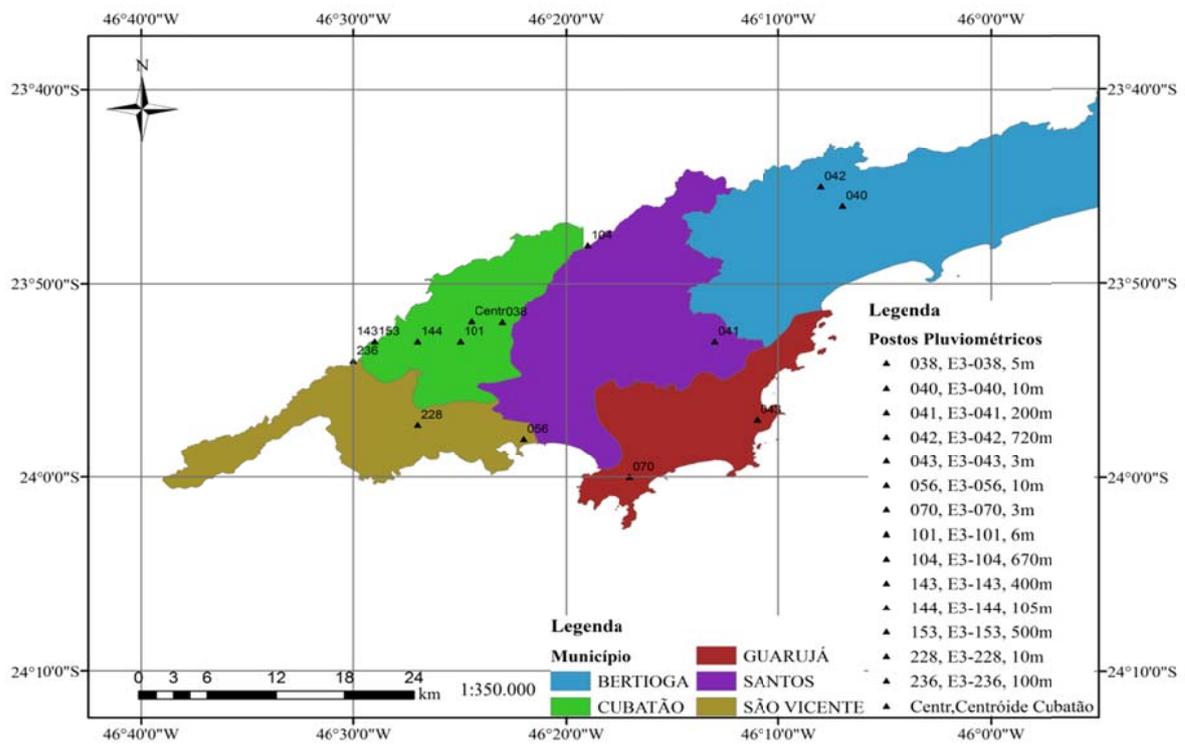


Figura 3.2 – Localização dos postos pluviométricos.

3.2.3 Projeções de precipitações

Utilizou-se as simulações produzidas por Lyra et al. (2017). A resolução espacial é 5km e advém do modelo regional Eta, com condições de contorno dadas pelas simulações do mesmo modelo, com resolução de 20km e, para este, as condições de contorno são do modelo de clima HadGEM2-ES.

Há estimativas de precipitação diária para 72 (9x8) células, compreendendo as longitudes -46,6 a -42,9 e as latitudes -24,1 a -23,75. A série denominada histórica apresenta simulações para o período de 1961 a 2005. As séries atreladas aos cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5 compreendem 2007 a 2040. O ano é representado por 360 (30x12) dias em cada série.

3.3 Métodos

Pode-se estimar o risco na-tech adotando-se o procedimento proposto na figura 3.3, o qual foi inspirado em Antonioni et al. (2009) (vide quadro 2.2 desta pesquisa) e em CETESB (2014, p. 16).

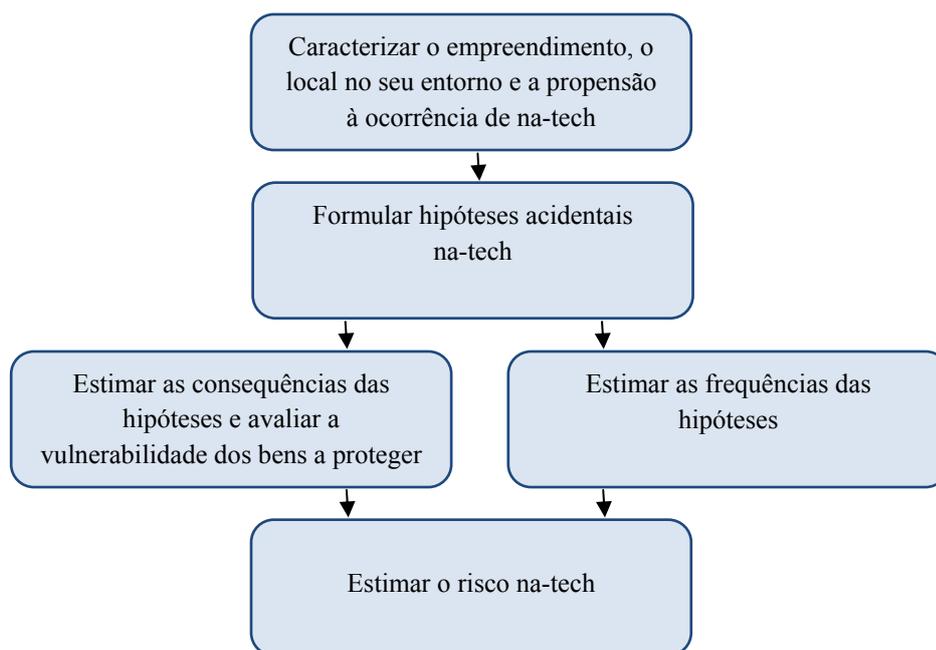


Figura 3.3 – Fluxograma das etapas para estimar o risco na-tech.

Esta pesquisa debruçou-se sobre algumas das etapas deste procedimento, a saber: (i) caracterizações do empreendimento, do seu entorno e investigar a propensão da região à ocorrência de na-tech e (ii) buscar estimadores da frequência de ocorrência dos na-techs.

Desenvolveu-se a etapa (i) na subseção 3.3.1 e a etapa (ii) nas subseções 3.3.2, 3.3.3 e 3.3.4. Discutiu-se as etapas hipóteses acidentais, consequências e vulnerabilidade e risco no capítulo 4 *Resultados e Discussão*.

Os métodos adotados para a execução dos objetivos específicos (a) a (e) da seção 1.3 são descritos nas subseções 3.3.1 a 3.3.4. A figura 3.4 os representam e os associam às etapas da AQR e aos resultados esperados.

Etapa	O que fazer?	Como fazer?	Resultado	Objetivo
Identificação	Identificar na-techs	Jornais	Entender o desenvolvimento dos na-techs	1.3 a
		Bancos de dados	Estimar a frequência de ocorrência de na-techs	
Frequência	Regionalizar medições de precipitação	Identificar postos pluviométricos	Curva de probabilidade de exceder um limiar de precipitação $[P(h > h_0)]$	1.3 b e 1.3 c
		Estimar a distribuição de probabilidade por posto		
	Aplicar o método de Thiessen para ponderar medições dos diferentes postos			
	Estimar a probabilidade de ocorrência de na-techs condicionada à precipitação $h > h_0$ regionalizada	Identificar a precipitação no dia da ocorrência e em $\pm 96h$		
Investigar a tendência de precipitação até 2040	Associar ao na-tech a maior precipitação h_0 em $\pm 24h$	Curva de probabilidade condicional de ocorrência de na-tech dada a precipitação $h > h_0$	Decisão de rejeitar a hipótese de tendência	
	Dispor h_0 em ordem decrescente			
	Associar número de na-techs a h_0			
Consequência	Formular hipóteses críveis, delimitadas pelo que já foi observado	Utilizar projeções de precipitação pelo modelo Eta, resolução 5km, cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5	Relação de hipóteses na-tech	1.3 d
		Aplicar os métodos de Mann-Kendall e Spearman às projeções		
Risco	Estimar risco na-tech	Combinar resultados das etapas frequência e consequência sob a ótica da Avaliação Quantitativa de Risco (AQR)	Discussão sobre o risco na-tech	1.3 e
			Medidas de gerenciamento	

Figura 3.4 – Representação dos métodos adotados para a estimativa do risco na-tech.

3.3.1 Identificação dos na-techs

Realizou-se busca presencial e página a página de evidência de ocorrência de na-tech no jornal A Tribuna. Os meses e os anos verificados encontram-se no quadro 3.2, destacados em amarelo.

Realizou-se busca similar na pasta de recortes de notícias sobre inundações e enchentes da Hemeroteca Roldão Mendes Rosa. O período de investigação foi 1991-2015 (25 anos) e encontra-se em marrom no quadro 3.2. As notícias estavam em vários dos jornais presentes no quadro 3.3.

Sobreposições entre as investigações no jornal e na hemeroteca encontram-se em laranja no quadro 3.2.

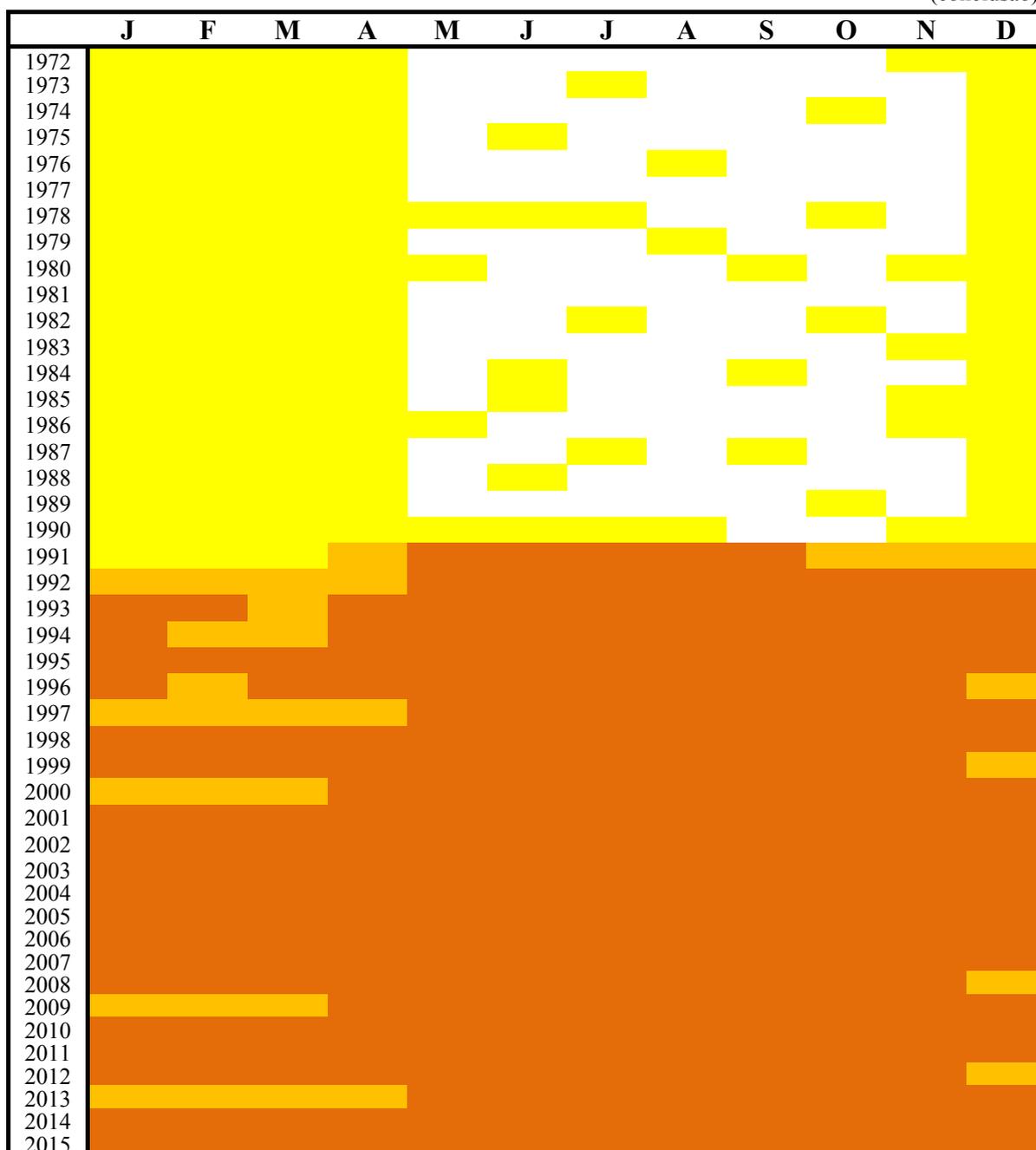
Quadro 3.2 – Meses investigados no jornal A Tribuna (in loco) e na Hemeroteca de Santos (jornais regionais do litoral paulista e jornais de circulação estadual/nacional).

(continua)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1940	■	■	■	■	■	■						
1941												
1942		■	■									
1943												
1944												
1945												
1946												
1947	■	■										
1948												
1949											■	■
1950	■	■	■	■	■	■						■
1951	■	■	■	■	■	■						■
1952	■	■	■	■	■	■						■
1953	■	■	■	■	■	■						■
1954	■	■	■	■	■	■						■
1955	■	■	■	■	■	■						■
1956	■	■	■	■	■	■						■
1957	■	■	■	■	■	■						■
1958	■	■	■	■	■	■						■
1959	■	■	■	■	■	■						■
1960	■	■	■	■	■	■						■
1961	■	■	■	■	■	■						■
1962	■	■	■	■	■	■						■
1963	■	■	■	■	■	■						■
1964	■	■	■	■	■	■						■
1965	■	■	■	■	■	■						■
1966	■	■	■	■	■	■						■
1967	■	■	■	■	■	■						■
1968	■	■	■	■	■	■						■
1969	■	■	■	■	■	■					■	■
1970	■	■	■	■	■	■			■	■	■	■
1971	■	■	■	■	■	■			■	■	■	■

Legenda: A Tribuna (amarelo); Hemeroteca (marrom); A Tribuna + Hemeroteca (laranja)

(conclusão)



Legenda: A Tribuna (amarelo); Hemeroteca (marrom); A Tribuna + Hemeroteca (laranja)

Realizou-se busca presencial no arquivo do jornal Folha de São Paulo em 28 de maio de 2015. Há recortes digitalizados para o período 1966-1996 (31 anos). Utilizou-se as palavras-chave inundação, enchente e forte chuva. Posteriormente, acessou-se o banco de dados eletrônico do Jornal, no período 1940-2015, com a combinação nome do município + inundação (por exemplo: Cubatão + inundação). Recuperou-se notícias de vários jornais presentes no quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Fontes de informação de na-techs.

Identificador	Fonte (Jornais)	Identificador	Fonte (Jornais)
1	A Tribuna	10	Manchete
2	Expresso Popular	11	Cidade de Santos
3	Diário do Litoral	12	Metro Santos
4	O Estado de S. Paulo	13	Jornal local
5	Jornal da Tarde	14	Folha da Tarde
6	Diário Oficial de Santos	15	O Globo
7	Diário Popular	16	Diário de São Paulo
8	D. O. Urgente (mesmo que 6)	17	Gazeta Mercantil
9	Folha de São Paulo		
18	Folha da Noite, provém da palavra chave forte chuva		
19	Folha da Manhã, provém da palavra chave inundação + Cubatão; 19* provém da palavra chave forte chuva		
20	O Estado de S. Paulo, eletrônico		
21	Folha de São Paulo, eletrônico, provém da palavra chave forte chuva; 21* provém da busca combinada de inundação + nome do município (ex.: inundação Santos)		

Realizou-se busca no banco de dados eletrônico do jornal O Estado de S. Paulo, no período 1940-2015, com a combinação nome do município + inundação (por exemplo: Cubatão + inundação).

Realizou-se busca no banco de dados eletrônico SIEQ e na biblioteca da Cetesb. Os registros estão disponíveis a partir de 1978 e referem-se a ocorrências em que há a participação da Cetesb. A busca eletrônica utilizou a combinação do nome do município + causa, entre elas, natural e extravasamento. Dado que a recuperação ofereceu poucos detalhes, fez-se consulta pessoal ao Setor de Atendimento a Emergências da Cetesb para os casos em que o resultado sugeria um na-tech.

Realizou-se busca no banco de dados EM-DAT, que separa os registros por eventos dos tipos natural e tecnológico. A partir da palavra-chave Brasil, recuperou-se dados para os dois tipos de eventos.

Acessou-se os bancos de dados da Defesa Civil Nacional e da Defesa Civil do estado de São Paulo. As chaves de pesquisa foram: período (1940-2015), município (Cubatão), documentos (todos) e desastres (todos).

3.3.2 Frequência baseada em registros

Segue-se o previsto na subseção 2.2.1. Determinou-se a frequência de ocorrência de

na-techs acumulada no tempo e normalizada pelo número de empresas (TN_i) dividindo-se o período 1940-2015 em intervalos de cinco anos, exceto o primeiro, de seis anos. Verificou-se as quantidades de na-techs e de empresas em cada intervalo e calculou-se a frequência a partir da equação 2.1.

3.3.3 Ocorrência de na-tech condicionada à intensidade da precipitação

O quadro 3.1 mostra a extensão das séries de precipitação diária dos 14 postos pluviométricos disponíveis para Cubatão e municípios litorâneos limítrofes. As séries de Cubatão têm extensões distintas, sendo que apenas o posto E3-038 alcança o ano 2000. As demais séries se estendem por todo o período da pesquisa, 76 anos, exceto as de Guarujá, pouco menores. Todas as séries, a despeito das suas extensões, apresentaram interrupções, como apresentadas no quadro 3.1, coluna número de medições.

A fim de se obter uma série representativa do período 1940-2015 para a região de interesse, inicialmente se examinou cada série quanto ao modelo de distribuição que melhor se ajustou às medições. O raciocínio subjacente era o de encontrar diferenças relevantes, que impedissem o uso das medições de algum posto.

Estimou-se os parâmetros das distribuições Gama, Weibull e Pearson tipo 3 por máxima verossimilhança e se verificou a aderência pelos métodos C-S, K-S e A-D. A escolha da distribuição que melhor representa as medições seguiu abordagem similar à de Yue et al. (1999), apresentada ao final da subseção 2.2.2.1. Para x_1, x_2, \dots, x_n , comparou-se os valores da função de distribuição acumulada observada com as funções teóricas das distribuições Gama, Weibull e Pearson tipo 3, cujos parâmetros foram estimados a partir das medições. A distribuição escolhida é a que apresenta maior proximidade com a função observada, com prioridade para as caudas. Adotou-se as cores verde, laranja e vermelha para destacar essas proximidades, maior, intermediária e menor, respectivamente.

Escolhida a distribuição de cada posto de Cubatão, comparou-se visualmente suas curvas de distribuição acumulada observada, além de se obter nova distribuição a partir das medições agregadas. Procedeu-se de forma similar para os postos dos demais municípios, além de se comparar suas curvas com as dos postos de Cubatão.

Conhecendo-se o comportamento individual e agregado das séries dos 14 postos, obteve-se a série representativa do período 1940-2015, ou série regionalizada, utilizando-se o método polígonos de Thiessen, subseção 2.2.2.2, com auxílio de software de informações geográficas. A razão é seu amplo uso no Brasil na regionalização de variáveis hidrológicas,

além da sua simplicidade operacional e matemática.

Aplicou-se o método à bacia do rio Cubatão em razão da localização dos postos de medição no seu interior ou nas cercanias e por conter boa parte das empresas onde ocorreram os na-techs e da área urbana do município. A bacia tem área aproximada de 501km², delimitada a partir de imagem disponível no DATAGEO (SÃO PAULO, 2017b), sistema de infraestrutura de dados espaciais ambientais do estado de São Paulo, gerido pela Secretaria de Meio Ambiente. Acessou-se a imagem pelas camadas base temática/físico/limites das sub-bacias hidrográficas do ESP. Então, delimitou-se o polígono referente ao atributo rio Cubatão.

Obtida a série regionalizada, estimou-se os parâmetros das distribuições Gama, Weibull e Pearson tipo 3 por máxima verossimilhança, verificou-se a aderência dos modelos às medições regionalizadas e escolheu-se a distribuição que melhor se ajustou a essas medições, de acordo com a subseção 2.2.2.1.

Para cada na-tech (subseção 3.3.1), identificou-se os valores de precipitação (h_0) do dia da sua ocorrência e os valores em $\pm 96h$ a partir da série regionalizada. Esta pesquisa atribuiu a cada na-tech o maior valor de precipitação observado no intervalo $\pm 24h$ da data da sua ocorrência. A razão está em como ocorreu o registro das medições de precipitação. De acordo com SÃO PAULO (2017c), a medição informada para certo dia representa o acumulado entre as 7h do dia anterior e as 7h do dia considerado.

A seguir, verificou-se na série quantos valores de precipitação eram iguais ou maiores que esse valor. Então ponderou-se a ocorrência de um na-tech com o número de vezes em que o valor de precipitação foi alcançado e não houve ocorrência de na-tech.

A probabilidade de ocorrência de um na-tech condicionada a um certo valor de precipitação é dada pelo produto entre a ponderação descrita no parágrafo anterior e a probabilidade de que a precipitação (h) seja maior que um certo valor (h_0), subseção 2.2.2.3.

Dispôs-se os valores de h_0 atribuídos a cada na-tech em ordem decrescente em tabela como a apresentada a seguir. As colunas subsequentes são (i) o número de na-techs associado a cada $h > h_0$, (ii) o número de valores de precipitação (M) $> h_0$. (iii) quantos na-techs ocorreram quando $h > h_0$, (iv) a probabilidade de que h exceda h_0 e (v) a probabilidade condicional de ocorrência de na-tech dado que o limiar h_0 seja excedido.

h_0 (mm)	N	M	N/M	$P(h > h_0)$	$P(N = 1 h > h_0)$

3.3.4 Tendência da precipitação até 2040

Nesta subseção, apresenta-se a estratégia e os métodos de estimativa da tendência de precipitações considerando o contexto das alterações do clima do Planeta.

Investigou-se as precipitações até o futuro próximo, 2040. O motivo é a incerteza menor das estimativas em relação a períodos mais distantes (IPCC, 2015). Adotou-se as estimativas diárias de precipitação discutidas em Lyra et al. (2017) e geradas pelo CPTEC/INPE a partir do modelo regional de clima Eta, acoplado ao modelo global de clima HadGEM2-ES, para a RMBS, com resolução de 5km, para os cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5.

Das 72 células com estimativas de precipitação diária disponíveis, adotou-se aquelas identificadas na figura 3.5 como C1 a C9 e Central. Foram escolhidas por se sobreporem a Cubatão. O centro da célula Central dista 1,9km do centróide de Cubatão.

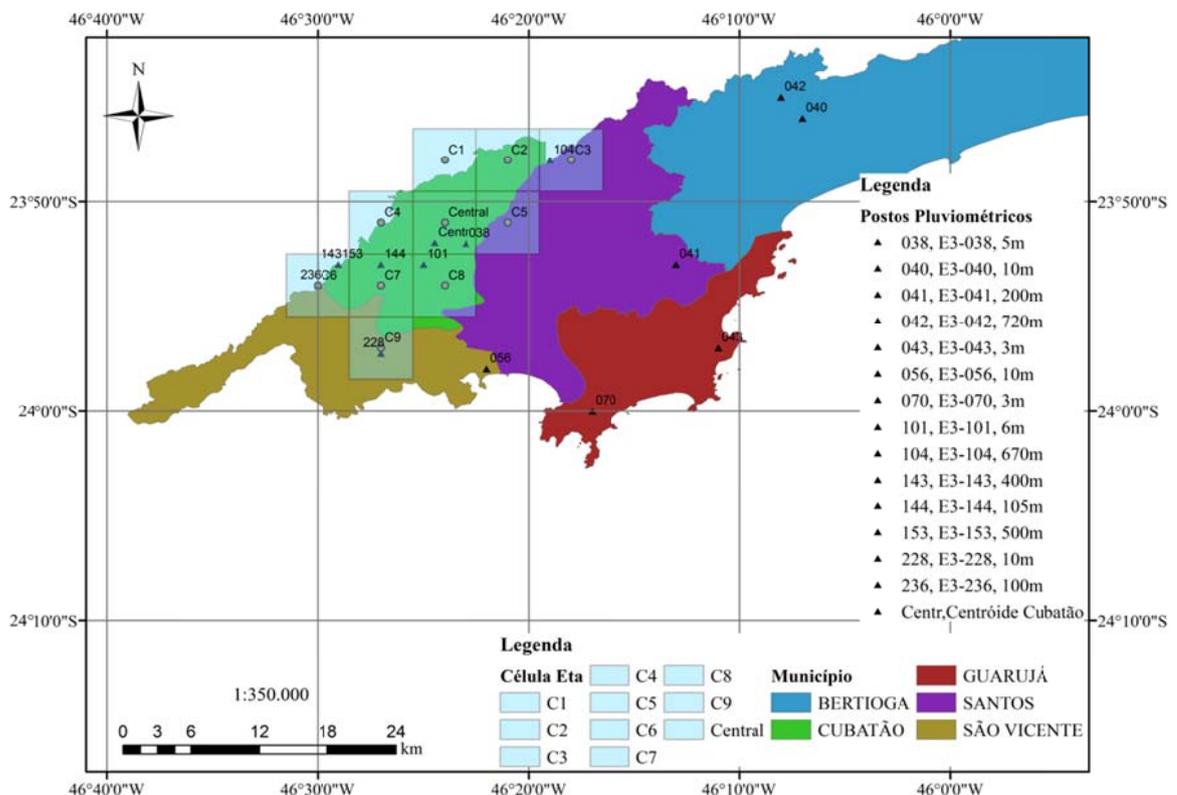


Figura 3.5 – Demarcação das células para simulações do modelo Eta.

Inicialmente, examinou-se as séries referentes ao período 1961-2005 quanto ao modelo de distribuição que melhor se ajustou às medições de precipitação (vide subseção

2.2.2.1). Para cada célula, estimou-se os parâmetros das distribuições Gama, Weibull e Pearson tipo 3 por máxima verossimilhança. Verificou-se a aderência dos modelos aos dados simulados, escolheu-se a distribuição e comparou-se visualmente as curvas das dez células.

A seguir, aplicou-se os testes de tendência de Mann-Kendall e de Spearman para os valores de precipitação das dez células referentes aos períodos histórico (1961-2005) e futuro (2007-2040, com os cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5).

Para tal, por célula, separou-se esses valores em intervalos regulares de tempo e classificou-se de acordo com limites mínimos de precipitação. Para o período histórico (1961-2005), adotou-se onze intervalos, sendo o primeiro de cinco anos e os demais de quatro, perfazendo 45 anos. Para o período futuro (2007-2040), adotou-se onze intervalos, sendo o primeiro de quatro anos e os demais de três, perfazendo 34 anos. Os limites variaram entre 10mm e 160mm.

A seguir, escolheu-se cinco limites para a aplicação dos testes de tendência. Dois ou três desses limites referiam-se à porção superior da classificação, com os maiores valores de precipitação. A razão é o entendimento que os na-techs ocorrem com valores elevados de precipitação. Então, justifica-se querer saber se há tendência de aumento de precipitação para essa faixa de valores. Também adotou-se o limite inferior de 20mm.

4 Resultados e Discussão

A seguir apresenta-se os resultados referentes aos objetivos específicos (a) a (e) da seção 1.3.

4.1 Na-techs

Identificou-se 15 na-techs. Descrição, localização, data, empresa, danos e a estimativa da frequência de ocorrência encontram-se nas subseções 4.1.1 e 4.1.2.

4.1.1 Identificação

Identificou-se cerca de 500 notícias que mencionavam fortes chuvas, algumas associadas a inundações e escorregamentos. Em outras, havia menção a fortes ventos. Essas notícias provêm predominantemente do jornal A Tribuna, secundadas pelos jornais do grupo Folha (de São Paulo, da Manhã, da Tarde, da Noite). Algumas notícias estavam em mais de um periódico. Também se observou alguma sobreposição entre os bancos de dados, principalmente o da Cetesb, e os periódicos. O apêndice A traz um extrato do levantamento e suas características.

Do levantamento, identificou-se quinze na-techs, evidenciados pela menção na notícia ou no banco de dados à perda de contenção de reservatório que armazenava substância perigosa decorrente de evento natural. O quadro 4.1 e a figura 4.1 apresentam, por município, os na-techs. Há também doze notícias que sugerem na-techs, todos em Cubatão.

Quadro 4.1 – Na-techs identificados.

(continua)

Identificador	Data	Município	Localização		Empresa
			UTM-N	UTM-E	
CUB 01	25.01.1985	Cubatão	7361270	356682	Ultrafertil
Rompimento de duto de três polegadas que transportava amônia entre as unidades Jardim São Marcos e Fafer da Ultrafertil, atuais Vale Fertilizantes unidade 2 e Vale Fertilizantes unidade 1, respectivamente. Vazamento de 15t em aproximadamente três horas devido à movimentação do solo decorrente das últimas chuvas. Ocorreu às 23h45min, na altura do km 60 da rodovia Piaçaguera-Guarujá, no denominado Setor 8.					
CUB 02	09.03.1988	Cubatão	7361270	356682	COPEBRAS/Union Carbide
Pequenos vazamentos em duto de gás residual (<i>tail gas</i>) que liga a COPEBRAS à Union Carbide, na altura do km 60 da rodovia Piaçaguera-Guarujá, no denominado Setor 8. A detecção ocorreu durante procedimento de teste do duto, executado anteriormente à sua operação. O vazamento ocorreu na madrugada de 09 de março e deveu-se à movimentação do solo.					
CUB 03	05.02.1989	Cubatão	7361270	356682	Ultrafertil
Rompimento do duto de três polegadas que transportava amônia entre as unidades Jardim São Marcos e Fafer da Ultrafertil, atuais Vale Fertilizantes unidade 2 e Vale Fertilizantes unidade 1, decorrente de movimentação de solo. Ocorreu na altura do km 60 da rodovia Piaçaguera-Guarujá, no denominado Setor 8.					
CUB 04	16.01.1992	Cubatão	7359213	354505	Petrobras/RPBC
O rio Cubatão subiu 1m e transbordou na Água Fria, na Vila Elizabeth e no Jardim Costa e Silva. O transbordamento atingiu a estação de tratamento de efluentes (ou o separador água óleo) da RPBC e a estação de tratamento de água ETA3 da Sabesp, com consequente interrupção do fornecimento para a Baixada. As águas contaminadas atingiram residências da Vila Elizabeth. O rio Casqueiro também transbordou. A região da RPBC foi a mais afetada. Nos últimos três dias, choveu na região 342mm, com pico de chuva em Cubatão às 16h quando o índice de precipitação atingiu 147,4mm (1h). Foram 1000 desabrigados, principalmente em Vila Parisi e no Morro Mazargão. Em Santos, fortes chuvas na madrugada de 16. Das 6h às 14h de 17, choveu 324,5mm. Não houve incidente grave. Bertioga ficou isolada. Em Ilha Bela, houve uma morte.					
CUB 05	08.02.1998	Cubatão	7359213	354505	Petrobras/RPBC
Forte chuva do final da tarde de domingo, 08, provocou o transbordamento de águas oleosas da Estação de Tratamento de Despejos Industriais da RPBC, as quais atingiram o rio Cubatão. O volume vazado não foi informado ou estimado. Segundo a Cetesb, (i) o vazamento impregnou de óleo cerca de 5km da margem direita do rio Cubatão; (ii) o vazamento decorreu da operação de apenas duas das cinco bombas que controlam a chegada de óleo na estação de tratamento; (iii) avaliação preliminar indica dano grave ao ambiente. Segundo a Petrobras, o vazamento não teve ligação com as bombas. Deveu-se à ruptura da tampa de uma caixa de passagem da tubulação que leva óleo para a estação de tratamento.					
CUB 06	11.01.1999	Cubatão	7361874	358913	Solorrico
Forte temporal associado à abertura das comportas da represa Billings inundou parte do polo industrial de Cubatão. A manobra da EMAE — que administra a Usina Hidrelétrica Henry Borden — contribuiu para a inundação parcial da Solorrico e o alagamento dos principais acessos ao polo. As águas da represa, depois de abertas as comportas, desceram da serra pelo Córrego do Tenente e por rios intermitentes, que engrossaram o volume do rio Piaçaguera. A inundação também se deveu ao enchimento do Rio Piaçaguera e à pequena tubulação de passagem desse rio por baixo da rodovia Cônego Domênico Rangoni. Nota do diretor da Solorrico, Odilon Moratelli: às 17h de ontem [11 de janeiro] a Solorrico tinha a sua área industrial ameaçada pelas águas, com perdas de material. Em Bertioga, das nove horas da manhã de 10 de janeiro até as 11h de 11 de janeiro o índice pluviométrico acumulado foi de 112,8mm. Somente em 11 de janeiro, no período de duas horas, choveu 68,4mm.					
CUB 07	15.01.2011	Cubatão	7359213	354505	Petrobras/RPBC
Forte chuva levou ao transbordamento da lagoa de retenção de resíduos da estação de tratamento de efluentes líquidos da RPBC. A vazão do rio Cubatão estava muito elevada devido à liberação de água da Usina Henry Borden.					

(continuação)

Identificador	Data	Município	Localização		Empresa
			UTM-N	UTM-E	
CUB 08	22.02.2013	Cubatão	7359213	354505	Petrobras/RPBC
			7356622	347438	Sabesp/ETA Pilões
			7357676	352436	Transpetro/Term. Cubatão
<p>Em decorrência da fortíssima chuva, houve (i) inundação de áreas da RPBC, entre elas o sistema de tratamento de águas residuárias (ETDI - Estação de Tratamento de Despejos Industriais e a Bacia de Acumulação de Efluentes), carreando material oleoso para o Rio Cubatão; (ii) corrida de lama e escorregamento da Serra do Mar junto à ETA Pilões da Sabesp. Entre as consequências, houve o arraste de cinco cilindros de armazenamento de cloro com capacidade individual de 900kg. Os cilindros foram posteriormente recuperados nos corpos d'água da região. Um deles estava com a válvula rompida e perdeu seu conteúdo. Houve reclamações de odor por parte da comunidade Vila dos Pescadores; e (iii) inundação do Terminal da Transpetro. Como consequência, inundação do SAO, casa de bombas, sump tank e ruptura dos diques dos tanques TQ 14011 e TQ 14023. Verificou-se o acúmulo de lama no SAO, sump tank e Pátio de Resíduos, com lançamento de tambores desse pátio para a rua externa (Rua Pescada) e acúmulo de detritos contaminados com borra oleosa. Em Cubatão, no Centro, às 00h:27min, 225,2mm (24h) ou 209,6mm desde as 16h (dados da Rede Telemétrica Cubatão do Sistema de Alertas a Inundações de São Paulo). Em 23 de fevereiro, o Plano Preventivo de Defesa Civil (PPDC) indicou 100,8mm no Portão 40 e 93,4mm na Cota 400 durante as últimas 24h. Acumulado em 84h, às 18h:30min, é de 104,6mm (portão 40) e 109,2mm (cota 400). Em 23 de fevereiro, pela primeira vez informou-se a destruição da estação Pilões. Informação de Wilson Bassotti Filho, gerente do Departamento e Tratamento de Águas e Esgoto da Sabesp, responsável pela região de Bertioga a Peruíbe. Não houve menção aos cilindros. Em 25 de fevereiro, informou-se 500 desabrigados e 4000 desalojados. Breve nota e uma foto sobre a ETA Pilões. Nenhuma menção aos cilindros. Em 26 de fevereiro, aventou-se a hipótese de abertura das comportas da represa Billings, em estado de emergência. A EMAE negou, dizendo que para que isso acontecesse, haveria informação prévia à Prefeitura, empresas do polo, Defesa Civil e órgãos ambientais. Em 27 de fevereiro, há notícia sobre a ETA, com duas fotos mostrando a destruição. Nenhuma menção aos cilindros. Em 01 de março, há notícia superficial sobre a inundação das instalações industriais. Na notícia principal, fala-se em assoreamento de rios que cortam o polo e que as águas do trecho assoreado do Rio Cubatão, em Pilões, inundaram a região de tanques de armazenamento do Terminal da BR Distribuidora (Petrobras) e alguns pontos da RPBC. Queda de barreira causou danos na Produquímica, próxima à Carbocloro. Em Santos, segundo a Prefeitura, 95,4mm entre 16h:30min e 18h. Acumulado de 155mm desde 16h de 22 de março até 19h de 23. Ao fim de uma semana de notícias, não houve menção aos cilindros de cloro. Também não há menção sobre os efeitos na RPBC ou no Terminal da Transpetro.</p>					
CUB 09	17.03.2013	Cubatão	7359213	354505	Petrobras/RPBC
<p>Em decorrência da forte chuva, houve inundação de áreas da RPBC, entre elas a Bacia de Acumulação de Efluentes (Bacia P - 3929), carreando borra oleosa para o canal 1 que deságua no rio Cubatão. Medição na cota 400, alto da Serra, indicou 189,2mm (24h) e 203,6 (84h). No posto do centro da cidade, o COMDEC informou 103mm (24h) e 109,2mm (84h).</p>					
SSB 10	18.03.1974	S. Sebast.	7375331	461814	Transpetro/ TA/SSE
<p>Fortes ventos e correnteza levaram ao rompimento das amarras dos navios Takamiya Maru, do Japão, e Conoco Canadá, de bandeira liberiana, por volta de 11h. Ambos bateram contra rochedos próximos ao porto de São Sebastião onde aguardavam para conexão com os píeres da Petrobras. O Conoco, depois de bater em um rochedo, ficou à deriva e encalhou em um banco de areia, próximo à Ilha Bela. O Takamiya teve o casco rompido e, segundo o jornal Folha de São Paulo, derramou cerca de 15t de óleo no mar. Já o jornal A Tribuna informa 15 mil toneladas e em Poffo (2000) consta o vazamento de 6 mil toneladas.</p>					
SSB 11	14.01.2010	S. Sebast.	7368370	458685	Transpetro/ TA/SSE
<p>Forte chuva provocou o transbordamento de tanque pulmão das caixas de drenagem dos filtros auxiliares do oleoduto OSVAT, presente na gleba D do Terminal Aquaviário de São Sebastião (TA/SSE). Pequena quantidade de resíduo oleoso atingiu o córrego do Outeiro. Não se constataram sinais de óleo nas suas margens, nem espécies animais contaminadas.</p>					
PGD 12	13.04.2007	Pr. Grande	7343599	353177	Centro Automotivo Veraneio
<p>Devido à forte chuva, houve inundação dos três tanques do posto de combustível Centro Automotivo Veraneio (cadastro Cetesb nº 558-516-5). O posto estava desativado e os tanques estavam com as bocas abertas, retiradas por vandalismo. O produto vazado foi óleo diesel e escoou para as galerias pluviais.</p>					

(conclusão)

Identificador	Data	Município	Localização		Empresa
			UTM-N	UTM-E	
SAN 13	10.10.1991	Santos	7353785	365022	Granel Química
Raio causa incêndio em dois tanques da Granel Química, na Ilha de Barnabé, Santos, ontem, pouco após 6h:30min. Em declaração, a Granel informou que dois tanques de 1400m ³ foram atingidos. O tanque 51 foi destruído e o 61 parcialmente destruído. O raio atingiu o tanque 51, com acrilonitrila. Seguiu-se uma explosão, movimento do teto do tanque que atingiu e rompeu uma válvula de uma poadada da linha do tanque 57, que continha hexano. O jato de hexano atingiu externamente o tanque 61. O tanque 51 continha 500t de acrilonitrila. Dessas, 140t queimaram e as demais foram transferidas.					
SSB 14	19.08.1976	S. Sebast.	7366873	460582	Transpetro/ TA/SSE
Próximo de 7h:40min, ventos de até 110km/h romperam as amarras do petroleiro Energy Transmition, de bandeira liberiana, ancorado no píer sul do Terminal de São Sebastião da Petrobras. Como consequência, houve o rompimento de três dos cinco braços de descarga e vazamento de petróleo para o Canal de São Sebastião.					
CUB 15	01.02.1983	Cubatão	7361874	358913	Solorrico
Devido à forte chuva (98,2mm entre 3h e 15h), o volume da água do rio Piaçaguera retido sob o pontilhão da rodovia Piaçaguera-Guarujá provocou a inundação das suas duas pistas, entre a Copebrás e a estrada Plínio de Queiroz. Em decorrência, a Solorrico paralisou as atividades de produção de fertilizantes devido ao transbordamento do rio Piaçaguera. Os prejuízos chegaram a milhares de cruzeiros e a diretoria da empresa prometeu mover uma ação de perdas contra o DER. As chuvas caíram com mais intensidade a partir da 4h. Às 5h, as águas chegaram a meio metro na área industrial e administrativa, inundando os setores de estocagem de matéria-prima e de produção, obrigando-a a paralisar a produção de fertilizantes. Toneladas de uréia e de sulfato foram perdidas. As caixas de água potável foram contaminadas. A água também ilhou a Gespa e a Copebrás, sem parar a produção das mesmas. As águas chegaram a 1,5m na Rua 12, Vila Parisi, junto a Adubos Trevo. Em Vila Parisi, 183 pessoas foram retiradas das suas casas. Em Vila Socó, uma rocha destruiu dois barracos. O índice pluviométrico acumulado nos últimos três dias é de 336,2mm.					

Dos quinze na-techs, quatorze afetaram apenas uma empresa, sendo que oito decorreram de inundações, três de movimentos de massa após intensa precipitação, dois de intensos ventos e um decorreu de raio. O na-tech CUB 08 afetou três empresas, com movimento de massa (Sabesp ETA Pilões) e inundação (Petrobras/RPBC e Transpetro). O na-tech SAN 13 afetou dois tanques, sendo que o primeiro foi atingido pelo raio e o segundo por efeito dominó decorrente de explosão e movimento do teto do primeiro tanque.

Dez na-techs ocorreram em Cubatão. Em todos, há precedência de precipitação intensa, sucedida por inundação e/ou movimento de massa. A figura 4.2 mostra a distribuição dos na-techs em Cubatão. Essa incidência maior é compatível com o número maior de empresas no município se comparado com São Sebastião (Petrobras/ TA/SSE), mas não com Santos, onde há número igual ou maior de empresas que movimentam substâncias perigosas. Em Santos, as empresas se localizam na área portuária, junto às margens do Canal do Porto e na Ilha de Barnabé. Ainda assim, a pesquisa não identificou relatos de na-techs associados a precipitação e elevação da maré, ou mesmo movimento de massa.

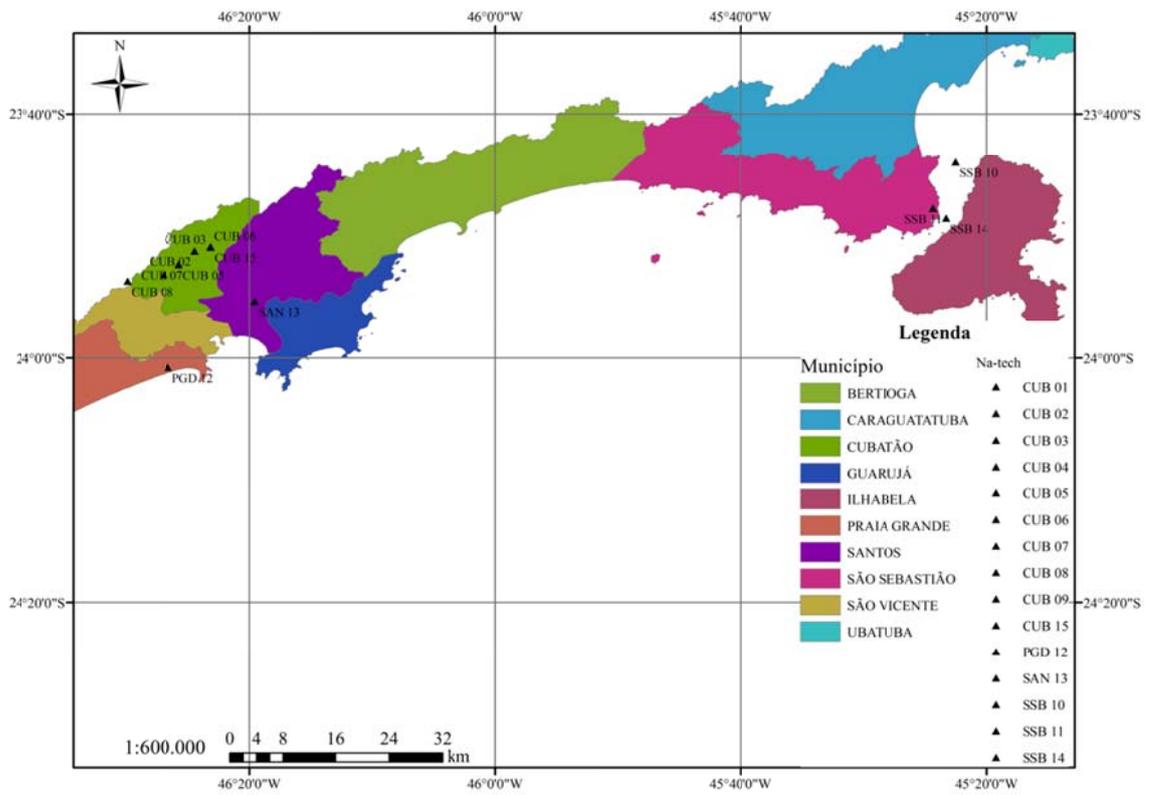


Figura 4.1 – Localização dos na-techs na região costeira do estado de São Paulo.

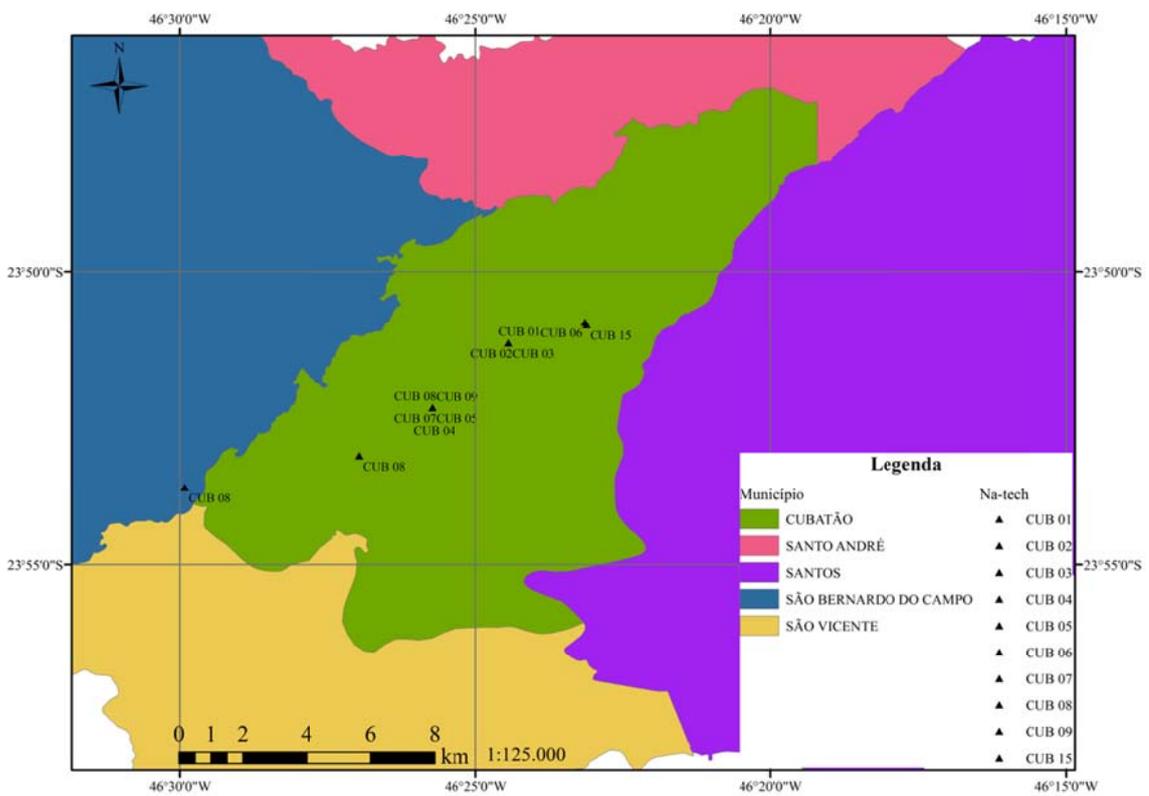


Figura 4.2 – Localização dos na-techs em Cubatão.

A predominância de na-techs (10 em 15) aliada à quantidade e à diversidade de empresas, bem como às características geográficas e de ocupação humana, induziu expressar a tendência de ocorrência de na-techs em Cubatão, no período de interesse, por meio de um índice quantitativo (uma frequência).

4.1.2 Frequência de ocorrência

Até 1955, eram quatro ou cinco empresas em Cubatão. Com o início das atividades da Petrobras/RPBC nesse ano, outras se instalaram, predominantemente nas décadas de 60 e 70. Em 1980, eram 28 empresas, entre elas duas estações de tratamento de água da Sabesp (ETA 3 e ETA Pilões) e o terminal marítimo da Ultrafertil. Embora localizadas em municípios limítrofes a Cubatão, a ETA Pilões e o Terminal da Ultrafertil possuem características similares às demais empresas, como a manipulação de substâncias perigosas, e, por isso, foram incorporadas à estimativa da frequência de ocorrência de na-techs no município.

Várias empresas mudaram de nome, em geral após fusões ou incorporações. A figura 4.3 apresenta suas localizações, independentemente da denominação. O objetivo é privilegiar o local em que ocorreu um na-tech. O apêndice B detalha a figura 4.3, com denominação, localização e período de operação das empresas.

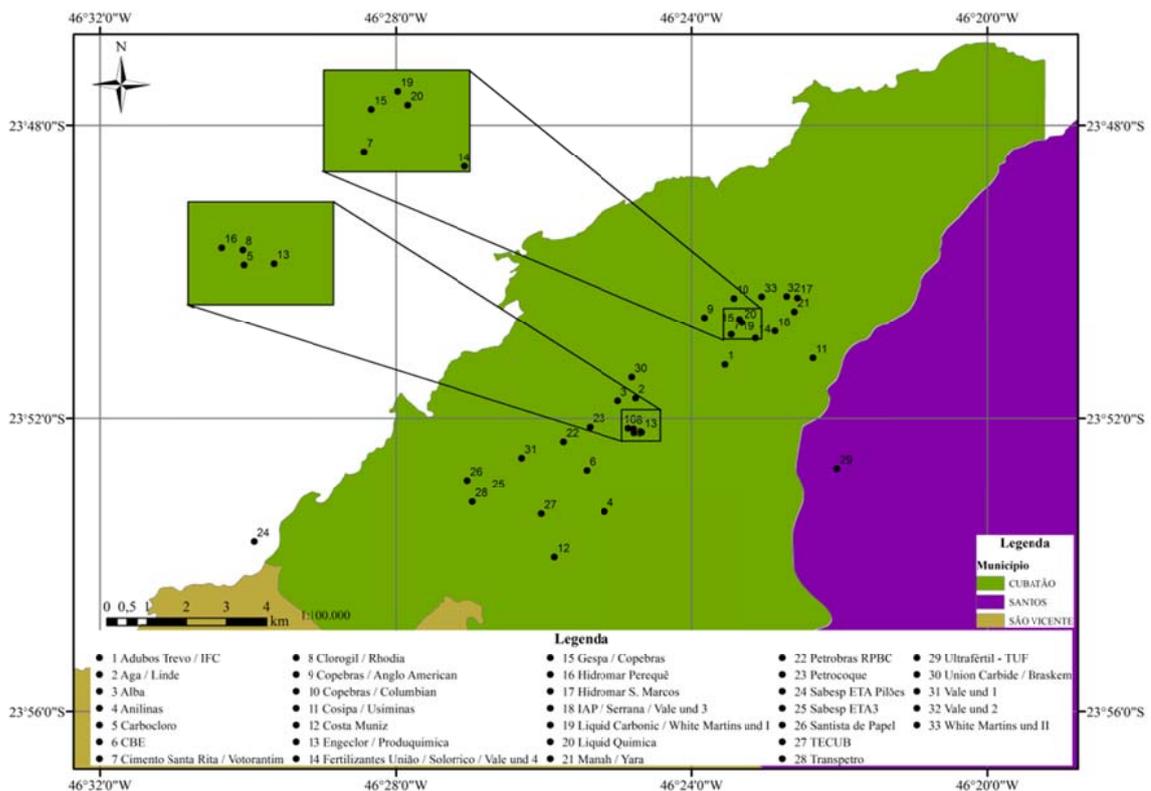


Figura 4.3 – Localização das empresas em Cubatão.

A tabela 4.1 apresenta a estimativa de TN_i , de acordo com a subseção 3.3.2. A frequência é crescente e reflete o registro de na-techs a partir do período 1981-1985. A partir de então, observa-se de zero a três ocorrências por período, com tendência temporal mostrada na figura 4.4. A leitura do valor pontual da frequência, por exemplo 3,69E-03 ocorrência . empresa⁻¹ . ano⁻¹, significa o número de na-techs normalizado pelo número de empresas presentes em cada período e contabilizado até 2010.

Tabela 4.1 – Frequência de ocorrência de na-techs acumulada no tempo e normalizada pelo número de empresas (TN_i).

P_i	E_i	N_i	Evento no período (ocorrência/ empresa x ano)	TN_i (ocorrência/ empresa x ano)
1940-1945	4	0	0	0
1946-1950	4	0	0	0
1951-1955	5	0	0	0
1956-1960	11	0	0	0
1961-1965	12	0	0	0
1966-1970	15	0	0	0
1971-1975	21	0	0	0
1976-1980	28	0	0	0
1981-1985	27	2	1,48E-02	1,61E-03
1986-1990	27	2	1,48E-02	2,90E-03
1991-1995	27	1	7,41E-03	3,31E-03
1996-2000	26	2	1,54E-02	4,30E-03
2001-2005	26	0	0,00E+00	3,97E-03
2006-2010	25	0	0,00E+00	3,69E-03
2011-2015	25	3	2,40E-02	4,97E-03

Legenda: (i) intervalo de interesse, (N_i) número de na-techs no intervalo i, (E_i) número de empresas no intervalo i e (P_i) número de anos em cada intervalo i

De forma similar aos dutos, pode-se formular hipótese afeita à perda de contenção de equipamento decorrente de evento natural e atribuir à mesma o valor de $TN_i = 4,97E-03$ ocorrência . empresa⁻¹ . ano⁻¹ como estimativa da frequência de ocorrência da hipótese.

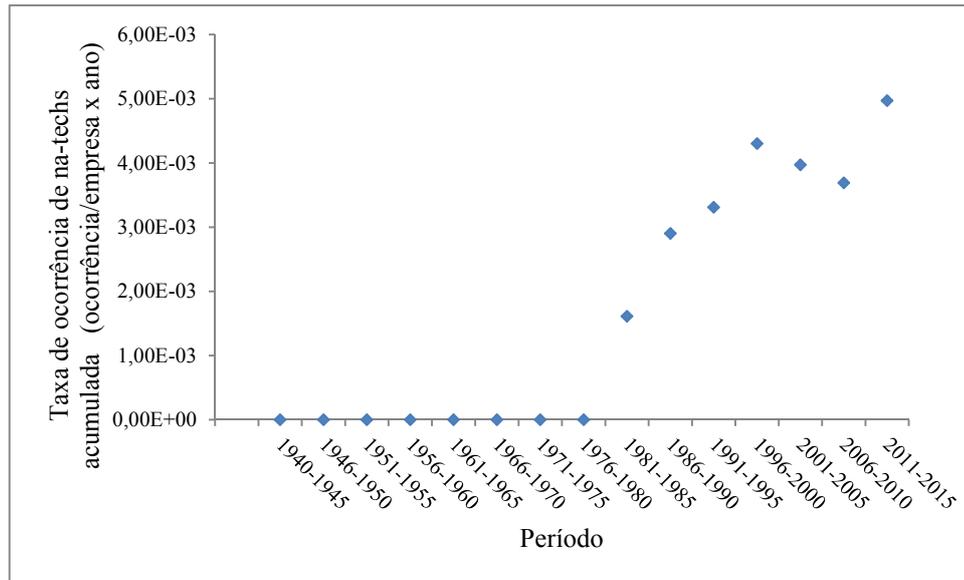


Figura 4.4 – Tendência da frequência de ocorrência de na-techs acumulada em Cubatão.

4.2 Na-techs e precipitação

O apêndice C traz os valores da função distribuição acumulada empírica e das funções teóricas, estimados a partir do método proposto na subseção 3.3.3. Para 11 dos 14 postos, a distribuição Weibull apresentou claramente o melhor ajuste às medições. Além de apresentar maior número de quantis em que as funções empírica e teórica mais se aproximam em relação às demais distribuições, destacados em verde, esses quantis estão predominantemente nas caudas, notadamente na superior, indicando melhor ajuste da distribuição Weibull nessas regiões.

O posto E3-043, de Guarujá, apresentou resultados similares para as distribuições Gama e Weibull. O posto E3-070, também de Guarujá, apresentou o mesmo número de “verdes” para as duas distribuições, porém predominam nas caudas da distribuição Weibull. Já o posto E3-041, de Santos, apresentou a distribuição Gama com maior número de “verdes” e menor número de “vermelhos”. A distribuição Weibull apresentou ajuste melhor na cauda superior e similar na inferior. O teste qui-quadrado, ao nível de significância de 5%, indicou não haver evidência para rejeitar a hipótese de que as medições pertençam à distribuição Weibull e haver evidência para rejeitar a distribuição Gama. Pelo exposto neste parágrafo, entende-se que a distribuição Weibull pode representar, ao menos em condições equivalentes, as séries dos postos E3-041, E3-043 e E3-070.

A tabela 4.2 apresenta os parâmetros α e β da distribuição Weibull para os 14 postos.

Então, estimou-se a probabilidade de exceder um certo valor de precipitação [$P(h>h_0)$] a partir das equações 2.4 e 2.12. A figura 4.5 traz as curvas de $P(h>h_0)$ para esses postos.

Tabela 4.2 – Valores dos parâmetros α e β da distribuição Weibull por posto.

Município	Posto	Zeros (%)	Medições \neq zero	Parâmetro	
				α	β
Bertioga	E3-040	46,6	14797	0,2228	0,6245
	E3-042	42,8	15828	0,1657	0,6536
Cubatão	E3-038	62,9	7869	0,0924	0,8294
	E3-101	57,8	7187	0,1303	0,7790
	E3-104	56,9	3146	0,1099	0,7801
	E3-143	49,9	8037	0,1366	0,7422
	E3-144	55,2	4017	0,1422	0,7677
	E3-153	48,5	7150	0,1393	0,7227
	E3-236	48,3	3765	0,1872	0,6708
Guarujá	E3-043	60,6	9756	0,1003	0,8402
	E3-070	53,7	11686	0,2223	0,6667
Santos	E3-041	50,6	13345	0,1498	0,7029
São Vicente	E3-056	59,4	9550	0,1696	0,7114
	E3-228	60,3	8459	0,1436	0,7522

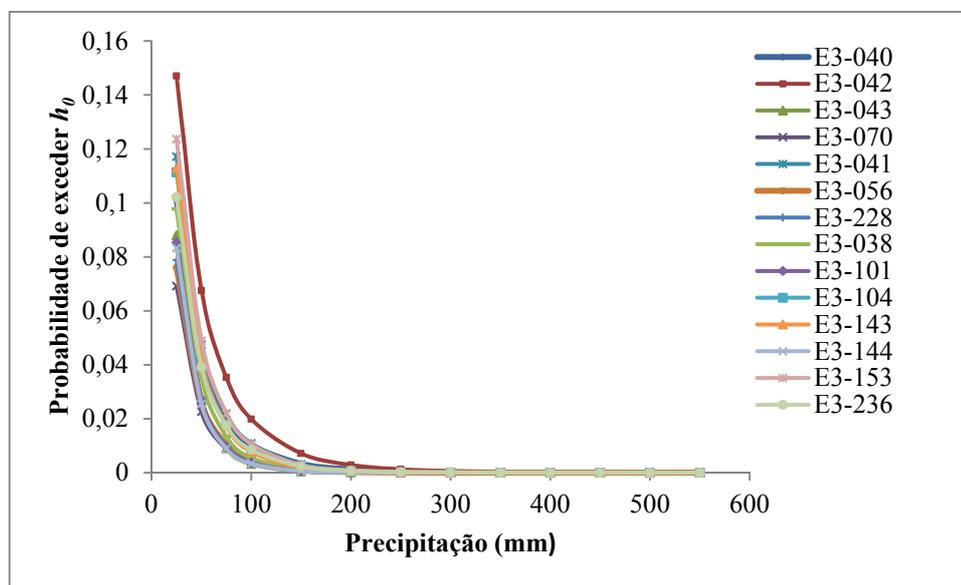


Figura 4.5 – Probabilidade de exceder [$P(h>h_0)$] baseada na distribuição Weibull por posto.

A observação visual da figura 4.5 mostra a curva do posto E3-042, de Bertioga, superior às demais, indicando a maior probabilidade de exceder h_0 , tanto na cauda superior como na região central. Por exemplo, $P(h>25\text{mm})$ é 2,1 vezes maior em relação ao posto

E3-070, ou $P(h>100\text{mm})$ é 6,1 vezes maior em relação ao posto E3-043, ambos do Guarujá. Embora a diferença seja clara, sua relevância será explorada na subseção 4.2.1, à frente, onde será discutida a curva regionalizada dos 14 postos.

Os ensaios que avaliaram o comportamento das medições agregadas (i) dos postos de Cubatão (toda a extensão e entre 1972-1982), (ii) dos demais postos e (iii) dos postos de Cubatão adicionados aos dos demais postos mostraram a distribuição Weibull com o melhor ajuste. A tabela 4.3 apresenta os parâmetros α e β da distribuição Weibull para as quatro combinações avaliadas e a figura 4.6 traz as suas curvas de $P(h>h_0)$.

Tabela 4.3 – Valores dos parâmetros α e β da distribuição Weibull para medições agregadas dos (i) postos de Cubatão, (ii) demais postos e (iii) postos de Cubatão e demais postos.

Denominação	Zeros (%)	Medições \neq zero	Parâmetro	
			α	β
Cubatão 1972-1982*	49,5	10954	0,1734	0,6870
Cubatão toda a extensão	55,1	41171	0,1301	0,7555
Demais postos	52,9	83421	0,1719	0,6848
Cubatão toda a extensão + Demais postos	53,7	124592	0,1576	0,7067

(*) Não há medições no período para o posto E3-144.

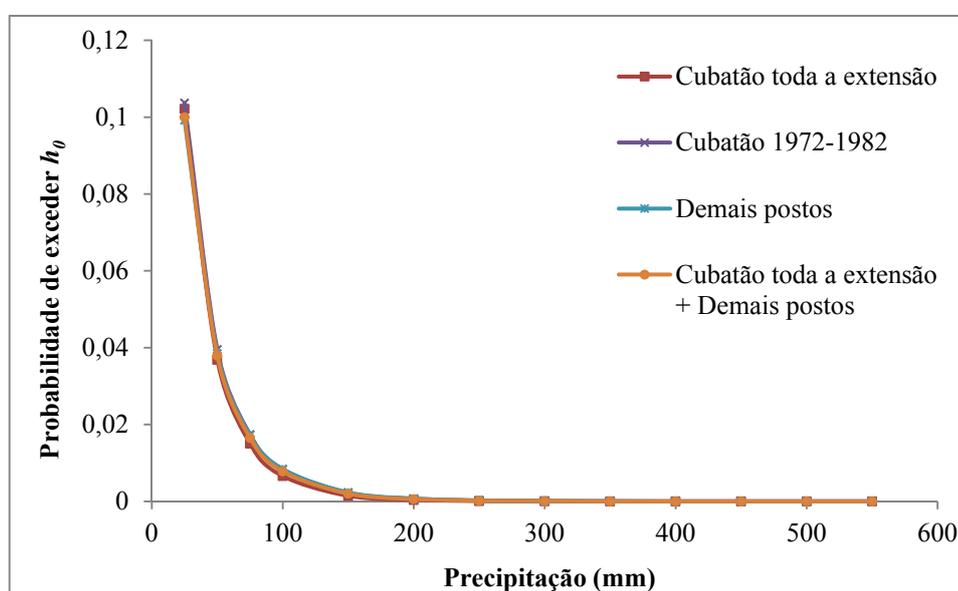


Figura 4.6 – Probabilidade de exceder [$P(h>h_0)$] baseada na distribuição Weibull para combinações de postos.

A observação visual da figura 4.6 mostra boa concordância das quatro curvas. Para as duas curvas mais afastadas entre si, a denominada Demais postos (postos distintos dos de

Cubatão) mostra probabilidade de exceder h_0 similar à da curva Cubatão toda a extensão na cauda superior e levemente maior na região central. Por exemplo, $P(h>25\text{mm})$ é 3% menor em relação à curva Cubatão toda a extensão e $P(h>50\text{mm})$ é 4% maior em relação a essa curva. Na região central, $P(h>100\text{mm})$ é 27% maior e $P(h>200\text{mm})$ é 100% maior em relação a Cubatão. Em relação aos postos (figura 4.5), a diferença entre as duas curvas é menos evidente e também será explorada na subseção 4.2.1, à frente.

O comportamento probabilístico dos 14 postos, figura 4.5, e das medições agregadas, figura 4.6, é similar. A distribuição Weibull mostrou-se a de melhor aderência às medições e as diferenças entre as curvas, embora não examinadas em profundidade, podem ser atribuídas, ao menos em parte, à localização dos postos. O quadro 3.1 mostra sete deles com altitude de até 10m, enquanto quatro estão igual ou acima de 400m.

4.2.1 A distribuição regionalizada

A seguir, obteve-se a série representativa do período 1940-2015 ou série regionalizada utilizando o procedimento descrito na subseção 3.3.3. A título de exemplo, a tabela 4.4 mostra a precipitação regionalizada estimada para janeiro de 1940.

Como mostrado no apêndice D, a distribuição Weibull apresentou o melhor ajuste à série. O número de “verdes” é maior em relação às demais distribuições e estão nas caudas, indicando melhor ajuste da distribuição Weibull nessas regiões.

Tabela 4.4 – Precipitação regionalizada para janeiro de 1940.

Data	E3-038	E3-040	E3-041	E3-042	E3-043	E3-056	E3-070	E3-101	E3-104	E3-143	E3-144	E3-153	E3-228	E3-236	Precipitação regionalizada
01.01.1940	0	0	0	5		0							0		0,2
2	0	0	3,7	16		3							0		3,1
3	5,1	7,9	0	0		0							0		0
4	0	2,3	24,1	0		1,2							0		9,6
5	0	0	2,4	5		0							0		1,1
6	0	41,5	0	0		0							0		0
7	114,3	9	8,7	4,2		25							0		11,1
8	116,9	103,2	101,8	6,5		184							206		150,4
9	7,6	5	54,1	16		68							43,2		53,7
10	5,1	2,3	14,2	65,5		1							2,8		9,5
11	0	3,8	4,7	6		16,5							7,2		9
12	0	12,3	0	0		1							0,1		0,3
13	0	6,2	0	0		3,6							8,4		3,3
14	0	0	0	0		7,5							0,1		2,3
15	0	0	30,4	0		0							0		11,6
16	0	0	0	0		0							0		0
17	0	4,5	0	0		0							0		0
18	30,5	16,2	0,3	0		2,1							1,1		1
19	5,1	6,8	29,1	0		20,2							22,1		23,2
20	0	0,3	3,3	0		1,5							0		1,7
21	0	0,5	0	0		0							0		0
22	0	0	0	0		0							0		0
23	0	0,2	0	0		0							0		0
24	0	5	0	0		0							0		0
25	10,2	12	6,2	18		6,8							0		5,3
26	0	9	8,5	0		4,8							9		7,1
27	0	0	0,6	0		0							1,2		0,6
28	10,2	10	0	0		0							0		0
29	0	0	17,1	0		0							0		6,5
30	15,2	34,2	0	0		0							0		0
31.01.1940	17,8	0,2	29,1	0		12							0		14,8

Legenda: E3-XXX Posto pluviométrico E3-XXX

A tabela 4.5 apresenta os parâmetros α e β da distribuição Weibull para a série regionalizada e a figura 4.7 traz a sua curva de $P(h>h_0)$ obtida a partir da equação $P(h > h_0) = 0,663 e^{-0,2364x^{0,6649}}$.

Tabela 4.5 – Valores dos parâmetros α e β da distribuição Weibull para a série regionalizada.

Denominação	Zeros (%)	Medições \neq zero	Parâmetro	
			α	β
Medições regionalizadas	33,7	18399	0,2364	0,6649

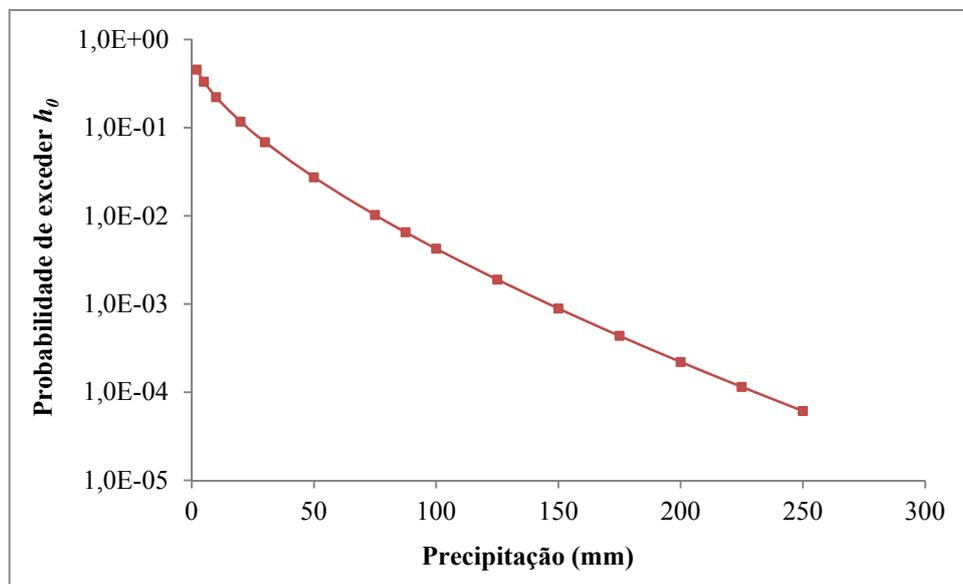


Figura 4.7 – Probabilidade de exceder $[P(h>h_0)]$ baseada na distribuição Weibull para a série regionalizada.

4.2.2 Na-tech condicionado à intensidade da precipitação regionalizada

Os valores de precipitação do dia de ocorrência do na-tech e valores em $\pm 96h$ estão na tabela 4.6 e advêm da regionalização das medições de precipitação. Exceto no na-tech CUB 01, o maior valor coincide com a data de ocorrência do na-tech ou 24h após.

O na-tech CUB 01 refere-se ao rompimento de duto e liberação de amônia para atmosfera. Sua descrição no quadro 4.1 menciona a “movimentação do solo decorrente das últimas chuvas”. Verificando os relatos anteriores a 25.01.1985, data do evento, há o registro de intensas chuvas a partir de 23.01.1985. Assim, embora se tenha assumido na subseção 3.3.3 atribuir a cada na-tech o maior valor de precipitação observado no intervalo $\pm 24h$ da

data da ocorrência, adotou-se a estimativa de 48h antes, ou seja, 122,2mm para representar a precipitação associada ao na-tech CUB 01. A razão é a evidência de que o rompimento está associado a precipitações que ocorreram em período maior que 24h.

Tabela 4.6 – Precipitação regionalizada (h , mm) para o dia da ocorrência do na-tech (0h) e intervalo de $\pm 96h$.

	Na-tech	(96h)	(72h)	(48h)	(24h)	0h	24h	48h	72h	96h
1	CUB 15	2	2,9	0	9,4	24	213,7	29,4	24,9	1
2	CUB 01	22	0,5	122,2	113	5,9	5,6	1,6	3,3	4,4
3	CUB 02	17,5	0	0,4	6,8	60	14,4	0	0	0
4	CUB 03	0	19,9	2,5	40,4	160,9	40,9	0,1	0	53,9
5	CUB 04	0,2	5,4	22,8	0,1	149,2	167	6,2	0,1	0,9
6	CUB 05	0,7	1,2	2,1	0,1	8,7	24,1	0,6	71,8	115,7
7	CUB 06	72,9	74,4	15,7	20,8	39,5	85,4	3,9	4,5	22,4
8	CUB 07	50,6	29,7	47,1	17,2	23,2	5,8	8,4	12,8	23,6
9	CUB 08	0	0,2	0,2	0	0,5	191,1	4,4	2,1	0,3
10	CUB 09	0	60,7	11,7	0	27	136,1	6,4	0,7	4,1

Na tabela 4.7, as três colunas à esquerda trazem (i) as estimativas de precipitação (h_0) provenientes do tabela 4.6 em ordem decrescente, (ii) o número de na-techs associado a cada $h > h_0$ e (iii) o número de estimativas de precipitação (M) $> h_0$. A quarta coluna informa quantos na-techs ocorreram quando $h > h_0$. Por exemplo, para $h_0 = 85,4\text{mm}$, há 184 medições maiores (M), sendo que em seis (3,26%) casos em que a precipitação superou esse valor registrou-se um na-tech.

Tabela 4.7 – Probabilidade de ocorrência de na-tech condicionada ao limiar de precipitação h_0 .

h_0 (mm)	N	M	N/M	$F(h > h_0)$	$P(N = 1 h > h_0)$
213,7	0	4	0,00E+00	1,54E-04	0,00E+00
191,1	1	9	1,11E-01	2,80E-04	3,11E-05
167	2	16	1,25E-01	5,45E-04	6,81E-05
160,9	3	19	1,58E-01	6,48E-04	1,02E-04
136,1	4	38	1,05E-01	1,34E-03	1,42E-04
122,2	5	52	9,62E-02	2,06E-03	1,98E-04
85,4	6	184	3,26E-02	7,02E-03	2,29E-04
60	7	520	1,35E-02	1,82E-02	2,45E-04
24,1	8	2721	2,94E-03	9,33E-02	2,74E-04
23,2	9	2850	3,16E-03	9,79E-02	3,09E-04

Essa abordagem é essencial no estabelecimento da probabilidade de ocorrência de na-tech dado um certo limiar de precipitação. A quinta coluna da tabela 4.7 traz as probabilidades de que h exceda h_0 , valores esses obtidos a partir da distribuição Weibull com parâmetros da tabela 4.5. A sexta coluna traz a probabilidade condicional de ocorrência de na-tech dado que o limiar h_0 foi excedido.

Os resultados da tabela 4.7 indicam valores de probabilidade de ocorrência de na-tech em queda à medida que o limiar h_0 aumenta. Essa tendência é coerente com a ocorrência de precipitações elevadas, cujas probabilidade de exceder cai rapidamente à medida em que aumenta h_0 (observar figura 4.7).

Visto que h_0 deriva da regionalização das medições de precipitação no período de 1940-2015, cujo método não impôs restrição à eventual tendência de aumento ou diminuição dessas medições, entendeu-se conveniente explorar essa eventual tendência para um futuro próximo, até 2040. A próxima seção apresenta os resultados.

4.3 Tendência da precipitação até 2040

Examinou-se a aderência das dez séries de projeções de precipitação diária referentes ao período histórico às distribuições Gama, Weibull e Pearson tipo 3 (vide subseção 3.3.3).

Segundo o método da subseção 3.3.4, a distribuição Weibull apresentou o melhor ajuste aos dados para as células. Observou-se maior número de “verdes” em relação às demais distribuições e melhor o ajuste na cauda na superior.

A tabela 4.8 apresenta os parâmetros α e β da distribuição Weibull para as células C2, C3, C9 e Central, período histórico, e a figura 4.8 traz as suas curvas de $P(h>h_0)$.

Tabela 4.8 – Valores dos parâmetros α e β da distribuição Weibull para as células C2, C3, C9 e Central relativas ao período 1961-2005.

Denominação	Zeros (%)	Medições \neq zero	Parâmetro	
			α	β
Célula C2	0,350	10524	0,3354	0,7056
Célula C3	0,364	10302	0,4459	0,6488
Célula C9	0,365	10290	0,3165	0,5527
Célula Central	0,334	10786	0,2792	0,6137

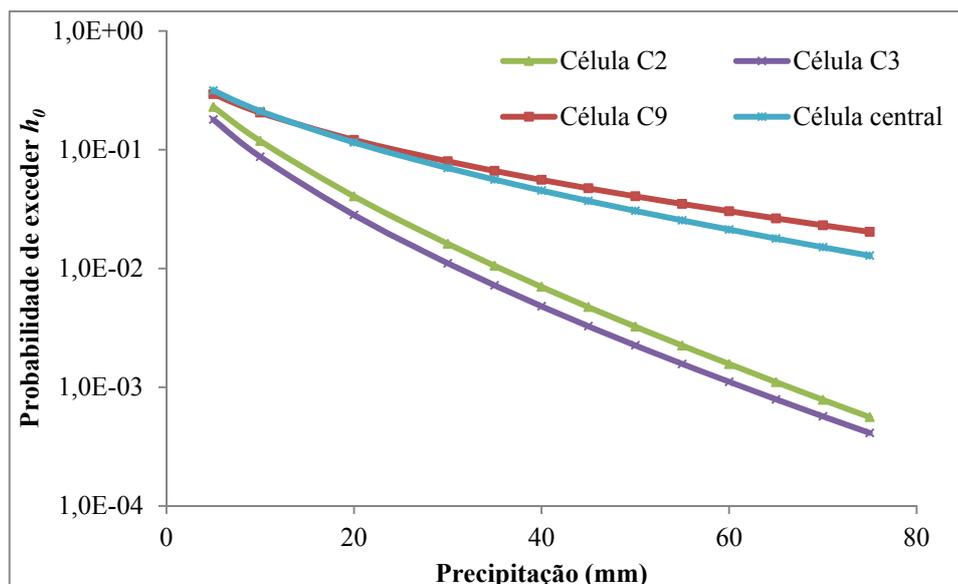


Figura 4.8 – Probabilidade de exceder $[P(h>h_0)]$ baseada na distribuição Weibull para as células C2, C3, C9 e Central, período histórico.

Na figura 4.8, as curvas das células C9 e Central apresentam entre si comportamento bastante próximo, principalmente para precipitações de até 40mm. Como mostra a figura 3.5, a célula C9 é a mais afastada da Serra do Mar. As curvas das células C2 e C3 também apresentam comportamento similar entre si em toda a extensão. As células se localizam na parte nordeste de Cubatão, sobre a Serra do Mar.

A probabilidade de exceder h_0 das células C2 e C3 é menor se comparada com a das células C9 e Central, notadamente com o aumento de h_0 , possivelmente decorrente da representação da topografia no modelo Eta. Esse comportamento (valores de precipitação que decaem no sentido oceano para Serra do Mar) foi observado por Barbosa (2008, p. 65-75), a partir de medições das décadas de 1970 a 1990, para municípios da região costeira de São Paulo e outros próximos.

A despeito da eventual necessidade de investigar esses comportamentos, que está além dos limites desta pesquisa, entende-se que as distribuições de probabilidade de C2/C3 e C9/Central são distintas.

Em seguida, aplicou-se os testes de tendência de Mann-Kendall e de Spearman para os valores de precipitação das dez células referentes aos períodos histórico (1961-2005) e futuro (2007-2040, com os cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5). Aplicou-se os dois testes para cinco limiares por célula. Em dez células e três períodos, foram 300 testes.

A título de exemplo, a tabela 4.9 traz a distribuição dos valores de precipitação para a

célula C1, período futuro RCP4.5. Observa-se que não há valores maiores que 90mm e que só há uma medição em $h>80\text{mm}$ e $h>70\text{mm}$ no período de 2007-2010. Portanto, nessa célula, aplicou-se os testes de tendência para $h>70\text{ mm}$, $h>60$, $h>50$, $h>40$ e $h>20\text{ mm}$.

Tabela 4.9 – Número de vezes em que o limiar de precipitação h_0 é excedido na célula C1, período futuro, cenário RCP4.5.

Limiar	Período										
	2007-2010	2011-2013	2014-2016	2017-2019	2020-2022	2023-2025	2026-2028	2029-2031	2032-2034	2035-2037	2038-2040
10	142	72	56	36	53	38	34	71	101	111	78
20	37	15	10	12	10	11	7	9	24	28	18
30	10	4	4	5	5	3	3	1	5	8	3
40	6	2	0	1	2	1	1	1	3	2	2
50	3	0	0	0	1	0	0	1	2	1	2
60	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
70	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
110	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
130	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
140	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

O quadro 4.2 apresenta a decisão de rejeitar a hipótese nula (H_0) de ausência de tendência. Para os casos onde houve a rejeição, o quadro 4.3 apresenta detalhes da estimativa. O apêndice E apresenta as estimativas da célula C5 para os períodos histórico, futuro RCP4.5 e futuro RCP8.5.

Em seis vezes (2%) houve evidência suficiente para rejeitar a hipótese de ausência de tendência dos dados, sendo que em cinco, foi detectada tendência negativa, indicativa de redução da frequência de ocorrência de $h>h_0$. Como mostra o quadro 4.3, esses cinco casos referem-se ao período futuro, para o cenário de emissão RCP8.5. Os resultados alinham-se aos de Lyra et al. (2017), que, com base nas mesmas simulações, sugerem a redução da precipitação para o final deste século considerando o cenário RCP8.5.

Quadro 4.2 – Decisão de rejeitar a hipótese nula (H_0) de ausência de tendência para os períodos histórico (1961-2005) e futuro (2007-2040), com os cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5) mediante aplicação dos testes de Mann-Kendall e Spearman.

Célula	Período					
	Histórico		Futuro RCP4.5		Futuro RCP8.5	
	M-K	Sp	M-K	Sp	M-K	Sp
C1	nrej	nrej	nrej	nrej	nrej	nrej
	5/5 ⁽¹⁾	5/5	5/5	5/5	5/5	5/5
C2	nrej	nrej	nrej	nrej	nrej	nrej
	5/5	5/5	5/5	5/5	5/5	5/5
C3	nrej	nrej	nrej	nrej	nrej	nrej
	4/5					
	rej	5/5				
	1/5					
C4	nrej	nrej	nrej	nrej	nrej	nrej
					4/5	
	5/5	5/5	5/5	5/5	rej	5/5
					1/5	
C5	nrej	nrej	nrej	nrej	nrej	nrej
					3/5	
	5/5	5/5			5/5	5/5
					2/5	
C6	nrej	nrej	nrej	nrej	nrej	nrej
					4/5	
	5/5	5/5			5/5	5/5
					1/5	
C7	nrej	nrej	nrej	nrej	nrej	nrej
	5/5	5/5	5/5	5/5	5/5	5/5
C8	nrej	nrej	nrej	nrej	nrej	nrej
						4/5
	5/5	5/5			5/5	5/5
C9	nrej	nrej	nrej	nrej	nrej	nrej
	5/5	5/5	5/5	5/5	5/5	5/5
Central	nrej	nrej	nrej	nrej	nrej	nrej
	5/5	5/5	5/5	5/5	5/5	5/5

Legenda: M-K Teste de tendência de Mann-Kendall Sp Teste de tendência de Spearman

nrej não rejeitar rej rejeitar

(1) número de não rejeições ou de rejeições em relação ao número de limiares de chuva onde o teste foi aplicado.

Este quadro pode ser alterado com o aperfeiçoamento dos modelos climáticos, por exemplo, na representação da topografia local pelos modelos regionais. Com o aperfeiçoamento e o aumento da resolução das simulações, os modelos poderão reproduzir os

extremos observados. Por exemplo, para o posto E3-041, em Santos, há 80 medições diárias maiores que 150mm entre 1940-2015, sendo esse o valor máximo alcançado na projeções de Lyra et al. (2017). A consequência será a alteração da distribuição das projeções de precipitação na sua cauda superior, com possível reflexo nas estimativas de tendência da precipitação para o futuro aqui apresentadas.

Quadro 4.3 – Pontos de rejeição da hipótese nula (H_0) de ausência de tendência mediante aplicação dos testes de Mann-Kendall e Spearman.

Célula	Período	Teste	Parâmetros						
			Mann-Kendall				Spearman		
			τ	S	Z_s	p	ρ	T	p
C3	Histórico	M-K	0,569	27	2,169	0,030	0,632	-	-
C4	Futuro RCP8.5	M-K	-0,674	-30	-2,524	0,012	-0,789	-	-
C5			-0,572	-18	-2,003	0,046	-0,671	-	-
C5			-0,612	-24	-2,237	0,025	-0,717	-	-
C6			-0,612	-24	-2,173	0,030	-0,717	-	-
C8		Sp	-	-	-	-	-0,632	-2,000	0,046

Então, com base na aplicação dos testes de tendência de Mann-Kendall e de Spearman, considera-se que não há evidência para rejeitar a hipótese de ausência de tendência das projeções oriundas das simulações do modelo Eta caracterizadas na subseção 3.2.3.

4.4 Risco na-tech

A busca pela contribuição dos na-techs ao risco imposto ao ambiente, ser humano inclusive, por empreendimentos que manipulam substâncias perigosas foi estruturada em observações no período de 1940-2015, na região costeira do estado de São Paulo. O período compreendeu o início da industrialização e o local caracteriza-se por eventos de precipitação elevada que motivaram inundações e escorregamentos, portanto propenso à ocorrência dos na-techs.

Dez dos quinze na-techs identificados ocorreram em Cubatão, resultado concordante com a quantidade elevada de empreendimentos industriais no município, somente comparável à de Santos.

Pode-se então expressar uma frequência de ocorrência para Cubatão, subseção 4.1.2, que é crescente e sugere o incremento do risco. A frequência é relativizada ao número de

empresas presentes em cada período de cinco anos e indica o incremento na ocorrência de na-techs ao longo de todo o período de observação. Sua abordagem seguiu a presente em EGIG (2015) e CONCAWE (2017). O raciocínio subjacente à relativização decorre do interesse em comparar a frequência de Cubatão com outras estimadas para locais com presença maior ou menor de empresas. Essa lógica está evidente em Santella, Steinberg e Aguirra (2011) ou Girgin e Krausmann (2016).

Outra forma de pensar o risco na-tech passa pela forte correlação entre a ocorrência de na-techs e a precipitação intensa nos dias que os precederam, como mostram o quadro 4.1 e a tabela 4.6.

Expressar a probabilidade de ocorrência dos na-techs condicionada a limiares de precipitação permite pensar em utilizá-la, com algum cuidado, na AQR, em substituição à frequência de perda de contenção estimada pela equação 2.39. Essa equação é proveniente do método de estimativa de vazamentos em tanques atmosféricos e pressurizados decorrentes de inundações presente em Landucci et al. (2012) e Landucci et al. (2013).

Como dito, deve-se ter algum cuidado ao extrapolar os resultados de precipitação para inundação. Embora a correlação seja intuitiva, há fatores que promovem uma inundação, como ações antrópicas (ocupação do solo próximo às empresas, canalizações e modificações dos cursos dos rios, construções de pontes e viadutos), mas é pouco provável que modifiquem o padrão de distribuição das precipitações.

Outro aspecto é verificar a ocorrência de inundação mediante certo limiar de precipitação. Intuitivamente, nem toda precipitação intensa, mesmo em valores elevados, leva a uma inundação.

Esse tipo de dependência foi observada ao se investigar na-techs e precipitações. Como mostra a subseção 4.2.2, a relação entre a ocorrência do na-tech e o limiar de precipitação não é 1:1. Por exemplo, a tabela 4.7 indica que em 52 vezes em que $h > 122,2\text{mm}$, identificou-se 5 na-techs. Consequentemente, ao se discutir uma hipótese acidental associada a esse nível de precipitação, a frequência do na-tech deve ser fatorada por 5/52.

É possível que Antonioni et al. (2009) tenham contemplado essa dependência ao estipular regiões de probabilidade de dano para diferentes combinações de altura da lâmina d'água e velocidade da água (veja figura 2.3). É pouco provável que Antonioni, Spadoni e Cozzani (2007) ou Campedel (2008) a tenham contemplado. Há clareza que Landucci et al. (2012) e Landucci et al. (2013) não a contemplaram. A consequência é a majoração das frequências das hipóteses acidentais e, consequentemente, dos indicadores de risco.

Ainda, considerando a expressão do risco na-tech associado à intensidade de

precipitação, esta pesquisa investigou a tendência de aumento da precipitação no futuro próximo, até 2040. Essa tendência estaria associada à mudança do clima do planeta e foi tratada por meio de simulações provenientes do modelo Eta, com resolução de 5km.

Os resultados apresentados na seção 4.3 indicam ausência de tendência na frequência das precipitações nos cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5. Por essa razão, não se propôs correção à curva que expressa a probabilidade de exceder [$P(h>h_0)$], figura 4.7.

Até aqui, seguindo a estrutura da AQR para na-tech presente na figura 3.3, desenvolveu-se as etapas (i) caracterizar o empreendimento, o local no seu entorno e a propensão à ocorrência de na-tech e (ii) estimar a frequência de ocorrência das hipóteses. As etapas (iii) formular hipóteses acidentais na-tech, (iv) estimar as consequências das hipóteses e avaliar a vulnerabilidade dos bens a proteger e (v) estimar o risco na-tech são tratadas a seguir.

Nos relatos dos na-techs presentes no quadro 4.1, não há menção a incêndio ou explosão. Não há menção a pessoas atingidas pela dispersão atmosférica das substâncias. Não há menção a monitoramento dos corpos d'água nos dias subsequentes aos na-techs, embora seja razoável inferir algum dano à fauna próxima.

A ausência de fatalidade humana também foi apontada por Girgin e Krausmann (2016) ao investigaram a ocorrência de na-techs na rede de dutos “on-shore” de transporte de líquidos perigosos dos Estados Unidos da América entre 1986-2012. O encontro é relevante, pois a métrica adotada na AQR para expressar risco tem como valores de referência (ou *end points*) concentrações de substâncias tóxicas, intensidade de radiação térmica ou intensidade de sobrepressão suficientes para causar fatalidade ao ser humano.

A constatação de que corpos d'água foram atingidos pelos vazamentos se alinha ao já apontado por Cozzani et al. (2010), que em pesquisa a bancos de dados europeus e americano identificou a contaminação da água como o efeito mais registrado. Já Girgin e Krausmann (2016) mostraram que 48% dos na-techs resultaram em lançamentos no solo, 28% em corpos d'água e 14% na atmosfera.

A partir do quadro 4.1, construiu-se o quadro 4.4, com destaque para as substâncias perigosas e os equipamentos envolvidos. Os na-techs associados a inundações caracterizaram-se por atingir equipamentos abertos e instalados ao nível do solo, caso das estações de tratamento de efluentes e galpões de armazenamento. Não há relato de envolvimento de tanques atmosféricos ou pressurizados.

Hipóteses críveis são desejáveis em uma AQR, embora seja possível considerar aquelas que envolvem, por exemplo, a ruptura catastrófica de um tanque pressurizado, com

frequência de 5.10^{-7} ano⁻¹ (UIJT de HAAG; ALE, 1999, p. 3.3), baixa, mas estimada a partir de eventos observados. Formular hipóteses envolvendo, por exemplo, vazamentos em tanques atmosféricos e tratá-las quantitativamente adotando o método de Landucci et al. (2012) confronta o pressuposto da hipótese crível, já que esse evento não foi observado na pesquisa.

Quadro 4.4 – Equipamentos e substâncias envolvidos nos na-techs.

Identificador	Data	Substância vazada	Equipamento	Causa imediata
CUB 01	25.01.1985	Amônia	Duto	Movimento do solo
CUB 02	09.03.1988	Gás residual (<i>tail gas</i>)	Duto	Movimento do solo
CUB 03	05.02.1989	Amônia	Duto	Movimento do solo
CUB 04	16.01.1992	Resíduo oleoso	Estação de tratamento de efluentes	Inundação
CUB 05	08.02.1998	Resíduo oleoso	Estação de tratamento de efluentes	Inundação
CUB 06	11.01.1999	Não identificado	Galpão de armazenagem de sólidos (supostamente)	Inundação
CUB 07	15.01.2011	Resíduo oleoso	Estação de tratamento de efluentes	Inundação
CUB 08	22.02.2013	Resíduo oleoso	Estação de tratamento de efluentes (local 1)	Inundação
		Resíduo oleoso	Estação de tratamento de efluentes (local 2)	Inundação
		Cloro	Cilindro 900kg (local 3)	Movimento do solo
CUB 09	17.03.2013	Resíduo oleoso	Estação de tratamento de efluentes	Inundação
SSB 10	18.03.1974	Petróleo	Tanque de navio	Vento e correnteza
SSB 11	14.01.2010	Resíduo oleoso	Caixas de drenagem de filtros	Precipitação intensa
PGD 12	13.04.2007	Diesel	Tanques subterrâneos	Inundação
SAN 13	10.10.1991	Acrilonitrila	Tanque vertical atmosférico	Raio
		Hexano		
SSB 14	19.08.1976	Petróleo	Braços de descarga	Vento
CUB 15	01.02.1983	Ureia, sulfato (??)	Galpão de armazenagem de sólidos (supostamente)	Inundação

Considerando a ausência de hipótese crível e de fatalidades a ela atribuível, entende-se que a contribuição dos na-techs ao risco imposto ao ser humano por empreendimentos que manipulam substâncias perigosas em Cubatão é negligenciável, considerando as métricas risco individual e risco social da AQR apresentadas na subseção 2.3.1.5.

4.5 Observações sobre na-techs

A abordagem quantitativa desenvolvida nesta pesquisa baseou-se em observação. Foi assim na expressão da frequência de ocorrência de na-techs, obtida a partir da identificação ordenada dos mesmos, e na estimativa da probabilidade de ocorrência do na-tech dado certo limiar de precipitação, dependente das medições de chuva.

A subnotificação apontada por Rasmussen (1995) ou a identificação do na-tech apenas após exame intenso dos registros relatada por Girgin e Krausmann (2016) foram também identificadas nesta pesquisa. Por exemplo, no na-tech CUB 08, o jornal A Tribuna não mencionou o arraste de cinco cilindros de cloro e a perda do inventário de um deles (subnotificação). Já o na-tech CUB 07 foi localizado após consulta pessoal ao Setor de Atendimento a Emergências da Cetesb e utilizar a chave de pesquisa extravasamento (identificação).

Decorre o devido cuidado nas conclusões por parte deste pesquisador. Ainda assim, chama a atenção a afirmação de parte da literatura citada nesta pesquisa que o risco decorrente de na-techs é significativo (LANDUCCI et al., 2013) e, em alguns casos, superior ao decorrente de causas internas de um empreendimento industrial (COZZANI et al., 2013; ANTONIONI et al., 2015).

Bancos de dados de acidentes envolvendo a liberação de substâncias perigosas mostram que a percentagem de na-techs varia de 1 a 5,5% do total de ocorrências (RASMUSSEN, 1995; PETROVA, 2011; GIRGIN; KRAUSMANN, 2016), com ausência (GIRGIN; KRAUSMANN, 2016) ou pequeno número de fatalidades (SENGUL et al., 2012).

Considerando a métrica comum à AQR tradicional, onde os estimadores risco individual e risco social têm como valores de referência concentrações ou intensidades que levam à fatalidade humana, as hipóteses na-tech não deveriam indicar número de fatalidades superior ao das hipóteses convencionais, decorrentes de falhas internas do empreendimento. Suas frequências de ocorrência também não deveriam superar aquelas decorrentes de falhas internas.

Como menciona Boot (2013) em sua análise sobre o uso de AQR para quantificar segurança, há diversas abordagens na consecução do método que podem gerar resultados diferentes e de difícil reconhecimento, geralmente associadas ao uso de softwares para a estimação de impactos (ou consequências) e a estimação do risco. Isso faz com que o método, embora bastante utilizado e inserido em legislações de países, esteja longe de ser padronizado.

Não obstante a pequena ou negligenciável contribuição ao risco, a pesquisa mostrou que os na-techs atingiram predominantemente corpos d'água próximos às empresas. Para Cubatão, deve-se ampliar a estratégia de proteção dos empreendimentos industriais estabelecida a partir de 1986 com a criação da comissão especial para a restauração da Serra do Mar na região de Cubatão, que propôs nesse ano um plano de contingência para monitorar a quantidade de chuva e adotar medidas nas empresas potencialmente afetadas por deslizamentos (COMISSÃO ESPECIAL PARA RESTAURAÇÃO DA SERRA DO MAR NA REGIÃO DE CUBATÃO , 1986).

Deslizamentos não são a principal causa de na-techs em Cubatão. Como mostra o quadro 4.4, seis dos dez na-techs ocorridos no município decorreram exclusivamente de inundações e atingiram equipamentos abertos e instalados ao nível do solo.

Portanto, o gerenciamento público e o privado do parque industrial de Cubatão deve contemplar também a identificação de regiões propícias a inundações e observar a presença de equipamentos armazenando ou processando substâncias perigosas. Equipamentos instalados ao nível do solo e próximos a corpo d'água devem ser prioritariamente protegidos por barreiras físicas ou deslocados para locais apropriados.

5 Conclusões e Recomendações

Esta pesquisa abordou a ocorrência de na-techs na região costeira do estado de São Paulo. Seus resultados, relevantes por apresentarem inovações metodológicas na estimativa da frequência de ocorrência dos na-tech e, conseqüentemente, no risco na-tech, também podem subsidiar órgãos governamentais na formulação ou na revisão de políticas públicas associadas à prevenção de acidentes ambientais, principalmente no planejamento do uso do solo no entorno de empreendimentos que manipulam substâncias perigosas, no seu licenciamento e na estruturação de planos de emergência, incorporando nas políticas a necessidade de previsão da ocorrência de eventos na-tech. Os empreendimentos industriais também podem se beneficiar da pesquisa, utilizando-a nas suas políticas de segurança e de meio ambiente, otimizando suas ações de gerenciamento de risco.

A frequência de ocorrência de na-techs na região costeira paulista apresenta tendência de crescimento, como mostra a figura 4.4. Apesar da ausência de fatalidade humana, os registros indicam que os meios ar e água foram atingidos pelos vazamentos. Deve-se, portanto, gerenciar este risco, independentemente da métrica utilizada para a sua expressão.

Preferencialmente, o gerenciamento deve ocorrer na fase de projeto do empreendimento industrial. A decisão pela localização de uma nova unidade dentro do empreendimento ou mesmo do novo empreendimento deve considerar, entre outros, o histórico de ocorrência de na-techs ou de eventos naturais com potencial para motivá-los. Neste caso, deve-se destacar a inundação de equipamentos abertos e instalados ao nível do solo em oito dos 15 na-techs, possivelmente evitável, pelo menos em alguns eventos, pela melhor localização desses equipamentos.

Para empreendimentos existentes, deve-se proteger os locais propícios aos na-techs com barreiras físicas e gerenciais. Essa abordagem está presente nos empreendimentos localizados em Cubatão desde 1986 para casos de deslizamentos da Serra do Mar e pode ser ampliada para inundações a partir das estimativas presentes nesta pesquisa.

As estimativas de frequência e de probabilidade mostradas nas figuras 4.4 e 4.7, respectivamente, podem ser utilizadas nos processos de decisão das empresas e dos órgãos licenciadores. Para as empresas, como já dito, podem auxiliar na localização do novo empreendimento ou no gerenciamento do existente. Para o órgão licenciador, trata-se de

resultado importante na ampliação do escopo da AQR, ainda que as métricas dessa ferramenta não contemplem os impactos a outros bens ambientais que não o ser humano, porém observados nos na-techs identificados.

Essas estimativas são aplicáveis a Cubatão e seu entorno. Contemplam as características geográficas, hidrológicas e de ocupação territorial locais. Estender as estimativas para outras regiões não é recomendável. Os métodos sim. Estes devem nortear outras estimativas, preferencialmente de âmbito local ou regional, de forma que reflitam as características próprias das regiões.

Aspectos metodológicos relativos à estimativa do risco na AQR também podem ser melhor examinados e, eventualmente, alterados, de forma a abranger os na-techs. Neste caso, as hipóteses acidentais avaliariam danos sobre outros bens ambientais que não o ser humano. De posse de critérios de tolerabilidade previamente estabelecidos e compatíveis com esses bens, pode-se tomar decisões. Essas podem ser por parte do empreendedor, ao escolher o local para o novo empreendimento, e podem ser por parte do órgão licenciador, que avaliará o projeto à luz de hipóteses na-tech.

As limitações da pesquisa estão presentes de forma tácita ou explícita em diversas partes do texto. Não obstante essa constatação, como a abordagem quantitativa para expressar o risco na-tech em consonância com a estrutura da AQR vigente decorreu de observação, a base de dados utilizada é condição de contorno básica da abordagem.

Considerando o observado na pesquisa e as métricas vigentes da AQR, o risco imposto ao ser humano por empreendimentos industriais localizados na região costeira do estado de São Paulo e que manipulam substâncias perigosas decorrente de na-techs é negligenciável, confirmando a hipótese presente na seção 1.1.

Os na-techs identificados atingiram predominantemente corpos d'água próximos aos empreendimentos industriais, sendo que aqueles associados a inundações atingiram equipamentos abertos e instalados ao nível do solo.

A conclusão sobre o risco na-tech é limitada pelo base de dados construída para esta pesquisa, proveniente predominantemente de notícias veiculadas na imprensa escrita. A subnotificação e a identificação pouco clara sugere número maior de na-techs que os encontrados. A pesquisa identificou doze relatos sugestivos de na-tech.

Pode-se aperfeiçoar essa conclusão a partir do aumento dessa base, com registros de outras fontes. Entende-se que o empreendimento industrial envolvido no na-tech pode contribuir com informação exata acerca dos equipamentos envolvidos, das quantidades das substâncias liberadas para o ambiente, das medidas adotadas antes e depois do na-tech, do

dano à vida humana e a outros bens ambientais, dos impactos econômicos e à imagem da empresa e, por fim, com lições aprendidas. A informação é relevante para entender a dinâmica do na-tech, a estimativa do risco na-tech e a proposição de medidas de gerenciamento.

Outra fonte de informação são os registros do Órgão Ambiental local. É prevista em lei a autuação decorrente de emissão para o ambiente de substância perigosa, impondo-se penalidades de advertência ou de multa. Estas são comumente acompanhadas de exigências requerendo a apresentação de resultados de investigação do ocorrido. A recuperação desses registros contribuirá para o aperfeiçoamento da base, neste caso mostrando o na-tech sob a ótica do Órgão Ambiental.

A base de dados também pode ser ampliada completando-se o levantamento dos meses não investigados entre 1940-2015 (veja quadro 3.2). Embora tenha-se priorizado no levantamento os meses de dezembro a abril, de maior incidência pluviométrica, os na-techs SAN 13 e SSB 14 ocorreram em outubro e agosto, respectivamente, justificando a investigação no período de menor incidência de chuva.

Dos na-techs de Cubatão decorrentes de inundação (quadro 4.4), CUB 05 e CUB 07 são associados a valores de precipitação pouco maiores que 20mm. A precipitação associada a CUB 06 é de 85,4mm. Os relatos dos na-techs CUB 06 e CUB 07 no quadro 4.1 informaram a abertura das comportas da represa da usina hidrelétrica Henry Borden, instalada a montante dos empreendimentos industriais. A investigação e a confirmação dessa abertura podem modificar o entendimento sobre o desenvolvimento desses na-techs e alterar a composição das tabelas 4.6 e 4.7, com a exclusão dos na-techs CUB 06 e CUB 07.

Não se observou tendência na frequência da precipitação no período 2007-2040 para os cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5. Por essa razão, não se propôs correção à estimativa de ocorrência de na-tech associada à precipitação.

A correção entretanto pode ocorrer com o aperfeiçoamento dos modelos climáticos, por exemplo, na representação da topografia local pelos modelos regionais. Com o aperfeiçoamento e o aumento da resolução das simulações, os modelos poderão reproduzir os extremos observados. Como consequência, a distribuição das projeções de precipitação será alterada na sua cauda superior, com possível reflexo nas estimativas de tendência da precipitação para o futuro aqui apresentadas.

Outra limitação a ser explorada está no método de regionalização das medições pluviométricas. A literatura indica vantagens no uso do método de Kriging associadas à sua habilidade em encontrar o peso ótimo de cada medição por meio da redução da variância amostral. O método pode ser aplicado a três dimensões, contemplando as diferentes altitudes

dos postos pluviométricos, o que não ocorreu nesta pesquisa.

Como qualquer pesquisa, esta também pode ser ampliada. Ampliá-la no sentido geográfico significa investigar na-techs em outros locais do Brasil propensos à ocorrência dos mesmos. Mas essa ampliação pode se limitar a Cubatão e região, investigando outras possibilidades de ocorrência de na-techs não consideradas aqui. Caso claro é a elevação do nível do mar e o efeito conjunto com precipitação. Resultados de modelos hidrológicos determinísticos acoplados à análise probabilística de precipitação e elevação do nível do mar podem aperfeiçoar a gestão do risco de empreendimentos industriais dessa região.

A despeito dos métodos para estimar o risco na-tech, entende-se pertinente adaptar os bancos de dados de registros de acidentes e desastres existentes no Brasil para registrar na-techs. Sobre uma estrutura já existente, pode-se ampliar a capacidade de identificá-los a partir dos registros de eventos provenientes de causa natural e com relato detalhado da evolução dos na-techs, buscando a ocorrência da perda de contenção de substância perigosa.

Deve constar do registro o evento natural iniciador, por exemplo, precipitação, e seus desdobramentos, como inundação e movimento de massa. Suas características como intensidade, duração e área abrangida da precipitação, altura da lâmina d'água e sua velocidade junto aos equipamentos afetados pela inundação.

Sobre os equipamentos onde houve perda de contenção, devem constar seus materiais de construção, quantidade armazenada e quantidade perdida, modos de falha (rupturas ou fendas em tubulações, juntas e válvulas, deslocamentos de tanques atmosféricos e pressurizados, recobrimento e extravasamento de reservatórios instalados ao nível do solo), barreiras físicas que reduzem impactos.

Sobre as substâncias químicas, a identificação das mesmas permitirá obter suas propriedades físicas, químicas e toxicológicas.

Sobre a evolução do na-tech, a sequência de eventos relativos à dispersão da substância nos meios ar, água e solo, a ocorrência múltiplos vazamentos associados ao mesmo evento natural, ocorrência de explosões e incêndios.

Sobre as ações emergenciais, a existência de cenários na-tech no plano de emergência, a eficácia do plano, a concorrência de recursos humanos e materiais com o evento natural.

Sobre os danos, os alcances dos efeitos de sobrepressão, radiação térmica e nuvem tóxica, os resultados dos monitoramentos ordinários e extraordinários de água, solo e ar, a quantificação de perdas humanas, de outras espécies de interesse e de bens sócio-ambientais.

Devem ainda constar do registro, os impactos econômicos e à imagem da empresa e, por fim, as lições aprendidas.

Referências

ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, I. A. (Editores). **Handbook of mathematical functions: with formulas, graphs, and mathematical tables**. New York: Dover, 1972.

Ab'SÁBER, A. N. **Os domínios de natureza do Brasil: potencialidades paisagísticas**. 3^a ed. São Paulo: Ateliê Editorial, 2005a. 160 p.

Ab'SÁBER, A. N. **Litoral do Brasil**. São Paulo: Metalivros, 2005b. 288 p.

ANP. **Anuário estatístico brasileiro de petróleo, gás natural e biocombustíveis**: 2016. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Rio de Janeiro: ANP, 2016. 264 p.

AICHe. CCPS. **Guidelines for hazard evaluation procedures**. 2nd. ed. New York, US. 1992. 461 p.

_____. **Guidelines for consequence analysis of chemical releases**. New York, US. 1999. 324 p.

_____. **Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis**. 2nd ed., New York, US. 2000. 756p.

ALE, B. J. M. Tolerable or acceptable: a comparison of risk regulation in the United Kingdom and in the Netherlands. **Risk Analysis**, v.25, n.2, p. 231-241, 2005.

ANTONIONI, G.; SPADONI, G.; COZZANI, V. A methodology for the quantitative risk assessment of major accidents triggered by seismic events. **Journal of Hazardous Materials**, v.147, p. 48-59, 2007.

ANTONIONI, G. et al. Development of a framework for the risk assessment of Na-tech accidental events. **Reliability Engineering and System Safety**, v.94, p. 1442-1450, 2009.

ANTONIONI, G. et al. Quantitative assessment of risk due to NaTech scenarios caused by floods. **Reliability Engineering and System Safety**, v.142, p. 334-345, 2015.

BARBOSA, J. P. M. **Avaliação de técnicas empíricas e estatísticas de identificação de extremos de precipitação para o litoral paulista e entorno**. 2008. 113 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2008.

BARPI. **ARIA Database**. [S.l.], 2017. Disponível em <<https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/le-barpi/>>. Acesso em: 03 nov. 2017.

BEN AISSIA, M. A. et al. Dependence evolution of hydrological characteristics, applied to floods in a climate change context in Quebec. **Journal of Hydrology**, v.519, p. 148-163, 2014.

BLÖSCHL, G.; SIVAPALAN, M. Scale Issues in Hydrological Modelling: A Review. **Hydrological Processes**, v.9, p. 251-290, 1995.

BOOT, H. Quantifying safety with a QRA: to agree on the results, the method should be explicit. **Chemical Engineering Transactions**, v.31, 2013.

BOSCH, C. J. H.van der. et al. **Methods for the determination of possible damage: to people and objects resulting from releases of hazardous materials – ‘Green Book’**. The Hague, NL: TNO, 1992. CPR 16E.

BOSCH, C. J. H.van der; WETERINGS, R. A. P. M. (Ed.). **Methods for the calculation of physical effects: due to releases of hazardous materials (liquids and gases) – ‘Yellow Book’**. 3rd ed. 2nd rev. print. The Hague, NL: Ministerie van Verkeer en Waterstaat; TNO, 2005. (Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen, 2). CPR 14E. Disponível em: <<http://content.publicatiereeksgevaarlijkestoffen.nl/documents/PGS2/PGS2-1997-v0.1-physical-effects.pdf>>. Acesso em: 05 nov. 2017.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Sistema Integrado de Informações sobre Desastres – S2iD**. 2017. Disponível em: <<https://s2id-search.labtrans.ufsc.br/>>. Acesso em: 05 nov. 2017.

CABALLERO W. L.; RAHMAN, A. Development of regionalized joint probability approach to flood estimation: a case study for Eastern New South Wales, Australia. **Hydrological Processes**, v.28, p. 4001-4010, 2014.

CAMPEDEL, M. **Analysis of Major Industrial Accidents Triggered by Natural Events Reported In the Principal Available Chemical Accident Databases**. EUR 23391 EN – 2008. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2008.

CETESB. **Manual de orientação para a elaboração de estudos de análise de riscos**. Norma P4.261. São Paulo, 2003. 120 p. Disponível na biblioteca da Cetesb.

CETESB. **Risco de acidente de origem tecnológica – método para decisão e termos de referência**. Norma P4.261. São Paulo, 2014. 140 p. Disponível em: <<http://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/normas/11/2013/11/P4261.pdf>>. Acesso em: 05 nov. 2017.

CETESB. **Sistema de Informações sobre Emergências Químicas**. 2017. Disponível em: <<http://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/emergencia/relatorio.php>>. Acesso em: 15 jul. 2017.

CHARVET, C. et al. Learning from the application of nuclear probabilistic safety assessment to the chemical industry. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v.24, p. 242-248, 2011.

CHINA. Planning Department. **Miscellaneous planning standards and guidelines**. In: _____. Hong Kong planning standards and guidelines. Hong Kong, 2008. Chap. 12. Disponível em: <http://www.pland.gov.hk/pland_en/tech_doc/hkpsg/full/ch12/pdf/ch12.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2017.

CHOU, S. C. et al. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. **Climate Dynamics**, v.38, p. 635-653, 2012.

CHOU, S. C. et al. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, v.3, p.438-454, 2014a.

CHOU, S. C. et al. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, v.3, p.512-525, 2014b.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2013.

COMISSÃO ESPECIAL PARA RESTAURAÇÃO DA SERRA DO MAR NA REGIÃO DE CUBATÃO. **Plano de Ações de Emergência 1985/1986: Relatório de Situação**. São Paulo, 1986. Cópia impressa disponível na biblioteca da CETESB.

CONCAWE. **CONCAWE Report n° 7/17: Performance of European cross-country oil pipelines**. Statistical summary of reported incidents in 2015 and since 1971. Brussels, 2017. Disponível em: <https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/2017/07/Rpt_17-7.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2017.

COZZANI, V. et al. Industrial accidents triggered by flood events: Analysis of past accidents. **Journal of Hazardous Materials**, v.175, p. 501-509, 2010.

COZZANI, V. et al. Quantitative assessment of domino and NaTech scenarios in complex industrial areas. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, p. 1-13, 2013.

CRUZ, A. M. et al. **State of the Art in Natech Risk Management** (Natech: Natural Hazard Triggering a Technological Disaster). EUR 21292 EN. Italy: European Communities, 2004.

CRUZ, A. M.; KRAUSMANN, E. Vulnerability of the oil and gás sector to climate change and extreme weather events. **Climatic Change**, v.121, p. 41, 2013.

D'AGOSTINO, R. B.; STEPHENS, M. **Goodness-of-fit Techniques**. New York: Marcel Dekker, 1986 *apud* NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. de A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007, 552p.

EGIG. **Gas pipeline incidents: 9th report of the European Gas Pipeline Incident Data Group** (period 1970 – 2013). Groningen, 2015. 61 p. (Doc. Number EGIG 14.R.0403; February 2015). Disponível em: <<https://www.egig.eu/uploads/bestanden/ba6dfd62-4044-4a4d-933c-07bf56b82383>>. Acesso em: 05 nov. 2017.

EUROPEAN COMMISSION. **EMARS – Major accident reporting system**. 2017. Disponível em <<https://minerva.jrc.ec.europa.eu/en/emars/content/>>. Acesso em: 03 nov. 2017.

FARMER, H. C. Reactor Safety and Siting: A Proposed Risk Criterion. **Nuclear Safety**, v.8, n. 6, p. 539-548, 1967.

FOLHA DE SÃO PAULO. São Paulo: UOL, 1921-. Disponível em: <<http://acervo.folha.uol.com.br/>>. Acesso em: 05 nov. 2017.

GIRGIN, S.; KRAUSMANN, E. Historical analysis of U. S. onshore hazardous liquid pipeline accidents triggered by natural hazards. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v.40, p. 578-590, 2016.

GUHA-SAPIR, D.; HOYOIS, Ph.; BELOW, R. **Annual Disaster Statistical Review 2015: The Numbers and Trends**. Brussels:CRED; 2016. Disponível em: <http://cred.be/sites/default/files/ADSR_2015.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2017.

GUHA-SAPIR, D. **EM-DAT: The Emergency Events Database**. Université Catholique de Louvain (UCL) - CRED, Brussels, 2017. Disponível em: <<http://www.emdat.be/>>. Acesso em: 05 nov. 2017.

GUL, O. G. et al. Nonstationarity in flood time series. **Journal of Hydrologic Engineering**, v.19, p. 1349-1360, 2014.

HAN, L. et al. Changing properties of precipitation extremes in the urban areas, Yangtze River Delta, China, during 1957-2013. **Natural Hazards**, v.79, p. 437-454, 2015.

HSE. **Reducing risks, protecting people: HSE's decision-making process**. Crown, 2001. Disponível em: <<http://www.hse.gov.uk/risk/theory/r2p2.pdf>>. Acesso em: 05 nov. 2017.

HSE. **Societal risk: Initial briefing to Societal Risk Technical Advisory Group**. Research report RR703. Crown, 2009. Disponível em: <<http://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr703.pdf>>. Acesso em: 05 nov. 2017.

IBGE. **Pesquisa industrial 2015**. Rio de Janeiro: IBGE, v. 34, n. 1 (empresa), 2017. 74 p. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/1719/pia_2015_v34_n1_empresa.pdf>. Acesso em 06 nov. 2017.

IPCC. **Climate Change 2007: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Core Writing Team, Pachauri, R. K. and Reisinger, A. (eds.)]. Geneva: IPCC, 2008, 104 p. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_full_report.pdf>. Acesso em 03 nov. 2017.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)]. Geneva: IPCC, 2015, 151 p. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf>. Acesso em 05 nov. 2017.

JENNINGS, M. E.; BENSON, M. A. Frequency curves for annual flood series with some zero events or incomplete data. **Water Resources Research**, vol. 5, n. 1, pp. 276-280, 1969.

JONES, D. A. (Ed.). **Nomenclature for hazard and risk assessment in the process industries**. 2nd ed. Rugby, UK: IChemE, 1992. 43 p. Reprint 1994.

KADAK, A. C.; MATSUO, T. The nuclear industry's transition to risk-informed regulation and operation in the United States. **Reliability Engineering and System Safety**, v.92, p. 609-

618, 2007.

KENDALL, M. **Rank Correlation Methods**. 4th ed. 2nd impression. London: Charles Griffin, 1975. 202 p.

KIREMIDJIAN, A. et al. **Seismic to Major Industrial Facilities**. Report nº 72. Department of Civil and Environmental Engineering. California, USA: Stanford University, 1985.

KITE, G. W. **Frequency and risk analyses in hidrology**. 2nd printing. Michigan, USA: Water Resources Publications, 1978.

KRAUSMANN, E. et al. Industrial accidents triggered by natural hazards: an emerging risk issue. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v.11, p. 921-929, 2011.

KRAUSMANN, E; BARANZINI, D. Natech risk reduction in the European Union. **Journal of Risk Research**, v.15, n.8, p. 1027-1047, 2012.

KRAUSMANN, E.; CRUZ, A. M. **Results of the Workshop: Assessing and Managing Natechs (Natural-hazard triggered technological accidents)**. EUR 23288 EN. Luxembourg: European Communities, 2008.

LANDUCCI, G. et al. Release of hazardous substances in flood events: Damage model for atmospheric storage tanks. **Reliability Engineering and System Safety**, v.106, p. 200-216, 2012.

LANDUCCI, G. et al. Damage models for storage and process equipment involved in flooding events. **Chemical Engineering Transactions**, v.31, p. 697-702, 2013.

LENOBLE, C.; DURAND, C. Introduction of frequency in France following de AZF accident. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v.24, p. 227-236, 2011.

LYRA, A. et al. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. **Theoretical and Applied Climatology**, DOI 10.1007/s00704-017-2067-z, 2017.

MADSEN, H. et al. (Editores). **A review of applied methods in Europe for flood-frequency analysis in a changing environment**. Centre for Ecology & Hydrology, 2013. Disponível em: <http://www.cost-floodfreq.eu/attachments/article/112/Cost%20Flood%20report_April2013_FINAL.pdf>. Acesso em 05 nov. 2017.

MAIONE, U.; MOISELLO, U. **Elementi di Statistica per l'Idrologia**. Pavia (Itália): La Goliardica Pavese, 2003 *apud* NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. de A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007, 552p.

MARENGO, J. A. et al. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. **Climate Dynamics**, v. 38, n. 9-10, p. 1829-1848, 2011.

MATALAS, N. C. Probability Distribution of Low Flows. Geological Survey Professional Paper 434-A. **Geological Survey**. Washington: United States Government, 1963. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/pp/0434a/report.pdf>>. Acesso em: 25 set. 2016.

MERZ, R; BLÖSCHL, G. Regionalisation of catchment model parameters. **Journal of Hydrology**, v.287, p. 95-123, 2004.

MILAZZO, M. F. et al. Potential loading damage to industrial storage tanks due to volcanic ash fallout. **Natural Hazards**, v.66, p. 939-953, 2013.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. Tradução e revisão técnica de Verônica Calado. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 496 p.

NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. de A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007, 552p.

NAIME, A. L. F. **Managing exposure to pipeline's risks. Improving Brazil's risk-based regulatory process**. 2010. 220 p. Tese (Doctor of Philosophy in Geography) – University of Waterloo, Canada. Disponível em: <https://uwspace.uwaterloo.ca/bitstream/handle/10012/5296/Naime_Andre.pdf?sequence=1>. Acesso em: 05 nov. 2017.

OECD. **OECD Studies in Risk Management. Italy. Industrial Hazards Triggered by Floods**. OECD Publications: Paris, 2006.

O ESTADO DE S. PAULO. São Paulo: Grupo Estado, 1875-. Disponível em: <<http://acervo.estadao.com.br/>>. Acesso em: 05 nov. 2017.

PASMAN, H.; RENIERS, G. Past, present and future of Quantitative Risk Assessment (QRA) and the incentive it obtained from Land-Use Planning (LUP). **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v.28, p. 2-9, 2014.

PETROVA, E. G. Natural factors of technological accidents: the case or Russia. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v.11, p. 2227-2234, 2011.

POFFO, I. R. F. **Vazamentos de óleo no Litoral Norte do estado de São Paulo: análise histórica (1974 a 1999)**. 2000. 175 p. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo.

RASMUSSEN, K. Natural events and accidents with hazardous materials. **Journal of Hazardous Materials**, v.40, p. 43-54, 1995.

RIVM. **Reference manual bevi risk assessments**. Version 3.2. Bilthoven, 2009. 189 p. Translation of the: Handleiding Risicoberekeningen Bevi. Versie 3.2. Disponível em: <http://www.rivm.nl/Documenten_en_publicaties/Professioneel_Praktisch/Richtlijnen/Milieu_Leefomgeving/Omgevingsveiligheid/Handleiding_Risicoberekeningen_Bevi/Download/Reference_Manual_Bevi_Risk_Assessments_version_3_2.org>. Acesso em: 06 nov. 2017.

ROSS, S. M. **Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists**. Third edition. Elsevier, Burlington, USA: Elsevier, 2004, 624p.

SANTELLA, N.; STEINBERG, L. J.; AGUIRRA, G. A. Empirical estimation of the conditional probability of natech events within the United States. **Risk Analysis**, v.31, n.6, p. 951-968, 2011.

SÃO PAULO. Governo do Estado de São Paulo. **Sistema Integrado de Defesa Civil – SIDEC**. 2017a. Disponível em: <<http://www.sidec.sp.gov.br/producao/>>. Acesso em: 06 nov. 2017.

SÃO PAULO. Secretaria do Meio Ambiente. **Sub-bacias hidrográficas do Estado de São Paulo**. 2017b. Disponível em: <<http://datageo.ambiente.sp.gov.br/app/?ctx=DATAGEO>>. Acesso em: 06 nov. 2017.

SÃO PAULO (Estado). Departamento de Águas e Energia Elétrica. **Banco de Dados Hidrológicos**. 2017c. Disponível em: <<http://www.hidrologia.dae.sp.gov.br>>. Acesso em: 05 nov. 2017.

SENGUL, H et al. Analysis of hazardous material releases due to natural hazards in the United States. **Disasters** v.36, n.4, p. 723-743, 2012.

SCHULLER, J. C. H. et al. **Methods for determining and processing probabilities** – ‘Red Book’. 2nd ed. 2nd rev. print. The Hague, NL: Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties; TNO, 2005. (Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen). CPR 14E. Disponível em: <<http://content.publicatiereeksgevaarlijkestoffen.nl/documents/PGS4/PGS4-1997-v0.1-probabilities.pdf>>. Acesso em: 05 nov. 2017.

SHOWALTER, P.S.; MYERS, M.F. Natural Disasters as the Cause of Technological Emergencies: a Review of the Decade 1980-1989. Working paper 78. **Natural Hazards Research and Applications Information Center**. Institute of Behavioral Science. University of Colorado, 1992.

SHOWALTER, P. S.; MYERS, M. F. Natural Disasters in the United States as Release Agents of Oil, Chemicals, or Radiological Materials Between 1980-1989: Analysis and Recommendations. **Risk Analysis**, v.14, n.2, p. 169-182, 1994.

SHIH, C-F. **Failure of Liquid Storage Tanks due to Earthquake Excitation**. EERL 81-04. Doctor of Philosophy Thesis. Pasadena: California Institute of Technology, 1981.

SOONG, T. T. **Fundamentals of Probability and Statistics for Engineers**. USA: Wiley, 2004, 391p.

STALLEN, P. J. M.; GEERTS, R.; VRIJLING, H K. Three conceptions of quantified societal risk. **Risk Analysis**, v.16, n.5, p. 635-644, 1996.

STEINBERG, J. L.; SENGUL, H.; CRUZ, A. M. Natech risk and management: an assessment of the state of the art. **Natural Hazards**, v.46, p. 143, 2008.

STURGES, H. A. The Choice of a Class Interval. **Journal of the American Statistical Association**, v.216, n.153, p. 65-66, 1926.

THIESSEN, A. H. Precipitation averages for large areas. **Monthly Weather Review**, v.39, p.

1082-1084, 1911. Disponível em:

<<ftp://ftp.library.noaa.gov/docs.lib/htdocs/rescue/mwr/039/mwr-039-07-1082b.pdf>>. Acesso em: 05 nov. 2017.

UIJT de HAAG, P. A. M.; ALE, B. J. M. **Guidelines for quantitative risk assessment – ‘Purple Book’**. CPR 18E. 1999. Disponível em:

<<http://content.publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/documents/PGS3/PGS3-1999-v0.1-quantitative-risk-assessment.pdf>>. Acesso em: 05 nov. 2017.

UNIÃO EUROPEIA. **Directiva 2012/18/EU do Parlamento Europeu e do Conselho**. [relativa ao controlo dos perigos associados a acidentes graves que envolvem substâncias perigosas, que altera e subsequentemente revoga a Diretiva 96/82/CE do Conselho].

Estrasburgo, 2012. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0018&from=EN>>.

Acesso em: 03 nov. 2017.

UFSC. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. **Atlas brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2012 - Volume São Paulo/ Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres**. 2. ed. rev. ampl. Florianópolis: CEPED UFSC, 2013. 142 p. Disponível em: <<https://s2id.mi.gov.br/paginas/atlas/>>. Acesso em 05 nov. 2017.

UFSC. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. **Relatório de danos materiais e prejuízos decorrentes de desastres naturais no Brasil: 1995 a 2014 / Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres; Banco Mundial [Organização Rafael Schadeck]** - Florianópolis: CEPED UFSC, 2016. 230 p. Disponível em:

<<http://www.ceped.ufsc.br/relatorio-de-danos-materiais-e-prejuizos-decorrentes-de-desastres-naturais-no-brasil-1995-2014/>>. Acesso em 06 nov. 2017.

XAVIER, J. C. de M.; MINNITI, V. M. M. Avaliação quantitativa de risco na gestão do risco tecnológico em São Paulo: uma perspectiva histórica a partir do olhar do Órgão Ambiental. **Congresso ABRISCO 2017**. Associação Brasileira de Análise de Risco, Segurança de Processos e Confiabilidade (ABRISCO). 2017.

XAVIER, J. C. de M.; SOUSA JUNIOR, W. C. de. Recognising Na-tech Events in Brazil: Moving Forward. **Natural Hazards (Dordrecht)**, v.82, p. 493, 2016.

YUE, S. et al. The Gumbel mixed model for flood frequency analysis. **Journal of Hydrology**, v.226, p. 88-100, 1999.

ZHANG, Q. et al. Flood frequency analysis with consideration of hydrological alterations: Changing properties, causes and implications. **Journal of Hydrology**, v.519, p. 803-813, 2014.

APÊNDICE A – Extrato dos registros de ocorrências 1940 – 2015

(continua)

Data	Na-tech	Localização		Município	Descrição
		UTM-N	UTM-E		
19810206				Santos, São Vicente, Peruíbe	Forte chuva.
19810317				Pedro de Toledo Santos, Cubatão	Chuva intensas, alagamentos e escorregamentos e alguns morros. Forte chuva desde a manhã de terça-feira, 17.
19811015				Santos, Guarujá	Pouco antes de 14h de ontem a chuva forte caiu sobre a Baixada Santista. Técnicos do Ministério da Agricultura estimam as chuvas de ontem em 80mm. Em Guarujá houve alagamentos nos bairros periféricos.
19811202				Santos	Forte chuva.
19820626				Santos Santos, São Vicente, Bertiooga	Forte chuva. Forte chuva de ontem.
19830201	CUB 15	7361874	358913	Cubatão, Santos, São Vicente, Itanhaém	Devido à forte chuva (98,2mm entre 3h e 15h), o volume da água do rio Piaçaguera retido sob o pontilhão da rodovia Piaçaguera-Guarujá provocou a inundação das suas duas pistas, entre a Copebrás e a estrada Plínio de Queiroz. Em decorrência, a Solorríco paralisou as atividades de produção de fertilizantes devido ao transbordamento do rio Piaçaguera. Os prejuízos chegaram a milhares de cruzeiros e a diretoria da empresa prometeu mover uma ação de perdas contra o DER. As chuvas caíram com mais intensidade a partir da 4h. Às 5h, as águas chegaram a meio metro na área industrial e administrativa, inundando os setores de estocagem de matéria-prima e de produção, obrigando-a a paralisar a produção de fertilizantes. Toneladas de uréia e de sulfato foram perdidas. As caixas de água potável foram contaminadas. A água também ilhou a Gespa e a Copebrás, sem parar a produção das mesmas. As águas chegaram a 1,5m na Rua 12, Vila Parisi, junto a Adubos Trevo. Em Vila Parisi, 183 pessoas foram retiradas das suas casas. Em Vila Socó, uma rocha destruiu dois barracos. O índice pluviométrico acumulado nos últimos três dias é de 336,2mm.
19830307				São Sebastião	Forte chuva, principalmente na parte sul do município.
19830307				Peruíbe	Forte chuva desde o último sábado, 05. 500 desabrigados.

APÊNDICE A

(continuação)

Data	Na-tech	Localização		Município	Descrição
		UTM-N	UTM-E		
19830611				São Sebastião	Chuvas ocorrem há quase um mês e bloqueiam estrada.
19840208				Pedro de Toledo, Itariri	Forte chuva, sem índices.
19840310				Cubatão	Notícia discute possíveis efeitos de fortes chuvas em dutos e instalações industriais. Reporta-se à chuva de 1975, quando as encostas ainda eram cobertas por vegetação. As fábricas da Copebras e Fertilizantes União foram inundadas por lama. Parcialmente, a Ultrafértil, a IAP e a COSIPA. Também se fala que a represa Billings transbordou pelo menos uma vez, em 1971. Sem uma única gota de chuva em Cubatão, os rios Cubatão, Perequê, Mogi e Piaçaguera subiram de volume. Houve inundação, três pessoas morreram em Vila Socó. Oficiosamente, mais de 20. Consta que alguém abriu inadvertidamente as comportas da represa, cujos canais drenam para esses rios.
		7361961	358336	Cubatão, Santos, Bertioga	Forte chuva na madrugada de ontem e durante o dia. 4000 pessoas da Vila Parisi foram removidas. Em Santos, a precipitação alcançou 110mm entre 18h de terça e 15h de ontem, quarta-feira. Rios Mogi e Piaçaguera transbordaram. Diversas indústrias interromperam atividades, entre elas Cimento Santa Rita e Adubos Trevo, que foram muito afetadas.
19850123	suspeito	7361348	358654	Cubatão	Fortes chuvas. Cubatão com 4000 desabrigados. Vila Parisi a mais afetada. IAP, próxima a Vila Parisi, teve seus escritórios inundados. A Ultrafértil teve problemas de comunicação entre as duas unidades. A inundação na IAP, promovida pelo transbordamento do rio Mogi, que passa atrás da empresa, afetou o sistema de captação de água para refrigeração da produção de ácido sulfúrico e fertilizantes granulosos. Não há menção a na-tech, embora a notícia fale que houve montagem de barricadas para que os galpões com adubo não fossem afetados.
		7362070	359646	Cubatão	Forte chuva. Pelo menos 110mm que caíram desde anteontem e provocaram o transbordamento dos rios Mogi, Perequê e Piaçaguera. Cerca de 2500 desabrigados. Adubos Trevo, IAP, Cimento Santa Rita e Fertilizantes União, entre outras, foram afetadas no seu funcionamento.
		7362931	359612	Cubatão, São Sebastião, Ubatuba	Notícia de acompanhamento de forte chuva dos últimos dias.
		7361951	358860		

APÊNDICE A

(conclusão)

Data	Na-tech	Localização		Município	Descrição
		UTM-N	UTM-E		
19850125	CUB 01	7361270	356682	Cubatão	Rompimento de duto de três polegadas que transportava amônia entre as unidades Jardim São Marcos e Fafer da Ultrafértil, atuais Vale Fertilizantes unidade 2 e Vale Fertilizantes unidade 1, respectivamente. Vazamento de 15t em aproximadamente três horas devido à movimentação do solo decorrente das últimas chuvas. Ocorreu às 23h:45min, na altura do km 60 da rodovia Piaçaguera-Guarujá, no denominado Setor 8.
19850128				Ubatuba, Caraguatatuba, Ilha Bela, São Sebastião	Forte chuva, sem índices.
19850506				Cubatão	Notícia repercute o rompimento do duto da Ultrafértil, com vazamento de 15t em 26 de janeiro de 1985. A razão foi a movimentação de solo na Serra do Mar.
19851227				Cubatão	Forte chuva e notícia sobre o funcionamento adequado das barreiras junto à RPBC.
19860120				Santos, Guarujá, Litoral Sul	Notícia fala de chuva forte que aconteceu a partir das 23h de anteontem.

APÊNDICE B

(continuação)

Empresa	UTM-N	UTM-E	Presença no município														
			1940-1945	1946-1950	1951-1955	1956-1960	1961-1965	1966-1970	1971-1975	1976-1980	1981-1985	1986-1990	1991-1995	1996-2000	2001-2005	2006-2010	2011-2015
Costa Muniz Com. e Ind. S. A. (ou Curtume Domingos da Costa Moniz)	7356305	354327	x	x	x	x	x	x	x	x	x	1981					
Engelcor Indústria Química S. A. (incorporada pela Produquímica)	7359470	356312								1971	x	x	x	x	x	x	2006
Fertilizantes União S. A. (incorporada pela Solorríco)	7361874	358913								1972	x	1981					
Gesso Paulista S. A. - Gespa (incorporada pela COPEBRAS)	7362229	358374									1976	x	x	x	x	2002	
Hidromar Indústria Química Ltda. (Jd. S. Marcos)	7362897	359855								1974	x	x	x	x	x	2002	
Hidromar Indústria Química Ltda. (Perequê)	7359570	356000												2000	x	x	x
IAP S. A. (incorporada pela Serrana e Bunge)	7362054	359351								1975	x	x	x	x	x	x	2009
IFC Indústria de Fertilizantes Cubatão S. A. (ex - Adubos Trevo)	7361200	358200												1997	x	x	2014
Linde Gases Ltda. (ex - Aga)	7360332	356164														2006	x
Líquid Carbonic Indústrias S. A. (incorporada pela White Martins unidade I)	7362345	358523								1971	x	x	x	x	x	2002	
Liquid Química S. A.	7362259	358581								1972	x	x	x	x	x	2004	
Manah S. A. (incorporada pela Yara)	7362553	359790								1976	x	x	x	x	x	x	2013
Petrobras Distribuidora S. A. (TECUB)	7357388	354016								1974	x	x	x	x	x	x	x
Petrobras Transporte S. A. - Transpetro (Terminal de Cubatão)	7357676	352436			1951	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Petrocoque S. A. Indústria e Comércio	7359592	355114								1975	x	x	x	x	x	x	x

APÊNDICE B

(conclusão)

Empresa	UTM-N	UTM-E	Presença no município														
			1940-1945	1946-1950	1951-1955	1956-1960	1961-1965	1966-1970	1971-1975	1976-1980	1981-1985	1986-1990	1991-1995	1996-2000	2001-2005	2006-2010	2011-2015
Petróleo Brasileiro S. A. – Petrobras (RPBC)	7359213	354505			1955	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Produquímica Indústria e Comércio S. A. (ex-Engeclor)	7359470	356312														2006	x
Rhodia Brasil Ltda. (ex - Clorogil)	7359557	356126								1976	x	x	1993				
Solorrco S. A. Indústria e Comércio (ex-Fertilizantes União)	7361874	358913									1981	x	x	x	x	2009	
Ultrafertil S. A. (Terminal marítimo - TUF)	7358602	360793						1969	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Union Carbide do Brasil S. A. (incorporada pela Braskem)	7360857	356071				1958	x	x	x	x	x	x	x	2000			
Vale Fertilizantes S. A. unidade 1 (ex-Ultrafertil)	7358792	353553				1956	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Vale Fertilizantes S.A. unidade 2 (Jardim São Marcos) (ex-Ultrafertil)	7362931	359612						1970	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Vale Fertilizantes S. A. unidade 3 (Jardim São Marcos) (ex - IAP, Bunge)	7362054	359351														2010	x
Vale Fertilizantes S. A. unidade 4 (ex - Solorrco, Mosaic, Cargill)	7361874	358913														2010	x
Votorantim Cimentos S. A. (ex - Cimento Santa Rita)	7361961	358336										1986	x	x	x	x	x
White Martins Gases Industriais Ltda. (Unidade I) (ex - Liquid Carbonic)	7362345	358523													2003	x	x
White Martins Gases Industriais Ltda. (Unidade II)	7362917	359041															2011
Yara Brasil Fertilizantes S. A. (ex - Manah)	7362553	359790															2013

Legenda: O destaque em cores indica e associa a mudança de denominação da empresa. Ex.:(marrom) em 2013, Manah foi incorporada por Yara
 x indica operação durante o intervalo O ano indica início ou final da operação. Ex.: Rhodia encerrou sua operação em 1993

**APÊNDICE C – Comparação entre a função de distribuição acumulada empírica e funções
teóricas obtidas a partir de dados dos 14 postos de Cubatão e região**

(continua)

i	Empírica $F_N[x_{(i)}]$	E3-040			E3-042			E3-038			E3-101			E3-104		
		Gama $F_X[x_{(i)}]$	Weibull $F_X[x_{(i)}]$	Pearson tipo 3												
1	0,05	0,1357	0,0515	0,0505	0,1112	0,0361	0,1357	0,0808	0,0507	0,0838	0,0885	0,0497	0,0985	0,0853	0,0421	0,0918
2	0,10	0,1736	0,0997	0,0793	0,1446	0,0726	0,1423	0,1314	0,1085	0,1151	0,1423	0,1131	0,1271	0,1271	0,0882	0,1112
3	0,15	0,2005	0,1346	0,1003	0,1922	0,1334	0,1587	0,1894	0,1739	0,1587	0,1788	0,1558	0,1492	0,1762	0,1467	0,1423
4	0,20	0,2420	0,1883	0,1335	0,2327	0,1865	0,1762	0,2033	0,1899	0,1685	0,2236	0,2072	0,1814	0,2177	0,1956	0,1711
5	0,25	0,2709	0,2308	0,1635	0,2743	0,2422	0,2033	0,2776	0,2751	0,2358	0,2643	0,2581	0,2122	0,2546	0,2385	0,2005
6	0,30	0,3121	0,2830	0,2005	0,3156	0,2932	0,2296	0,3015	0,3002	0,2546	0,3015	0,2977	0,2451	0,3264	0,3201	0,2643
7	0,35	0,3446	0,3262	0,2358	0,3520	0,3408	0,2578	0,3783	0,3850	0,3300	0,3483	0,3527	0,2812	0,3336	0,3282	0,2709
8	0,40	0,3859	0,3802	0,2810	0,4207	0,4240	0,3192	0,3859	0,3916	0,3372	0,3897	0,3968	0,3300	0,3974	0,4012	0,3336
9	0,45	0,4325	0,4344	0,3300	0,4404	0,4432	0,3336	0,4522	0,4642	0,4090	0,4404	0,4511	0,3821	0,4207	0,4238	0,3557
10	0,50	0,4721	0,4835	0,3783	0,4840	0,4966	0,3821	0,4801	0,4910	0,4364	0,4761	0,4920	0,4207	0,4801	0,4898	0,4207
11	0,55	0,5239	0,5405	0,4404	0,5319	0,5480	0,4364	0,5199	0,5327	0,4801	0,5080	0,5230	0,4522	0,5398	0,5500	0,4840
12	0,60	0,5733	0,5970	0,5040	0,5793	0,5966	0,4880	0,5793	0,5905	0,5438	0,5596	0,5749	0,5120	0,5910	0,6046	0,5478
13	0,65	0,6255	0,6487	0,5675	0,6255	0,6448	0,5478	0,6443	0,6560	0,6217	0,6103	0,6261	0,5714	0,6591	0,6723	0,6293
14	0,70	0,6772	0,6999	0,6368	0,6736	0,6944	0,6141	0,6985	0,7095	0,6844	0,6591	0,6732	0,6255	0,7054	0,7164	0,6844
15	0,75	0,7357	0,7559	0,7123	0,7291	0,7474	0,6844	0,7389	0,7480	0,7291	0,7190	0,7322	0,6985	0,7357	0,7462	0,7190
16	0,80	0,7823	0,8007	0,7734	0,7852	0,7986	0,7611	0,7995	0,8055	0,7995	0,7764	0,7875	0,7704	0,7881	0,7943	0,7823
17	0,85	0,8389	0,8525	0,8438	0,8413	0,8509	0,8413	0,8554	0,8577	0,8599	0,8365	0,8417	0,8389	0,8438	0,8476	0,8485
18	0,90	0,8997	0,9056	0,9147	0,8980	0,9017	0,9131	0,9099	0,9102	0,9207	0,8980	0,8990	0,9082	0,9049	0,9047	0,9147
19	0,95	0,9554	0,9534	0,9706	0,9545	0,9526	0,9732	0,9726	0,9709	0,9812	0,9573	0,9550	0,9686	0,9515	0,9497	0,9649
20	1,00	0,9999	1,0000	0,9999	0,9999	0,9998	0,9999	0,9999	1,0000	0,9999	0,9999	1,0000	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999

APÊNDICE C

(continuação)

i	Empírica $F_N[x_{(i)}]$	E3-143			E3-144			E3-153			E3-236			E3-043		
		Gama	Weibull $F_X[x_{(i)}]$	Pearson tipo 3												
1	0,05	0,1112	0,0668	0,1210	0,0968	0,0549	0,1056	0,1075	0,0567	0,1230	0,1271	0,0616	0,1423	0,0708	0,0358	0,0721
2	0,10	0,1469	0,1093	0,1357	0,1379	0,1025	0,1251	0,1446	0,1021	0,1379	0,1562	0,0963	0,1492	0,1038	0,0717	0,0918
3	0,15	0,1814	0,1529	0,1587	0,1711	0,1418	0,1446	0,1814	0,1470	0,1562	0,1867	0,1370	0,1611	0,1515	0,1246	0,1230
4	0,20	0,2177	0,1974	0,1788	0,2177	0,2001	0,1788	0,2177	0,1919	0,1788	0,2119	0,1707	0,1736	0,2033	0,1829	0,1635
5	0,25	0,2514	0,2363	0,2033	0,2546	0,2430	0,2061	0,2546	0,2368	0,2033	0,2483	0,2178	0,1949	0,2514	0,2393	0,2061
6	0,30	0,2843	0,2766	0,2296	0,2946	0,2874	0,2389	0,2912	0,2812	0,2296	0,2912	0,2721	0,2236	0,3085	0,3035	0,2611
7	0,35	0,3228	0,3224	0,2611	0,3372	0,3378	0,2776	0,3336	0,3296	0,2643	0,3300	0,3177	0,2483	0,3707	0,3677	0,3192
8	0,40	0,3669	0,3714	0,3015	0,3783	0,3822	0,3156	0,3707	0,3759	0,2981	0,3783	0,3777	0,2912	0,4286	0,4308	0,3783
9	0,45	0,4129	0,4218	0,3446	0,4207	0,4303	0,3594	0,4168	0,4270	0,3446	0,4207	0,4278	0,3300	0,4602	0,4640	0,4129
10	0,50	0,4562	0,4723	0,3897	0,4761	0,4871	0,4129	0,4641	0,4802	0,3936	0,4681	0,4816	0,3745	0,5040	0,5093	0,4602
11	0,55	0,5080	0,5270	0,4483	0,5199	0,5330	0,4641	0,5120	0,5284	0,4404	0,5160	0,5359	0,4286	0,5596	0,5648	0,5199
12	0,60	0,5636	0,5806	0,5040	0,5557	0,5707	0,5040	0,5557	0,5767	0,4920	0,5675	0,5912	0,4880	0,6103	0,6191	0,5832
13	0,65	0,6179	0,6373	0,5714	0,6103	0,6278	0,5675	0,6141	0,6358	0,5636	0,6255	0,6486	0,5596	0,6406	0,6471	0,6141
14	0,70	0,6700	0,6886	0,6331	0,6700	0,6865	0,6406	0,6700	0,6897	0,6293	0,6772	0,6994	0,6217	0,6879	0,6960	0,6736
15	0,75	0,7291	0,7442	0,7054	0,7422	0,7551	0,7257	0,7257	0,7434	0,6985	0,7642	0,7803	0,7357	0,7422	0,7478	0,7324
16	0,80	0,7852	0,7977	0,7764	0,7910	0,8001	0,7852	0,7823	0,7949	0,7673	0,7881	0,8024	0,7673	0,7881	0,7909	0,7852
17	0,85	0,8413	0,8503	0,8461	0,8461	0,8520	0,8508	0,8413	0,8507	0,8438	0,8389	0,8495	0,8365	0,8389	0,8405	0,8438
18	0,90	0,9015	0,9038	0,9131	0,9049	0,9058	0,9162	0,8997	0,9028	0,9115	0,8997	0,9034	0,9115	0,8925	0,8930	0,9032
19	0,95	0,9554	0,9539	0,9693	0,9564	0,9542	0,9686	0,9564	0,9545	0,9706	0,9535	0,9516	0,9699	0,9474	0,9459	0,9582
20	1,00	0,9999	1,0000	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	1,0000	0,9999

APÊNDICE C

(conclusão)

i	Empírica $F_M[x_{(i)}]$	E3-070			E3-041			E3-056			E3-228		
		Gama	Weibull	Pearson tipo 3									
		$F_X[x_{(i)}]$	$F_X[x_{(i)}]$		$F_X[x_{(i)}]$	$F_X[x_{(i)}]$		$F_X[x_{(i)}]$	$F_X[x_{(i)}]$		$F_X[x_{(i)}]$	$F_X[x_{(i)}]$	
1	0,05	0,1170	0,0468	0,1357	0,1075	0,0472	0,1170	0,1093	0,0525	0,1190	0,1020	0,0564	0,1112
2	0,10	0,1401	0,0732	0,1423	0,1423	0,0879	0,1292	0,1379	0,0846	0,1271	0,1423	0,1040	0,1292
3	0,15	0,1711	0,1137	0,1587	0,1685	0,1202	0,1401	0,1685	0,1233	0,1423	0,1736	0,1429	0,1469
4	0,20	0,2090	0,1608	0,1685	0,2177	0,1806	0,1660	0,2119	0,1756	0,1660	0,2090	0,1849	0,1711
5	0,25	0,2546	0,2220	0,1949	0,2611	0,2359	0,1949	0,2514	0,2271	0,1922	0,2451	0,2288	0,1977
6	0,30	0,2946	0,2715	0,2206	0,3050	0,2878	0,2266	0,2946	0,2778	0,2236	0,2877	0,2797	0,2296
7	0,35	0,3336	0,3212	0,2483	0,3520	0,3459	0,2676	0,3446	0,3386	0,2643	0,3300	0,3294	0,2676
8	0,40	0,3783	0,3767	0,2877	0,3974	0,3952	0,3085	0,3974	0,3995	0,3156	0,3745	0,3778	0,3085
9	0,45	0,4286	0,4342	0,3336	0,4443	0,4512	0,3557	0,4483	0,4548	0,3632	0,4267	0,4324	0,3557
10	0,50	0,4761	0,4870	0,3783	0,4960	0,5044	0,4090	0,5000	0,5122	0,4207	0,4721	0,4832	0,4052
11	0,55	0,5279	0,5427	0,4364	0,5319	0,5450	0,4522	0,5478	0,5634	0,4761	0,5199	0,5362	0,4602
12	0,60	0,5733	0,5951	0,4920	0,5832	0,5990	0,5160	0,5832	0,5973	0,5160	0,5714	0,5867	0,5160
13	0,65	0,6293	0,6510	0,5596	0,6368	0,6523	0,5793	0,6331	0,6506	0,5793	0,6406	0,6403	0,5793
14	0,70	0,6844	0,7057	0,6331	0,6950	0,7078	0,6517	0,6844	0,6996	0,6406	0,6772	0,6919	0,6406
15	0,75	0,7489	0,7578	0,7054	0,7454	0,7571	0,7190	0,7422	0,7542	0,7157	0,7324	0,7464	0,7123
16	0,80	0,7939	0,8068	0,7764	0,7967	0,8060	0,7852	0,7881	0,7976	0,7734	0,7910	0,8014	0,7852
17	0,85	0,8461	0,8543	0,8461	0,8485	0,8546	0,8531	0,8461	0,8514	0,8485	0,8485	0,8539	0,8531
18	0,90	0,8997	0,9031	0,9147	0,9015	0,9027	0,9162	0,8962	0,8974	0,9082	0,9015	0,9038	0,9147
19	0,95	0,9545	0,9519	0,9713	0,9535	0,9505	0,9699	0,9525	0,9501	0,9686	0,9335	0,9520	0,9671
20	1,00	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	1,0000	0,9999	0,9999	1,0000	0,9999

Legenda: i quantil $F^O[X_{(i)}]$ função empírica de probabilidade acumulada $F(x_{(i)})$ função teórica de probabilidade acumulada
E3-XXX Posto pluviométrico E3-XXX Destaque em verde (vermelho) representa o melhor (pior) ajuste no quantil i

APÊNDICE D – Comparação entre a função de distribuição acumulada empírica e funções teóricas obtidas a partir de dados regionalizados de precipitação de Cubatão

i	Distribuição Empírica $F_N[x_{(i)}]$	Distribuição teórica		
		Gama	Weibull	Pearson tipo 3
		$F_X[x_{(i)}]$		
1	0,05	0,121	0,0499	0,1357
2	0,10	0,145	0,0779	0,142
3	0,15	0,179	0,1206	0,1539
4	0,20	0,215	0,1702	0,1711
5	0,25	0,248	0,2106	0,1867
6	0,30	0,291	0,2663	0,2148
7	0,35	0,341	0,3293	0,2546
8	0,40	0,386	0,3812	0,2912
9	0,45	0,432	0,4370	0,3336
10	0,50	0,484	0,4935	0,3859
11	0,55	0,532	0,5486	0,4404
12	0,60	0,583	0,6009	0,5
13	0,65	0,633	0,6523	0,5636
14	0,70	0,688	0,7068	0,6331
15	0,75	0,739	0,7548	0,7019
16	0,80	0,794	0,8071	0,7764
17	0,85	0,851	0,8578	0,8508
18	0,90	0,901	0,9045	0,9162
19	0,95	0,954	0,9516	0,9719
20	1,00	0,9999	0,9999	0,9999

Legenda: i quantil $F^O[X_{(i)}]$ função empírica de probabilidade acumulada $F(x_{(i)})$ função teórica de probabilidade acumulada
 E3-XXX Posto pluviométrico E3-XXX Destaque em verde (vermelho) representa o melhor (pior) ajuste no quantil i

APÊNDICE E – Resultados dos testes de tendência para as séries histórica e futura da célula C5

Período	Teste		$h>150$	$h>140$	$h>130$	$h>120$	$h>110$	$h>100$	$h>90$	$h>80$	$h>70$	$h>60$	$h>50$	$h>40$	$h>20$	
1961 - 2005 (histórico)	Mann-Kendall	τ					0	0,106		0,135			0,056		0,245	
		S					0	4		7			3		13	
		Z_S					0	0,302		0,477			0,156		0,94	
		p					1	0,764		0,631			0,912		0,347	
		H_0					nrej	nrej		nrej			nrej		nrej	
	Spearman	ρ							0,215		0,143			0,055		0,233
		T														
		H_0														
2007 - 2040 cenário RCP4.5	Mann-Kendall	τ			-0,171	0,191				0,244			0,295		0,2	
		S			-4	6			11		15		11			
		Z_S			-0,474	0,589			0,867		0,967		0,778			
		p			0,638	0,555			0,384		0,332		0,435			
		H_0			nrej	nrej			nrej		nrej		nrej			
	Spearman	ρ			-0,2	0,224				-0,13			0,15		0,236	
		T													0,747	
		H_0													0,453	
2007 - 2040 cenário RCP8.5	Mann-Kendall	τ						-0,572	-0,612	-0,453				-0,321	-0,345	
		S						-18	-24	-21				-17	-19	
		Z_S						-2,003	-2,237	-1,684				-1,264	-1,401	
		p						0,046	0,025	0,093				0,208	0,162	
		H_0						rej	rej	nrej				nrej	nrej	
	Spearman	ρ							-0,671	-0,717	-0,535				-0,395	-0,5
		T														-1,581
		H_0														0,114
															nrej	

Legenda: H_0 Hipótese a ser testada rej rejeitar [H_0] nrej não rejeitar [H_0]

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

¹ CLASSIFICAÇÃO/TIPO <p style="text-align: center;">TD</p>	² DATA <p style="text-align: center;">10 de janeiro de 2018</p>	³ REGISTRO N° <p style="text-align: center;">DCTA/ITA/TD-053/2017</p>	⁴ N° DE PÁGINAS <p style="text-align: center;">112</p>
⁵ TÍTULO: <p>Riscos de riscos de eventos Na-Tech sob mudanças climáticas na região costeira do estado de São Paulo.</p>			
⁶ AUTOR: <p>José Carlos de Moura Xavier</p>			
⁷ INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): <p>Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA</p>			
⁸ PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: <p>Na-tech, avaliação quantitativa de risco, AQR, risco tecnológico, mudança do clima, planejamento do uso do solo, licenciamento ambiental</p>			
⁹ PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: <p>1. Avaliação de riscos 2. Mudanças climáticas 3. Efeitos ambientais 4. Utilização do solo 5. Gestão ambiental</p>			
¹⁰ APRESENTAÇÃO: <input checked="" type="checkbox"/> Nacional () Internacional <p>ITA, São José dos Campos. Curso de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica. Área de Infraestrutura Aeroportuária. Orientador: Wilson Cabral de Sousa Junior. Defesa em 14/12/2017.Publicada em 2017.</p>			
¹¹ RESUMO: <p>Acidentes ambientais de origem tecnológica vêm sendo estudados há pelo menos 50 anos por meio de ferramentas tradicionais de modelagem matemática com o objetivo de minimizar perdas humanas, econômicas e de outros bens de interesse ambiental. Essas ferramentas se baseiam em hipóteses acidentais críveis decorrentes de falhas humanas e de equipamentos, na estimação dos seus impactos, das suas frequências de ocorrência e na expressão do risco imposto ao ser humano, à economia e ao ambiente, entre outros. Até recentemente, causas naturais não eram consideradas na formulação dessas hipóteses pelos guias dos países que adotam a Avaliação Quantitativa de Risco (AQR) em seus processos de decisão na ocupação do solo e no licenciamento de empreendimentos que manipulam substâncias perigosas. Acidente ambiental de origem tecnológica cuja causa seja um evento natural é conhecido como na-tech. Esta pesquisa investigou a ocorrência de na-techs na região costeira do estado de São Paulo entre 1940 e 2015. Identificou 15, dez deles em Cubatão, e caracterizou outros 12 como sugestivos. A frequência de ocorrência em Cubatão é crescente, embora os impactos registrados sejam similares ao longo do período investigado. Evidenciou-se a correlação entre na-tech e precipitação intensa. Treze dos 15 na-techs foram precedidos ou ocorreram durante forte chuva. Para Cubatão, determinou-se a probabilidade de ocorrência de um na-tech dada a ocorrência de precipitação de intensidade determinada. Investigou-se a tendência da precipitação para futuro próximo, considerando a possibilidade de aumento no número de na-techs. Dois testes não indicaram tendência ao nível de significância de 5%. Considerando as métricas risco individual e risco social da AQR vigentes no estado de São Paulo, o risco adicional decorrente de hipóteses na-tech é negligenciável e decorre da ausência de hipótese na-tech crível que levasse à fatalidade. Os vazamentos decorrentes de na-techs atingiram predominantemente corpos d'água próximos às empresas, requerendo gerenciamento apropriado. Bancos de dados brasileiros de acidentes e desastres devem ser adaptados para registrar na-techs. Sobre uma estrutura existente, pode-se ampliar a capacidade de identificá-los, seus impactos econômico e à imagem da empresa e lições aprendidas.</p>			
¹² GRAU DE SIGILO: <p><input checked="" type="checkbox"/> OSTENSIVO () RESERVADO () CONFIDENCIAL</p>			