

SEGURANÇA DO SETOR DE PETRÓLEO E GÁS NO BRASIL:
CLIMA PASSADO E CENÁRIOS FUTUROS FRENTE AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS*

SAFETY OF THE OIL AND GAS SECTOR IN BRAZIL:
PAST CLIMATE AND FUTURE SCENARIOS FACED WITH CLIMATE CHANGE

Daniel Pires Bitencourt

Fundação Jorge Duprat Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho (Brasil)
ORCID 0000-0001-6727-4290 daniel.bitencourt@fundacentro.gov.br

Valéria Ramos Soares Pinto

Fundação Jorge Duprat Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho (Brasil)
ORCID 0000-0001-9659-2239 valeria.pinto@fundacentro.gov.br

RESUMO

As emissões, incêndio ou explosão de substâncias perigosas de grande magnitude são chamadas de acidentes ampliados. Tais eventos podem ser causados ou agravados pela condição atmosférica. O objetivo deste artigo é abordar variáveis e eventos atmosféricos no Brasil com potencialidade de prejuízo à segurança do setor de petróleo e gás. Para tanto, analisa-se o vento, temperatura e precipitação, assim como as descargas elétricas, ondas de calor e tornados, em 12 subáreas com extração de petróleo e gás ou refino, armazenamento e transporte destes produtos. O clima passado (1961-2000) é analisado por meio de simulações numéricas e com base na literatura científica. Tanto para o período de 1961-2000 quanto para as projeções futuras (2020-2099), as quais consideram dois possíveis cenários, um otimista e outro pessimista, são calculados os riscos de ocorrência de valores extremos de temperatura e vento. Quanto a temperatura máxima, os resultados das projeções mostraram risco maior para o período de clima futuro em relação ao clima passado, sendo mais significativo nas subáreas da região tropical do Brasil. Nas projeções com cenário climático pessimista, há tendência de risco máximo nessas áreas tropicais. Quanto aos valores extremos da velocidade do vento, tanto as projeções otimistas como as pessimistas apontam para risco oscilando entre 1 e 2, numa escala de 0 a 4, durante o período de clima futuro, que é o mesmo padrão observado durante o período de clima passado.

Palavras-chave: Acidente ampliado, petróleo e gás, risco atmosférico, mudança climática.

ABSTRACT

Emissions, fire, or explosions of harmful substances are called a major accident. Such events can be caused or aggravated by atmospheric conditions. The purpose of this paper is to address the variables and events of the atmosphere in Brazil with the potential for harming the safety of the oil and gas sector. The wind, temperature, and precipitation, as well as lightning, heatwaves, and tornadoes, are analysed for 12 sub-areas with extraction oil and gas or the refining, storage, and transport of their products. Past climate (1961-2000) is analysed through numerical simulation and scientific literature. The risks of extreme values for temperature and wind were calculated for both the 1961-2000 period and future projections (2020-2099), which consider two possible scenarios, one optimistic and one pessimistic. Regarding the maximum temperature, projection results show increased risk for the future period compared with past climate, with more significant impact on the tropical sub-areas of Brazil. Considering the pessimistic scenario, the trend is for maximum risk in these tropical areas. In terms of extreme wind speed, the optimistic and pessimistic projections both show risk varying from 1 to 2, on a scale of 0 to 4 in the future climate period, which is the same standard observed during the past climate.

keywords: Major accident, oil and gas, atmospheric risk, climate change.

* O texto deste artigo foi submetido em 16-04-2020, sujeito a revisão por pares a 28-04-2020 e aceite para publicação em 24-10-2020.

Este artigo é parte integrante da Revista *Territorium*, n.º 29 (II), 2022, © Riscos, ISSN: 0872-8941.

Introdução

A Convenção 174 da Organização Internacional do Trabalho (ILO, 2019) define como “*acidente maior*” ou “*acidente ampliado*” as ocorrências repentinas decorrentes de determinada atividade que provoque emissão, incêndio ou explosão de grande magnitude, envolvendo uma ou mais substâncias perigosas. A ILO (2019) também considera que esse tipo de acidente implica em grave perigo, imediato ou retardado, para os trabalhadores, à população ou ao meio ambiente. Freitas *et al.* (2000) apontam que o termo “*maior*” acaba induzindo uma interpretação eticamente equivocada de “*menor importância*” aos outros tipos de acidentes. Os autores reforçam que a denominação “*acidentes ampliados*” expressa melhor a conotação de ampliação das consequências do acidente no espaço e no tempo, com impactos também ampliados à saúde física e mental da sociedade e ao meio ambiente. Evitando, portanto, a denominação “*maior*”, não há desqualificação de outros tipos de acidentes, tais como os acidentes de trabalho, muito embora, no caso de acidentes ampliados em instalações industriais, essas ocorrências se configurem primariamente como acidentes de trabalho, uma vez que os trabalhadores são a maioria das vítimas (Freitas *et al.*, 2000). Por outro lado, as áreas industriais atraem a população de mais baixa renda, que vive em condições precárias, o que aumenta ainda mais sua vulnerabilidade frente aos riscos de acidentes ampliados (Freitas, 2000).

O Brasil já foi palco de acidentes ampliados em diferentes setores, tais como as recentes tragédias na mineração ocorridas nos municípios de Mariana (2015) e Brumadinho (2019), no estado de Minas Gerais, com centenas de vítimas fatais e imensuráveis impactos ambientais. No setor aeroespacial, ocorreu em 2003 uma explosão na base de Alcântara, estado do Maranhão, matando 21 pessoas. Na indústria química, o acidente ampliado em Paulínia, estado de São Paulo (SP), entre as décadas de 1990 e 2000, contaminou o meio ambiente (ar, solo e água) e resultou em intoxicações agudas e crônicas da população (Aliaga, 2016). Em 2015, ocorreu incêndio e explosão em um tanque de armazenamento com vazamento de produto químico a base de cloro no terminal marítimo de Alemoa, Santos-SP, causando a morte de milhares de peixes. Em 2016, um incêndio provocado pela reação da água da chuva com o produto químico armazenado em Guarujá-SP liberou uma nuvem de gás formada por ácido dicloroisocianúrico de sódio, causando a morte de duas pessoas e a evacuação de centenas de outras.

Além dos acidentes mencionados acima, foram também registrados no Brasil vários acidentes envolvendo o setor de petróleo e gás. Freitas *et al.* (1995) registraram a explosão da esfera de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), na refinaria de Duque de Caxias, estado do Rio de Janeiro (RJ), com a morte de 38 trabalhadores em

1972 e o descarrilamento de trens com 126 mil litros de gasolina, seguido de incêndio e explosão, no município de Pojuca, estado da Bahia, matando 48 e ferindo 162 pessoas em 1983. Em fevereiro de 1984, no município de Cubatão-SP, o vazamento de 700 mil litros de gasolina de um duto provocou um incêndio de grandes proporções, matando 93 pessoas e desabrigando mais de 3 mil moradores da Vila Socó, segundo dados oficiais. Contudo, até hoje esses números são contestados por entidades e testemunhas que vivenciaram o episódio, acreditando-se que cerca de 500 pessoas possam ter morrido no episódio. Também em 1984, a explosão de uma plataforma de petróleo na Bacia de Campos-RJ matou 37 e feriu 19 trabalhadores (Freitas *et al.*, 2000). No ano de 2000, outros três acidentes ampliados foram registrados no setor de petróleo e gás. O primeiro foi novamente na refinaria de Duque de Caxias-RJ, onde o rompimento de um duto derramou 1,3 milhão de litros de óleo combustível na Baía de Guanabara, causando grande desastre ambiental e afetando as comunidades da região. O segundo acidente de 2000 ocorreu em Araucária, estado do Paraná (PR), onde o vazamento de 4 milhões de óleo cru, que estava sendo transportado via oleoduto, causou contaminação ambiental nos rios Barigui e Iguaçu. No terceiro acidente ampliado de 2000, a colisão de um navio com o pier do Terminal de São Sebastião-SP liberou 86 mil litros de óleo que, levados pelo vento e correnteza oceânica, atingiu as praias de São Sebastião e Ilha Bela. No ano seguinte, em 2001, em Morretes-PR, ocorreu outro desastre ambiental causado por rompimento de oleoduto, ocasionando o vazamento de 50 mil litros de óleo. Ainda em 2001, a colisão de um navio com uma pedra derramou 392 mil litros de nafta no mar. Nesse mesmo ano, a explosão seguida de incêndio no Campo do Roncador, Bacia de Campos-RJ, resultou em 11 mortes e liberação de 78.400 barris de óleo diesel e petróleo, culminando com o afundamento da plataforma semi-submersível (Bertoli e Ribeiro, 2006).

Este artigo não tratará das possíveis relações entre as condições atmosféricas e os acidentes ampliados ocorridos no passado. A proposta deste trabalho é de contribuir, no âmbito das informações climáticas disponíveis e através do cálculo de risco em relação as variáveis atmosféricas temperatura e vento, com os planos de ação preventiva de acidentes ampliados no setor de petróleo e gás, com intuito de proteger os trabalhadores, população e meio ambiente. A intenção é aprimorar o debate da gestão em segurança sob a consideração dos aspectos climáticos, favorecendo ações que busquem evitar futuros acidentes ampliados ou, pelo menos, minimizar os impactos sociais e ambientais decorrentes desses acidentes. Portanto, o principal objetivo do estudo é abordar os eventos naturais atmosféricos que ocorrem no Brasil, em suas diferentes escalas de tempo e espaço, que, segundo estudos prévios, são causa ou parte das causas de acidentes

ampliados no setor de petróleo e gás. A climatologia e as projeções futuras frente as mudanças climáticas dos principais eventos naturais atmosféricos, assim como o risco de ocorrência de temperatura e velocidade do vento extremos, são analisadas a fim de contribuir para a criação ou ajuste de políticas públicas voltadas ao setor de petróleo e gás no Brasil.

Fundamentação teórica

Nesta seção, são apresentados os eventos naturais atmosféricos com implicações marcantes à segurança do setor de petróleo e gás, assim como a localização aproximada das áreas brasileiras (mar e terra) de atuação deste setor.

Eventos naturais atmosféricos

As condições atmosféricas são comumente relacionadas com os acidentes ampliados, seja como parte da causa ou como determinantes da abrangência e intensidade dos impactos pós-acidente. Em relação a este último aspecto, Thaning e Baklanov (1997) e Benamrane *et al.* (2013) mostraram o uso da simulação numérica da atmosfera para definir o transporte de partículas radioativas lançadas por acidentes ampliados em usinas nucleares, ressaltando a importância do acesso aos resultados de dispersão atmosférica para apoiar o planejamento e dar respostas de emergência em casos de propagação de nuvens perigosas, possibilitando a correta tomada de medidas preventivas. Para o Brasil, Junior e Lorenzi (2007) simularam cenários de exposição do dióxido de enxofre proveniente de um acidente ampliado na indústria química.

Alguns autores listam quais são os eventos atmosféricos mais prejudiciais à segurança do setor de petróleo e gás e definem os seus impactos detalhadamente para diferentes processos, tais como refino, armazenamento e transporte de óleo e gás (Cruz e Krausman, 2013; Sengul *et al.*, 2012; Landucci *et al.*, 2012; Krausmann *et al.*, 2011; Renni *et al.*, 2010; Cruz *et al.*, 2000). Nos EUA, o furacão é um dos principais sistemas meteorológicos estudado (Godoy, 2007; Cruz *et al.*, 2001), uma vez que este sistema meteorológico é causa de tornados, ventos fortes, inundações e descargas elétricas. No Brasil, houve o registro histórico de apenas um furacão, denominado de Furacão Catarina por ter atingido principalmente a costa do estado de Santa Catarina em março de 2004. Contudo, embora o atual clima brasileiro não favoreça a ocorrência de furacões, muitas áreas com instalações do setor de petróleo e gás são suscetíveis à ocorrência de tornados, ventos fortes, inundações e descargas elétricas, além das ondas de calor que tem ocorrido nos últimos anos com maior frequência e intensidade (Geirinhas *et al.*, 2017; Bitencourt *et al.*, 2016).

Ainda sob a consideração do setor de petróleo e gás, Cruz e Krausmann (2013) apresentaram uma visão geral da vulnerabilidade dos processos operacionais frente as mudanças climáticas, concluindo que os possíveis novos cenários climáticos e os eventos meteorológicos extremos representam uma ameaça real para a segurança do setor. As operações envolvendo gás natural, por exemplo, devem ser totalmente reprogramadas sob condições de eventos meteorológicos extremos, exigindo modificações de planos desde a produção até a transmissão e distribuição do gás (Cho *et al.*, 2018). Segundo ainda Cruz e Krausmann (2013), o perigo das condições extremas de tempo é particularmente maior em áreas costeiras de baixa altitude que, para o caso do Brasil, é onde estão localizadas a maior parte das instalações de petróleo e gás. Em termos de vulnerabilidade, cabe ressaltar que a zona costeira concentra 2/3 da população humana, tendo sido a região de ocupação preferencial no Brasil também (Vitte, 2003). Nos Estados Unidos (EUA), 3 % de todas as liberações de materiais perigosos são causadas por eventos naturais (Sengul *et al.*, 2012). Muitas instalações do setor de petróleo e gás contam com tanques de armazenamento, os quais podem ser danificados por ventos fortes, tornados, descargas elétricas e inundações (Cruz *et al.*, 2001), liberando substâncias perigosas de grande impacto às pessoas e ao meio ambiente (Krausmann *et al.*, 2011; Landucci *et al.*, 2012). De acordo com Godoy (2007), além das inundações, a ocorrência de vento forte também é altamente perigosa. Por outro lado, segundo Renni *et al.* (2010), entre os eventos naturais, as descargas elétricas (relâmpagos) apresentam-se como causa mais frequente de liberação tóxica e incêndio em tanques de armazenamento de óleo, diesel ou gasolina. Zou (2018) chama atenção para o efeito da mudança climática na carga de ondas no mar que pode diminuir o prazo para fadiga das estruturas de exploração petrolífera (*Offshore*). Também direcionado às operações *Offshore*, Andrioni *et al.* (2019) avaliaram os impactos das mudanças climáticas para as instalações de petróleo e gás da Bacia de Campos.

Áreas de Atuação do Setor de Petróleo e Gás

De acordo com as informações da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), disponíveis em <http://www.anp.gov.br/>, as áreas brasileiras (mar e terra) onde existem exploração e produção de óleo e gás, produção de derivados de petróleo e processamento de gás natural, armazenamento/movimentação de produtos líquidos e movimentação/estocagem de gás natural contemplam aproximadamente toda a zona costeira do Brasil e algumas áreas interioranas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste e Norte, conforme delimitado pelas subáreas 1 a 12 (fig. 1).

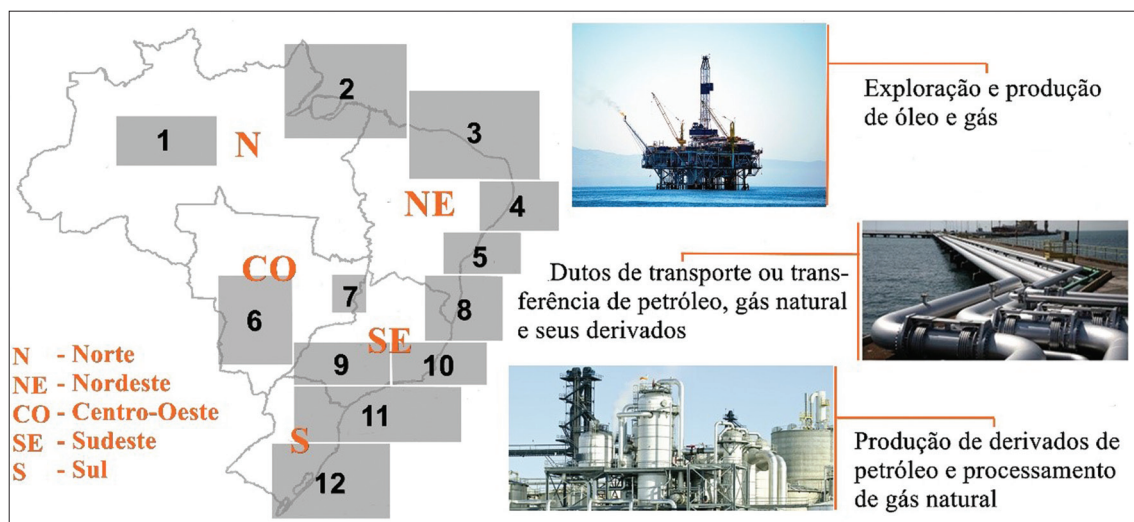


Fig.1 - Subáreas (1 a 12) selecionadas para avaliação dos eventos naturais atmosféricos e imagens ilustrativas de três instalações do setor de petróleo e gás (Fonte das imagens: <http://www.anp.gov.br/>).

Fig.1 - Subareas (1 to 12) selected for the assessment of natural atmospheric events and illustrative images of three facilities in the oil and gas sector (Source of images: <http://www.anp.gov.br/>).

Procedimentos metodológicos

Os eventos naturais atmosféricos são analisados individualmente para as subáreas 1 a 12 (fig. 1) por intermédio do clima passado e futuro. O clima passado é baseado na literatura científica, com informações sobre a frequência de ocorrência de incidência de descargas elétricas (*des*), de ondas de calor (*oc*) e da susceptibilidade para ocorrência de tornados. Além disso, para a série temporal de 40 anos, entre 1961 e 2000, utilizando resultados de simulação numérica, apresenta-se a média e desvio padrão da velocidade do vento média diária (V , em $m\ s^{-1}$), temperatura máxima diária (T_{mx} , em $^{\circ}C$) e precipitação acumulada em 24 horas (P , em mm). Considerando tanto o período de clima passado (1961-2000) do Modelo Climático Regional Eta quanto as projeções de clima futuro (2020-2099) deste mesmo modelo, calcula-se o risco de ocorrência de valores extremos da temperatura máxima e da velocidade média diárias. Conforme estudos apresentados nas seções anteriores, o vento apresenta-se como uma das principais variáveis atmosféricas na consideração de risco ao setor de petróleo e gás. Da mesma forma, para o Brasil, por ser composto por áreas tropicais e subtropicais, o valor máximo diário da temperatura do ar é um importante parâmetro causador de tempestades provenientes do aquecimento diurno.

O Modelo Climático Regional Eta (Chou *et al.*, 2005) foi desenvolvido pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Brasil. Os resultados possuem resolução temporal diária e foram obtidos da plataforma PROJETA, disponível em www.projeta.cptec.inpe.br.

As simulações usaram uma abordagem dinâmica de downscaling (Pesquero *et al.*, 2009; Chou *et al.*, 2014a; Chou *et al.*, 2014b) em uma resolução horizontal de 20 km, aninhada com o modelo climático HadGEM2-ES do Met Office Hadley Center (MOHC). As projeções futuras de mudanças climáticas até 2099 consideraram duas vias de concentração representativa (Representative Concentration Pathways (RCP - RCP): RCP 4.5 e RCP 8.5 (Van Vuuren *et al.*, 2011a; Van Vuuren *et al.*, 2011b; Moss *et al.*, 2010). O cenário do RCP 4.5 se refere a emissões moderadas (cenário otimista), enquanto o cenário do RCP 8.5 se refere a altas emissões (cenário pessimista). Para o RCP 4.5 moderado, o forçamento radiativo aumenta quase linearmente até cerca de 2060 e depois diminui até o final do século. Para o alto RCP 8.5, há um aumento contínuo de gases de efeito estufa até 2099.

O risco de ocorrência de valores extremos (*rve*) tomou como base a ferramenta bandas de controle, similarmente como realizado para o cálculo de risco de estresse térmico no estudo de Bitencourt *et al.* (2019). Para o cálculo de *rve*, primeiramente obtém-se os percentis 40, 55, 70 e 85% da série de dados diários de 1961 a 2000 do Modelo Climático Regional Eta. Os resultados dos percentis P_{40} , P_{55} , P_{70} e P_{85} para as variáveis (*var*) T_{mx} e V são obtidos para cada subárea mostrada na fig. 1, definindo-se quatro faixas de valores: A: $P_{40} \leq var < P_{55}$, B: $P_{55} \leq var < P_{70}$, C: $P_{70} \leq var < P_{85}$ e D: $var \geq P_{85}$. Posteriormente, para cada década dos períodos de clima passado (1961-2000) e de clima futuro (2020-2099), calcula-se a frequência (*f*) de ocorrência na qual *var* (ou seja, T_{mx} ou V) é registrada nas faixas A, B, C e D. Considerando risco nulo ($rve = 0$) quando $var < P_{40}$, teremos o cálculo parcial de risco dado por $rve_A = (f/25) \times 0,25$, $rve_B = (f/25) \times 0,5$,

$rve_c = (f/25) \times 0,75$ e $rve_d = (f/25) \times 1$ para as faixas A, B, C e D, respectivamente. Os diferentes pesos atribuídos para cada faixa de valores (0,25 para faixa A, 0,50 para faixa B, 0,75 para faixa C e 1 para faixa D) determinam que o risco será tão maior quanto maior forem a frequência de ocorrência e a intensidade do evento, tal como é dada na definição de bandas de controle. Neste caso, a “intensidade” do evento está relacionada com os valores de T_{mx} ou V, ou seja, quanto maior o valor de var maior será a intensidade. O resultado final do rve, que varia de zero (risco nulo) a 4 (risco máximo), é dado pela soma dos riscos em cada faixa de valores:

$$rve = rve_A + rve_B + rve_C + rve_D.$$

Resultados e discussão

Clima Passado: 1961-2000

Com os maiores índices pluviométricos entre fevereiro e maio, a subárea 1 é a mais chuvosa de todas, totalizando em média 2221 mm ano⁻¹, devido as altas temperaturas e a elevada umidade no ar proveniente da floresta Amazônica. Na sequência, aparecem as subáreas 2, 3, 6, 7, 9, 10, 11 e 12, com precipitação acumulada (P_o), aproximadamente, entre 1000 e 1500 mm ano⁻¹. Nas subáreas 2 e 3 os acumulados de precipitação concentram-se entre fevereiro e abril, na subárea 6 entre outubro e fevereiro, nas subáreas 7 e 9 entre dezembro e fevereiro, na subárea 10 entre novembro e fevereiro, na subárea 11 entre dezembro e março e na subárea 12 entre junho e outubro. As demais subáreas (4, 5 e 8) apresentam aproximadamente precipitação acumulada de 640 a 880 mm ano⁻¹, sendo maio a julho a época mais chuvosa na subárea 4 e outubro a janeiro nas subáreas 5 e 8 (fig. 2).

A segurança nas instalações do setor de petróleo e gás é fortemente prejudicada tanto pela escassez de precipitação, que pode causar erosão e favorecer a danificação de oleodutos, como pelo excesso de precipitação, que pode causar inundações (Cruz e Krausmann, 2013; Landucci *et al.*, 2012; Krausmann *et al.*, 2011), com prejuízos, por exemplo, às instalações de armazenamento. Nesse sentido, é importante a avaliação dos recordes de precipitação acumulada em 24 horas (P_{rd}), uma vez que este parâmetro pode servir como comparativo entre as subáreas (fig. 2). Notamos que P_{rd} das doze subáreas apresenta valores entre 25 a 68 mm dia⁻¹, indicando que o acumulado diário da precipitação mais significativo da série temporal não é extremo e também não difere muito entre as subáreas, apesar da significativa extensão territorial do Brasil (8.516.000 km²). Entretanto, ressaltamos que esses resultados são obtidos de modelo numérico que, embora tomem como base dados meteorológicos observados,

tendem a homogeneizar os dados espacialmente a fim de não criar “ruídos” (valores discrepantes) pontuais que possam prejudicar as análises. Contudo, principalmente em se tratando da precipitação, que é altamente heterogênea espacialmente, a realidade observacional mostra-se diferente, podendo ocorrer precipitação extremamente intensa em todas as subáreas com instalações do setor de petróleo e gás. Em todo o Brasil ocorrem sistemas meteorológicos capazes de provocar precipitação superior a 100 mm dia⁻¹, tais como a Zona de Convergência Intertropical (Norte e Nordeste), a Zona de Convergência do Atlântico Sul (Sudeste e Centro-Oeste), os Vórtices Ciclônicos, Ciclones Extratropicais, Frentes Frias e os Complexos Convectivos de Mesoescala (Sul, Sudeste e Centro-Oeste), entre outros tantos (Cavalcanti *et al.*, 2009).

Determinadas ocorrências de precipitação intensa são oriundas de nuvens de tempestade, sob as quais, todas as operações envolvendo gás natural devem ser reprogramadas, respeitando procedimentos específicos na produção, liquefação e regasificação, no estoque, no transporte e comércio marítimo e na transmissão e distribuição do gás (Cho *et al.*, 2018). Dependendo da região brasileira, as tempestades podem ser acompanhadas de granizo e descargas elétricas do tipo nuvem-solo. Este último fenômeno atmosférico se apresenta altamente prejudicial às instalações de petróleo e gás (Sengul *et al.*, 2012; Renni *et al.*, 2010; Godoy, 2007; Cruz *et al.*, 2001) e deve ser fortemente considerado como um fator de risco no Brasil, uma vez que o país está entre os de maior incidência de descarga elétrica no mundo (Pinto e Pinto, 2003). A climatologia de descarga elétrica (*des*) esquematizada na fig. 2, a qual foi baseada em avaliação dos resultados apresentados por Pinto Jr (2019), mostra que as subáreas 2, 3, 4, 5 e 8, localizadas na zona costeira do Norte e Nordeste, apresentam as menores incidências de descarga elétrica, com no máximo 5 *des* km⁻² ano⁻¹. Por outro lado, este tipo de ocorrência é bem maior para as subáreas 1 e 11, onde podem ocorrer até 10 *des* km⁻² ano⁻¹, e pelo menos para parte das demais subáreas (6, 7, 9, 10 e 12), onde o mapeamento de Pinto Jr (2019) aponta ocorrências de até 15 *des* km⁻² ano⁻¹. Pinto Jr *et al.* (2013) constataram aumento significativo a partir do final do século XIX na incidência de tempestades acompanhadas de descarga elétrica nas cidades de Campinas e São Paulo, no estado de SP. Os autores associaram essa tendência de aumento à elevação da temperatura na superfície do solo provocada pela acelerada urbanização dessas cidades. Contudo, é importante ressaltar que o aumento das temperaturas, com consequente aumento das tempestades e descargas elétricas, tem sido verificado a partir dos anos 2000 para praticamente todo o Brasil, conforme documentado por Geirinhas *et al.* (2017), Bitencourt *et al.* (2016) e Ceccherini *et al.* (2016), indicando que a

causa não é exclusivamente a urbanização e que, muito provavelmente, estas tendências de aumento do calor já são efeitos das mudanças climáticas.

Com estudo direcionado à países de tempo frio, Rosenfeld (2015) avaliou a exposição de gasodutos às temperaturas baixas e encontrou que o frio pode ameaçar os dutos por uma série de circunstâncias, tais como cargas nos componentes devido ao acúmulo de neve e gelo, tensões térmicas devido a temperaturas extremamente baixas e expansão confinada de água gelada nos componentes. Embora, em geral, as ondas de frio no Brasil sejam de moderada a baixa intensidade, algumas situações de tempo, entre os meses de junho e agosto, podem provocar temperaturas negativas por períodos de algumas horas em parte das subáreas 6, 9, 10, 11 e 12, possibilitando o congelamento dos componentes da estrutura de transporte de gás. Eventualmente ocorre frio extremamente intenso no Sul do Brasil, tal como a onda de frio de julho de 2013 que provocou neve em 126 municípios do estado de Santa Catarina, incluindo o incomum registro na área litorânea (Fernandes *et al.*, 2016). Por outro lado, Cruz e Krausmann (2013) abordaram alguns aspectos relacionados a diminuição da segurança do setor de petróleo e gás devido as temperaturas elevadas. Nesse sentido, os processos relacionados a extração e transporte do petróleo e gás, ao refino do petróleo e a distribuição e entrega do petróleo e gás merecem considerável atenção, uma vez que o Brasil apresenta temperaturas muito elevadas em boa parte do ano e que, também, as tendências dos últimos anos tem sido de intensificação do calor (Geirinhas *et al.*, 2017; Bitencourt *et al.*, 2016; Ceccherini *et al.*, 2016). Voltando a síntese da climatologia apresentada na fig. 2, notamos que as subáreas mais quentes são aquelas afastadas da zona costeira, com média da temperatura máxima diária de 31,1 °C na subárea 6, 30 °C na subárea 1 e 28,4 °C na subárea 7. Os recordes históricos para essas subáreas são extremamente altos, atingindo, respectivamente, os valores de 40, 35,8 e 36,4 °C. Os valores de $\overline{T_{mx}}$ são próximos ou maiores que 25 °C e de T_{rd} próximos ou maiores que 29 °C nas subáreas 2, 3, 4, 5, 8 e 9. Nas demais subáreas (10, 11 e 12), que compõe a zona costeira subtropical do Brasil, onde as massas de ar frio provocam declínio das temperaturas nos meses de inverno, a $\overline{T_{mx}} \leq 24$ °C, porém com T_{rd} também elevado, variando entre 28,5 e 30,4 °C. Esse resultado mostra que, mesmo nas subáreas onde ocorrem avanços de massas de ar frio, caracterizando a existência de estação fria, a temperatura máxima diária na primavera e verão pode ser extrema devido a atuação de ondas de calor (ver indicação de oc na fig. 2) que, conforme documentado por Bitencourt *et al.* (2016) e Bitencourt (2019), tem sido cada vez mais intensas, frequentes e espacialmente abrangentes no centro-sul do Brasil.

O vento intenso é outra situação de tempo que favorece o aumento do risco de acidente ampliado no setor de petróleo e gás (Godoy, 2007; Cruz *et al.*, 2001). No sudeste da América do Sul, o ciclone extratropical aparece como um importante sistema meteorológico causador de ventos intensos (Cardoso *et al.*, 2012) que, juntamente com a elevação da ondulação no mar, é muitas vezes parte das causas de incidentes com pequenas embarcações na costa brasileira (Fuentes *et al.*, 2013). O vento intenso por influência de ciclones extratropicais é aproximadamente constante (durando períodos de horas) e ocorre em áreas mais abrangentes, sendo mais crítico para as instalações de petróleo e gás ao sul de 27 °S de latitude (Bitencourt *et al.*, 2010), que contempla aproximadamente as subáreas 11 e 12. É também ao sul da latitude de 27 °S que, em situações mais extremas, ocorrem os chamados ciclones extratropicais “explosivos” ou “bomba”, denominados assim devido a sua rápida intensificação e potencial para geração de ventos intensos (Bitencourt *et al.*, 2013). Porém, outros sistemas meteorológicos como Frentes Frias, Complexos Convectivos de Mesoescala ou situações extremas de calor e umidade podem formar nuvens de tempestade que, além da precipitação, do granizo e das descargas elétricas, causam também ventos intensos. Os ventos intensos provenientes de aquecimento diurno podem ser observados em todas as subáreas de atuação do setor de petróleo e gás, ocorrendo de forma momentânea e localizada (são os chamados “ventos de rajada”). As tempestades, em situação de muita instabilidade atmosférica, podem evoluir para uma “super célula” e favorecer a formação de tornado, que embora com frequência rara e atuação muito localizada, é considerado como um dos eventos naturais atmosféricos mais perigosos e destruidores e, portanto, requerendo planos de ação específicos para a ocorrência desses eventos nas áreas com instalações do setor de petróleo e gás. Apresentados os valores climatológicos da média diária da velocidade do vento (\overline{V}) e o recorde diário (não se trata dos ventos de rajada e sim da velocidade média diária mais alta) registrado na série temporal de 1961-2000 (V_{rd}) para cada subárea com instalações do setor de petróleo e gás (fig. 2). Estes resultados mostram \overline{V} variando de 1,8 a 5,4 m s⁻¹ e V_{rd} variando de 5,2 a 15,3 m s⁻¹. De acordo com o levantamento publicado por Dias (2011), excetuando as subáreas 3, 7 e 8, em todas as demais já foi registrado a ocorrência de pelo menos um evento de tornado. Entretanto, as subáreas 9, 10, 11 e 12 são significativamente mais susceptíveis em relação as demais para a ocorrência deste tipo de tempestade. O centro-sul brasileiro, que inclui as subáreas 6, 9, 10, 11 e 12, é parte de uma área sul-americana que concentra as maiores frequências e intensidades de tempestades (Nunes *et al.*, 2019; Brooks *et al.*, 2003; Goliger e Milford, 1998).

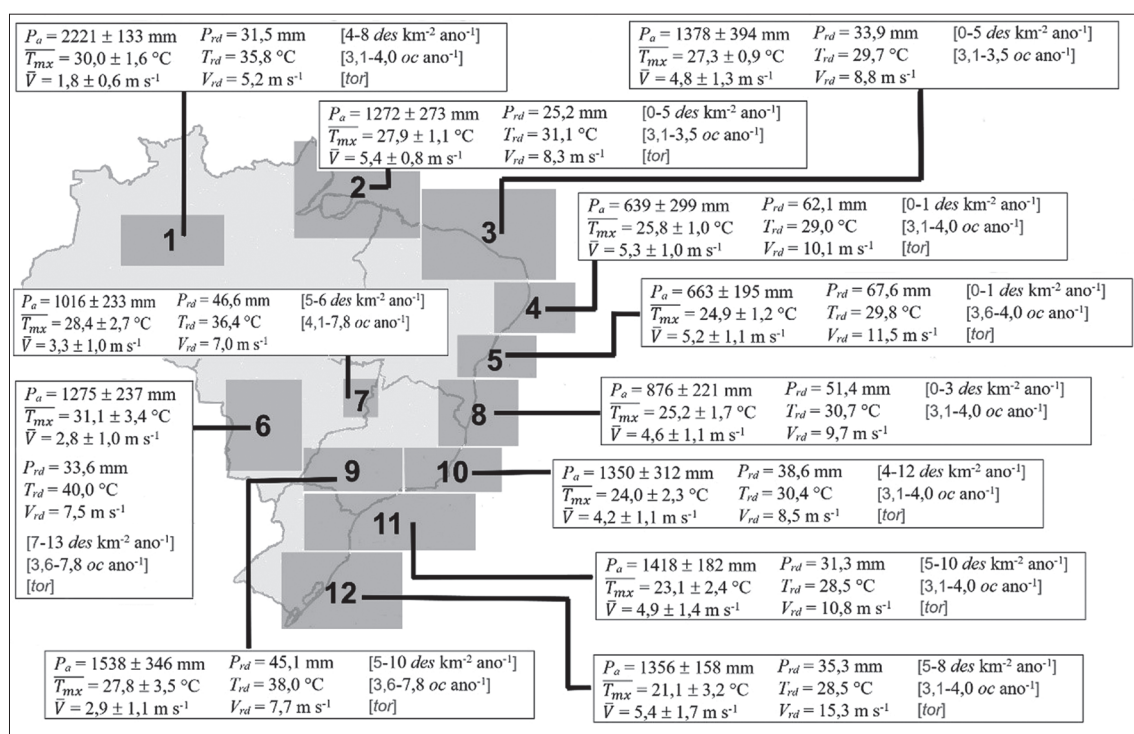


Fig. 2 - Climatologia (1961-2000) da precipitação acumulada no ano (Jan a Dez) (P_a), da temperatura máxima diária ($\overline{T_{mx}}$) e da velocidade do vento média diária (\overline{V}) e os respectivos valores de desvio padrão (a direita de \pm). Os valores de P_{rd} , T_{rd} e V_{rd} são os registros registrados na série temporal de 1961-2000 de P , T_{mx} e V . As informações em “[]” mostram a incidência de descargas elétricas (des) e ondas de calor (oc) nas porções de terra de cada subárea. O indicativo tor marca quais subáreas são susceptíveis a ocorrência de tornados.

Fig. 2 - Climatology (1961-2000) of the annual precipitation (Jan to Dec) (P_a), daily maximum temperature ($\overline{T_{mx}}$) and the daily average wind speed (\overline{V}) and the respective standard deviation (to the right of \pm). P_{rd} , T_{rd} and V_{rd} are the record values in the 1961-2000 time series of P , T_{mx} and V . The information in “[]” shows the incidence of lightning strikes (des) and heat waves (oc) on land of each subarea. The “tor” marks subareas where tornadoes are likely to occur

Risco de Valores Extremos

Simulações numéricas para o período da atualidade até o final do século têm mostrado aumento da temperatura e velocidade do vento na América do Sul, diminuição na precipitação sobre o Nordeste do Brasil e aumento na região Sul e no oeste da região Norte (Silva e Haas, 2016). O aquecimento do planeta por conta das mudanças climáticas tem favorecido aumento local da temperatura máxima diária, além de maiores períodos (dias consecutivos) com anomalias positivas de temperatura (Brooks, 2013). Juntamente com outros fatores atmosféricos, os dias quentes são altamente favoráveis para a ocorrência de tempestades, as quais são geralmente acompanhadas por descargas elétricas, ventos intensos e altos índices pluviométricos. Exposto isso, avaliaremos aqui o risco de ocorrência de temperatura máxima (T_{mx}) e de velocidade do vento (V) extremos, para cada subárea com atividades do setor de petróleo e gás.

Para o caso da T_{mx} do dia, as projeções climáticas do período de 2020 a 2099 mostram claramente maior risco de valor extremo (rve) em relação ao clima passado (fig. 3). Notamos que em todas as subáreas, na escala de 1 a 4, rve para T_{mx} , em geral, oscilou entre 1 e 1,5 nas décadas de 1960, 1970, 1980 e 1990 (fig. 3). Durante este período de 40 anos de clima passado, observou-se rve ≈ 2 somente nas subáreas 2 e 3 para a década de 1990 e nas subáreas 6 e 9 para a década de 1970. As projeções para o clima futuro apontam rve para T_{mx} entre 2 e 4 em todas as subáreas (fig. 3). Notadamente, o risco é maior nas subáreas localizadas no domínio brasileiro tropical, onde as frequências dos altos valores de T_{mx} são maiores. As projeções que consideram RCP 8.5 (cenário pessimista) indicam rve entre 3 e 4 já a partir da década de 2030 em praticamente todas as subáreas. Considerando projeções RCP 4.5 (cenário otimista), o risco é menor, mas ainda assim muito alto e quase sempre superior a 3. Para diferentes momentos do clima futuro, as projeções mais pessimistas apontam risco máximo nas subáreas

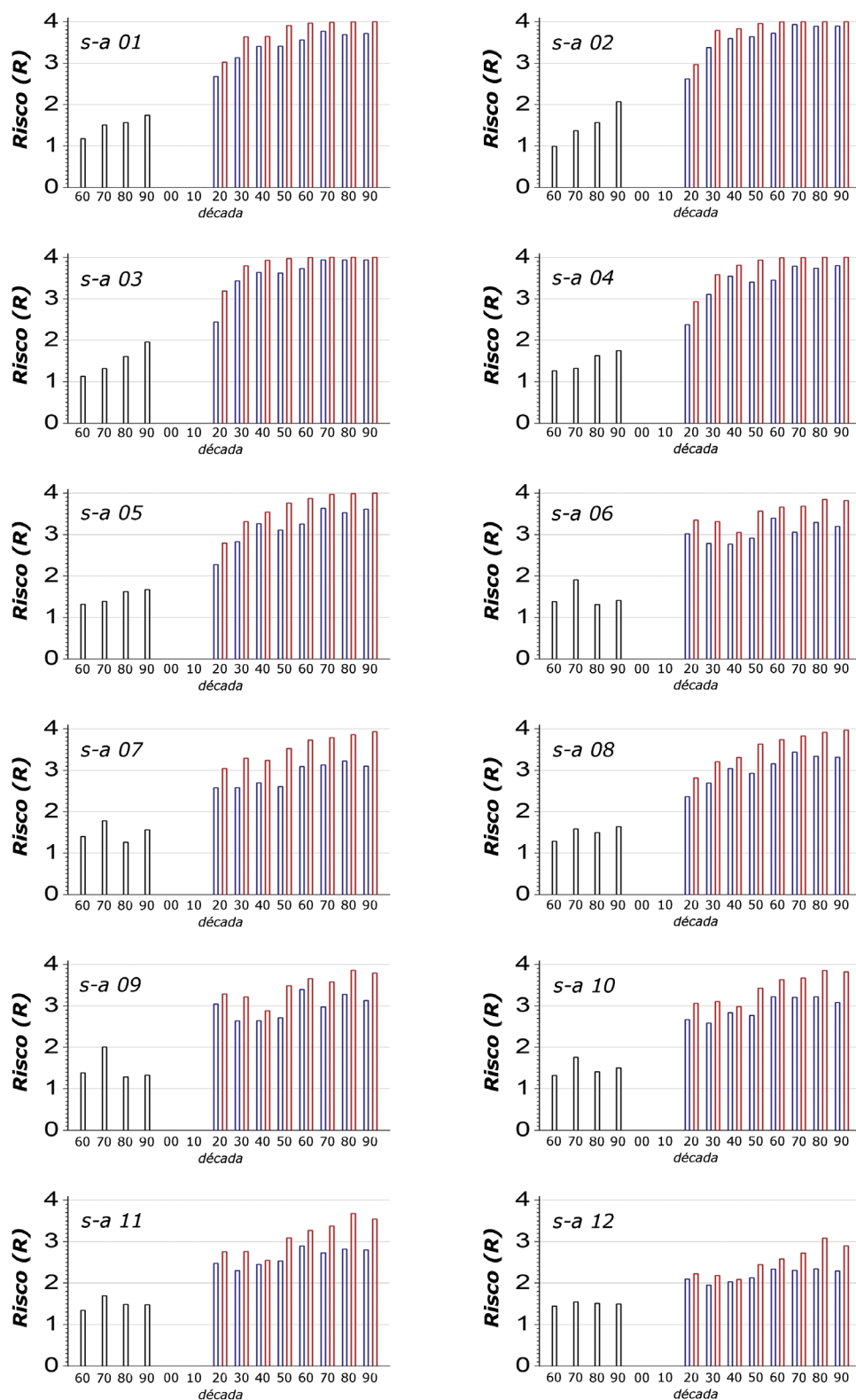


Fig. 3 - Risco de Valores Extremos (rve) da Temperatura Máxima (T_{mx}) para o período de clima passado (1961-2000) (barra preta) e para as projeções de clima futuro (2020-2099), considerando os cenários climáticos otimista (barra azul) e pessimista (barra vermelha). As subáreas 1 a 12 são indicadas por s-a (canto esquerdo/superior).

Fig. 3 - Risk of extreme values (rve) for maximum temperature (T_{mx}) in the past climate period (1961-2000) (black bars) and in the future climate projections (2020-2099), considering optimistic (blue bars) and pessimistic (red bars) climate scenarios. Sub-areas from 1 to 12 are indicated by s-a (left/upper corner).

de 1 a 10, com $rve \approx 4$. Já nas subáreas 11 e 12, que ficam na porção mais ao sul do Brasil, em geral rve oscila entre 2 e 3. Os resultados de rve menos críticos para as subáreas 11 e 12 muito provavelmente seja por conta da influência sazonal mais acentuada nessas áreas, que em última análise, acarreta em menores frequências de T_{mx} elevada. A elevação do risco de T_{mx} frente as novas condições climáticas projetadas para o futuro acarreta em condições atmosféricas mais favoráveis às tempestades, com chuvas intensas (e inundações), descargas elétricas e ventos fortes. Este último, por ser causado por tempestades, geralmente ocorre na forma de rajadas, ou seja, são ventos intensos, de curta duração e de abrangência espacial localizada.

O aumento da temperatura dos oceanos frente ao advento das mudanças climáticas (Silva e Haas, 2016) favorecem a intensificação dos ciclones extratropicais no Atlântico Sul, acarretando em ventos intensos durante períodos maiores (várias horas consecutivas) e com maior abrangência espacial nas zonas costeiras da região Sul (Cardoso *et al.*, 2012). Além disso, a maior carga de onda no mar tende a acelerar a fadiga das estruturas *Offshore* (Zou, 2018). Entretanto, os resultados (fig. 4) apontam para elevações do rve menos críticas para a variável V . Tanto as projeções otimistas como as pessimistas, com emissões de gás estufa contínuas, apontam para rve oscilando entre 1 e 2 durante o período de clima futuro. O rve para o V em praticamente todas as subáreas apresenta-se entre 2020 e 2099 com o mesmo padrão observado durante o período de clima passado (fig. 4). Apesar do indicativo para o período de clima futuro de risco um pouco mais elevado ($rve \approx 2$) na subárea 7, espera-se que as condições de vento mais prejudiciais aos setor de petróleo e gás continuem sendo verificados nas subáreas 11 e 12 por conta do tipo de sistemas meteorológico atuantes nessas regiões, tais como os ciclones extratropicais, incluindo os ciclones classificados como “explosivo” ou “bomba” (Bitencourt *et al.*, 2013).

A fim de prevenir os acidentes ampliados são necessárias avaliações de riscos naturais e tecnológicos integradas, considerando cenários previstos para esses eventos e seus impactos nas instalações e operações. O gerenciamento dos riscos inclui adequações que podem variar muito, dependendo da situação da operação e do tipo de evento natural. Uma proposta com ênfase no aumento do nível do mar, que tem os ciclones extratropicais no oceano Atlântico Sul como uma das principais causas, foi desenvolvida por Lacerda *et al.* (2012) para o terminal da Petrobras da Ilha Redonda, na Baía de Guanabara, Rio de Janeiro/RJ. Utilizando o software ArcGIS 9.3 em três cenários de inundações, o pior cenário simulou a ocorrência de um evento extremo com ondas na altura de 3 metros, com potencial para elevar a altura do mar em até 5m, o que inviabilizaria a utilização da Ilha Redonda. Para essa situação extrema, Lacerda *et al.* (2012)

apresentaram o fluxo da abordagem metodológica, diagnóstica, prognóstica e de gestão, identificando uma perda estimada de 48% das instalações.

Considerando ainda o caso simulado de elevação do nível do mar, Lacerda *et al.* (2012) sugere medidas de mitigação, tais como a contenção das encostas da Ilha Redonda, com o uso por exemplo de paredes de concreto, a criação de poços de drenagem com sistemas de comportas para bombear água da chuva, a elevação das áreas pública (ruas, calçadas, etc), implantação de medidas específicas para a não interrupção de processos existentes na ilha, como carga e descarga de gás, por exemplo, e a criação de estrutura do quebra-mar em “L” para proteger a ilha e dar abrigo para embarcações.

Considerações finais e recomendações

Com base na literatura consultada, este estudo mostrou os fatores atmosféricos mais importantes nas considerações de risco de acidente ampliado no setor de petróleo e gás. Embora trate-se de uma macro análise, a apresentação do clima passado separadamente para doze subáreas com instalações de extração de petróleo ou refino, armazenamento e transporte de óleo e gás traz fundamentais subsídios para o planejamento, manutenção e operação destas atividades. Os resultados de clima futuro, que projetam elevação do risco de temperatura máxima extrema nas próximas décadas, apontam para a necessidade urgente de revisão das políticas públicas e sistemas específicos de segurança. A projeção futura aponta para aumento mais significativo do risco de valor extremo para a temperatura máxima nas subáreas localizadas na região tropical do Brasil, onde as frequências de temperatura elevada são maiores. As projeções que consideram os cenários climáticos pessimistas apontam risco de nível 4 (mais elevado) de ocorrência de temperatura máxima extrema em subáreas do Norte e Nordeste do Brasil. Em última análise, a ocorrência de temperatura máxima mais elevada, juntamente com outros parâmetros, implica em condições atmosféricas mais favoráveis para intensificação de fenômenos naturais, tais como ventos intensos e descargas elétricas provenientes de tempestades. Quanto aos valores extremos da velocidade do vento, tanto as projeções otimistas como as pessimistas apontam para risco oscilando entre 1 e 2 durante o período de clima futuro, que é o mesmo padrão observado durante o período de clima passado. Apesar disso, espera-se que as subáreas 11 e 12 mantenham-se como as mais susceptíveis a ocorrência de vento intenso por conta do tipo de sistemas meteorológico atuantes nessas regiões. Com isso, atuais instalações do setor de petróleo e gás poderão, em um futuro próximo, tornar-se mais vulneráveis aos eventos naturais que, em associação com outros aspectos, poderão ter elevação do risco de acidente ampliado.

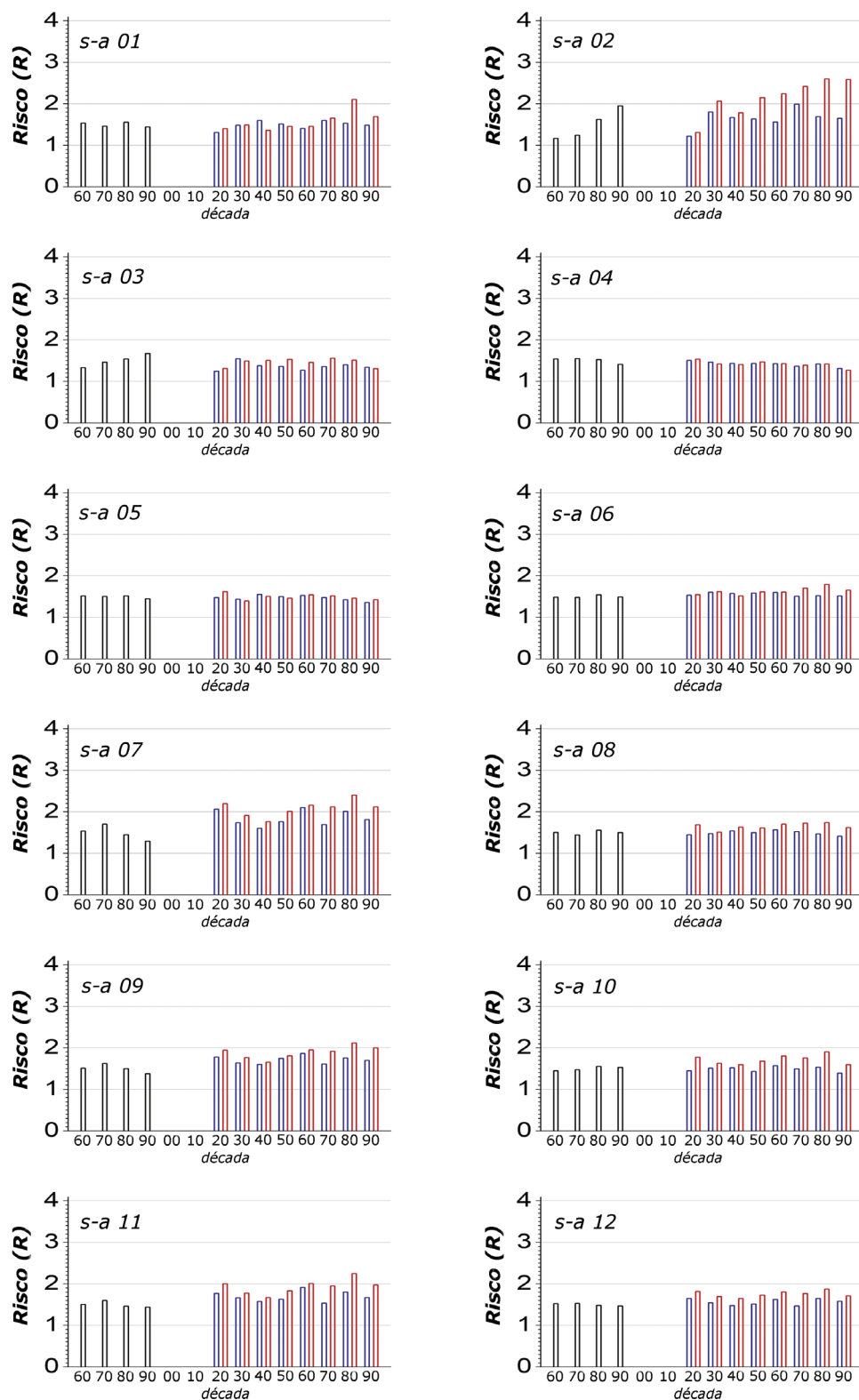


Fig. 4 - Risco de Valores Extremos (rve) da Velocidade do Vento (V) para o período de clima passado (1961-2000) (barra preta) e para as projeções de clima futuro (2020-2099), considerando os cenários climáticos otimista (barra azul) e pessimista (barra vermelha). As subáreas 1 a 12 são indicadas por (s-a) (canto esquerdo/superior).

Fig. 4 - Risk of extreme values (rve) for wind speed (V) in the past climate period (1961-2000) (black bars) and in the future climate projections (2020-2099), considering optimistic (blue bars) and pessimistic (red bars) climate scenarios. Sub-areas from 1 to 12 are indicated by s-a (left/upper corner).

Dada a extensão territorial do Brasil e grande variabilidade espacial do clima entre as diferentes regiões, é crucial que as variáveis e fenômenos atmosféricos, quantificados neste trabalho por subárea, sejam considerados em todos os procedimentos e normas de segurança voltados ao setor de petróleo e gás. Sugere-se, por exemplo, medidas mais específicas que abordem o risco atmosférico nas Normas Regulamentadoras brasileiras 20 e 37, que tratam, respectivamente, de produtos inflamáveis e combustíveis e das atividades em Plataformas de Petróleo. Há, portanto, com base nas tendências de mudanças do clima já verificadas nas últimas décadas e projetadas para o futuro, necessidade de revisão das análises de riscos e avaliações quantitativas, identificando detalhadamente os possíveis cenários decorrentes de eventuais fenômenos naturais, seus impactos e a capacidade de cada instalação do setor de petróleo e gás de suportar tais ocorrências. É necessário avaliar possíveis consequências, como vazamentos de produtos tóxicos, explosões, reações em cadeia e análise de vulnerabilidade, incorporando medidas concretas para sua prevenção e adequação dos planos de emergência e contingência. Além disso, é importante que as ações de adequação das medidas preventivas e mitigatórias não sejam restritas somente às instalações e atividades, mas também que considerem o entorno destas instalações. As respostas as emergências precisam envolver a população do entorno, nos moldes do Alerta e Preparação de Comunidades Locais (UNEP, 2019), a fim de minimizar os impactos de acidentes ampliados.

Por fim, recomendamos o desenvolvimento de estudos científicos específicos, que visem detalhar os riscos provenientes de eventos naturais à procedimentos e processos, quando, com este detalhamento, poderão ser consideradas quantificações mais adequadas do impacto do fenômeno atmosférico, a depender da época do ano e da localidade no território brasileiro. Também é fundamental o incentivo e fomento ao desenvolvimento tecnológico a fim de minimizar todos os riscos de acidente. Adicionalmente, ponderamos que toda a discussão de gestão deva envolver as agências reguladoras e setoriais, nacionais e internacionais, de petróleo e gás, estabelecendo diretrizes e guias para todo o setor.

Referências

- Aliaga, M. K. L. (2016). Caso SHELL/BASF: Reflexões para um novo olhar sobre os acidentes ampliados. *Revista do Tribunal Regional do Trabalho da 15ª Região*, 49, 69-95.
- Andrioni, M., Campos, C. P. de, Ferrero, B., Wainer, I., Pereira, J. E., Moita, D. M., & Bomventi, T. N. (2013). Climate Change Impacts in Offshore Operations at Campos Basin. In: *Offshore Technology Conference*, Rio de Janeiro.
- Bernamrane, Y., Wybob, J. L., & Armand, P. (2013). Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: what has changed in the use of atmospheric dispersion modeling?. *Journal of Environmental Radioactivity*, 126, 239-252.
- Bertoli, A. L., & Ribeiro, M. S. (2006). Passivo ambiental: estudo de caso da Petróleo Brasileiro S.A. - Petrobrás. A repercussão ambiental nas demonstrações contábeis, em consequência dos acidentes ocorridos. *Revista de Administração Contemporânea*, 10(2), 117-136.
- Bitencourt, D. P. (2019). Maximum wet-bulb globe temperature mapping in central-south Brazil: a numerical study. *Meteorological Applications*, 26, 385-395.
- Bitencourt, D. P., Fuentes, M. V., Maia, P. A., & Amorim, F. T. (2016). Frequência, duração, abrangência espacial e intensidade das ondas de calor no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 31, 506-517.
- Bitencourt, D. P., Fuentes, M. V., & Cardoso, C. S. (2013). Climatologia de ciclones explosivos para a área ciclogênica da América do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 28, 43-56.
- Bitencourt, D. P., Gan, M. A., Acevedo, O. C., Fuentes, M. V., Muza, M. N., Rodrigues, M. L. G., & Quadro, M. F. L. (2010). Relating winds along the southern Brazilian coast to extratropical cyclones. *Meteorological Applications*, 18, 223-229.
- Brooks, H. E. (2013). Severe thunderstorms and climate change. *Atmospheric Research*, 123, 129-138.
- Brooks, H. E., Lee, J. W., & Craven, J. P. (2003). The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data. *Atmospheric Research*, 67-68, 73-94.
- Cardoso, C. S., Bitencourt, D. P., & Mendonça, M. (2012). Comportamento do vento no setor leste de Santa Catarina sob influência de ciclones extratropicais. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 27(1), 39-48.
- Cavalcanti, I. F. A., Ferreira, N. J., Silva, M. G. A. J., & Dias, M. A. F. S. (2009). *Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 457 p.
- Ceccherini, G., Russo, S., Ameztoz, I., Romero, C. P., & Carmona-Moreno, C. (2016). Magnitude and frequency of heat and cold waves in recent decades: The case of South America. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 16, 821-831.
- Cho, J., Limb, G. J., Kimb, S. J., & Biobakute, T. (2018). Liquefied natural gas inventory routing problem under uncertain weather conditions. *International Journal of Production Economics*, 204, 18-29.
- Chou, S.C., Bustamante, J.F., & Gomes, J.L. (2005). Evaluation of Eta Model seasonal precipitation forecasts over South America. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 12, 537-555.

- Chou, S. C., Lyra, A., Mourão, C., Dereczynski, C., Pilotto, I., Gomes, J., Bustamante, J., Tavares, P., Silva, A., Rodrigues, D., Campos, D., Chagas, D., Sueiro, G., Siqueira, G., & Marengo, J. (2014). Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. *American Journal of Climate Change*, 3, 512-527.
- Chou, S.C., Lyra, A., Mourão, C., Dereczynski, C., Pilotto, I., Gomes, J., Bustamante, J., Tavares, P., Silva, A., Rodrigues, D., Campos, D., Chagas, D., Sueiro, G., Siqueira, G., Nobre, P., & Marengo, J. (2014) Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. *American Journal of Climate Change*, 3, 438-454.
- Cruz, A. M., & Krausmann, E. (2013). Vulnerability of the oil and gas sector to climate change and extreme weather events. *Climatic Change*, 121, 41-53.
- Cruz, A. M., Steinberg, L. J., & Luna, R. (2001). Identifying Hurricane-Induced Hazardous Material Release Scenarios in a Petroleum Refinery. *Natural Hazards Review*, 2(4), 203-210.
- Dias, M. (2011). An Increase in the Number of Tornado Reports in Brazil. *Weather, Climate, and Society*, 3, 209-217.
- Fernandes, L. G., Alves, M. P. A., Zamparetti, A., Fuentes, M. V., & Bitencourt, D. P. (2016). Abrangência espacial da neve em Santa Catarina, Brasil, nos dias 22 e 23 de julho de 2013. *Ciência e Natura*, 38(1), 360-370.
- Freitas, C. M., Porte, M. F. S., & Huet, M. J. M. (2000). *Acidentes Industriais Ampliados: Desafios e perspectivas para o controle e a prevenção*. Rio de Janeiro: Editora Fiocruz, 316 p.
- Freitas, C. M., Porte, M. F. S., & Gomez, C. M. (1995). Acidentes químicos ampliados: um desafio para a saúde pública. *Revista de Saúde Pública*, 29(6), 503-514.
- Fuentes, E. V., Bitencourt, D. P., & Fuentes, M. V. (2013). Análise da velocidade do vento e altura de onda em incidentes de naufrágio na costa brasileira entre os estados de Sergipe e do rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 28(3), 257-266.
- Geirinhas, J. L., Trigo, R. M., Libonati, R., Coelho, C. A., & Palmeira, A. C. (2017). Climatic and synoptic characterization of heat waves in Brazil. *International Journal of Climatology*, 38(4), 1760-1776.
- Godoy, L. A. (2007). Performance of Storage Tanks in Oil Facilities Damaged by Hurricanes Katrina and Rita. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 21(6), 441-449.
- Goliger, A. M., & Milford, R. V. (1998). A review of worldwide occurrence of tornadoes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 74-76, 111-121.
- INTERNATIONAL LABOR ORGANIZATION (ILO) - C174 - *Prevention of Major Industrial Accidents Convention* (No. 174). (2019). Recuperado de https://www.ilo.org/dyn/normlex/en/f?pNORMLEXPUB:12100:0::NO::P12100_ILO_CODE:C174
- Junior, L. M., & Lorenzi, R. L. (2007). Acidente químico com dióxido de enxofre em um populoso distrito de uma grande metrópole: Cenários de exposição a partir de um modelo Gaussiano de dispersão. *Revista Brasileira de Saúde Ocupacional*, 32(116), 31-37.
- Krausmann, E., Renni, E., Campedel, M., & Cozzani, V. (2011). Industrial accidents triggered by earthquakes, floods and lightning: lessons learned from a database analysis. *Natural Hazards*, 59, 285-300.
- Lacerda, G. B. M., Souza, C. R. G., Silva, C. & Freitas, M. A. V. (2012). Methodological proposal for assessment and adaptation in oil industry plants in Brazil's coastland. *WIT Transactions on Ecology and The Environment*, Vol 159, 79-91.
- Landucci, G., Antonioni, G., Tugnoli, A., & Cozzani, V. (2012). Release of hazardous substances in flood events: Damage model for atmospheric storage tanks. *Reliability Engineering and System Safety*, 106, 200-216.
- Moss, R.H., Edmonds, J.Á., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J.; Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P., & Wilbanks, T.J. (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, 747-756.
- Nunes, L. H., Bona, L. de, & Candido, D. H. (2011). Tornado and waterspout climatology in Brazil. In: 6th *European Conference on Severe Storms* (ECSS 2011). Palma de Mallorca, Balearic Islands, Spain.
- Pesquero, J.F., Chou, S.C., Nobre, C.A., & Marengo, J.A. (2009) Climate downscaling over South America for 1961-1970 using the Eta Model. *Theoretical and Applied Climatology*, 99, 75-93.
- Pinto Jr, O., Pinto, I. R. C. A., & Ferro, M. A. S. (2013). A study of the long-term variability of thunderstorm days in southeast Brazil. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(11), 5231-5246.
- Pinto Jr, O. (2008). An overview of cloud-to-ground lightning research in Brazil in the last two decades. In: 20th *International Lightning Detection Conference e 2nd International Lightning Meteorology Conference*. Tucson, Arizona, USA.
- Pinto, I. R. C. A., & Pinto Jr, O. (2003). Cloud-to-ground lightning distribution in Brazil. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 65, 733-737.

- Renni, E., Krausmann, E., & Cozzani, V. (2010). Industrial accidents triggered by lightning. *Journal of Hazardous Materials*, 184, 42-48.
- Rosenfeld, M. J. (2015). Cold weather can play havoc on natural gas systems. *Pipeline & Gas Journal*, 242(1), 64-69.
- Sengul, H., Santella, N., Steinberg, L. J., & Cruz, A. M. (2012). Analysis of hazardous material releases due to natural hazards in the United States. *Disasters*, 36(4), 723-43.
- Silva, R. R., & Haas, R. (2016). Ocean Global Warming Impacts on the South America Climate. *Frontiers in Earth Science*, 4(30), 1-8.
- Thaning, L., & Baklanov, A. (1997). Simulation of the atmospheric transport and deposition on a local/ mesa-and regional scale after hypothetical accidents at the Kola nuclear power plant. *The Science of the Total Environment*, 202, 199-210.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME (UNEP) - *Awareness and preparedness for emergencies at local level* (APELL) (2019). Recuperado de <https://www.unenvironment.org/explore-topics/disasters-conflicts/what-we-do/preparedness-and-response/awareness-and-preparedness>
- Van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., & Weyant, J. (2011a) A special issue on the RCPs. *Climatic Change*, 109, 1-4.
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., ... & Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic change*, 109(1), 5-31.
- Vitte, A.C. (2003). O litoral brasileiro: a valorização do espaço e os riscos socioambientais. *Territorium: Revista de Geografia Física Aplicada no Ordenamento do Território e Gestão de Riscos Naturais*, n.º 10, Minerva, 61-67.
DOI: https://doi.org/10.14195/1647-7723_10_4
- Zou, T. (2018). *Effect of global climate change projections on fatigue lifetime of permanently moored floating offshore structures*. Tese (Doutorado) - Maritime and Transport Technology, Delft University of Technology - Delft.