



DESENVOLVIMENTO DE SERVIÇOS CLIMÁTICOS PARA A ANÁLISE DE TENDÊNCIA NA FREQUÊNCIA DE EVENTOS COMPOSTOS DE EXTREMOS DE VAZÃO E NÍVEL DO MAR NO PORTO DE ITAJAÍ E POSSÍVEIS IMPACTOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

Relatório 1/3 - Plano de Trabalho

Pedro Chaffe

Elaborado por: **Pedro Luiz Borges Chaffe**

Essa publicação foi realizada por uma equipe formada por consultores independentes sob a coordenação da Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável, por meio do projeto Ampliação dos Serviços Climáticos para Investimentos em Infraestrutura (CSI).

Este projeto foi pactuado no âmbito da Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável, por meio da parceria entre o Ministério do Meio Ambiente do Brasil e a Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ), no âmbito da Iniciativa Internacional para o Clima (IKI, sigla em alemão), do Ministério Federal do Meio Ambiente, Proteção da Natureza e Segurança Nuclear (BMU, sigla em alemão).

Participaram desse processo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a Empresa Eletrosul/ Eletrobrás e a Defesa Civil de Santa Catarina.

Todas as opiniões aqui expressas são de inteira responsabilidade dos autores, não refletindo necessariamente a posição da GIZ e do MMA. Este documento não foi submetido à revisão editorial.

EQUIPE TÉCNICA - MMA

Hugo do Valle Mendes (coordenação)
Adriana Brito da Silva
Jaqueline Leal Madruça

EQUIPE TÉCNICA - GIZ

Ana Carolina Câmara (coordenação)
Eduarda Silva Rodrigues de Freitas
Pablo Borges de Amorim

EQUIPE TÉCNICA - DEFESA CIVIL/ SANTA CATARINA

Flavio Rene Brea Victoria
Frederico Moraes Rudorff

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Chou Sin Chan

EQUIPE TÉCNICA – AUTORIDADE PORTUÁRIA DE ITAJAÍ

Heder Cassiano Moritz
Ricardo José Pogakski de Amorim
Médelin Pitrez dos Santos
Amarildo Madeira
Luciano Sens
Guilherme Knoll
Joelcir Zatta

Ministério do Meio Ambiente

Esplanada dos Ministérios, Bloco B, Brasília/DF, CEP
70068-901
Telefone: + 55
61 2028-1206

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Sede da GIZ: Bonn e Eschborn
GIZ Agência Brasília
SCN Quadra 01 Bloco C Sala 1501
Ed. Brasília Trade Center - 70.711-902 Brasília/DF
T + 55-61-2101-2170
E giz-brasilien@giz.de
www.giz.de/brasil

A encargo de:

Ministério Federal do Ambiente, Proteção da Natureza e Segurança Nuclear (BMU) da Alemanha

BMU Bonn:
Robert-Schuman-Platz 3
53175 Bonn, Alemanha
T +49 (0) 228 99 305-0

Diretora de Projeto:

Ana Carolina Câmara
T:+55 61 9 99 89 71 71
T +55 61 2101 2098
E ana-carolina.camara@giz.de



Sumário

1. Contexto	2
1.1. Objetivo geral	3
2. Metodologia	3
2.1. Produto 2	3
2.2. Produto 3	3
2.3. Produto 4	4
2.4. Produto 5	5
3. Produtos e prazo estimado de entrega	6
4. Considerações finais	7
Referências Bibliográficas	8

1. Contexto

Eventos compostos são eventos extremos multivariados onde as contribuições individuais das variáveis podem não ser extremas, mas a sua ocorrência conjunta e dependente pode causar um impacto extremo (Bevacqua et al., 2017; Wahl et al 2018). Tradicionalmente, a análise de risco é feita considerando apenas uma dessas ameaças (e.g. maré alta ou evento de vazão extrema na costa, ou ainda seca ou altas temperaturas) que podem causar um impacto significativo na população em geral, na infraestrutura e nos sistemas terrestres (Zscheischler et al., 2018). Porém, as causas desses eventos extremos geralmente não são independentes e os métodos tradicionais que não consideram a dependência dessas ameaças pode levar a uma possível subestimativa do risco (AghaKouchak et al., 2018; Sadegh et al 2018; Wahl et al., 2018). Além da codependência desses eventos, existe evidência de que os eventos compostos estão aumentando em frequência e magnitude em várias áreas do mundo (Zscheischler et al., 2018; Mazdiyasi e AghaKouchak., 2015; AghaKouchak et al., 2014). Eles podem ainda causar efeitos em cascata e desastres naturais que aparentemente não tem relação podem ser agravados devido a ocorrências anteriores (AghaKouchak et al., 2018; Vahedifard et al., 2016).

Toda a infraestrutura e os ecossistemas costeiros estão suscetíveis à inundação decorrente de uma combinação de processos (i.e. vazão extrema, precipitação, nível de maré ou vento) que acontecem em diversas escalas temporais e espaciais (Moftakhari et al., 2017a,b,c; Wahl et al., 2018; Zscheischler et al., 2018). Quando um evento de maré de tempestade e chuva intensa ocorrem concomitantemente, por exemplo, o potencial de inundação de áreas costeiras é geralmente maior do que quando esses eventos ocorrem isoladamente (Moftakhari et al., 2017). A ameaça de inundação costeira pode ser influenciada pela interação entre descarga fluvial e nível do mar, assim um nível de ameaça pode ser mais frequente do que o esperado caso não se considere essa interação. O aumento do nível do mar e de eventos de vazão extrema são esperados que causem danos em estruturas costeiras que não foram projetadas considerando essas ameaças (Moftakhari et al., 2017a e b).

O aumento do nível do mar e eventos de vazão extrema são esperados que causem os maiores danos a costa. O aumento do nível do mar aumenta o nível das marés, reduz os gradientes de pressão que são importantes para ao transporte da descarga fluvial para o oceano, e aumenta também a propagação da maré e de ondas no canal fluvial. Assim, deve-se definir o impacto da inundação principalmente como uma função do nível do mar e do nível fluvial. Através de uma metodologia centrada no impacto no Porto de Itajaí, este trabalho visa entendimento de processos que controlam a ocorrência de eventos compostos de cheias. Serão identificadas a

combinação de forçantes climáticas e ameaças que combinadas causem uma mudança no risco.

1.1. Objetivo geral

Este produto contém o plano de trabalho do serviço climático a ser fornecido para analisar o risco de cheia no Porto de Itajaí. O estudo tratará da análise de tendência quanto a frequência de ocorrência de eventos extremos compostos de vazão e nível do mar que possam causar impactos à infraestrutura do Porto de Itajaí/SC. Adicionalmente, o Estudo deverá identificar as possíveis alterações na distribuição de frequência dos eventos extremos compostos acima mencionados, frente às projeções climáticas de chuva e nível do mar.

2. Metodologia

A metodologia que será utilizada para a execução deste serviço climático está dividida de acordo com os produtos solicitados, conforme mostrado nos itens a seguir.

2.1. Produto 2

O Produto 2 consiste de relatório contendo a base de dados com as tabelas de estações de vazão da bacia do Itajaí e os valores de máximas anuais. O relatório deve conter os resultados da análise exploratória, da análise de consistência e da análise de estacionariedade das séries. Serão apresentados os valores de máximas anuais de vazão da bacia do rio Itajaí. Devem ser utilizadas todas as séries de dados disponíveis no Hidroweb da Agência Nacional de Águas (ANA) para o período histórico. Deve ser feita, ainda, uma análise exploratória, uma análise de consistência e uma análise de estacionariedade das séries históricas.

2.2. Produto 3

O Produto 3 consiste de relatório contendo a base de dados com os valores de máximas do nível do mar na costa de Santa Catarina e uma série específica para a localização do Porto de Itajaí. Obtenção dos valores de máximas do nível do mar na costa de Santa Catarina e, adicionalmente, obtenção de uma série de dados especificamente para a localização do Porto. Para este, estudo devem ser utilizados um conjunto de resultados de hindcast da circulação oceânica, atmosférica e clima de ondas costeiro com resolução de 1km, obtida pelo Instituto de Hidráulica da Cantabria para toda a costa de Santa Catarina, abrangendo o período entre 1979 e 2010;

O nível total (NT) do mar resultante de condições oceanográficas na costa foi estimado como:

$$NT = MM + \eta \quad [1]$$

onde MM é a mare meteorológica, a elevação do nível da água devido ao gradiente de pressão e aos ventos que sopram águas oceânicas em direção à costa; e η é o setup, a elevação do nível de água devido à quebra das ondas próximo à desembocadura do rio. O valor de setup utilizado em [1] foi calculado a partir de uma relação com a altura significativa de onda - H_s (King et al., 1990):

$$\eta = 0.1 H_s \quad [2]$$

A série de maré meteorológica utilizada será obtida a partir da base de dados GOS (Global Ocean Surge) (CEPAL-ONU, 2015) que consiste em séries horárias de flutuações do nível do mar devido às forçantes atmosféricas. A base de dados foi gerada a partir de simulações numéricas com o modelo hidrodinâmico ROMS (Regional Ocean Model Simulation), e utilizando dados de vento da Reanálise II (NCEP/NCAR) como forçante. Por outro lado, os dados de ondas utilizados para o cálculo do setup [2], são provenientes da base de dados ROW (Regional Ocean Waves). A base de dados de ondas foi gerada a partir de simulações numéricas com o modelo SWAN (Simulating Waves Nearshore) usando dados de reanálise de ondas (WWIII) e dados de vento da reanálise Climate Forecast System (CFSR) como forçantes. As séries temporais de maré meteorológica e ondas das bases de dados GOS e ROW, compreendem um período de 32 anos (1979 a 2010) e estão disponíveis em pontos distribuídos a cada 1 km ao longo da costa de Santa Catarina. O ponto utilizado para análises apresentadas neste trabalho corresponde às coordenadas 27,71°S e 48,18°W.

2.3. Produto 4

O Produto 4 consiste de um relatório apresentando o resultado da análise da distribuição de probabilidade conjunta de eventos extremos de vazão e nível do mar, bem como os padrões atmosféricos que causam os eventos compostos. O relatório deverá contemplar o resultado da análise dos dados da Praticagem do Porto de Itajaí, assim como a estimativa do tempo de retorno de eventos históricos de falha na operação portuária e de danos estruturais.

Será feito o cálculo da distribuição de probabilidade conjunta de eventos extremos de vazão e nível do mar utilizando cópulas e análise de dependência bivariada. Devem ser calculados os eventos extremos para tempos de retorno de 5, 25, 50 e 100 anos ou outros de interesse do Porto de Itajaí. Análise dos dados da Praticagem

do Porto visando gerar a estimativa do tempo de retorno de eventos históricos que geram falha na operação portuária e danos estruturais;

A análise de cheias costeiras através de eventos compostos serão todas calculadas utilizando cópulas através da ferramenta Multivariate Copula Analysis Toolbox MCVAT (Sadegh et al., 2017, 2018). Essa ferramenta utiliza inferência Bayesiana para estimar uma grande família de cópulas assim como a incerteza relacionada as estimativas. O uso de cópulas se faz necessário na análise de risco quando pode haver mais de uma ameaça que cause o mesmo impacto (eventos compostos). Portanto, essa formulação será utilizada para identificar possíveis mudanças nos tempos de retorno de estruturas hidráulicas suscetíveis a multi ameaças.

2.4. Produto 5

O Produto 5 consiste de um relatório apresentando os resultados da análise da distribuição de probabilidade de eventos compostos para o clima futuro devido ao aumento do nível do mar médio global. Adicionalmente, o relatório deverá contemplar o cálculo da mudança de probabilidade de falha na operação do porto e de danos a estrutura, considerando os cenários de clima futuro de nível do mar médio global e diversos horizontes de projeto de acordo com as necessidades do Porto de Itajaí.

Serão realizados o cálculo da distribuição de probabilidade conjunta de eventos de vazão e de nível do mar para o clima futuro. Essa análise deve ser feita considerando a mudança na probabilidade de falha desses eventos compostos em função do aumento do nível do mar e das possíveis mudanças nos padrões atmosféricos.

Cálculo da mudança de probabilidade de falha na operação do porto e de danos a estrutura considerando os cenários de clima futuro e diversos horizontes de projeto. Essa análise deve ser integrada em uma curva de probabilidade de falha, considerando os horizontes de projeto a ser verificado com o Porto de Itajaí, para entender as ameaças futuras desses eventos;

Os fatores responsáveis pela variação do nível do mar (descarga fluvial, maré meteorológica e setup) estão fortemente relacionados com a condição atmosférica que os gera. Com base nesse fato, busca-se verificar quais são os principais padrões atmosféricos que regem a dinâmica fluvial e oceânica na costa catarinense. Este tipo de análise permite identificar os padrões responsáveis pelos casos mais extremos de inundação e aqueles que propiciam eventos compostos de descarga fluvial e elevação do nível do mar.

A identificação dos diferentes padrões atmosféricos se dará em 3 etapas: Inicialmente aplica-se uma Análise de Componentes Principais (PCA) aos campos de pressão e gradiente de pressão da zona do Atlântico Sul. Dados diários de campos de pressão provenientes da reanálise CFSR compreendendo o período de 1979 a 2010

serão utilizados nesta etapa. No seguinte passo, os dados das PCs serão agrupados em padrões atmosféricos representativos. Finalmente, conhecendo as datas de ocorrência de cada um dos eventos atmosféricos, será possível verificar os respectivos eventos de descarga e elevação do nível do mar e atribuí-los ao weather type correspondente. Mais detalhes da metodologia aplicada podem ser verificados em Rueda et al. (2016).

3. Produtos e prazo estimado de entrega

A Tabela 2 a seguir apresenta a descrição dos produtos e atividades que serão executados.

Tabela 1. Descrição dos produtos e prazo estimado de entrega.

Produto	Descrição	Prazo Estimado De Entrega	Formato / Especificações
Produto 2	Relatório contendo a base de dados com as tabelas de estações de vazão da bacia do Itajaí e os valores de máximas anuais. O relatório deve conter os resultados da análise exploratória, da análise de consistência e da análise de estacionariedade das séries.	30.05.2019	Versão digital, em formato aberto (.doc), com redação em português fluente e revisada. Resultados em formato digital (.xls)
Produto 3	Relatório contendo a base de dados com os valores de máximas do nível do mar na costa de Santa Catarina e uma série específica para a localização do Porto de Itajaí.	30.05.2019	Versão digital, em formato aberto (.doc), com redação em português fluente e revisada. Resultados em formato digital (.xls)
Produto 4	Relatório apresentando o resultado da análise da distribuição de probabilidade conjunta de eventos extremos de vazão e nível do mar, bem como os padrões atmosféricos que causam os eventos compostos. O relatório deverá contemplar o resultado da análise dos dados da Praticagem do Porto de Itajaí, assim como a estimativa do tempo de retorno de eventos históricos de falha na operação portuária e de danos estruturais.	15.06.2019	Versão digital, em formato aberto (.doc), com redação em português fluente e revisada. Resultados em formato digital (.xls)
Produto 5	Relatório apresentando os resultados da análise da distribuição de probabilidade de eventos compostos para o clima futuro devido ao aumento do nível do mar médio global. Adicionalmente, o relatório deverá contemplar o cálculo da mudança de probabilidade de falha na operação do porto e de danos a estrutura, considerando os cenários de clima futuro de nível do mar médio global e diversos horizontes de projeto de acordo com as necessidades do Porto de Itajaí.	30.06.2019	Versão digital, em formato aberto (.doc), com redação em português fluente e revisada. Resultados em formato digital (.xls)

4. Considerações finais

Espera-se que a partir desta metodologia possa-se inferir como as mudanças climáticas poderão alterar a frequência e intensidade de danos às infraestruturas do Porto de Itajaí.

Referências Bibliográficas

AGHAKOUCHAK, A.; HUNING, L.; CHIANG, F.; SADEGH, M.; VAHEDIFARD, F.; MAZDIYASNI, O.; MOFTAKHARI, H.; MALLAKPOUR, I. How do Natural Hazards Cascade to Cause Disasters? **Nature**, 561, p. 458-460, 2018.

CEPAL-ONU. Dinámicas, tendencias y variabilidad climático. Documento 1 del estudio de "Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe", 2015.

HALLEGATTE, S.; GREEN, C.; NICHOLLS, R.J.; CORFEE-MORLOT, J. Future flood losses in major coastal cities. **Nature Climate Change**, 3, 2013.

HANSON, S.; NICHOLLS, R.; RANGER, N.; HALLEGATTE, S.; CORFEE-MORLOT, J.; CHATEAU, J. A global ranking of port cities with high exposure to climate extremes. **Climatic Change**, 104, 2011.

KING, B.A., BLAKLEY, M.W.L., CARR, A.P., HARDCASTLE, P.J. (1990) Observations of wave induced setup on a natural beach. *Journal of Geophysical Research*, 95(C12): 22289-222-97.

LUKE, A., SANDERS, B. F., GOODRICH, K. A., FELDMAN, D. L., BOUDREAU, D., EGUIARTE, A., SERRANO, K., REYES, A., SCHUBERT, J. E., AGHAKOUCHAK, A., BASOLO, V., AND MATTHEW, R. A.: Going beyond the flood insurance rate map: insights from flood hazard map co-production, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18, 1097-1120, <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1097-2018>, 2018.

MOFTAKHARI, H. M.; AGHAKOUCHAK, A.; SANDERS, B. F.; ALLAIRE, M.; MATTHEW, R. A. What is Nuisance Flooding? Defining and Monitoring an Emerging Challenge. **Water Resources Research**, v. 54, p. 4218-4227, 2018.

MOFTAKHARI, H. M.; AGHAKOUCHAK, A.; SANDERS, B. F.; MATTHEW, R. A. Cumulative Hazard: The Case of Nuisance Flooding, **Earth's Future**, v. 5, n. 2, p. 214-223, 2016.

MOFTAKHARI, H. M.; AGHAKOUCHAK, A.; SANDERS, B. F.; MATTHEW, R. A.; MAZDIYASNI, O. Translating Uncertain Sea Level Projections into Infrastructure Impacts Using a Bayesian Framework. **Geophysical Research Letters**, v. 44, n. 23, p. 11914-11921, 2017.

MOFTAKHARI, H. M.; SALVADORI, G.; AGHAKOUCHAK A.; SANDERS, B. F.; MATTHEW, R. A. Compounding Effects of Sea Level Rise and Fluvial Flooding. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 114, n. 37, 9785-9790, 2017.

MOFTAKHARI, H. M.; SCHUBERT, J. E.; AGHAKOUCHAK A.; MATTHEW, R. A.; SANDERS, B. F. Linking statistical and hydrodynamic modeling for compound flood hazard assessment in tidal channels and estuaries. **Advances in Water Resources**, v. 128, 2019.

RUEDA, A., CAMUS, P., TOMÁS, A., VITOUSEK, S, MENDEZ, F.J. (2016) A multivariate extreme wave and storm surge climate emulator based on weather patterns. *Ocean Modelling*, 104: 242-251.

SADEGH, M.; MOFTAKHARI, H. M.; GUPTA, H. V.; RAGNO, E.; MAZDIYASNI, O.; SANDERS, B. F.; MATTHEW, R. A.; AGHAKOUCHAK, A. Multi-Hazard Scenarios for Analysis of Compound Extreme Events. **Geophysical Research Letters**, v. 45, p. 5470-5480, 2018.

SADEGH, M., E. RAGNO, AND A. AGHAKOUCHAK. Multivariate Copula Analysis Toolbox (MvCAT): Describing dependence and underlying uncertainty using a Bayesian framework, **Water Resour. Res.**, 53, 5166–5183, 2017.

VOUSDOUSKAS, M.I.; MENTASCHI, L.; VOUKOUVALAS, E.; BIANCHI, A.; DOTTORI, F.; FEYEN, L. Climatic and socioeconomic controls of future coastal flood risk in Europe. **Nature Climate Change**, 8, 2018.

WAHL, T.; JAIN, S.; BENDER, J.; MEYERS, S.D.; LUTHER, M.E. Increasing risk of compound flooding from storm surge and rainfall for major US cities. **Nature Climate Change**, 5, 2015.

ZSCHEISCHLER, J.; WESTRA, S.; VAN DER HURK, B.J.J.M.; SENEVIRATNE, S.I.; WARD, P.J.; PITMAN, A.; AGHAKOUCHAK, A.; BRESCH, D.N.; LEONARD, M.; WAHL, T.; ZHANG, X. Future climate risk from compound events. **Nature Climate Change**, 8, 2018.