

## XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### USO DE CÓPULAS E WEATHER TYPES PARA ANÁLISE DE EVENTOS COMPOSTOS DE CHEIA NA BACIA DO ITAJAÍ

*Pedro Luiz Borges Chaffe<sup>1</sup> ; Paula Gomes da Silva<sup>2</sup>, Paula Cunha David<sup>3</sup>, Antônio Fernando Harter Fetter Filho<sup>4</sup>, Fernando Javier Mendez<sup>5</sup> & Antonio Henrique da Fontoura Klein<sup>6</sup>*

**RESUMO** – 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. 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. 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. 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 na infraestrutura, este trabalho visa o entendimento de processos que controlam a ocorrência de eventos compostos na costa. Neste trabalho nós utilizamos a Multivariate Copula Analysis Toolbox (MvCAT) para analisar uma série de 32 anos (1979-2010) de dados de chuva, vazão e nível do mar na bacia do Itajaí. Foram determinados quais as estações e cópulas melhor descrevem os eventos compostos na parte costeira da bacia do Itajaí.

**ABSTRACT**– Compound events are multivariate extremes where the individual occurrences might not be an extreme in itself, however the co-occurrence of the several hazards may cause an extreme impact. The coastal ecosystems and infrastructure are susceptible to coastal flooding due to a combination of hazards (i.e. extreme discharge, precipitation, storm surges or wind) that may happen in several temporal and spatial scales. When storm surge and intense precipitation co-occur, for example, the probability of coastal floods are generally higher than if they occurred independently. Therefore, we should define the flood probability as a function of sea and river water levels. By using a impact centered methodology, we analyzed processes that control the occurrence of compound events in the Santa Catarina coastal area. We used the Multivariate Copula Analysis Toolbox (MvCAT) with 32 years (1979-2010) of precipitation, streamflow and sea water level data in the Itajaí river basin.

**Palavras-Chave** – Evento composto, cheias, Itajaí

1) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, pedro.chaffe@ufsc.br

2) Programa de Pós-Graduação em Oceanografia – PPGOCEANO, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, silvapgomes@gmail.com

3) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental - PPGEA, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, paulacunhadavid@gmail.com

4) Coordenadoria do Curso de Graduação em Oceanografia, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, antonio.fetter@ufsc.br

5) Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Cantabria, fernando.mendez@unican.es

6) Coordenadoria do Curso de Graduação em Oceanografia, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, antonio.klein@ufsc.br

## INTRODUÇÃO

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; Mazdidasni 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 na infraestrutura e ecossistema costeiro, este trabalho visa entendimento de processos que controlam a ocorrência de eventos compostos na costa da cidade de Itajaí. São identificadas as combinação de forçantes climáticas e ameaças que combinadas causem uma mudança no risco.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Dados de Chuva e Vazão

Foram utilizados dados de vazão da estação fluviométrica de Blumenau (Figura 1) do período de 1979 a 2010. Os dados de chuva considerados foram os da estação fluviométrica com código 02649007.

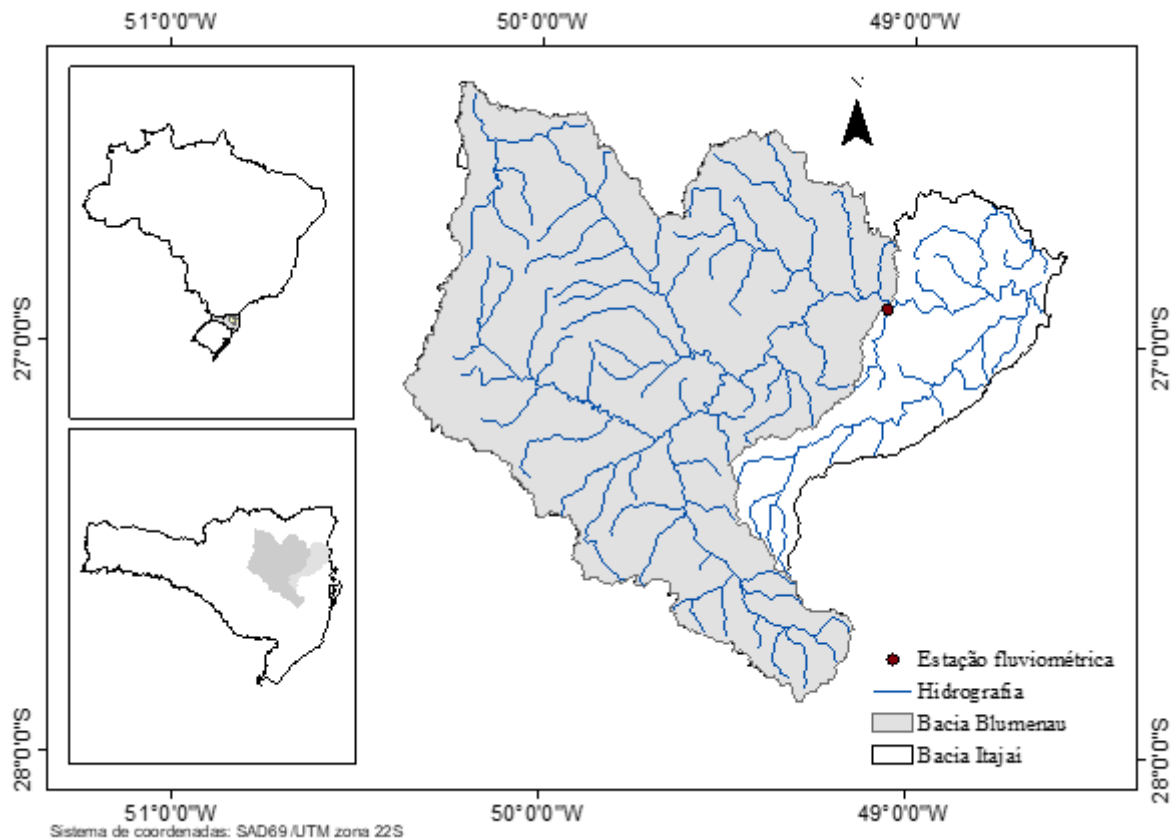


Figura 1 – Bacia do Itajaí com a delimitação e localização da estação fluviométrica de Blumenau.

### Nível total do mar

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  $\eta$  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):

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

A série de maré meteorológica utilizada aqui foi 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.

### **Padrões atmosféricos (Weather Types)**

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, buscou-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 deu em 3 etapas: Inicialmente aplicou-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 foram utilizados nesta etapa. 86 componentes principais (PCs) mostraram explicar 95% da variância dos dados. No seguinte passo, os dados das 86 PCs foram congregados em 36 grupos, representativos de 36 padrões atmosféricos. Finalmente, conhecendo as datas de ocorrência de cada um dos eventos atmosféricos, foi 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).

### **Análise de eventos compostos**

A análise de cheias costeiras através de eventos compostos serão todas calculados utilizando cópulas através da ferramenta Multivariate Copula Analysis Toolbox MVCAT (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.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Seleção de máximas anuais

Foram utilizados os dados de máximos anuais de chuva para selecionar o máximo nível de maré meteorológica na semana do evento – *Caso 1*, e os dados de máximo anual de vazão – *Caso 2* (, Figura 1)

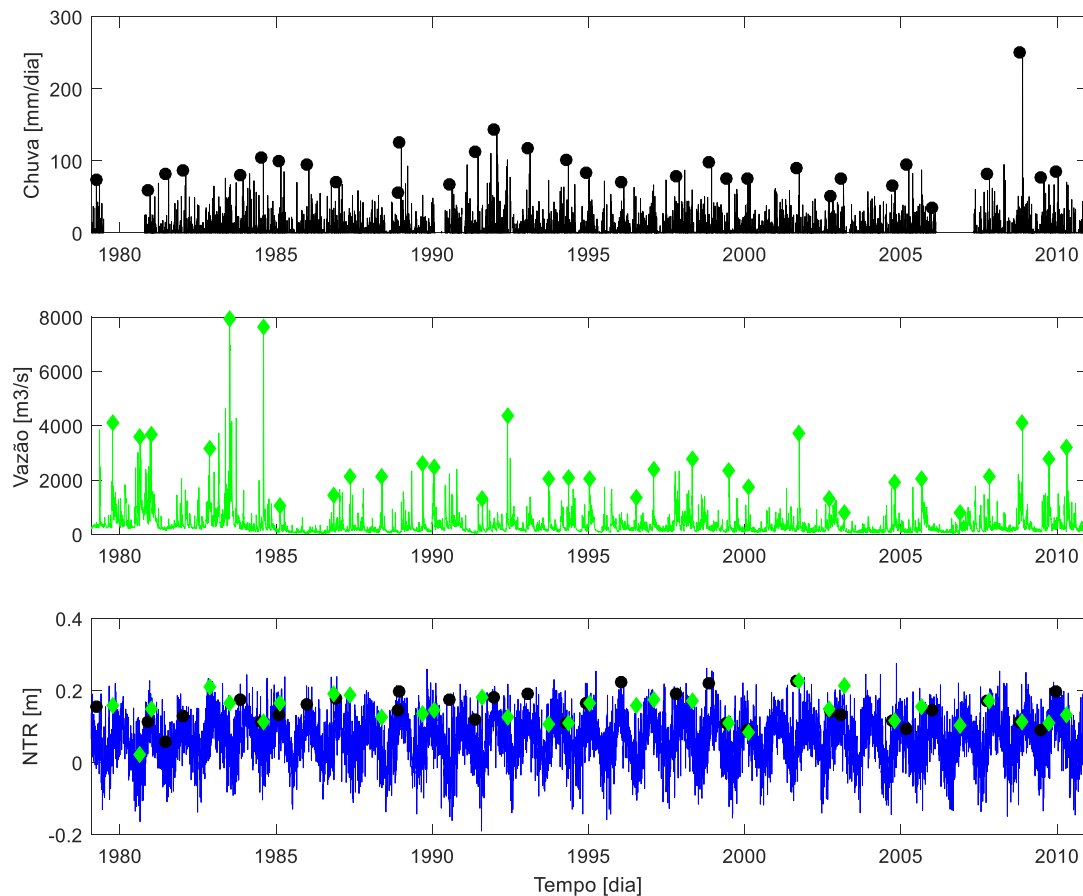


Figura 2 – Seleção de máximas anuais de chuva, vazão e maré meteorológica (NTR). A NTR máxima anual foi selecionada com base na máxima chuva anual (Caso 1, círculo preto) e com base na máxima vazão anual (Caso 2, diamante verde).

### Análise dos padrões atmosféricos

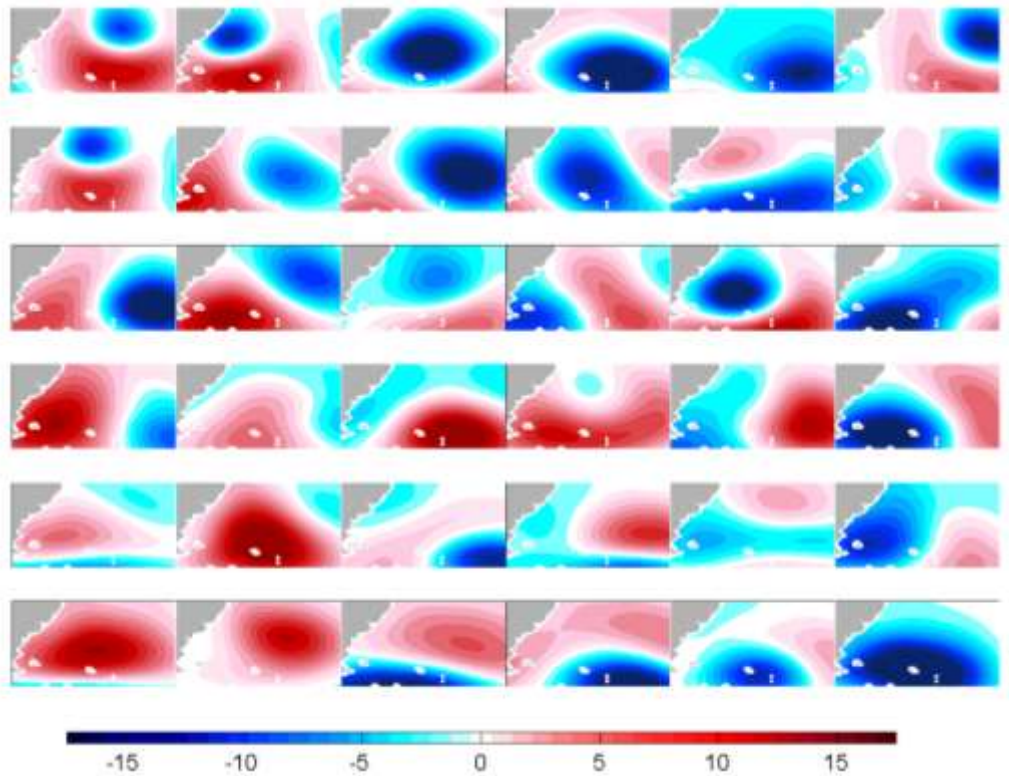


Figura 3 – Os 36 padrões atmosféricos (WT) selecionados. A escala representa anomalia de pressão no mar.

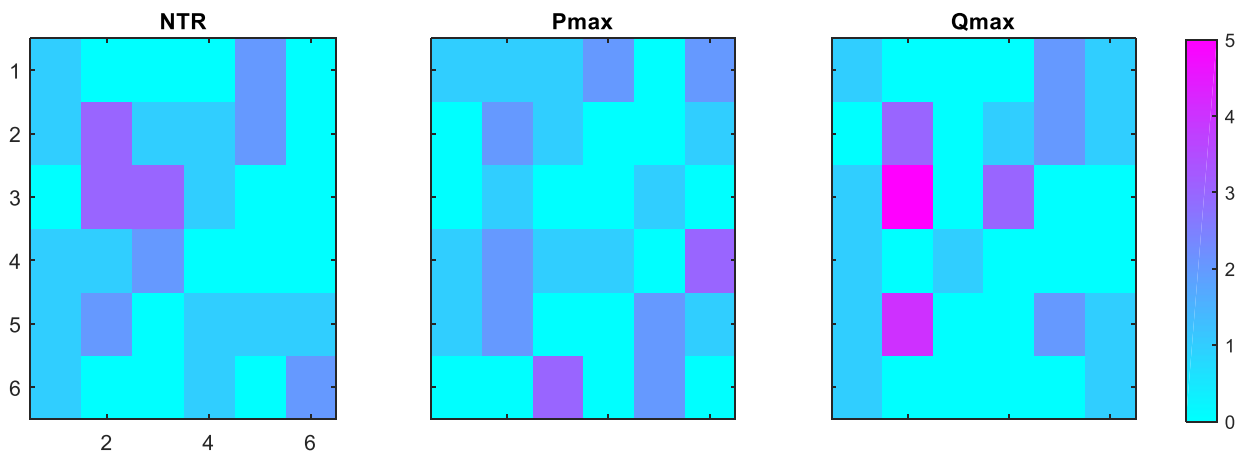


Figura 4 – Frequência de cocorrência de WT de acordo com as máximas de maré meteorológica (à esquerda), precipitação (ao centro) e vazão (à direita). Cada célula corresponde exatamente aos padrões da Figura 3.

## Análise de eventos compostos

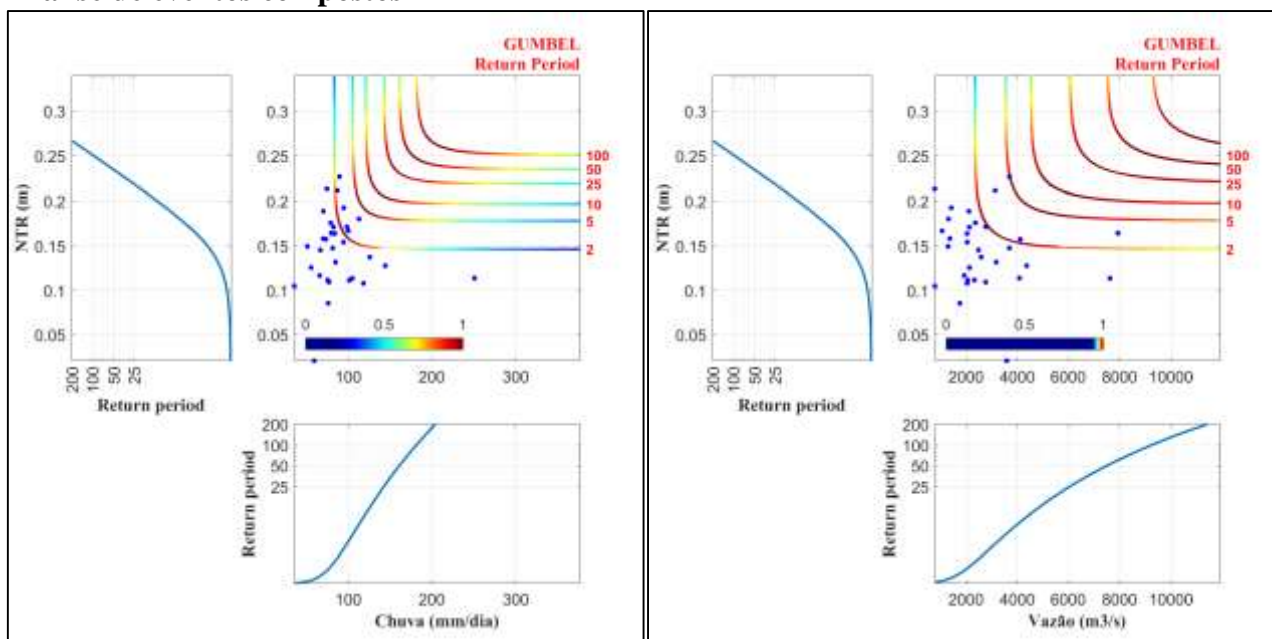


Figura 5 – Probabilidade marginal e relação bivariada entre chuva máxima anual e nível de maré (*Caso 1*, à esquerda) e vazão máxima e nível de maré (*Caso 2*, à direita).

## CONCLUSÕES

Neste trabalho foi utilizado a Multivariate Copula Analysis Toolbox (MvCAT) para analisar uma série de 32 anos (1979-2010) de dados de chuva, vazão e nível do mar na bacia do Itajaí. Identificou-se que os padrões de maré meteorológica, chuva e vazão estão correlacionados com weather types específicos. Porém, os pares para análise de eventos compostos de máximas anuais de chuva e maré meteorológica (*Caso 1*) e vazão e maré meteorológica (*Caso 2*) tiveram baixa correlação. Uma das possíveis causas dessa baixa relação pode ser a curta série de dados ou o uso de dados de maré de reanálise. Para os próximos passos, seria interessante a análise de eventos compostos considerando as estações do ano e também dados de marégrafo.

## REFERÊNCIAS

- 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.; HALLEGATE, 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.

**AGRADECIMENTOS** - O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 88881146046201701.