

Universidade Federal de Santa Catarina  
Centro Tecnológico  
Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental

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

**Produto 4 – Relatório de resultados da análise de distribuição de  
probabilidade conjunta de eventos extremos de vazão e nível do mar e  
padrões atmosféricos que causam os eventos compostos.**

Pedro Luiz Borges Chaffe

Paula Gomes da Silva

Florianópolis, 30 de outubro de 2019

## Sumário

1. Introdução.....	2
2. Objetivo.....	2
3. Metodologia.....	2
3.1. Análise de extremos.....	3
3.2. Padrões atmosféricos (weather types).....	5
3.3. Análise dos eventos de fechamento da barra.....	6
4. Resultados.....	7
4.1. Análise de extremos.....	7
4.1.1. Nível total do mar.....	7
4.1.2. Probabilidade de ocorrência conjunta.....	8
4.2. Análise por padrões atmosféricos.....	12
4.2.1. Padrões atmosféricos (Weather Types).....	12
4.2.2. Características da vazão relacionada aos diferentes padrões atmosféricos.....	14
4.2.3. Características do nível total do mar relacionado aos diferentes padrões atmosféricos.....	14
4.2.4. Características das ondas relacionadas aos diferentes padrões atmosféricos.....	16
4.2.5. Efeito na operacionalidade do porto (eventos de fechamento da barra).....	18
5. Conclusões e considerações finais.....	20
6. Referências.....	21

## 1. Introdução

Os eventos de inundação em zonas estuarinas (como a desembocadura do rio Itajaí) estão normalmente associados à ocorrência conjunta de extremos de nível total do mar (resultante da soma das marés meteorológicas com o setup das ondas) e descarga fluvial. A análise de probabilidade de ocorrência conjunta destas variáveis é, por tanto, essencial para verificação de impactos às atividades portuárias. Valores de nível e descarga relacionados a eventos de baixa probabilidade de ocorrência e alto período de retorno podem ser identificados neste tipo de análise e, com base nos resultados, é possível determinar um limiar a partir do qual a autoridade portuária deve adotar ações de resposta para prevenir ou reduzir os efeitos da elevação/redução do nível da água. Além disso, a verificação da tendência dos valores extremos permite inferir sobre o aumento/redução da ocorrência dos mesmos ao longo dos anos.

## 2. Objetivo

Este documento tem por objetivo apresentar os resultados das análises de extremos de nível total do mar e descarga fluvial, a probabilidade de ocorrência conjunta dos eventos extremos combinados por tais componentes oceanográficas e fluviais. As componentes do nível total do mar e a descarga fluvial estão relacionadas com os padrões atmosféricos que antecedem a observação das variações de nível na costa. Por essa razão, também se apresenta, aqui, uma análise baseada nos principais padrões atmosféricos que desencadeiam estes eventos.

Cabe destacar que o foco do presente estudo foi a análise de eventos extremos de nível do mar e vazão. No entanto, por solicitação da autoridade portuária, também se apresentam os resultados de uma breve análise de dados não extremos relacionados a casos de fechamento barra do Porto de Itajaí, e uma análise de dados de ondas que afetam à costa da cidade.

## 3. Metodologia

A metodologia aplicada aqui consistiu em três etapas distintas:

- i) Análise de extremos: Nesta etapa realizou-se a análise dos eventos extremos de nível total do mar e descarga, com a distribuição de probabilidade (individual e conjunta) dos mesmos. Desta análise pode-se obter um limiar de nível, vazão e nível-vazão, a partir da seleção de um período de retorno determinado previamente. A análise de cheias costeiras através de eventos compostos serão todas calculados 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 ameaças múltiplas.

ii) Análise por padrões atmosféricos: Na segunda etapa, determinaram-se os principais padrões atmosféricos responsáveis pelas variações de nível total do mar e vazão, conforme apresentado por Rueda et al. (2016). Os padrões associados às máximas foram então identificados. Adicionalmente, se verificou quais as características das ondas e vazão resultantes dos diferentes padrões atmosféricos. Neste caso, todos os dados (extremos e não extremos) foram utilizados nas análises.

iii) Análise dos eventos de fechamento da barra: Com o intuito de identificar casos de ondas e vazão que ocasionam falha na operacionalidade do porto (valores que nem sempre são considerados extremos), verificaram-se os padrões atmosféricos relacionados aos eventos de fechamento da barra por ondas ou corrente.

Detalhes da metodologia aplicada em cada etapa serão apresentados a seguir.

### ***3.1. Análise de extremos***

A análise de extremos foi realizada com base nos valores máximos anuais de nível total do mar e descarga do rio. A Figura 1 mostra os passos da metodologia aplicada nesta etapa.

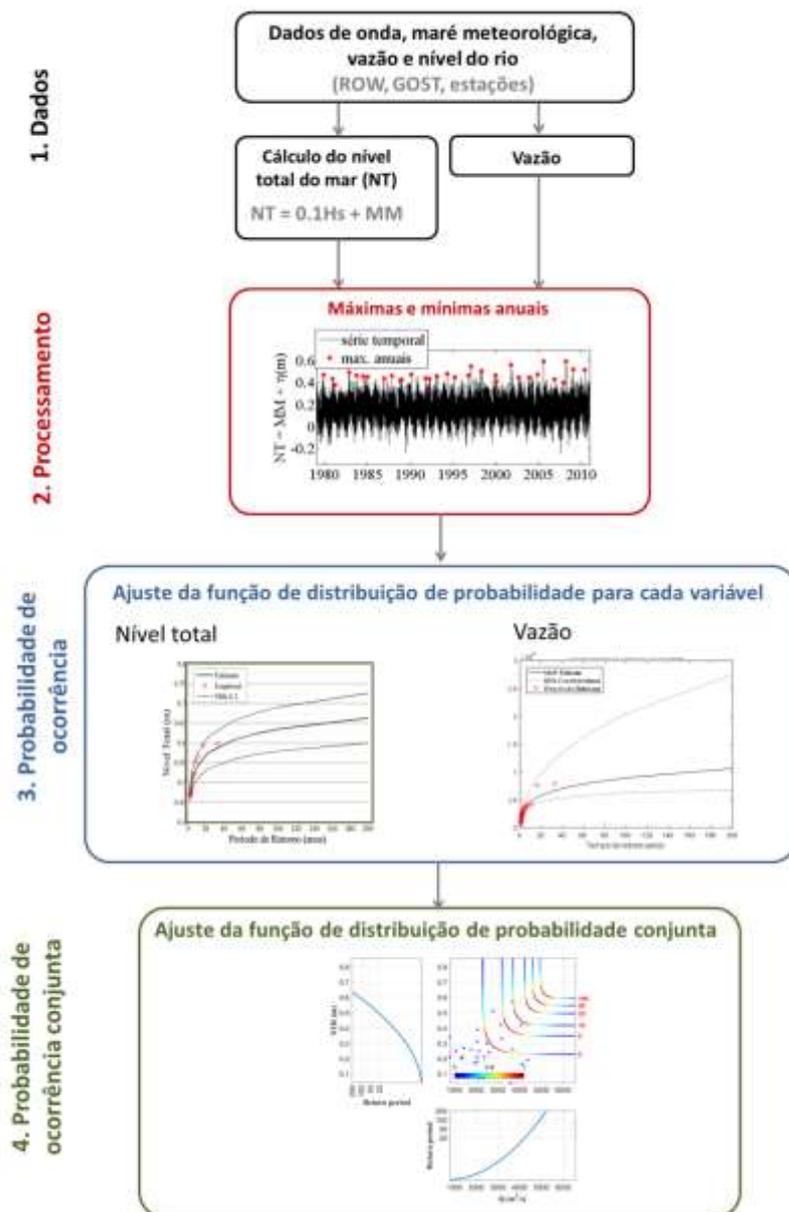


Figura 1: Metodologia aplicada para análise de extremos.

Os valores máximos observados em cada ano foram identificados e selecionados nas séries de dados diários. As séries de máximas anuais foram então ajustadas a uma distribuição de probabilidade de extremos, na qual se identificaram os valores de nível total e vazão relacionados aos diferentes períodos de retorno/probabilidade de ocorrência.

A análise de probabilidade de ocorrência conjunta foi feita utilizando MCVAT (Sadegh et al., 2017, 2018), os valores extremos de vazão e nível total foram ajustados a uma distribuição de extremos, e período de retorno associado à ocorrência conjunta de ambas variáveis foi verificado.

### 3.2. Padrões atmosféricos (weather types)

Dados de pressão ao nível do mar (*sea level pressure* - SLP) e gradiente de pressão ao nível do mar (SLPG) da reanálise *Climate Forecast System Reanalysis* do *National Centers for Environmental Prediction (NCEP)* foram utilizados para identificar os principais padrões atmosféricos atuantes sobre Atlântico Sul e América do Sul. Tais padrões estão relacionados com ventos e com o transporte de umidade no ar sobre a área de estudo que, por sua vez, são responsáveis pela geração de ondas, maré meteorológica e precipitação. A Figura 2 mostra os passos da metodologia aplicada para obtenção dos padrões atmosféricos. Detalhes da metodologia estão descritos a seguir.

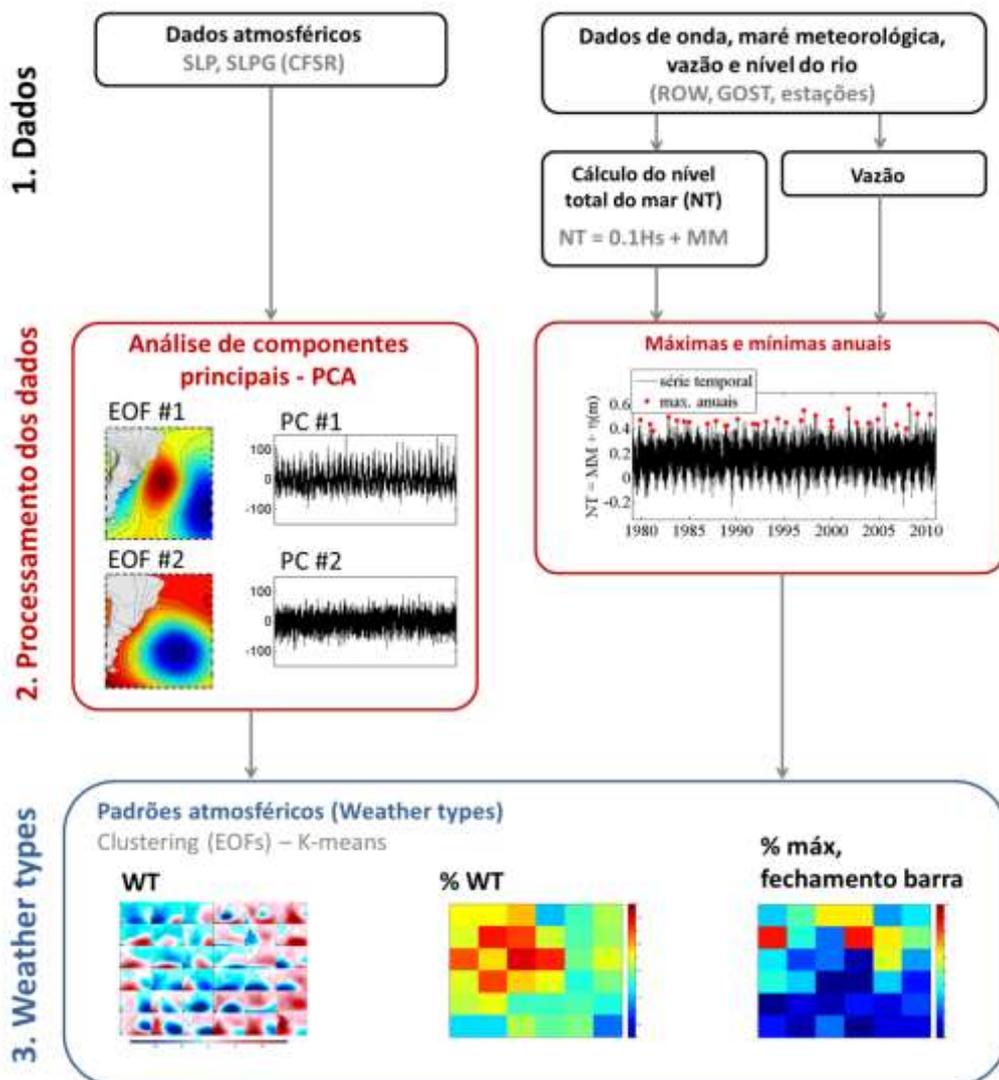


Figura 2: Metodologia aplicada para a análise das máximas com base nos padrões atmosféricos.

Inicialmente, aplicou-se uma Análise de Componentes Principais (*Principal Component Analysis* – PCA) aos dados de pressão e gradiente de pressão ao nível do mar, com o objetivo

de reduzir a dimensionalidade dos mesmos aos principais modos de oscilação. Das componentes obtidas da PCA, se selecionaram aquelas que representam 95% da variância dos dados para serem utilizadas nas análises subsequentes. Neste caso, um total de 251 PCs, e as respectivas EOFs foram utilizados (Figura 3).

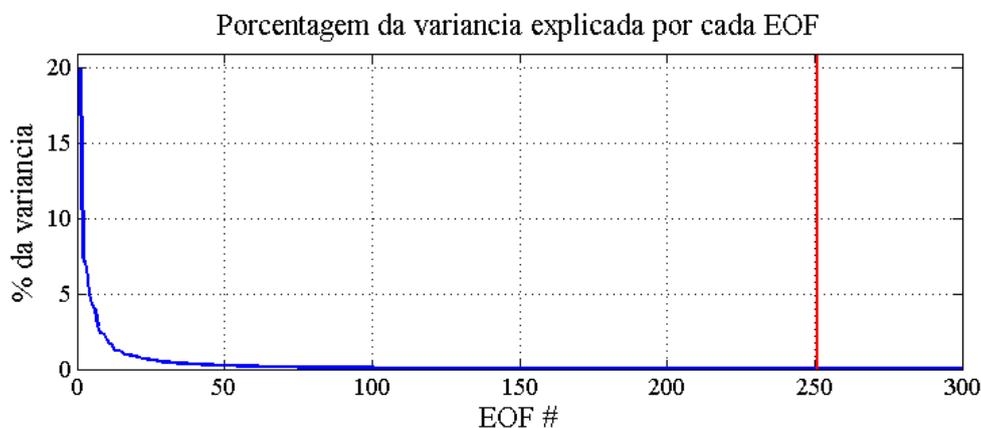


Figura 3: Variância explicada por cada EOF da análise. A linha vermelha indica o limite sob o qual as EOFs são capazes de explicar 95% da variância dos dados de pressão e gradiente de pressão.

As 251 PCs foram utilizadas como variáveis para agrupar os dados em 36 grupos de padrões atmosféricos semelhantes, também chamados de *weather types*. Para a análise de agrupamento aplicou-se a técnica K-means que reúne cada dia da série de dados atmosféricos em n (aqui n=36) grupos de padrões semelhantes entre si. A semelhança é verificada pela distância euclidiana entre o dado e o centróide do grupo (menor distância euclidiana). Finalmente, verificou-se qual o padrão responsável pela geração dos eventos extremos de nível total e vazão.

### 3.3. Análise dos eventos de fechamento da barra

Por fim, analisaram-se também os valores de nível total e vazão que ocorriam nos dias em que o Porto registrou fechamento da barra por ondas e correntes. Embora o foco principal do trabalho apresentado aqui tenha sido a análise de eventos extremos, sabe-se que eventos de fechamento da barra nem sempre estão relacionados com condições tão extraordinárias. Tais eventos afetam as atividades portuárias e, por essa razão, optou-se por ampliar as análises com o objetivo de se ter uma percepção inicial das condições que geram ocasionam a falha das atividades. A análise foi realizada para o período em que a série de registros de fechamento e a série de dados de nível e vazão coincidem, entre 01/01/2010 a 31/12/2010. Os eventos de fechamento foram relacionados ao padrão atmosférico no dia da interrupção das operações. Desta forma foi possível identificar aqueles padrões atmosféricos que estão relacionados às falhas na operacionalidade do Porto.

## 4. Resultados

### 4.1. Análise de extremos

#### 4.1.1. Nível total do mar

Da mesma forma, os máximos anuais de nível total do mar foram identificados na série de NT (Figura 4). Os valores estão apresentados na Tabela 1.

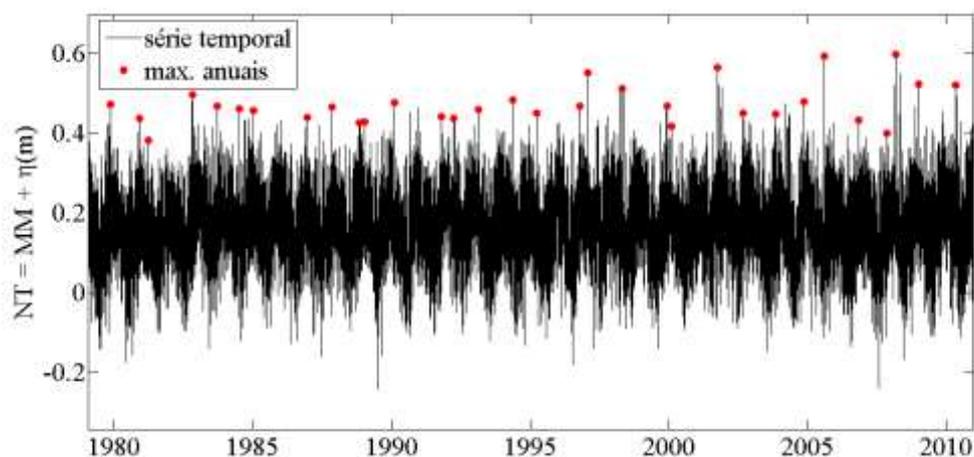


Figura 4: Série de nível total do mar para o período de 1979 a 2010. Os pontos vermelhos indicam os valores máximos anuais.

Tabela 1: Máximos anuais de nível total do mar.

Máximos Anuais			
Ano	Mês	Dia	NT (m)
1979	11	10	0.47
1980	12	2	0.44
1981	3	29	0.38
1982	11	1	0.50
1983	9	23	0.47
1984	7	3	0.46
1985	1	5	0.46
1986	12	13	0.44
1987	11	4	0.47
1988	10	29	0.43
1989	1	6	0.43
1990	2	12	0.48
1991	10	13	0.44
1992	3	23	0.44
1993	2	16	0.46
1994	5	12	0.48
1995	3	30	0.45
1996	10	10	0.47
1997	1	25	0.55

1998	4	28	0.51
1999	12	13	0.47
2000	2	1	0.42
2001	10	1	0.57
2002	9	6	0.45
2003	11	12	0.45
2004	11	10	0.48
2005	8	10	0.59
2006	11	5	0.43
2007	11	9	0.40
2008	3	1	0.60
2009	1	3	0.52
2010	5	12	0.52

A série de valores máximos foram ajustadas a uma função de distribuição de probabilidades, onde os níveis relacionados a diferentes períodos de retorno puderam ser verificados (Figura 5). Os resultados do ajuste indicaram valores de níveis máximos iguais a 0.57 m, 0.61 m, 0.63 m para os períodos de retorno de 20, 50 e 100 anos, respectivamente.

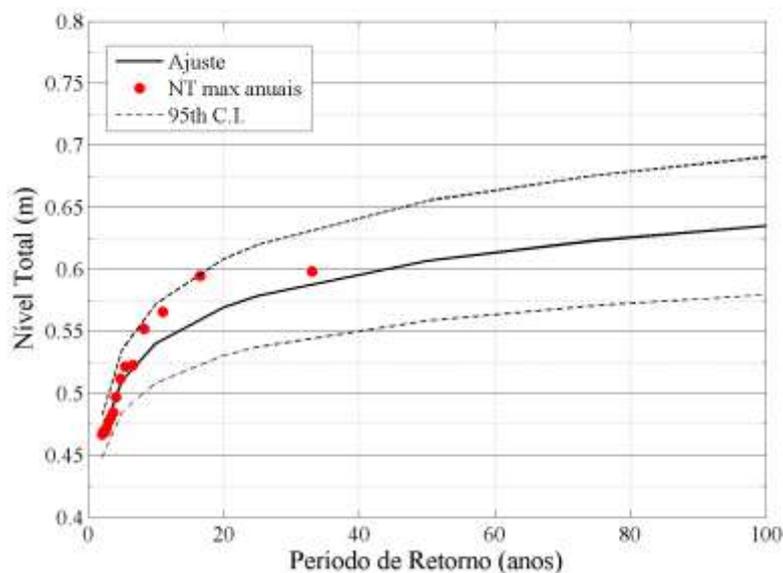


Figura 5: Distribuição de probabilidades dos máximos anuais de NT.

#### 4.1.2. Probabilidade de ocorrência conjunta

Fez-se a análise de probabilidade conjunta utilizando os dados de máximas de vazão (Q) da estação de Blumenau (Figura 6 e 7) e selecionado-se os dados de máxima de Nível Total Residual (NTR) para os três dias em torno da máxima de vazão. A cópula ajustada considerando também os dados das grandes cheias de 1983 e de 1984 acabou mostrando uma correlação negativa e optou-se por descartar esses dados (círculo vermelho na Figura 6).

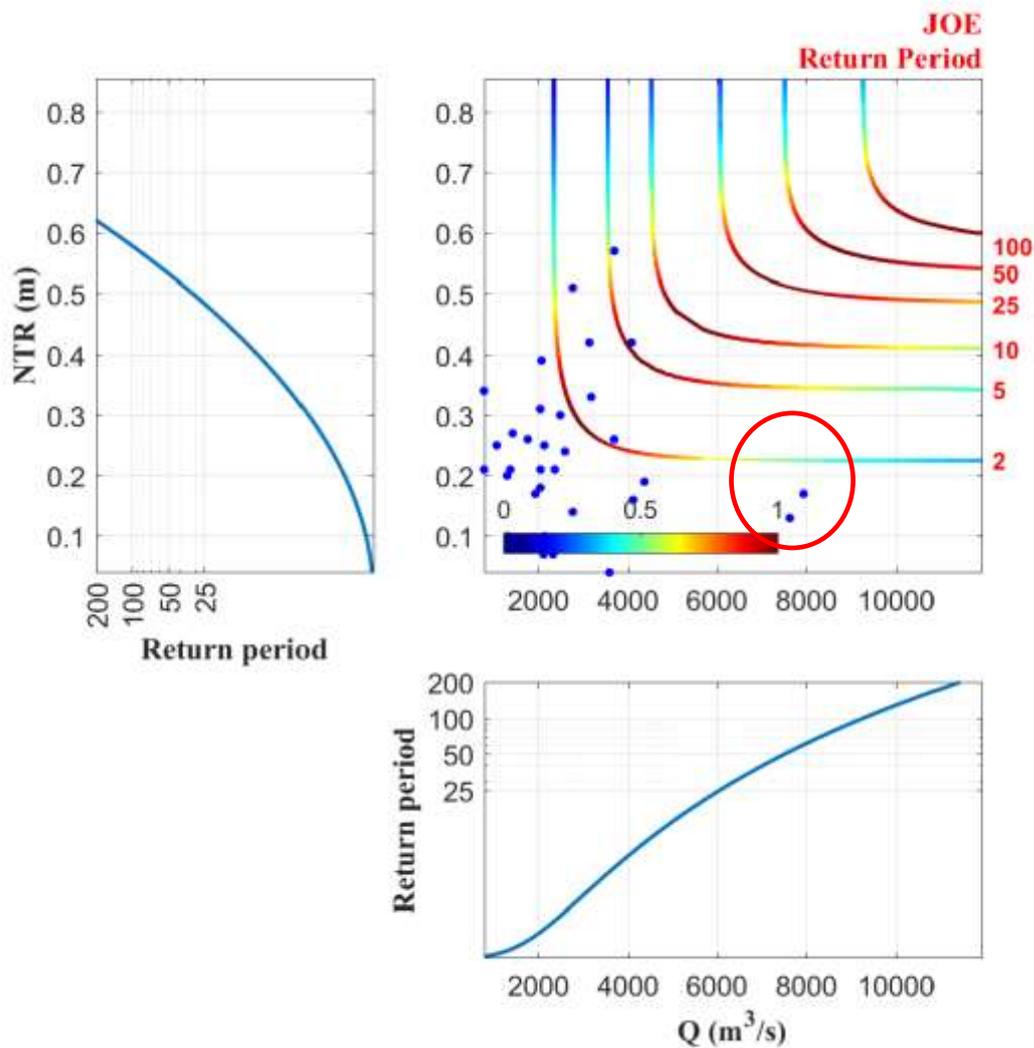


Figura 6: Cópula de Joe ajustada para as séries de Nível Total Residual (NTR) e Vazão máxima anual (Q) para a estação de Blumenau. Os dados circulos em vermelho correspondem as grandes cheias de 1983 e 1984.

Na Figura 7 pode-se observar a cópula ajustada para as máximas da estação de Blumenau desconsiderando as grandes cheias da Bacia do Itajaí. São apresentados os diversos níveis de retorno relacionados aos tempos de retorno. As setas azuis indicam o nível de retorno para uma cheia de 50 anos de tempo de retorno considerando as ameaças como eventos independentes. Se considerarmos a dependência do NTR e da vazão máxima, vê-se que o nível de retorno fica acima daquele estimado com o método tradicional onde cosidera-se as ameaças independentes.

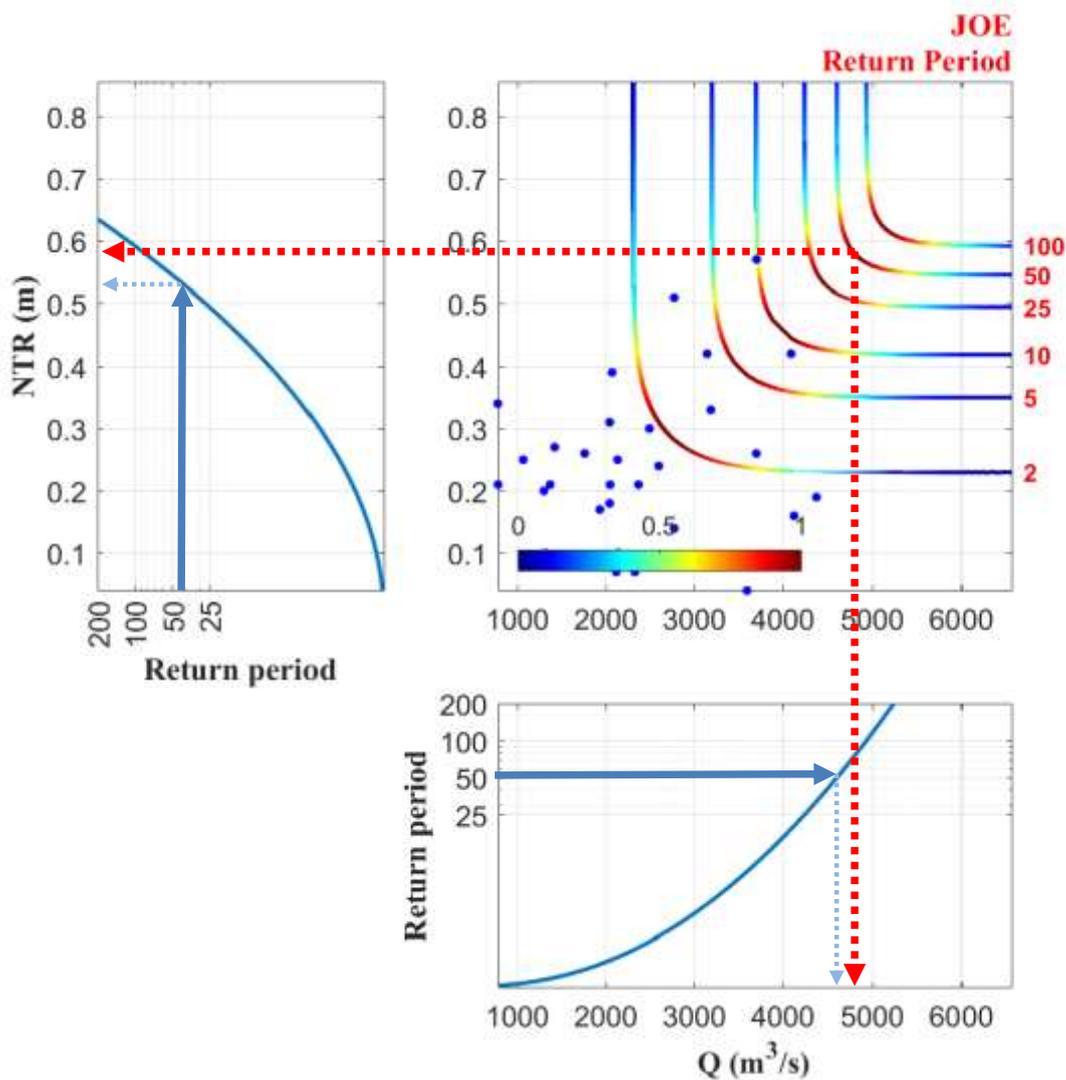


Figura 7: Cópula de Joe ajustada para as séries de Nível Total Residual (NTR) e Vazão máxima anual (Q) para a estação de Blumenau desconsiderando as grandes cheias de 1983 e 1984. As setas em azul indicam a Q e NTR para o tempo de retorno de 50 anos sem considerar a dependência das séries. As setas em vermelho representam a Q e NTR considerando a dependência das séries. . Pode-se observar uma possível subestimativa das cheias de projeto quando considera-se a independência das ameaças de nível e vazão.

Na Figura 8 tem-se a cópula ajustada utilizando a série de máximas anuais de Q da estação de Brusque e as NTR correspondentes. Na Figura 9 optou-se por excluir as grandes cheias da Bacia do Itajaí pois elas acabavam gerando uma correlação negativa com o sinal do nível do mar. As setas azuis indicam o nível de retorno para uma cheia de 50 anos de tempo de retorno considerando as ameaças como eventos independentes. Assim como no caso da estação de Blumenau, se considerarmos a dependência do NTR e da vazão máxima da estação de Brusque, vê-se que o nível de retorno fica acima daquele estimado com o método tradicional onde considera-se as ameaças independentes (Figura 9).

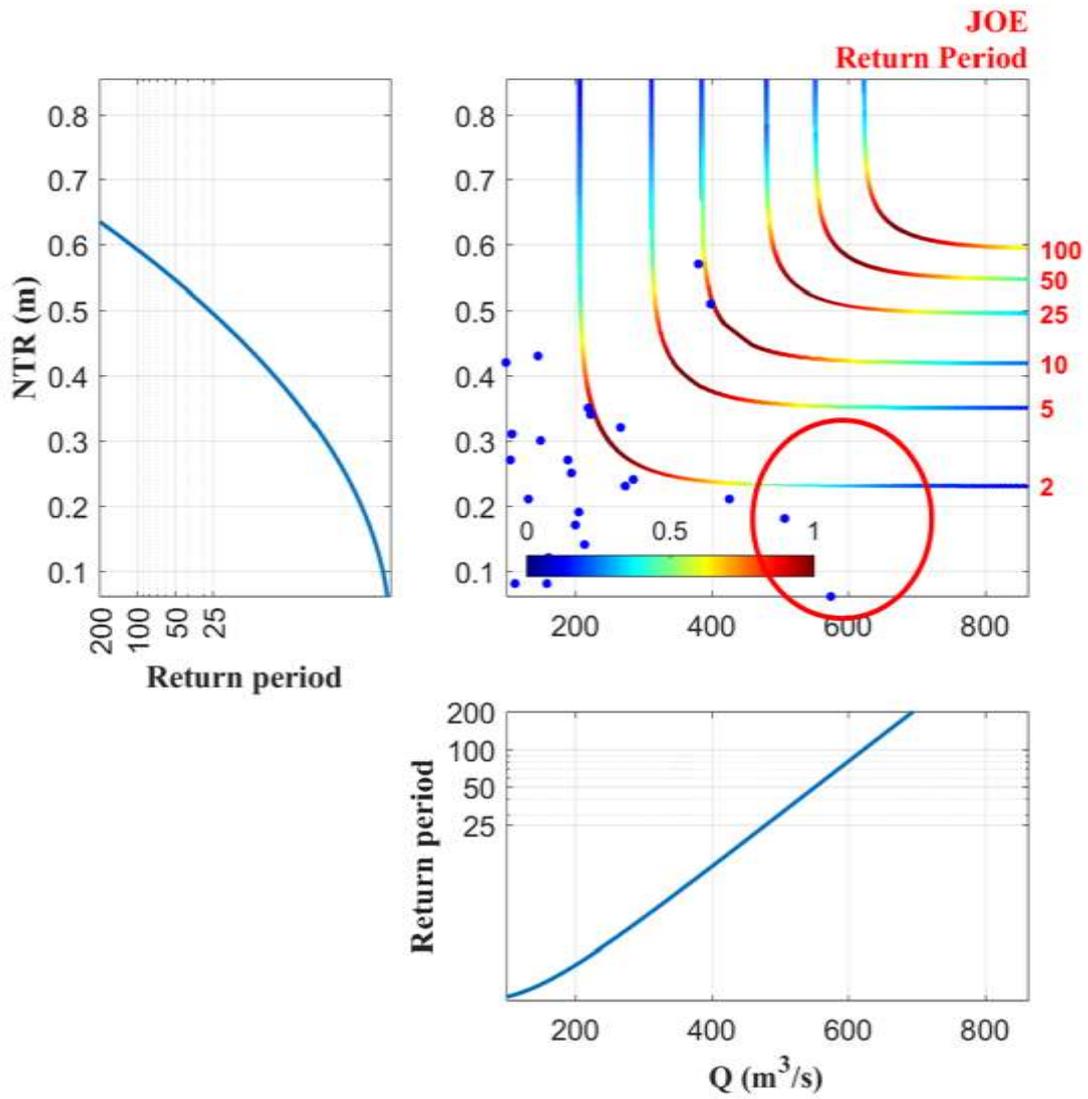


Figura 8: Cópula de Joe ajustada para as séries de Nível Total Residual (NTR) e Vazão máxima anual (Q) para a estação de Brusque. Os dados circulado em vermelho correspondem as grandes cheias de 1983 e 1984.

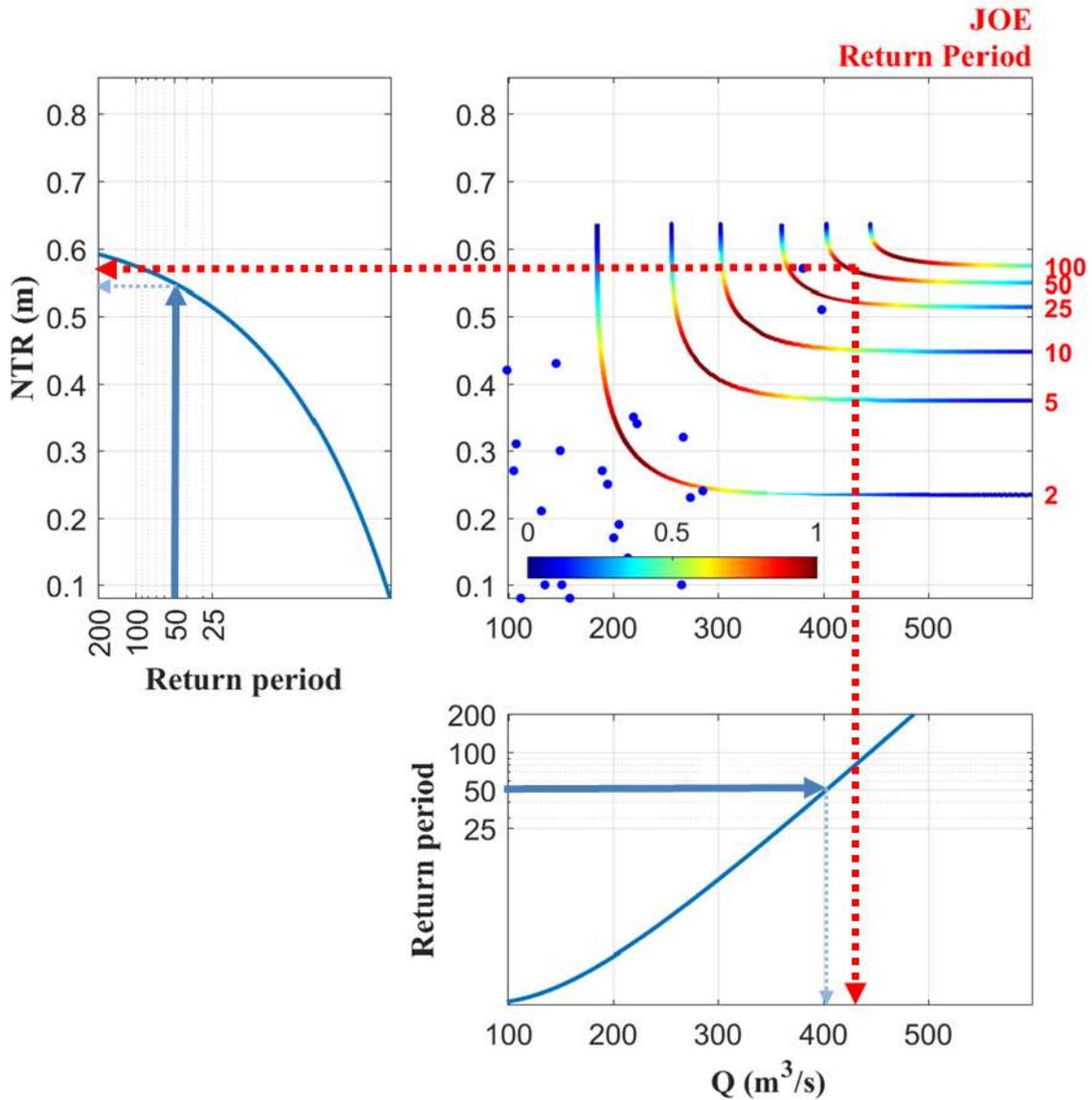


Figura 9: Cópula de Joe ajustada para as séries de Nível Total Residual (NTR) e Vazão máxima anual (Q) para a estação de Brusque desconsiderando as grandes cheias de 1983 e 1984. As setas em azul indicam a Q e NTR para o tempo de retorno de 50 anos sem considerar a dependência das séries. As setas em vermelho representam a Q e NTR considerando a dependência das séries. Pode-se observar uma possível subestimativa das cheias de projeto quando considera-se a independência das ameaças de nível e vazão.

## 4.2. Análise por padrões atmosféricos

### 4.2.1. Padrões atmosféricos (Weather Types)

Os padrões atmosféricos representativos dos 36 grupos verificados na análise de agrupamento estão apresentados na Figura 10. A quantidade de casos dentro de cada grupo, representada pela probabilidade de ocorrência de cada *weather type*, pode ser verificada na Figura 11.

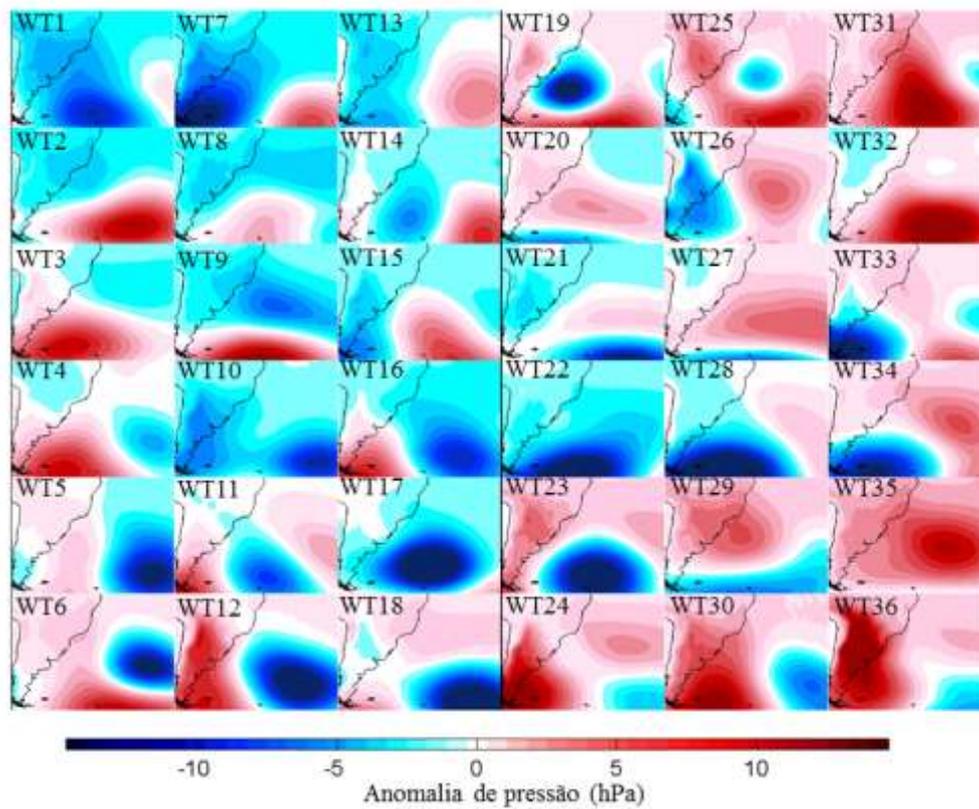


Figura 10: Padrões atmosféricos (*weather types - WT*) representativos de cada grupo de condição atmosférica observado na série de dados.

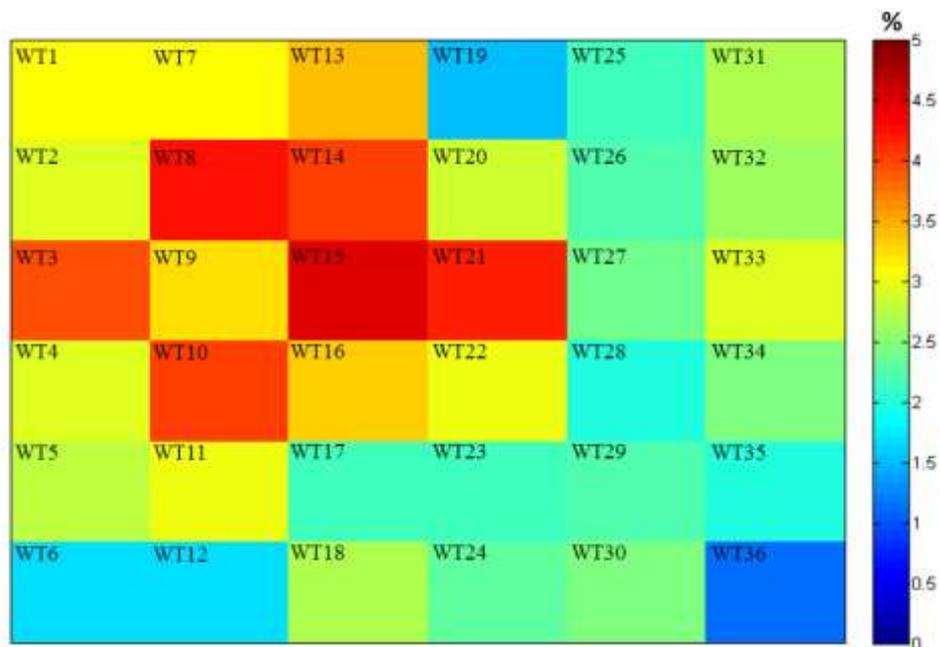


Figura 11: Probabilidade de ocorrência dos diferentes padrões atmosféricos.

#### 4.2.2. Características da vazão relacionada aos diferentes padrões atmosféricos

Na Figura 12 apresenta-se a probabilidade de ocorrência de máximos de vazão relacionados a cada padrão atmosférico. Fica claro que os padrões WT1 e WT2 são os mais relacionados as máximas de vazão.

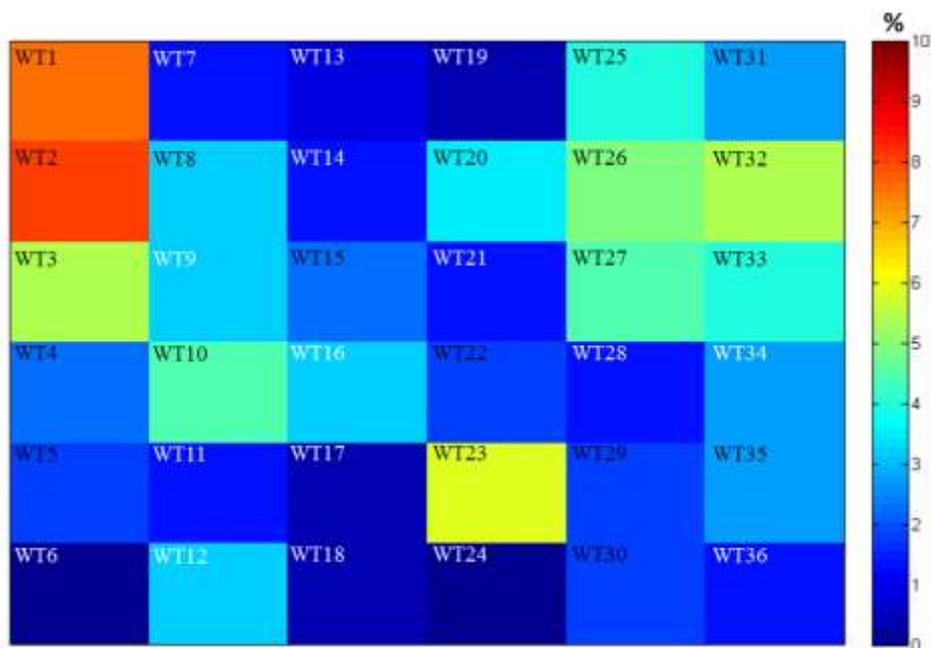
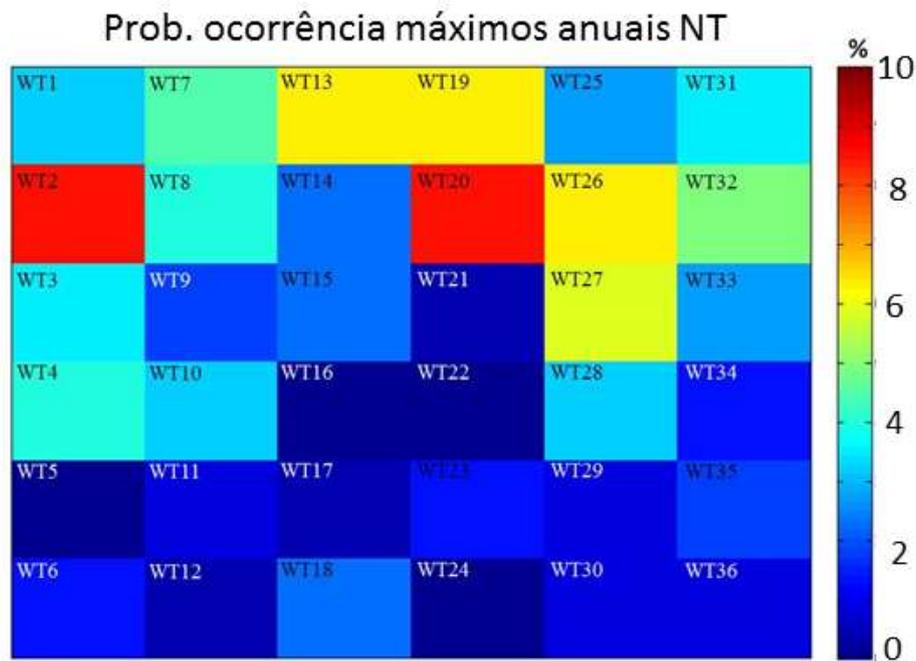


Figura 12: Probabilidade de ocorrência dos eventos de máximas (+3 dias) de vazão relacionados a cada padrão atmosférico.

#### 4.2.3. Características do nível total do mar relacionado aos diferentes padrões atmosféricos

Os valores de máximos anuais foram distribuídos nos respectivos padrões atmosféricos. A probabilidade de ocorrência desses eventos em cada padrão está representada na Figura 13. Cruzando os resultados da Figura 13 com aqueles apresentados na Figura 10, é possível verificar que os extremos de níveis máximos anuais estão relacionados principalmente aos padrões WT2 e WT20 (Figura 10), que representam anticiclones ocorrendo no Atlântico Sul e pressões mais baixas sobre o continente. Tais condições propiciam a ocorrência de ventos e umidade em direção à costa, o que ocasiona a geração de ondas e precipitação no continente. Estes mesmos padrões correspondem a uma série eventos extremos de ondas e enchente registrados anteriormente, como é o caso na enchente de novembro de 2008, e a ressaca de ondas que assolou muitas praias do estado em abril de 2010.



**Figura 13: Probabilidade de ocorrência dos eventos máximos (+3 dias) de NT relacionados a cada padrão atmosférico.**

Os resultados apresentados acima dizem respeito aos extremos de nível em frente à costa de Itajaí. Para verificar as condições gerais (extremas e não extremas) provocadas por cada padrão atmosférico, as funções de densidade de probabilidade (*Probability Density Function* –PDF) obtidas com os dados de NT de cada grupo (todos os dados, incluído eventos não extremos) foram obtidas. Os resultados estão apresentados na Figura 14. Como é possível observar, valores negativos são particularmente dominantes nos padrões WT36 e WT17, enquanto nos WT2 e WT20, valores positivos são mais frequentes.

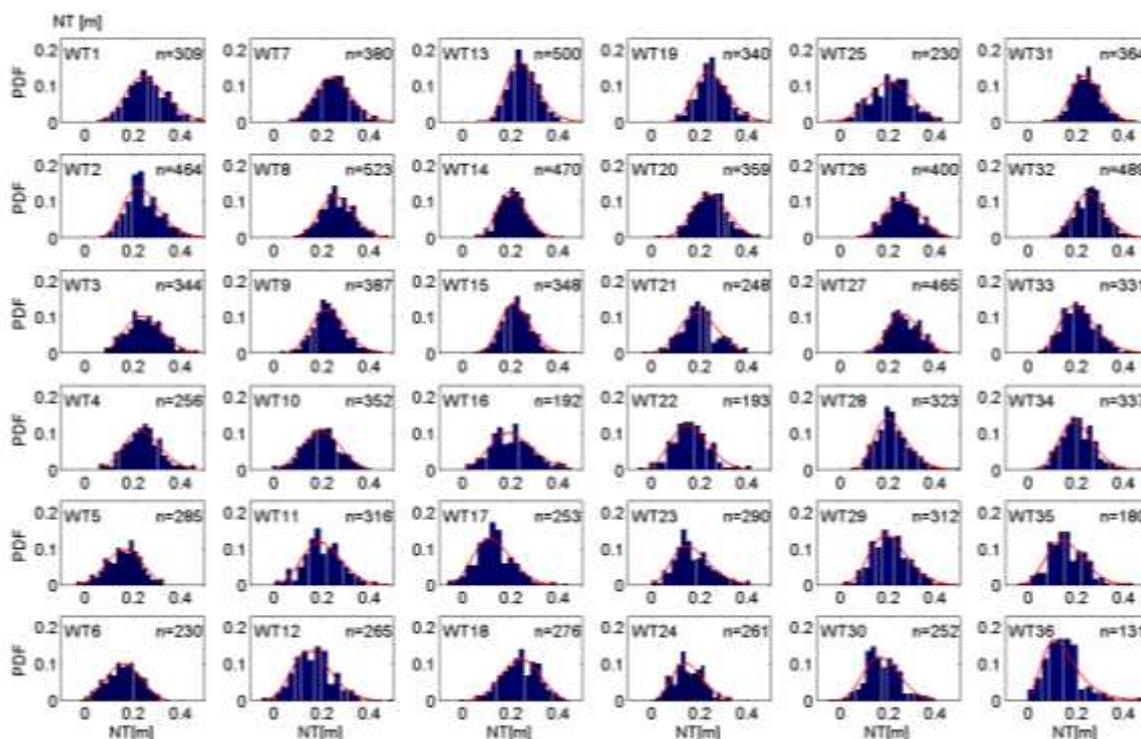


Figura 14: Distribuição dos casos de nível total (extremo e não extremo) relacionados a cada um dos 36 padrões atmosféricos.

#### 4.2.4. Características das ondas relacionadas aos diferentes padrões atmosféricos

Uma breve análise dos dados de ondas em frente ao Porto de Itajaí (detalhes sobre os dados utilizados estão disponíveis no Relatório III) foi realizada, com o objetivo de verificar as alturas de onda relacionadas a diferentes períodos de retorno, bem como o clima de ondas relacionado a cada padrão atmosférico. A figura 15 mostra o ajuste de distribuição de frequência dos máximos anuais de altura significativa de onda ( $H_s$ ). Os resultados indicam alturas de 3,58 m, 3,78 m e 3,93m relacionadas com os períodos de retorno de 20, 50 e 100 anos, respectivamente.

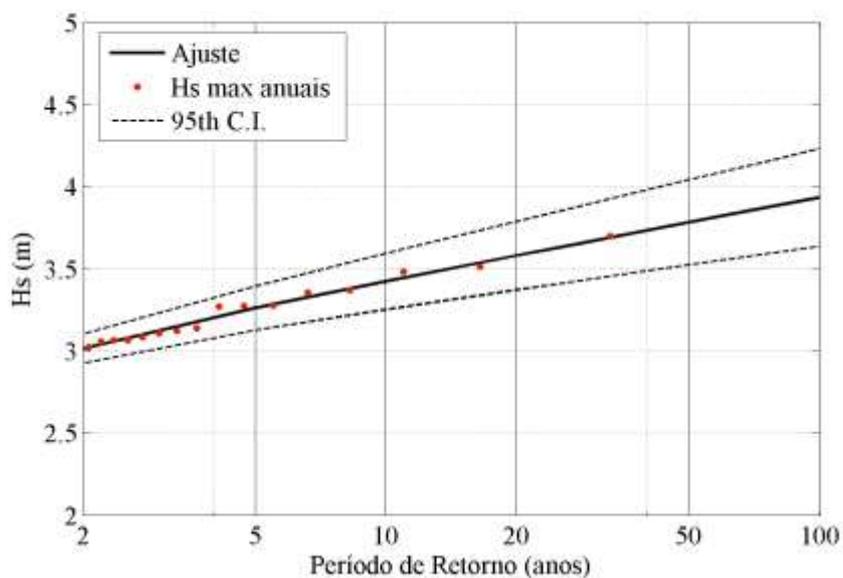


Figura 15: Distribuição de probabilidades dos máximos anuais de Hs.

As Figuras 16 e 17 apresentam o clima de ondas (Hs e Tp) relacionado a cada um dos padrões atmosféricos. A partir dos gráficos apresentados, é possível verificar a frequência de ocorrência dos diferentes climas de ondas em cada padrão atmosférico.

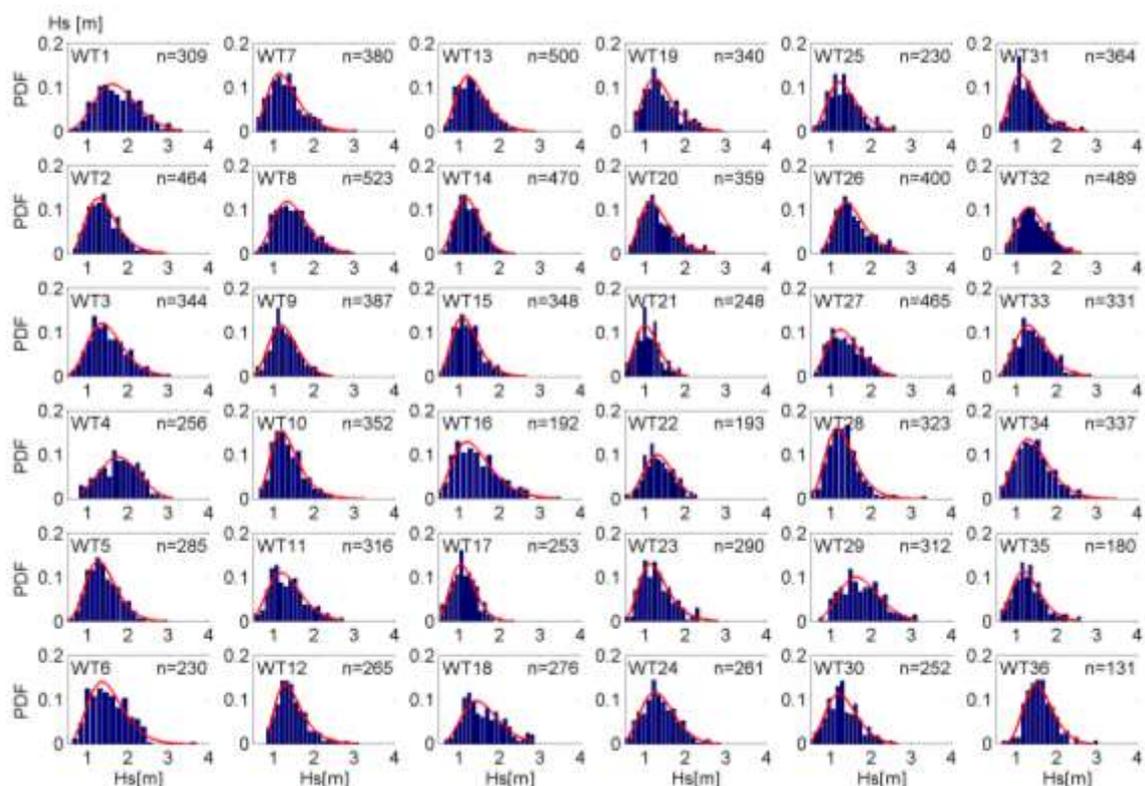


Figura 16: Distribuição dos dados de altura significativa (extremos e não extremos) relacionados a cada um dos 36 padrões atmosféricos.

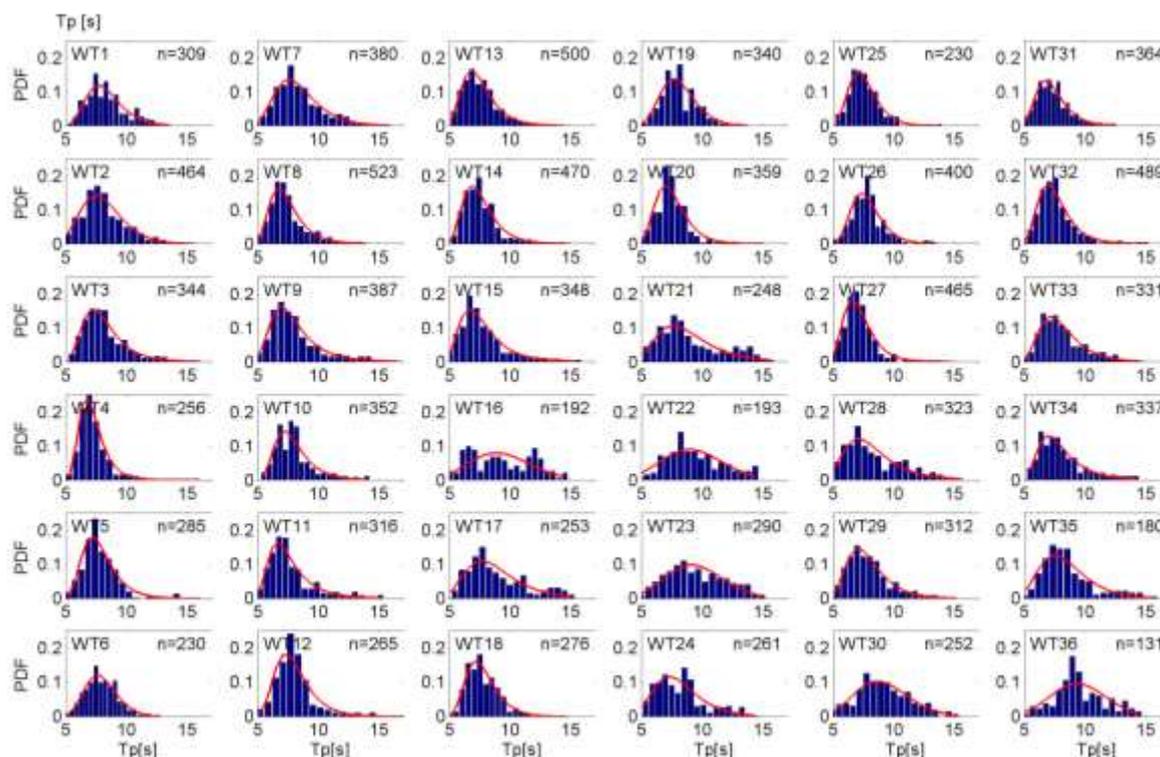


Figura 17: Distribuição dos dados de período de pico de ondas (extremos e não extremos) relacionados a cada um dos 36 padrões atmosféricos.

#### 4.2.5. Efeito na operacionalidade do porto (eventos de fechamento da barra)

As análises dos casos de fechamento da barra do Porto de Itajaí no ano de 2010 não indicaram um valor específico de altura de ondas, ou período de pico relacionado às falhas operacionais do Porto (Figura 18). É certo que todas as falhas ocorreram com ondas maiores que 1m, e ondas com direção de NE-SW, mas outros casos com as mesmas características não chegaram a ocasionar a falha operacional. Nestes casos, é possível que a ação dos ventos locais sobre as ondas (processo não considerado nas reanálise de ondas) tenham ocasionado a agitação marinha que impediu as operações. Ainda assim, se recomendam estudos detalhados sobre o as ondas e nível local, bem como estudos de agitação portuária, para verificar o clima marinho responsável pela agitação que leva ao fechamento da barra.

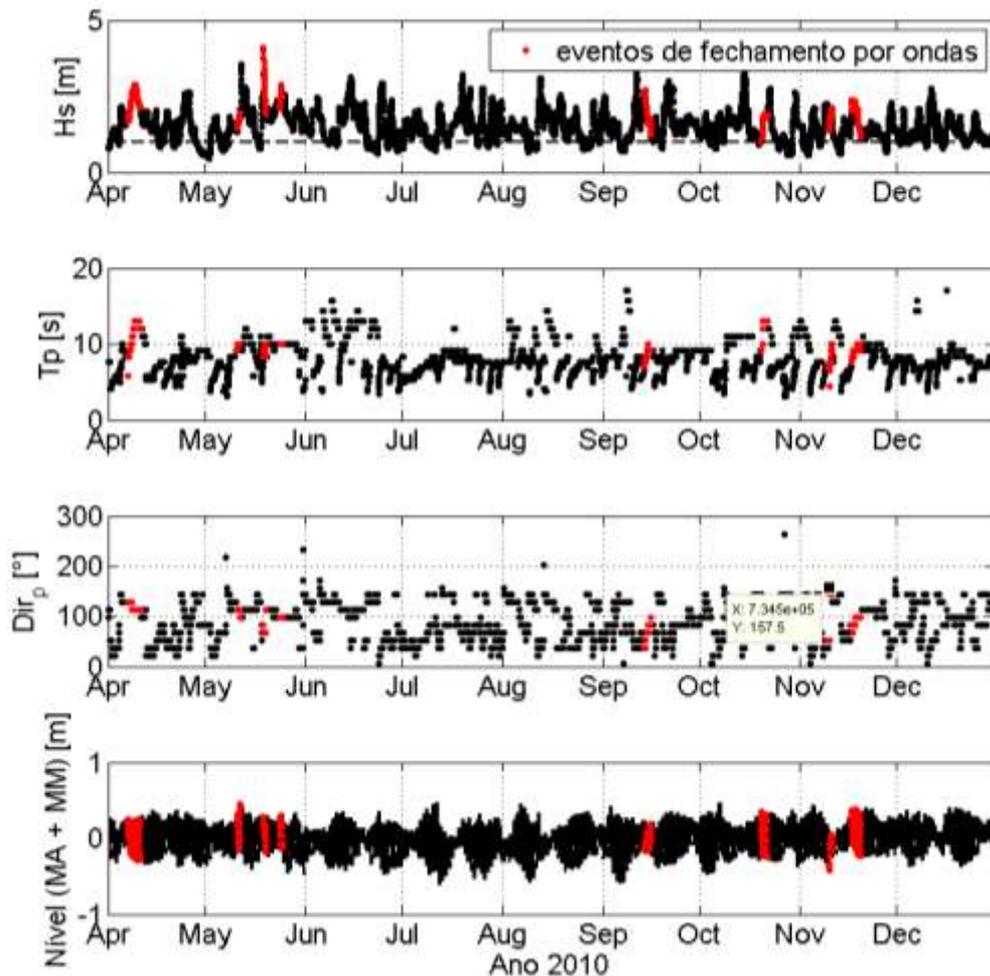
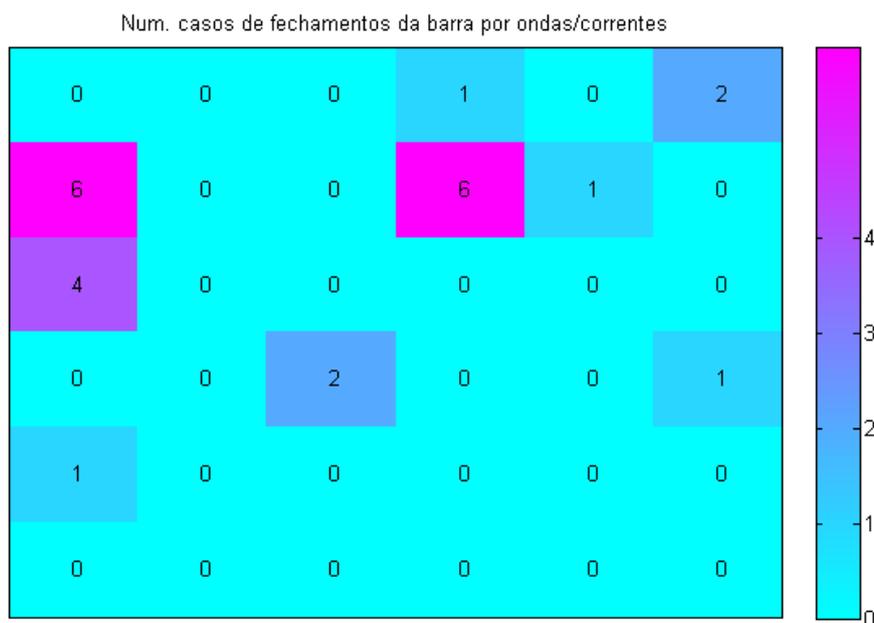


Figura 18: Séries de altura significativa ( $H_s$ ), período de pico ( $T_p$ ), direção de pico ( $Dir_p$ ) e nível do ano de 2010. Pontos vermelhos indicam os dias em que se registrou fechamento da barra por ondas ou correntes.

Finalmente, identificaram-se os padrões atmosféricos relacionados a cada evento de fechamento da barra por ondas ou corrente. Os resultados estão apresentados na Figura 19. Se verifica maior frequência de falha operacional nos padrões atmosféricos WT2 e WT20 (Figura 19), mesmos padrões associados à ocorrência de níveis máximos, o que confirma a influência destes padrões nas atividades do Porto de Itajaí.



**Figura 19: Número de casos para cada *weather type* em que se registrou fechamento da barra por ondas ou correntes.**

## 5. Conclusões e considerações finais

Neste relatório apresentou-se a análise de máximas de vazão e os níveis totais residuais no porto para o período de 1979-2010. A análise conjunta utilizando cópulas mostrou uma dependência entre a ocorrência dos níveis de máximos e que a desconsideração dessa dependência pode acabar na subestimativa dos níveis de retorno de projeto. A incerteza relacionada com as estimativas ainda deve ser levada em conta uma vez que a série de dados é de tamanho limitado. Deve-se investigar máximas sazonais para aumentar o número de eventos e entender o efeito dos mesmos na estimativa das cópulas.

Padrão atmosférico WT2 parece estar particularmente relacionado com a ocorrência de máximas de vazão, nível total e também com casos de fechamento da barra do Porto. O padrão WT20, bastante frequente em casos de máximas de nível total do mar também apresentou relação importante com os casos de fechamento da barra. 30% dos eventos que ocasionaram a falha operacional das atividades portuárias (6 dos 19 casos ocorridos em 2010) estiveram relacionados a este padrão. Tais padrões estão relacionados à ocorrência de anticlones no Atlântico Sul, em frente à costa sudeste do continente Americano.

Cabe destacar aqui que o efeito da maré astronômica não foi considerado nas análises apresentadas. Ainda assim, é importante ressaltar que, apesar de ter menor influência nos processos costeiros na costa de Santa Catarina, pode acentuar/reduzir os efeitos das variáveis

resultantes de forçantes atmosféricas (Gomes da Silva et al., 2016) e deve ser levado em conta na tomada de decisão. Por essa razão, se recomenda que se some o nível de maré no período de interesse no futuro aos valores indicados neste relatório.

As séries de ondas e maré meteorológica utilizadas aqui abrangem o período de 1979 a 2010, enquanto os registros de falha operacional portuária começam em 2010 e vão até 2019. Por essa razão, só foi possível realizar a análise dos eventos de fechamento da barra para o ano de 2010. O objetivo inicial do presente estudo foi a análise de eventos extremos de nível do mar e vazão, e os resultados relacionados a eventos não extremos que afetam as atividades do Porto de Itajaí não foram o foco principal do trabalho. Em estudos futuros, se recomenda uma análise específica de casos não extremos relacionados ao fechamento para todo o período do registro.

## 6. Referências

- CAMUS, P.; MÉNDEZ, F.J.; LOSADA, I.J.; MENÉNDEZ, M.; ESPEJO, A.; PÉREZ, J.; RUEDA, A.; GUANCHE, Y. A method for finding the optimal predictor indices for local waves climate conditions. *Ocean Dynamics*, 64, 1025-1038, 2014.
- GOMES DA SILVA, P., DALINGHAUS, C., GONZÁLEZ, M., GUTIÉRREZ, O., ESPEJO, A., ABASCAL, A.J., KLEIN, A.H.F. Estimating flooding level through the Brazilian coast using reanalysis data. *Journal of Coastal Research*, SI(75): 1092-1096, 2016. doi: 10.2112/SI75-219.1
- Rueda, A.; Camus, P.; Tomás, A.; Vitousek, S.; Méndez, F.J. A multivariate extreme wave and storm surge climate emulator base don weather patherns. *Ocean Modelling*, 104: 242:251, 2016.
- 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.