



# 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 de Resultados da Análise de Distribuição de Probabilidade de Eventos de Nível e Vazão para o Clima Futuro

Pedro Chaffe e Paula Gomes

Elaborado por:  
**Pedro Luiz Borges Chaffe**  
**Paula Gomes da Silva**

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 (CS1).

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 Chen

#### **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](mailto:giz-brasilien@giz.de)  
[www.giz.de/brasil](http://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](mailto:ana-carolina.camara@giz.de)



## Sumário

1. Introdução .....	1
2. Objetivo.....	3
3. Metodologia .....	3
3.1. Modelos Climáticos.....	3
3.2. Análise de componentes principais e verificação dos padrões atmosféricos .....	3
3.3. Projeção dos padrões futuros nos WT estabelecidos com base no hindcast .....	3
4. Resultados .....	4
4.1. Probabilidade de ocorrência dos WT no futuro .....	4
4.2. Elevação do nível médio do mar na costa brasileira.....	5
5. Conclusões .....	5
6. Referências .....	7

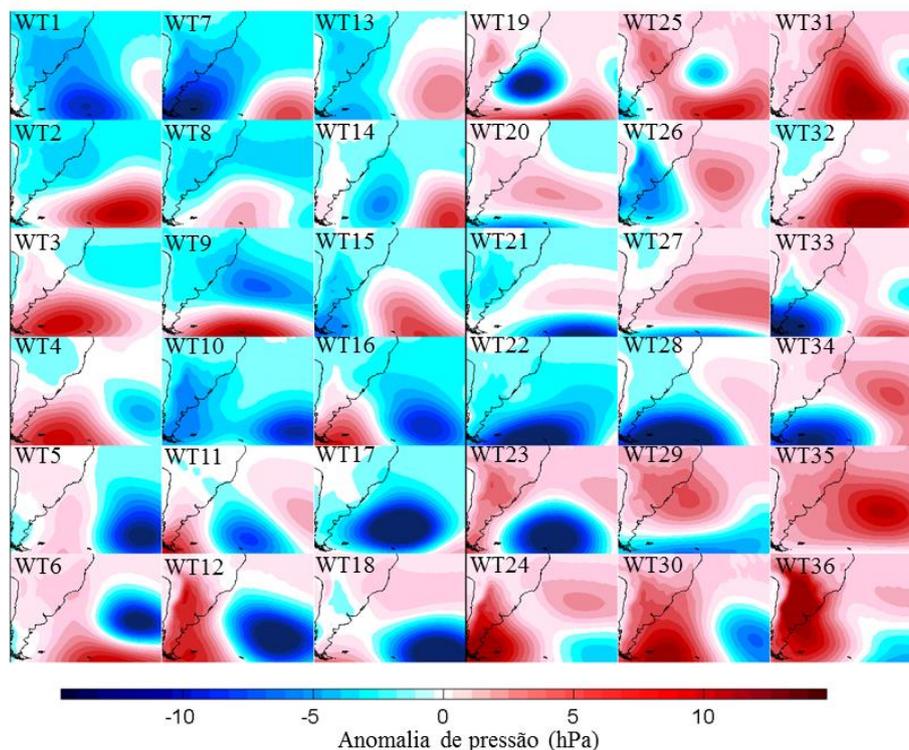
## 1. Introdução

A análise de extremos de sobre-elevação do nível do mar permite reconhecer a probabilidade de ocorrência de um determinado evento e o período de retorno relacionado a ele. Tal informação é extremamente relevante para o planejamento das atividades portuárias em estuários, sendo tomada como base em projetos de desenho de infraestrutura e em análises de riscos tanto da estrutura física como das operações portuárias frente à ocorrência destes extremos. Diversos estudos demonstraram, no entanto, que ocorrerá uma alteração nas tendências de precipitação, nos processos de geração de ondas e na circulação oceânica devido às mudanças climáticas (e.g. Debernard et al. 2003, Marengo et al. 2009, Camus et al. 2017). Isso indica que a probabilidade de ocorrência de determinado evento, pode variar no futuro.

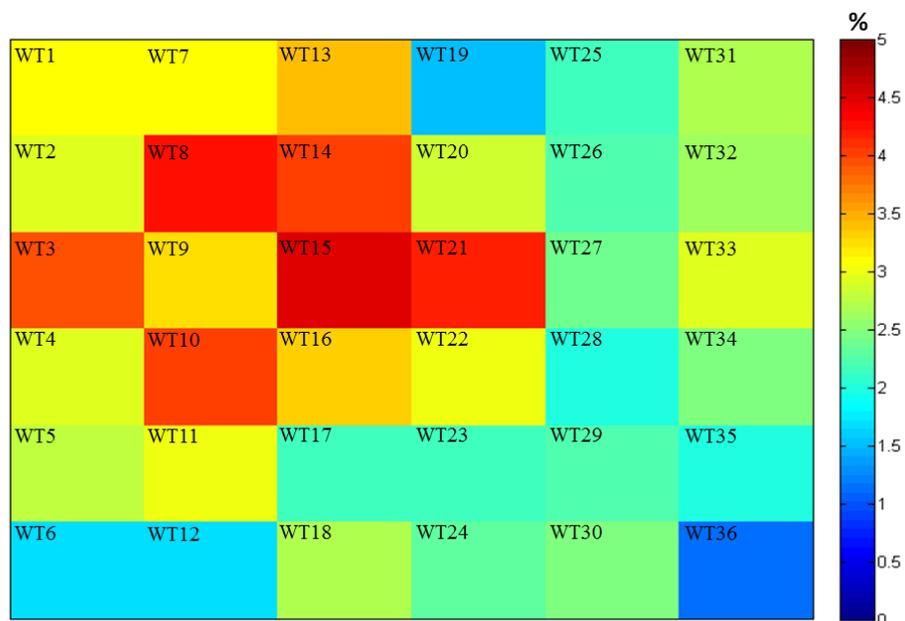
A estimativa dessas alterações na probabilidade de ocorrência é fundamental para que se possa prever o clima marinho e as condições hidrológicas que serão predominantes no futuro, bem como verificar se haverá aumento ou redução dos extremos. Tais estimativas são normalmente realizadas com base em resultados de modelos climáticos que utilizam como forçantes as condições apresentadas nos diferentes cenários de projeções do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*) (IPCC, 2012).

Nos Produtos 2, 3 e 4 (Chaffe et al., 2019; Gomes da Silva et al., 2019a e 2019b) do projeto CSI foram apresentadas as bases de dados (*hindcast – 1979 - 2010*) e os resultados das análises de extremos dos eventos de vazão, nível total e ondas na zona do Porto de Itajaí (bacia hidrográfica e zona costeira). Tais análises foram realizadas tendo em conta os diferentes padrões atmosféricos responsáveis pela ocorrência dos extremos. Os dados foram agrupados de acordo ao padrão atmosférico gerador de cada evento, e a probabilidade de ocorrência de cada *cluster* foi então verificada (Figura 1 e Figura 2). A seguir, identificaram-se os padrões responsáveis pelos eventos extremos de máximas e pelos eventos que ocasionam a interrupção das operações portuárias. Uma vez estabelecida a probabilidade de ocorrência de cada padrão atmosférico e a sua relação com eventos de risco para o Porto, pode-se inferir sobre o risco

climático do Porto, verificando como essas probabilidades irão variar no futuro de acordo com diferentes cenários climáticos.



**Figura 1: atmosféricos (weather types - WT) representativos de cada grupo de condição atmosférica observado na série de dados do passado (resultado apresentado no Produto IV).**



**Figura 2: Probabilidade de ocorrência dos diferentes padrões atmosféricos (resultado apresentado em Gomes da Silva et al., 2019b).**

## 2. Objetivo

Este relatório tem por objetivo apresentar os resultados das análises de probabilidades de ocorrência dos padrões atmosféricos responsáveis pelos eventos de nível total do mar e vazão futuros (de 2021 a 2050) na costa de Itajaí, com base nas projeções de modelos climáticos. As análises foram realizadas para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 apresentados na *5th Phase of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5)* do IPCC.

## 3. Metodologia

### 3.1. Modelos Climáticos

Para a estimativa da probabilidade de ocorrência dos diferentes padrões atmosféricos (*weather types*) no futuro, utilizaram-se resultados de projeções dos modelos climáticos HadGEM2-ES ([www.metoffice.gov.uk](http://www.metoffice.gov.uk)) e MIROC5 (<https://data.globalchange.gov/model/miroc5>). Dados das rodadas dos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 do CMIP5 foram utilizados visando analisar cenários intermediários e pessimistas. As análises apresentadas aqui foram realizadas utilizando os dados de projeções do período de 2021 a 2050, totalizando de 30 anos de dados.

### 3.2. Análise de componentes principais e verificação dos padrões atmosféricos

Campos de pressão e gradiente de pressão cobrindo todo o Atlântico Sul foram utilizados. Uma análise de componentes principais permitiu identificar os modos de oscilação dominantes no futuro e suas componentes espaciais (*Empirical Orthogonal Functions* - EOFs) e temporais (*Principal Components* - PCs). A condição atmosférica em cada  $t$  futuro (diário) foi verificada da seguinte forma:

$$CondAtm_{t=i} = PC_{t=i} * EOF \quad [1]$$

### 3.3. Projeção dos padrões futuros nos WT estabelecidos com base no hindcast

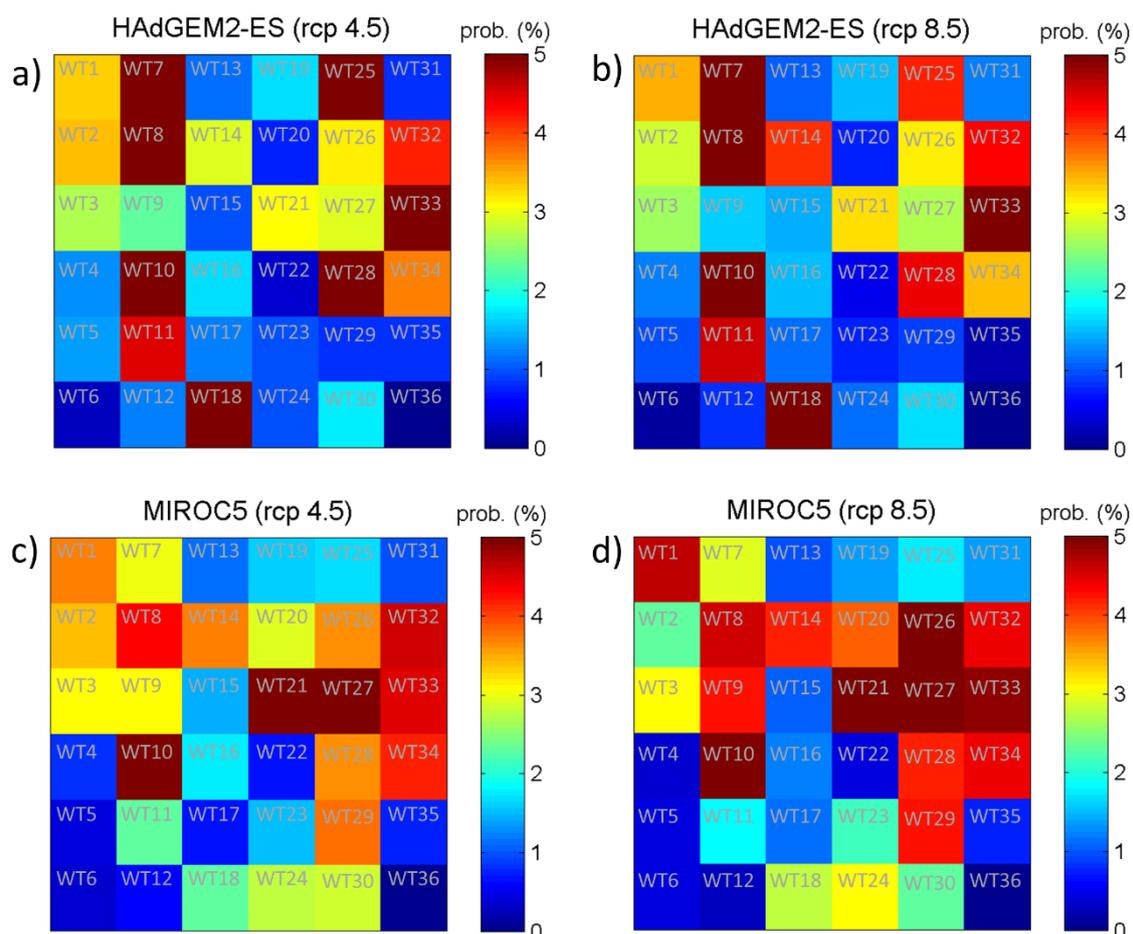
A condição atmosférica em cada  $t$  futuro foi então comparada com a condição do centróide de cada um dos 36 clusters do *hindcast* (36 *weather types*) através da distância euclidiana. Atribuiu-se cada dado futuro ao cluster

com centróide mais próximo ao padrão verificado. Desta forma, toda a série de dados futuros foi distribuída pelos 36 *weather types* da Figura 1. Foi possível, então, calcular a probabilidade de ocorrência de cada um dos 36 WT no futuro.

## 4. Resultados

### 4.1. Probabilidade de ocorrência dos WT no futuro

As probabilidades de ocorrência dos 36 *weather types* no futuro, de acordo com os diferentes modelos e cenários, estão apresentadas na Figura 3.



**Figura 3: Probabilidade de ocorrência dos diferentes *weather types* no período de 2021 a 2050 obtidos das projeções dos modelos climáticos: a) modelo HadGEM2-ES, cenário RCP 4.5; b) modelos HadGEM2-ES, cenário RCP 8.5; c) modelo MIROC5, cenário RCP 4.5; d) modelo MIROC5, cenário RCP 8.5.**

Verificam-se importantes diferenças ao comparar as probabilidades de ocorrência dos WT no passado (1979 a 2010 - Figura 2) e as probabilidades de ocorrência no futuro (2021 a 2050 - Figura 3). O modelo HadGEM2 mostra

aumento significativo na probabilidade de ocorrência dos WT 7, 8, 10, 11, 18, 25, 28, 32 e 33, para ambos os cenários analisados. Também se verificou um aumento, ainda que não tão expressivo, na frequência de ocorrência do WT 2. Por outro lado, se verifica uma redução na probabilidade de ocorrência dos WT 3, 14, 15 e 21.

Já o modelo MIROC5 indicou aumento evidente na probabilidade de ocorrência dos WT 10, 26, 27, 32, 33 e 34 em ambos os cenários. Além destes, o cenário mais pessimista ainda indica aumento na probabilidade dos WT 1, 9, 28 e 29. Uma redução clara no WT2 é verificada neste último caso (MIROC5 RCP 8.5).

De todos os *weather types* analisados, é importante destacar os resultados obtidos com relação ao WT2. Tal padrão atmosférico está particularmente relacionado com a ocorrência de eventos extremos (máximas anuais) de vazão e nível do mar na zona portuária (resultados apresentados em Gomes Gomes da Silva et al., 2019b) e também com eventos de falha nas atividades do Porto. O aumento da frequência do WT2 nos resultados do modelo HadGEM2-ES (RCP 4.5 e 8.5) e MIROC5 (RCP 4.5) pode indicar maior ocorrência de eventos de risco à infraestrutura e às operações portuárias.

#### **4.2. Elevação do nível médio do mar na costa brasileira**

Um fator adicional que deve ser considerado ao analisar o clima marinho no futuro é a elevação do nível médio do mar decorrente do aumento da temperatura global. Na zona de Santa Catarina, se estima que, em 2050, o nível médio do mar estará 0.2 m acima do nível atual no caso do cenário RCP 4.5, e 0.3m acima do nível atual, para as condições do RCP 8.5 (*Integrated Climate Data Center – ICDC - <http://icdc.cen.uni-hamburg.de/>*). Tais valores devem ser considerados nos planos de ação e projetos futuros.

### **5. Conclusões**

Neste relatório foram apresentados os resultados das análises de probabilidade de ocorrência dos diferentes padrões atmosféricos para o período de 2021 a 2050, com base nos resultados dos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 do IPCC.

O aumento na probabilidade de ocorrência do WT2, foi algo em comum observado nos resultados baseados nas séries de ambos modelos climáticos. Tal aumento foi observado em ao menos um dos cenários (RCP 4.5) para os dois modelos. O WT2 está relacionado com a ocorrência dos eventos extremos de vazão e nível do mar e com eventos de falha nas operações portuárias (resultados apresentados em Gomes da Silva et al., 2019b). Estes resultados enfatizam o possível aumento das condições de risco às operações portuárias. Por tanto, especial atenção deve ser dada a eventos decorrentes deste tipo de condições atmosféricas.

Cabe ressaltar que os resultados apresentados aqui indicam variações nos dados de projeções dos diferentes modelos climáticos utilizados. Isso significa que o mesmo cenário simulado por modelos distintos gera resultados diferentes. Tais variações resultam em variações importantes também na probabilidade de ocorrência futura apresentada aqui. Em estudos futuros, recomenda-se a comparação com resultados de outros modelos climáticos, além de atualizações periódicas a medida que novos avanços em termos de projeções climáticas forem realizados.

Finalmente destaca-se que, ainda que as projeções de elevação do nível médio do mar não indiquem valores tão altos como aqueles verificados em outras costas do globo, é importante que estes valores sejam considerados em estudos, projetos de desenho e análises de risco à infraestrutura e às operações portuárias no futuro.

## 6. Referências Bibliográficas

Camus, P., Losada, I.J., Izaguirre, C., Espejo, A., Menéndez, M., Pérez, J. Statistical wave climate projections for coastal impact assessment. **Earth's Future**, doi:10.1002/2017EF000609, 2017.

Chaffe, P.L.B; Santos, C.I.; Gomes da Silva, P., Chagas, V.B.P.; MMA; GIZ. **Produto 2 – Relatório sobre a base de dados de vazão da bacia do Itajaí**. Ampliação dos Serviços Climáticos para Investimentos em Infraestrutura (CSI). Ministério do Meio Ambiente (MMA) e Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Brasília, DF, 2019.

Debernand, J., Saeltra, O., Roed, L.P. Future Wind, wave and storm surge climate in the northern North Atlantic. **Climate Research**, v.23, pp. 39-49, 2002.

IPCC, 2012 – Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (Eds.) Available from Cambridge University Press, The Edinburgh Building, Shaftesbury Road, Cambridge CB2 8RU ENGLAND, 582 pp. Available from June 2012

Gomes da Silva, P., Chaffe, P.L.B; MMA; GIZ. **Produto 3 – Relatório sobre 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**. Ampliação dos Serviços Climáticos para Investimentos em Infraestrutura (CSI). Ministério do Meio Ambiente (MMA) e Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Brasília, DF, 2019a.

Gomes da Silva, P., Chaffe, P.L.B; MMA; GIZ. **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**. Ampliação dos Serviços Climáticos para Investimentos em Infraestrutura (CSI). Ministério do Meio Ambiente (MMA) e Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Brasília, DF, 2019b.

Marengo, J.A., Alves, R., Alves, L.M., Valverde, M.C. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **International Journal of Climatology**, vol. 29, pp2241-2255, 2009.