

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO  
REMOTO

Fabiane Machado Furlan

**VARIABILIDADE TEMPORAL E ESTIMATIVA  
ESPACIAL DOS FLUXOS DE CO<sub>2</sub> ENTRE A  
ATMOSFERA E A VEGETAÇÃO NA  
MARISMA DA ILHA DA PÓLVORA EM RIO  
GRANDE - RS**

Porto Alegre-RS

2020



Fabiane Machado Furlan

**VARIABILIDADE TEMPORAL E ESTIMATIVA  
ESPACIAL DOS FLUXOS DE CO<sub>2</sub> ENTRE A  
ATMOSFERA E A VEGETAÇÃO NA MARISMA DA  
ILHA DA PÓLVORA EM RIO GRANDE - RS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto para obtenção do título de Mestre em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento.

Orientação Dr. Ronald Buss de Souza  
Coorientação Dra. Rita de Cássia Marques  
Alves

Porto Alegre-RS

2020

### CIP - Catalogação na Publicação

Furlan, Fabiane Machado

Variabilidade temporal e estimativa espacial dos fluxos de CO<sub>2</sub> entre a atmosfera e a vegetação na marisma da Ilha da Pólvora em Rio Grande - RS / Fabiane Machado Furlan. -- 2020.

80 f.

Orientador: Ronald Buss de Souza.

Coorientadora: Rita de Cássia Marques Alves.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre, BR-RS, 2020.

1. Carbono azul. 2. Covariância de vórtices. 3. Estuário da Lagoa dos Patos. I. Souza, Ronald Buss de, orient. II. Alves, Rita de Cássia Marques, coorient. III. Título.

*Dedico este trabalho à minha querida Emília Carolina Souza Machado Dessoy  
(in memoriam)*



# Agradecimentos

Acho que este é o espaço onde mais podemos criar, sem nos preocuparmos com referências.....

Entretanto, não apenas para saber se a Terra está rodando em torno do Sol, mas também para caminhararmos pela vida, precisamos de referência...

Por isso, venho agradecer a cada pessoa que, ao longo desta caminhada, tem sido minha referência....

Ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto - CEPSSRM - UFRGS, pela estrutura, aprendizado, e ensino de qualidade! Ao INPE pela excelente estrutura, indispensáveis ao andamento desta pesquisa, a FAPERGS, que por intermédio do INCT da Criosfera concedeu-me uma bolsa de estudos, essencial para meu sustento durante este período. Agradeço também a banca pela disponibilidade para avaliar meu trabalho.

Dr. Ronald, obrigada por aceitar me orientar, é uma honra poder te conhecer e trilhar este caminho científico. Minha admiração pelo teu trabalho começou na ocasião da apresentação da Catarina Marques, uma grande amiga... mas foi através da Carla Aseff, que nos apresentou, que foi possível este momento acontecer, a ela eu agradeço o reencontro e nossos bons momentos juntas... A ti, meu querido orientador, meu profundo agradecimento e admiração!

Aos queridos colegas de LAMOS, pelo acolhimento quando cheguei no INPE. Obrigada a todos pelos bons momentos, em especial, Fernanda Casagrande, que foi uma incentivadora para minha volta aos estudos! Agradeço ao Joel Rubert, por ser um colega tão prestativo e uma pessoa admirável!

Família, obrigada pelo amor, apoio, suporte. Tomar a decisão de voltar a estudar não aconteceria sem ter vocês como porto seguro! Mãe, obrigada por tudo...

Aos amigos queridos que estão na minha vida para encher meu coração de amor! NG Haig They, não tenho palavras para expressar o tanto que te acho o máximo, é isso, tu é o máximo! Obrigada por me brindar com tua amizade! Também agradeço aos amigos de POA e de Santa Maria que conheci ao longo desta jornada, em especial ao Marco Antônio, pela bela amizade que tem se solidificado a cada dia!

Por último, mas não menos importante, Angélica Zanini, obrigada por me ajudar a trilhar o caminho da análise, sem dúvida, dedico a ti este momento!

*Obrigada!!!*



*Meu suspiro por ti revela a morada do amor que sempre senti, meu oceano...*  
*(Fabiane Machado Furlan)*



# Resumo

Entender o papel das zonas costeiras no sequestro de carbono atmosférico é de extrema importância, uma vez que a liberação de gases de efeito estufa é fator preponderante para as mudanças climáticas globais. Ao mesmo tempo, os efeitos antropogênicos como a expansão urbana, assim como os próprios efeitos das mudanças climáticas, em especial o aumento do nível dos mares, colocam todos os ambientes costeiros do planeta em risco. Visando compreender melhor a dinâmica temporal da interação entre a vegetação dos ecossistemas costeiros do Rio Grande do Sul (RS) e a atmosfera, uma torre micrometeorológica foi instalada na Ilha da Pólvora no município de Rio Grande, RS, com o objetivo de medir a variabilidade temporal dos fluxos de CO<sub>2</sub> e de parâmetros meteorológicos associados, sobre a vegetação de marisma ali presente. Dois períodos foram selecionados para esse estudo: (i) julho a outubro de 2016 INV (inverno) e (ii) dezembro de 2016 a março de 2017 VER (verão). Para poder entender como os fenômenos meteorológicos sinóticos poderiam influenciar a variabilidade dos fluxos de CO<sub>2</sub>, foram realizadas análises estatísticas de correlação, autocorrelação e correlação cruzada. Os resultados indicam uma marcada diferença nos fluxos medidos, entretanto o comportamento como sumidouro de carbono apresentado pela marisma persiste nos dois períodos estudados. O fluxo médio é  $-2,33\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  no inverno e  $-3,59\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  no verão. No inverno e no verão, a maior correlação negativa ocorreu entre o fluxo de CO<sub>2</sub> e a temperatura do ar. A fim de extrapolar a estimativa espacial dos fluxos de CO<sub>2</sub> para a área total aproximada coberta por marismas no Estuário da Lagoa dos Patos, foi realizada uma classificação supervisionada utilizando imagens PlanetScope. A área total de marisma estimada para o estuário da lagoa dos Patos foi de 89,69 km<sup>2</sup>. A acurácia geral foi de 77,5% e índice Kappa igual a 0,73. Sendo assim, os valores de incorporação de carbono durante o INV foi de  $-238,6\text{gC m}^{-2}$  e no período VER foi de  $-366,3\text{gC m}^{-2}$ . Extrapolando estes valores para a área total do estuário, o inverno apresentou valor de  $-21,40\text{kgC}$  incorporado pela vegetação e o verão apresentou valor  $-32,85\text{kgC}$ . Como resultado, além de descrever-se diretamente o papel dessa vegetação como sumidouro de carbono atmosférico, apresenta-se a primeira estimativa conhecida de concentração de CO<sub>2</sub> trocada entre a vegetação de marisma e a atmosfera ao longo das estações do ano para esse ecossistema costeiro no Estuário da Lagoa dos Patos.

**Palavras-chave:** Fluxo de Carbono, Covariância de vórtices, Estuário da Lagoa dos Patos.



# Abstract

Clarifying the role of coastal zones on the atmospheric carbon sink is extremely important, once the release of the greenhouse gases may ruling climate changes. At the same time, antropic effects, as urban expansion, as well as the climate changes effect itself, in particular the rise in sea level, put all the coastal environments on the planet at risk. Aiming to better understand the temporal dynamics of the interaction between the salt marsh vegetation in southern Brazil and atmosphere, a micrometeorological tower was installed at the Pólvora island, located in Rio Grande, RS, with the aim of measuring temporal variability of CO<sub>2</sub> flux and related meteorological parameters over the salt marsh. Two periods were selected for the study: (i) July to October 2016 (winter) and (ii) December 2016 to March 2017 (summer). Aiming to understand how the synoptic meteorological phenomena could influence the variability of CO<sub>2</sub> flux, estatistical analyses as correlation, autocorrelation and cross correlation were performed. The results indicate an average of  $-2.33\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  in the winter and  $-3.59\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  in the summer. In winter and summer, the major negative correlation occurred between CO<sub>2</sub> flux and air temperature.

In order to extrapolate the spatial estimate of CO<sub>2</sub> fluxes to the approximate total area covered by salt marsh in the Patos lagoon estuary, a supervised classification was performed using planetscope images. The total area estimated for the salt marsh was 89.69 km<sup>2</sup>. The general accuracy was 77.5 % and the Kappa index was 0.73. Thus, the values of carbon incorporation during the winter was  $-238.6\text{gC m}^{-2}$  and  $-366.3\text{gC m}^{-2}$  in the summer. When extrapolating these values to the total area of the estuary, in winter we had  $-21.40\text{kgC}$  incorporated by the vegetation and in summer ew had a value of  $-32.85\text{kgC}$ . As a result, in addition to directly describe the role of the salt marsh as an atmospheric carbon sink ecosystem, we als present the first known estimate of CO<sub>2</sub> exchanged between the atmosphere and the salt marsh for two seasons in this representative coastal ecosystem of southern Brazil.

**Keywords:** Carbon fluxes, Eddy covariance, Patos Lagoon estuary.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Esquema de distribuição das camadas atmosféricas. Boundary layer - Camada limite atmosférica, Capping inversion - Camada de transição, Troposphere - Troposfera, Free atmosphere - Atmosfera livre. . . . .	24
Figura 2 – Desenvolvimento da camada laminar e transição para camada turbulenta.	24
Figura 3 – Marisma da Ilha da Pólvora, Estuário da Lagoa dos Patos, cidade do Rio Grande (RS). . . . .	26
Figura 4 – Dinâmica conceitual do carbono em ambientes costeiros. a) Incorporação em biomassa lenhosa, b) Absorção de carbono pela fotossíntese e c) Liberação de carbono pela respiração e decomposição. Setas vermelhas representam o sequestro de longo prazo no sedimento e na biomassa lenhosa. Setas verdes representam a absorção e as setas pretas representam a liberação de carbono. . . . .	27
Figura 5 – Localização da área de estudo, Ilha da Pólvora, RS. . . . .	33
Figura 6 – Fisionomia da vegetação que compõe a marisma da Ilha da Pólvora. . .	34
Figura 7 – Torre micrometeorológica instalada na Ilha da Pólvora com os sensores em operação. A) Base da torre, B) Pluviômetro, C) Painel solar, D) Centro de aquisição de dados do analisador de gás, E) Anemômetro Alpine, F) Termohigrometro, G) Piranômetro (Radiômetro), H) Anemômetro sônico e analisador de gás integrado, I) Datalogger. . . . .	36
Figura 8 – Modelo footprint inverno 2016 (A) e verão 2016/2017 (B). Imagem oriunda do software Tovi®. . . . .	42
Figura 9 – Direção do vento inverno 2016 (A) e verão 2016/2017 (B). . . . .	43
Figura 10 – Série temporal do fluxo de CO <sub>2</sub> referente ao período de inverno. Linha no meio indica valor "0", evidenciando padrões de valores positivos e negativos. A linha vermelha série com a aplicação da média móvel. . .	46
Figura 11 – Séries temporais das variáveis meteorológicas referente ao período de inverno. Temperatura do Ar, Pressão Atmosférica, Umidade Relativa, Intensidade do vento e Velocidade de fricção. . . . .	47
Figura 12 – Série temporal do Fluxo de CO <sub>2</sub> referente ao período de verão. Linha no meio indica valor "0", evidenciando padrões de valores positivos e negativos. A linha vermelha série com aplicação da média móvel. . . .	50
Figura 13 – Séries temporais das variáveis meteorológicas referente ao período de verão. Temperatura do Ar, Pressão Atmosférica, Umidade Relativa, Intensidade do vento e Velocidade de fricção. . . . .	51
Figura 14 – Média horária do Fluxo de CO <sub>2</sub> referente ao período de inverno. . . . .	55

Figura 15 – Média horária do Fluxo de CO <sub>2</sub> (linha preta), e dos parâmetros meteorológicos, referente ao período de inverno. . . . .	56
Figura 16 – Média horária do Fluxo de CO <sub>2</sub> referente ao período de verão. . . . .	57
Figura 17 – Média horária do Fluxo de CO <sub>2</sub> (linha preta) e dos parâmetros meteorológicos, referente ao período de verão. . . . .	58
Figura 18 – Matriz de correlação entre fluxo de CO <sub>2</sub> e parâmetros meteorológicos no período INV. . . . .	60
Figura 19 – Matriz de correlação entre fluxo de CO <sub>2</sub> e parâmetros meteorológicos no período VER. . . . .	61
Figura 20 – Autocorrelação do Fluxo de CO <sub>2</sub> referente aos períodos de inverno e verão. A linha azul indica o intervalo de confiança ao nível de 95%. . . . .	62
Figura 21 – Correlação Cruzada do Fluxo de CO <sub>2</sub> com as variáveis meteorológicas referente ao período de inverno. A linha azul indica o intervalo de confiança ao nível de 95%. . . . .	63
Figura 22 – Correlação Cruzada do Fluxo de CO <sub>2</sub> com as variáveis meteorológicas referente ao período de verão. A linha azul indica o intervalo de confiança ao nível de 95%. . . . .	65
Figura 23 – Estuário da Lagoa dos Patos, com destaque para área de marisma estimado. . . . .	68

# Lista de tabelas

Tabela 1	– Especificações da Torre Micrometeorológica instalada na Ilha da Pólvora. AF - alta frequência, BF - baixa frequência, a coluna "figura 7" a letra está descrita na figura 7. . . . .	35
Tabela 2	– Valores descritivos para as variáveis FCO <sub>2</sub> (Fluxo de CO <sub>2</sub> ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )), TAr (Temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ )), PAtm (Pressão Atmosférica (hPa)), UR (Umidade Relativa (%)), IVento (Intensidade do Vento ( $\text{m s}^{-1}$ )) e U* (Velocidade de fricção ( $\text{m s}^{-1}$ )) coletados no inverno e verão de 2016/2017. . . . .	45
Tabela 3	– Valores de fluxo de CO <sub>2</sub> ( $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) encontrados em trabalhos publicados. . . . .	45
Tabela 4	– Valores do Teste de Mann-Whitney-Wilcoxon (W) e <i>p</i> (Probabilidade a 95% de confiança) para o Fluxo de CO <sub>2</sub> (FCO <sub>2</sub> ) e os parâmetros meteorológicos TAr (Temperatura do ar), PAtm (Pressão Atmosférica), UR (Umidade Relativa), Int (Intensidade do vento) e U* (Velocidade de fricção). Comparação entre médias de inverno e verão.* valor significativo.	54
Tabela 5	– Valores de <i>p</i> oriundos da matriz de correlação, para o Fluxo de CO <sub>2</sub> (CO <sub>2</sub> ) e os parâmetros meteorológicos TAr (Temperatura do ar), PAtm (Pressão Atmosférica), UR (Umidade Relativa), Int (Intensidade do vento) e U* (Velocidade de fricção) no período INV.* valor significativo.	59
Tabela 6	– Valores de <i>p</i> oriundos da matriz de correlação, para o Fluxo de CO <sub>2</sub> (CO <sub>2</sub> ) e os parâmetros meteorológicos TAr (Temperatura do ar), PAtm (Pressão Atmosférica), UR (Umidade Relativa), Int (Intensidade do vento) e U* (Velocidade de fricção) no período VER.* valor significativo.	60
Tabela 7	– Matriz de confusão. AUm (Área úmida), VAr (Vegetação arbórea), Vras (Vegetação rasteira), AU (Acurácia do Usuário) e AP (Acurácia do Produtor). . . . .	68



# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>21</b>
1.1.1	Objetivo Geral	21
1.1.2	Objetivos Específicos	21
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>23</b>
<b>2.1</b>	<b>Camada Limite atmosférica e os fluxos turbulentos</b>	<b>23</b>
<b>2.2</b>	<b>Marismas e seu papel no sequestro de carbono</b>	<b>25</b>
<b>2.3</b>	<b>Estimativa espacial da Marisma utilizando sensoriamento remoto</b>	<b>29</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>33</b>
<b>3.1</b>	<b>Localização e caracterização da área de estudo</b>	<b>33</b>
<b>3.2</b>	<b>Aquisição dos Dados</b>	<b>34</b>
3.2.1	Torre Micrometeorológica	34
<b>3.3</b>	<b>Processamento e Análise dos Dados</b>	<b>36</b>
3.3.1	Método da Covariância de Vórtices	36
3.3.2	Modelo de <i>Footprint</i>	37
3.3.3	Construção das séries temporais	37
3.3.4	Análise das séries temporais – Análise de correlação, autocorrelação e correlação cruzada	38
3.3.5	Estimativa espacial do fluxo de CO <sub>2</sub> através do uso de ferramentas de sensoriamento remoto	39
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>41</b>
<b>4.1</b>	<b>Modelo de <i>Footprint</i></b>	<b>41</b>
<b>4.2</b>	<b>Descrição dos valores e as séries temporais do Fluxo de CO<sub>2</sub> e dos parâmetros meteorológicos</b>	<b>44</b>
<b>4.3</b>	<b>Análise horária do Fluxo de CO<sub>2</sub> e dos parâmetros meteorológicos.</b>	<b>54</b>
<b>4.4</b>	<b>Correlação, Autocorrelação e Correlação Cruzada.</b>	<b>58</b>
<b>4.5</b>	<b>Estimativa espacial do fluxo de CO<sub>2</sub>.</b>	<b>67</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>69</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>71</b>



# 1 INTRODUÇÃO

Uma das maiores questões da atualidade está relacionada aos mecanismos e gatilhos propulsores do aquecimento global (FEELY et al., 2016). Estudos mostram que tais gatilhos estão presentes na atmosfera, na forma de vapor d'água e gases de efeito estufa (GEE: dióxido de carbono -CO<sub>2</sub>, metano - CH<sub>4</sub>, óxido nitroso - N<sub>2</sub>O, ozônio - O<sub>3</sub>, entre outros) onde o elemento carbono está envolvido. O efeito estufa é um processo natural, onde a radiação emitida pelo sol e pela superfície terrestre fica aprisionada por nuvens enriquecidas por vapor d'água e gases. Esse processo, porém, vem sendo intensificado pelas atividades antrópicas que, através da combustão e outros efeitos, vem aumentando a concentração de GEE na atmosfera terrestre.

O carbono envolvido na intensificação do efeito estufa apresenta-se na atmosfera principalmente em sua forma inorgânica como CO<sub>2</sub>. Sua principal fonte de liberação é a queima de combustíveis fósseis e a depreciação de comunidades vegetais, tais como florestas temperadas e tropicais, bem como ecossistemas vegetais costeiros.

Os ecossistemas vegetais costeiros são compostos por manguezais, pradarias submersas e marismas e seu potencial como produtor primário já é bem conhecido. Entretanto, ainda não há um entendimento sobre a potencialidade destes ecossistemas enquanto sumidouro de carbono, principalmente o carbono presente na atmosfera.

Nos últimos anos, o interesse acerca do papel dos ecossistemas costeiros vegetados na dinâmica do sequestro de carbono tem aumentado e, com isto, os estudos de caso que buscam melhorar o conhecimento sobre a dinâmica do carbono e dos processos bioquímicos associados a estes ecossistemas. Um melhor entendimento destes ecossistemas pode gerar protocolos de proteção e recuperação, com base nos produtos e serviços que prestam, como a capacidade de sequestrar o carbono atmosférico. No entanto, a variabilidade do estoque de carbono em ecossistemas costeiros vegetados ainda não é totalmente compreendida (MCLEOD et al., 2011), logo o aprofundamento sobre os fluxos de carbono nestes ecossistemas faz-se necessário, podendo assim contribuir com as pesquisas sobre o aquecimento global e sua relação com o meio ambiente e sociedade.

Os ecossistemas costeiros vegetados, conhecidos como Ecossistemas de Carbono Azul, podem ser definidos como ambientes costeiros e marinhos que capturam e armazenam carbono tanto nas plantas, como no sedimento. Gao et al. (2016) discutem que, apesar dos Ecossistemas de Carbono Azul cobrirem uma área global menor que 2%, esses são muito importantes no processo de sequestro de carbono, já que são responsáveis por 50% do carbono armazenado no sedimento oceânico, devido à sua rapidez em capturar o elemento. Reforçando esta ideia, Wylie, Sutton-Grier e Moore (2016) estimam que estes ecossistemas

chegam a ser 10 vezes mais eficientes se comparados às florestas terrestres, evidenciando sua importância no ciclo do carbono. Mesmo sabendo da relevância destes ecossistemas, nos últimos 50 anos houve uma drástica transformação antropogênica dos ecossistemas nativos, acarretando na perda ou diminuição dos serviços ecossistêmicos.

As marismas, que fazem parte dos Ecossistemas de Carbono Azul, são ecossistemas alagadiços, com periódica inundação pela maré, e área global estimada em torno de 5,1 milhões de hectares (MURRAY et al., 2011), mas apenas 2,2 milhões de hectares são verificados, o que dificulta a produção dos inventários nacionais de gases de efeito estufa (HOWARD et al., 2017). São constituídas por vegetação herbácea capaz de fixar carbono e estimular a produção de matéria orgânica na forma de detritos, sendo dominadas por espécies como *Spartina alterniflora* e *Spartina densiflora*.

Além de sumidouro e sequestrador de carbono, marismas também possuem um papel ecológico importante, uma vez que servem de abrigo e hábitat para diversas espécies, sem contar a importância da produção primária para a cadeia trófica (MARANGONI; COSTA, 2009). Estes ambientes também executam importantes funções geomorfológicas, atuando como barreiras flexíveis contra os avanços do mar, favorecendo a deposição e a fixação de sedimento, podendo atuar na formação da costa, influenciando na hidrodinâmica do ambiente e diminuindo a erosão costeira (COSTA; MARANGONI, 2010).

A conversão de área nativa em área para uso da terra, somado à queima de combustíveis fósseis, são a combinação perfeita para o aumento das emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, resultando na aceleração do aquecimento global. Não apenas a supressão da vegetação das florestas terrestres causa déficits nesta atenuação, mas também a supressão da vegetação dos Ecossistemas de Carbono Azul deve ser considerada. Os Ecossistemas de Carbono Azul são ótimos sequestradores, mas também podem ser, uma vez suprimidos, uma importante fonte de emissão de carbono, devido a liberação do carbono armazenado no sedimento para a atmosfera, uma vez que a vegetação desaparece (PENDLETON et al., 2012; HOWARD et al., 2017). Wylie, Sutton-Grier e Moore (2016) afirmaram que, nas últimas décadas, esses ecossistemas costeiros perderam uma taxa alarmante de, aproximadamente, um terço do total global, devido a fatores antropogênicos. O problema é que, a partir do momento em que estes ecossistemas são suprimidos, eles não só param de sequestrar o carbono, como contribuem para sua emissão, liberando o carbono já armazenado.

Estudos recentes mostram que as emissões associadas a destruição deste ambientes resultariam em até 900 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> por ano (PENDLETON et al., 2012), o que é aproximadamente igual as emissões de toda a Alemanha por consumo de energia e indústria. Estes valores correspondem a aproximadamente 12% das emissões globais causadas por desflorestamento ou ainda a cerca de 2% de todas as emissões de GHG antropogênico (Van Der Werf et al., 2009). Além disso, estudos salientam a importância

dos ecossistemas costeiros, visto a sua capacidade de mitigar as mudanças climáticas atuando como sumidouros de carbono (WYLIE; SUTTON-GRIER; MOORE, 2016).

Devido à importância dos Ecossistemas de Carbono Azul e ao completo desconhecimento no Brasil e no estado do Rio Grande do Sul acerca das magnitudes e variabilidade dos fluxos de CO<sub>2</sub> entre a vegetação de ecossistemas costeiros e a atmosfera, uma Torre Micrometeorológica foi instalada em um ambiente de marisma, localizado na Ilha da Pólvora/RS. O principal objetivo do projeto de instalação dessa torre foi analisar a capacidade de troca de CO<sub>2</sub> na interface atmosfera-vegetação e, com isto, obter uma melhor compreensão do papel das marismas no sequestro de carbono que ocorre nestes ecossistemas. Utilizando dados inéditos, espera-se que os resultados obtidos neste estudo colaborem com a implementação de políticas de gestão ambiental visando a preservação deste ecossistema.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

Analisar as magnitudes, a variabilidade temporal e estimativa espacial dos fluxos de CO<sub>2</sub> entre a vegetação de marisma e a atmosfera e identificar fatores meteorológicos interferentes de curto período.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a robustez e a representatividade da série de dados meteorológicos disponíveis a partir da torre micrometeorológica para a marisma da Ilha da Pólvora;
- Avaliar a variabilidade temporal do fluxo de CO<sub>2</sub> que ocorre entre a atmosfera e a vegetação de marisma da Ilha da Pólvora;
- Avaliar quais variáveis meteorológicas estão mais intimamente relacionadas aos padrões de variação dos fluxos de CO<sub>2</sub> que ocorrem na marisma da Ilha da Pólvora;
- Utilizar sensoriamento remoto para estimar a área de cobertura por marisma no estuário da Lagoa dos Patos;
- Extrapolar os valores de fluxo de CO<sub>2</sub> para a área do estuário.



## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Camada Limite atmosférica e os fluxos turbulentos

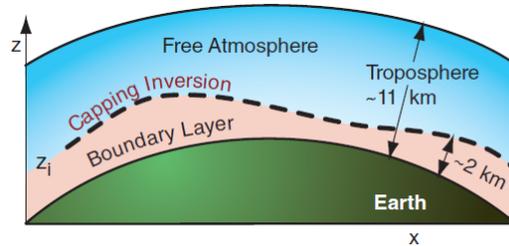
A Camada Limite Atmosférica (CLA) consiste na camada da atmosfera que está localizada na porção mais próxima da superfície terrestre, dentro da troposfera, e pode-se dizer que ela sente os efeitos do atrito desta superfície, respondendo seus forçantes numa escala de tempo de horas ou minutos. Esta influência se dá na forma térmica, resultado do aquecimento ou resfriamento da superfície, ou na forma mecânica, devido ao cisalhamento do vento causado pela fricção de arrasto (STULL, 2017).

Uma das principais características da CLA é a presença de turbulência, a força que controla os processos de troca de calor, massa e momentum entre a superfície e a atmosfera. A profundidade da CLA é variável, podendo ter normalmente 1 ou 2km de espessura e diminuindo até dezenas de metros (figura 1), de acordo com a forçante térmica, principal responsável por esta variação (WALLACE; HOBBS, 2006).

A porção da CLA que será avaliada neste estudo é a Camada de Superfície Turbulenta (CST), que se caracteriza por intensa turbulência de pequena escala, que é gerada pela rugosidade superficial e convecção. Durante o dia, pode se estender até 50 metros, porém a noite, quando a CLA se contrai, a CST tende a apresentar alguns poucos metros de profundidade (OKE, 1987).

Estudos envolvendo a camada limite atmosférica vem sendo desenvolvidos por grupos de pesquisa no Brasil, a iniciativa ATTO (Amazon Tall Tower Observatory) realiza medidas micrometeorológicas e de fluxo de CO<sub>2</sub> desde 2012 na floresta amazônica (ANDREAE et al., 2015). Oliveira et al. (2019) publicaram os primeiros resultados de fluxo de CO<sub>2</sub> no Atlântico sudoeste. Além disso, estudos envolvendo os processos de formação e dispersão de partículas ultra-finas, aerossóis e compostos orgânicos voláteis oriundos, por exemplo, das queimadas ocorridas na floresta amazônica e de processos naturais, são amplamente publicados Malavelle et al. (2019), Glicker et al. (2019), Andreae et al. (2015). Na região sul do Brasil, Acosta et al. (2018) estudaram fluxos superficiais em campos nativos, Rubert, Roberti e Diaz (2018) utilizaram dados de fluxos e evapotranspiração para avaliar os fatores que influenciaram a variabilidade sazonal e a partição de energia no bioma pampa.

Figura 1 – Esquema de distribuição das camadas atmosféricas. Boundary layer - Camada limite atmosférica, Capping inversion - Camada de transição, Troposphere - Troposfera, Free atmosphere - Atmosfera livre.

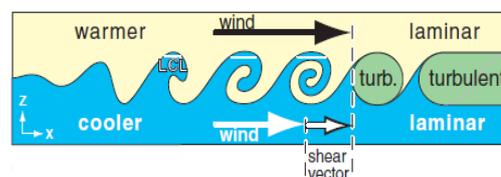


Fonte: Stull (2017).

Segundo Stull (2017) o escoamento turbulento pode originar-se de uma corrente térmica, causada pelo aquecimento solar da superfície, ou através de forçantes tais como a força de atrito que atua no escoamento de ar sobre a superfície, podendo causar o cisalhamento, que geralmente é turbulento. Uma das consequências do conjunto formado pelo aquecimento da superfície e o escoamento turbulento é a regulação dos fluxos de calor, umidade e *momentum*. Esta regulação pode se dar através de correntes convectivas, que possuem papel no transporte e fluxo de propriedades e substâncias, tais como os GEEs. Entretanto, os escoamentos turbulentos são sensíveis a barreiras impostas, seja pela variação de temperatura e/ou pressão, seja por zonas fronteiriças causadas por diferenças de terreno, árvores, edificações. Tais barreiras causam ondas de turbulência nestas fronteiras e no escoamento do vento descendente.

A figura 2 representa a transição entre a camada laminar e o desenvolvimento da camada turbulenta. A espessura da camada laminar pode ir crescendo e a combinação de algumas propriedades transpassa o limite e o fluxo decompõe-se num amontoado aleatório de turbilhões, caracterizando a camada turbulenta. Entretanto, pode-se notar a camada laminar remanescente, que permanece dependendo da rugosidade e do vento externo (OKE, 1987).

Figura 2 – Desenvolvimento da camada laminar e transição para camada turbulenta.



Fonte: Stull (2017).

O objetivo principal de se entender os processos turbulentos que ocorrem na CLA está pautado na necessidade de se estudar a interface superfície/atmosfera, uma vez que quase todas as atividades humanas se realizam nesta porção da CLA. Neste sentido, foram desenvolvidas tecnologias capazes de mensurar diversas propriedades e processos, em diferentes escalas, aumentando assim o conhecimento relativo a CLA e CST.

Um desses métodos é a Covariância de Vórtices (CV), que é capaz de relacionar o fluxo entre um escalar e o ecossistema e pode ser estimado como a soma da covariância de vórtices vertical numa dada altura ( $h_m$ ) e a troca do estoque do escalar entre o solo e a altura ( $h_m$ ), assim:

$$F_s = F_s^{EC} + F_s^{STO} \quad (2.1)$$

Onde  $F_s$  representa a troca líquida do ecossistema,  $F_s^{EC}$  é o termo que designa a covariância vertical do escalar e  $F_s^{STO}$  representa a mudança do estoque do escalar entre o solo e a altura ( $h_m$ ) (AUBINET; VESALA; PAPAIE, 2012).

As medidas de fluxos turbulentos realizadas pelo método da CV têm sido vastamente utilizadas. Para tanto, estruturas de torres micrometeorológicas são confeccionadas e alocadas sobre o solo, oceanos e reservatórios de água, seja de modo fixo em plataformas, ou mesmo de modo flutuante como em navios e boias (STULL, 1988).

Alguns estudos utilizando a técnica de CV foram conduzidos, Kathilankal et al. (2008) e Moffett et al. (2010) estudaram a influência do alagamento periódico nos fluxos de CO<sub>2</sub> em ecossistemas de marisma no leste da Virgínia e no sul da Baía de São Francisco, respectivamente. No Bioma pampa, alguns trabalhos utilizando a CV estimaram, além dos fluxos de CO<sub>2</sub>, a evapotranspiração e os fluxos de energia, na forma de calor latente e calor sensível, Rubert, Roberti e Diaz (2018), Rubert et al. (2018) e Acosta et al. (2018)

## 2.2 Marismas e seu papel no sequestro de carbono

Na região sul do Brasil, os ecossistemas de marisma (Figura 3) são importantes sistemas de transição, constituídos de vegetação herbácea halófitas, cujas espécies possuem alta capacidade de fixar carbono e espalhar parte significativa de matéria orgânica, na forma de detrito, para áreas adjacentes através da maré e correntes (COSTA et al., 1997; COSTA; MARANGONI, 2010). As marismas estão distribuídas ao longo da costa brasileira desde a região tropical, onde coexistem com sistemas de manguezal, ocorrendo nas bordas inferiores e acima do nível médio de ocorrência das marés. Na região subtropical a temperada, as marismas predominam a região costeira (COSTA; MARANGONI, 2010). No Estuário da Lagoa dos Patos, situado na região litorânea sul do estado do Rio Grande do Sul, o ambiente de marisma, que tem área de aproximadamente 70 km<sup>2</sup>, é formado principalmente por espécies perenes, constituídas pelas “macegas” *Spartina alterniflora*, *Spartina densiflora* e a “junça” *Scirpus maritimus*.

Azevedo (2000), estudou a comunidade de espécies das marismas localizadas na Ilha da Pólvora, discorreu sobre a variação anual e períodos reprodutivos, bem como, descreveu estratégias de assentamento em áreas vegetadas e não vegetadas. A autora encontrou 27 espécies vegetais típicas de ambientes de marisma, distribuídas em 8 associações vegetais com características espaciais específicas relativas a cada hábitat identificado na Ilha da Pólvora. Além disso, foram identificadas plantas anuais e perenes, épocas e estratégias reprodutivas diferenciadas entre si. A variação na distribuição espacial encontrada por Azevedo (2000) na Ilha da Pólvora se deu em razão da diferença na taxa de sedimentação, frequência de alagamento e cobertura vegetal prévia.

Ambos tipos de vegetação (macegas e junças) são capazes de suportar variações extremas de salinidade e possuem hastes densas que dificultam o crescimento de outras espécies, podendo também ser considerados agentes geomorfológicos, porque favorecem a deposição e fixação de sedimento. Essa deposição sedimentar resulta no rearranjo e na formação de costa, além de diminuir a pressão hidrodinâmica sobre o ambiente vegetado, atua como barreira flexível contra os avanços do mar (COSTA; MARANGONI, 2010).

Figura 3 – Marisma da Ilha da Pólvora, Estuário da Lagoa dos Patos, cidade do Rio Grande (RS).



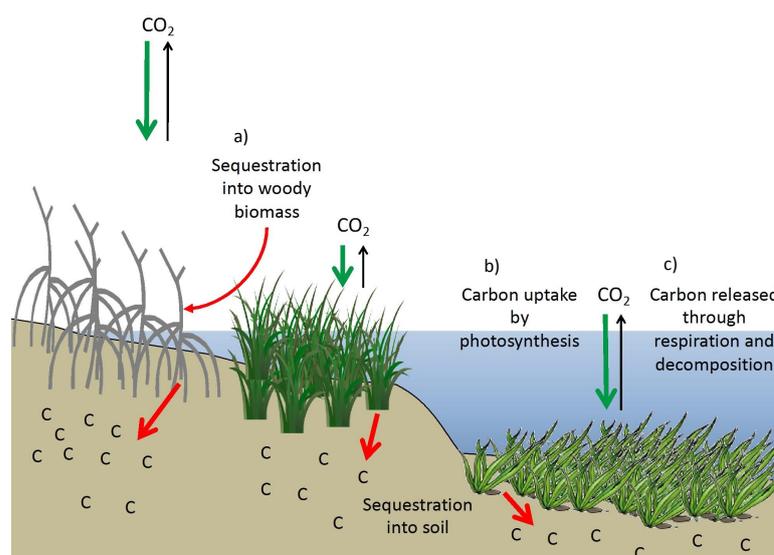
Fonte: acervo de fotos do LAMOS.

Ecossistemas costeiros vegetados têm sido identificados como tendo um elevado estoque de carbono, assim como uma elevada capacidade de sequestrá-lo da atmosfera (LAFFOLEY; GRIMSDITCH, 2009; NELLEMAN et al., 2009; MCLEOD et al., 2011). Florestas de manguezais, marismas e pradarias de fanerógamas submersas são importantes sistemas sorvedores de carbono na interface terra-mar (MCLEOD et al., 2011). Este carbono fixado e preservado nos sedimentos costeiros é denominado *blue carbon* ou carbono azul (NELLEMAN et al., 2009).

A fixação do carbono azul, na zona costeira do planeta, desempenha um papel significativo em escala global para o estoque e sequestro do carbono, presente em excesso

na atmosfera e proveniente das atividades antrópicas pós-revolução industrial, contribuindo para equalizar a mudança climática (CHMURA et al., 2003; DUARTE; MIDDELBURG; CARACO, 2005; BOUILLON et al., 2008; LAFFOLEY; GRIMSDITCH, 2009; NELLE-MANN et al., 2009; DUARTE et al., 2010; KENNEDY et al., 2010). Uma das questões principais que diferencia a fixação do carbono azul com a fixação do carbono no ambiente terrestre é a capacidade das marismas, pradarias marinhas e manguezais em estocar e preservar o carbono incorporado em seus sedimentos, nas biomassas aéreas (troncos, galhos e folhas), subterrâneas (rizomas e raízes) e na biomassa morta (detritos, serapilheira, troncos mortos) (figura 4) (MCLEOD et al., 2011; HOWARD et al., 2017).

Figura 4 – Dinâmica conceitual do carbono em ambientes costeiros. a) Incorporação em biomassa lenhosa, b) Absorção de carbono pela fotossíntese e c) Liberação de carbono pela respiração e decomposição. Setas vermelhas representam o sequestro de longo prazo no sedimento e na biomassas lenhosa. Setas verdes representam a absorção e as setas pretas representam a liberação de carbono.



Fonte: adaptado de Howard et al. (2017)

Mesmo ocupando uma área cerca de 100 vezes inferior a das florestas tropicais, a taxa de sequestro por ecossistemas costeiros vegetados é de duas a quatro vezes superior (FOURQUREAN et al., 2012). Isto bastaria para que a preservação e recuperação destes ecossistemas tivessem uma importância e preocupação ainda maiores. Infelizmente não é o que ocorre, uma vez que estas perdas estão ligadas à economia, pois a supressão destas áreas, além de acarretarem perda de biodiversidade, afeta o uso da área por se tornarem urbanizadas ou, ainda, alvos de especulação imobiliária. Além disso, o impacto econômico gerado pela perda de áreas sequestradoras de carbono vai além, uma vez que há associação ao aumento de enchentes, mudanças no nível do mar e na frequência de eventos extremos causadas pelo aumento da temperatura média global (PENDLETON et al., 2012).

Sendo assim, a perda desta vegetação fixadora do carbono azul resulta na oxidação (decomposição) do carbono estocado nos sedimentos, além de favorecer a emissão de CO<sub>2</sub> e outros GEEs para a atmosfera (LOVELOCK; RUESS; FELLER, 2011). O desmatamento da vegetação costeira e a alteração de seu solo para a construção de fazendas aquícolas, a dragagem sobre fundos de pradarias marinhas e a drenagem de marismas para geração de terra (agricultura, ocupação urbana) são exemplos de alterações geradas nestes sistemas nas zonas costeiras de nosso planeta. Estas atividades não alteraram apenas a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos, mas geram a emissão anual de toneladas de CO<sub>2</sub> que devem ser consideradas nas estimativas do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC).

Os ecossistemas de marismas são altamente vulneráveis às mudanças climáticas globais observadas e previstas. A elevação do nível médio do mar afeta potencialmente o estabelecimento das plantas típicas de marisma afetando a ecologia de comunidades bentônicas costeiras (COSTA et al., 1997; COSTA, 2007; COSTA; MARANGONI, 2010). Os impactos das mudanças climáticas se somarão aos impactos antropogênicos, com resultados que ainda não podem ser inferidos. Portanto, as funções ecológicas e os serviços ecossistêmicos associados estão ameaçados, incluindo a capacidade de captação de carbono e seu efeito na redução do clima global (NELLEMANN et al., 2009; PENDLETON et al., 2012; COPERTINO et al., 2016).

O comportamento e a variabilidade dos fluxos de carbono na maioria das regiões costeiras do globo ainda são pouco compreendidos. As taxas de fixação pelos produtores primários, a respiração e consumo pela comunidade, as taxas de sedimentação e de exportação da matéria orgânica para zonas profundas são exemplos de questões científicas que precisam ser investigadas. A área global ocupada pela vegetação costeira também não é completamente conhecida, assim como as taxas de perda destes ecossistemas, com enormes lacunas em regiões como o Sudeste Asiático, a América do Sul e a África, onde se situam muitos dos importantes “blue carbon hot spots” (NELLEMANN et al., 2009; PENDLETON et al., 2012; WYLIE; SUTTON-GRIER; MOORE, 2016).

Considerando a história da colonização e intensa ocupação territorial da zona costeira (25 % da população brasileira vive na região litorânea) e o desenvolvimento acelerado das últimas décadas, podemos afirmar que os manguezais, marismas e pradarias do país encontram-se gravemente ameaçados. Estes estão sob uma crescente pressão de impactos diversos como técnicas de pesca predatória, carcinicultura, eutrofização, urbanização intensa, poluição por resíduos sólidos, agriculturas e lançamentos de esgoto não tratado. A destruição destes ecossistemas resultam em emissões de carbono imediatas e continuadas no tempo. Estudos recentes mostram que as emissões associadas à destruição de ambientes costeiros podem liberar cerca de 900 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> por ano (PENDLETON et al., 2012), o que é aproximadamente igual as emissões de toda a

Alemanha por consumo de energia e indústria. Estes valores correspondem a níveis entre 10 % e 20 % das emissões globais causadas por desflorestamento ou ainda a cerca de 2 % de todas as emissões de GEE antropogênicos. O carbono azul fornece uma nova ênfase ao estudo e conservação das áreas úmidas vegetadas, propondo mudanças nos incentivos econômicos e novos mecanismos de valoração destes ecossistemas. O pagamento pelo carbono azul possui um grande potencial para proteger a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos destas áreas tão ameaçadas, em escala local e regional (HOWARD et al., 2017).

Para discutir algumas destas questões científicas e suas implicações ambientais e econômicas, as organizações International Oceanographic Commission (IOC-UNESCO), Conservation International (CI), International Union for Conservation of Nature (IUCN) criaram o programa *The Blue Carbon Initiative*. Este programa planeja fornecer recomendações e coordenar futuros projetos para a utilização do carbono costeiro, ou carbono azul, como uma ferramenta de conservação e manejo, de maneira a contribuir com a mitigação da mudança climática. Portanto, o programa visa dar bases científicas, econômicas e políticas para o desenvolvimento de mecanismos de financiamento associados à conservação dos ecossistemas costeiros. Entretanto, precisamos ainda de pesquisas científicas coordenadas e focadas, assim como coleta de dados, para embasar a construção deste mecanismo financeiro, tão importante na redução dos gases estufa. O sucesso depende também, de um rearranjo que não tenha impactos negativos para a sobrevivência das populações locais, as quais dependem dos recursos destes ecossistemas.

## 2.3 Estimativa espacial da Marisma utilizando sensoriamento remoto

O advento do uso de geotecnologias para avaliação ambiental sem dúvida foi um grande avanço nas mais diversas áreas da pesquisa, pois possibilitou a aquisição de dados em um curto espaço de tempo, além de viabilizar o monitoramento permanente de extensas áreas de proteção ambiental ou de difícil acesso e seu uso para atualização de bases cartográficas, permitindo criar um banco de dados que contém todas as informações necessárias e disponíveis e o mapeamento de ambientes e processos (COSTA, 2007). Analisar a condição, bem como estimar a área de ocupação de ecossistemas vegetados, seja natural ou oriunda de cultivos, pode ser realizada de diversas maneiras. Para a estimativa espacial, por exemplo pode-se fazer uso de técnicas de classificação automática e/ou que eventualmente utilizem a mineração de dados (COSTA, 2007; BELLOLI, 2019), estas técnicas podem ser integradas com informações relativas a fisiologia da vegetação, ou até mesmo utilizando-se índices de vegetação, cujo uso é bem difundido dentre diversos objetivos.

Neste sentido, pesquisas foram direcionadas para se desenvolver técnicas capazes de serem utilizadas em medidas realizadas em áreas úmidas, mesmo que o comportamento espectral do dossel da vegetação aquática e terrestre seja semelhante (VILLA et al., 2014). A presença de água exerce interferência significativa na resposta espectral da vegetação, seja em situações de completo alagamento, ou mesmo no caso de vegetação emergente, pois os eventos de alagamento produzem variabilidade nos valores de reflectância causados pela mistura de sinais das plantas e da água (VILLA et al., 2014; SILVA et al., 2008). Mesmo em locais onde por ventura a frequência de alagamento seja menor, há influência quando o solo está saturado, uma vez que o grau de umidade e a mistura dos minerais formadores do solo podem diminuir a intensidade da resposta espectral e influencia nos resultados (VILLA; MOUSIVAND; BRESCIANI, 2014).

Constelações de satélites com sensores de alta resolução espacial e taxa de revisita maior têm sido lançados nos últimos anos, assim, com o aumento da disponibilidade de imagens, aumenta também as possibilidades de temas e ambientes a serem estudados. Neste sentido, áreas cujo acesso físico, bem como sua descrição através de sensoriamento remoto, são mais difíceis, começam a ter suas características descritas e suas interações e processos melhor entendidos. Áreas de marisma, por exemplo, as localizadas no Estuário da Lagoa dos Patos têm sido estudadas utilizando-se ferramentas de sensoriamento remoto (NOGUEIRA et al., 2001; NOGUEIRA; COSTA, 2003; COSTA, 2007; MARANGONI, 2008). Isacch et al. (2006), utilizando imagens LANDSAT estimaram a área total de marismas do sudoeste do Atlântico (de 31° to 43° S) em cerca de 213.200 hectares, incluindo a área relativa ao estuário da lagoa dos Patos, que foi estimada em 6.223 hectares. Este tipo de aplicação de ferramentas de geotecnologias é oriunda da interação da vegetação com a energia em diferentes comprimentos de onda, propriedade que viabiliza a utilização de sensores espectrais em estudos para melhor entendimento dos processos que ocorrem em áreas vegetadas terrestres, costeiras e também em áreas úmidas e de vegetação submersa (NOGUEIRA; COSTA, 2003; COSTA, 2007; ISACCH et al., 2006; VILLA; MOUSIVAND; BRESCIANI, 2014; COPERTINO et al., 2016).

Em 2014 foi lançado o sensor PlanetScope, que tem revisita diária e resolução espacial de 3 m. Possui 4 bandas (azul, verde, vermelho e infravermelho próximo). Pode ser utilizado na análise de áreas úmidas, como por exemplo, em áreas de mangue e turfa e com objetivos distintos, como por exemplo, classificação de uso e cobertura, e a utilização de índices espectrais para mapear e monitorar áreas de mangue (TUZCU; TASKIN; MUSAOĞLU, 2019; VILLA et al., 2014; VILLA; MOUSIVAND; BRESCIANI, 2014).

Dentre os métodos de avaliação das imagens, a classificação supervisionada pode se mostrar eficiente em estudos de uso e ocupação do solo, bem como para mapear áreas que exibem diferentes tipos de cobertura. A classificação por objetos se mostra como uma metodologia que embora não seja tão facilmente aplicada, costuma trazer resultados

satisfatórios, principalmente se combinada com outros métodos de avaliação (MOFFETT; GORELICK, 2013; TUZCU; TASKIN; MUSAOĞLU, 2019). Assim, neste trabalho, será conduzida classificação supervisionada com o objetivo de estimar a área da vegetação de marisma presente no estuário da Lagoa dos Patos.



## 3 MATERIAL e MÉTODOS

### 3.1 Localização e caracterização da área de estudo

A Ilha da Pólvora ( $32.021405^{\circ}\text{S}$  e  $52.102862^{\circ}\text{W}$ ) está localizada na cidade de Rio Grande ( $32.035469^{\circ}\text{S}$  e  $52.107359^{\circ}\text{W}$ ), estado do Rio Grande do Sul, possuindo área de  $0,472\text{ km}^2$  (Figura 5). Sua superfície é coberta por vegetação típica de marisma, composta pelas espécies *Spartina alterniflora*, *Spartina densiflora* e *Scirpus maritimus* (NOGUEIRA et al., 2001) (Figura 6). Anualmente a frequência de inundação é regida pela variação da maré, influência de chuvas e altitude do terreno. Segundo Costa et al. (1997), Costa (1997), Costa, Marangoni e Azevedo (2003) a distribuição espacial da vegetação de marisma existente no sul do Brasil se dá pela influência do alagamento oriundo do regime de micromaré e/ou elevação do nível da lagoa dos patos de acordo com o regime de chuvas existentes na região. Neste sentido, espacialmente pode se considerar que há um marisma médio, ocupado por espécies vegetais que suportam frequências de alagamento menores, e um marisma baixo, cuja tolerância ao alagamento frequente é maior, este último prioritariamente colonizado pela macega *Spartina alterniflora* (COSTA; SEELIGER; KINAS, 1988; COSTA; DAVY, 1992; COSTA et al., 1997).

Segundo Nogueira et al. (2001), a maior parte da área vegetada das marismas 56,5% SI (superfície da ilha) são áreas esporadicamente alagadas e constituem marismas médias. Cerca de 24% SI está ocupada por marismas inferiores compostas por *S alterniflora*. Ao longo principalmente da margem oeste da Ilha, é depositado material em deriva na Lagoa dos Patos, formando  $8,872\text{ m}^2$  de zonas de deposição de “lixo”. Hábitats recobertos por componentes arbustivos constituem 10% SI.

Figura 5 – Localização da área de estudo, Ilha da Pólvora, RS.

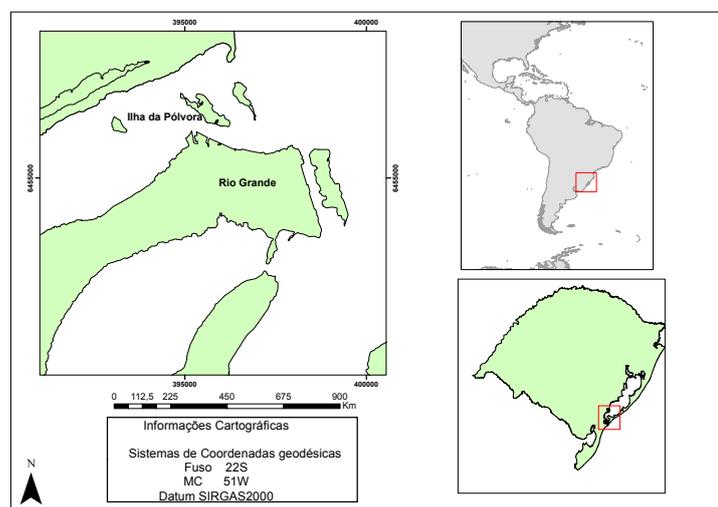


Figura 6 – Fisionomia da vegetação que compõe a marisma da Ilha da Pólvora.



Fonte: acervo de fotos do LAMOS.

## 3.2 Aquisição dos Dados

### 3.2.1 Torre Micrometeorológica

A torre micrometeorológica (Figura 7) foi instalada na Ilha da Pólvora em janeiro de 2016 e pertence ao Laboratório de Meteorologia e Oceanografia por Satélites (LAMOS) do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais (CRS) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O projeto de instalação e manutenção é uma iniciativa conjunta entre o INPE, o Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e o Instituto de Oceanografia da Universidade Federal do Rio Grande (IO-FURG). Todos os sensores meteorológicos da torre estão dispostos acima da vegetação de marisma a cerca de 3,2m de altura do solo. Após diversos testes, manutenção e estabilização dos sensores, a torre entrou em operação e os dados começaram a ser adquiridos a partir de março de 2016, com intuito de estudar a Camada Limite Superficial (CLS), na interface vegetação-atmosfera. A Tabela 1 apresenta a descrição dos sensores utilizados neste estudo e as variáveis meteorológicas. Devido à frequência de aquisição dos dados, as variáveis meteorológicas são definidas a partir daqui como de Alta Frequência (AF, coletadas a 10 Hz ou seja, 10 medidas por segundo) e de Baixa Frequência (BF, coletadas a cada 15 segundos).

Tabela 1 – Especificações da Torre Micrometeorológica instalada na Ilha da Pólvora. AF - alta frequência, BF - baixa frequência, a coluna "figura 7" a letra está descrita na figura 7.

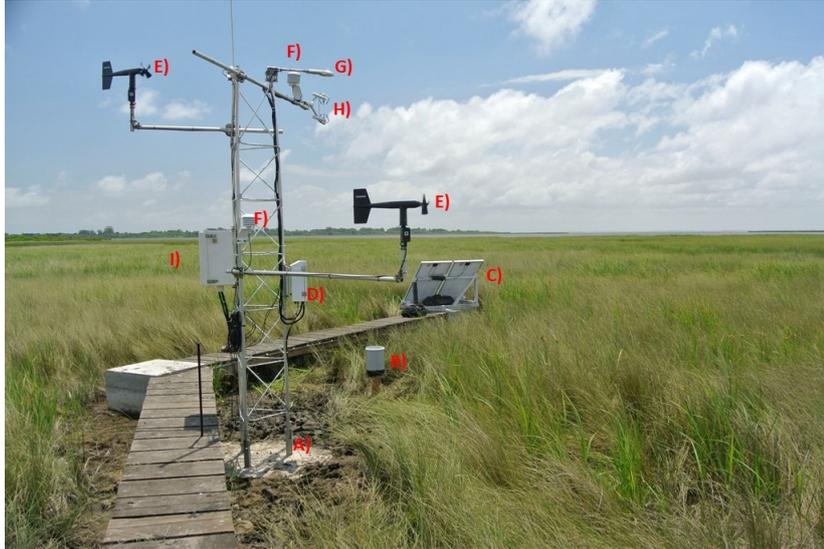
Sensor/Fabricante	Figura 7	Frequência	Modelo	Variável Meteorológica
Anemômetro sônico e analisador de gás integrado (Campbell Scientific)	H	AF	IRGASON	Componentes do vento <sup>1</sup> , Concentração de CO <sub>2</sub> , Concentração de água <sup>3</sup> e Pressão atmosférica <sup>4</sup>
Anemômetro Alpine (R. M. Young)	E	BF	05103	Componentes do vento <sup>1</sup> e Temperatura Virtual <sup>5</sup>
Termohigrometro Campbell Scientific	F	BF	CS215	Temperatura Virtual <sup>5</sup> e Umidade Relativa <sup>6</sup>
Piranômetro (Radiômetro) Kipp e Zonen	G	BF	CMP3 (CNR4)	Radiação de onda longa e Radiação de onda curta <sup>7</sup>
Pluviômetro Hydrological Services America	B	N/A	TB4	Precipitação <sup>8</sup>

<sup>1</sup>.Componentes u, v e w do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ), <sup>2</sup>.Concentração de CO<sub>2</sub> ( $\text{mg m}^{-3}$ ), <sup>3</sup>.Concentração de água ( $\text{g m}^{-3}$ ), <sup>4</sup>.Pressão atmosférica (KPa), <sup>5</sup>.Temperatura Virtual ( $^{\circ}\text{C}$ ), <sup>6</sup>.Umidade Relativa (%), <sup>7</sup>.Radiação de onda longa e Radiação de onda curta ( $\text{W m}^{-2}$ ), <sup>8</sup>.Precipitação (mm).

Fonte: Autora.

Todos os sensores estão integrados num sistema que contém um datalogger e um conjunto de baterias com suporte de painéis solares (pertencentes ao CEPSRM). O sistema de aquisição de dados constitui-se de sensores de alta frequência e sensores de baixa frequência, assentados numa estrutura metálica fixada no solo (figura 7) permitindo a obtenção de medidas de radiação de onda longa e onda curta, direção e intensidade do vento nas três componentes, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, concentração de CO<sub>2</sub>, concentração de vapor d'água, precipitação e temperatura da atmosfera (tabela 1).

Figura 7 – Torre micrometeorológica instalada na Ilha da Pólvora com os sensores em operação. A) Base da torre, B) Pluviômetro, C) Painel solar, D) Centro de aquisição de dados do analisador de gás, E) Anemômetro Alpine, F) Termohigrometro, G) Piranômetro (Radiômetro), H) Anemômetro sônico e analisador de gás integrado, I) Datalogger.



Fonte: acervo de fotos do LAMOS.

### 3.3 Processamento e Análise dos Dados

#### 3.3.1 Método da Covariância de Vórtices

A turbulência é o mecanismo dominante de transferência vertical de umidade, calor, *momentum* e CO<sub>2</sub>. A técnica da Covariância de Vórtices (CV) determina os fluxos turbulentos através da covariância entre as flutuações turbulentas da componente vertical da velocidade do vento com temperatura, concentração de vapor d'água e com a concentração de CO<sub>2</sub>.

Neste trabalho foram determinados os fluxos de CO<sub>2</sub> através do Método da CV, utilizando-se o software EddyPro®, versão 6.2.1, Li-Cor (Lincoln, Nebraska, EUA) que foi aplicado às seguintes medidas micrometeorológicas (dados de alta frequência): componente vertical da velocidade do vento e temperatura virtual, concentração de vapor d'água e concentração de CO<sub>2</sub>. Conforme descrito em Aubinet, Vesala e Papale (2012), pode-se definir o fluxo de CO<sub>2</sub> ( $F_s$ ) como:

$$F_s = \overline{w'\rho'_s} + \frac{m_d \overline{\rho_s}}{m_v \overline{\rho_d}} \overline{w'\rho'_v} + \left(1 + \frac{m_d \overline{\rho_v}}{m_v \overline{\rho_d}}\right) \frac{\overline{\rho_s}}{T} \overline{w'T'} \quad (3.1)$$

Na equação acima, as barras representam a parte média de uma variável e as linhas representam a parte de perturbação. Sendo que ( $\rho_d$ ) é a densidade média do ar seco

determinada pela diferença entre a densidade do ar úmido ( $\rho$ ) e a densidade de vapor d'água ( $\rho_v$ ) medida pelo analisador de gás;  $\rho$  foi determinada a partir da Equação de Estado (Lei dos Gases Ideais) (equação 3.2):

$$\rho = \frac{p}{R_d T_v} \quad (3.2)$$

onde  $p$  é a pressão atmosférica medida pelo analisador de gás,  $R_d$  é a constante dos gases para o ar seco ( $R_d = 287 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ );  $T_v$  é a temperatura virtual medida pelo anemômetro sônico;  $C_p$  e  $L_v$  são o calor específico à pressão constante e o calor latente de vaporização da água, respectivamente;  $(w'T'_v)$  representa a covariância estatística entre as variáveis  $w$  e  $T_v$ . Na Equação 3.1,  $\rho_s$  é a concentração do  $\text{CO}_2$  medida em  $\text{mg m}^{-3}$ ;  $\rho_v$  é a concentração da  $\text{H}_2\text{O}$  medida em  $\text{g m}^{-3}$ ;  $T$  é a temperatura virtual medida pelo anemômetro sônico e;  $m_d$  e  $m_v$  são os pesos moleculares do ar seco e do vapor d'água ( $m_d = 28,97 \text{ g mol}^{-1}$  e  $m_v = 18,01 \text{ g mol}^{-1}$ ), respectivamente.

### 3.3.2 Modelo de *Footprint*

O modelo de *footprint* estima o tamanho e a posição das áreas fontes para o cálculo dos fluxos turbulentos. Através da metodologia de Kljun et al. (2004), Kljun et al. (2015), e utilizando o software Tovi® foi calculado a estimativa do *footprint* dos dados coletados na Ilha da Pólvora.

### 3.3.3 Construção das séries temporais

Para este trabalho, foram escolhidos os períodos em que a série de tempo apresentou menos falhas. Esta escolha foi pautada no objetivo de não ser utilizado preenchimento de falha, uma vez que se trata de dados inéditos. Neste sentido, são apresentados dois períodos de análise, que correspondem a duas estações do ano. O período compreendido entre 07/07/2016 a 14/10/2016 que corresponde ao período de inverno (INV), e o período compreendido entre 09/12/2016 a 18/03/2017 que corresponde ao período de verão (VER).

Especificamente para os valores de fluxo de  $\text{CO}_2$ , foram utilizadas duas estratégias para retirada de dados discrepantes. A primeira, seguindo Ruppert et al. (2006) que versa sobre a retirada dos valores de fluxo de  $\text{CO}_2$  nos horários que foram registradas precipitação pluviométrica, portanto, neste trabalho foram utilizados os dados pluviométricos coletados em baixa frequência pela torre, além dos dados de precipitação da estação meteorológica que foram gentilmente cedidos pela praticagem do porto do Rio Grande, nos horários correspondentes em que havia sinalização de ocorrência de chuva, os dados de fluxo de  $\text{CO}_2$  foram descartados. A segunda estratégia consistiu em dividir os dados em blocos a cada meia hora, e a partir destes blocos, foi calculada a média e o desvio padrão de cada bloco. De acordo com Seo e Gary M. Marsh (2006), a utilização do método SD (standard

deviation), pode resultar na retirada de dados espúrios de forma simples. Neste trabalho, utilizando-se os valores de média e desvio padrão de cada bloco, foi calculado um ponto de corte referente ao resultado da equação a seguir

$$PC = \bar{x} \pm 2 * \sigma \quad (3.3)$$

Em que PC é o ponto de corte,  $\bar{x}$  é a média do bloco de hora e  $\sigma$  é o desvio padrão do bloco de hora. Ainda segundo Seo e Gary M. Marsh (2006), pode-se ser utilizado o valor 2 para multiplicar pelo desvio padrão, assim, como foi utilizado cada bloco de hora, foi escolhido o valor 2 para multiplicar pelo desvio padrão, uma vez que em cada bloco de hora há um número suficientemente grande de medições e uma variabilidade razoável, justificando-se o intervalo escolhido para considerar o ponto de corte, garantindo que os valores acima ou abaixo do mesmo possam ser considerados espúrios.

Além do fluxo de CO<sub>2</sub>, os parâmetros utilizados para as análises foram temperatura do ar (Tar), pressão atmosférica (Pa), umidade relativa (UR), intensidade do vento (INT) e velocidade de fricção (U\*). Estes parâmetros meteorológicos podem retratar os processos de pequena escala que possam estar interagindo entre si no comportamento do marisma em relação a absorção e/ou liberação do CO<sub>2</sub> na atmosfera.

Com o objetivo de responder parte das perguntas propostas no trabalho, foram aplicadas algumas técnicas de análise de séries temporais. Estas técnicas permitiram analisar a variabilidade temporal dos fluxos de CO<sub>2</sub> e associar à variabilidade temporal dos parâmetros meteorológicos estudados.

### 3.3.4 Análise das séries temporais – Análise de correlação, autocorrelação e correlação cruzada

Segundo Falcão (2012), análises de correlação entre duas variáveis no contexto de séries temporais é realizada com o objetivo de estimar o grau de associação entre duas variáveis ao longo do tempo. Neste trabalho, foram analisadas a correlação, autocorrelação e a correlação cruzada, para verificar as relações existentes entre os parâmetros meteorológicos e o fluxo de CO<sub>2</sub> entre si e ao longo do tempo, na Ilha da Pólvora.

A análise de autocorrelação produz uma medida de dependência entre as observações de uma mesma série de dados ao longo do tempo, relacionando cada valor com seus valores anteriores e posteriores. A variação do coeficiente de autocorrelação em função da defasagem do tempo estima a existência de flutuações e/ou oscilações periódicas nas séries. A análise de autocorrelação foi realizada na série do fluxo de CO<sub>2</sub> para uma defasagem de tempo de até 3 meses ao nível de 5% de significância. A análise foi realizada no software *R Core Team (2019)* pacote *Stats*, onde o coeficiente de autocorrelação ( $r_t$ ) é determinado por

(VENABLES; RIPLEY, 2002):

$$r_t = \frac{C_t}{C_0} \quad (3.4)$$

Sendo  $C_0$  o coeficiente de autocovariância no tempo 0 e  $C_t$  o coeficiente de autocovariância, que é determinado por

$$C_t = \frac{1}{n} \sum_{s=\max(1,-t)}^{\min(n-t,n)} [X_{s+t} - \bar{X}][X_s - \bar{X}] \quad (3.5)$$

onde  $n$  é o número total de observações da série,  $X$  é o valor da variável no tempo e  $\bar{X}$  é a média da série. O coeficiente de autocorrelação ( $r_t$ ) varia entre -1 e 1. O intervalo de confiança de 95% é apresentado no gráfico de autocorrelação, este intervalo vale para séries independentes em que  $\rho t = I(t = 0)$ .

Para analisar a associação entre os parâmetros meteorológicos na variabilidade do fluxo de CO<sub>2</sub> dos dois períodos estudados, foi realizado o teste estatístico de correlação cruzada entre as séries de Tar, PA, UR, INT e U\* com as séries dos FCO<sub>2</sub>. Cada uma das séries de tempo das 5 variáveis meteorológicas de cada período foi correlacionado com as séries dos fluxos de CO<sub>2</sub> relativos ao mesmo período, para uma defasagem de tempo de até 3 meses. A análise de correlação cruzada foi realizada no software *R Core Team (2019)* pacote *Stats*, sendo que o coeficiente de correlação cruzada é obtido a partir da equação 3.5, porém relativa a duas séries temporais.

### 3.3.5 Estimativa espacial do fluxo de CO<sub>2</sub> através do uso de ferramentas de sensoriamento remoto

Para realização da estimativa da área de marisma do estuário da lagoa dos patos, foi utilizado conjunto de imagens PlanetScope do dia 30/03/2020, para posterior fusão em mosaico, nas 4 bandas, ortorretificadas, e com resolução espectral de 16 bits. Como atributos de seleção foram designados cobertura de nuvens abaixo de 10%, cobertura da área entre 95 e 100% e valores de reflectância de superfície (PLANET, 2016). Foi elaborada uma composição RGB (infravermelho próximo, vermelho e verde) para realce da vegetação. As análises foram efetuadas no programa ArcGIS 10.3, desenvolvido pela ESRI (*Environmental Systems Research Institute*).

Foram designadas 6 classes temáticas Área úmida, Marisma, Urbano, Água, Vegetação Arbórea e Vegetação rasteira. Para cada classe foram criados 20 pontos de avaliação e foi utilizada a função classificação interativa supervisionada, presente no software, que faz uso de amostras de treinamento inseridas a partir da imagem segmentada. As classes foram escolhidas de acordo com a avaliação visual da imagem, e de acordo com as características

presentes, cabe ressaltar que as mesmas foram escolhidas de acordo com a extensão e alcance da imagem, entretanto a classe de interesse é a que representa a marisma, sendo assim, os resultados de acurácia serão focados nesta classe. (COSTA et al., 1997; COSTA, 1997) Identificaram para o ecossistema de marisma cerca de 60 espécies vegetais, com distribuição ao longo do estuário, entretanto poucas espécies apresentam a maior frequência de ocorrência (COSTA; MARANGONI, 2010), por isso, o ambiente de marisma foi tratado como apenas uma classe.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Modelo de *Footprint*

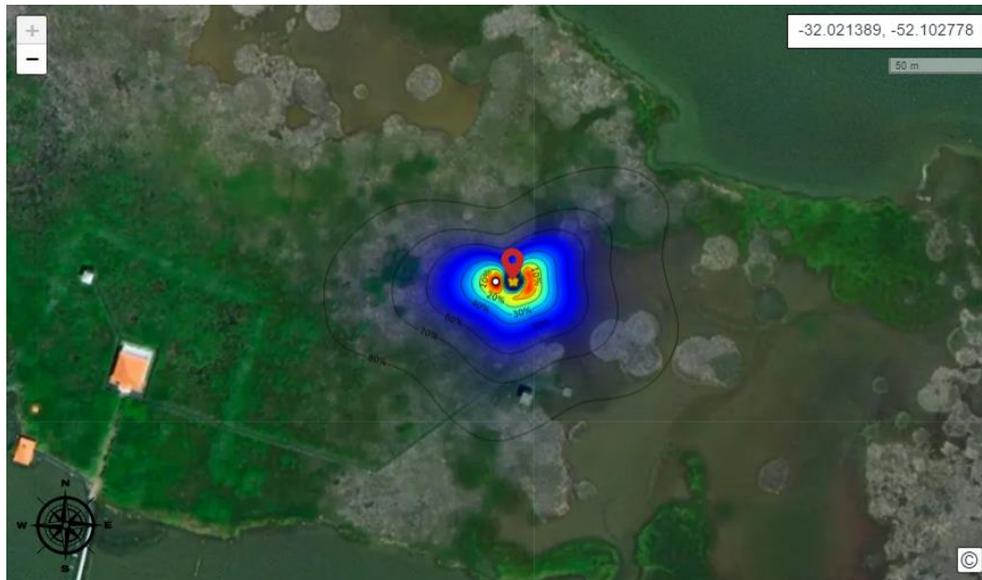
Esta metodologia foi utilizada com o objetivo de entender a relação da variação da direção do vento com a composição vegetativa do entorno da torre com os fluxos medidos. Artigas et al. (2015) estudaram o modelo de *footprint* para uma região composta de vegetação de marisma médio e de marisma baixo. Os autores objetivaram avaliar a influência na variação dos fluxos discretizando a direção do vento na tentativa de estabelecer uma relação da composição vegetativa da marisma e testou se haveria influência desta composição com os valores de fluxo de CO<sub>2</sub>. Foram encontradas diferenças significativas nas mesmas condições de temperatura de hora do dia, demonstrando que o tipo de marisma (baixo ou médio) pode influenciar nos valores do fluxo de CO<sub>2</sub>.

A figura 8 mostra as imagens geradas a partir do modelo com a localização da torre, bem como a área de abrangência do *footprint* para a área de estudo nos períodos INV e VER. Pode-se observar uma homogeneidade vegetativa na área que compreende o alcance da torre nos dois períodos, concordando com o apresentado por Azevedo (2000) e Nogueira et al. (2001) que encontraram espécies de marisma médio em mais de 70% da área da Ilha.

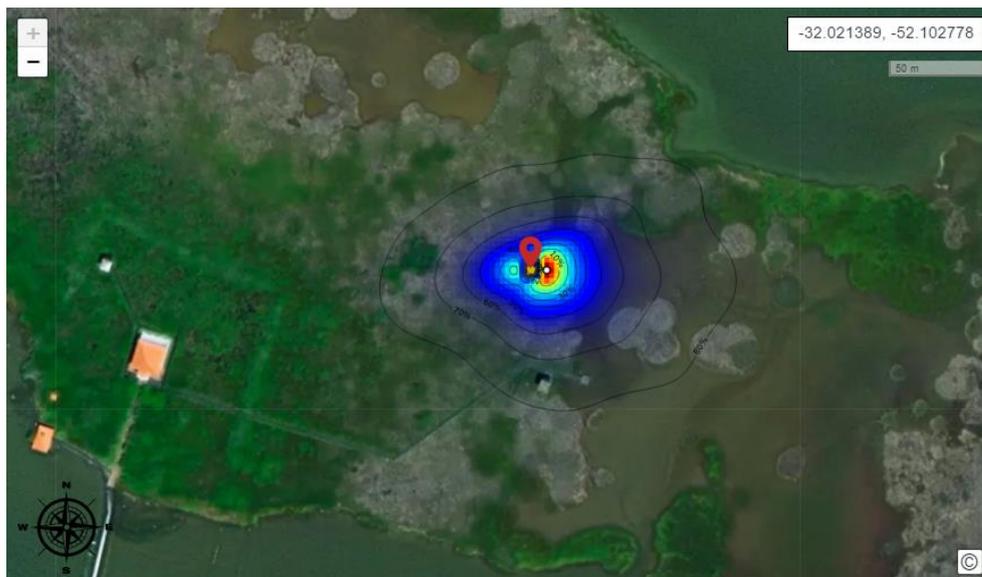
O modelo não demonstrou obstáculo dentro da área de *footprint*, portanto não houve descarte de dados por este motivo. A figura 9 demonstra a direção predominante do vento ao longo dos períodos de análise, sendo que no período INV não apresentou um padrão claro, e no período VER houve uma predominância de ventos do quadrante NE, E SE., com intensidade média de 3,53 m s<sup>-1</sup> no INV e 3,67 m s<sup>-1</sup> no VER.

Figura 8 – Modelo footprint inverno 2016 (A) e verão 2016/2017 (B). Imagem oriunda do software Tovi®.

A.



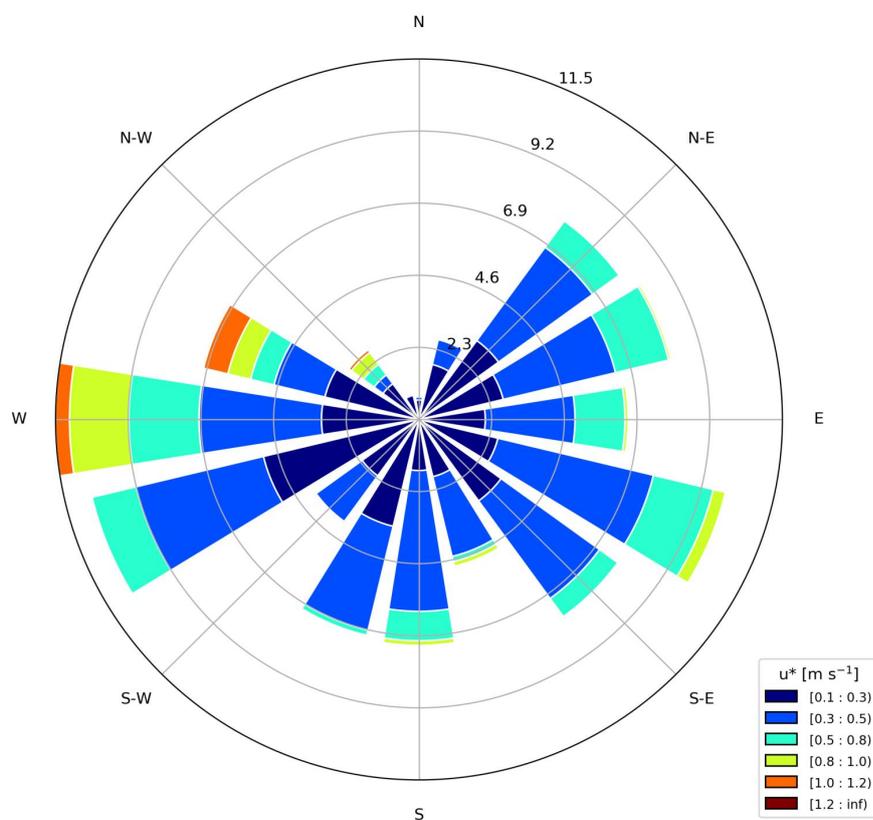
B.



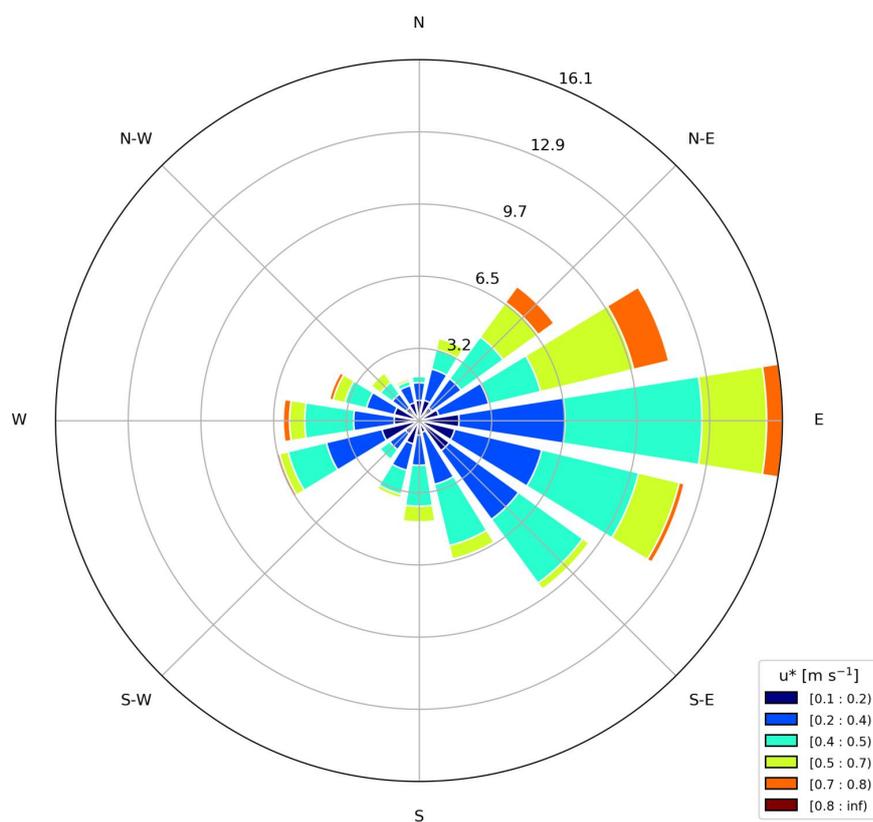
Fonte: Autora.

Figura 9 – Direção do vento inverno 2016 (A) e verão 2016/2017 (B).

A.



B.



Fonte: Autora.

## 4.2 Descrição dos valores e as séries temporais do Fluxo de CO<sub>2</sub> e dos parâmetros meteorológicos

A tabela 2 apresenta os valores de média, mediana, desvio padrão, mínimo e máximo para os parâmetros meteorológicos e fluxo de CO<sub>2</sub>. Nesta tabela pode-se perceber que o parâmetro que apresentou a menor diferença, em valor absoluto, para as médias de inverno e verão foi velocidade de fricção, já o parâmetro com a maior diferença, em valor absoluto, entre as médias de INV e VER foi temperatura do ar. Os valores de fluxo de CO<sub>2</sub> demonstraram variabilidade nos valores mínimos e máximos, que variaram entre  $-20,93\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ( $-6,67\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  média móvel de 20 hs) e  $9,85\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ( $1,98\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  média móvel de 20 hs) no inverno e  $-23,74\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ( $-6,03\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  média móvel de 90 hs) e  $8,50\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ( $-1,26\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  média móvel de 90 hs) no verão, com valor de troca no INV de  $-11,08\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  e no VER  $-15,24\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , indicando que o marisma absorve mais CO<sub>2</sub> do que libera, mesmo descontando o que é liberado pela sua respiração. As médias de INV  $-2,33\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  e VER  $-3,59\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  demonstram que, de maneira geral, a marisma está absorvendo CO<sub>2</sub> da atmosfera no período de INV e VER.

Nos trabalhos citados na tabela 3 os valores mínimos e máximos são, de maneira geral, diferentes dos encontrados neste trabalho. Moffett et al. (2010) e Guo et al. (2009) encontraram decréscimo nos valores de fluxo de CO<sub>2</sub> em consequência do alagamento das áreas de marisma estudadas, no qual a profundidade de alagamento pode ser mais importante, na supressão dos fluxos, do que o tempo de permanência da marisma alagada. No caso da Ilha da Pólvora, conforme os dados apresentados por Azevedo (2000), a partir de um nível topográfico maior do que 15 cm, a frequência de alagamento é de aproximadamente 20%, além disto, as espécies *Spartina densiflora* e *Scirpus maritimus* que são características de marismas médias, suportando frequência de alagamentos menores, constituem 90% ou mais do percentual de espécies de marismas encontradas na Ilha da Pólvora. Artigas et al. (2015) encontraram diferenças (frequência e profundidade do alagamento) nos valores de troca líquida do ecossistema (*NEE - Net Ecosystem Exchange*) em relação a outros estudos, os autores argumentaram que as condições das variáveis meteorológicas e fontes de nutrientes também poderiam explicar tal diferença.

Tabela 2 – Valores descritivos para as variáveis FCO<sub>2</sub> (Fluxo de CO<sub>2</sub>( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )), Tar (Temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ )), PAtm (Pressão Atmosférica (hPa)), UR (Umidade Relativa (%)), IVento (Intensidade do Vento ( $\text{m s}^{-1}$ )) e U\* (Velocidade de fricção ( $\text{m s}^{-1}$ )) coletados no inverno e verão de 2016/2017.

		Média	Mediana	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
FCO <sub>2</sub>	INV	-2,33	-0,14	$\pm 5,39$	-20,93	9,85
	VER	-3,59	0,74	$\pm 8,24$	-23,74	8,50
Tar	INV	14,32	14,27	$\pm 3,12$	5,25	25,52
	VER	24,48	24,66	$\pm 3,00$	14,31	33,40
PAtm	INV	1018,4	1019,6	$\pm 6,01$	994,6	1039,2
	VER	1011,3	1011,2	$\pm 5,24$	981,7	1030,8
UR	INV	50,52	52,07	$\pm 19,33$	1,88	100
	VER	62,77	64,39	$\pm 13,11$	8,68	100
Ivento	INV	3,53	3,19	$\pm 1,75$	0,07	10,54
	VER	3,67	3,67	$\pm 1,52$	0,07	8,22
U*	INV	0,38	0,35	$\pm 0,18$	0,01	1,18
	VER	0,41	0,41	$\pm 0,16$	0,03	0,91

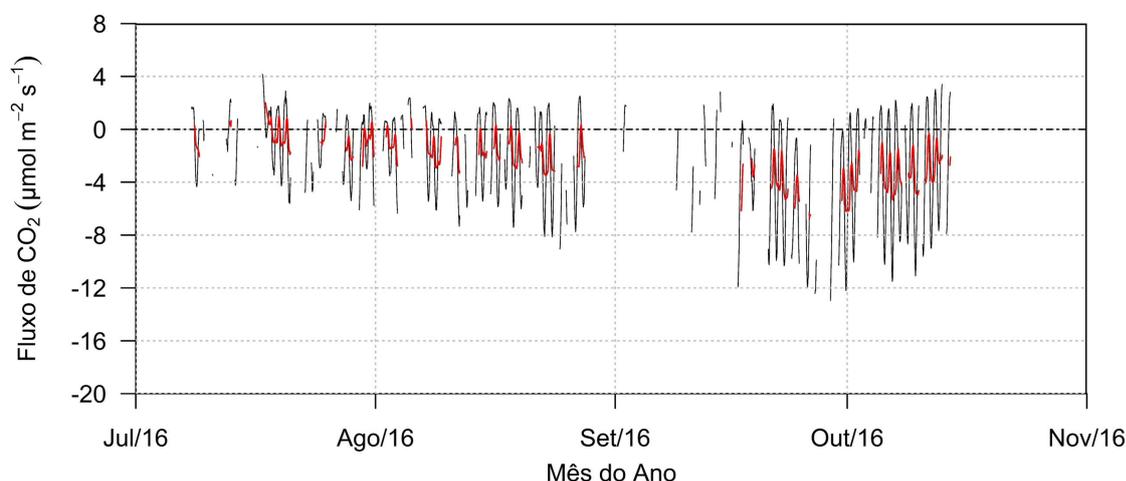
Tabela 3 – Valores de fluxo de CO<sub>2</sub> ( $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) encontrados em trabalhos publicados.

	Mínimo	Máximo	Ecosistema
Artigas et al. (2015)	-13,51	0,2	Marisma
Moffett et al. (2010)	-9,6	2,7	Marisma
Guo et al. (2009)	-30,6	4	Marisma
Kathilankal et al. (2008)	-10	6	Marisma
Goulden, Litvak e Miller (2007)	-30	10	Banhado

A figura 10 apresenta as medidas realizadas na Ilha da pólvora ao longo do período denominado como INV, foi aplicada média móvel de 10 e 20 horas (linha vermelha) para melhor representação. É possível observar o ciclo diurno ao longo da série, e que houve um aumento na amplitude dos valores no período final do inverno. Entretanto, não foi possível estabelecer um padrão de baixa frequência, nem relacioná-los a eventos transientes extremos ou ciclogênicos. Alguns trabalhos realizados, Guo et al. (2009), Moffett et al. (2010) e Artigas et al. (2015) demonstraram em seus resultados períodos de crescimento e períodos de senescência muito claros para as áreas de interesse dos autores. No caso da marisma da Ilha da Pólvora, Azevedo (2000) demonstrou que *S alterniflora* e *S densiflora* embora tenham época de floração definida, apresentaram novas hastes, originadas por brotamento, ao longo de todo o ano, já *S maritimus* apresentou desaparecimento da

porção vegetativa aérea no inverno. Estas estratégias resultam numa diferença pequena na variabilidade dos fluxos de  $\text{CO}_2$ , como visto se compararmos as figuras 10 e 13 o que se pode perceber é uma tendência de valores que caracterizam o marisma como absorvedor de  $\text{CO}_2$  ligeiramente maiores no verão do que no inverno, fato corroborado pelo valor de média do verão que foi menor (mais negativo) que do inverno (tabela 2).

Figura 10 – Série temporal do fluxo de  $\text{CO}_2$  referente ao período de inverno. Linha no meio indica valor "0", evidenciando padrões de valores positivos e negativos. A linha vermelha série com a aplicação da média móvel.

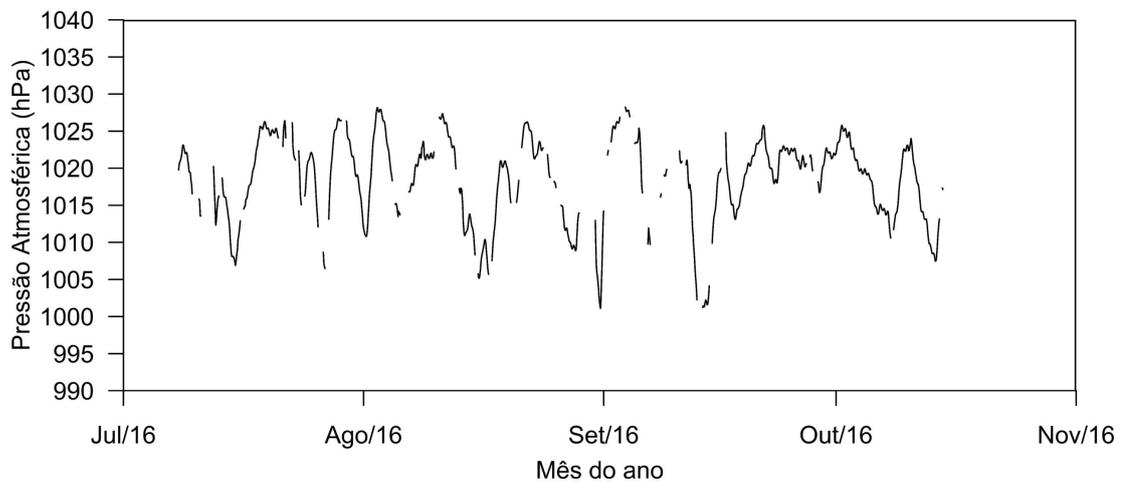
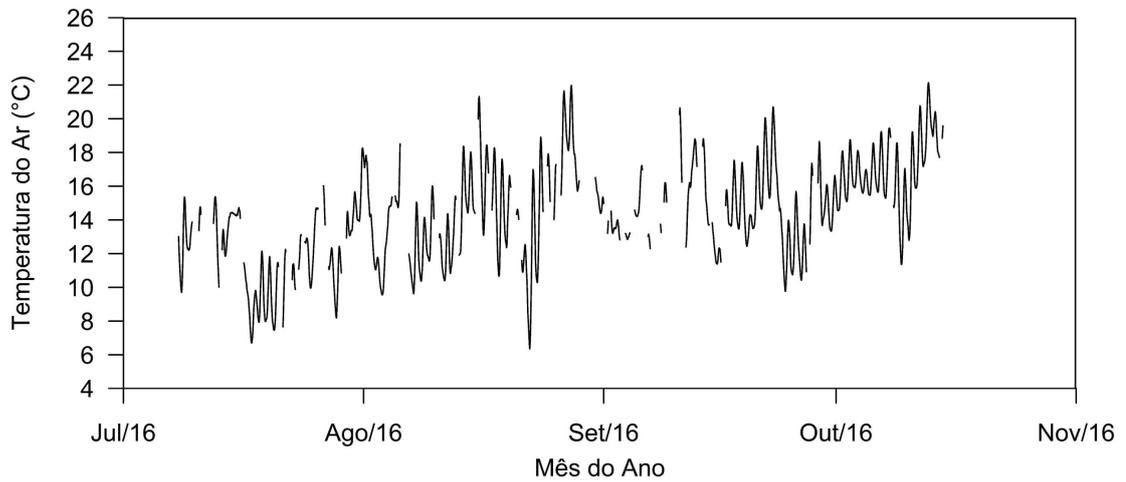


Fonte: Autora.

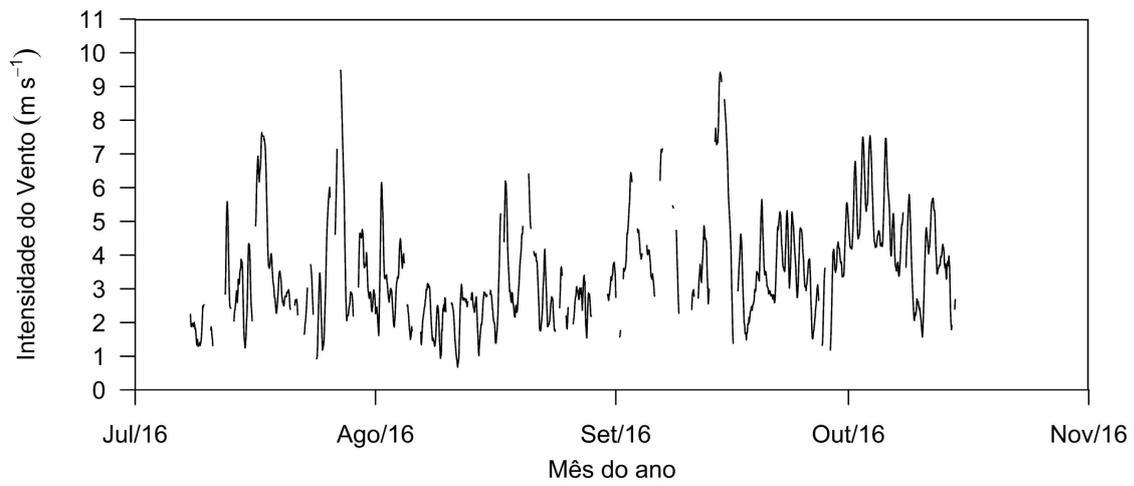
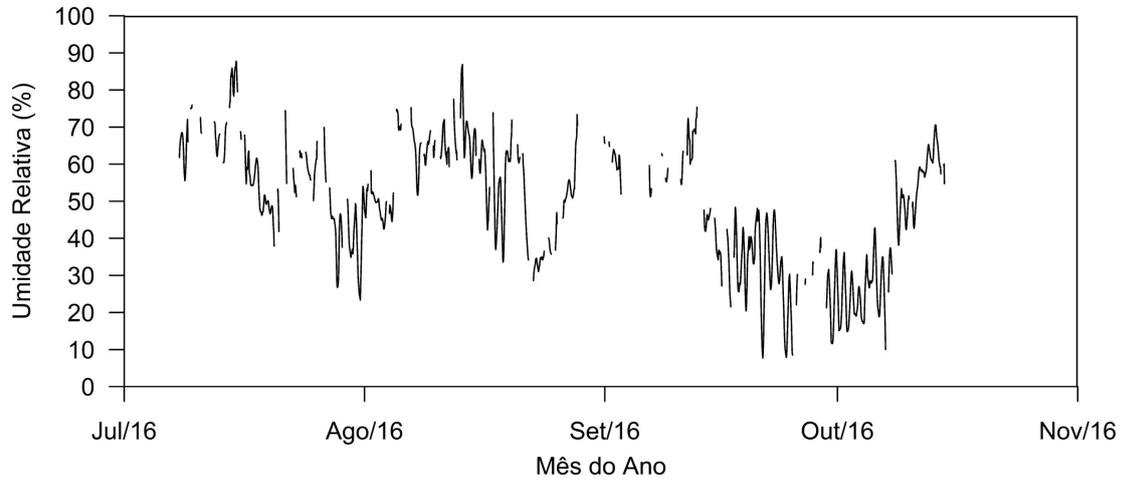
A figura 11 demonstra a variabilidade temporal dos parâmetros meteorológicos relativos ao período INV. De modo geral, pode-se perceber o ciclo diurno, assim como no caso do fluxo de  $\text{CO}_2$ , além disso, a partir do início de setembro alguns valores aumentam (temperatura do ar), indicando o final do inverno e início da primavera.

Segundo Reboita e Krusche (2018) que estudaram as normais climatológicas provisórias a partir dos dados da estação meteorológica instalada na FURG e dados de reanálise, e seguindo os padrões descritos pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) o clima da região pode ser classificado como temperado quente sempre úmido com verão quente, pela classificação Köppen-Geiger, e clima subtropical úmido pela classificação de Strahler, com predominância de ventos do quadrante nordeste ao longo do ano e chuvas bem distribuídas ao longo dos meses.

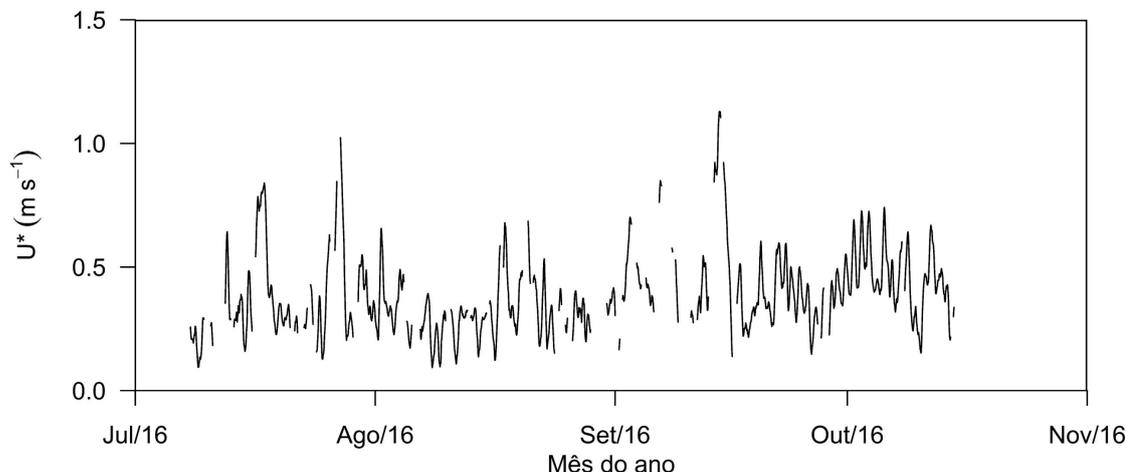
Figura 11 – Séries temporais das variáveis meteorológicas referente ao período de inverno. Temperatura do Ar, Pressão Atmosférica, Umidade Relativa, Intensidade do vento e Velocidade de fricção.



Continuação figura 11



Continuação figura 11

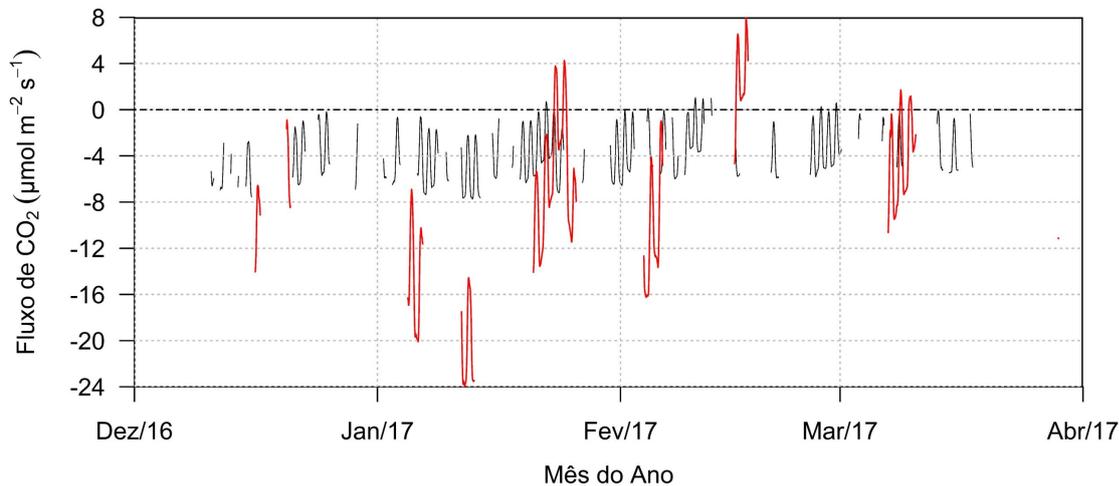


Fonte: Autora.

A figura 12 apresenta as medidas realizadas na Ilha da pólvora ao longo do período denominado como VER, foi aplicada média móvel de 8 e 90 horas (linha vermelha), para melhor representação. Pode-se perceber claramente o ciclo diurno ao longo da série e diferente do inverno, percebe-se uma regularidade visualmente maior na variação dos valores. Além disso, mesmo que a variabilidade diária alterne períodos em que o marisma se comporte como fonte de CO<sub>2</sub> (valores positivos), e períodos em que o mesmo se comporte como um sumidouro de CO<sub>2</sub> (valores negativos), é evidente que o comportamento de sumidouro está se sobrepondo, chegando a apresentar uma ordem de grandeza a mais, mesmo que a média geral, em comparação com o inverno, tenha apresentado uma diferença pequena (tabela 2) e significativamente diferente (tabela 4).

Guo et al. (2009) demonstraram a variação anual dos fluxos de CO<sub>2</sub> comparando dois estratos de um marisma localizado nas redondezas de Shanghai, um extrato baixo, sujeito a uma frequência de alagamento maior, e um extrato alto, com menor frequência de alagamento, estes autores conseguiram perceber as diferenças discrepantes entre as estações de crescimento e senescência do marisma. A marisma da ilha da pólvora não apresenta estação de senescência clara, uma vez que as espécies mais frequentes ocorrem ao longo do ano todo (COSTA et al., 1997; COSTA, 2007; COSTA; MARANGONI, 2010), e há um período de menor crescimento, porém a diferença é menos expressiva, isto porque as espécies que compõem mais de 90% da marisma da ilha da pólvora são perenes (AZEVEDO, 2000).

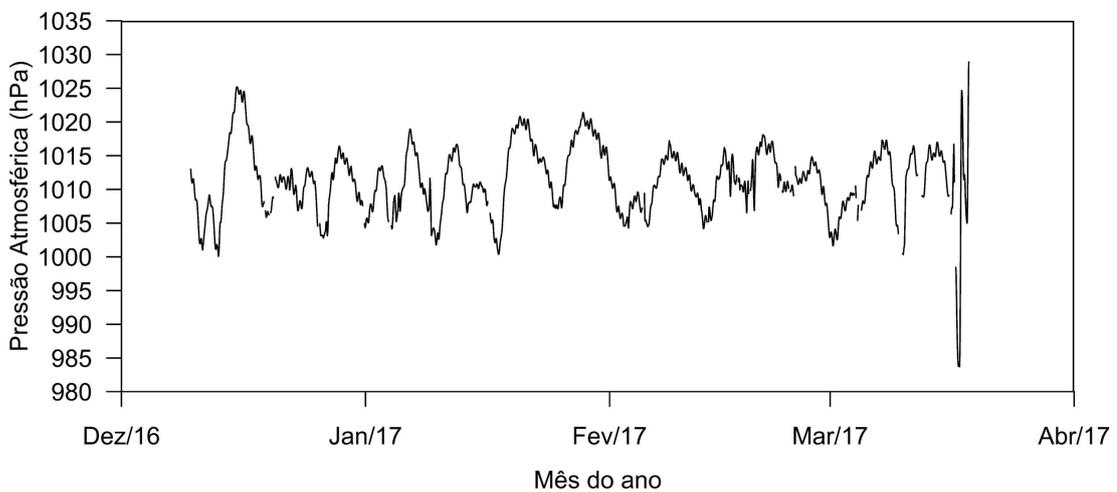
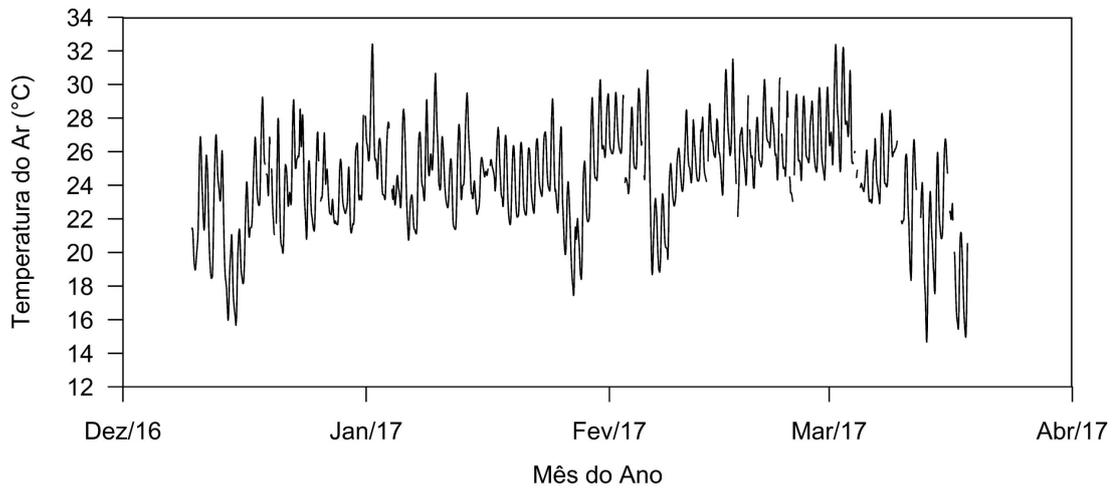
Figura 12 – Série temporal do Fluxo de CO<sub>2</sub> referente ao período de verão. Linha no meio indica valor "0", evidenciando padrões de valores positivos e negativos. A linha vermelha série com aplicação da média móvel.



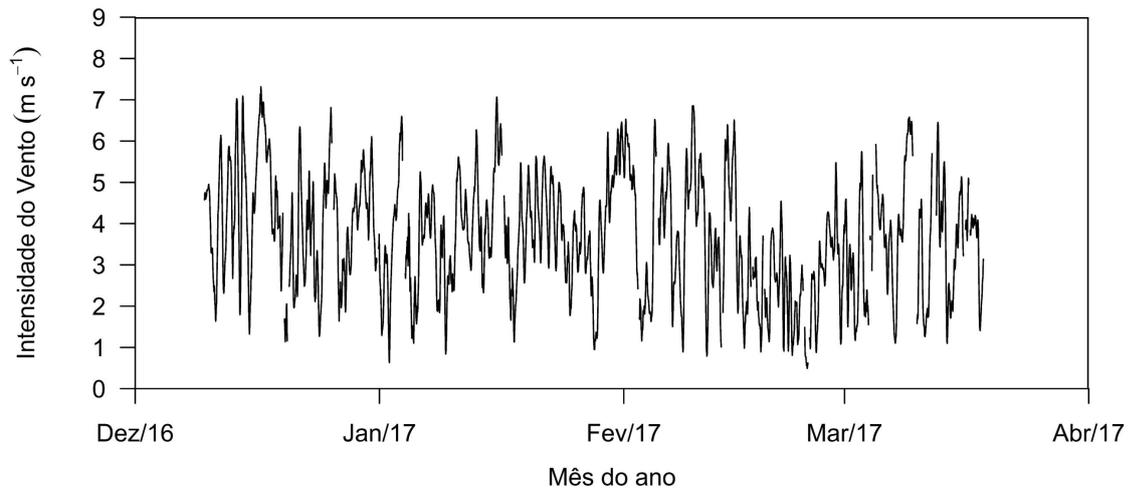
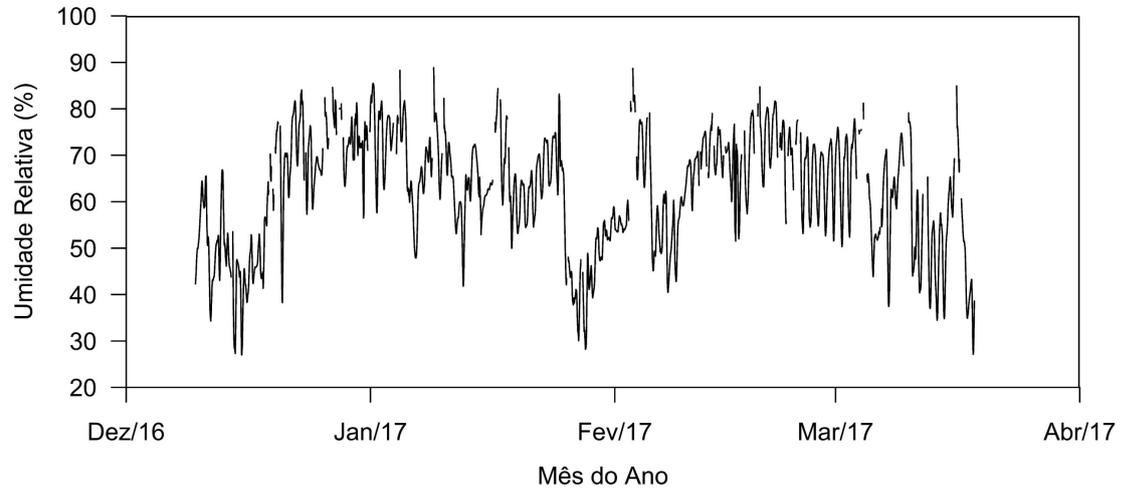
A figura 13 demonstra a variabilidade temporal dos parâmetros meteorológicos relativos ao período VER. Assim como para os dados de fluxo de CO<sub>2</sub>, foi aplicada média móvel de 8 horas para melhor representação. Embora o ciclo diurno não seja tão perceptível, como no caso do fluxo de CO<sub>2</sub>, pode-se perceber uma maior estabilidade na variação dos valores dos parâmetros meteorológicos, entretanto a partir do mês de março alguns valores começam a demonstrar sinais de diminuição (temperatura do ar) e padrões começam a mudar (pressão atmosférica e umidade relativa), indicando o final do verão e início do outono.

Reboita e Krusche (2018) discorreram sobre os valores dos parâmetros meteorológicos coletados por uma estação meteorológica instalada na cidade de Rio Grande entre 1991 e 2010, as autoras encontraram valores de temperatura do ar, pressão atmosférica, umidade relativa e intensidade do vento que apresentaram uma variação sazonal bem marcada, neste sentido, os dados apresentados neste trabalho refletem satisfatoriamente as condições meteorológicas decorrentes na região. Além disso, (PARISE; CALLIARI; KRUSCHE, 2009) analisando a ocorrência de eventos extremos na região e as relacionando a erosão costeira, discutiram que um maior número de frentes ocorrem durante o outono e inverno, neste sentido, uma maior estabilidade meteorológica é esperada para a época em questão.

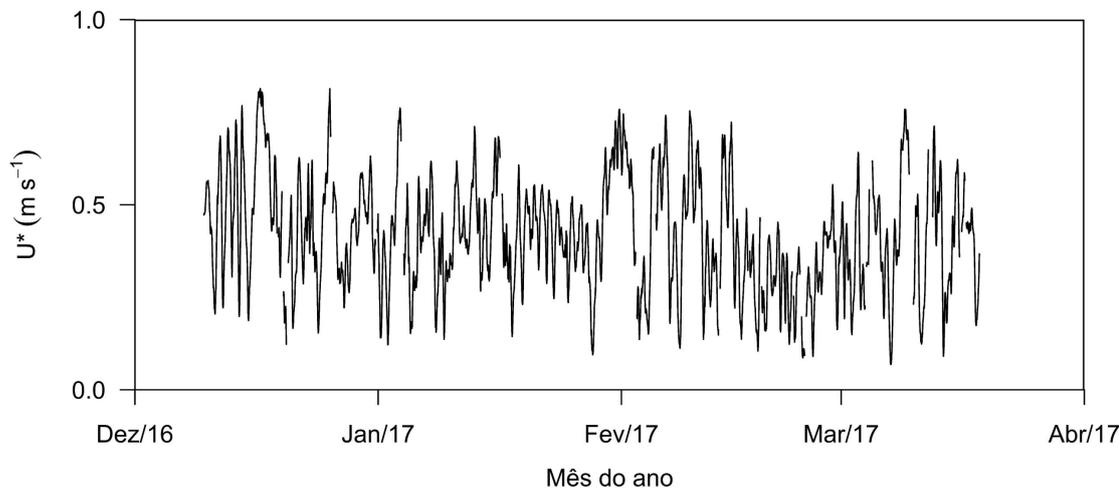
Figura 13 – Séries temporais das variáveis meteorológicas referente ao período de verão. Temperatura do Ar, Pressão Atmosférica, Umidade Relativa, Intensidade do vento e Velocidade de fricção.



Continuação figura 13



Continuação figura 13



Fonte: Autora.

A tabela 4 representa os valores obtidos através do teste de Mann-Whitney-Wilcoxon (W), que foi utilizado com o objetivo de determinar se as médias entre os dois grupos de análise (INV e VER) diferem. Embora alguns dos valores de média tenham sido relativamente próximos (tabela 2), o teste W demonstrou que as médias dos parâmetros P<sub>Atm</sub> e U\* foram maiores no INV e T<sub>Ar</sub>, U<sub>R</sub> e I<sub>vento</sub> apresentaram as maiores médias no VER, já fluxo de CO<sub>2</sub> apresentou média maior no INV, e a média de todas as variáveis são estatisticamente diferentes. Artigas et al. (2015) testou a diferença entre médias avaliadas de marisma médio e marisma baixo (cuja taxa e frequência de alagamento é maior) e percebeu média maior no marisma alto, além desta diferença ser estatisticamente significativa, entretanto o comportamento de sumidouro ocorreu nas duas médias, mesmo com valores diferentes.

No caso dos dados apresentados na tabela 2 cujas médias foram avaliadas e os valores apresentados na tabela 4, o que está sendo comparado é a diferença entre duas estações em uma região cujo comportamento bem marcado das duas época já é bem conhecido, neste sentido, o que se buscou com esta avaliação foi determinar que a análise da média em si não basta, pois os valores absolutos das médias, com exceção da média da temperatura do ar, foram relativamente próximos, entretanto, sabe-se que o padrão de variação de tais parâmetros são diferentes nas duas estações, fato corroborado pela diferença significativa do teste. Parise, Calliari e Krusche (2009) estudando 23 eventos meteorológicos que ocorreram entre os anos de 2006 e 2007 demonstraram que 35% dos eventos ocorreram no outono e inverno, esta maior ocorrência de eventos durante o inverno

está presente no padrão de variação dos resultados apresentados nas figuras 11 e 13, uma vez que a análise conjunta dos padrões atmosféricos podem indicar mudanças nas condições meteorológicas.

Tabela 4 – Valores do Teste de Mann-Whitney-Wilcoxon (W) e  $p$  (Probabilidade a 95% de confiança) para o Fluxo de CO<sub>2</sub> (FCO<sub>2</sub>) e os parâmetros meteorológicos TAR (Temperatura do ar), PAtm (Pressão Atmosférica), UR (Umidade Relativa), Int (Intensidade do vento) e U\* (Velocidade de fricção). Comparação entre médias de inverno e verão.\* valor significativo.

	W	$p$
FCO <sub>2</sub>	7161502	$4,111e^{-7*}$
Tar	258018	$< 2,2e^{-16*}$
PAtm	15934191	$< 2,2e^{-16*}$
UR	5207583	$< 2,2e^{-16*}$
Int	8804443	$1,106e^{-14*}$
U*	8336082	$< 2,2e^{-16*}$

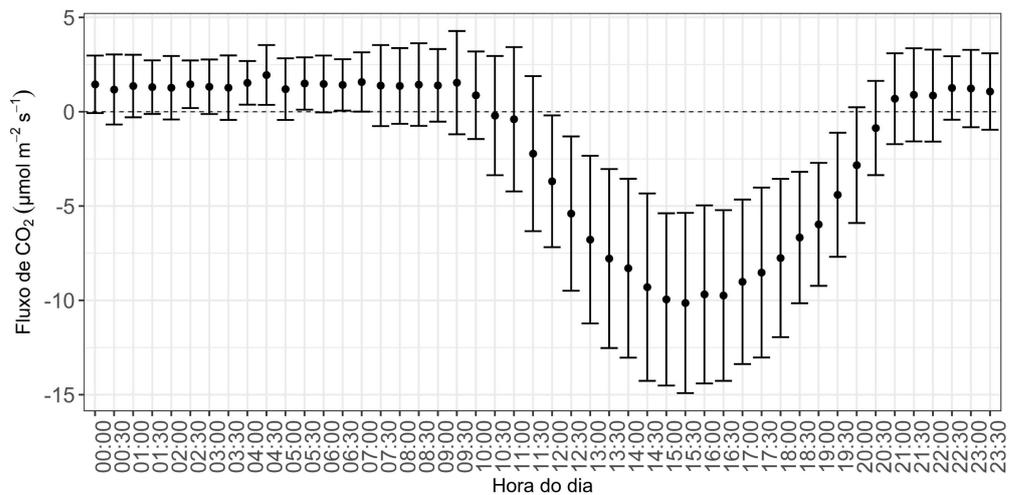
### 4.3 Análise horária do Fluxo de CO<sub>2</sub> e dos parâmetros meteorológicos.

A figura 14 representa a média da variação horária dos valores do fluxo de CO<sub>2</sub> para o período de inverno. A linha "0" na figura 14 evidencia os valores negativos e positivos do fluxo de CO<sub>2</sub>. Os valores negativos de fluxo demonstram o comportamento de absorção de CO<sub>2</sub> por parte do marisma, que varia ao longo do dia, aumentando a partir das 10:00 hs e se estendendo até o final do dia. O menor valor de média horária apresentado no inverno ocorreu as 15hs e 30 minutos e foi de  $-10,14\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , já o maior valor de média horária ocorreu as 04:30 e foi de  $1,94\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Quando o desvio padrão relativo a cada bloco de hora é analisado, pode-se perceber que a variação dos dados é maior em horários em que o padrão está mudando, sendo que o maior valor de desvio padrão foi as 15:00 ( $\pm 4,96$ ).

Estudos reportam o mesmo comportamento do ciclo diurno dos fluxos de CO<sub>2</sub> encontrados em marismas, Kathilankal et al. (2008) e Artigas et al. (2015) embora tenham avaliado a influência do alagamento na variação dos fluxos, demonstraram o padrão diário da variação, o que não chega a ser uma surpresa, uma vez que o processo fotossintético é bem evidente na variabilidade do fluxo de CO<sub>2</sub> de plantas de marisma (MOFFETT et al., 2010; GOULDEN; LITVAK; MILLER, 2007). Além disso, marismas baixos, que apresentam altas frequências de alagamento, são povoados por espécies que apresentam adaptações, tal como *S alterniflora*, uma das espécies dominantes da Ilha da pólvora, cujo metabolismo pode reciclar o CO<sub>2</sub> internamente, entretanto este processo precisa ser melhor entendido através de experimentos específicos (KATHILANKAL et al., 2008).

Outro aspecto que deve ser levado em consideração é o fato de que as espécies dominantes da Ilha da pólvora, embora apresentem variações ao longo do ano, em termos de época reprodutiva e estratégias de fuga, são consideradas perenes (AZEVEDO, 2000), assim, uma das funções ecológicas do marisma se mantém ao longo do inverno e do verão, como é demonstrado nos dados apresentados anteriormente.

Figura 14 – Média horária do Fluxo de CO<sub>2</sub> referente ao período de inverno.

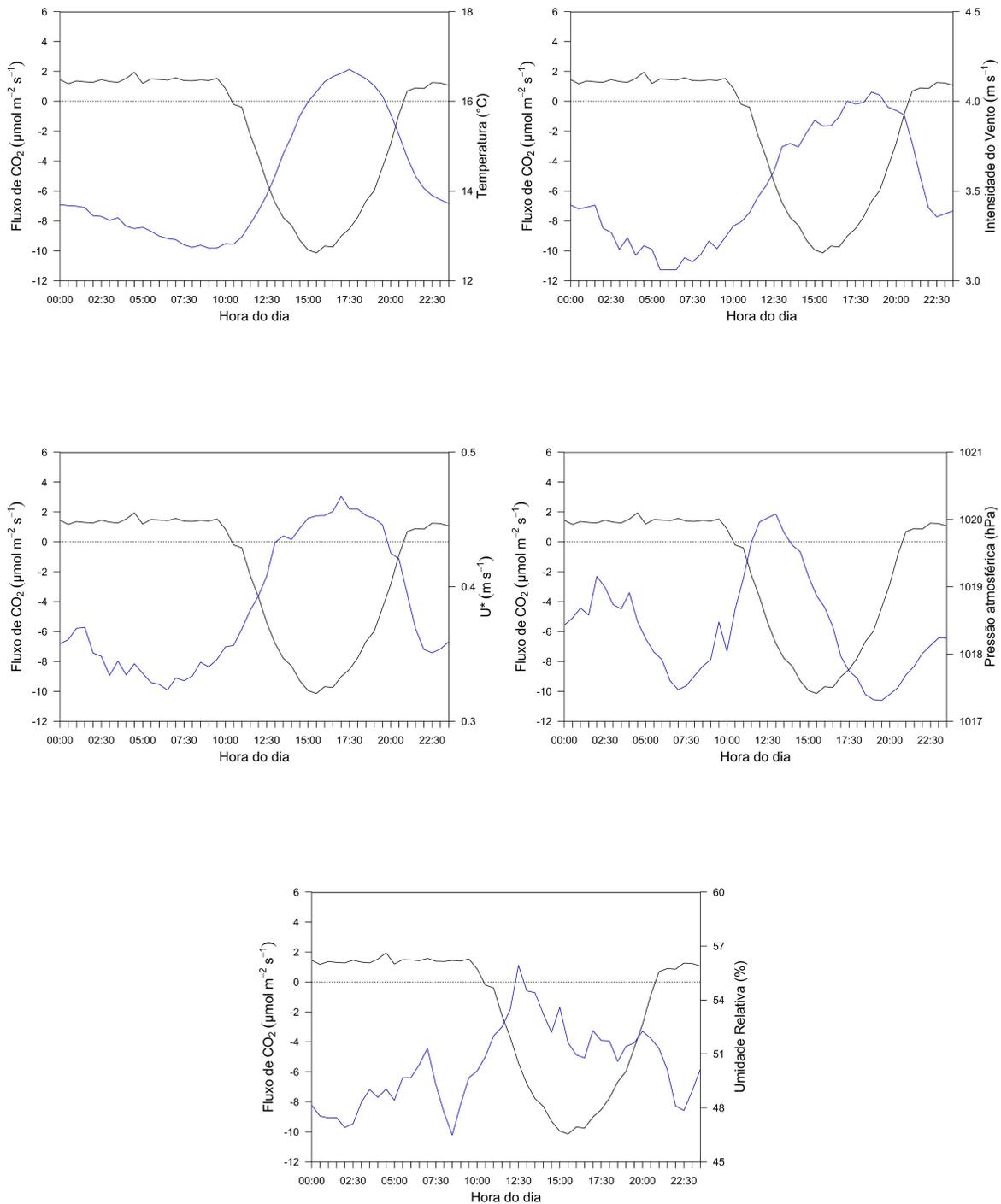


Fonte: Autora.

A figura 15 representa a variação horária dos fluxos de CO<sub>2</sub> comparados aos parâmetros meteorológicos medidos na Ilha da pólvora no período do inverno. De maneira geral, a variação horária dos parâmetros pressão atmosférica e umidade relativa não demonstraram uma variação muito clara, entretanto, pode-se perceber que há uma relação mais clara e inversa entre fluxo de CO<sub>2</sub> e temperatura do ar, intensidade do vento e fricção do vento.

(REBOITA; KRUSCHE, 2018) classificou o clima da região através da análise de dados meteorológicos obtidos em uma estação meteorológica, e seus resultados mensais concordam com o encontrado neste trabalho, neste sentido entende-se que o padrão apresentado para as médias diárias, embora não discutidos, estejam alinhados com os apresentados. Parise, Calliari e Krusche (2009) analisando a ocorrência de eventos meteorológicos observou que há uma maior frequência durante o outono e inverno, isto pode explicar a falta de um padrão em algumas das variáveis, tais como pressão atmosférica e umidade relativa que estariam respondendo as mudanças meteorológicas decorrentes de tais eventos meteorológicos que ocorreram ao longo do período de estudo.

Figura 15 – Média horária do Fluxo de CO<sub>2</sub> (linha preta), e dos parâmetros meteorológicos, referente ao período de inverno.

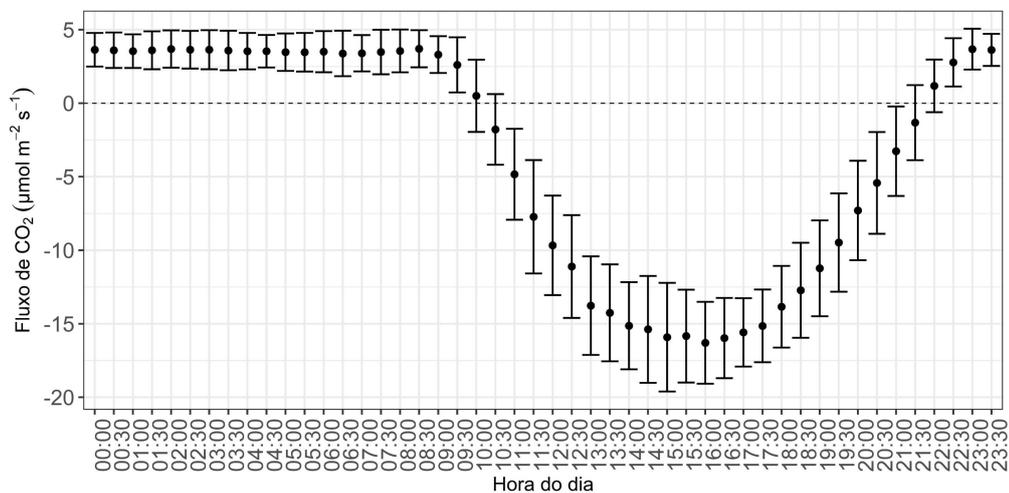


Fonte: Autora.

A figura 16 representa a média da variação horária dos valores do fluxo de CO<sub>2</sub> para o período de verão. A linha "0" na figura 16 evidencia os valores negativos e positivos do fluxo de CO<sub>2</sub>. Os valores negativos de fluxo demonstram o comportamento de absorção de CO<sub>2</sub> por parte do marisma, que varia ao longo do dia, aumentando no início da manhã

e se estendendo até o final do dia. O menor valor de média horária apresentado no verão ocorreu as 16:00 horas e foi de  $-16,29\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , já o maior valor de média horária ocorreu as 08 horas e 30 minutos e foi de  $3,70\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Quando o desvio padrão relativo a cada bloco de hora é analisado, pode-se perceber que a variação dos dados é maior em horários em que o padrão está mudando, sendo que o maior valor de desvio padrão foi as 11 horas e 30 minutos ( $\pm 3,85$ ).

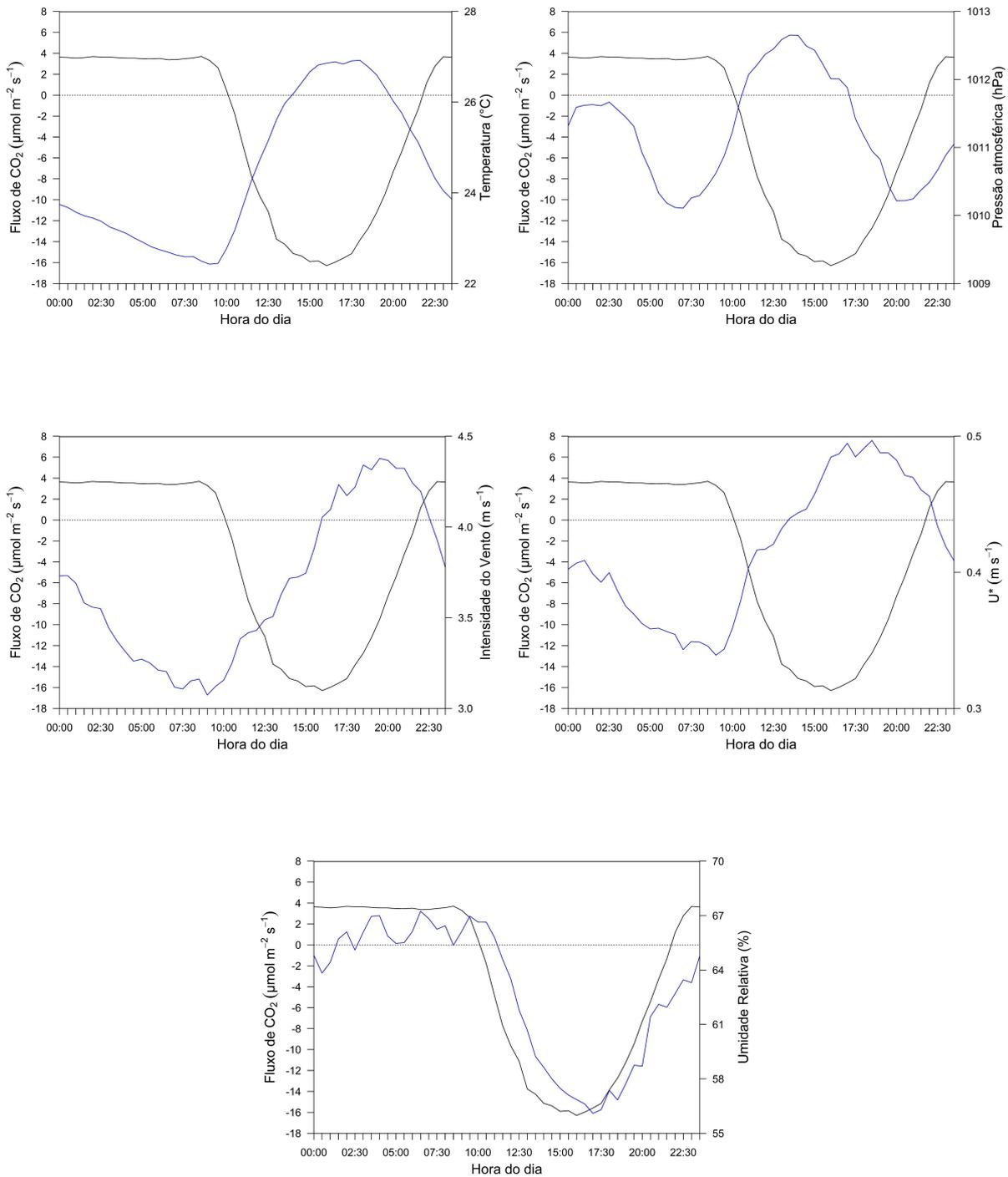
Figura 16 – Média horária do Fluxo de CO<sub>2</sub> referente ao período de verão.



Fonte: Autora.

A figura 17 representa a variação horária dos fluxos de CO<sub>2</sub> comparados aos parâmetros meteorológicos medidos na Ilha da pólvora no período do verão. Diferente do inverno, a variação horária dos parâmetros meteorológicos no período VER demonstra uma relação mais clara com o fluxo de CO<sub>2</sub>. Pode-se inferir uma maior estabilidade na variação dos parâmetros meteorológicos, uma vez que as condições meteorológicas demonstradas na figura 13 e o apontado por Parise, Calliari e Krusche (2009) cujos resultados apresentados demonstraram uma maior ocorrência de eventos extremos durante o outono e inverno. Além disso, os resultados apresentados por Reboita e Krusche (2018) demonstram uma uniformidade na variação anual de precipitação e uma variação bem marcada no campo de pressão atmosférica relacionado ao anticiclone subtropical do atlântico sul, que no verão se afasta em direção a costa africana.

Figura 17 – Média horária do Fluxo de CO<sub>2</sub> (linha preta) e dos parâmetros meteorológicos, referente ao período de verão.



Fonte: Autora.

#### 4.4 Correlação, Autocorrelação e Correlação Cruzada.

As figuras 18 e 19 demonstram as matrizes de correlação entre todas as variáveis nos períodos INV e VER, respectivamente. De acordo com as tabelas 5 e 6 todos os valores

de correlação entre os fluxos de CO<sub>2</sub> e os parâmetros meteorológicos são significativos.

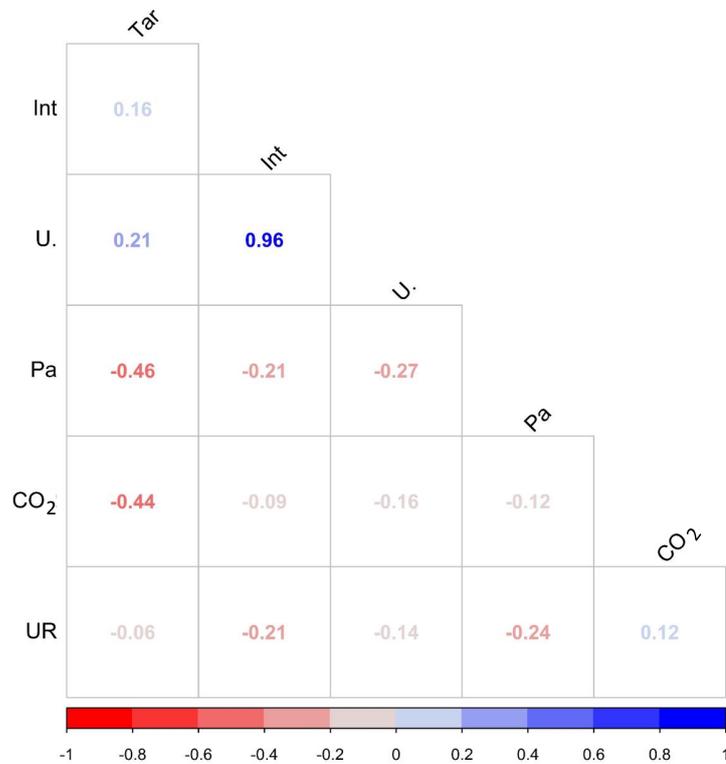
Para o período INV, quase todas as correlações foram negativas, e o maior valor de correlação encontrado foi entre o fluxo de CO<sub>2</sub> e temperatura do ar, já o menor valor encontrado foi entre fluxo de CO<sub>2</sub> e Intensidade do Vento. Para o período VER, quase todas as correlações também foram negativas, com o maior valor de correlação entre o fluxo de CO<sub>2</sub> e temperatura do ar, e o menor foi entre o fluxo de CO<sub>2</sub> e pressão atmosférica.

Nos dois períodos a única correlação positiva foi entre o fluxo de CO<sub>2</sub> e umidade relativa. Guo et al. (2009) testou a relação entre alguns parâmetros meteorológicos e biofísicos e a variação no fluxo de CO<sub>2</sub>. Os autores encontraram uma forte correlação negativa entre o fluxo de CO<sub>2</sub> e temperatura do ar nos dois sítios do estudo. Os resultados encontrados neste estudo demonstram a variabilidade temporal dos fluxos de CO<sub>2</sub> relacionada com as condições meteorológicas da região, entretanto estas variações, aliadas a características das espécies que formam as marismas da Ilha da Pólvora, permitiu que o comportamento de sumidouro se mantivesse nas duas estações estudadas.

Tabela 5 – Valores de  $p$  oriundos da matriz de correlação, para o Fluxo de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>) e os parâmetros meteorológicos TAr (Temperatura do ar), PAtm (Pressão Atmosférica), UR (Umidade Relativa), Int (Intensidade do vento) e U\* (Velocidade de fricção) no período INV.\* valor significativo.

	CO <sub>2</sub>	TAr	PAtm	UR	Int	U*
CO <sub>2</sub>						
TAr	<0,001*					
PAtm	$4,28e^{-13}$ *	<0,001*				
UR	$1,34e^{-13}$ *	0,0009*	<0,001*			
Int	$3,30e^{-8}$ *	<0,001*	<0,001*	<0,001*		
U*	<0,001*	<0,001*	<0,001*	<0,001*	<0,001*	

Figura 18 – Matriz de correlação entre fluxo de CO<sub>2</sub> e parâmetros meteorológicos no período INV.

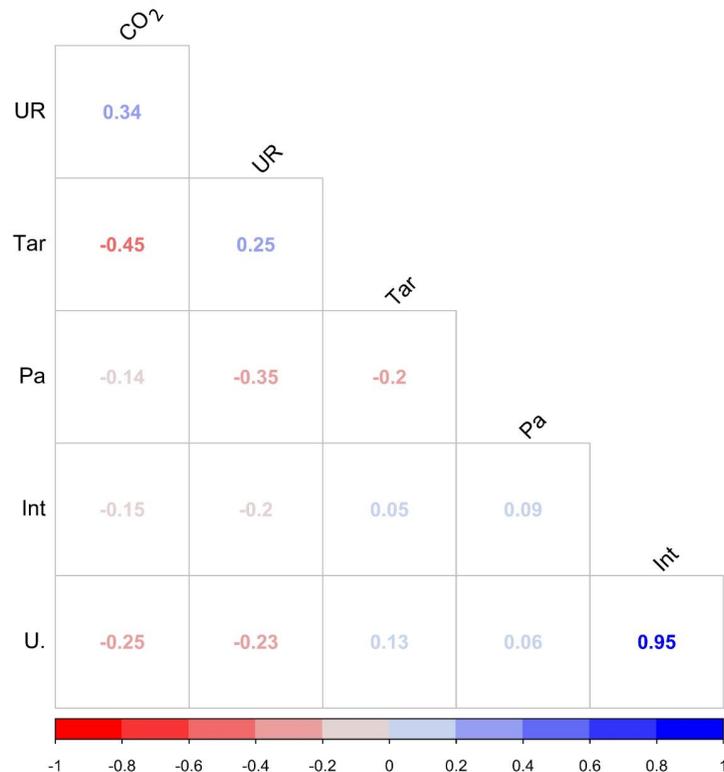


Fonte: Autora.

Tabela 6 – Valores de  $p$  oriundos da matriz de correlação, para o Fluxo de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>) e os parâmetros meteorológicos TAr (Temperatura do ar), PAtm (Pressão Atmosférica), UR (Umidade Relativa), Int (Intensidade do vento) e U\* (Velocidade de fricção) no período VER.\* valor significativo.

	CO <sub>2</sub>	TAr	PAtm	UR	Int	U*
CO <sub>2</sub>						
TAr	<0,001*					
PAtm	<0,001*	<0,001*				
UR	<0,001*	<0,001*	<0,001*			
Int	<0,001*	0,0006*	1,78e <sup>-9</sup>	<0,001*		
U*	<0,001*	<0,001*	0,0001*	<0,001*	<0,001*	

Figura 19 – Matriz de correlação entre fluxo de CO<sub>2</sub> e parâmetros meteorológicos no período VER.



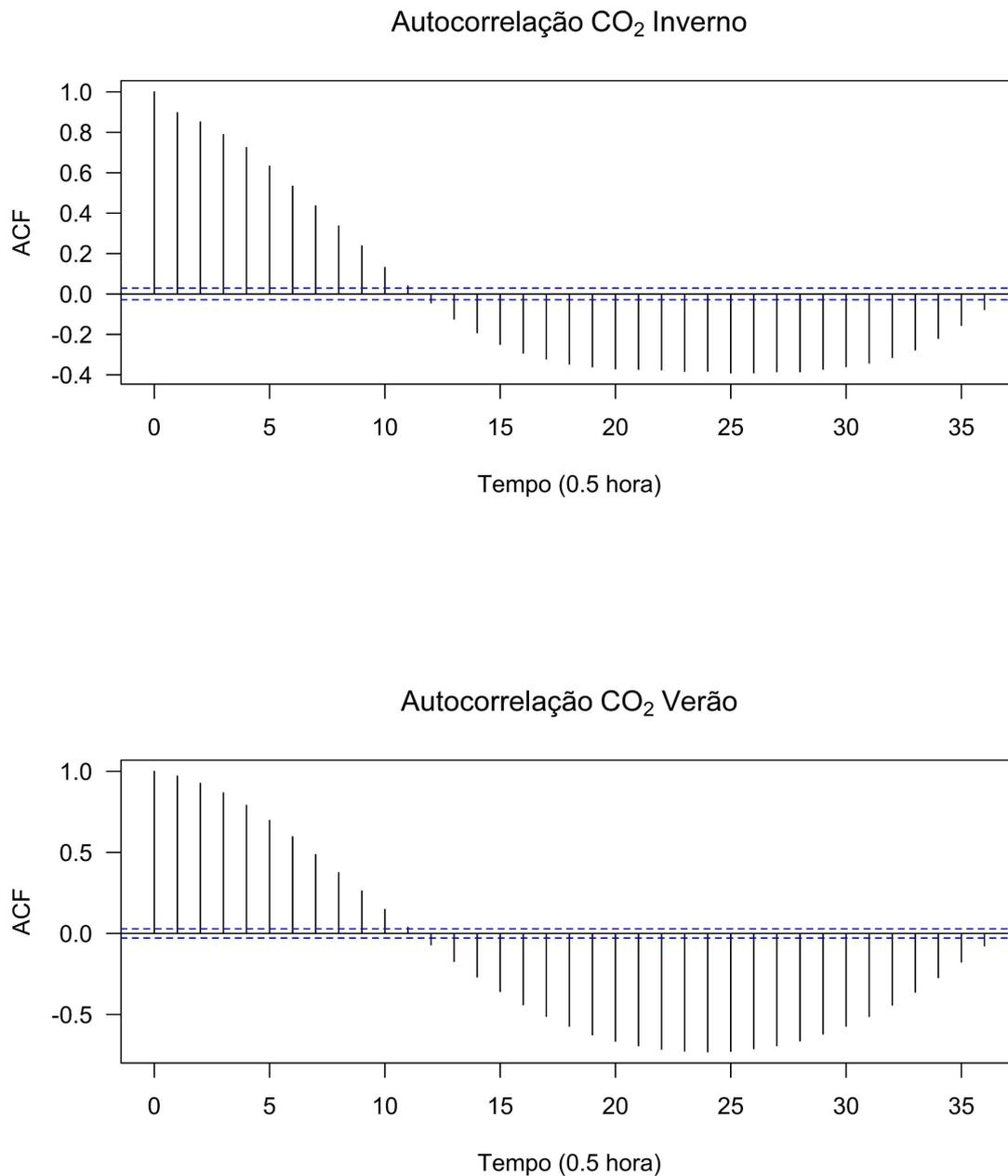
Fonte: Autora.

A figura 20 representa a curva de autocorrelação do fluxo de CO<sub>2</sub> para os períodos INV (A) e VER (B). Tanto a curva do inverno (A) quanto a curva de verão (B) apresentam uma defasagem de aproximadamente 5 horas (10 lags), embora a defasagem máxima seja de até 12 horas (24 lags), o que corresponde a um ciclo diurno, concordando com as figuras 14 e 16 que apresentaram a média horária medida nos períodos INV e VER. Guo et al. (2009) aplicando transformadas de ondeletas não detectou pico de variação nos fluxos de CO<sub>2</sub> relativo a frentes e tempestades, uma vez que não ocorreram eventos que fossem mais significativos do que o pico de variação relativo ao ciclo de maré, os mesmos autores observaram que os principais picos de variação ocorreram nas frequências relativas ao ciclo diurno e em intervalos que variaram entre 10 e 20 dias, que correspondeu ao ciclo lunar.

Na marisma da Ilha da Pólvora, mais de 90% da composição são de espécies características de marismas médios, com frequência de alagamento abaixo de 30% (AZEVEDO, 2000; NOGUEIRA et al., 2001), assim é de se esperar que não haja uma curva de defasagem de tempo demonstrando correspondência entre frequência da maré astronômica e variação

no fluxo de CO<sub>2</sub>. Entretanto, poderia se esperar uma defasagem entre a variação do fluxo e um período maior do que um ciclo diurno, porém, os resultados de correlação cruzada não demonstraram padrões diferentes do que os encontrados até o momento.

Figura 20 – Autocorrelação do Fluxo de CO<sub>2</sub> referente aos períodos de inverno e verão. A linha azul indica o intervalo de confiança ao nível de 95%.

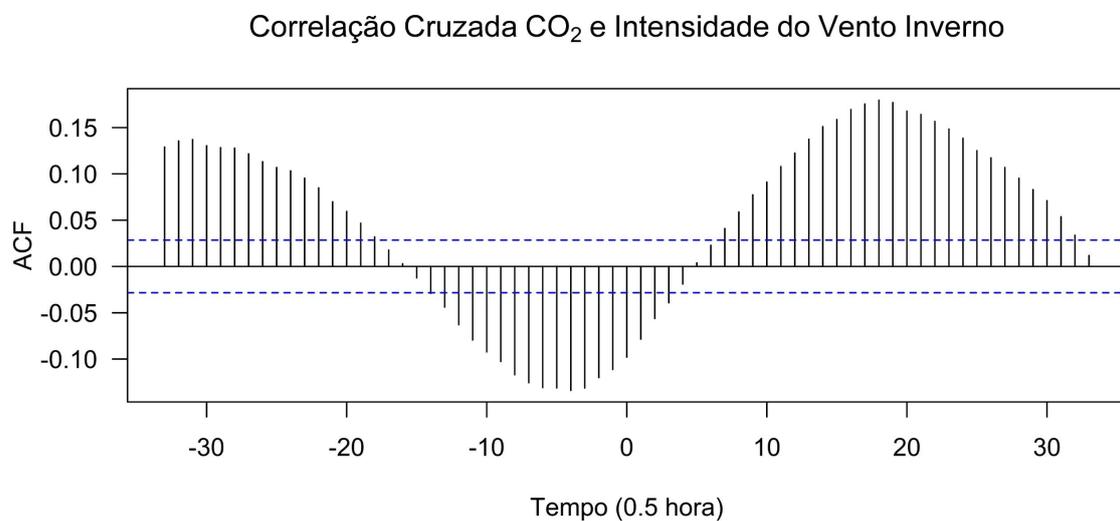
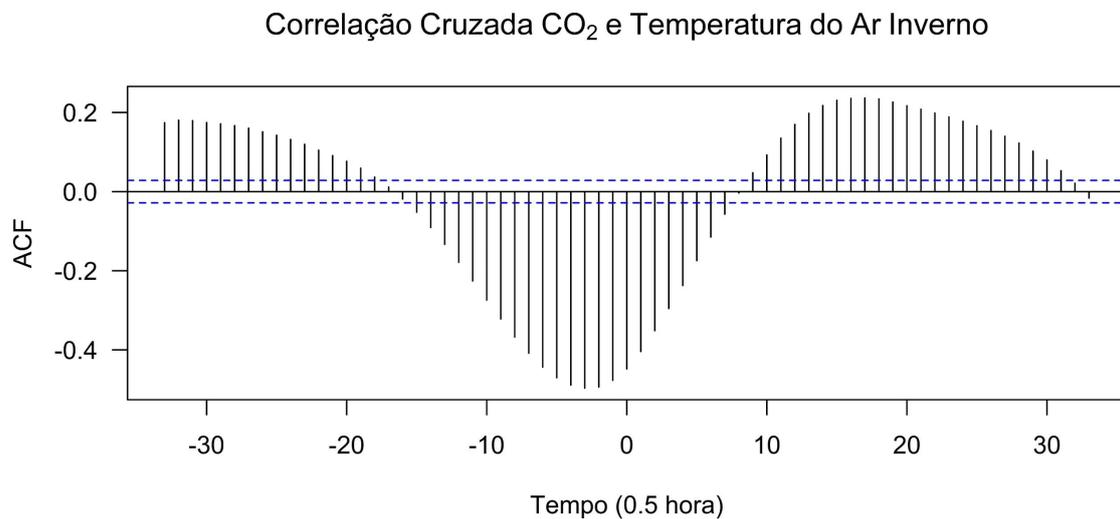


Fonte: Autora.

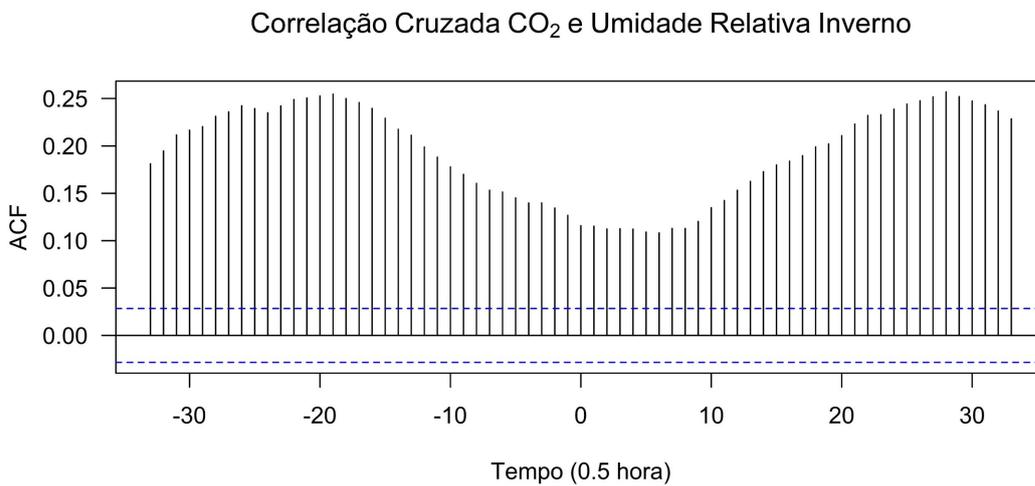
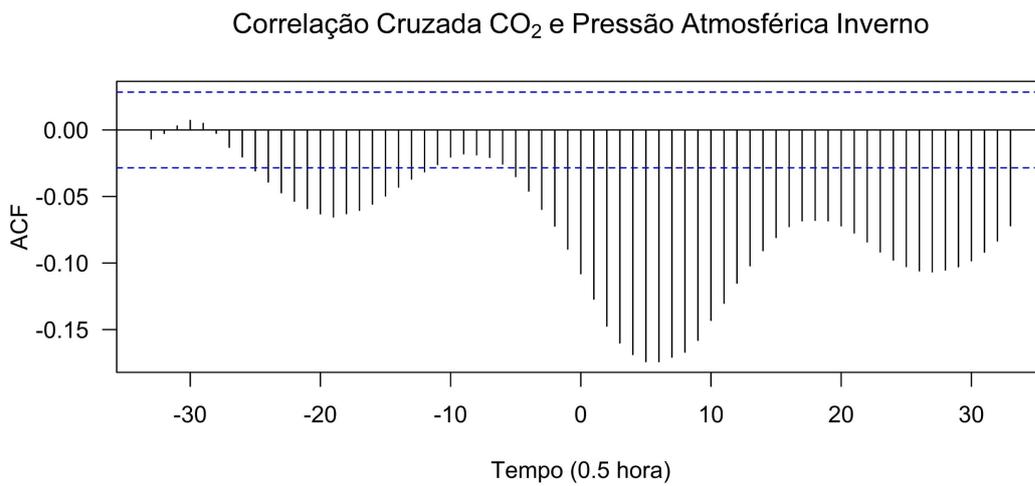
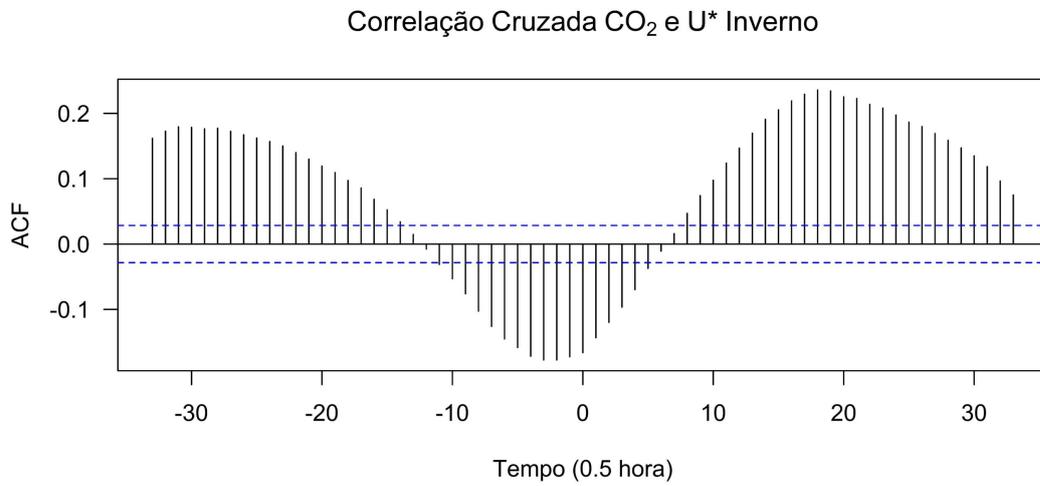
A figura 21 representa os valores de correlação cruzada do fluxo de CO<sub>2</sub> com as variáveis meteorológicas para o período de inverno. De maneira geral, há uma defasagem

entre o fluxo de  $\text{CO}_2$ , temperatura do ar, intensidade do vento e velocidade de fricção de até 10 horas (20 lags). Já pressão atmosférica e umidade relativa podem estar forçando uma resposta ao fluxo de  $\text{CO}_2$  à variação destes parâmetros meteorológicos mais instantânea e não apresenta um padrão claro. O estudo de Guo et al. (2009) que efetuou a análise de transformada de ondeleta estava focado em determinar se os picos de variação nos fluxos estariam variando de acordo com a variação de maré, os autores encontraram correspondência no período de variação conforme esperado tanto para os fluxos de  $\text{CO}_2$  quanto para a relação dos fluxos com os parâmetros meteorológicos.

Figura 21 – Correlação Cruzada do Fluxo de  $\text{CO}_2$  com as variáveis meteorológicas referente ao período de inverno. A linha azul indica o intervalo de confiança ao nível de 95%.



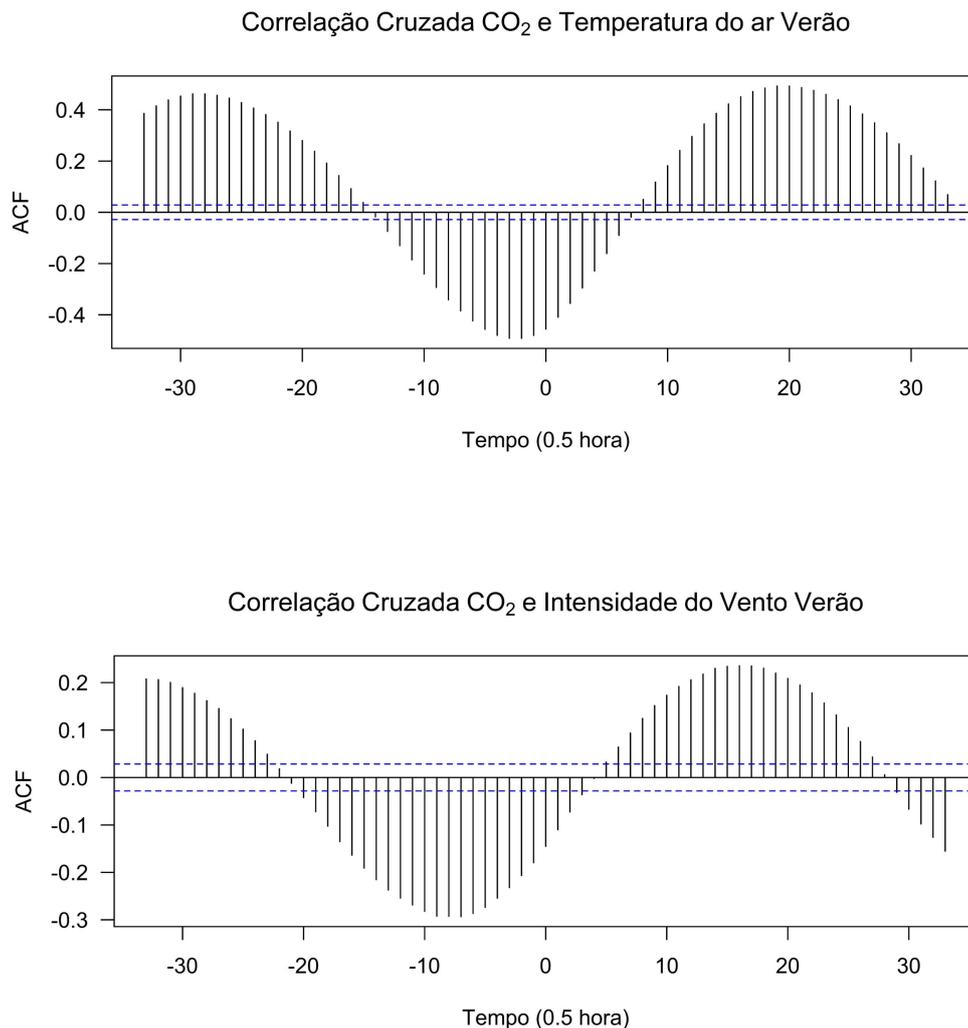
Continuação figura 21



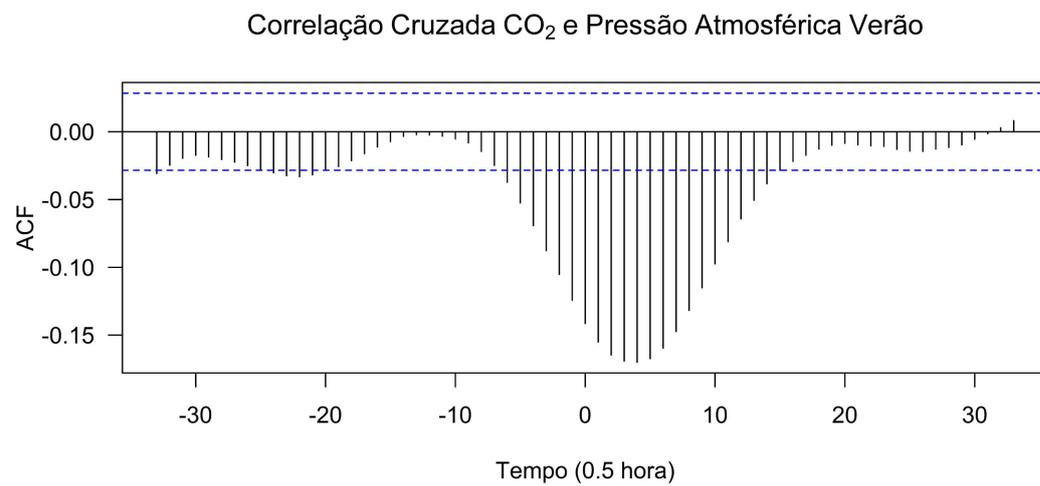
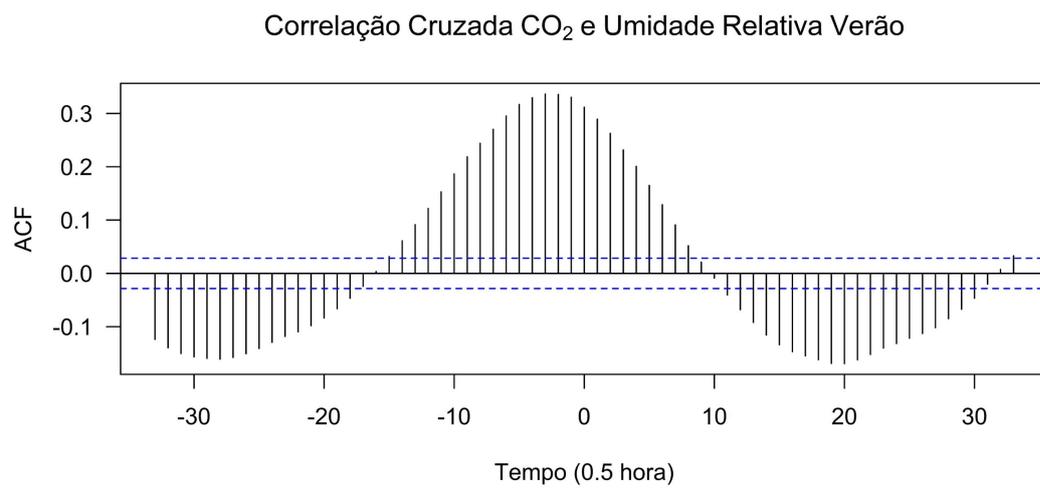
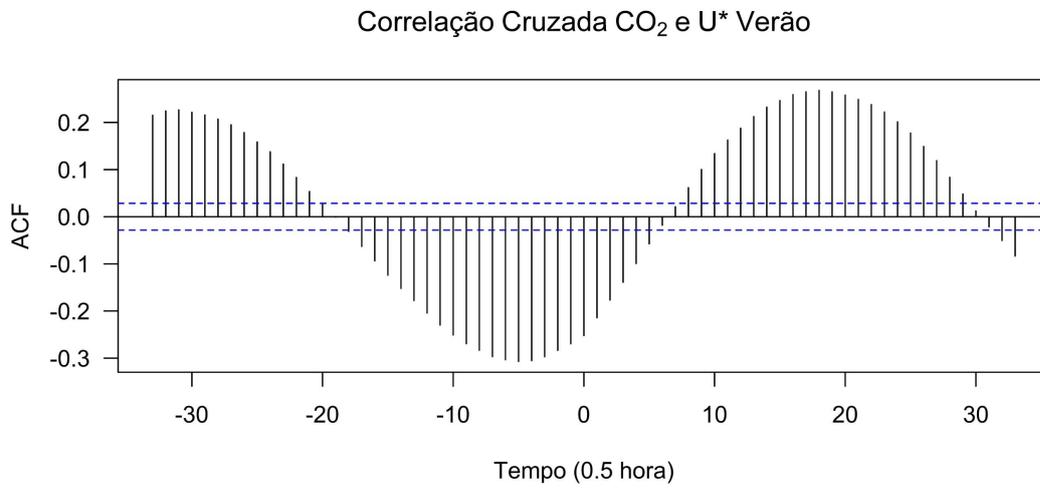
Fonte: Autora.

A figura 22 representa os valores de correlação cruzada do fluxo de CO<sub>2</sub> com as variáveis meteorológicas para o período de verão. Pode-se perceber um padrão cíclico na variação da interação do fluxo de CO<sub>2</sub> com temperatura do ar, intensidade do vento e umidade relativa, com defasagens variadas, demonstrando que embora haja uma diferença na resposta, ainda assim, a defasagem de tempo regula com o ciclo diurno. A pressão atmosférica apresentou padrão de resposta com defasagem de até 2,5 horas (5 lags). Como reportado anteriormente acerca dos resultados de Guo et al. (2009) que encontrou picos de variação para o fluxo de CO<sub>2</sub> e parâmetros meteorológicos que variaram entre menos de um ciclo diurno e de acordo com a variação de maré, os dados aqui apresentados demonstram com clareza o padrão diário da variabilidade temporal dos fluxos e sua relação com os parâmetros meteorológicos escolhidos para o presente estudo.

Figura 22 – Correlação Cruzada do Fluxo de CO<sub>2</sub> com as variáveis meteorológicas referente ao período de verão. A linha azul indica o intervalo de confiança ao nível de 95%.



Continuação figura 22



Fonte: Autora.

## 4.5 Estimativa espacial do fluxo de CO<sub>2</sub>.

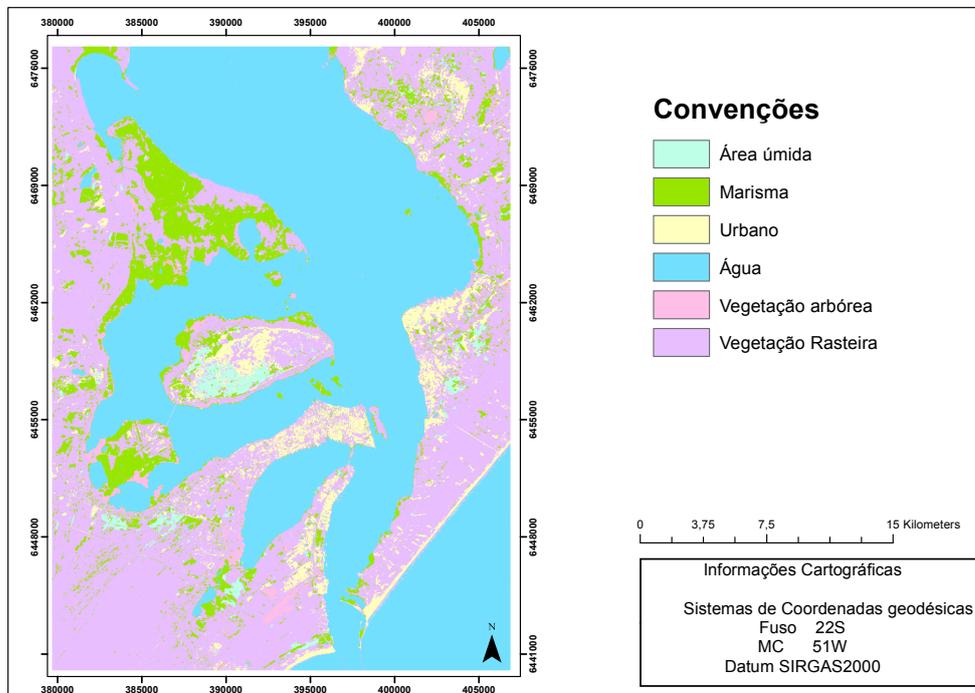
A figura 23 demonstra a distribuição total das classes escolhidas para realizar a estimativa das áreas de marisma no estuário da lagoa dos patos. Através da metodologia utilizada, a área total de marisma encontrada foi de 89,69km<sup>2</sup>. Costa et al. (1997) e Marangoni (2008) discorreram sobre a variação nas áreas de marisma ao longo do tempo. Os autores concluíram que as áreas de marisma estiveram relativamente estáveis entre o período de 1947 e 2000 sendo que o principal motivo de perda destas áreas foi a erosão. Os resultados encontrados neste trabalho estão um pouco acima do encontrado pelos autores, isto pode ser explicado pelos resultados apresentados na tabela 7 em que na estimativa da área de cada classe escolhida, como houve confusão entre marisma e água, pode ser que a diferença tenha sido classificado como área externa ao marisma, pertencendo a classe área úmida, além disso, conforme a figura 23 pode se perceber que áreas claramente fora das áreas de marisma estão classificadas como tal. A classificação realizada apresentou acurácia geral de 77,5% e índice Kappa igual a 0,73. Conforme apresentado por Costa et al. (1997) e Nogueira e Costa (2003) 98% das áreas de marisma são representadas por marisma médio e alto (apresentam baixa frequência de alagamento), o que de certa forma poderia subestimar a estimativa, caso a metodologia não fosse capaz de estimar as áreas de marisma baixo, devido a reduzida área. Entretanto, a principal formação de marisma baixo, localizado na margem de São José do Norte, cuja frequência de alagamento é maior, além de estar mais propenso ao estresse relativo a variação de salinidade inerente de área estuarina (COSTA et al., 1997; COSTA; MARANGONI, 2000; MARANGONI, 2008), foi bem representada.

A área da marisma foi estimada com o intuito de extrapolar os valores de fluxo de CO<sub>2</sub> para o estuário da lagoa dos patos, o valor utilizado foi de 89,69km<sup>2</sup>. Para o período INV, considerando a média global, conforme a tabela 2, de -2,33μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> e os 99 dias correspondentes ao período estudado pela covariância de vórtices, o valor total de carbono retirado da atmosfera e incorporado pelo sistema é de -238,6gC m<sup>-2</sup>, já para o período VER, que de acordo com a tabela 2, apresentou média global de -3,59μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> e considerando os 99 dias correspondentes ao período estudado pela covariância de vórtices, o valor total de carbono retirado da atmosfera e incorporado pelo sistema é de -366,3gC m<sup>-2</sup>. Artigas et al. (2015) estimou incorporação de -979gC m<sup>-2</sup> e liberação de 766gC m<sup>-2</sup> para o período de um ano.

Como mencionado anteriormente, para a extrapolação dos valores para a área do estuário, foi considerado 89,69km<sup>2</sup>. O valor encontrado para o período INV foi de -21,40kgC incorporado pelo marisma no estuário, já no período VER, o valor foi de -32,85kgC incorporado pelo marisma do estuário da lagoa dos patos. Kathilankal et al. (2008) estimaram a diminuição dos valores de fluxo de CO<sub>2</sub> durante eventos de alagamento em marisma, os autores encontraram perdas de até 1gC m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> em condições de

dias ensolarados, as perdas chegaram a  $2,44\text{gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  sem condições meteorológicas especificadas.

Figura 23 – Estuário da Lagoa dos Patos, com destaque para área de marisma estimado.



Fonte: Autora

Tabela 7 – Matriz de confusão. AUm (Área úmida), VAr (Vegetação arbórea), Vras (Vegetação rasteira), AU (Acurácia do Usuário) e AP (Acurácia do Produtor).

Classes	Água	Marisma	Urbano	Vras	AUm	VAr	AU(%)
Água	49	5	0	0	0	0	100
Marisma	2	54	0	0	1	0	78.26
Urbano	0	0	34	0	0	0	92.86
Vras	0	0	0	55	1	1	47.06
AUm	9	1	1	5	58	0	100
VAr	0	0	25	0	0	59	72.73
AP (%)	100	90	65	80	90	40	

Fonte: Autora.

## 5 CONCLUSÕES

O papel das regiões costeiras no sequestro de carbono é um assunto que está em constante aprimoramento. As medidas inéditas que foram realizadas na marisma da Ilha da Pólvora tiveram o objetivo de avaliar os fluxos de CO<sub>2</sub> em dois períodos entre os anos de 2016 e 2017 para entender melhor o papel deste importante ecossistema enquanto sumidouro ou fonte de carbono para a atmosfera. Sendo assim, concluiu-se que:

1. A dinâmica populacional das espécies de marisma presentes na Ilha da pólvora e suas estratégias adaptativas, seja em relação a frequência de alagamento, a variação de salinidade e a sazonalidade, são suficientes para que o comportamento de sumidouro de CO<sub>2</sub> seja mantido nas duas estações analisadas.

2. Durante o inverno, devido a maior frequência de eventos de precipitação pluviométrica, os valores dos fluxos de CO<sub>2</sub> apresentaram um maior número de dados espúrios. Isto poderia ser explicado pela interferência que a presença de água no sensor acarreta. Talvez por isso, não houve a possibilidade de relacionar a variabilidade temporal dos fluxos de CO<sub>2</sub> com condições sinóticas que por ventura ocorreram na região durante a época da coleta dos dados.

3. A variabilidade do fluxo de CO<sub>2</sub> demonstrou o ciclo diurno, em que pode-se relacionar com a fotossíntese e a respiração, entretanto outros processos locais que poderiam estar presentes, como por exemplo a estratificação térmica que pode ocorrer em períodos com velocidade de fricção ( $U^*$ ) menores não ficaram evidentes através das análises realizadas.

4. Devido a umidade relativa do ar na região (nas duas estações analisadas) ter apresentado valores relativamente altos, não foi possível detectar períodos de seca suficientes para ocasionar uma modificação nos fluxos de CO<sub>2</sub> que pudessem ser explicados por este motivo. Entretanto, análises mais apuradas para entender o papel da umidade do ar na metodologia poderia estabelecer melhor a influência deste parâmetro nos sensores utilizados.

5. Diferenças termais significativas se desenvolvem quando as velocidades do vento e de fricção são baixas, e os processos superficiais de pequena escala são obliterados quando há atuação de ventos fortes. Dessa forma, possivelmente, outras variáveis não analisadas podem influenciar a variabilidade dos fluxos de CO<sub>2</sub>, além daquelas utilizadas no presente estudo.

Por fim, este trabalho trouxe valores desconhecidos até então para a região, contribuindo para a construção do conhecimento deste importante ecossistema costeiro. Já

é entendido a importância das marismas e sua contribuição em diversos serviços ecossistêmicos, assim, alavancar o conhecimento dos processos para sempre melhor entender o papel das marismas em diferentes cenários contribuirá para que medidas de conservação sejam implementadas para proteger este importante recurso natural tão impactado pelas atividades antrópicas.

## Referências

- ACOSTA, R. et al. Uma análise da sazonalidade dos fluxos superficiais de energia e carbono em um ecossistema de campos nativos inserido no bioma Pampa. *Ciência e Natura*, Universidad Federal de Santa Maria, v. 40, p. 132, mar 2018. ISSN 0100-8307.
- ANDREAE, M. O. et al. The Amazon Tall Tower Observatory (ATTO): Overview of pilot measurements on ecosystem ecology, meteorology, trace gases, and aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Copernicus GmbH, v. 15, n. 18, p. 10723–10776, sep 2015. ISSN 16807324.
- ARTIGAS, F. et al. Long term carbon storage potential and CO<sub>2</sub> sink strength of a restored salt marsh in New Jersey. *Agricultural and Forest Meteorology*, Elsevier, v. 200, p. 313–321, jan 2015. ISSN 01681923.
- AUBINET, M.; VESALA, T.; PAPALE, D. *Eddy Covariance: Practical guide to Measurement and Data Analysis*. [s.n.], 2012. 461 p. ISBN 9789400723511. Disponível em: <<http://www.springer.com/series/10176>>.
- AZEVEDO, A. M. G. d. *Habitats, associações vegetais e fenologia das plantas das marismas da Ilha da Pólvora, Estuário da Lagoa dos Patos (RS, BRasil)*. 106 p. Dissertação (Mestrado) — Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Biológica, Rio Grande, 2000.
- BELLOLI, T. F. *ESTIMATIVA DE BIOMASSA E ESTOQUE DE CARBONO DE VEGETAÇÃO MACROFÍTICA A PARTIR DE DADOS ESPECTRAIS E DE CAMPO, BANHADO GRANDE, RS*. 128 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.
- BOUILLON, S. et al. Mangrove production and carbon sinks : A revision of global budget estimates. v. 22, p. 1–12, 2008.
- CHMURA, G. L. et al. Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils. *Global Biogeochemical Cycles*, American Geophysical Union (AGU), v. 17, n. 4, p. 1–12, dec 2003. ISSN 0886-6236.
- COPERTINO, M. S. et al. Seagrass and submerged aquatic vegetation (VAS) habitats off the coast of Brazil: State of knowledge, conservation and main threats. *Brazilian Journal of Oceanography*, Universidade de Sao Paulo, v. 64, n. Special Issue 2, p. 53–80, 2016. ISSN 1982436X.
- COSTA, C. et al. Distribuição, funções e valores das marismas e pradarias submersas no estuário da Lagoa dos Patos (RS, Brasil). *Atlântica*, v. 19, p. 65–83, 1997.
- COSTA, C. S.; SEELIGER, U.; KINAS, P. The effect of wind velocity and direction on the salinity regime in the Lower Patos Lagoon estuary. *Ciência e Cultura*, v. 40, p. 909–912, 1988.
- COSTA, C. S. B. Tidal Marsh and Wetland Plants. In: *Subtropical Convergence Environments*. [S.l.: s.n.], 1997. p. 317. ISBN 13: 978-3-642-64418-4.
- COSTA, C. S. B. *Diagnosis of Hydrological Changes due to the Impact of Climate Change on the Brazilian Temperate Coastal Ecosystem (state)*. [S.l.], 2007. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/320211529>>.

- COSTA, C. S. B.; DAVY, A. J. Coastal Saltmarsh Communities of Latin America. In: *Coastal Plant Communities of Latin America*. Elsevier, 1992. p. 179–199. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780080925677500180>>.
- COSTA, C. S. B.; MARANGONI, J. C. Impacto ambiental do asfaltamento da BR 101 sobre as marismas de São José do Norte (RS, Brasil): Estado atual e efeitos potenciais. In: *Annals of V Simpósio de Ecossistemas Brasileiros. 10-15 October 2000*. [S.l.]: Publicação ACIESP n. 109- I, 2000. I, p. 268–291.
- COSTA, C. S. B.; MARANGONI, J. C. As comunidades das marismas. In: *O estuário da Lagoa dos Patos: Um século de transformações*. Rio Grande - RS: Editora FURG, 2010. p. 180. ISBN 978-85-7566-144-4.
- COSTA, C. S. B.; MARANGONI, J. C.; AZEVEDO, A. M. G. Plant zonation in irregularly flooded salt marshes: Relative importance of stress tolerance and biological interactions. *Journal of Ecology*, 2003. ISSN 00220477.
- DUARTE, C. M. et al. Seagrass community metabolism : Assessing the carbon sink capacity of seagrass meadows Seagrass community metabolism : Assessing the carbon sink capacity of seagrass meadows. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 24, n. June 2014, p. 1–8, 2010.
- DUARTE, C. M.; MIDDELBURG, J. J.; CARACO, N. Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle. *Biogeosciences*, v. 2, p. 1–8, 2005. ISSN 1726-4189. Disponível em: <[www.biogeosciences.net/bg/2/1/](http://www.biogeosciences.net/bg/2/1/)>.
- FEELY, R. A. et al. *Global ocean carbon cycle [in “State of the Climate in 2015”]*. [S.l.], 2016. v. 97, n. 8, 1–280 p. Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2016BAMSStateoftheClimate.1>>.
- FOURQUREAN, J. W. et al. Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock. *Nature Geoscience*, Nature Publishing Group, v. 5, n. 7, p. 505–509, jul 2012. ISSN 17520894. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/ngeo1477>>.
- GAO, Y. et al. New insight into global blue carbon estimation under human activity in land-sea interaction area: A case study of China. *Earth-Science Reviews*, Elsevier B.V., v. 159, p. 36–46, aug 2016. ISSN 00128252. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.05.003>>.
- GLICKER, H. S. et al. Chemical composition of ultrafine aerosol particles in central Amazonia during the wet season. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 19, n. 20, p. 13053–13066, 2019. ISSN 16807324.
- GOULDEN, M. L.; LITVAK, M.; MILLER, S. D. Factors that control Typha marsh evapotranspiration. *Aquatic Botany*, v. 86, n. 2, p. 97–106, 2007. ISSN 03043770.
- GUO, H. et al. Tidal effects on net ecosystem exchange of carbon in an estuarine wetland. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 149, n. 11, p. 1820–1828, nov 2009. ISSN 01681923.
- HOWARD, J. et al. Clarifying the role of coastal and marine systems in climate mitigation. *Frontiers in Ecology and the Environment*, Wiley Blackwell, v. 15, n. 1, p. 42–50, feb 2017. ISSN 15409309.

- ISACCH, J. P. et al. Distribution of saltmarsh plant communities associated with environmental factors along a latitudinal gradient on the south-west Atlantic coast. *Journal of Biogeography*, v. 33, n. 5, p. 888–900, may 2006.
- KATHILANKAL, J. C. et al. Tidal influences on carbon assimilation by a salt marsh. *Environmental Research Letters*, 2008. ISSN 17489326.
- KENNEDY, H. et al. Seagrass sediments as a global carbon sink: Isotopic constraints. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 24, n. 4, p. 1–8, 2010. ISSN 08866236.
- KLJUN, N. et al. A simple parameterisation for flux footprint predictions. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 112, n. 3, p. 503–523, 2004. ISSN 00068314.
- KLJUN, N. et al. A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP). *Geoscientific Model Development*, v. 8, n. 11, p. 3695–3713, 2015. ISSN 19919603.
- LAFFOLEY, D.; GRIMSDITCH, G. *The management of natural coastal carbon sinks. Natural England Commissioned Report NECR033*. [S.l.: s.n.], 2009. 53 p. ISBN 9782831712055.
- LOVELOCK, C. E.; RUESS, R. W.; FELLER, I. C. CO<sub>2</sub> Efflux from Cleared Mangrove Peat. *PLoS ONE*, v. 6, n. 6, 2011. Disponível em: <www.plosone.org>.
- MALAVELLE, F. F. et al. Studying the impact of biomass burning aerosol radiative and climate effects on the Amazon rainforest productivity with an Earth system model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 19, n. 2, p. 1301–1326, 2019. ISSN 16807324.
- MARANGONI, J. C. *Subsídios Para O Gerenciamento Das Marismas No Estuário Da Lagoa Dos Patos (Rs)*. 151 p. Tese (Doutorado) — Fundação Univaersidade Federal do Rio Grande, 2008.
- MARANGONI, J. C.; COSTA, C. S. B. Natural and anthropogenic effects on salt marsh over five decades in the patos lagoon (Southern Brazil). *Brazilian Journal of Oceanography*, Universidade de Sao Paulo, v. 57, n. 4, p. 345–350, 2009. ISSN 16798759.
- MCLEOD, E. et al. A blueprint for blue carbon: Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO<sub>2</sub>. *Frontiers in Ecology and the Environment*, v. 9, n. 10, p. 552–560, dec 2011. ISSN 15409295.
- MOFFETT, K. B.; GORELICK, S. M. Distinguishing wetland vegetation and channel features with object-based image segmentation. *International Journal of Remote Sensing*, v. 34, n. 4, p. 1332–1354, 2013. ISSN 13665901.
- MOFFETT, K. B. et al. Salt marsh-atmosphere exchange of energy, water vapor, and carbon dioxide: Effects of tidal flooding and biophysical controls. *Water Resources Research*, v. 46, n. 10, p. 1–18, 2010. ISSN 00431397.
- MURRAY, B. C. et al. *Green payments for blue carbon: Economic incentives for protecting threatened coastal habitats*. [S.l.: s.n.], 2011. 52 p. ISBN 9111243627.
- NELLEMAN, C. et al. *Blue carbon: A rapide response assessment*. [S.l.: s.n.], 2009. 80 p. ISBN 9788277010601.

- NOGUEIRA, R. et al. Mapeamento digital da paisagem das Marismas do Ecomuseu da Ilha da Pólvora (Rio Grande, Rs). In: *1º Simpósio de Áreas Protegidas, Pelotas, 2 a 4 de outubro de 2001.- Pelotas: Educat.* [S.l.: s.n.], 2001. p. 232.
- NOGUEIRA, R. S.; COSTA, C. S. B. SIGMAR: Aplicação e análise de sensibilidade das marismas a derrames de óleo. In: *Anais XI SBSR, Belo Horizonte, Brasil, 05 - 10 abril 2003, INPE.* [S.l.: s.n.], 2003. p. 1617–1619.
- OKE, T. *Boundary Layer Climates.* [S.l.: s.n.], 1987. 460 p.
- OLIVEIRA, R. R. et al. First measurements of the ocean-atmosphere CO<sub>2</sub> fluxes at the Cabo Frio upwelling system region, Southwestern Atlantic Ocean. *Continental Shelf Research*, Elsevier Ltd, v. 181, n. September 2018, p. 135–142, 2019. ISSN 18736955. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.05.008>>.
- PARISE, C. K.; CALLIARI, L. J.; KRUSCHE, N. Extreme storm surges in the south of Brazil: Atmospheric conditions and shore erosion. *Brazilian Journal of Oceanography*, v. 57, n. 3, p. 175–188, 2009.
- PENDLETON, L. et al. Estimating Global "Blue Carbon" Emissions from Conversion and Degradation of Vegetated Coastal Ecosystems. *PLoS ONE*, v. 7, n. 9, sep 2012. ISSN 19326203.
- PLANET. *PLANET IMAGERY PRODUCT SPECIFICATION : Table of Contents.* [S.l.], 2016. 52 p.
- R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing.* Vienna, Austria, 2019. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.
- REBOITA, M. S.; KRUSCHE, N. Normais Climatológicas Provisórias de 1991 a 2010 para Rio Grande , RS. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 33, n. 1, p. 165–179, 2018.
- RUBERT, G. C. et al. Evapotranspiration of the Brazilian Pampa biome: Seasonality and influential factors. *Water (Switzerland)*, MDPI AG, v. 10, n. 12, p. 1–18, dec 2018. ISSN 20734441.
- RUBERT, G. C. D.; ROBERTI, D. R.; DIAZ, M. B. Loops de histerese na evapotranspiração em área de pastagem no sul do Brasil. *Ciência e Natura*, Universidad Federal de Santa Maria, v. 40, p. 26, mar 2018. ISSN 0100-8307.
- RUPPERT, J. et al. Innovative gap-filling strategy for annual sums of CO<sub>2</sub> net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 138, n. 1-4, p. 5–18, 2006. ISSN 01681923.
- SEO, S.; Gary M. Marsh, P. D. A review and comparison of methods for detecting outliers in univariate data sets. *Department of Biostatistics, Graduate School of Public Health*, p. 1–53, 2006. Disponível em: <<http://d-scholarship.pitt.edu/7948/>>.
- SILVA, T. S. et al. Remote sensing of aquatic vegetation: Theory and applications. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 140, n. 1-3, p. 131–145, 2008. ISSN 01676369.
- STULL, R. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology.* [S.l.: s.n.], 1988. 667 p. ISBN 90-277-2769-4.

- STULL, R. *Practical Meteorology*. [S.l.: s.n.], 2017. 944 p. ISBN 9780888652836.
- TUZCU, A.; TASKIN, G.; MUSAOĞLU, N. COMPARISON OF OBJECT BASED MACHINE LEARNING CLASSIFICATIONS OF PLANETSCOPE AND WORLDVIEW-3 SATELLITE IMAGES FOR LAND USE / COVER. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII, n. June, p. 10–14, 2019.
- Van Der Werf, G. R. et al. CO<sub>2</sub> emissions from forest loss. *Nature Geoscience*, v. 2, n. 11, p. 737–738, 2009. ISSN 17520894.
- VENABLES, W.; RIPLEY, B. *Modern Applied Statistics with S*. [S.l.: s.n.], 2002. 504 p. ISSN 0039-0526.
- VILLA, P. et al. Comparative assessment of broadband vegetation indices over aquatic vegetation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v. 7, n. 7, p. 3117–3127, 2014. ISSN 21511535.
- VILLA, P.; MOUSIVAND, A.; BRESCIANI, M. Aquatic vegetation indices assessment through radiative transfer modeling and linear mixture simulation. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, Elsevier B.V., v. 30, p. 113–127, 2014. ISSN 0303-2434. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2014.01.017>>.
- WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. *Atmospheric Science: An Introductory Survey: Second Edition*. [S.l.: s.n.], 2006. 1–488 p. ISBN 9780127329512.
- WYLIE, L.; SUTTON-GRIER, A. E.; MOORE, A. Keys to successful blue carbon projects: Lessons learned from global case studies. *Marine Policy*, Elsevier, v. 65, n. March, p. 76–84, mar 2016. ISSN 0308597X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.marpol.2015.12.020>>.