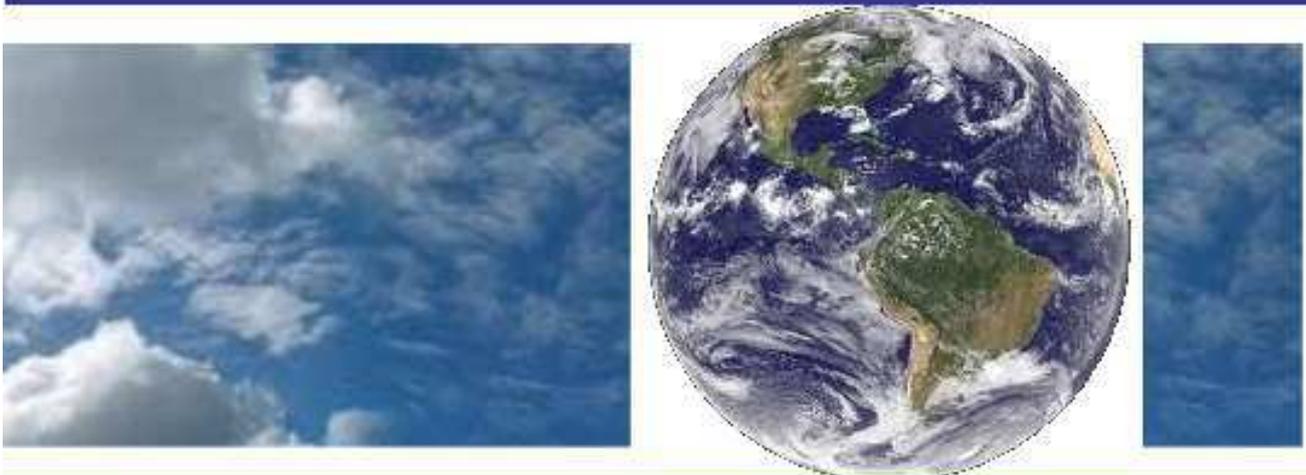


UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

METEOROLOGIA



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Mônica Paulino P. de Andrade

Análise de brisas utilizando a Teoria Termodinâmica
de Circulações Convectivas

Campina Grande, junho de 2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ANÁLISE DE BRISAS UTILIZANDO A TEORIA TERMODINÂMICA DE
CIRCULAÇÕES CONVECTIVAS

MX NICA PAULINO PEREIRA DE ANDRADE

Campina Grande - PB
2024

ALUNO: PAULINO PEREIRA DE ANDRADE

ANÁLISE DE BRISAS UTILIZANDO A TEORIA TERMODINÂMICA DE
CIRCULAÇÕES CONVECTIVAS

Plano de dissertação apresentado ao Curso de Mestrado em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), em cumprimento às exigências para obtenção do grau de mestre.

Orientador: Prof. Dr. Enio Pereira de Souza

Área de Concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escalas

Campina Grande - PB
2024

A554a

Andrade, Mônica Paulino Pereira de.

Análise de brisas utilizando a teoria termodinâmica de circulações convectivas / Mônica Paulino Pereira de Andrade. – Campina Grande, 2024.

56 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2024.

"Orientação: Prof. Dr. Enio Pereira de Souza".

Referências.

1. Circulação Convectiva. 2. Brisas Marítimas. 3. Brisas Terrestres. 4. Teoria Termodinâmica. 5. ERA-5. I. Souza, Enio Pereira de. Título.

CDU 551.553.11(043)

MÔNICA PAULINO PEREIRA DE ANDRADE

ANÁLISE DE BRISAS UTILIZANDO A TEORIA TERMODINÂMICA DE
CIRCULAÇÕES CONVECTIVAS

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 19/06/2024

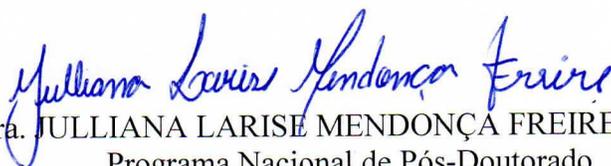
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. ENIO PEREIRA DE SOUZA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. CARLOS ANTONIO COSTA DOS SANTOS
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Dra. JULLIANA LARISE MENDONÇA FREIRE
Programa Nacional de Pós-Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. RANYÉRE SILVA NÓBREGA
Unidade Acadêmica de Geografia
Universidade Federal de Campina Grande

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a todas as pessoas que contribuíram diretamente e indiretamente para realização deste trabalho e para o meu crescimento acadêmico ao longo deste período.

Gostaria também de expressar minha gratidão à minha família pelo incentivo constante, e ao meu esposo, Edjanilson, pelo apoio inabalável ao longo deste caminho desafiador.

Minha gratidão aos meus queridos companheiros felinos. Ao meu amado gato, Theo, que infelizmente não está mais comigo e agora descansa em paz. Sua presença afetuosa e seu companheirismo trouxeram conforto e alegria nos dias mais desafiadores. Seu carinho será eternamente lembrado e permanecerá vivo no meu coração. E minha gatinha, Marie, pela sua presença e por ser uma fonte de conforto e alegria, aliviando os momentos de estresse e tensão durante este percurso.

Aos meus colegas de mestrado, minha sincera gratidão, e em especial minha amiga Geisse Kelly, cuja amizade, presença constante, incentivo e apoio foram verdadeiros pilares ao longo desta jornada, obrigada por estar ao meu lado compartilhando alegrias e dificuldades. Seu apoio moral e encorajamento foram essenciais para manter minha motivação e determinação ao longo desta etapa.

Agradeço também à CAPES pela concessão da bolsa de estudo e aos professores do Programa de Pós-graduação em Meteorologia, pelos ensinamentos valiosos e incentivos ao longo do percurso acadêmico. Agradeço a Airlene por sua paciência e atenção sempre que precisei esclarecer dúvidas.

E por fim, expresso minha gratidão ao meu orientador, Prof. Dr. Enio Pereira de Souza. Sua orientação, paciência e apoio contínuo foram cruciais em cada etapa deste projeto de pesquisa. Seu conhecimento e ensinamento foram de grande importância para o desenvolvimento deste trabalho. Minha mais sincera gratidão.

"Mas os que esperam no Senhor renovar² o as
suas for² as. Voar² o alto como  guias;
correr² o e n² o se cansar² o, caminhar² o e
n² o se fatigar² o." Isa^oas 40:31

RESUMO

A brisa marítima é gerada devido à superfície do oceano estar menos aquecida que a superfície terrestre, ocasionando na circulação dos ventos da região menos aquecida para região mais aquecida, ou seja, da superfície do oceano em direção à superfície terrestre, no período diurno. Por outro lado, a brisa terrestre ocorre basicamente de forma inversa, durante o período noturno, quando a superfície terrestre se encontra menos aquecida que o oceano, gerando circulação que vai da terra para o oceano. Apesar de parecer que uma é o inverso da outra, existem diferenças, pois a brisa terrestre ocorre com menos intensidade que a brisa marítima, porque durante a noite o forçamento termodinâmico é mais fraco. Nesta pesquisa utilizou-se a teoria termodinâmica de circulação convectiva para comparar os seus resultados com os dados de reanálise obtidos do ERA5, que são dados horários de reanálise com resolução espacial de ~28 km. O período de análise abrangeu todo o ano de 2018. Isso permitiu analisar a diferença de temperatura entre o oceano e a terra, a eficiência termodinâmica do sistema e a diferença de pressão atmosférica, com o intuito de verificar a veracidade da teoria termodinâmica de circulação convectiva e analisar, através dessa teoria e dos dados de reanálise, a circulação das brisas marítimas e terrestre na costa do Ceará. Para isso, utilizou-se um ponto A e um B como referência, um localizado no oceano e o outro na superfície terrestre, respectivamente. Além disso, para obter os resultados, aplicou-se inicialmente um valor fixo de gama de 0,26. Embora tenha proporcionado resultados satisfatórios, procedeu-se à variação desse valor de gama mensalmente para melhorar os resultados, já que sua variação influencia na dissipação próxima à superfície. Com base nas análises, os resultados revelam que a teoria fundamenta bem a compreensão e previsão dos padrões de circulação de brisas, demonstrando uma boa concordância com os dados observados, especialmente no caso de brisa marítima. Observou-se também que a diferença de temperatura entre o oceano e a terra interfere diretamente na observação das brisas, no qual, os meses chuvosos apresentam menores valores de temperatura, o que dificulta a observação de brisas.

Palavras-chave: Circulação convectiva, Brisas, Teoria Termodinâmica, ERA-5.

ABSTRACT

Sea breeze is generated due to the ocean surface being less heated than the land surface, causing the circulation of winds from the less heated region to the more heated region, that is, from the ocean surface towards the land surface, during the day. On the other hand, the land breeze occurs basically inversely, during the night, when the land surface is less heated than the ocean, generating circulations that go from the land to the ocean. Although it appears that one is the opposite of the other, there are differences, as the land breeze occurs with less intensity than the sea breeze, because at night the thermodynamic forcing is weaker. In this research, the thermodynamic theory of convective circulation was used to compare its results with the reanalysis data obtained from ERA5, which are reanalysis times with a spatial resolution of ~28 km. The analysis period covered the entire year of 2018. This made it possible to analyze the temperature difference between the ocean and land, the thermodynamic efficiency of the system and the difference in atmospheric pressure, with the aim of verifying the veracity of the thermodynamic theory of convective circulation and analyze, through this theory and reanalysis data, the circulation of sea and land breezes on the coast of Ceara. For this, a point A and a B were used as reference, one located in the ocean and the other on the earth's surface, respectively. Furthermore, to obtain the results, a fixed gamma value of 0.26 was initially applied. Although it provided satisfactory results, this gamma value was varied monthly to improve results, as its variation influences dissipation near the surface. Based on the analyses, the results reveal that the theory provides a good basis for understanding and predicting breeze circulation patterns, demonstrating good agreement with observed data, especially in the case of sea breezes. It was also observed that the difference in temperature between the ocean and land directly interferes with the observation of breezes, in which the rainy months have lower temperature values, which makes it difficult to observe breezes.

Keywords: Convective circulation, Breezes, Heat engine, ERA-5.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Circula�o de brisa marítima no período diurno	15
Figura 2.	Circula�o de brisa terrestre no período da noite	16
Figura 3.	Localiza�o Geográfica do estado do Ceará	22
Figura 4.	Diferença de pressão entre a teoria com altitude (linha preta) e sem a presença da altitude (linha verde), de janeiro a junho de 2018.	29
Figura 5.	Diferença de pressão entre a teoria com altitude (linha preta) e sem a presença da altitude (linha verde), de julho a dezembro de 2018.	30
Figura 6.	Eficiência Termodinâmica do sistema (%) de janeiro a junho de 2018.	32
Figura 7.	Eficiência Termodinâmica do sistema (%) de julho a dezembro de 2018.	33
Figura 8.	Queda de Pressão (hPa) calculada pela teoria (linha preta) e a queda de pressão da reanálise (linha verde) dos meses de janeiro a junho de 2018.	35
Figura 9.	Queda de Pressão (hPa) calculada pela teoria (linha preta) e a queda de pressão da reanálise (linha verde) dos meses de julho a dezembro de 2018.	36
Figura 10.	Trabalho de escoamento calculada pela teoria (linha preta) e a queda de pressão da reanálise (linha verde) dos meses de janeiro a junho de 2018.	37
Figura 11.	Trabalho de escoamento calculada pela teoria (linha preta) e a queda de pressão da reanálise (linha verde) dos meses de julho a dezembro de 2018.	38
Figura 12.	Queda de pressão dos dias 1 a 5 de fevereiro e do dia 21 de fevereiro a 25 de fevereiro no primeiro quadro. No segundo quadro tem-se Queda de pressão para os mesmos dias do mês de outubro.	40
Figura 13.	Diferença de temperatura entre o ponto A (oceano) e o ponto B (continente) do mês de janeiro a junho de 2018.	42
Figura 14.	Diferença de temperatura entre o ponto A (oceano) e o ponto B (continente) do mês de julho a dezembro.	43
Figura 15.	Ciclo diário médio mensal do componente meridional do vento ao longo de 2018.	45

Figura 16. Taxa de precipita ² o ao longo do ano de 2018.	45
Figura 17. Taxa de precipita ² o do dia 1 de outubro a 30 de outubro do ano de 2018.	46
Figura 18. Comportamento de cada .:durante 2018.	47
Figura 19 Altura da camada Limite para todo o ano de 2018.	48

LISTA DE SÍMBOLOS

γ	Gama
κ	Coeficiente de absorção
η	Eficiência termodinâmica
Z	Profundidade da camada limite

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACIÖES

BMTs Brisas Marítimas e Brisas terrestres

ECMWF European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

CLA Camada Limite da Atmosfera

VCAN Vórtices Ciclónicos e Altos Níveis

ZCIT Zona de Convergência Intertropical

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valor do gama para cada m_j s durante todo ano de 2018.

28

SUMÉRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo Geral	14
2.2 Objetivos Específicos.....	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 Brisas Marítimas e Terrestres.....	15
3.2 Teoria da Máquina Térmica	19
4 MATERIAL E MÉTODOS	22
4.1 Dados.....	22
4.2 Metodologia.....	23
4.3 Teoria Termodinâmica da Circulação Local.....	24
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5.1 Discussão das Variáveis Físicas.....	44
6 CONCLUSÕES	49
REFERÊNCIAS.....	51

1 INTRODUÇÃO

As Brisas Marítimas-Terrestres (BMTs) são um importante sistema que representa a meteorologia costeira. Investigações envolvendo a influência dessas brisas têm sido foco de pesquisas atrelados dias atuais, atribuindo-se a origem de circulações de BMTs à diferença de temperatura entre a superfície da terra e do mar (Miller et al., 2003; Crosman e Horel, 2010; Jia et al., 2023).

Embora a afirmação anterior esteja correta, outros aspectos termodinâmicos devem ser levados em consideração. Segundo Souza et al. (2000) o início desses ciclos se deve à resposta da atmosfera a um gradiente de entropia que resulta de fluxos de calor sensível e latente de duas superfícies com capacidades térmicas diferentes.

A brisa marítima é produzida pelos ventos que sopram do mar em direção à superfície da terra. Esse processo se intensifica à tarde e ocorre devido às mudanças horizontais de pressão causadas pelo aquecimento da terra em relação ao oceano durante o dia, então o oceano demora mais para esfriar, pois a água tem maior capacidade calorífica que ele. Como resultado, a força do gradiente de pressão é direcionada do oceano para a superfície. Por outro lado, as brisas terrestres desenvolvem-se à noite, já que a superfície terrestre vai perdendo calor para o espaço e se resfriando, criando um gradiente de pressão horizontal que favorece o fluxo de ar para o oceano (Satyamurty, p. 119, 2005; Hallgren et al., 2023).

O estudo de brisa se torna importante por ser considerado um fenômeno meteorológico que pode influenciar na ocorrência de chuvas sobre o continente, em específico a formação de brisas marítimas, que vêm do oceano em direção ao continente, ocasionando, muitas vezes, a formação de nuvens sobre esse, e em alguns casos a ocorrência de chuvas.

Outro fator importante que as brisas influenciam é no clima da região, podendo causar no período do verão, por exemplo, um melhor conforto térmico. Para Keeler et al. (2012) as brisas marítimas influenciam na dispersão de poluentes em zona costeira, assim como no alívio das ondas de calor, proporcionando um conforto térmico para região costeira.

Sendo assim, Alcantara et al. (2004) afirmam que as brisas chamam atenção por apresentarem várias funções e domínios meteorológicos, no qual seus efeitos se tornam significantes no clima e tempo das regiões que elas circulam. Para Baumbach et al. (1999) o sistema de vento induzido influencia no clima local de uma região, podendo também afetar o transporte de poluentes atmosféricos.

Em vista disso, Souza et al. (2000) formularam uma teoria de circulação de meso escala induzida por heterogeneidade de superfície em terreno inclinado, que tinha como condição para a ocorrência de brisa vale-montanha, o gradiente de temperatura potencial positivo entre o vale e a montanha. No trabalho de Souza et al. (2000) foram utilizados para teste dados de experimento de campo na floresta amazônica e uma clareira próxima, analisando, assim, a diferença de temperatura entre a floresta e o desmatamento da região, o que poderia ocasionar uma circulação convectiva entre essas duas regiões.

Neste sentido, este estudo pretende investigar as circulações de BMTs em dois pontos da costa oeste do Ceará mediante dados de reanálise do ERA5 do ano de 2018. Este conjunto de dados de reanálise do ERA5 do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) possui resolução temporal de 1 h e espacial de 0,25 grau, possibilitando uma análise que inclui fluxos de calor sensível e latente, trabalho de escoamento, energia de inibição convectiva e estimativa de precipitação. Estudos anteriores não tinham à disposição tal conjunto de dados e precisavam recorrer a modelos que, nem sempre, mostram resultados livres de algum viés.

Aprofundar o conhecimento sobre as circulações de brisas nas regiões costeiras beneficia tanto a comunidade científica quanto a local. A validação dessa teoria pode acarretar em novos estudos sobre brisas em outras regiões costeiras, contribuindo para a compreensão de seu funcionamento e impactos nessa sociedade.

A teoria da circulação convectiva de Souza et al. (2000) considera diferenças de temperatura e umidade como impulsionadores da circulação convectiva. Desta forma, este estudo planeja contribuir para uma compreensão mais profunda dos aspectos termodinâmicos das brisas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral analisar as brisas marítimas e terrestres, utilizando a teoria termodinâmica de circulação convectiva e observar de forma detalhada a ocorrência das brisas e a aplicabilidade da teoria.

2.2 Objetivos Específicos

- 1) Testar a teoria de circulação convectiva por heterogeneidades de superfície e analisar os fenômenos influentes na formação da brisa;
- 2) Verificar o ciclo diário e o ciclo anual da brisa;
- 3) Observar a intensificação de brisas e os fatores meteorológicos associados, como temperatura, pressão atmosférica e profundidade da camada limite convectiva;
- 4) Analisar o horário em que a brisa marítima atinge o estado estacionário.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Brisas Marítimas e Terrestres

A pesquisa sobre brisas tem sido amplamente estudada para compreender quando e como ocorrem, como também para entender o seu impacto nas condições meteorológicas. Bao et al. (2023) mencionam as brisas marítimas como o transporte de massa de ar marítima e úmida em direção à superfície terrestre.

No período diurno, as circulações de brisas marítimas geralmente são mais intensas devido ao aquecimento da superfície terrestre, já que esse ocorre mais rápido que a superfície do oceano, em função de sua capacidade calorífica. Tendo como resultado as baixas pressões sobre a superfície da terra, gerando gradientes de pressão que direcionam os ventos do mar mais frio e de maior pressão para a área de menor pressão, que neste caso é a terra. A Figura 1 ilustra o processo de formação das brisas marítimas.

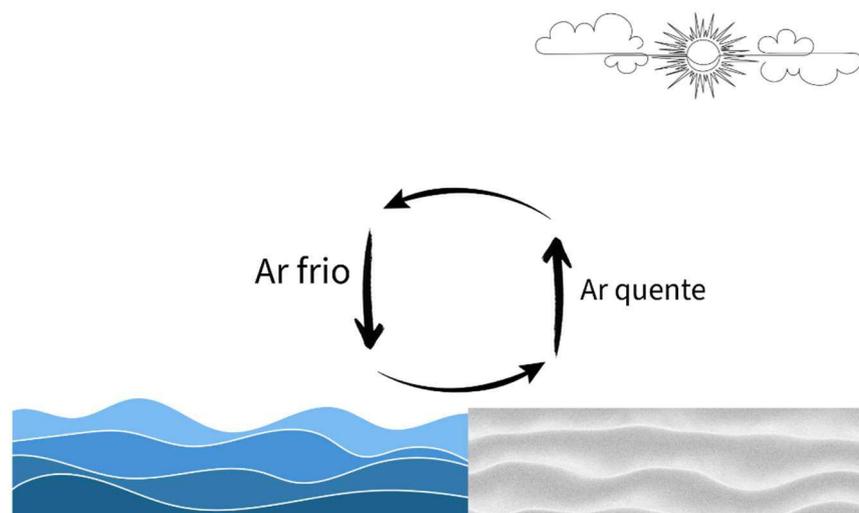


Figura 1: Circulação de brisa marítima no período diurno. Fonte: Autora (2024)

Na representação demonstrada na Figura 2 é possível visualizar o fenômeno meteorológico conhecido como circulações das brisas terrestres. Estes ventos são caracterizados por seu movimento a partir da superfície terrestre em direção ao oceano, durante o período noturno.

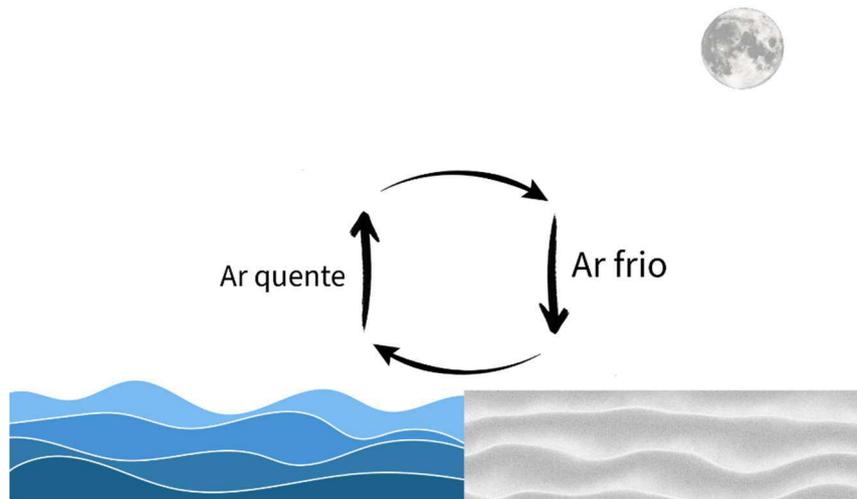


Figura 2: Circulação de brisa terrestre no período da noite. Fonte: Autora (2024)

Conforme evidenciado nas Figuras 1 e 2, as brisas são caracterizadas por ventos periódicos, apresentando movimentos que se repetem, alterando-se entre a direção oceano-continente e continente-oceano. Esse padrão de circulação é resultado da diferença de capacidade calorífica da terra e do oceano, na qual a terra demonstra uma maior eficiência na absorção e emite calor, enquanto o oceano realiza esses processos mais lentamente.

Conforme destacado por Simpson (1994), a presença das brisas marítimas não está ligada à temperatura elevada da superfície, mas sim à diferença térmica entre elas. Mesmo em temperaturas mais baixas, brisas podem ocorrer quando houver variação de temperatura entre o oceano e a superfície terrestre, resultando em variações de pressão decorrentes dessas diferenças térmicas.

Em resumo, as circulações geradas por contrastes térmicos em um mesmo nível de altitude, especialmente nas brisas marítimas, são consideravelmente intensas devido à sua capacidade de deslocamento a grandes distâncias, especialmente quando influenciadas pela topografia. Esse movimento transporta umidade e calor para áreas afastadas da costa, sendo essencial para influências atmosféricas e climáticas locais (Melo et al., 2011).

A diferença de temperatura no mar, desencadeando a circulação das brisas marítimas, geralmente resulta na redução da temperatura e no aumento da umidade atmosférica. Essa formação é frequentemente marcada por rajadas de vento, semelhantes a uma frente fria na borda interna da brisa marítima (Planchon et al., 2006).

Outro fator importante é a intensidade das brisas, que variam conforme a influência dos sistemas meteorológicos e fatores como as diferenças de temperatura, sendo mais pronunciadas

em regiões costeiras ou em locais com topografia favorável. Diante deste fenômeno de brisas, diversos estudos têm investigado as características das BMTs, apesar de inúmeros estudos sobre suas influências terem sido alvo de pesquisas desde muito tempo, é importante ressaltar que continua presente nas investigações atuais.

Na China Shen et al. (2020) realizaram um estudo que investigou as possíveis características impulsionadas pelo clima das BMTs, visando analisar as brisas em diferentes tipos de clima, obtendo resultados que mostraram que elas apresentam significância na variação do clima mediterrâneo. No entanto, difere do clima subtropical, resultados que também foram obtidos em anos anteriores por Drobenske et al. (2018) e Wagner et al. (2015).

Outro estudo realizado por Xiao et al. (2023) em Tianjin, China, observaram alterações na frequência e intensidades das BMTs atribuídas a urbanização e o aquecimento dos oceanos. O aquecimento dos oceanos no período diurno causou uma redução da diferença de temperatura entre o oceano e a terra, enfraquecendo a brisa marítima, principalmente no período do verão. Já a urbanização enfraquece as BMTs devido à sua influência na alteração da direção do vento, principalmente no outono e na primavera.

O estudo de Simpson et al. (2008) revelam a influência das atividades urbanas na circulação das brisas marítimas e na ocorrência de incidentes. Utilizando dados de radar Doppler, uma pesquisa demonstrou uma circulação de brisas marítimas bem desenvolvida na região de Chennai, Índia, em junho de 2003. Toda a questão acima de 100 mm foi atribuída à convecção ao longo da frente de brisas marítimas, ressaltando a importância da compreensão da interação entre áreas urbanas e da circulação das brisas para compreender o clima regional.

Em regiões urbanas a poluição possui um índice mais elevado, por consequência do maior número de veículos circulando e indústrias, o que pode gerar partículas suspensas na atmosfera constituída de substâncias orgânicas chamadas de aerossóis orgânicos. Essas partículas podem perturbar os gases presentes na atmosfera do nosso planeta. Zhang (2023) realizou um estudo em uma cidade costeira da China, no qual foi investigado os impactos realizados pelas BMTs na variação durante o dia dos aerossóis, esse estudo indicou que as BMTs desempenham um papel significativo em mudanças climáticas e na transformação química desses aerossóis.

A Lei dos Gases está associada à temperatura e à pressão, resultante da força de gradiente de pressão, referente à mudança de pressão de um fluido em função da sua posição, influenciada pela circulação do ar que a gera. O sistema de ar que se desloca da terra, possui maior pressão atmosférica, para a região de menor pressão (mar) durante a noite, formando brisas terrestres. Durante o dia, ocorre o contrário. Em dias quentes a presença de brisa

marítima traz um maior conforto térmico para a população, resultando em ventos refrescantes, diminuindo, assim, a sensação térmica. No início do dia, a profundidade da brisa do mar pode ser inferior a 50 m e o vento logo acima dela pode estar soprando em direção oposta. No final do dia, a direção do vento muda um pouco como consequência da rotação da Terra, virando a alguns graus no Hemisfério Norte (Simpson, 1994). Esses ventos que surgem em áreas costeiras geralmente são leves, como consequência do gradiente de pressão entre o oceano e a terra. É importante enfatizar que as BMTs são melhor analisadas no período de verão, em consequência do maior aquecimento da superfície terrestre, causando uma maior diferença de temperatura entre o oceano e o solo.

A pesar disso, as brisas podem ocorrer durante todo o ano. No entanto, a ocorrência de brisas durante o inverno acontecem com menos intensidade, devido a menor incidência solar na superfície terrestre durante o dia. Isso resulta em uma maior temperatura sobre o oceano e até mesmo a geração de brisas terrestres durante o dia. De acordo com isso, as brisas são mais visíveis e intensas no verão e na primavera por causa da maior incidência solar, consequentemente menos intensa no inverno, já que irá possuir menor incidência solar e como consequência menor diferença de temperatura.

Em contrapartida, nas estações de primavera e verão a circulação das brisas são mais intensas graças a maior incidência solar nesse período. Esse maior aquecimento contribui para maior diferença de temperatura entre o solo e o oceano, favorecendo a circulação de BMTs.

É possível encontrar alguns estudos que abrangem determinadas regiões costeiras do Nordeste. Planchon et al. (2006) analisaram a diferença de temperatura no mar que causa a brisa marítima, constatou-se que geralmente resulta em aumento da umidade atmosférica. A formação da brisa marítima é marcada por uma rajada de vento inesperada, semelhante a uma frente fria na borda interna da brisa marítima. Nesse estudo enfatizou-se a análise das brisas na região nordeste do Brasil, mediante o uso de sensoriamento remoto. No qual, a topografia local mostrou-se ser um fator influente para análise das brisas, observou-se que a topografia da região do Ceará é relativamente plana, favorecendo a ocorrência de brisas marítimas. Teixeira (2008) investigou a relação entre a precipitação e brisas em Fortaleza, que se mostraram ser fatores influentes na precipitação, a brisa e os ventos alísios, sendo os ventos que sopram em direção aos trópicos. Freire (2024) realizou um estudo de brisas marítimas e terrestre na costa do Nordeste com ênfase na análise de vortacidade.

A diferença de temperatura entre a superfície terrestre e a superfície oceânica afeta a camada limite da atmosfera (CLA) que fica próxima à superfície terrestre. A CLA é a camada situada na baixa troposfera, por ser a mais baixa da troposfera sofre com as influências na

superfície terrestre. Para Salvador et al. (2016) a CLA é formada no interior do continente, devido às variações diárias e térmicas entre o oceano e a terra, alterando significativamente as circulações locais.

Em resumo, as circulações são geradas por contrastes térmicos em um mesmo nível de altitude, sendo as brisas marítimas consideradas mais intensas devido à capacidade de deslocamento em grandes distâncias, especialmente quando formadas com auxílio da topografia. Nesse caso, transportam umidade e calor para áreas mais distantes da costa. A análise das brisas é de extrema importância para previsões de tempo e clima na região (Melo et al., 2011).

Dessa forma, a intensidade das brisas varia de acordo com a influência de alguns sistemas meteorológicos, como a diferença de temperatura, que tendem a ser mais fortes em regiões costeiras, ou ainda ao ter uma topografia do local favorável. Contudo, a brisa terrestre tende a ser mais intensa. Assim, a superfície terrestre aquece mais rapidamente durante o dia, enquanto a marítima, com sua circulação do oceano para a terra, torna-se menos intensa devido à maior capacidade térmica da água em relação ao solo. Resultando no retardamento do aquecimento da água, da mesma forma que demora mais a ser aquecida, demora mais a se resfriar, resultando em brisas marítimas com menor intensidade do que as brisas terrestres.

É interessante salientar que as brisas marítimas costumam ser mais estudadas pelos pesquisadores do que as brisas terrestres, pois essas geram as nuvens sobre o oceano, podendo, assim, ter a ocorrência de precipitação sobre ele e não sobre o continente. Dessa forma, torna-se importante para previsões de tempo e clima das regiões costeiras.

3.2 Teoria da Máquina Térmica

As leis termodinâmicas e o princípio do funcionamento de uma máquina térmica estão estreitamente correlacionados, já que aquelas regem a transformação do calor em trabalho (Oliveira, 2005). A primeira lei termodinâmica, também conhecida como princípio da conservação de energia, consiste em que a variação da energia interna de um sistema será igual à diferença da energia que entra ou sai do sistema, tanto na forma de calor como em trabalho. De forma que, a fonte quente cede calor para fonte fria. A segunda lei da termodinâmica, envolve o sistema de uma máquina térmica, o calor recebido da fonte quente é transformado, parte desse calor transforma-se em trabalho e a outra parte é enviada para uma fonte fria. Essa última lei foi formulada pelos cientistas Lord Kelvin e Max Planck (1858-

1947). É importante salientar que não é possível construir uma máquina térmica que converta todo calor recebido em trabalho.

A teoria da máquina térmica é baseada nas leis termodinâmicas e tem como finalidade a conversão de energia térmica em trabalho mecânico. Essa máquina opera entre duas fontes de calor com diferença de temperatura e pressão, realizando, assim, a conversão da energia. Costa et al. (2013) descreveram a máquina térmica como um mecanismo que transforma calor em trabalho. Jørgensen (1995) descreve o ciclo do motor térmico, o qual ocorre através da retirada de calor de um reservatório quente, uma parte dele é rejeitada e liberada para atmosfera livre (reservatório frio), o que fica transformado no trabalho mecânico e em calor.

Segundo Jørgensen (2008) uma máquina térmica real deve absorver calor de um reservatório mais quente e rejeitar uma fração dele para um reservatório mais frio, durante a realização do trabalho. Enquanto que em uma máquina térmica reversível a entrada e saída de calor é totalmente convertida em trabalho. Dessa forma, tem-se a geração do trabalho através da diferença de temperatura.

Essa é uma das teorias discutidas com bastante frequência, visando o estudo da energética da atmosfera, a partir da aplicação do conceito da máquina térmica (Alcantara, 2009). Um motor termodinâmico deve operar entre duas temperaturas diferentes. A atmosfera é aquecida e resfriada desigualmente em diferentes latitudes, ocasionando a circulação planetária, esses processos se tornam complicados por se tratar de processos irregulares. A caldeira de um motor atmosférico é parte da terra e do mar, aquecidas, já a parte do condensador é a parte mais fria, no qual o ar perde calor e radiação em condições tropicais (Woolard, 1926).

De acordo com Jørgensen e Adams (2005), a atmosfera é um motor térmico que pode operar neste sistema, apresentando uma teoria simples para convecção atmosférica que prevê a flutuabilidade, velocidade vertical e fração de área coberta por convecção seca ou úmida em um estado de equilíbrio estatístico. Esse motor térmico convectivo, retira calor da camada superficial (a fonte quente) e uma parte dele é rejeitado para a atmosfera livre (o sumidouro frio) e desse é irradiado para o espaço. O equilíbrio é transformado em trabalho mecânico, pois esse é utilizado para manter os movimentos convectivos contra a dissipação mecânica. Já a energia dissipada pelo atrito mecânico é transformada em calor.

Os autores enfatizam ainda que, a quantidade de trabalho produzida pelo motor convectivo, ao ser introduzido sobre o volume, é fornecido a medida da quantidade de equilíbrio estático de energia potencial convectiva disponível (CAPE), a qual se torna necessária para manter os movimentos convectivos contra a dissipação viscosa. Esta integral é o número global que caracteriza o estado de equilíbrio do planeta. Para o clima atual da Terra,

a estrutura do motor térmico prevê um valor CAPE da ordem de 1000 J kg^{-1} para a atmosfera tropical.

Emanuel (1985) também enfatiza que a existência do CAPE se deve, certamente, à ascensão ou à diluição de parcela nos trópicos. A capacidade convectiva natural ou simulada de perceber essa energia potencial é sensível aos detalhes de misturas turbulentas, interações microfísicas e outros processos.

4 MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo compreende o estado do Ceará localizado no Nordeste Brasileiro. Esta análise tem como foco a região costeira do estado do Ceará

De acordo com Rocha et al. 2003, o estado possui uma linha de costa de 573 km. Embora a zona costeira represente apenas 14,38% do território do Estado do Ceará 49% da população vive em 33 municípios litorâneos.

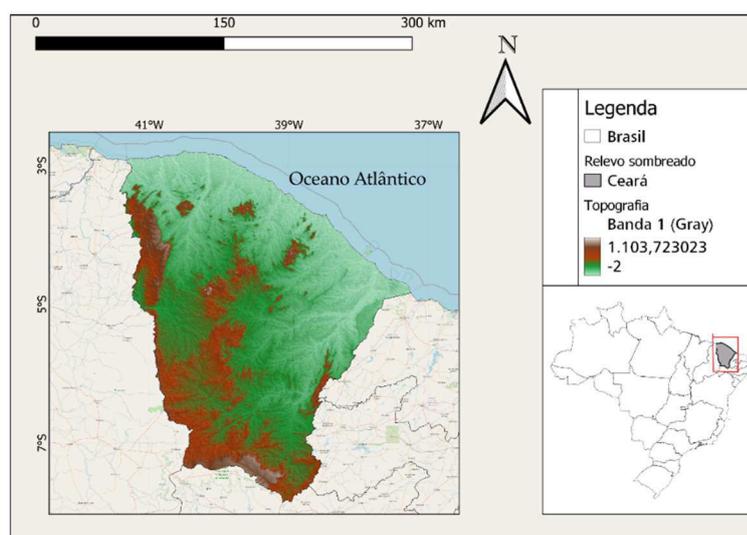


Figura 3: Localização Geográfica do estado do Ceará Fonte: Autora (2024).

4.1 Dados

Para este estudo, utilizaram-se dados de reanálise ERA5 do European Centre for Medium-range Weather Forecast (ECMWF), e dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para a região costeira do Ceará Sabater et al. (2021) esclarecem que as reanálises consistem em dados climáticos resultantes da combinação de observações perturbativas e modelos de previsão climática, gerando uma análise aprofundada das condições climáticas passadas. Essa informação é importante para analisar as condições meteorológicas, avaliar as mudanças climáticas e compreender o comportamento climático durante longos períodos. A reanálise atmosférica também inclui a avaliação da consistência dos dados climáticos.

Além disso, é relevante considerar a resolução espacial do ERA5, que foi reestruturado para grade de 0,25 graus de reanálise e 0,5 graus para estimativa de incerteza, conforme as informações mostradas no banco de dados. Esses dados têm resolução horária, o que permite uma análise minuciosa e completa das condições meteorológicas ao longo do tempo (ECMWF, 2023). No entanto, apenas os dados de 2018 foram utilizados neste estudo.

A presença desta informação na resolução horária permite uma avaliação mais precisa das condições atmosféricas. Para a formação de brisas será utilizado o programa GradS, que possibilita o cálculo de parâmetros relevantes, como o trabalho de escoamento, diferença de temperatura e diferença de pressão. Esses cálculos são cruciais para compreender a eficiência termodinâmica envolvida na geração das brisas.

A análise abrangerá todo o ano de 2018, permitindo-se examinar a incidência de brisas em diferentes sistemas meteorológicos ao longo das estações. Dessa forma, será possível identificar padrões sazonais e compreender sistemas meteorológicos que influenciam na formação e intensidade das brisas.

Os dados do ERA5 possibilitam uma análise diária das circulações locais ao longo de algumas localidades da costa do Brasil, assim é possível analisar a ocorrência de brisa, com ênfase na diferença de pressão que ocorre no local estudado e o trabalho de escoamento.

A pesquisa tem como base a realização dos cálculos teóricos e sua comparação com os dados de reanálise. Essa abordagem permitirá testar a veracidade da teoria termodinâmica da circulação local, fornecendo informações importantes sobre o funcionamento das BMTs na região estudada.

4.2 Metodologia

Após a escolha do ano e do banco de dados a ser utilizado, realizou-se a localização dos pontos de estudos. O ponto A, localizado no oceano com 2,75°S e 41,25°W, e o ponto B, no continente com 3,25°S e 41,25°W; ambos com altitude de 110m. Para visualização dos dados e obtenção dos resultados utilizou-se o software Grid Analysis and Display System (GradS), sendo uma ferramenta utilizada para visualizar informações de interferência, especialmente modelos digitais de previsão do tempo e dados meteorológicos. Além de ter sido utilizado o Excel para realizar os cálculos estatísticos e aplicação do teste t-Student.

Para a realização dos cálculos utilizou-se a Teoria Termodinâmica de Circulação Local, mostrada no item (3.2), que se baseia nos trabalhos de Souza et al. (1999, 2000) e Alcântara e Souza (2007). As principais equações para este estudo são a equação de energia de uma massa

convectiva (Equa²o 5); a primeira lei da termodin^omica aplicada ao ar βmido (Equa²o 7); a por²o de energia total mec^onica consumida por atrito pr^oxima ⁻ superf^ocie (Equa²o 11); diferen^a de press^o (Equa²o 19); o trabalho de escoamento obtido pela (Equa²o 20); e a (Equa²o 24) que resulta na efici^{nc}ia termodin^omica do sistema, estando associada com a altura da CLA.

No primeiro momento utilizou-se um valor fixo de gama de (0,26) para realizar uma an^olise preliminar da diferen^a de press^o e efici^{nc}ia termodin^omica e o trabalho de escoamento realizados a partir do software GrADS. Posteriormente, ^o foi ajustado mensalmente para melhor aproximar os dados te^oricos dos dados de rean^olise.

Para realizar a valida²o estat^ostica foi feita a organiza²o dos dados de temperatura do INMET e os valores do ^o fixo e variado. Em seguida, realizou-se os c^oculos da m^odia, Mediana, desvio padr^o, vari^oncia e a correla²o entre a temperatura e o ^o.

A equa²o abaixo mostra o c^oculo da m^odia,

$$\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \tag{1}$$

O n^o n^omero total de observa²es e x_i representa cada valor individual.

O desvio padr^o,

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \tag{2}$$

O coeficiente de correla²o de Pearson (r) ^o dado por:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \tag{3}$$

Em que \bar{x} e \bar{y} s^o os valores das duas var^oveis, \bar{x} e \bar{y} s^o as m^odias dessas var^oveis, e n^o o n^omero de pares de valores.

Em seguida, realizou-se o T este t ou teste de Student, para as duas amostra de ^o

$$\frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s^2}{n_1} + \frac{s^2}{n_2}}} \tag{4}$$

Utilizado para determinar uma diferen^a significativa entre as m^odias de duas amostras, testando o seu efeito nos resultados.

4.3 T eoria T ermodin^omica da C ircula²o L ocal

No trabalho realizado por Souza et al. (1999) e Souza et al. (2000) eles utilizam a teoria da m^oquina t^ormica para formular uma nova teoria, com o intuito de atrav^os de uma simples teoria analisar as circula²es locais, aplicando a sua teoria para uma ^orea de desmatamento no

Amazonas. Posteriormente, Alcântara e Souza (2007) testaram a teoria termodinâmica da circulação para brisas marítimas-terrestres e brisas de vale-montanha localizado na costa do Nordeste com o auxílio de simulações numéricas.

Para a obtenção da equação de energia para uma massa convectiva realiza-se o produto vetorial entre o vetor de velocidade e a equação de movimento (Haltiner e Martin, 1957). A equação resultante após uma parcela estacionaria  dada por:

$$\dot{\vec{v}} \times \vec{v} + g \vec{e}_z - a \frac{dV}{dt} - \tau = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (5)$$

Sendo que, \vec{v} o vetor velocidade, g a aceleração da gravidade, a o volume específico, τ a pressão, $\frac{dV}{dt}$ a resistência ao movimento por unidade de massa, denominado força de atrito, e $\frac{d\vec{v}}{dt}$ refere-se ao aumento da distância ao longo do trajeto da parcela de ar. A teoria proposta estabelece um limite máximo para intensidade da circulação, devido à existência de um estado estacionário e de um processo reversível. Sendo assim, a integral da equação (6) de uma circulação fechada  dada por:

$$\oint (\vec{v} \times \vec{v} + g \vec{e}_z - a \frac{dV}{dt} - \tau) \cdot d\vec{r} = 0 \quad (6)$$

Resultando no equilíbrio da parcela de ar convectiva com a perca de atrito em um estado estacionário. Considerando a primeira lei da termodinâmica que trata do princípio da conservação de energia e a segunda lei que trata da entropia, fazendo a aplicação para o ar bmido, obtemos:

$$\frac{dT}{T} + \frac{dp}{\rho T} - \frac{a}{T} \frac{dV}{dt} - \frac{dS}{T} = 0 \quad (7)$$

Sabe-se que, T a temperatura absoluta do ar, $\frac{dS}{T}$ a variação da entropia específica do ar, $\frac{dp}{\rho T}$ o calor específico da parcela de ar seco, $\frac{a}{T} \frac{dV}{dt}$ o calor latente específico da parcela e o $\frac{dS}{T}$ a razão de mistura do vapor de gua.

Integrando em uma circulação fechada os dois princípios termodinâmicos aplicados para o ar bmido da equação (6) temos:

$$\oint \left(\frac{dT}{T} + \frac{dp}{\rho T} - \frac{a}{T} \frac{dV}{dt} - \frac{dS}{T} \right) = 0 \quad (8)$$

A firmando que o trabalho executado através da circulação corresponde a quantidade de calor líquido absorvido. Igualando a equação (6) e (8) obtm-se,

$$\oint \left(\frac{dT}{T} + \frac{dp}{\rho T} - \frac{a}{T} \frac{dV}{dt} - \frac{dS}{T} \right) = \oint \frac{dQ}{T} \quad (9)$$

Resultando no equilíbrio entre o calor líquido que entra e o que  perdido por atrito.

Considerando dois pontos distintos 1 e 2 durante um curso de uma linha de corrente, próximo  região que  absorvida o calor, podemos integrar de acordo com a equação (5) nesses dois pontos,

$$\frac{\dot{Q}_{\text{atrito}}}{\dot{Q}_{\text{total}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{atrito}}}{\dot{Q}_{\text{total}}} \quad (10)$$

De acordo com Renn/Et.al. (1998), Souza et.al. (2000) a porção de energia total mecânica consumida por atrito próxima superfície é dada por:

$$\frac{\dot{Q}_{\text{atrito}}}{\dot{Q}_{\text{total}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{atrito}}}{\dot{Q}_{\text{total}}} \quad (11)$$

A eficiência termodinâmica da circulação convectiva está relacionada a capacidade de um sistema transferir calor por convecção, se tornando mais eficaz quando se tem uma diferença de temperatura entre duas regiões, podemos representá-la como:

$$\frac{\dot{Q}_{\text{atrito}}}{\dot{Q}_{\text{total}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{atrito}}}{\dot{Q}_{\text{total}}} \quad (12)$$

Ao combinar as equações (9), (10), (11) e (12), obtém-se:

$$\frac{\dot{Q}_{\text{atrito}}}{\dot{Q}_{\text{total}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{atrito}}}{\dot{Q}_{\text{total}}} \quad (13)$$

Integrando a equação (7), nos pontos A e B, obtém-se a equação para entrada de calor total:

$$\frac{\dot{Q}_{\text{atrito}}}{\dot{Q}_{\text{total}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{atrito}}}{\dot{Q}_{\text{total}}} \quad (14)$$

Combinando a equação (13) e (14)

$$\frac{\dot{Q}_{\text{atrito}}}{\dot{Q}_{\text{total}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{atrito}}}{\dot{Q}_{\text{total}}} \quad (15)$$

Ignorando as mudanças no calor específico e no calor latente, pode-se obter a diferença de pressão entre dois pontos:

$$\frac{\Delta P}{\rho g} = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (16)$$

Considerando a diferença de temperatura entre os pontos A e B no estado adiabático e no estado adiabático, tem-se:

$$\frac{\Delta P}{\rho g} = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (17)$$

Organizando os termos da equação (17), pode-se expressar a diferença de pressão da parcela adiabática:

$$\frac{\Delta P}{\rho g} = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (18)$$

Substituindo a Equação (18) na (16) tem-se:

$$\frac{\Delta P}{\rho g} = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (19)$$

O trabalho de escoamento (trabalho de escoamento), no ramo inferior da circulação, pode ser obtido diretamente da Equação 15.

$$\frac{\dot{W}_{\text{escoamento}}}{\dot{Q}_{\text{total}}} = \frac{\dot{W}_{\text{escoamento}}}{\dot{Q}_{\text{total}}} \quad (20)$$

Sendo Δp a diferena de pressão entre os dois pontos ($\Delta p = p_1 - p_2$), a variao da razão de mistura representada por $\Delta \lambda$ que é igual  razão de mistura do ponto 2 menos a do ponto 1 $\Delta \lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ a diferena de altitude, T_m a temperatura média ao longo do ramo inferior e H uma altura de escala.

Na Equao 19, tem-se a pressão não hidrostática, o que resulta em circulaes na encosta de acordo com a eficiência termodinâmica de circulaes. Sugerindo assim, as características topográficas que promovem a circulao convectiva, já que levam ao aquecimento não adiabático de uma parcela de ar que se move para cima. Rescrevendo a Equao 12, que também é um termo ligado à eficiência termodinâmica, tem-se:

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} = \frac{\partial \lambda}{\partial t} + \frac{\partial \lambda}{\partial t} \quad (21)$$

No qual,

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} \text{ e } \frac{\partial \lambda}{\partial t}$$

Logo,

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} = \frac{\partial \lambda}{\partial t} \quad (22)$$

O T_w representa a temperatura do reservatório de calor quente e o T_c a temperatura do dissipador de calor, ou seja, o T_c é considerado o nível de temperatura no qual ocorre a dissipao de calor. Considerando T_c como a temperatura nesse nível, tem-se:

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} = \frac{\partial \lambda}{\partial t} \quad (23)$$

Sendo assim, $\frac{\partial \lambda}{\partial t}$ corresponde a taxa de resfriamento adiabático seco e Z a profundidade da camada. De acordo com Souza et al. (2000) ao combinar as Equaes 22 e 23 a equao da eficiência termodinâmica é

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} = \frac{\partial \lambda}{\partial t} \quad (24)$$

Sendo o T_a a temperatura da área de absoro de calor que ocorre perto da superfície e Z a profundidade da camada limite da atmosfera (CLA). Santos (2013) define a eficiência termodinâmica (η) como um parâmetro que consiste na razão entre a quantidade de calor que entra no sistema e a parte do calor que é rejeitada para o reservatório frio ao longo da circulao.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente as figuras foram geradas utilizando um valor fixo de gama de 0,26, que representa a porcentagem de energia total mecânica consumida por atrito próximo a superfície, o valor fixo se mostrou razoavelmente estável na análise. No entanto, visando-se uma análise mais precisa, optou-se pela variação do gama (係數) para encontrar aquele que melhor aproxima-se a teoria em relação aos dados de reanálise. Os resultados dessa variação de gama estão detalhados na Tabela 1.

Tabela 1: Valor do gama para cada mês durante todo ano de 2018

Meses	1(Jan)	2(Fev)	3(Mar)	4(Abr)	5(Mai)	6(Jun)	7(Jul)	8(Ago)	9(Set)	10(Out)	11(Nov)	12(Dez)
Gama (係數)	0,38	0,68	0,66	0,80	0,88	0,72	0,40	0,32	0,28	0,26	0,28	0,52

Fonte: Autora (2024)

Para uma análise estatística do valor de gama variado e fixo, realizou-se o teste t de t-Student entre os valores de gama fixo de 0,26 para todo o ano de 2018 e o valor de gama variado ilustrado na Tabela 1. Este teste resultou em um valor P de 0,00068, sendo este um valor muito menor que 0,05. Diante disso, pode-se afirmar que existe uma diferença significativa entre os dois conjuntos de valores de gama rejeitando a hipótese nula. Sendo assim, as variáveis experimentais nos valores de gama resultam em mudanças significativas em comparação com os valores constantes.

Nesta seção, serão analisadas as figuras de diferença de pressão dada pela Equação (19), eficiência Equação (24), queda de pressão equação (20) e diferença de temperatura entre a superfície do oceano e a superfície terrestre. Todas essas variáveis serão analisadas a partir de dois pontos, o ponto A localizado sobre o oceano e o ponto B localizado sobre o continente.

Na Figura 4 e 5, pode-se observar a diferença de pressão mensal durante todo o ano de 2018, com a presença da altitude (linha preta) de 110 m e sem a altitude (linha verde), essa análise é crucial na circulação de brisas em regiões costeiras. A altitude é um fator influente na pressão atmosférica, de maneira que a pressão diminui conforme a altitude, já que a densidade do ar diminui medida que se sobe na atmosfera. Na diferença de pressão sem consideração da altitude, a pressão atmosférica é mais alta devido a um número maior de densidade de moléculas de ar. Observa-se nas duas figuras que se tem

uma diferença de 10 hPa entre a diferença de pressão com altitude e a diferença de pressão reduzida ao nível do mar, apesar de ambos apresentarem comportamento semelhante.

Durante os meses de maio e junho, os valores de diferença de pressão são menores, já nos meses de setembro a novembro, os valores mostram-se com maior variabilidade.

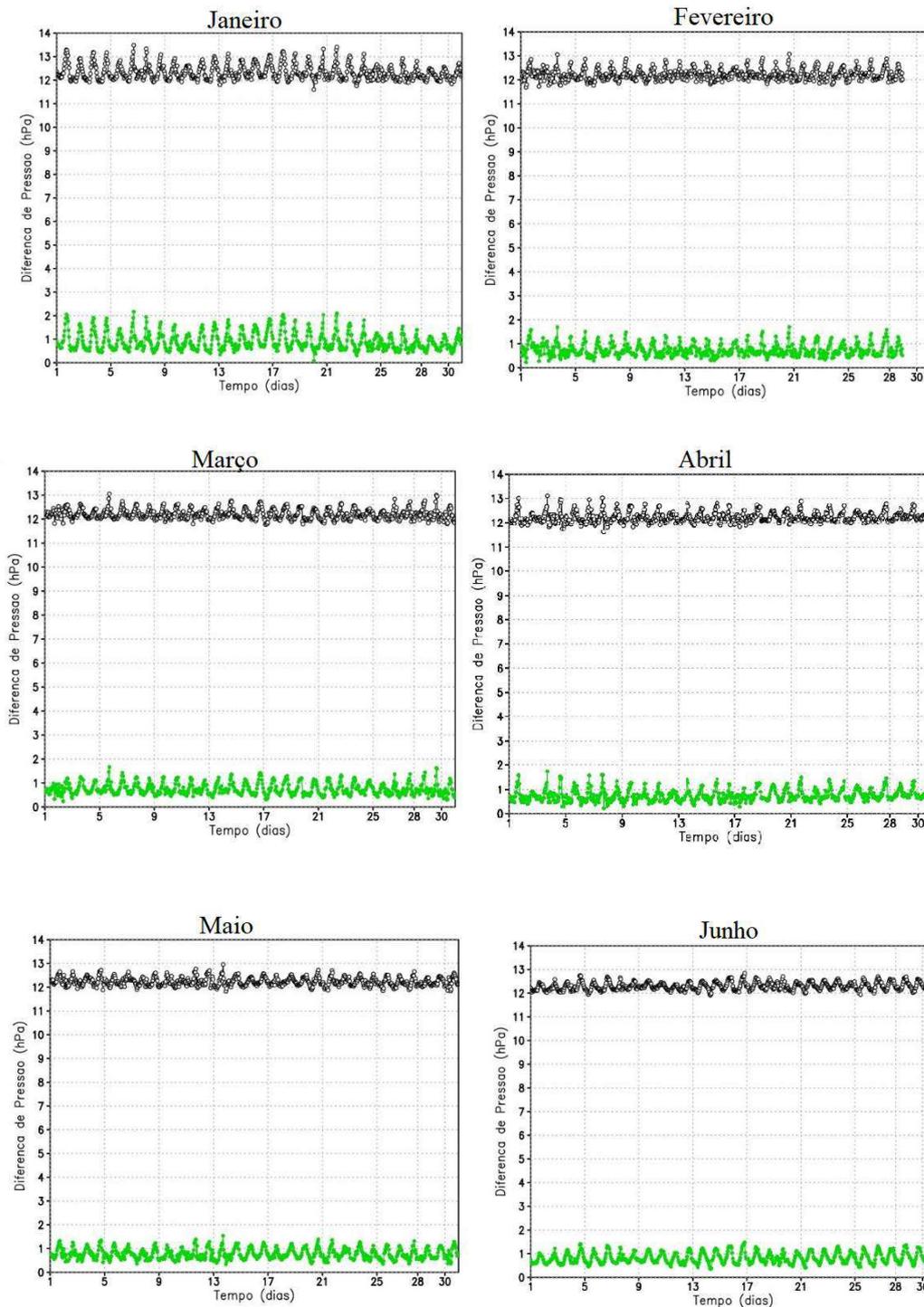


Figura 4: Diferença de pressão entre a teoria com altitude (linha preta) e sem a presença da altitude (linha verde), de janeiro a junho de 2018. Fonte: A autora (2024).

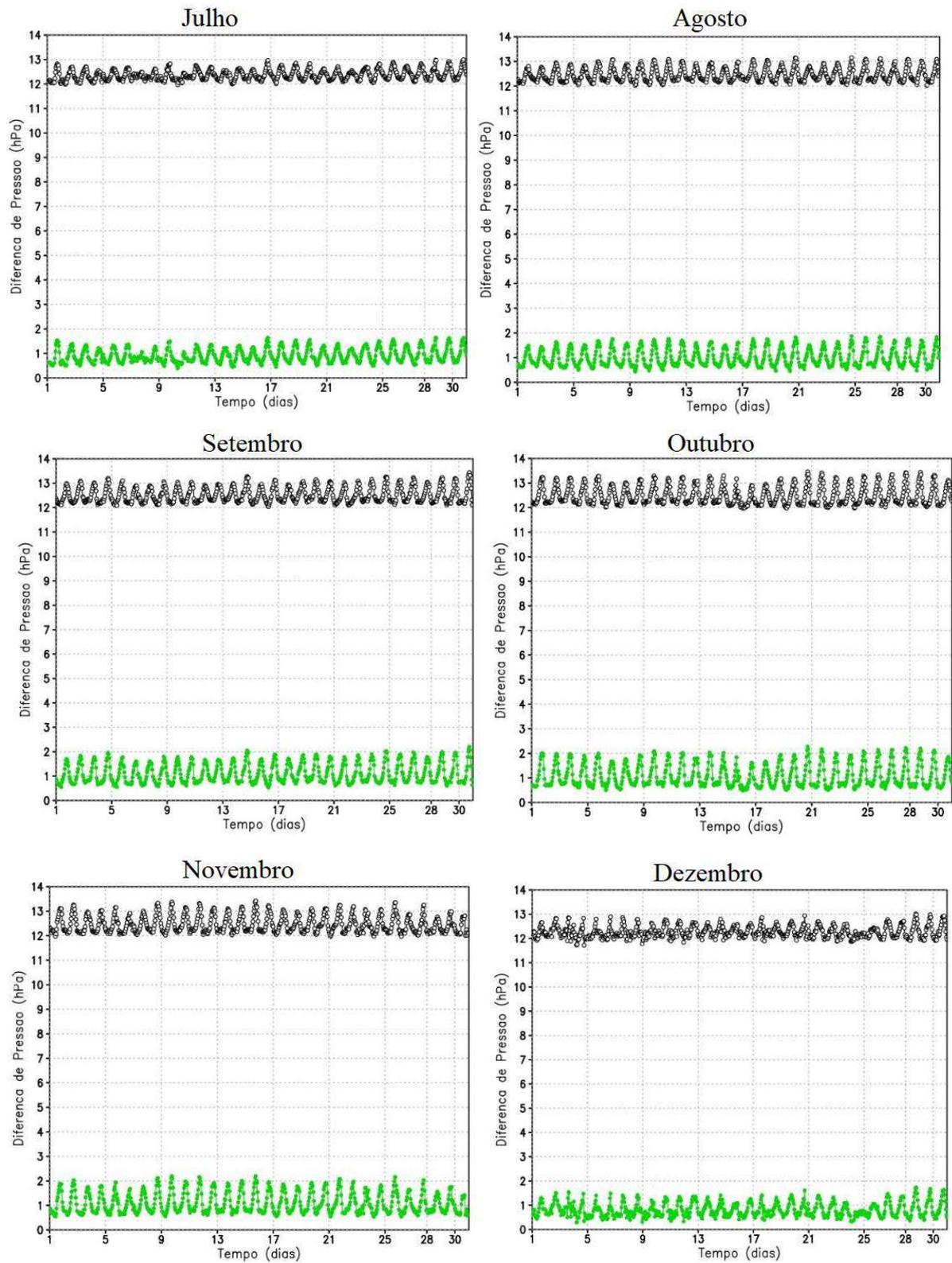


Figura 5: Diferença de pressão entre a teoria com altitude (linha preta) e sem a presença da altitude (linha verde), de julho a dezembro de 2018. Fonte: Autora (2024).

Nas Figuras 6 e 7, ilustra-se a eficiência termodinâmica do sistema calculada conforme a equação 20, a eficiência é a capacidade de um sistema transferir calor, o que se torna mais eficaz ao ter uma maior diferença de temperatura entre duas regiões, a eficiência está ligada ao termo da CLA. O percentual de eficiência permite observar a intensidade da brisa, quanto maior for a eficiência, mais forte será a circulação da brisa. Na análise mensal da eficiência, nota-se que janeiro teve mais dias com menor eficiência. De fevereiro a abril são perceptíveis valores abaixo de 5%. Maio, apesar de manter valores semelhantes, houve alguns dias com eficiência superior a 5%. De junho a novembro, os valores de eficiência mostraram-se os mais altos, chegando a 9%. Em dezembro, a eficiência voltou a cair. Os meses de setembro a novembro ilustrados na Figura 7 nota-se o maior percentual de eficiência durante todo o ano de 2018, com isso mostra o que favorece a observação das brisas.

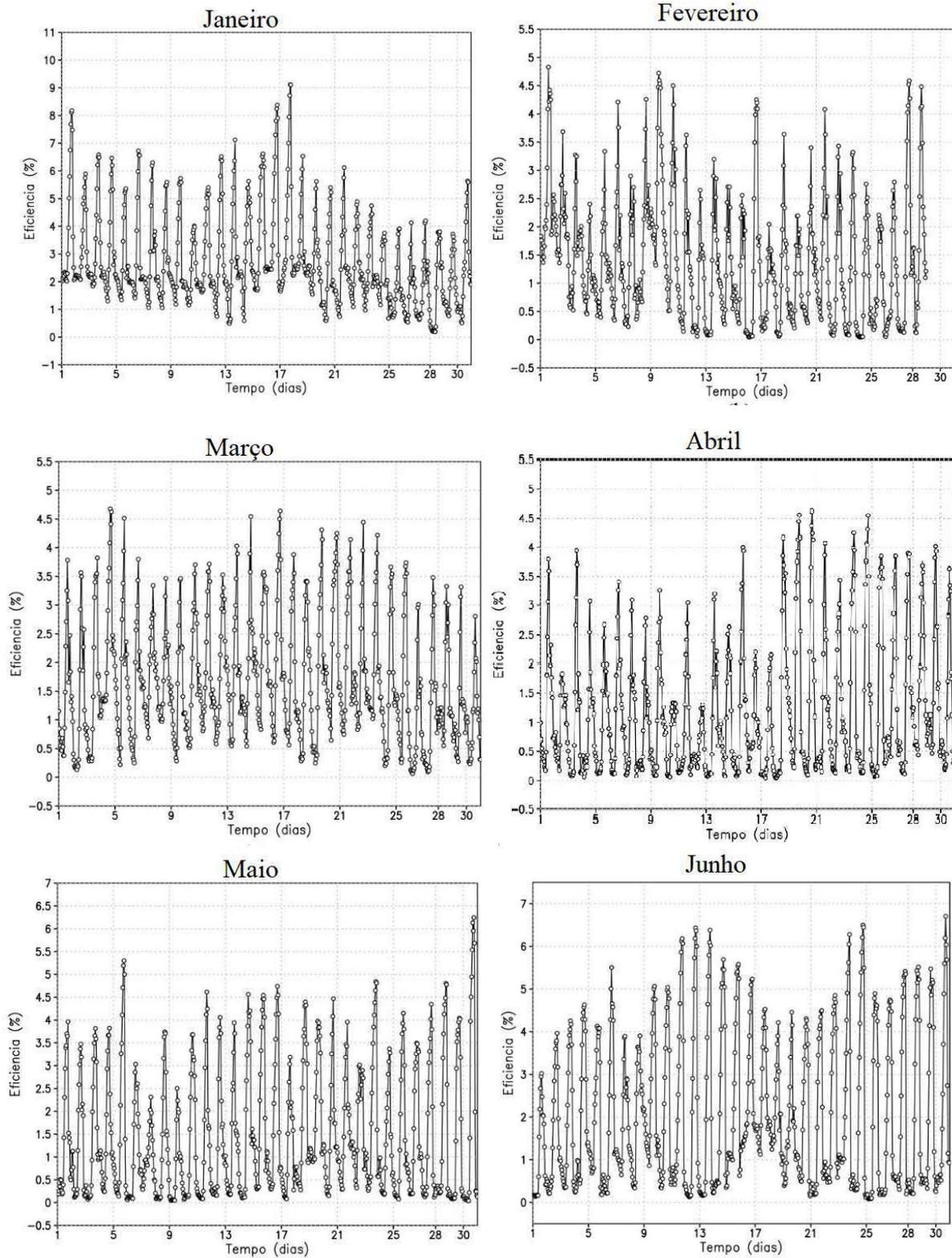


Figura 6: Eficiência Termodinâmica do sistema (%) de janeiro a junho de 2018. Fonte: A autora (2024).

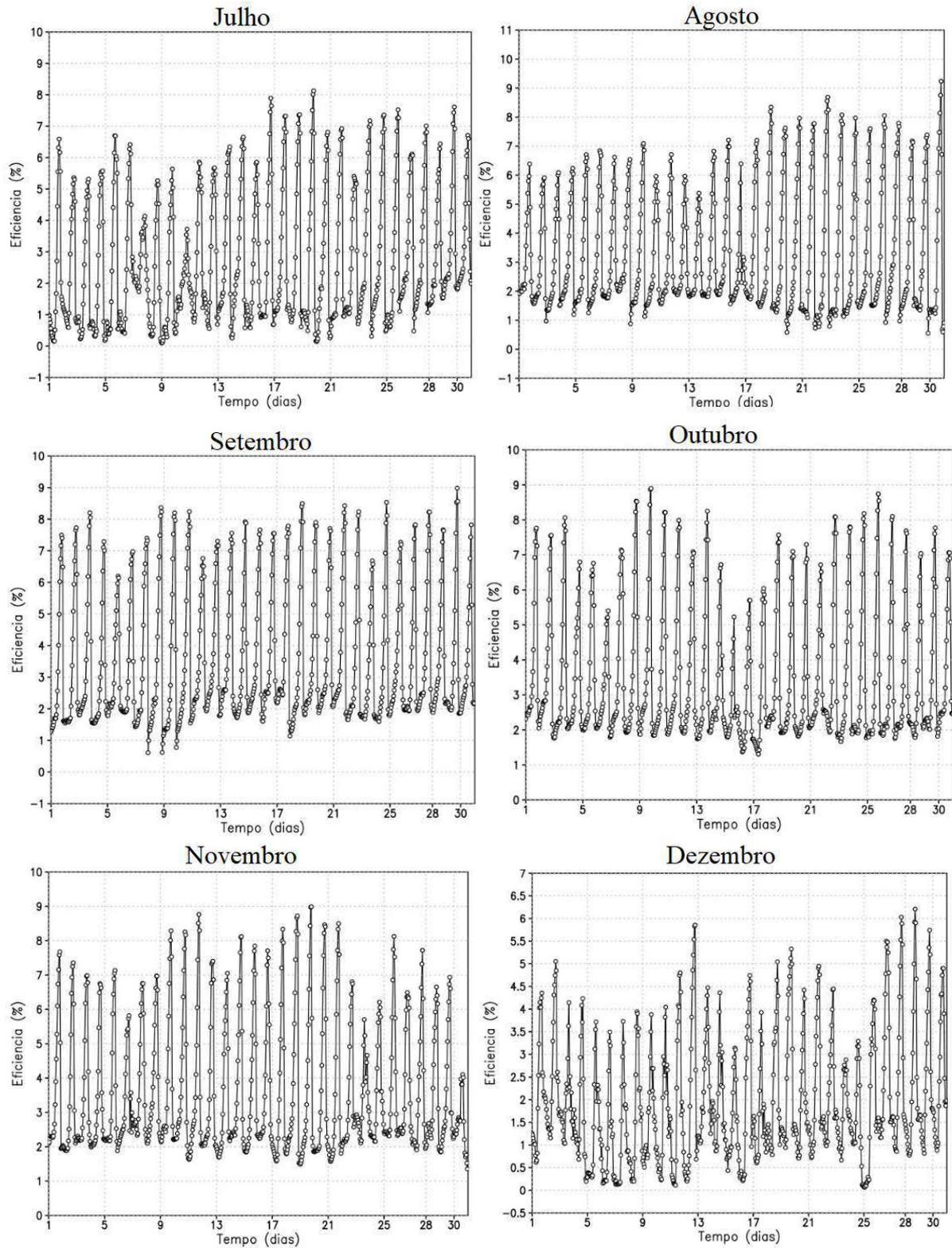


Figura 7: Eficiência Termodinâmica do sistema (%) de julho a dezembro de 2018. Fonte: Autora (2024)

Nas Figuras 8 e 9, observa-se a queda de pressão mensal para todo o ano de 2018, na vertical tem-se os valores de queda de pressão (em hPa) e na horizontal está representado o tempo ao longo dos dias. A análise apresenta a queda de pressão calculada pela teoria (linha preta) e a queda de pressão da reanálise (linha verde) entre o ponto A (oceano) e o ponto B (continente).

A queda de pressão atmosférica é um fator importante na formação de circulações de brisas, as diferenças de temperatura entre o mar e a superfície terrestre e as variações de pressão geram os padrões de circulação de brisas comuns em áreas costeiras. A pressão atmosférica tende a cair durante o dia devido ao aquecimento solar e sobe à noite em consequência do resfriamento, influenciando diretamente as brisas.

Observa-se que do mês de janeiro até o mês de abril ilustrados na Figura 8 a queda de pressão calculada e a da reanálise apresentam distanciamentos entre os resultados, apesar de apresentarem comportamentos semelhantes. Maio e junho apresentam valores mais próximos, mas com valores de queda de pressão ainda baixos, não ultrapassando 1,8hPa. Na Figura 9, os meses de julho e agosto mostram uma melhor correspondência entre os dados de reanálise e a teoria. Já de setembro a novembro, notam-se os melhores resultados com as maiores quedas de pressão no decorrer deste ano, juntamente com uma correspondência quase perfeita entre os pontos de reanálise e a teoria. Esta aproximação entre os dados e a similaridade em seus comportamentos aponta que a teoria consegue acompanhar os resultados de reanálise, mostrando a veracidade dos resultados teóricos. O mês de dezembro volta a apresentar valores baixos e com distanciamento entre a teoria e a reanálise.

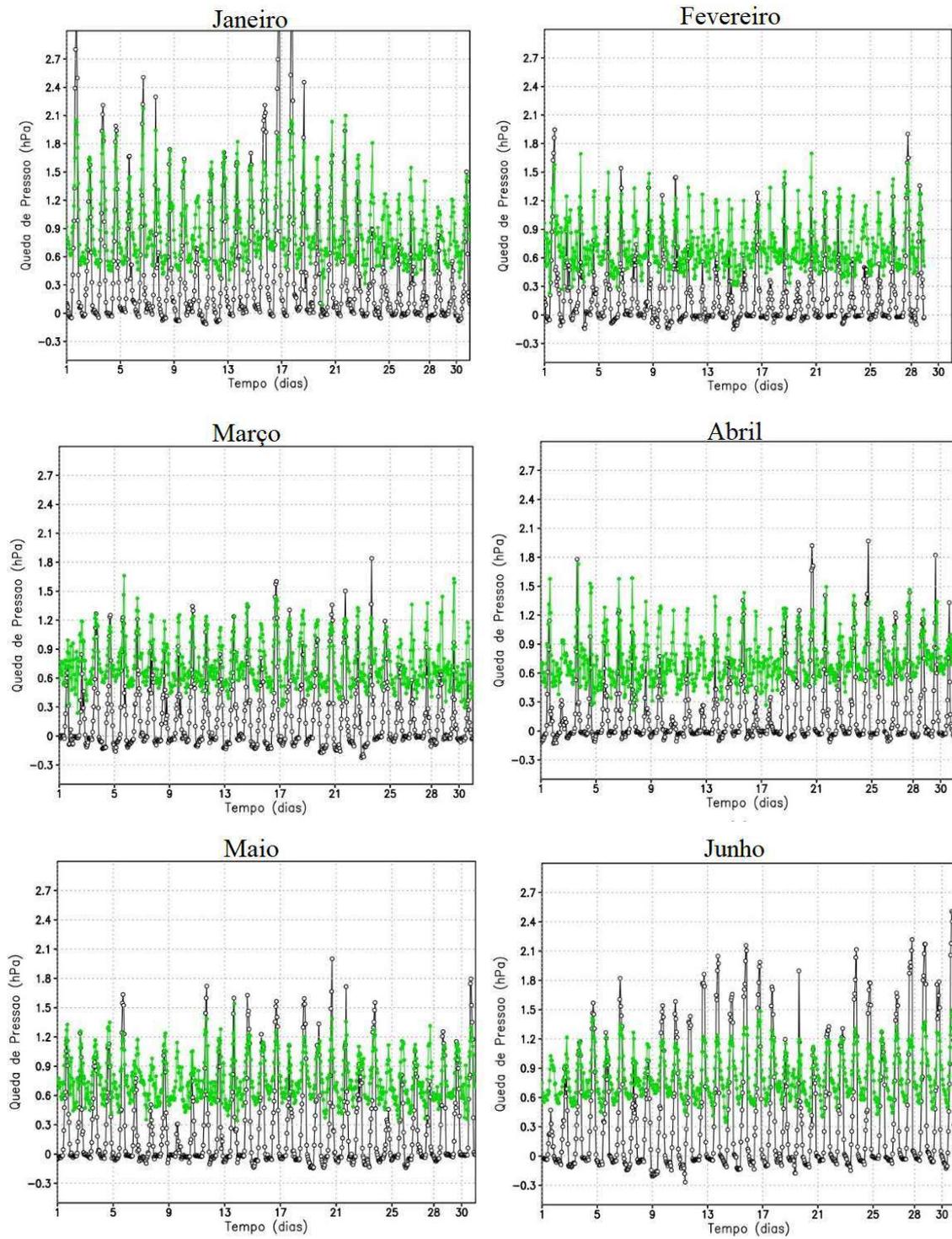


Figura 8: Queda de Press²o (hPa) calculada pela teoria (linha preta) e a queda de press²o da rean²lise (linha verde) dos meses de janeiro a junho de 2018. Fonte: A autora (2024)

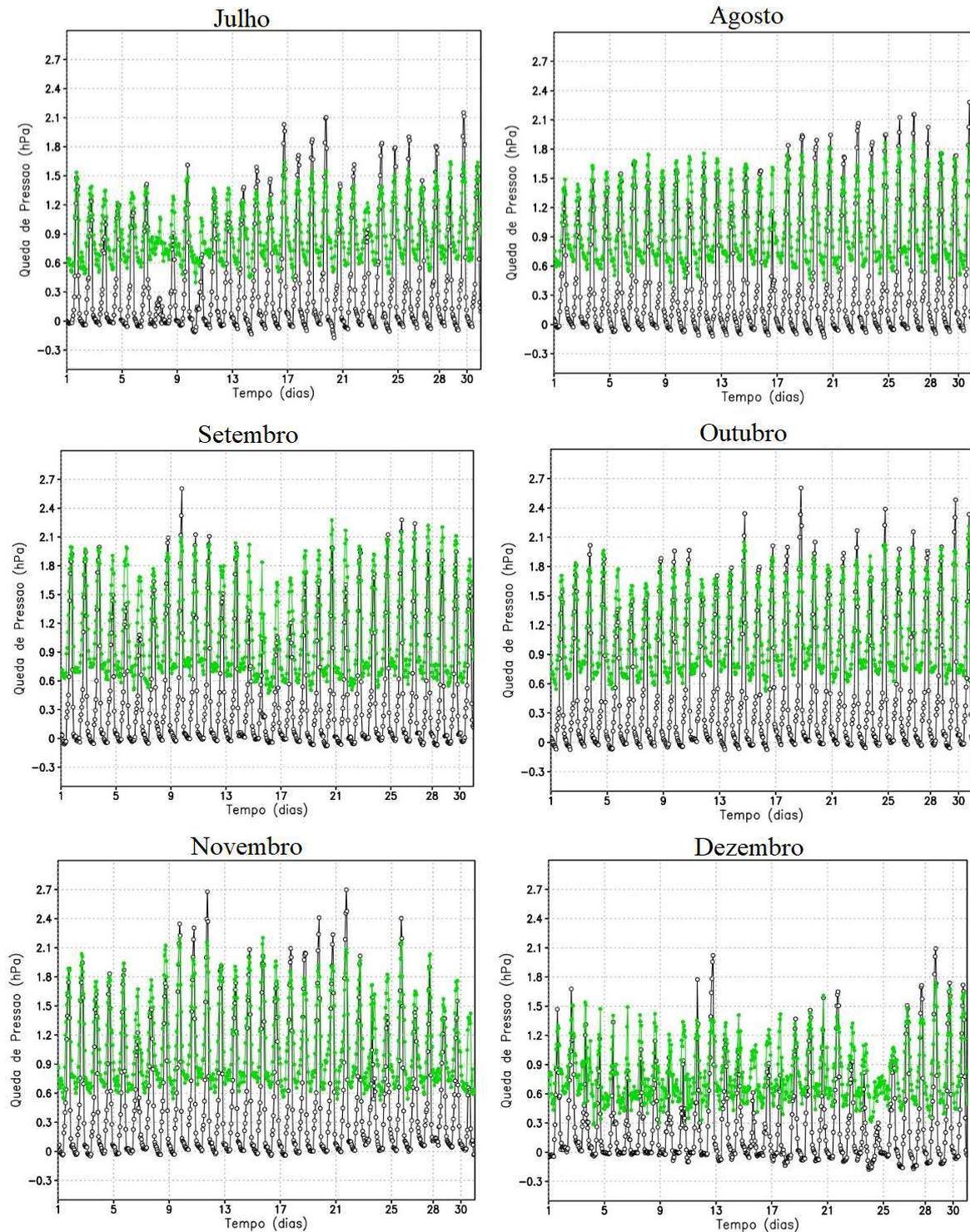


Figura 9: Queda de Press²o (hPa) calculada pela teoria (linha preta) e a queda de press²o da rean@lise (linha verde) dos meses de julho a dezembro de 2018. Fonte: Autora (2024)

Nas Figuras 10 e 11, observa-se o trabalho de escoamento entre o oceano e o continente, que ocorre justamente quando o ar se move de uma regi²o de alta press²o (ar frio) para uma regi²o de baixa press²o (ar quente), processo este que est@relacionado

circula²o de brisas. Tanto no trabalho de escoamento quanto nas figuras de queda de press²o (Figura 8 e 10) observam-se comportamentos semelhantes. Os valores m^áximos, nos quais a brisa atinge seu estado m^áximo de intensidade, denominado de estado estacion^ário, s^ão consistentes com a teoria de Souza et al. (2000), que prev^ê o estado estacion^ário da brisa.

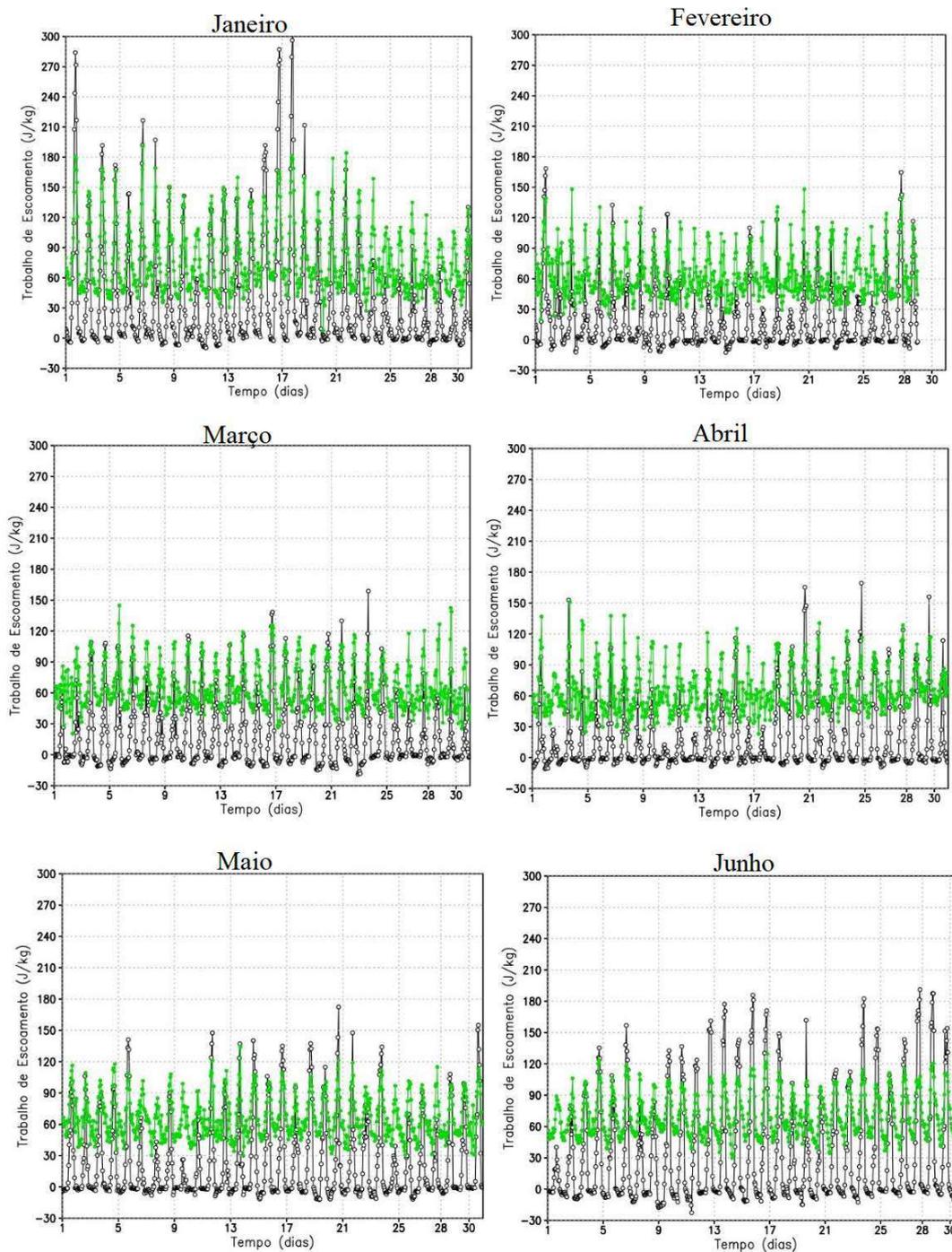


Figura 10: Trabalho de escoamento calculado pela teoria (linha preta) e a queda de press²o da rean^álise (linha verde) dos meses de janeiro a junho de 2018. Fonte: A autora (2024).

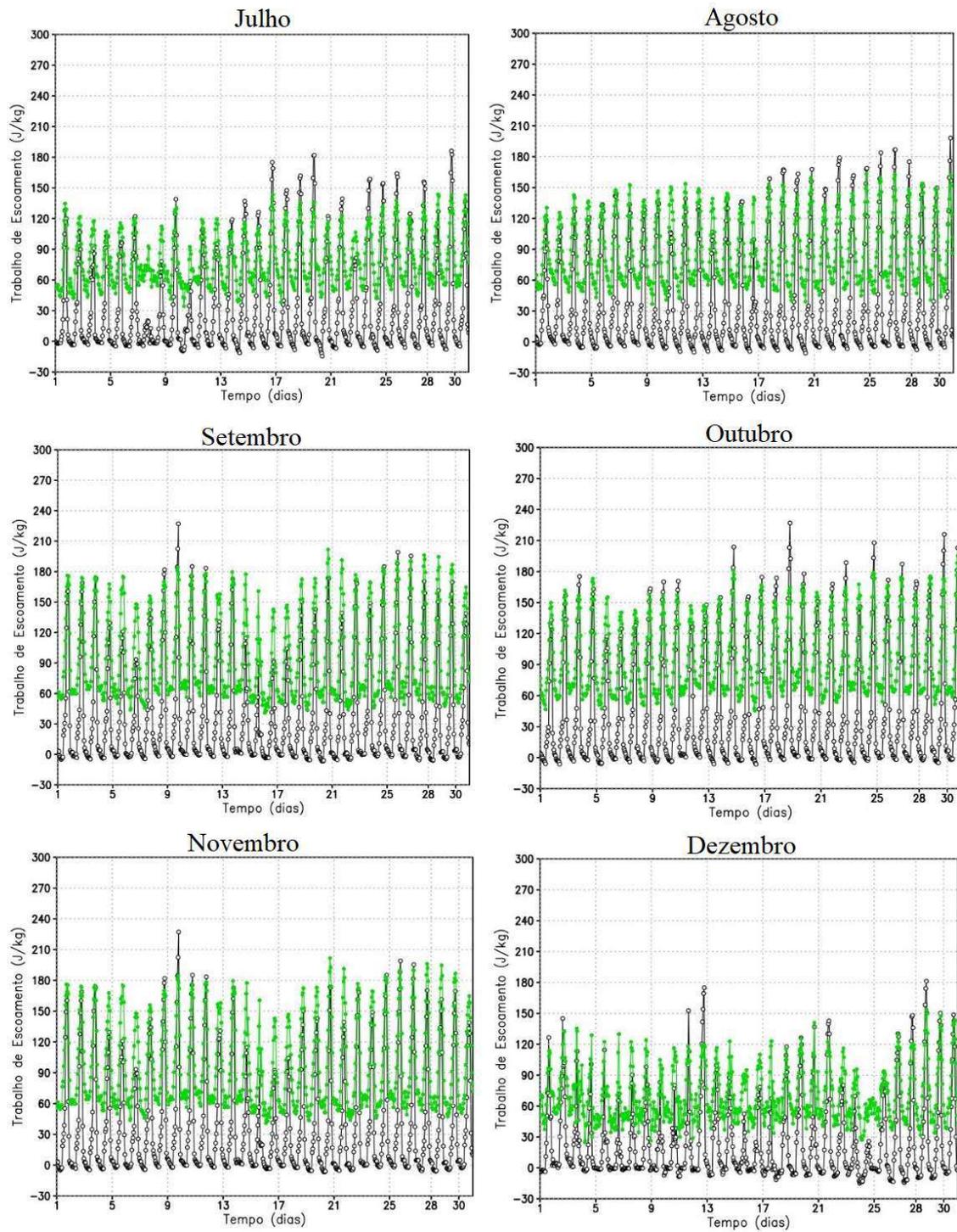
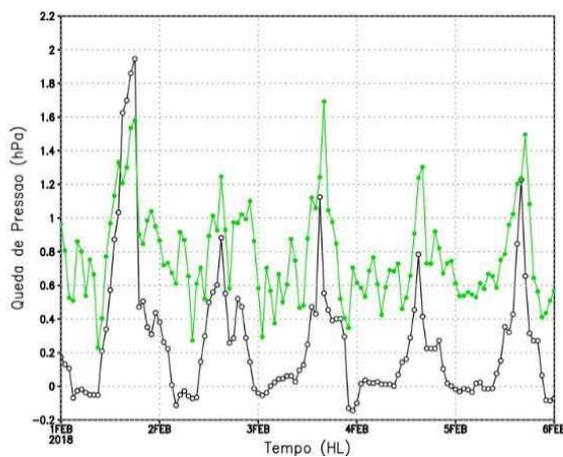


Figura 11: Trabalho de escoamento calculada pela teoria (linha preta) e a queda de press^2 o da rean@ise (linha verde) dos meses de julho a dezembro de 2018. Fonte: A autora (2024)

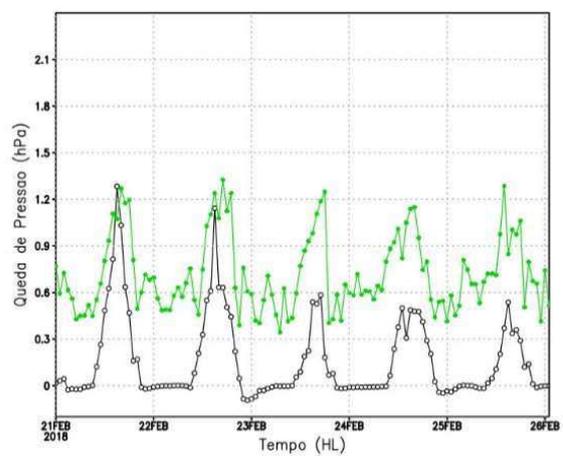
Na Figura 12, é possível observar os dados de queda de press^2 o e trabalho de escoamento aproximados para os dias 1 a 5 e 21 a 25 dos meses de fevereiro (Figura a,b,d,e) e outubro (Figura b,c,f,g). No mês de fevereiro observa-se que a teoria (linha preta) e a rean@ise (linha verde) apresentam comportamentos diferentes, e uma certa

turbulência nos seus resultados, que está ocorrendo em virtude de uma menor diferença de temperatura neste mês entre a superfície do oceano e a superfície terrestre como pode-se observar na Figura 13. No mês de outubro (Figura c,d,f,g), verifica-se que os pontos térmicos e de reanálise ocorrem com maior frequência ou se aproximam nos pontos máximos de diminuição de pressão e escoamento do trabalho. Os pontos mínimos, por outro lado, estão relacionados à circulação das brisas terrestres.

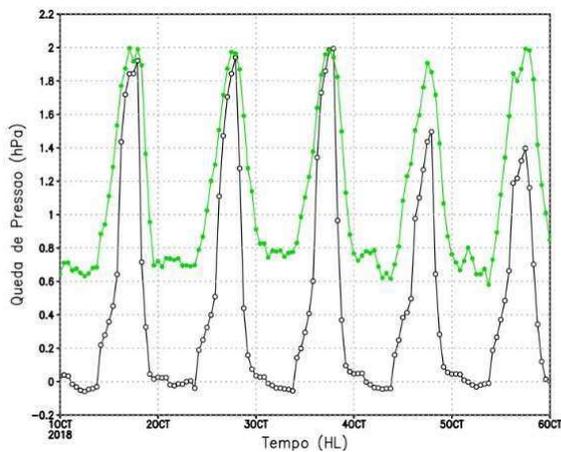
Nesse aspecto, a teoria falha ao conseguindo analisar as circulações nos pontos com menos intensidade, ou seja, no período noturno, uma vez que a teoria foi formulada para prever a brisa na sua intensidade máxima, ou seja, a brisa marítima, sendo falha para brisa terrestre, já que ocorre com menos intensidade. Pode-se ainda observar que os pontos máximos de intensidade ocorrem às 18 UTC que são às 15 horas da tarde.



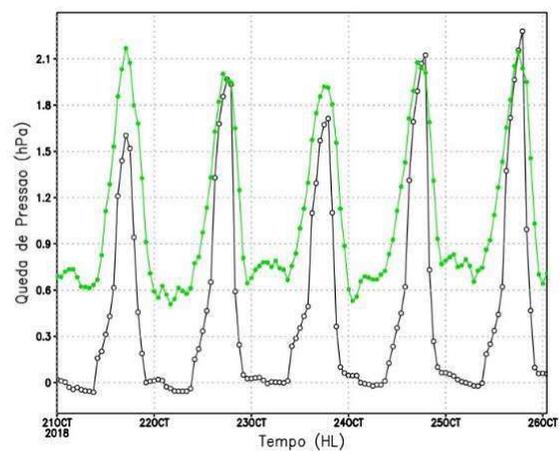
(a)



(b)



(c)



(d)

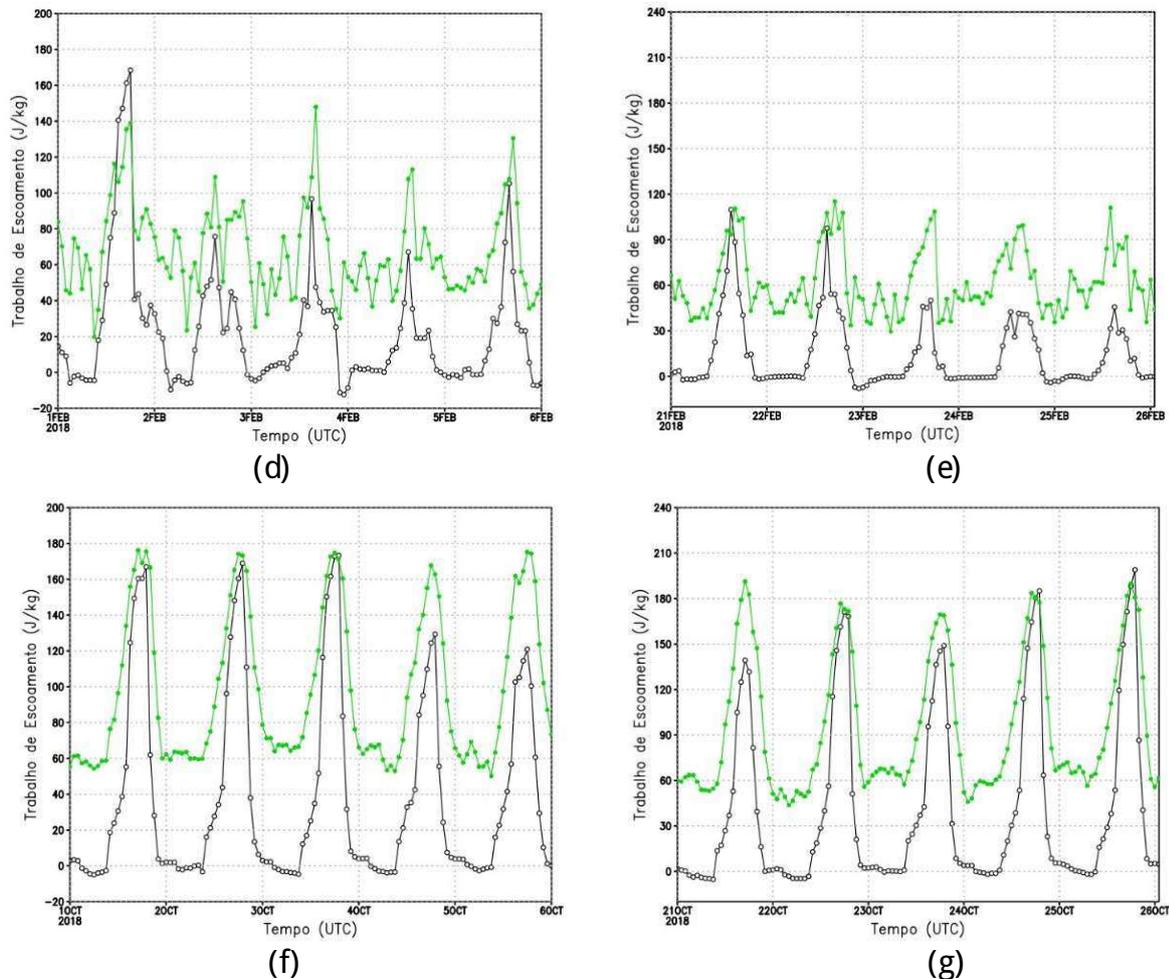


Figura 12: Queda de press^2 o dos dias 1 a 5 de fevereiro e do dia 21 de fevereiro a 25 de fevereiro no primeiro quadro. No segundo quadro tem-se Queda de press^2 o para os mesmos dias do mês de outubro. Fonte: A autora (2024).

Nas Figuras 13 e 14 observa-se a variação da diferença de temperatura entre dois pontos diferentes: um localizado no oceano (A) e o outro localizado na superfície terrestre (B). Esta diferença é um elemento crucial para o estudo de brisas. A variação de temperatura entre as áreas marítimas e terrestres influencia na formação de brisas, intensidade e direção de circulação das brisas, ajudando a entender o movimento do ar. Estas figuras fornecem informações importantes sobre a diferença de temperatura para cada mês durante todo o ano de 2018.

Uma diferença de temperatura negativa entre o oceano e a terra significa que o oceano está mais aquecido que a superfície terrestre. Esse fenômeno é comum durante o período noturno, quando a superfície terrestre está mais fria, enquanto o oceano está mais quente, resultando em brisas terrestres. Já os valores positivos, representam variação diurna, o ar sobre o oceano permanece mais frio e mais denso do que o sobre a terra. Esse

gradiente de temperatura ocasiona o deslocamento do ar mais frio e denso sobre o oceano em direção à terra, formando as chamadas brisas marítimas.

Analisando a Figura 13, no mês de janeiro observa-se uma diferença de temperatura de até 9 K, no entanto, a maioria dos dias apresenta diferença de temperatura inferiores a essa. De fevereiro a junho essa diferença é inferior a 5 K, apresentando-se as menores diferenças de temperatura deste ano, o mês de dezembro também apresentou valores baixos. Os meses de setembro a novembro mostram-se os maiores valores de diferença de temperatura variando de aproximadamente -1 K a 10 K.

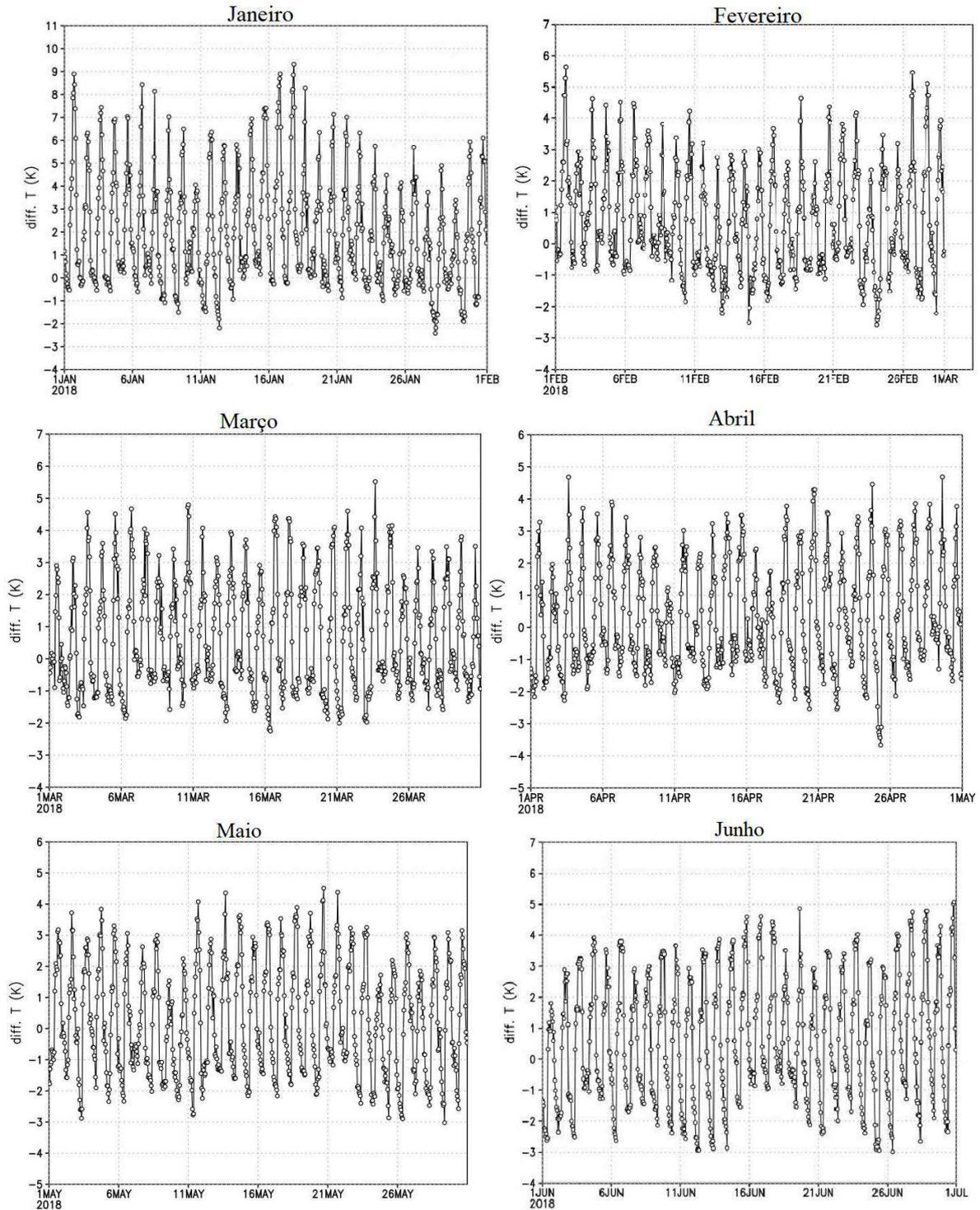


Figura 13: Diferença de temperatura entre o ponto A (oceano) e o ponto B (continente) do mês de janeiro a junho de 2018. Fonte: Autora (2024)

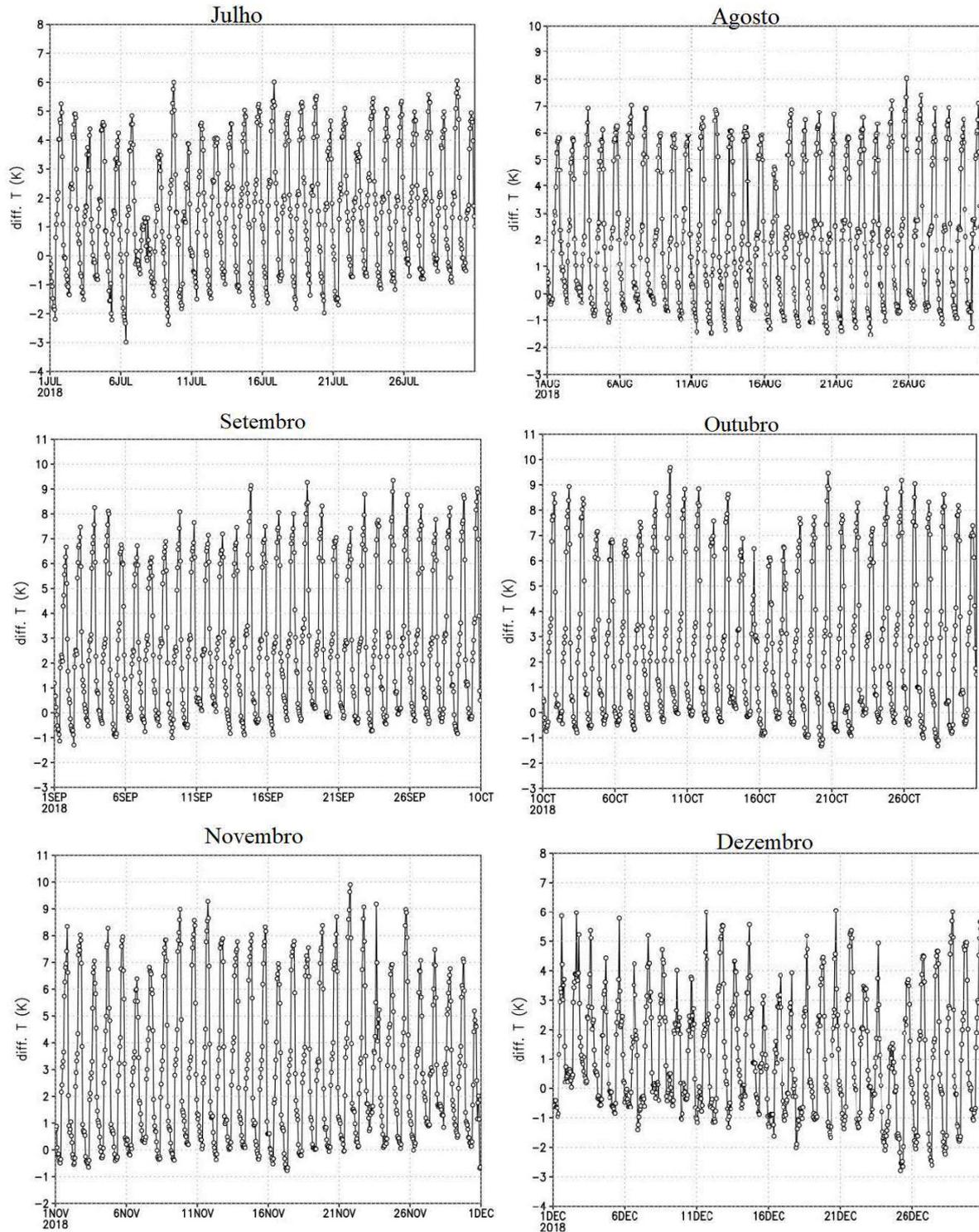


Figura 14: Diferença de temperatura entre o ponto A (oceano) e o ponto B (continente). Fonte: Autora (2024).

As figuras geradas para cada mês do ano permitem testar a teoria de circula o convectiva por heterogeneidade de superfície em dois pontos distintos. A partir destes foi possível observar que a teoria funciona bem para a análise de brisas, principalmente no seu estado estacionário, que ocorre por volta das 15 horas, mas que depende da diferença

térmica entre as duas superfícies, com isso, observa-se que a diferença de temperatura é um fator de suma importância na análise da circulação das brisas. Em alguns meses, como janeiro a abril, houve uma maior discrepância dos dados devido a influências meteorológicas, que resultaram em menor diferença de temperatura.

5.1 Discussão das Variáveis Físicas

Ao longo das análises realizadas para todo o ano de 2018 foram geradas diversas figuras utilizando algumas variáveis para melhor aproximar os resultados teóricos das reanálises. Para se estudar como essas variáveis se comportam ao longo desse ano, supondo que as características típicas do ciclo anual são captadas, serão discutidos, agora, ciclos diários médios mensais para as variáveis mais importantes. A localidade escolhida apresenta vento perpendicular que pode ser representado pela componente meridional do vento. Na Figura 15, pode-se observar um corte vertical do componente meridional do vento ao longo da longitude de 41,25 °W. Valores negativos, próximo à superfície, indicam a brisa marítima fluindo para o continente. Valores positivos, entre 900 e 750 hPa, indicam a circulação de retorno, quando presente. No primeiro quadrimestre do ano, observa-se o escoamento penetrando no continente, abaixo de 900 hPa. Entretanto, não se observa a circulação de retorno correspondente. Entre maio e junho, começa a configuração de uma circulação de retorno, mas caracterizada por um fraco escoamento continente adentro, nos níveis inferiores. Entre julho e novembro que se observam circulações com intensidades semelhantes nos níveis inferior e superior da brisa. É nesse período que se pode atestar a presença de uma brisa marítima, na sua definição clássica. Como as condições termodinâmicas típicas, associadas às BMTs, variam pouco ao longo do ano (por a região estar localizada próximo ao equador).

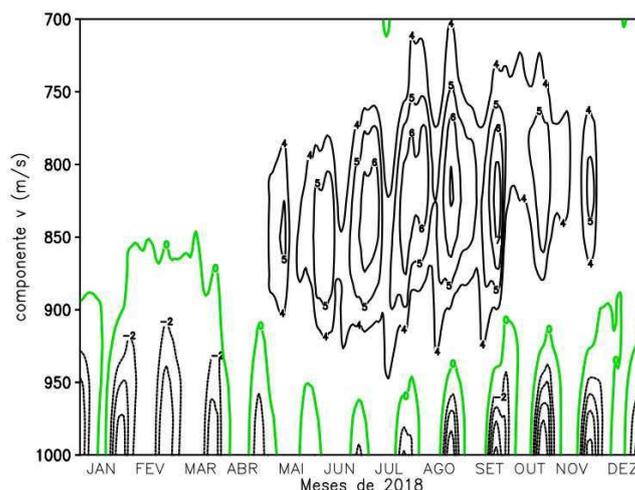


Figura 15: Ciclo diário médio mensal do componente meridional do vento ao longo de 2018. Fonte: Autora (2024)

A Figura 16 mostra a taxa de precipitação a cada hora de 2018, em (3 \pm 41,25 \pm). É notável a configuração das brisas nos períodos que possui maior índice de precipitação, já que esses dias apresentam menor diferença de temperatura e menor incidência solar. De janeiro a abril, a precipitação é bem distribuída, provavelmente pela atuação de Vórtices Ciclônicos e Altos Níveis (VCAN) e da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). A partir de junho a precipitação diminui e passa a ser episódica. Os meses de julho a novembro são os que apresentam menos precipitação, possivelmente maior incidência solar o que está de acordo com a maior atividade de BMTs no período (Figura 16). Em dezembro, observa-se um retorno a índices consideráveis de precipitação de até 5 mm/h. Além disso, há dias com menos insolação e, conseqüentemente, menor diferença de temperatura, o que explica a fraca atuação das BMTs.

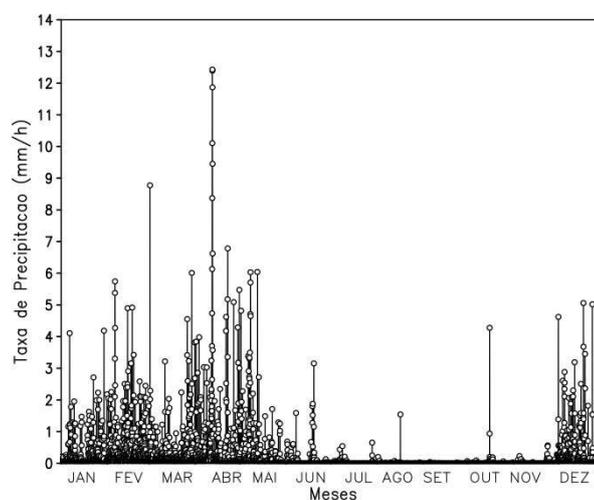


Figura 16: Taxa de precipitação ao longo do ano de 2018. Fonte: Autora (2024).

Embora o mês de outubro apareça com uma brisa bem configurada, na média, por volta do dia 16 pode-se observar, na Figura 17, que ocorreu uma precipitação com taxa de 4,4 mm/h. Este evento pode ser considerado como explicativo as discrepâncias nos resultados em relação a comparação do dado do ERA5 e a teoria. Note-se que tanto a queda de pressão (Figura 10 e 11) quanto o trabalho de escoamento (Figura 12 e 13) sofrem uma diminuição em relação aos dias precedentes e subsequentes e, também, são subestimados pela teoria. Observa-se que os dias com maior índice de precipitação tem-se uma menor diferença de temperatura entre a superfície terrestre e a superfície do oceano, como pode ser observado na Figura 13 e 14. Como resultado dessa baixa diferença de temperatura, houve uma redução no forçamento para a configuração das brisas.

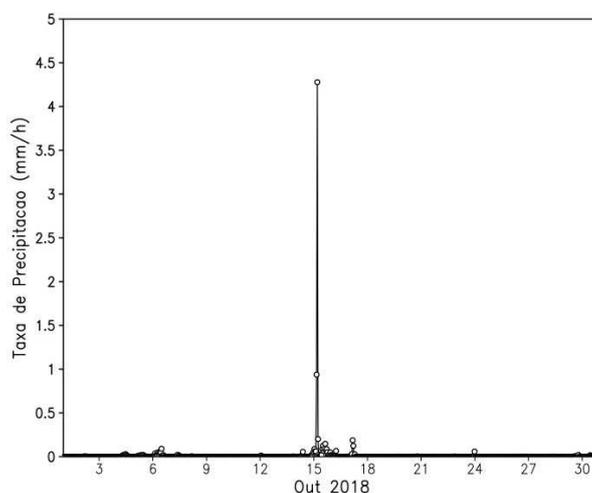


Figura 17: Taxa de precipitação do dia 1 de outubro a 30 de outubro do ano de 2018. Fonte: Autora (2024).

A discussão agora será focada nas variáveis \bar{E} e \bar{W} . A primeira é a fração de dissipação que ocorre nos baixos níveis, em relação a toda a profundidade da circulação e a segunda é a eficiência termodinâmica, que é a quantidade da energia absorvida que é convertida em trabalho. Segundo Renn e Ingersoll, 1996, e Souza et al., 2000, esse trabalho é usado para vencer os processos dissipativos. Note-se que o produto $\bar{E}\bar{W}$ aparece nas Equações 19 e 20, que descrevem, respectivamente a queda de pressão e o trabalho de escoamento associado à brisa.

Os valores de \bar{E} da Tabela 1, usados para a discussão que precedeu esta seção, são mostrados na Figura 18. Essa informação oferece uma representação visual do comportamento do \bar{E} ao longo do período estudado. Esses valores de \bar{E} foram

estabelecidos para que os resultados previstos pela teoria se aproximassem dos valores do ERA5, a cada mês.

Note-se que, em janeiro o valor κ de 0,38, aumenta para 0,68 em fevereiro, diminui para 0,66 em março e aumenta para 0,80 em abril até atingir 0,88 em maio. Esse padrão κ semelhante ao observado com a distribuição de precipitação na Figura 17. Em junho, que já apresenta indicação de uma fraca brisa (ver Figura 16) o valor de κ ainda é elevado (0,62), apesar da pouca precipitação. A partir de julho, o valor de κ cai de 0,40 até atingir o menor valor em outubro (0,26). Nos meses de setembro, outubro de novembro, κ fica abaixo de 0,30. Em dezembro, volta a aumentar para 0,52, refletindo um mês chuvoso (Figura 17). Em suma, κ maior nos meses mais chuvosos e menor nos meses mais secos.

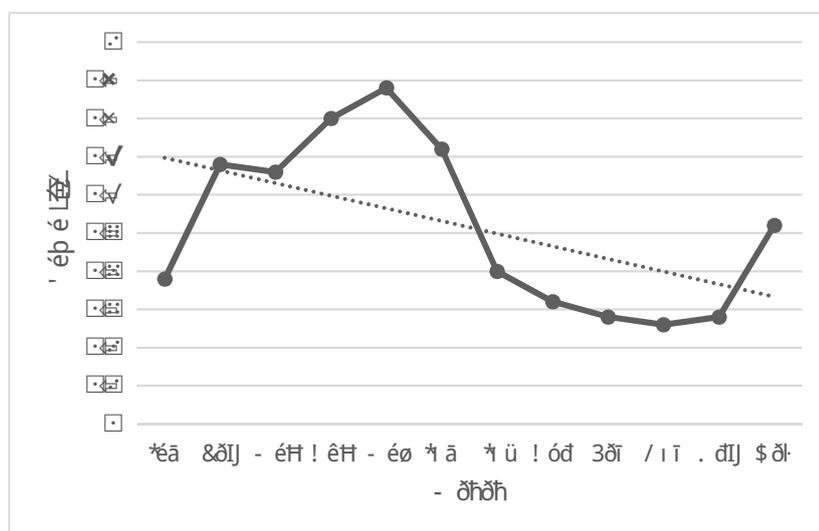


Figura 18: Comportamento de cada mês durante 2018. Fonte: A autora (2024).

Outro fator que evidencia o comportamento da brisa é a eficiência termodinâmica, cuja variação κ devida, em grande parte, à altura da camada limite, conforme a Equação 24. A evolução anual do ciclo diário médio da altura da camada limite, κ mostrada na Figura 19. Percebe-se que a altura da CLP κ menor nos meses que ocorre menos precipitação e maior nos meses mais secos, em que a superfície terrestre tende a se aquecer mais rapidamente devido a maior incidência solar, esse aquecimento aumenta a turbulência térmica, promovendo a expansão vertical da CLP. Em condições secas, os movimentos convectivos são mais intensos devido à maior diferença de temperatura entre a superfície e a atmosfera superior. Isso resulta em uma maior altura da CLP. Os menores

valores de κ nos meses chuvosos significam que grande parte da energia disponível na superfície é usada para evaporar a água do solo e não para produzir turbilhões térmicos, que fazem com que a CLP se aprofunde.

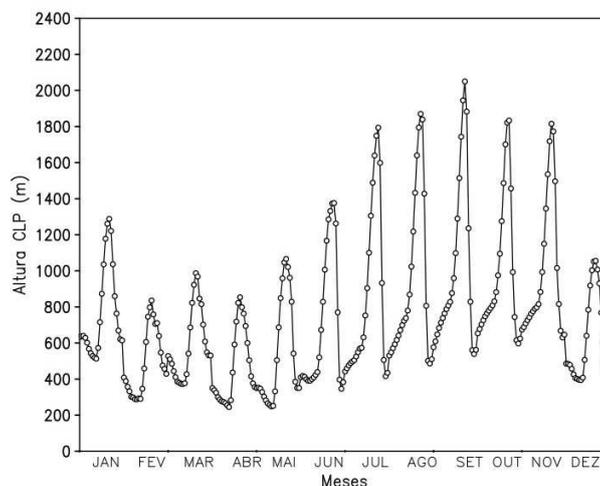


Figura 19: Altura da Camada Limite para todo o ano de 2018. Fonte: Autora (2024).

Comparando-se as curvas para κ percebe-se que nos meses em que uma variável cresce, a outra diminui. Tendo em mente o que produto κ determina a intensidade da queda de pressão (Equação 19) e do trabalho de escoamento (Equação 20), é possível fazer uma análise física do papel das duas variáveis. O ciclo anual da altura da CLP parece alinhado com a presença e intensidade da brisa, conforme a Figura 16. Já o aumento de κ para conseguir explicar a queda de pressão nos meses chuvosos (sem brisa) requer outras considerações. Para que a dissipação seja grande próximo à superfície, o que implica em valores elevados para κ o sistema convectivo deve ser profundo.

Pode-se especular, portanto, que a queda de pressão observada estaria associada à presença de sistemas convectivos profundos, responsáveis pela precipitação observada (Figura 21). Em todo o caso, não é razoável imaginar que um período de brisa fraca esteja associado a um valor elevado de κ que é fisicamente inconsistente. Portanto, os meses em que κ apresenta valores mais altos implicam ou na presença de outros sistemas ou em falha da teoria em prever uma brisa que não existe.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um estudo conciso das brisas para a região do Ceará no Nordeste do Brasil, durante ano de 2018, com base em dados de reanálise do ERA5 e na teoria termodinâmica de circulação convectiva proposta por Souza et al. (2000). Essa teoria permite analisar o comportamento das brisas, que ocorrem devido ao gradiente de entropia entre o oceano e o continente, com intuito principal de analisar a brisa no seu estado estacionário.

A fixação dos pontos A e B, localizados no oceano e no continente, respectivamente, apresentou comportamento da brisa marítima de acordo com as variações sazonais esperadas. Obtendo-se trabalho de escoamento relacionado à circulação da brisa. Além disso, a variação do parâmetro gama mostrou ser um fator crucial para a melhor adequação da teoria e dos resultados das reanálises, destacando sua importância em diferentes variáveis e cenários meteorológicos. Embora o valor fixo de gama de 0,26 tenha apresentado resultados significativos, a variação mensal revelou uma maior aproximação entre os resultados teóricos e da própria reanálise, evidenciando uma relação entre o comportamento do gama e a componente do vento.

As figuras apresentadas neste trabalho, como as diferenças de pressão, eficiência do sistema, queda de pressão atmosférica e trabalho de escoamento, permite uma visualização clara das tendências ao longo do ano. Foram observadas associações entre fenômenos meteorológicos, como chuva de verão, e variações nos padrões de brisas, destacando-se os fenômenos atmosféricos e a influência de diversos fatores no seu desenvolvimento.

Identificou-se que as brisas marítimas e terrestres não ocorrem inversamente, porque as brisas marítimas circulam durante o dia e com uma maior diferença de temperatura, enquanto as brisas terrestres ocorrem durante a noite e com menor diferença de temperatura.

A diferença de temperatura mostrou-se um fator influente na ocorrência de brisa nas regiões costeiras. Portanto, os meses com maior índice de precipitação apresentaram menores valores de temperatura, consequentemente nos meses menos chuvosos ter os maiores valores de temperatura o que irá favorecer a uma maior diferença de temperatura entre a terra e o oceano, intensificando a brisa marítima.

Como foi visto o ciclo diário médio mensal da componente meridional do vento mostrou que a brisa marítima tem uma configuração mais intensa entre julho e novembro, quando há menos precipitação e a circulação de retorno é bem definida, indicando que a precipitação é um fator crucial que afeta a intensidade das brisas marítimas. Nos meses chuvosos como janeiro a abril e dezembro, a brisa mostrou-se menos intensa devido a menor diferença de temperatura entre a terra e o oceano.

Além disso, confirmou-se que a Teoria termodinâmica produz resultados superiores para circulações marítimas, especialmente quando a brisa atinge seu estado estacionário por volta das 18 UTC (15 horas). Verificou-se que em torno das 18 UTC e nos picos das circulações das brisas, houve maiores concordâncias entre a teoria e a reanálise.

Os resultados aqui apresentados mostram concordância entre os cálculos teóricos e as reanálises, validando a coerência da teoria em relação às condições reais.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, David K.; RENNO, Nilton O. Thermodynamic efficiencies of an idealized global climate model. *Climate dynamics*, v. 25, p. 801-813, 2005.
- ALCANTARA, Cláudia R. Aplicação de Teorias Termodinâmicas às Circulações de Brisa Utilizando Simulações Numéricas. Orientador: Enio Pereira de Souza. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2007.
- ALCANTARA, Cláudia Rodrigues; DE SOUZA, Enio Pereira. Identificação de brisas na costa do nordeste brasileiro em simulações do modelo RAMS. VIII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e IV Encontro Latino Americano de Pós-Graduação. Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos-SP, 2004.
- ALCANTARA, Cláudia R.; SOUZA, Enio P. Teoria para o trabalho de expansão aplicada às brisas do nordeste Brasileiro. *Revista brasileira de meteorologia*, v. 24, p. 423-435, 2009.
- BAUMBACH, Ginter; VOGT, Ulrich. Experimental determination of the effect of mountain-valley breeze circulation on air pollution in the vicinity of Freiburg. *Atmospheric Environment*, v. 33, n. 24-25, p. 4019-4027, 1999.
- COSTA, Micejane da Silva; LEVIT, Vladimir; FEDOROVA, Natalia. Padrões de circulação atmosférica no nordeste brasileiro dos eventos de ventos ciclônicos de altos níveis com correntes de jato. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 6, n. 4, p. 794-804, 2013.
- DROBINSKI, P., BASTIN, S., DABAS, A., DELVILLE, P., & REITEBUCH, O. Variability of three-dimensional sea breeze structure in southern France: Observations and evaluation of empirical scaling laws. *Annales Geophysicae*, v. 24, p. 1783-1799, 2006. (Doi: <https://doi.org/10.5194/angeo-24-1783-2006>)
- EMANUEL, William R.; SHUGART, Herman H.; STEVENSON, Mary P. Climatic change and the broad-scale distribution of terrestrial ecosystem complexes. *Climatic change*, v. 7, n. 1, p. 29-43, 1985.
- HALTNER, George J.; MARTIN, F. L. *Dynamical and physical meteorology*. McGraw-Hill, p. 470, 1957.
- FREIRE, Maria Eduarda A. Estudo Sinótico de Brisas na Costa do Nordeste Brasileiro. Orientador: Enio Pereira de Souza. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2024.
- HERSBACH, H., BELL, B., BERRISFORD, P., BIAVATI, G., HORNYI, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thompson, J.N. (2023): ERA5 hourly data at single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), DOI: [10.24381/cds.adbb2d47](https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47) Acesso em: 15 mar. 2024)

JIA, D., Xin, J., Wang, Z., Wang, W., Wang, X., Xiao, H. & Wang, L. The dynamic, thermal and material structures of sea-land breeze circulation at the coastal of Ningbo, East China Sea. *Atmospheric Research*, v. 283, p. 106540, 2023.

KIRSHBAUM, Daniel J. et al. Moist orographic convection: Physical mechanisms and links to surface-exchange processes. *Atmosphere*, v. 9, n. 3, p. 80, 2018.

MELO, Ewerton et al. Efeito da interação da convecção atmosférica com o desenvolvimento de brisas no estado da Paraíba. *Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia*, v. 8, n. 2, 2011.

MILLER, S. T. K., KEIM, B. D., TALBOT, R. W.; MAO, H. Sea breeze: Structure, forecasting, and impacts. *Reviews of geophysics*, v. 41, n. 3, 2003.

MUÑOZ-SABATER, Joaquín et al. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth system science data*, v. 13, n. 9, p. 4349-4383, 2021.

OLIVEIRA, Mário José de. *Termodinâmica*. Editora Livraria da Física, 2005.

PLANCHON, Olivier et al. A method of identifying and locating sea-breeze fronts in north-eastern Brazil by remote sensing. *Meteorological Applications*, v. 13, n. 3, p. 225-234, 2006.

REBOITA, Michelle Simoes et al. Evidências de Circulação de Brisa Vale-Montanha na Serra da Mantiqueira: Cidade de Itajubá/MG. *Ciência e Natura*, v. 36, n. 1, p. 61-71, 2014.

RENNÓ, Nilton O.; INGERSOLL, Andrew P. Natural convection as a heat engine: A theory for CAPE. *Journal of atmospheric sciences*, v. 53, n. 4, p. 572-585, 1996.

RENNO, Nilton O. A thermodynamically general theory for convective vortices. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, v. 60, n. 4, p. 688-699, 2008.

ROTUNNO, Richard. A synopsis of coastal meteorology: a review of the state of the science. *Environmental Science in the Coastal Zone: Issues for Further Research*, p. 14, 1994. Disponível em: <https://nap.nationalacademies.org/read/2249/chapter/3> Acesso em: 3 de junho de 2024

ROTUNNO, Richard. *Coastal Meteorology: A review of the State of the Science*. 1992.

SALVADOR, Nadir et al. Study of the thermal internal boundary layer in sea breeze conditions using different parameterizations: application of the WRF model in the greater Vitória region. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, p. 593-609, 2016.

SOUZA, Diego Oliveira de. SARAIVA, Jaci M. Bilhalva. LOPES, Jorge Luís Machado. Influência das Circulações do tipo Brisa na Formação de Tempestade Severa em Macapá. *Atmospheric Circulations in The Amazonas River Mouth*. 8 ICHMO Proceedings. Foz do Iguaçu p. 1417-1425, 2006.

SANTOS, Alane Saldanha dos; Aplica^{ção} da teoria da máquina térmica às brisas marítima/terrestre e de vale/montanha sobre terreno Inclinado e plano. Orientadores: Cláudia Rodrigues Alc^{antara} e Enio Pereira de Souza. Disserta^{ção} (Mestrado em meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

SATYAMURTY, Prakki. Rudimentos de Meteorologia Din^{âmica}. 2.ed. São José dos Campos: INPE (Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais), 2005, p. 119.

SOUZA, Enio Pereira. Estudo teórico e num^{érico} da rela^{ção} entre convec^{ção} e superf^{ícies} heterog^{êneas} na Regi^{ão} Amaz^{ônia}. 1999. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

SOUZA, Enio P.; RENN^o, Nilton O.; SILVA DIAS, Maria AF. Convective circulations induced by surface heterogeneities. Journal of the atmospheric sciences, v. 57, n. 17, p. 2915-2922, 2000.

SIMPSON, John E. Sea breeze and local winds. Cambridge University Press, 1994.

SILVA DIAS, Maria Assun^{ção} Faus da et al. River breeze circulation in eastern Amazonia: observations and modelling results. Theoretical and applied climatology, v. 78, p. 111-121, 2004.

TEIXEIRA, Raul Fritz Bechtel. O fenômeno da brisa e sua rela^{ção} com a chuva sobre Fortaleza-CE. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 23, p. 282-291, 2008.

WOOLARD, Edgar W. Recent investigations on the energy in the Earth's atmosphere, its transformation and dissipation. Monthly Weather Review, v. 54, n. 6, p. 254-255, 1926.