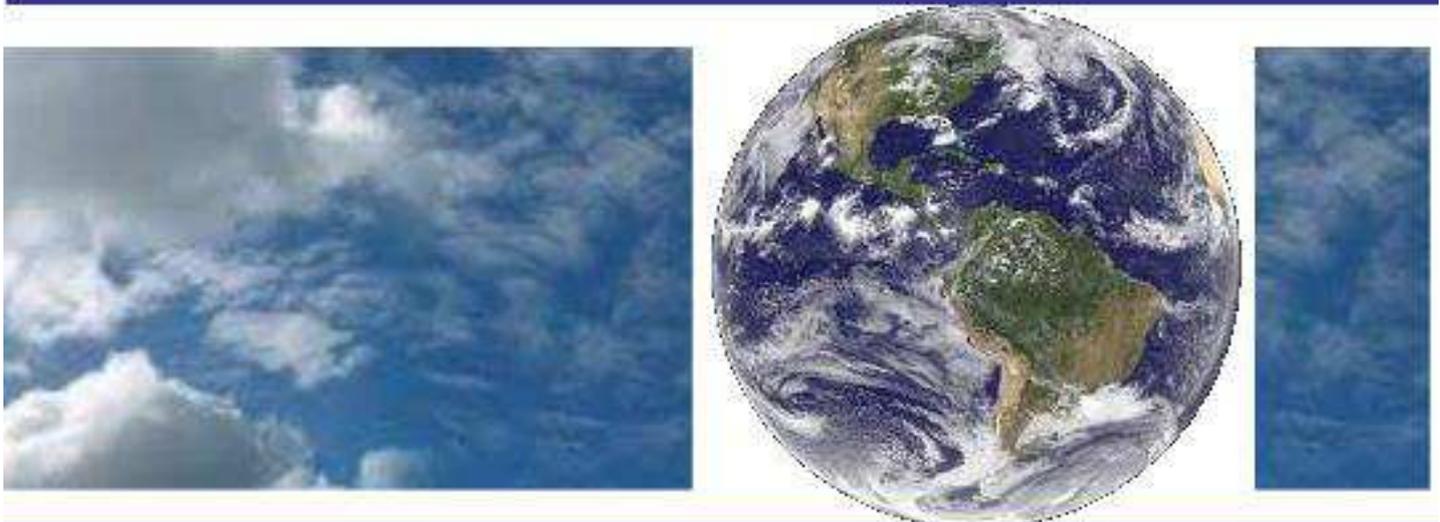


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**

# **METEOROLOGIA**



**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Maria Eduarda Almeida Freire**

**Estudo Sinótico de Brisas na Costa do Nordeste  
Brasileiro**

**Campina Grande, fevereiro 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**

**ESTUDO SINÓTICO DE BRISAS NA COSTA DO NORDESTE BRASILEIRO**

**MARIA EDUARDA ALMEIDA FREIRE**

**MARIA EDUARDA ALMEIDA FREIRE**

**ESTUDO SINÓTICO DE BRISAS NA COSTA DO NORDESTE BRASILEIRO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), como requisito final à obtenção do Título de Mestre em Meteorologia.

Orientador: Prof. Dr. Enio Pereira de Souza

Área de Concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escalas

Sub-área: Sinótica

Campina Grande – PB  
2024

F866e

Freire, Maria Eduarda Almeida.

Estudo sinótico de brisas na Costa do Nordeste brasileiro / Maria Eduarda Almeida Freire. – Campina Grande, 2024.

67 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. Meteorologia de Meso e Grande Escalas. 2. Brisa Marítima/Terrestre. 3. Vetor Vorticidade. 4. Análise Sinótica. 5. ERA5.

I. Souza, Enio Pereira de. II. Título.

CDU 551.515.6(043)

MARIA EDUARDA ALMEIDA FREIRE

ESTUDO SINÓTICO DE BRISAS NA COSTA DO NORDESTE BRASILEIRO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 28/02/2024

BANCA EXAMINADORA



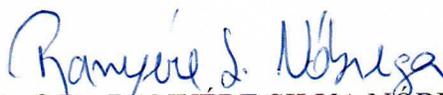
Prof. Dr. EMIO PEREIRA DE SOUZA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. JOSÉ IVALDO BARBOSA DE BRITO  
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

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho à minha família.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sua graça e orientação constante ao longo desta jornada. Sua força e sabedoria me sustentaram em todos os desafios que enfrentei durante a pesquisa e a escrita desta dissertação.

Agradeço aos meus pais, Erivaneide Almeida e Joares Estevão, pela assistência proporcionada para que eu prosseguisse com meus estudos e superasse os desafios enfrentados ao longo deste período de mestrado, ao meu irmão, Pedro Neto, por sua presença constante e apoio incondicional. Quero expressar minha gratidão ao meu avô, José Freire, de 98 anos, por ser meu grande apoiador nos estudos e um exemplo inspirador em minha vida.

Quero expressar meus sinceros agradecimentos ao Prof. Dr. Enio Pereira de Souza, meu orientador, por seus inestimáveis conselhos, orientação em todas as etapas, amizade e apoio fundamental durante a realização deste trabalho.

Agradeço à Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), e ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia (PPGMET) pela oportunidade excepcional de realizar meu mestrado.

Agradeço aos professores do PPGMET por compartilharem seus conhecimentos de maneira concisa, contribuindo significativamente para o meu aprendizado. Além disso, expressei meu agradecimento à secretaria, representada por Arilene, pelos serviços e assistência prestados ao longo desses dois anos.

Agradeço à CAPES pelo suporte financeiro concedido.

Agradeço aos meus amigos e colegas de sala no mestrado que me acompanharam ao longo desta trajetória: Francielho, Fagner, Matheus, Bárbara, Geisse e Mônica. Agradeço ao meu colega que está no doutorado no PPGMET, em especial ao Pedro, pelo precioso apoio oferecido ao longo desta jornada acadêmica.

Agradeço ao meu filho de quatro patas, meu gato, Rubinho, por passar inúmeras noites ao meu lado durante meus estudos.

Agradeço aos meus amigos que fiz durante minha graduação, por seu constante apoio e pela presença contínua em minha vida até o presente momento. Obrigada, Otavio, Victoria, Larissa, Carol e Aldair.

Agradeço profundamente aos meus amigos Acson e Eduarda, que se destacaram de maneira excepcional durante este período. Eles foram meus confidentes e suportaram-me nos momentos de estresse.

Agradeço a todos que, de alguma maneira, contribuíram para a minha formação.

*Porque a sabedoria é melhor do que jóias, e de tudo o que se deseja, nada se pode comparar com ela." - Provérbios 8:11*

**RESUMO**

Neste estudo, foram empregados dados de reanálise do ERA5, para examinar os padrões de brisa marítima/terrestre ao longo da costa do NEB (Nordeste Brasileiro). O objetivo foi avaliar a intensidade dessas circulações em diferentes segmentos da região costeira do NEB ao longo do ano de 2018. As análises foram conduzidas utilizando os componentes zonal e meridional do vetor vorticidade horizontal. Os resultados indicaram que na costa norte do NEB a brisa foi mais intensa quando comparada à costa leste, onde a brisa foi praticamente ausente. Além disso, observou-se que o vetor vorticidade apontou altas intensidades nos níveis de 900-925 hPa por volta das 19:00 UTC. Vale ressaltar que a intensidade variou conforme a localidade, apresentando diferentes valores de acordo com a região.

**Palavras-chave:** ERA5, Brisa marítima/terrestre, vetor vorticidade.

## **ABSTRACT**

In this study, ERA5 reanalysis data was used to examine sea/land breeze patterns along the NEB (Brazilian Northeast) coast. The objective was to evaluate the intensity of these circulations in different segments of the NEB coastal region throughout 2018. The analyzes were conducted using the zonal and meridional components of the horizontal vorticity vector. The results indicated that on the north coast of NEB the breeze was more intense when compared to the east coast, where the breeze was practically absent. Furthermore, it was observed that the vorticity vector showed high intensities at levels of 900-925 hPa around 19:00 UTC. It is worth mentioning that the intensity varied depending on the location, presenting different values according to the region.

**Key words:** ERA5, Sea/land breeze, vorticity vector.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Mapa da localização da região Nordeste.....	21
<b>Figura 2:</b> Representação do vetor vorticidade indicando que há energia no sentido anti-horário na direção para a qual ele aponta.....	23
<b>Figura 3:</b> Topografia da região Nordeste, com destaque para os pontos P1, P2, P3 e P4, que serão objeto de análise.....	25
<b>Figura 4:</b> Ciclo diário médio mensal do vetor vorticidade ( $10^{-3}s^{-1}$ ), ao longo do ano de 2018, para o ponto P1.....	26
<b>Figura 5:</b> Ciclo diário médio mensal do vetor vorticidade ( $10^{-3}s^{-1}$ ), ao longo do ano de 2018, para o ponto P2.....	27
<b>Figura 6:</b> Ciclo diário médio mensal do vetor vorticidade ( $10^{-3}s^{-1}$ ), ao longo do ano de 2018, para o ponto P3.....	27
<b>Figura 7:</b> Ciclo diário médio mensal do vetor vorticidade ( $10^{-3}s^{-1}$ ), ao longo do ano de 2018, para o ponto P4.....	28
<b>Figura 8:</b> Representação do NEB no horário de 19:00 UTC (equivalente a 16 horas no horário local), para o vetor vorticidade ( $10^{-3}s^{-1}$ ) no nível de pressão de 925 hPa.....	31
<b>Figura 9:</b> Semelhante à figura anterior, porém referente ao nível de pressão de 900 hPa (em $10^{-3}s^{-1}$ ).....	33
<b>Figura 10:</b> Diagrama Hovmöller da componente zonal do vetor vorticidade, entre 2 e 4 °S, no nível de 925 hPa, na longitude de 41°W (em $10^{-3}s^{-1}$ ).....	34
<b>Figura 11:</b> Representação de perfil para a média diária do ponto P1 no mês de outubro, onde: (A) nos dias 1 a 11, (B) dos dias 11 a 21 e (C) dos dias 21 a 1.....	35
<b>Figura 12:</b> Valores máximos de vorticidade às (15 UTC, linha preta); (17 UTC, linha vermelha); (19 UTC, linha verde) e (21 UTC, linha azul). (em $10^{-3}s^{-1}$ ).....	36
<b>Figura 13:</b> Diagrama Hovmöller da componente zonal do vetor vorticidade, entre 4 e 6 °S, no nível de 925 hPa, na longitude de 36,5°W, (para o ponto P3), costa do Rio Grande do Norte. ...	36
<b>Figura 14:</b> Semelhante à Figura 11, porém referente ao ponto P3 no estado do Rio Grande do Norte.....	37
<b>Figura 15:</b> Semelhante à Figura 12, porém com longitude de 36,5° W e referente ao estado do Rio Grande do Norte.....	38
<b>Figura 16:</b> Média mensal para o mês de janeiro, às 19Z (16h), nos níveis de 975, 950, 900, 875, 850, 825 e 800.....	42
<b>Figura 17:</b> Média mensal para o mês de Fevereiro, às 19Z (16h), nos níveis de 975, 950, 900, 875, 850, 825 e 800.....	44
<b>Figura 18:</b> Média mensal para o mês de Março, às 19Z (16h), nos níveis de 975, 950, 900, 875, 850, 825 e 800.....	46

<b>Figura 19:</b> Média mensal para o mês de Abril, às 19Z (16h), nos níveis de 975, 950, 900, 875, 850, 825 e 800.....	48
<b>Figura 20:</b> Média mensal para o mês de Maio, às 19Z (16h), nos níveis de 975, 950, 900, 875, 850, 825 e 800.....	50
<b>Figura 21:</b> Média mensal para o mês de Junho, às 19Z (16h), nos níveis de 975, 950, 900, 875, 850, 825 e 800.....	52
<b>Figura 22:</b> Média mensal para o mês de Julho, às 19Z (16h), nos níveis de 975, 950, 900, 875, 850, 825 e 800.....	54
<b>Figura 23:</b> Média mensal para o mês de Agosto, às 19Z (16h), nos níveis de 975, 950, 900, 875, 850, 825 e 800.....	56
<b>Figura 24:</b> Média mensal para o mês de Setembro, às 19Z (16h), nos níveis de 975, 950, 900, 875, 850, 825 e 800.....	58
<b>Figura 25:</b> Média mensal para o mês de Outubro, às 19Z (16h), nos níveis de 975, 950, 900, 875, 850, 825 e 800.....	60
<b>Figura 26:</b> Média mensal para o mês de Novembro, às 19Z (16h), nos níveis de 975, 950, 900, 875, 850, 825 e 800.....	62
<b>Figura 27:</b> Média mensal para o mês de Dezembro, às 19Z (16h), nos níveis de 975, 950, 900, 875, 850, 825 e 800.....	64

**LISTA DE SÍMBOLO**

$v$  - Componente meridional

$u$  - Componente zonal

$w$  - Componente vertical

$\vec{w}$  - Vetor vorticidade

$\eta$  - Componente zonal da vorticidade

$\vartheta$  - Componente meridional da vorticidade

$\zeta$  - Componente vertical da vorticidade

**LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

ASAS	Alta do Subtropical Atlântico Sul
CLA	Centro Espacial de Alcântara
CMORPH	CPC Morphing Technique
ECMWF	Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo
GOES-R	Geostationary Operational Environmental Satellite
HL	Horário Local
LSBC	Land-Sea Breeze Clocal
MERRA	Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications
MSG	Meteosat Second Generation
NEB	Nordeste Brasileiro
NEXRAD	Next-Generation Radar
NMRS	North and the Middle Red Sea
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
RAMS	Regional Atmospheric Modeling System
RSCZ	Red Sea Convergence Zone
SRS	Southern Red Sea
TSM	Temperatura Superfície do Mar
UTC	Coordinated Universal Time
WRF	Weather Research and Forecasting
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

**SUMÁRIO**

<b>RESUMO .....</b>	<b>8</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>8</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLO .....</b>	<b>10</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS .....</b>	<b>11</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1. Objetivo Geral.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2. Objetivos Específicos .....</b>	<b>15</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
<b>3.1. Brisa marítima e terrestre .....</b>	<b>16</b>
<b>3.2. Estudos sobre Brisa .....</b>	<b>17</b>
<b>3.3. Brisa na costa do NEB.....</b>	<b>18</b>
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>21</b>
<b>4.1 Região de Estudo .....</b>	<b>21</b>
<b>4.2. Dados Utilizados .....</b>	<b>21</b>
<b>4.2.1 Reanálise do ERA5.....</b>	<b>21</b>
<b>4.2.2 Vorticidade.....</b>	<b>22</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>25</b>
<b>5.1. Ciclo Anual.....</b>	<b>25</b>
<b>5.2. Médias Mensais.....</b>	<b>29</b>
<b>6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>41</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>42</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>44</b>

## 1. INTRODUÇÃO

As brisas marítimas e terrestres são correntes de vento comuns em áreas costeiras. Durante o dia, a brisa marítima, próximo da superfície, sobre o oceano em direção à terra devido ao aquecimento mais gradual da água. À noite, a brisa terrestre, próximo da superfície da terra para o oceano, impulsionada pelo resfriamento mais rápido do solo. Portanto, brisas, é um fenômeno de circulação local, ocorrendo em diversas regiões costeiras. Para Wexler (1946), a brisa terrestre e marítima pode ser definida de acordo com o vento local, estimulados pela temperatura entre a terra e o mar.

De acordo com Wagner et al. (2012), a brisa terrestre costuma iniciar à meia-noite e perdura até depois do amanhecer, resultando em um intervalo de 5 a 6 horas no qual massas de ar urbanas são transportadas sobre a água durante a noite. Nesse período, as reações químicas noturnas podem ter um impacto considerável na análise do efeito global da brisa terrestre na qualidade do ar na região. Portanto, conforme mencionado por Park e Chae (2018), as circulações locais, como as brisas marítimas e terrestres, são geradas pelas discrepâncias de temperatura entre diferentes tipos de cobertura terrestre. Esses fenômenos desempenham um papel significativo na configuração do clima local e na influência na qualidade do ar de várias maneiras.

Estudos sobre as brisas marítimas e terrestres foram conduzidos em diversas partes do mundo. Khan et al. (2018) investigaram as brisas marítimas ao longo da costa do Mar Vermelho na Arábia Saudita, analisando dados de cinco estações costeiras. Os dados foram obtidos por meio do modelo MERRA (*Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications*) e informações TSM (Temperatura Superfície do Mar) da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Os resultados revelaram a existência de diferentes sistemas de brisas marítimas ao longo de segmentos distintos da costa do Mar Vermelho, que foram classificados em três regiões com base em suas características físicas e influências sinóticas: NMRS (*North and the Middle Red Sea*), RSCZ (*Red Sea Convergence Zone*) e SRS (*Southern Red Sea*).

Vários estudos na literatura meteorológica destacaram a identificação de brisas marítimas e terrestres no NEB. No entanto, esses estudos frequentemente se concentraram em localidades específicas, resultando em abordagens isoladas que não possibilitaram uma compreensão sinótica abrangente desse fenômeno.

Neste contexto, é importante estudar os padrões das brisas ao longo da costa do NEB,

utilizando uma ferramenta que permita proporcionar uma visão sinótica das brisas em diversos estados do Nordeste Brasileiro, de modo que essas características possam ser comparadas em uma única representação visual.

Os dados ERA5, cuja resolução horizontal era de 0,25 grau e resolução temporal era de 1 hora, permitiram que se pudesse computar o vetor vorticidade horizontal, de modo a se poder comparar diferentes regiões ao mesmo tempo.

No Capítulo 2, detalham-se os objetivos gerais e específicos deste estudo, enquanto no Capítulo 3 faz-se uma revisão bibliográfica sobre o tema. A metodologia aplicada para a reanálise dos dados e a identificação dos eventos de brisas é descrita no Capítulo 4. Por fim, apresentam-se os resultados desta pesquisa no Capítulo 5.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Analisar a brisa marítima/terrestre ao longo da costa norte do Nordeste Brasileiro, buscando uma visão sinótica que permita avaliar, simultaneamente, a intensidade dessas circulações em diferentes partes da costa.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Gerar campos do vetor vorticidade horizontal, cujas magnitudes serão usadas como indicadores da intensidade da circulação;
- Investigar em qual nível da baixa troposfera a vorticidade associada à brisa marítima apresenta um máximo;
- Gerar o ciclo anual médio do vetor vorticidade horizontal para investigar a variação da brisa ao longo de um ano;
- Estudar o ciclo diário do vetor vorticidade horizontal para investigar a variação da brisa ao longo de um mês.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. Brisa marítima e terrestre**

Em áreas tropicais, as brisas assumem uma função de destaque, uma vez que suavizam as temperaturas elevadas durante o dia, transportam umidade para o interior do continente e exercem influência sobre a precipitação e o clima das regiões afetadas (CAVALCANTI, 1982). A força da brisa é alterada devido a elementos locais e ao fluxo médio de grande amplitude. Dentre os elementos locais que impactam a intensidade da brisa, estão a topografia e a natureza da cobertura desde o litoral até o interior do continente (CAVALCANTE, 2016).

De acordo com Miller et al. (2003), a brisa marítima é um específico vento que ocorre em locais costeiros devido à variação de temperatura, isto é, o gradiente de pressão apontado para terra. Durante o dia o ar frio do mar se desloca para a terra, onde é chamado de corrente de gravidade, decorrente de fluxos de baixos níveis.

A frente de brisas marítimas é caracterizada de acordo com as observações de determinadas variantes, são elas: aumento da velocidade do vento, queda da temperatura, aumento da umidade, aumento do ponto de orvalho ou temperatura potencial equivalente (ALPERT; HADAR, 2003). Essas variantes sofrem mudanças de acordo com o local e estação que se encontra a brisa marítima.

Conforme Wexler (1946), duas categorias distintas de brisa marítima podem ser identificadas: a brisa marítima gradual que ocorre em dias calmos ou com ventos suaves e a brisa marítima frontal que se manifesta em dias com ventos provenientes do continente. Cada uma dessas categorias possui propriedades notavelmente distintas.

A compreensão das brisas terrestres é menos desenvolvida em comparação com as brisas marítimas, embora haja muitos estudos sobre chuvas influenciadas pelas brisas marítimas, lacustres e de montanhas. No entanto, as pesquisas sobre as influências das brisas terrestres nas chuvas em áreas continentais são menos comuns, principalmente devido à expectativa de que as brisas terrestres promovam precipitações sobre o oceano, não sobre o continente (TEXEIRA 2008).

À noite, a brisa terrestre age em oposição ao fluxo médio, levando a uma diminuição na intensidade do vento e/ou a uma mudança em sua direção. Como resultado, o vento se torna mais forte durante o dia e menos intenso durante a noite (BARRETO, 2001).

### 3.2. Estudos sobre Brisa

O trabalho de Chen et al. (2016) teve o objetivo examinar os ciclos diurnos da brisa terrestre e marítima, na região costeira do sul da China durante os meses de maio a junho para os anos de 2007 a 2009. Utilizando simulações de alta resolução do modelo WRF (*Weather Research and Forecasting*), foi destacado especialmente o papel das montanhas costeiras e das forças dinâmicas e termodinâmicas nos padrões diurnos de brisa terrestre e marítima, bem como nas chuvas associadas. A simulação realizada com o WRF foi validada com sucesso em comparação com as médias de observações de radar terrestre, dados de superfície e informações do CMORPH (*CPC Morphing Technique*) ao longo de um período de três anos. Além disso, a simulação conseguiu reproduzir de forma realista a variação diurna e a propagação das chuvas associadas às brisas terrestres e marítimas na região costeira do sul da China.

Bao et al. (2023) analisaram as características temporais e geográficas da brisa marítima na região sudeste dos Estados Unidos ao longo do ano de 2019. Para alcançar esse objetivo, foi elaborado um método que consistiu no mapeamento das áreas costeiras do sudeste, utilizando três conjuntos de dados para análise: ERA5-Land, satélite GOES-R (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) e NEXRAD (*Next-Generation Radar*). Os resultados deste estudo revelaram a ocorrência de um total de 134 dias com a presença da brisa marítima, correspondendo a uma frequência de 63% nos meses de março e setembro de 2019. Entretanto houve uma exceção do mês de junho, que registrou uma quantidade menor de ocorrências de brisa marítima em comparação com os meses de maio e julho. Além disso, notou-se que os ventos terrestres eram mais intensos em uma faixa próxima à costa.

O estudo de Gao et al. (2004) examina dados de simulação de resolução de nuvens 2-D associados à convecção tropical 2-D. Entretanto, constatou-se que apenas a vortacidade potencial seca/úmida, extremamente útil para análise meteorológica, não é aplicável a essas simulações bidimensionais 2-D. Assim, a utilização do vetor vortacidade convectivo revelou-se de grande importância. Os resultados indicam que ao utilizar a componente vertical do vetor vortacidade convectivo, é possível destacar o parâmetro associado às nuvens e investigar a convecção tropical ao utilizar a componente vertical do vetor vortacidade convectivo.

No estudo realizado por Cui (2008), foram calculados os coeficientes de correlação de atraso para analisar a relação de fase entre vetores de vortacidade e a taxa de precipitação

superficial na convecção tropical. Para isso, foram empregadas simulações de resolução de nuvens integradas em massa, com média zonal. Os parâmetros considerados incluíram a velocidade vertical, o vento zonal, as advecções horizontais térmicas e de umidade, além da temperatura da superfície do mar, ao longo de um período de 10 dias.

O trabalho conduzido por Davis et al. (2019) apresenta uma análise da dinâmica e dos impactos regionais do LSBC (*Land-Sea Breeze Clocal*) na costa da Arábia, sobre o Mar Vermelho, durante o período de 2008 a 2011. Esse estudo empregou simulações de redução de escala climática do modelo WRF, juntamente com medições de satélite. O conjunto de dados resultante proporciona uma nova perspectiva sobre a variabilidade sazonal e diária das condições atmosféricas na região. Uma característica de destaque observada nesse estudo é a presença do LSBC do Mar Vermelho, que se destaca como um dos LSBCs mais intensos globalmente. Sua influência é mensurável no clima regional, afetando a velocidade do vento em baixas altitudes, a temperatura, a umidade e os padrões de precipitação ao longo das quatro estações do ano.

Segundo Kilroy et al. (2013), o estudo empreendido teve como objetivo investigar aspectos das depressões tropicais, abordando os efeitos da estrutura do vento na camada limite sobre a configuração da tempestade. Especial atenção foi dada à geração de vorticidade vertical e à divisão da corrente ascendente, considerando também os impactos combinados do cisalhamento horizontal e vertical. Dessa forma, compreendendo esses fenômenos, é possível inferir a fusão de anomalias de vorticidade induzidas por convecção durante a evolução do vórtice. A amplificação do giro ciclônico do dipolo é favorecida pelo ambiente de cisalhamento horizontal ciclônico ou vorticidade vertical ciclônica.

### **3.3. Brisa na costa do NEB**

A região Nordeste do Brasil detém a maior extensão de litoral do país, o que resulta em uma pluralidade de estudos sobre esse tema. Inicialmente, serão exploradas as pesquisas realizadas em locais ou segmentos específicos, todas elas relacionadas à análise das brisas. Vale salientar, que as características das brisas são influenciadas pela região onde se manifestam. A altura alcançada pelas brisas varia de acordo com o clima e as condições locais (CAVALCANTI, 1982).

Um trabalho que merece destaque é o realizado por Kousky (1979), no qual ele investiga as influências frontais na região Nordeste do Brasil. O referido estudo, ao abordar o período de 1961 a 1970 (10 anos), baseou-se em uma coleção de observações de superfície

coletadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil. Ressalta-se que essas observações foram devidamente processadas e armazenadas em meio magnético sob a supervisão do corpo técnico do Instituto de Pesquisas Espaciais. Os resultados da pesquisa revelam as seguintes informações: a porção meridional da região, localizada no interior da Bahia, registra uma significativa concentração de precipitações durante o período compreendido entre novembro e fevereiro, sendo essas precipitações associadas à influência de sistemas frontais. Por outro lado, as áreas costeiras, que experimentam seu pico de precipitação nos meses de maio a julho, testemunham um expressivo aumento nas chuvas correlacionado à aproximação e passagem de frentes frias. Além disso, mesmo eventos de precipitação no extremo norte da região, especialmente no Ceará, ocasionalmente parecem estar vinculados a sistemas de origem frontal fria.

Conforme Marques; Fisch (2005), o CLA (Centro Espacial de Alcântara) está localizado no litoral norte do Estado do Maranhão. O CLA desempenha a função de destruição de informações meteorológicas e é composto por uma estação de superfície, uma torre anemométrica e um dispositivo para detecção de campo elétrico. Conforme Magnago et al. (2010), o comportamento dos ventos para esta região, revela diferenças significativas entre a época chuvosa e seca. No período chuvoso, os ventos se mostram mais brandos, em grande medida devido à predominância dos ventos alísios. Durante a estação seca, acontece uma superposição desse vento. Isto é, devido ao aumento da intensidade da brisa marítima, que atinge seu pico de influência (contraste térmico entre o oceano e o continente) durante esse período, especialmente nos meses de setembro a novembro. A temperatura do ar e a umidade relativa não apresentam flutuações sazonais, mantendo valores característicos da atmosfera tropical.

O trabalho de Teixeira (2008) mostrou que a brisa terrestre no Estado do Ceará é visível por imagens de satélite NOAA e MSG (*Meteosat Second Generation*), onde aparece um grande arco se movendo em direção ao oceano. Ocorre uma influência da geometria costeira côncava de Fortaleza ao norte do Rio Grande do Norte, sua interação com os ventos sinóticos locais (os ventos alísios do Sudeste). Já as brisas marítimas, em seus estudos, proporcionam a ocorrência de precipitações mais intensas no interior da região litorânea do Ceará.

Planchon et al. (2006) utilizaram o método de identificação de frentes de brisa marítima através de sensoriamento remoto (usando dados visíveis e infravermelhos do satélite GOES-8). Especificamente, a pesquisa foi conduzida durante a estação seca, entre os meses de setembro e dezembro do ano de 2000, observando a distância média que essas

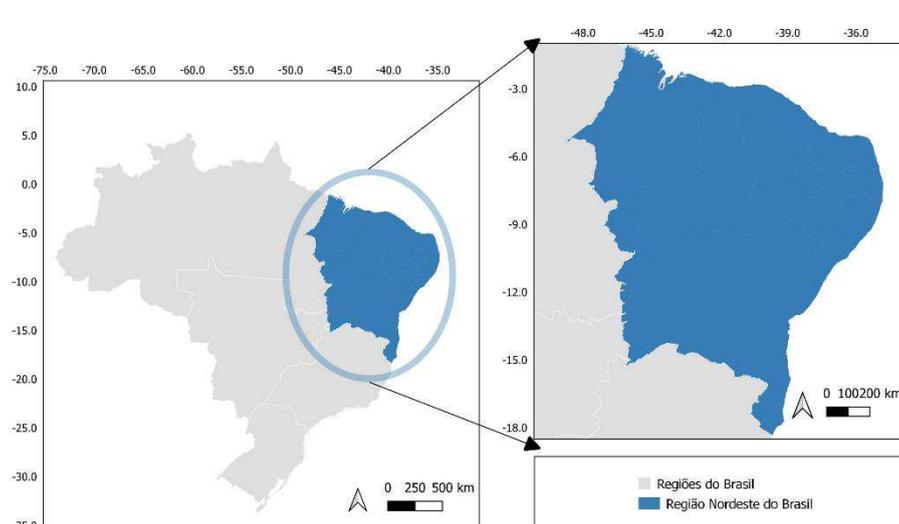
frentes penetravam no interior às 18:00 UTC (*Coordinated Universal Time*). Nesse período, as frentes de brisa marítima alcançaram sua maior incidência registrada, conseguindo adentrar significativamente o interior. Um destaque foi a ocorrência no estado do Ceará, onde essas frentes chegaram a atingir uma distância máxima de 100 km da costa.

A região da Paraíba é afetada pelos ventos alísios vindos do Sudeste. A Serra da Borborema, posicionada transversalmente à direção dos alísios, desempenha um papel crucial na alteração dos padrões de vento tanto sobre a serra quanto nas outras sub-regiões circundantes (MELO, 2000). O trabalho de Melo et al. (2011) apresenta a utilização do modelo RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*) para simular a circulação das brisas marítimas na Paraíba. Com o propósito de realizar quatro simulações para avaliar a relevância da convecção e da interação não-linear com a topografia nas brisas na Paraíba. Os resultados numéricos mostram que a brisa marítima atinge sua velocidade máxima de 2,5 m/s entre 17 e 18 HL (Horário Local). O extremo ocidental do deslocamento da brisa é registrado aproximadamente às 24 HL. A presença da convecção pode ter um papel variável na contribuição para a formação da brisa marítima. Notavelmente, a interação não-linear entre a topografia e a convecção mantém as características essenciais de ambos os fenômenos, incluindo a organização longitudinal das áreas de convergência/divergência e divergência em altitudes elevadas.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Região de Estudo

A área de estudo compreendeu a costa do NEB, que inclui nove estados: Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia (Figura 1), cobrindo uma extensão territorial de 1.558.000 km<sup>2</sup>. A população estimada dessa região é de aproximadamente 1.558.000 habitantes (IBGE, 2022).



**Figura 1:** Mapa da localização da região Nordeste

Na América do Sul, os padrões de precipitação são categorizados em sete regimes distintos, e de acordo com Reboita et al. (2010), o litoral do NEB segue o regime climático 6 (R6), que se caracteriza por picos de precipitação durante o primeiro semestre do ano, totalizando cerca de 1500 mm/ano. Essa dinâmica é influenciada pela migração da ZCIT (Zona de Convergência Intertropical) para o hemisfério sul. Durante o ano a posição ZCIT varia, durante março e abril está localizada mais ao sul (em torno de 10°N - 14°N) e esta variação sazonal é de extrema importância para a estação chuvosa do NEB (ESCOBAR; MATOSO, 2020).

### 4.2. Dados Utilizados

#### 4.2.1 Reanálise do ERA5

O ERA5 representa a quinta geração do ECMWF (Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo). O ECMWF viabiliza a geração de interferências numéricas e acompanhamento de sistemas globais que afetam o clima, permitindo a emissão de alertas

para condições ambientais catastróficas. Além disso, oferece a oportunidade de conduzir pesquisas científicas com o propósito de aprimorar a precisões (FRANÇA, 2023).

Primeiramente, é relevante mencionar que o ERA-Interim abrange o período a partir de 1 de janeiro de 1989. Além disso, encontra-se em processo de extensão para incluir o período de 1979 a 1989. Esse conjunto de dados em grade compreende uma ampla gama de parâmetros de superfície, com intervalos de 3 horas, que descrevem aspectos climáticos, bem como as condições das ondas oceânicas e da superfície terrestre. Além disso, os parâmetros de ar superior, abrangendo a troposfera e a estratosfera, são monitorados a cada 6 horas. O ERA-Interim foi desenvolvido, em parte, com a finalidade de preparar uma nova reanálise atmosférica para substituir o ERA-40, com perspectiva de extensão até o início do século XX (DEE et al., 2011).

A reanálise mais recente, conhecida como ERA5, substituiu o lugar do ERA-Interim. Como resultado, o ERA5 aproveita dez anos de desenvolvimento em modelos físicos, numéricos e assimilação de dados. Os registros foram coletados desde 1950 até o presente, com um minucioso detalhamento que abrange a atmosfera global, a superfície terrestre e as ondas oceânicas. Apresentando diversas características inovadoras, como a produção de dados a cada hora. Esse avanço destaca-se pela sua notável melhoria em termos de qualidade e detalhamento (HERSBACH et al., 2020).

Com o intuito de analisar a região do NEB com maior detalhamento, foram utilizadas para este trabalho, uma categorias de dados. Dados de nível de altitude do ERA5-Land, as variáveis utilizadas foram: componentes do vento, geopotencial, temperatura, velocidade vertical e umidade específica.

No ERA-Interim, a resolução horizontal era de 80 km no equador ( $0,75^\circ$ ), enquanto que no ERA5 a resolução é de 31 km no equador ( $0,25^\circ$ ). Entretanto, o ERA5-Land supera suas versões anteriores ao promover um aumento substancial em sua resolução horizontal, abrangendo globalmente 9 km (SABATER et al., 2021).

O intervalo de tempo abordado compreendeu o ano de 2018, durante o qual os dados de superfície e altitude foram validados, visando a análise da brisa marítima e terrestre ao longo desse período anual.

#### 4.2.2 Vorticidade

A vorticidade é a medida da rotação presente no vetor de movimento de um fluido, indicando a propensão desse fluido a girar em um ponto específico (SATYAMURTY, 2004).

Dado o vetor velocidade, na forma:

$$\mathbf{V} = u\mathbf{i} + v\mathbf{j} + w\mathbf{k} \quad (01)$$

em que,  $u$  é o componente zonal,  $v$  é o componente meridional e  $w$  é o componente vertical. Os dados originais de velocidade vertical estão disponíveis em termos da velocidade vertical isobárica  $\omega$ . Neste trabalho, os dados foram convertidos para velocidade vertical cartesiana  $w$ , usando a relação.

$$\omega = -\rho g w \quad (02)$$

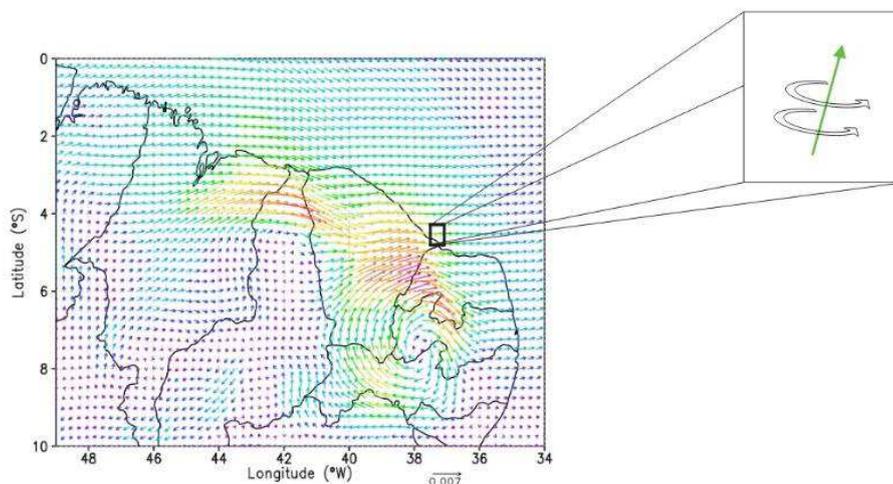
O vetor vorticidade pode ser obtido através do rotacional do vetor velocidade, na forma:

$$\vec{\Omega} = \nabla \times \mathbf{V} \quad (03)$$

Com isso o vetor  $\vec{\Omega}$  fica:

$$\vec{\Omega} = \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}, \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) = (\eta, \vartheta, \zeta) \quad (04)$$

$\zeta$  é o componente vertical da vorticidade, desempenhando um papel, fundamental em fenômenos meteorológicos de grande escala sinótica, como os exemplos de vorticidade ciclônica e anticiclônica. Os componentes  $\eta$  e  $\vartheta$  representam os eixos horizontais, e são esses que serão utilizados para identificar os padrões de brisas. Se o vetor vorticidade tem o continente à sua esquerda, tem-se a brisa marítima, se tem o continente à sua direita ocorre a brisa terrestre (Figura 2).



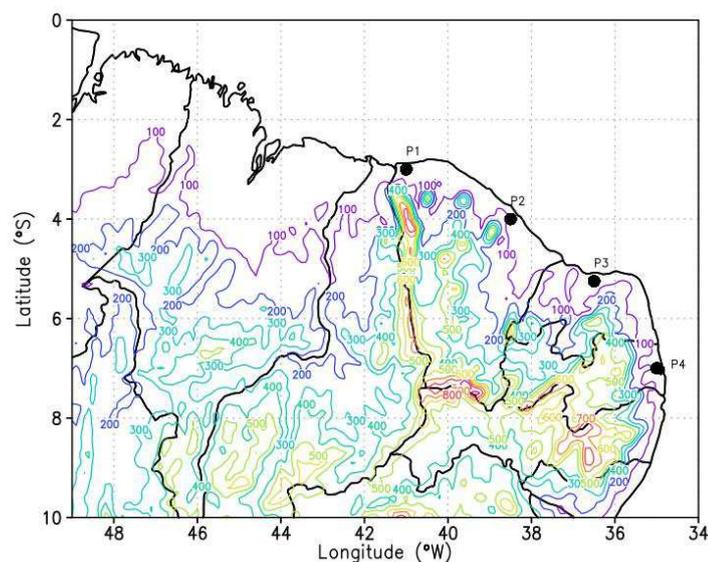
**Figura 2:** Representação do vetor vorticidade indicando que há energia no sentido anti-horário na direção para a qual ele aponta.

A representação do vetor vorticidade foi definida pela sua circulação no sentido anti-horário em torno de um eixo, o que implica a presença de energia nesse vetor. Quanto maior o comprimento desse vetor, maior será sua magnitude ou intensidade.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Ciclo Anual

Para estudar o ciclo anual do vetor vorticidade, a pesquisa focou em quatro pontos específicos, designados como P1, P2, P3 e P4, na Figura 3. Esses pontos seguiram uma orientação de norte para sul e de leste para oeste, conforme ilustrado. A Figura tem o propósito de indicar a região na qual o ciclo anual foi examinado.



**Figura 3:** Topografia da região Nordeste, com destaque para os pontos P1, P2, P3 e P4, que serão objeto de análise.

Neste estágio inicial, concentrou-se no ponto P1, localizado nas coordenadas  $41^{\circ}\text{W}$  e  $3^{\circ}\text{S}$ . A primeira análise para o ponto P1 envolveu o cálculo da média para todas as horas de todos os meses, permitindo a observação do ciclo diário médio para cada mês. Na Figura 4, a área em preto representou valores negativos (brisas marítimas), enquanto os valores em vermelho indicaram positivos (brisas terrestres). Observou-se que a brisa marítima apresentava vorticidade negativa neste caso porque o vetor apontava na direção negativa do eixo x.

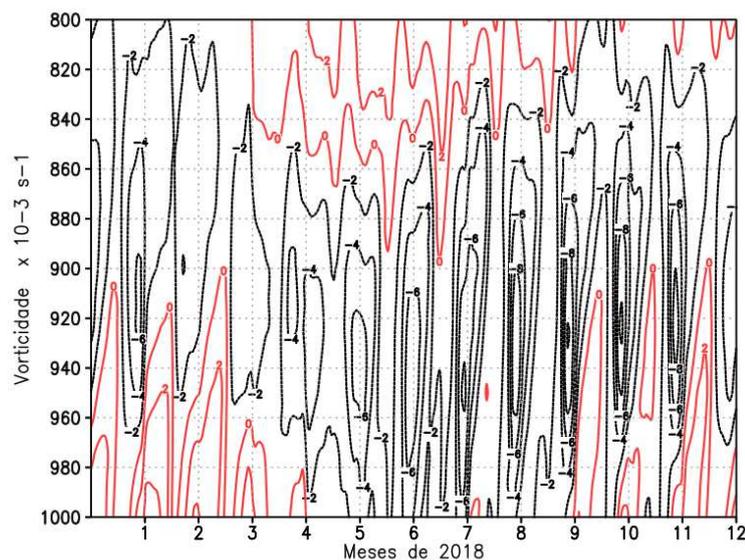
No mês de janeiro, observou-se uma brisa média com baixa intensidade entre 925-900 hPa. A partir dos meses de fevereiro, março e abril, entre 2 e 4, ocorreu o enfraquecimento dessas circulações, chegando a maio, quando as pressões máximas diminuíram, atingindo entre 970-940 hPa. Esse padrão fez sentido considerando que fevereiro, março, abril e maio eram parte da estação chuvosa, durante a qual as brisas podem não ter sido tão claras devido

à precipitação. Se estivesse chovendo ou se o ano fosse chuvoso, a superfície continental não se aqueceria tanto, e o mecanismo para brisas poderia não se manifestar. Além disso, a precipitação costuma estar associada a um fenômeno de grande escala, a ZCIT.

À medida que se passou de maio para junho, a zona de convergência migrou para norte, e a influência local tornou-se predominante. Setembro, outubro e novembro revelaram uma intensificação, indicada pelo aumento das pressões máximas, sugerindo que as brisas estavam mais profundas. Dezembro apresentou um padrão semelhante ao de janeiro, concluindo o ciclo anual.

Observou-se claramente um ciclo anual da brisa marítima, com intensidade significativa em janeiro, seguida por uma redução até abril e um subsequente aumento no segundo semestre, tornando-se mais profunda e intensa. Já a brisa terrestre mostrou uma diminuição de intensidade, sendo mais baixa nos primeiros e últimos meses do ano, quando as condições estavam menos turbulentas.

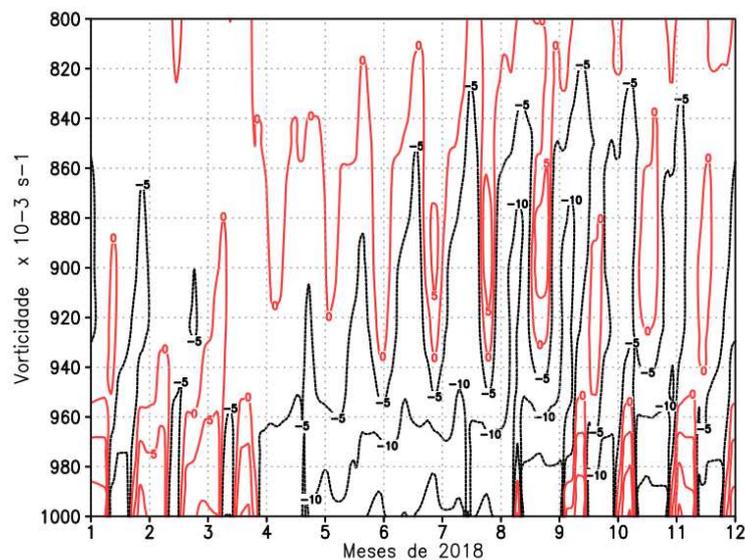
As isolinhas em vermelho, na parte inferior da Figura 4, mostraram os valores positivos de vorticidade, associados à brisa terrestre. De abril a setembro, a brisa terrestre esteve, na média, ausente. Observou-se que a brisa terrestre foi mais rasa e uma ordem de magnitude menor do que a marítima. Isso foi esperado, uma vez que o forçamento térmico durante o período diurno foi mais intenso do que o noturno.



**Figura 4:** Ciclo diário médio mensal do vetor vorticidade ( $10^{-3}\text{s}^{-1}$ ), ao longo do ano de 2018, para o ponto P1.

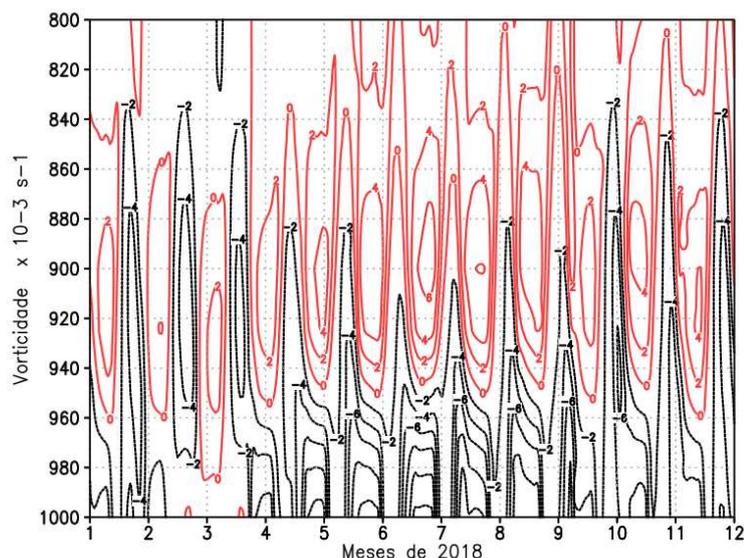
Para o ponto P2 (Figura 5), situado a  $38.5^{\circ}\text{W}$  e  $4^{\circ}\text{S}$ , a análise revela que o ciclo é razoavelmente semelhante, embora o ciclo diário não parecesse bem definido quanto o observado no ponto P1. Apesar de alcançar valores intensos de vorticidade, da ordem de  $-10$

$^1s^{-1}$ , é notável que a brisa marítima na região tendia a ser mais rasa. Uma reversão na circulação é observada, com uma simetria de valores positivos e negativos, uma característica diferente da observada na Figura 4. Ao contrário do ponto P1, a vorticidade associada à brisa terrestre apresentou-se mais intensa no ponto P2, principalmente durante a primavera e o verão, embora tenha continuado rasa.



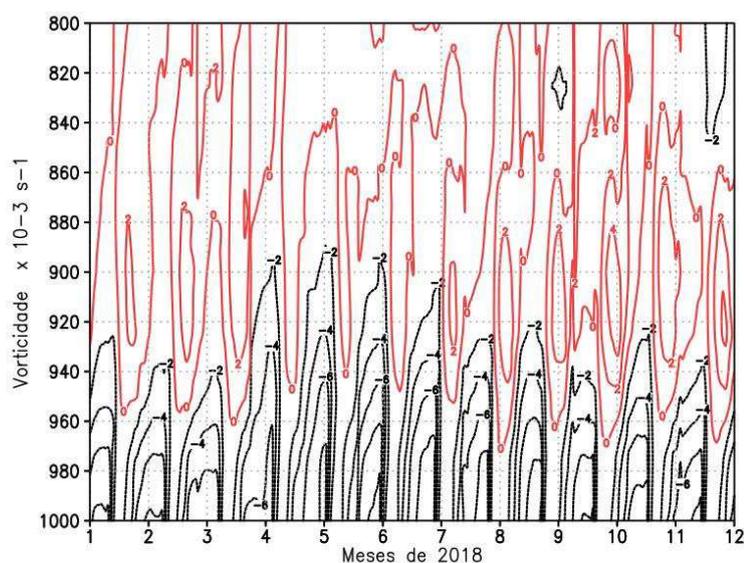
**Figura 5:** Ciclo diário médio mensal do vetor vorticidade ( $10^{-3}s^{-1}$ ), ao longo do ano de 2018, para o ponto P2.

A Figura 6 representou o ponto P3, situado no Rio Grande do Norte, com coordenadas  $36.5^{\circ}W$  e  $5.25^{\circ}S$ . Observou-se uma oscilação entre valores positivos e negativos. Foi possível notar que, abaixo de 960 hPa, ocorreu uma circulação marcada por valores negativos. Isso implicou que, nessa parte da costa, a brisa marítima é menos intensa e mais rasa. Não obstante, apresentou um ciclo anual semelhante aos dos pontos anteriores. Deve-se notar a presença de valores positivos entre 900-925 hPa ao longo de todo o ano. Isso não indicou uma brisa terrestre intensa, mas uma compensação da circulação acima da brisa, como consequência da circulação de retorno associada à brisa marítima.



**Figura 6:** Ciclo diário médio mensal do vetor vorticidade ( $10^{-3}\text{s}^{-1}$ ), ao longo do ano de 2018, para o ponto P3.

O ponto P4, conforme ilustrado na Figura 7 e localizado na costa da Paraíba com coordenadas a  $35^{\circ}\text{W}$  e  $7^{\circ}\text{S}$ , destacou-se pela evidente ausência de inversão do vento. A média apresentada indicou a inexistência da oscilação observada em outros pontos. A figura ressaltou que a brisa não se manifestou de maneira evidente na costa da Paraíba, pelo fato de ser uma brisa muito rasa, indicando a ausência desse fenômeno nesse local. Foi interessante porque a costa da Paraíba apresentou um forte vento de leste, aparentemente, esse vento estava associado à circulação de grande escala, à Alta do Subtropical Atlântico Sul (ASAS).



**Figura 7:** Ciclo diário médio mensal do vetor vorticidade ( $10^{-3}\text{s}^{-1}$ ), ao longo do ano de 2018, para o ponto P4.

## 5.2. Médias Mensais

Nesta seção, a análise do vetor vorticidade para a média mensal de cada mês do ano de 2018 foi apresentada para os níveis de pressão 925 e 900 hPa. A análise foi focada no horário das 19:00 UTC por corresponder à máxima intensidade da brisa, conforme discutido anteriormente. Os mapas para a região norte do Nordeste do Brasil permitiram uma visão sinótica da brisa marítima, conforme ilustrado na Figura 8 (A-M). Cada figura correspondia a um mês do ano, sendo A janeiro e M dezembro, para o nível de 925 hPa (as figuras para todos os níveis, das 19:00 UTC, foram apresentadas no apêndice A).

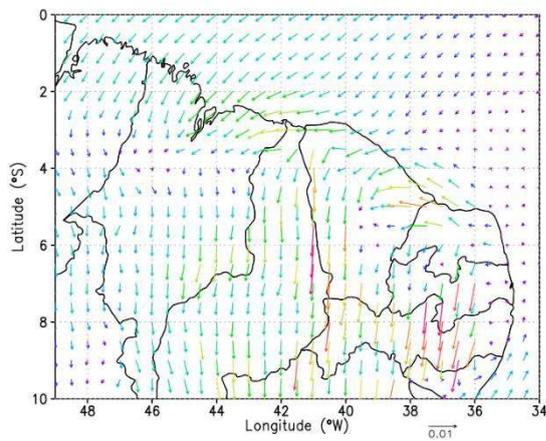
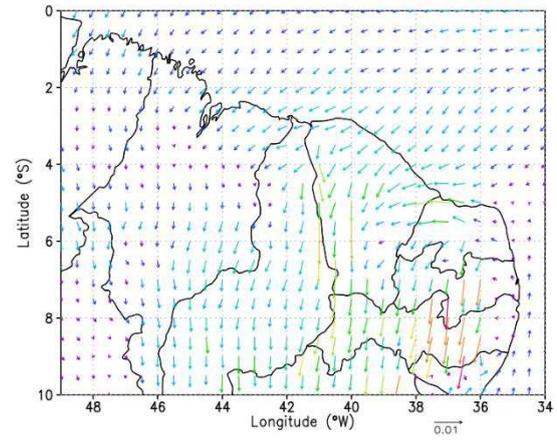
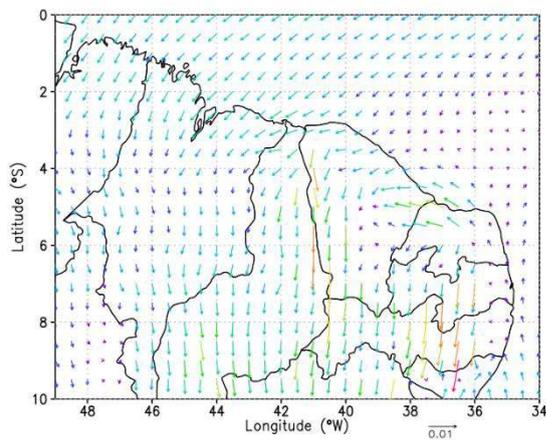
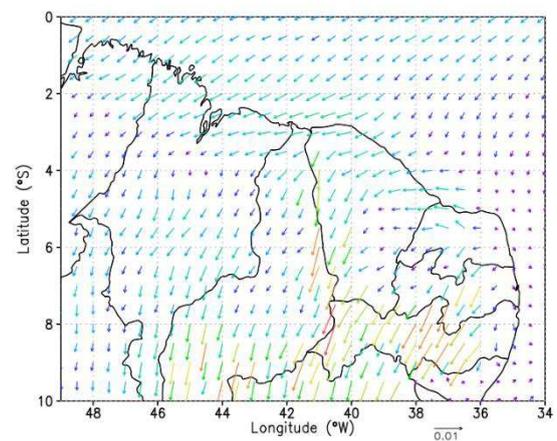
Esses mapas foram analisados em conformidade com os pontos selecionados na seção anterior. Ao examinar o ponto P1, localizado próximo à divisa entre Ceará e Piauí, com base no mapa do corte vertical que representou a média anual, observou-se uma brisa razoavelmente forte. Ao analisar o mês de janeiro (Figura 8A), os vetores de vorticidade indicaram uma brisa marítima com baixa intensidade. Nos meses de fevereiro, março e abril, a análise vertical mostrou baixa intensidade em 925 hPa, e ao examinar os vetores de vorticidade nas Figuras 8B, 8C, 8D, essa observação foi corroborada.

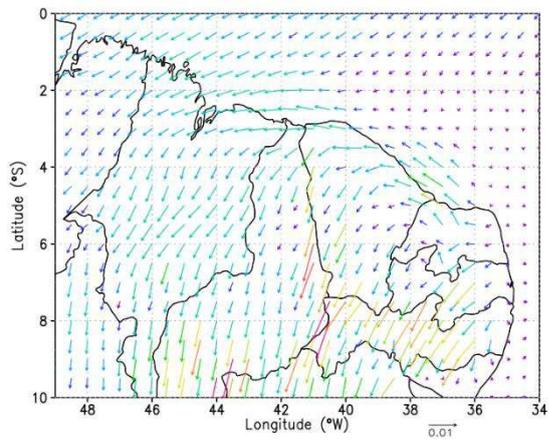
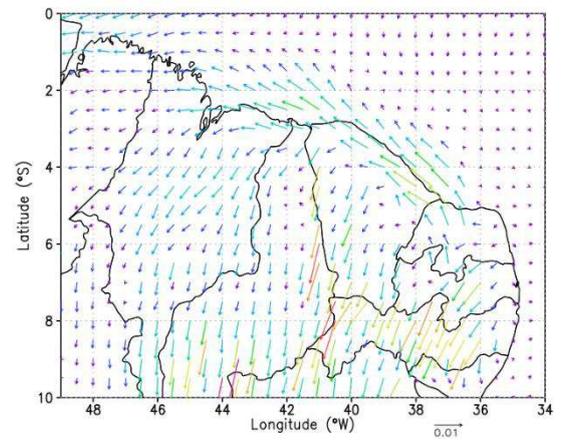
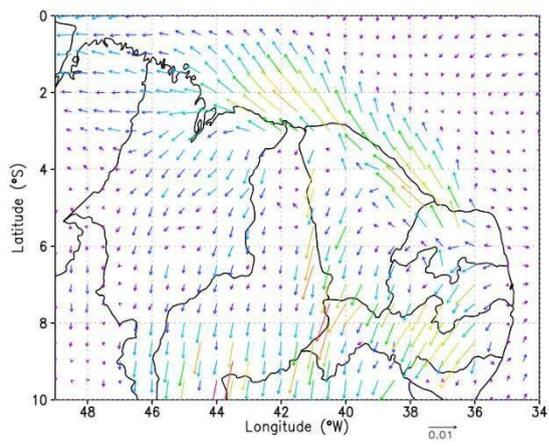
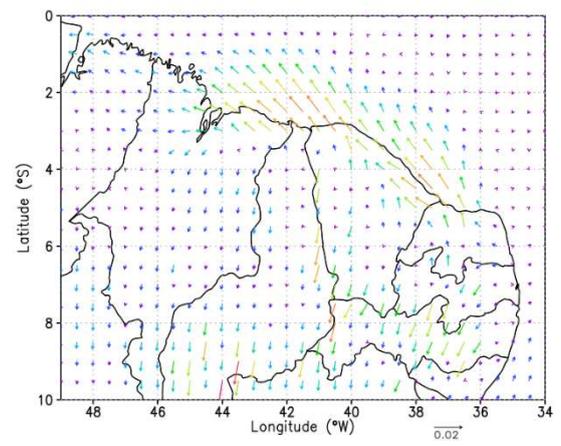
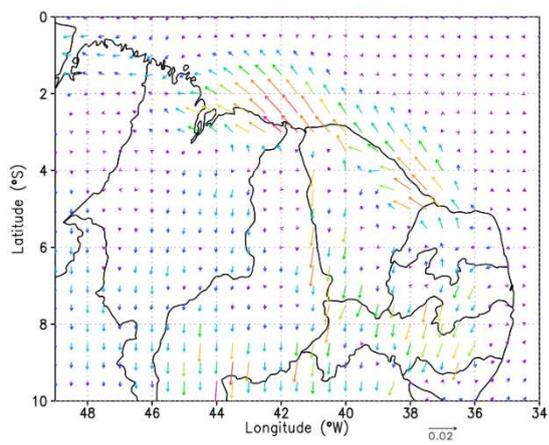
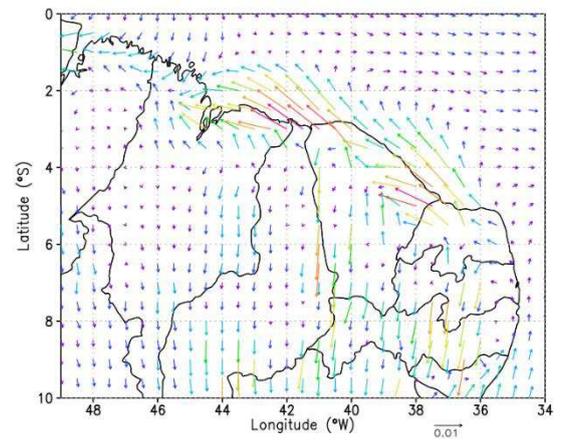
Para os meses de setembro, outubro e novembro, houve uma intensificação na brisa, conforme indicado pelos vetores de vorticidade nas Figuras 8I, 8J, 8L, respectivamente. A relação entre essas imagens e os vetores de vorticidade permitiu observar essa intensificação, sendo em tons de vermelho os vetores que representaram uma maior intensidade.

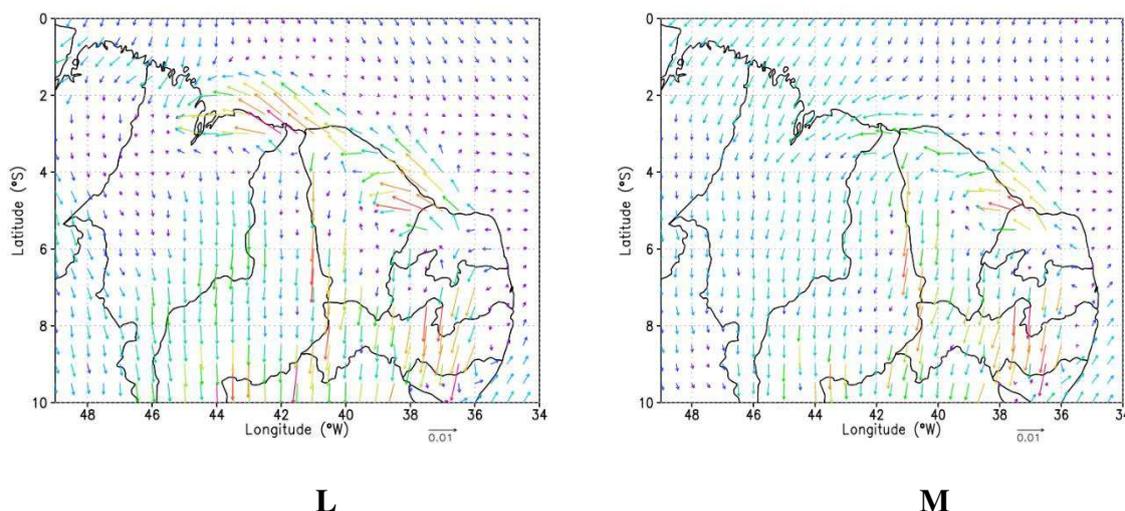
Ao analisar o ponto P2, situado no Ceará, conforme discutido na seção anterior, observou-se, na análise vertical, que a brisa estava presente entre 920-900 hPa, similar ao P1. Ao analisar a média mensal com o vetor de vorticidade para janeiro, fevereiro, março, abril e maio (Figuras 8A, 8B, 8C, 8D), notou-se que os vetores de vorticidade estavam dispersos e não seguiram a costa. Pode-se inferir que, no nível de 900 hPa (Figura 09), a visualização pode ser mais clara. À medida que se avançava de maio até novembro, tornou-se evidente a presença da brisa, com intensidades mais pronunciadas em agosto, setembro e outubro. Essa observação, ao ser comparada com a análise vertical, confirmou a precisão das conclusões.

Para o ponto P3, situado no Rio Grande do Norte, ao se comparar com a análise vertical do ponto em 925 hPa na seção anterior, não se verificou a ocorrência de brisa. A análise das Figuras 8 (A-M), juntamente com os vetores de vorticidade, confirmou essa observação, indicando a inexistência de brisa marítima neste ponto para 925 hPa. É possível que, em outro nível de pressão, essa condição seja diferente.

Para o ponto P4, não houve muito a ser destacado; ambas as imagens indicaram que, neste caso, não ocorreu brisa marítima. Isso foi evidente tanto na análise da média anual, representada verticalmente, quanto na análise dos vetores de vorticidade, apresentada horizontalmente.

**A****B****C****D**

**E****F****G****H****I****J**



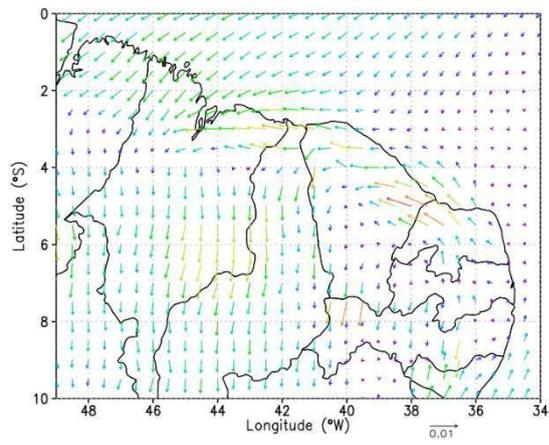
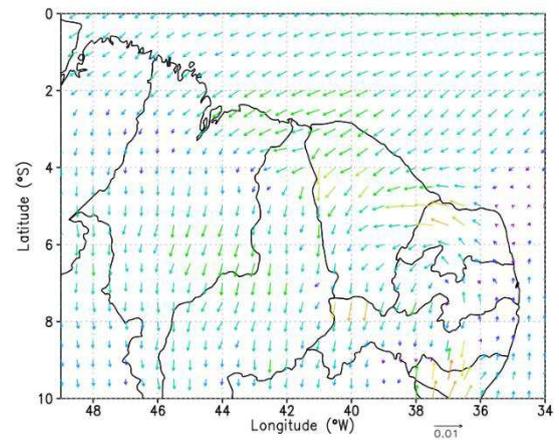
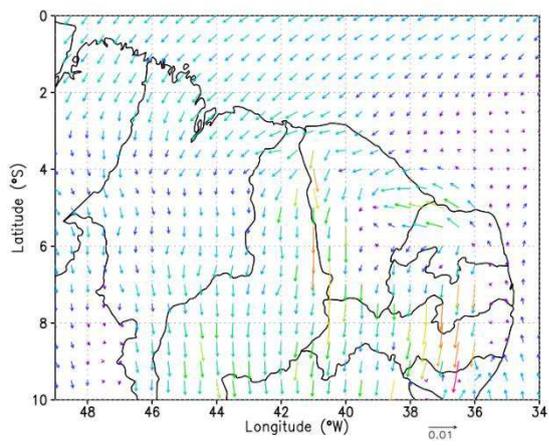
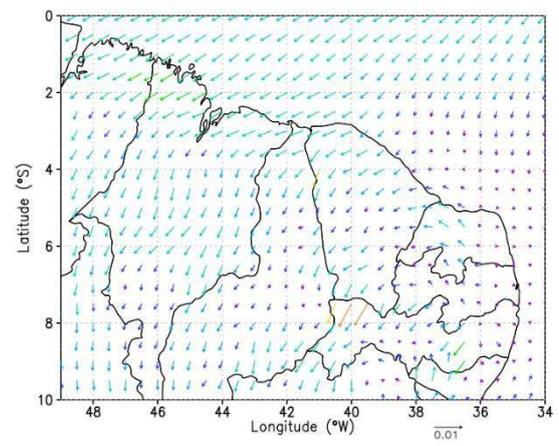
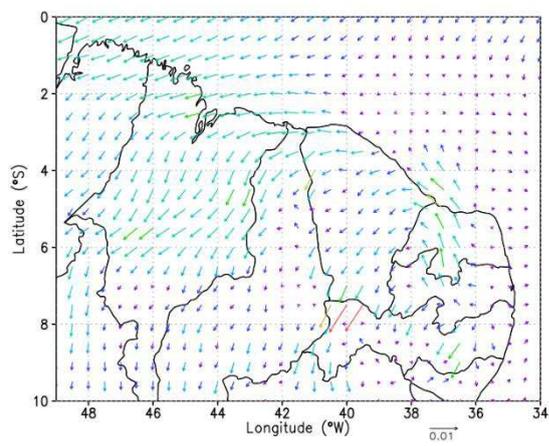
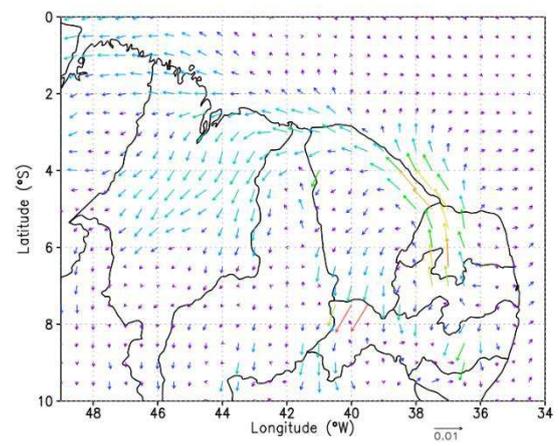
**Figura 8:** Representação do NEB no horário de 19:00 UTC (equivalente a 16 horas no horário local), para o vetor vorticidade ( $10^{-3}\text{s}^{-1}$ ) no nível de pressão de 925 hPa.

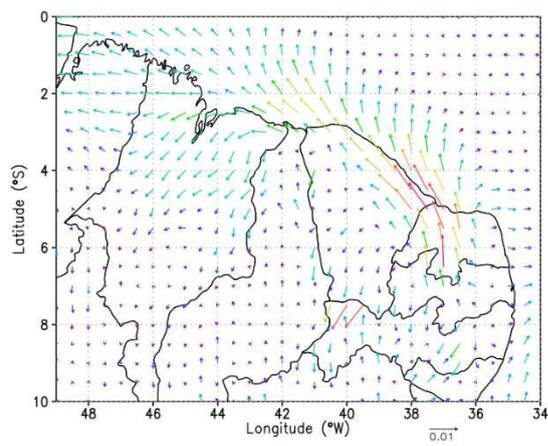
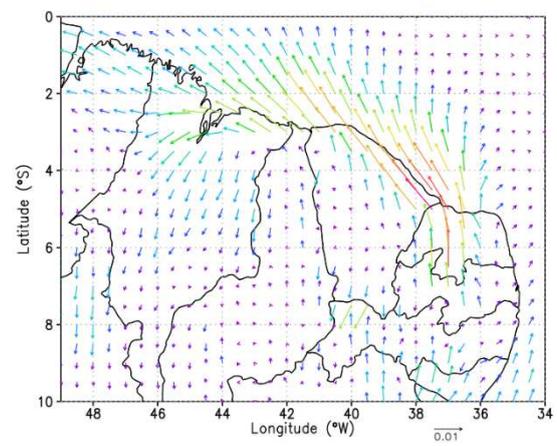
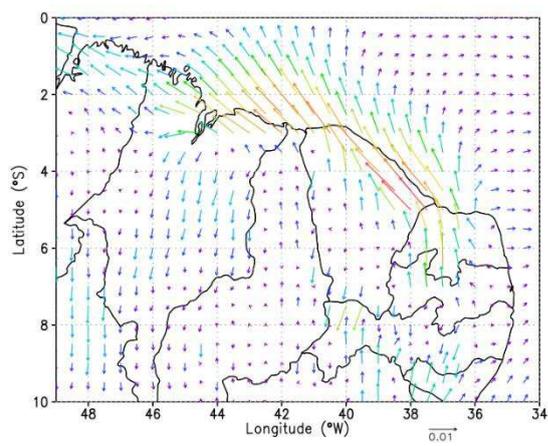
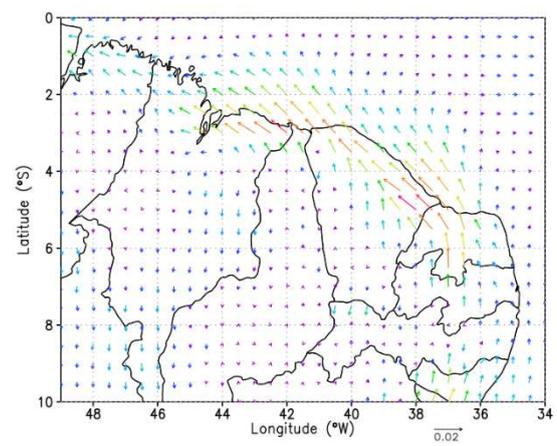
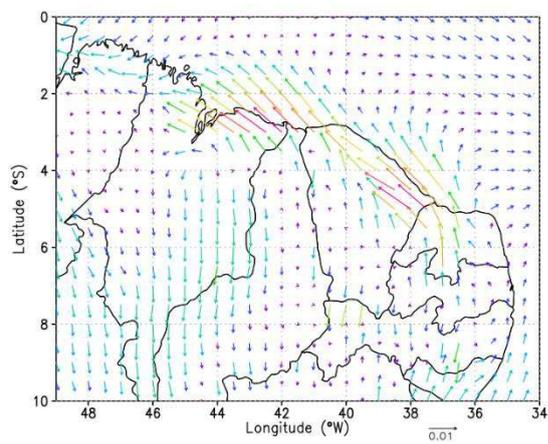
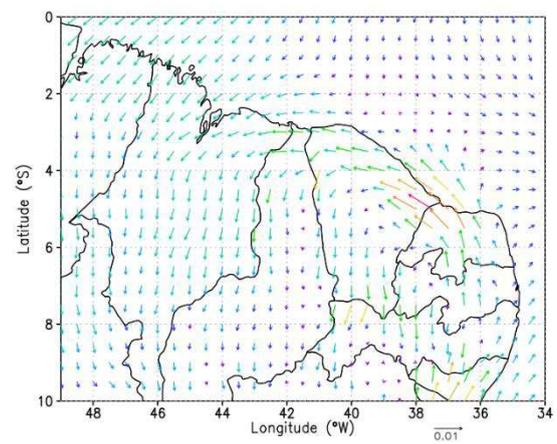
Na Figura 9 (A-M), foi realizada uma análise no nível de 900 hPa às 19:00 UTC, examinando o perfil horizontal com os vetores de vorticidade e comparando-os com o perfil vertical e a média anual da seção anterior.

Analisando para o ponto P1, em comparação com a análise vertical, os vetores de vorticidade para o nível de 900 hPa estavam um pouco dispersos. No mês de janeiro (9A), foi possível observar a ocorrência de brisa marítima. Nos meses de fevereiro a abril (Figura 9B-D), não houve ocorrência de brisa marítima. No mês de maio (9E), observaram-se vetores de vorticidade de pequenas intensidades seguindo a costa. Nos meses de agosto (9H) adiante, os vetores de vorticidade apareceram em tons de vermelho, indicando alta intensidade, mas não seguiram a costa, e não pudemos considerar como brisa marítima.

Para o ponto P2, nos meses de julho a dezembro (Figura 9F-M), houve ocorrência de brisa marítima com altas intensidades, de acordo com os vetores de vorticidade. Essa observação foi corroborada pela análise vertical, que mostrou brisa na ordem de -10, significando altas intensidades.

Quanto aos pontos P3 e P4, ao observar os vetores de vorticidade, notou-se que estavam dispersos. No ponto P3, houve vetores de vorticidade, mas estes não seguiram a costa. Já no ponto P4, os vetores foram muito pequenos.

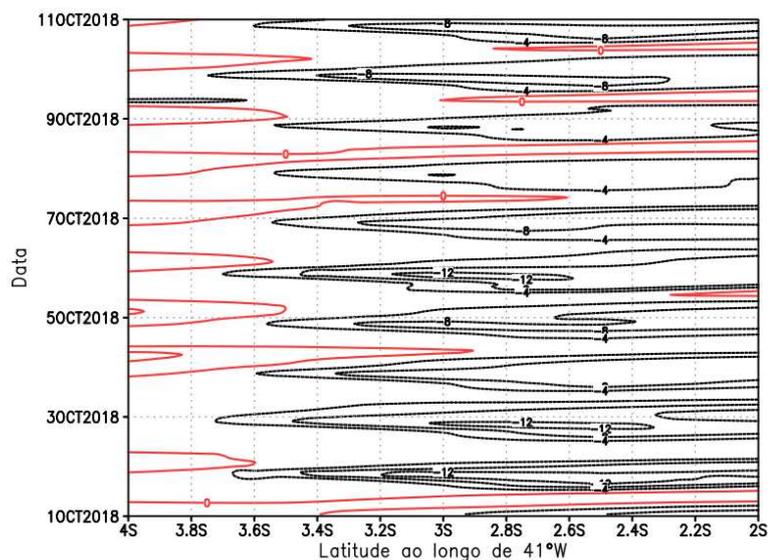
**A****B****C****D****E****F**

**G****H****I****J****L****M**

**Figura 9:** Semelhante à figura anterior, porém referente ao nível de pressão de 900 hPa (em  $10^{-3}s^{-1}$ ).

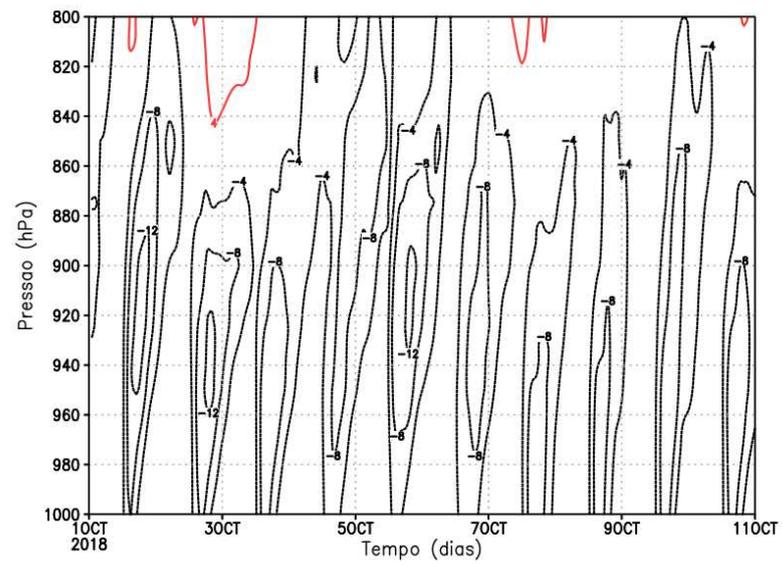
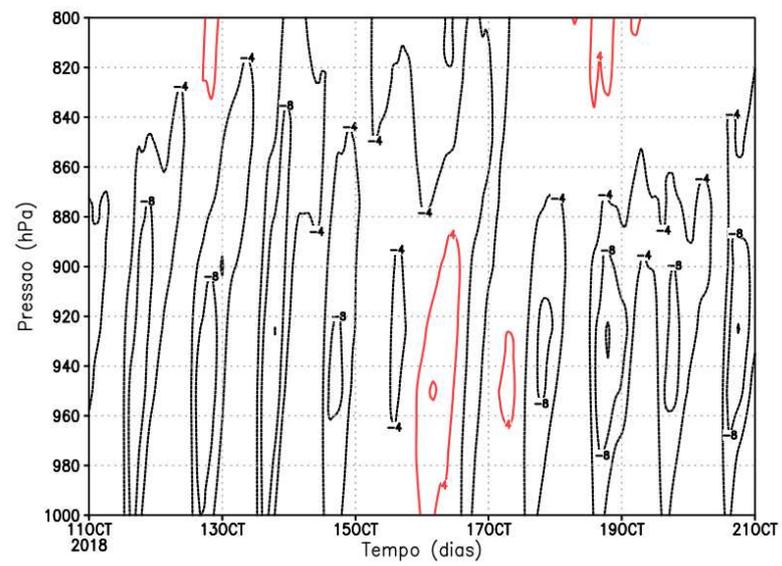
### 5.3 Ciclo Diário

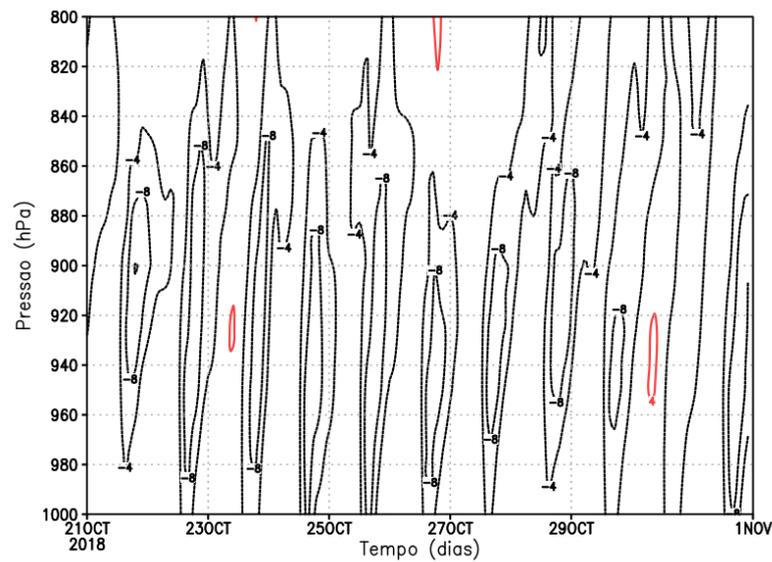
Nesta seção, será discutido o ciclo diário da brisa através do vetor vorticidade. A Figura 10 mostrou os 11 primeiros dias de outubro de 2018 através de um diagrama Hovmöller da componente zonal do vetor vorticidade, entre 2 e 4°S, no nível de 925 hPa, na longitude de 41°W. Essa latitude correspondeu ao ponto P1 (Figura 3). Pôde-se notar que a brisa marítima foi intensa e o vetor vorticidade foi da ordem de  $10 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ .



**Figura 10:** Diagrama Hovmöller da componente zonal do vetor vorticidade, entre 2 e 4 °S, no nível de 925 hPa, na longitude de 41°W (em  $10^{-3} \text{s}^{-1}$ ).

Essas observações foram capazes de ser visualizadas nas representações de perfil vertical no ponto P1 (conforme mostrado na Figura 11). Na Figura 11A, pôde-se notar que a brisa é intensa nos seis primeiros dias e, depois se desintensifica. Entre os dias 11 e 21 de outubro (Figura 11B), os núcleos tenderam a ter valores da ordem de  $-8 \cdot 10^{-3} \text{s}^{-1}$ . No dia 16, a brisa terrestre pareceu bem definida, enquanto a brisa marítima é ausente. Os valores da vorticidade, associados à brisa marítima, retornaram a ficar em torno de  $-8 \cdot 10^{-3} \text{s}^{-1}$  até final do mês (Figura 11C). Esta representação ofereceu uma visão clara da média entre eventos mais intensos ou mais fracos, conforme destacado na Figura 4 para o ciclo anual.

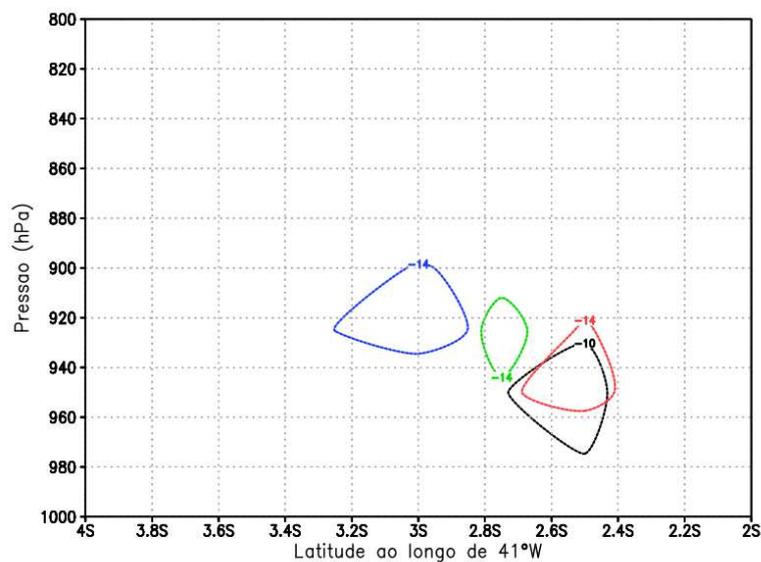
**A****B**



C

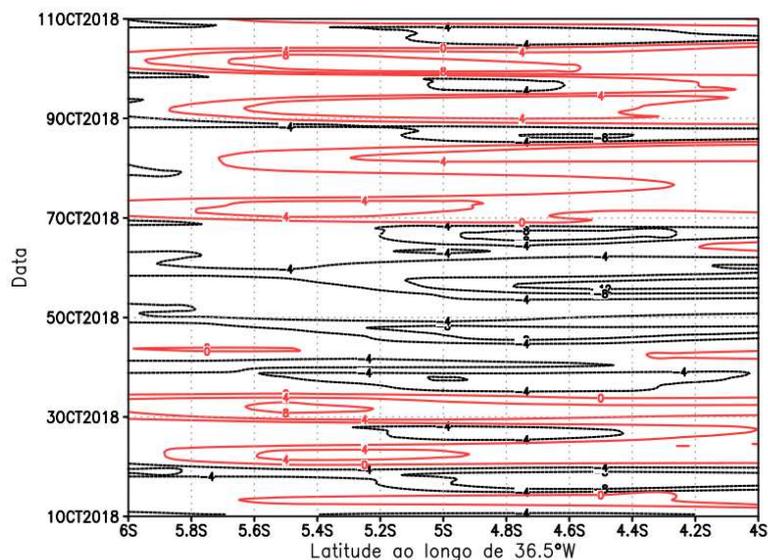
**Figura 11:** Representação de perfil para a média diária do ponto P1 no mês de outubro, onde: (A) nos dias 1 a 11, (B) dos dias 11 a 21 e (C) dos dias 21 a 1.

A Figura 12 reforça essas informações, evidenciando quatro núcleos que, ao serem observados ao longo do tempo, apresentaram horários de 15:00 UTC, 17:00 UTC, 19:00 UTC e 21:00 UTC, equivalentes a 12, 14, 16 e 18 horas no horário local. Nessa representação, é possível constatar o aumento da intensidade da brisa, conforme ela se desloca em direção ao continente, confirmando os dados apresentados no diagrama de Hovmöller na Figura 10. Essa penetração da brisa é da ordem de 100 km, e corrobora os resultado de Planchon et al. (2006).



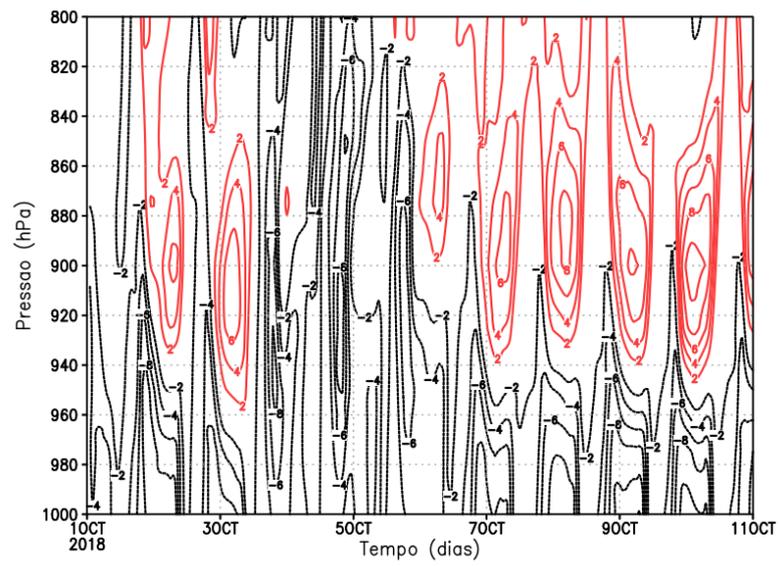
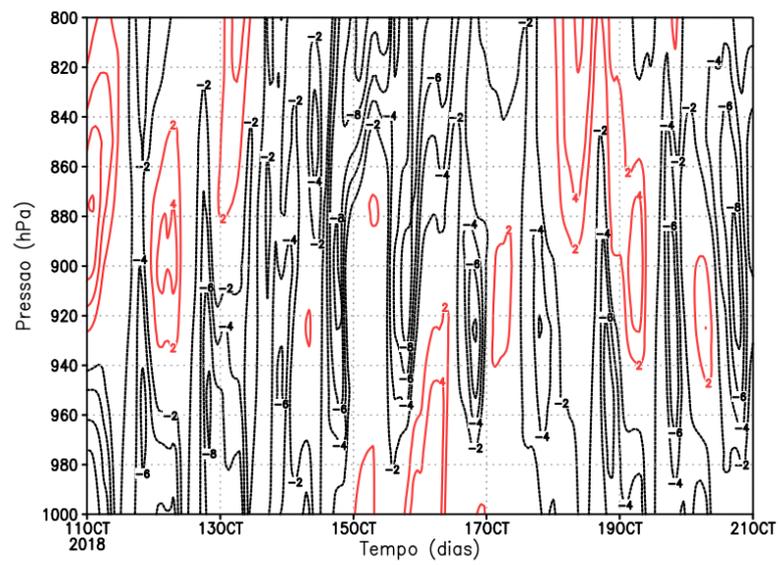
**Figura 12:** Valores máximos de vorticidade às (15 UTC, linha preta); (17 UTC, linha vermelha); (19 UTC, linha verde) e (21 UTC, linha azul). (em  $10^{-3}s^{-1}$ ).

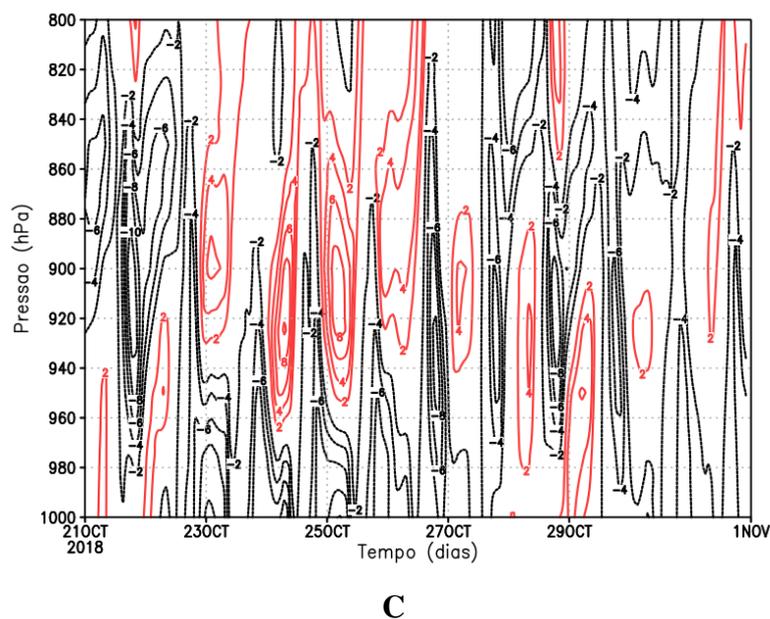
Essa mesma análise pode ser aplicada ao ponto P3, localizado na costa do Rio Grande do Norte, o que demonstra os 11 primeiros dias de outubro de 2018. Este ponto está situado entre 4 a 6°S, no nível de 925 hPa, na longitude de 36,5°W. Observe-se que a brisa marítima se apresentou com menor intensidade nessa região, conforme a Figura 13.



**Figura 13:** Diagrama Hovmöller da componente zonal do vetor vorticidade, entre 4 e 6 °S, no nível de 925 hPa, na longitude de 36,5°W, (para o ponto P3), costa do Rio Grande do Norte.

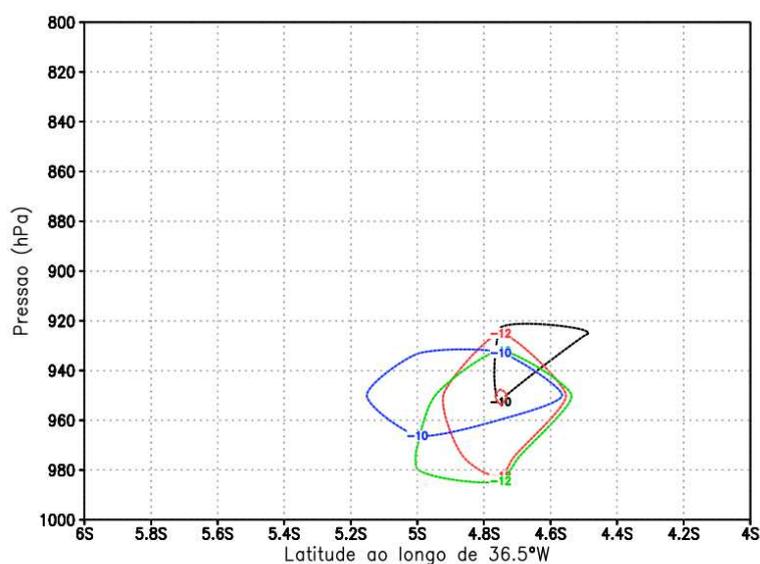
Na Figura 14, a representação em perfil vertical mostra uma notável redução da definição para todos os dias de outubro em comparação com a Figura 11, sendo notavelmente menos definida para todos os dias do mês de outubro, ou seja, uma brisa fraca. A Figura 14A destacou a presença da brisa entre os dias 3 e 7. Nas Figuras 14B e 14C, foram observadas oscilações, evidenciando também a presença da brisa terrestre. Essas observações, quando comparadas com a Figura 6, que representou o ciclo anual, sustentaram a análise feita anteriormente.

**A****B**



**Figura 14:** Semelhante à Figura 11, porém referente ao ponto P3 no estado do Rio Grande do Norte.

A Figura 15 reiterou as informações apresentadas anteriormente. Nela, quatro núcleos são coletados ao longo do tempo, representados em 15:00 UTC (12h), 17:00 UTC (14h), 19:00 UTC (16h) e 21:00 UTC (18h). Nessa representação, foi evidente que a brisa não se desloca para o interior do continente, ela permanece ao longo da costa. Consequentemente, confirmou-se que a brisa no ponto P1 é mais intensa do que no ponto P3.



**Figura 15:** Semelhante à Figura 12, porém com longitude de 36,5° W e referente ao estado do Rio Grande do Norte.

## 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste estudo, a brisa marítima e terrestre foram analisadas por meio do vetor vorticidade, com o auxílio dos dados de reanálise do ERA5, que forneceram os dados de reanálise. A motivação por trás dessa pesquisa reside na necessidade de aprimorar a compreensão das brisas. Através de uma representação visual, é possível observar diversas regiões simultaneamente, permitindo o estudo do comportamento da brisa em diferentes momentos e altitudes.

Os resultados obtidos indicaram a ocorrência de brisa marítima com máxima vorticidade nos níveis de 925-900 hPa, atingindo maior intensidade às 19:00 UTC (16h). Essa tendência foi observada nas três etapas analisadas utilizando o vetor vorticidade. No ciclo diário, os resultados corroboraram a média mensal, revelando maiores intensidades nas primeiras horas, seguidas por um enfraquecimento e, posteriormente, uma intensificação no final dia, indicando um forte ciclo diário.

Análise para pontos específicos mostraram que a brisa é mais intensa na costa norte do Nordeste e fraca, ou ausente, na costa leste. Isso pode estar relacionado ao vento de grande escala associado à ASAS.

Os resultados mostraram a presença de brisa terrestre. Porém, sua intensidade é inferior a da brisa marítima, além de ser mais rasa.

Os resultados mostraram que a brisa marítima/terrestre tem valores e intensidades diferentes de acordo com a localidade estudada.

Assim, por meio dos objetivos delineados neste estudo, as observações conduzidas indicam que a análise dos vetores de vorticidade horizontal possibilita o estudo das brisas marítimas com uma perspectiva sinótica. Enquanto estudos tradicionais sobre brisas geralmente se limitam a uma região específica, a abordagem utilizada neste trabalho permite uma análise mais abrangente ao longo de uma extensa costa, abrangendo diversas regiões.

Uma hipótese a ser considerada para futuras pesquisas envolve a análise das componentes da equação de vorticidade, com foco nas duas últimas: o termo selenoidal e o termo de viscosidade, especialmente em relação à costa brasileira. O termo selenoidal está diretamente associado ao gradiente de temperatura, que é o mecanismo principal responsável pela formação das brisas. Já o termo de viscosidade atua como um fator de destruição da brisa, opondo-se ao movimento. Em um estado estacionário, espera-se que esses termos se equilibrem, e essa é uma dinâmica que merece investigação específica para a costa brasileira.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALPERT, P.; HADAR, R. Pre- and Post-Sea-Breeze Frontal Lines—A Meso-g-Scale Analysis over South Israel. *American Meteorological Society*, v. 60, 2003.
- BAO, S.; PIETRAFESA, L.; GAYES, P.; NOBRE, S.; VINER, B.; QIAN, J. H.; WUERTH, D.; MITCHELL, G.; BURDETTE, S. Mapping the Spatial Footprint of Sea Breeze Winds in the Southeastern United States. ***Journal Of Geophysical Research: Atmospheres***, v. 128, n. 7, 2023.
- BARRETO, A. B. Estudo do Ciclo Diário do Vento à Superfície no Nordeste do Brasil. 2001. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2001.
- CAVALCANTI, I. F. A. Um estudo sobre interações entre sistemas de circulação de escala sinótica e circulações locais. 1982. 140 p. (INPE-2494-TDL/097). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1982.
- CHEN, X.; ZHANG, F.; ZHAO, K. Diurnal Variations of the Land–Sea Breeze and Its Related Precipitation over South China. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 73, n. 12, p. 4793–4815, 2016.
- CUI XIAO-PENG, A phase analysis of vorticity vectors associated with tropical convection, ***Chinese Physics B***, v. 17, n. 6, p. 2304–2310, 2008.
- DAVIS, S.R.; FARRAR, J. T.,; Weller, R. A, JIANG, H.; LAWRENCE J. P. . The land-sea breeze of the red sea: Observations, simulations, and relationships to regional moisture transport. ***Journal of Geophysical Research: Atmospheres***, 124, 2019.
- DEE, D. P., UPPALA, S. M., SIMMONS, A. J., BERRISFORD, P., POLI, P., HERSBACH, H., de ROSNAY, P., Bell, B., SCHEPERS, D., et al. “Operational global reanalysis: progress, future directions and synergies with NWP”. Série de relatórios ERA, n. 27, dezembro de 2018.
- FRANÇA, L. Baixar dados meteorológicos do ERA5-Land - GeoOne. Disponível em: <<https://geoone.com.br/era5-land/#>>. Acesso em: 3 out. 2023
- GAO, S. et al. A convective vorticity vector associated with tropical convection: A two-dimensional cloud-resolving modeling study. ***Journal of Geophysical Research***, v. 109, n. D14, 24 jul. 2004.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2022. <http://www.ibge.gov.br>
- KILROY, Gerard; SMITH, Roger K ; WISSMEIER, Ulrike, Tropical convection: the effects of ambient vertical and horizontal vorticity, ***Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society***, v. 140, n. 682, p. 1756–1770, 2014.
- KOBAYASHI, S., VITART, F., “The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system”. *Quarterly Journal of the royal*.
- KOUSKY, V. E. Frontal Influences on Northeast Brazil. ***Monthly Weather Review***, v. 107, n. 9, p. 1140–1153, set. 1979.
- MAGNAGO, R.; FISCH G.; MORAES O. ANÁLISE ESPECTRAL DO VENTO NO CENTRO DE LANÇAMENTO DE ALCÂNTARA (CLA). ***Revista Brasileira de Meteorologia***, v.25, n.2, 260 - 269, 2010.

MARQUES, R.F.C.; FISCH, G.F. As atividades de meteorologia aeroespacial no Centro Técnico Aeroespacial (CTA). **Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia**, v.29, n.3, p.21-25, 2005. Meteorological Society. 2011. DOI: D137(656), 553-597

MELO, E. C. S. SIMULACAO NUMERICA DE CIRCULACOES DE BRISA NO ESTADO DA PARAIBA. 2000. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2000.

MELO, E. C. S.; ARAGÃO, M. R. S.; CAVALCANTI, E. P.; MELO, A. S. M.; SILVA, T. L. V. efeito da interação da convecção atmosférica com o desenvolvimento de brisas no estado da paraíba. **Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal**, v. 8, n. 2, p. 298-314, abr. /jun. 2011.

MILLER, S. T. K.; KEIM, B. D.; TALBOT, R. W.; MAO, H., 2003, “Sea breeze: Structure, forecasting, and impacts”. **Reviews of Geophysics**, 41(3) DOI: <https://doi.org/10.1029/2003RG000124>.

MUÑOZ-SABATER, J., “ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications Earth Syst”. *Sci. Data*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>

NO NORDESTE DO BRASIL. 2014. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

ark, MS., Chae, JH. Features of sea–land–breeze circulation over the Seoul Metropolitan Area. *Geosci. Lett.* 5, 28 (2018). <https://doi.org/10.1186/s40562-018-0127-6>

PLANCHON, O.; DAMATO, F.; DUBREUIL, V.; GOUERY, P. A method of identifying and locating sea-breeze fronts in north-eastern Brazil by remote sensing, **Meteorological Applications**, V. 13, p. 225–23, 2006, doi:10.1017/S1350482706002283

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. REGIMES DE PRECIPITAÇÃO NA AMÉRICA DO SUL: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.2, 185 - 204, 2010.

SABATER, J. M.; DUTRA, E.; PANAREDA, A. A.; ALBERGEL, C.; ARDUINI, G.; BALSAMO, G.; BOUSSETTA, S.; CHOULGA, M.; HARRIGAN, S.; HERBACH, H.; MARTENS, B.; MARALLES, D. G.; PILES, M.; FERNÁNDEZ, N. J. R.; ZSOTER, E.; BUONTEMPO, C. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. **Earth System Science Data**. v. 13, n.

SOUZA, E. B. GrADS – GRID ANALYSIS AND DISPLAY SYSTEM FUNDAMENTOS E PROGRAMAÇÃO BÁSICA. 2004. GrADS – **Fundamentos e Programação Básica. Curso de Extensão**, DM-CG-UFPa.

TEXEIRA, R. F. O FENÔMENO DA BRISA E SUA RELAÇÃO COM A CHUVA SOBRE FORTALEZA-CE. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.23, n.3, 282-291, 2008.

VIEIRA, V. R. REGIONALIZAÇÃO E RISCOS DE ÍNDICES DE CHUVAS INTENSAS

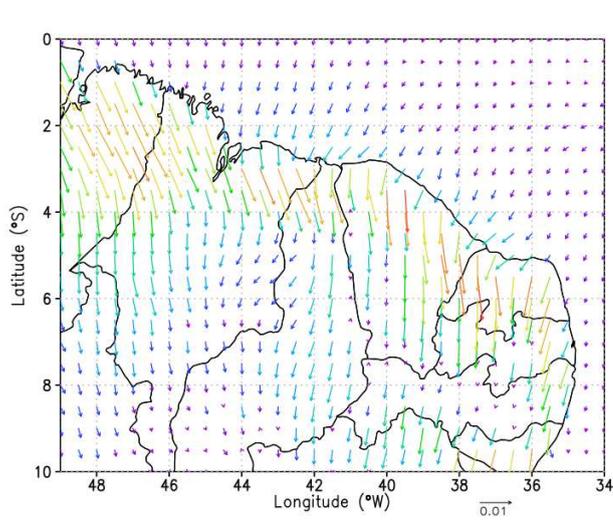
WAGNER, N. et al. The sea breeze/land breeze circulation in Los Angeles and its influence on nitryl chloride production in this region. **Journal of Geophysical Research**, v. 117, n. D21, p. n/a-n/a, 27 nov. 2012.

WEXLER, R. Theory and observations of land and sea breezes. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 27, p. 272- 287, 1946.

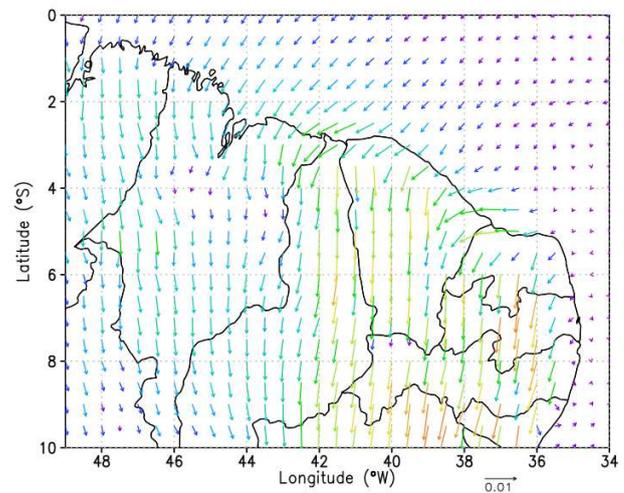
ZHANG, L.; XIN, J.; YIN, Y.; WANG, Z.; WANG, D.; MA, Y.; JIA, D.; PANELA, X. Adaptability evaluation of boundary layer schemes for simulation of sea and land breeze circulation in the west coast of the Yellow Sea. **Atmospheric Research**, v. 278, p. 106354–106354, 1 nov. 2022.

**APÊNDICES**  
**APÊNDICE A – MAPAS DE MÉDIA MENSAL PARA TODOS OS NÍVEIS DE**  
**HECTOPASCAL ÀS 19Z (16 HORAS)**

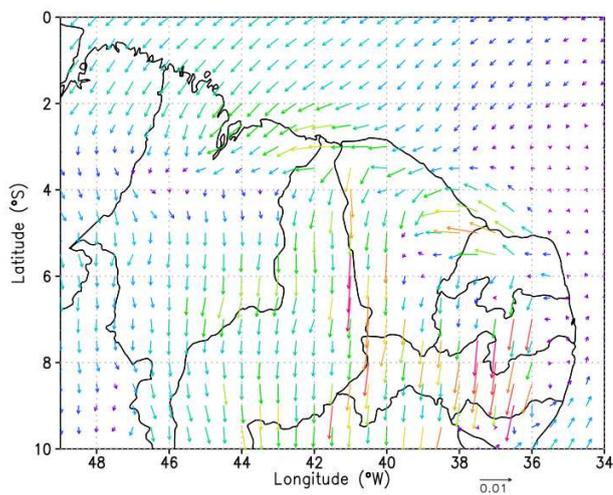
**Figura 16:** Média mensal para o mês de janeiro, às 19Z (16h), nos níveis de 975, 950, 900, 875, 850, 825 e 800.



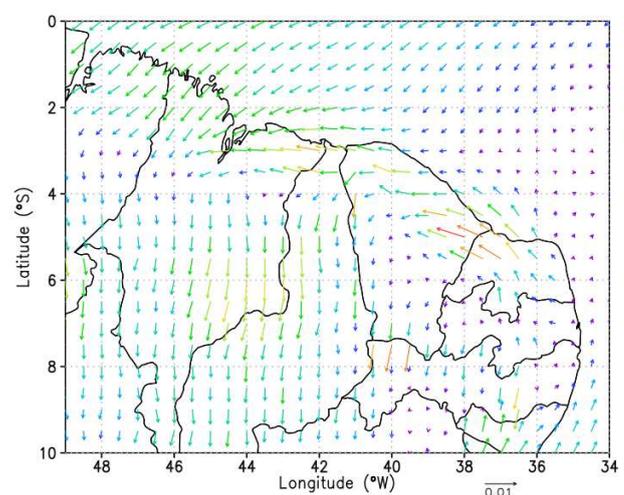
a) 975 hPa



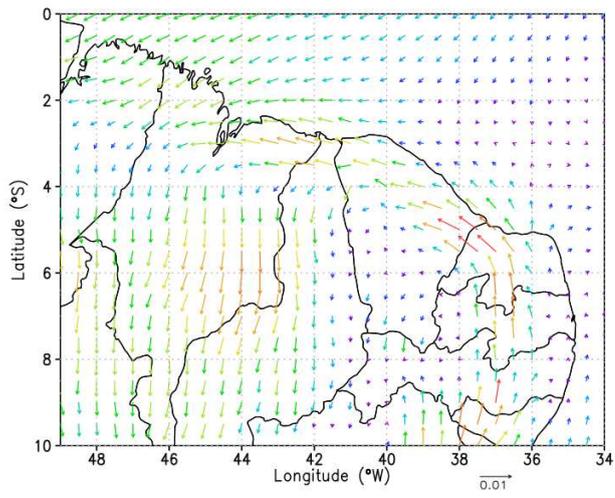
b) 950 hPa



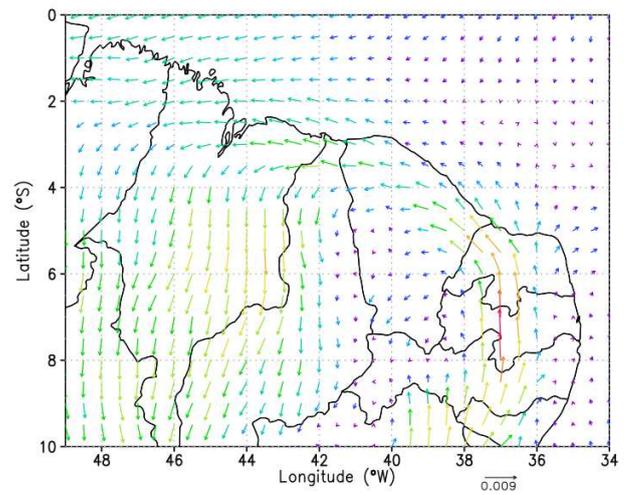
c) 925 hPa



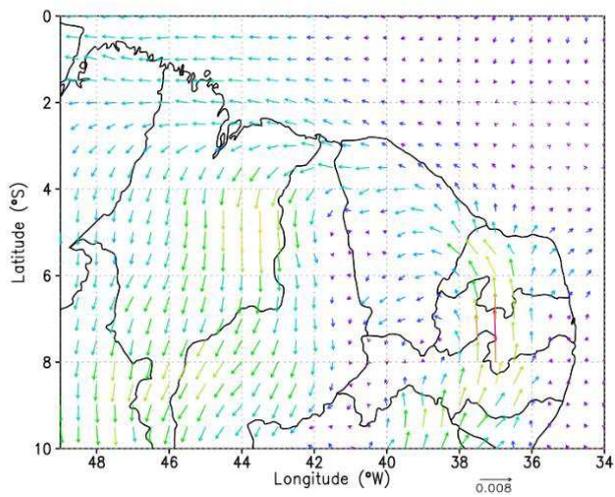
d) 900 hPa



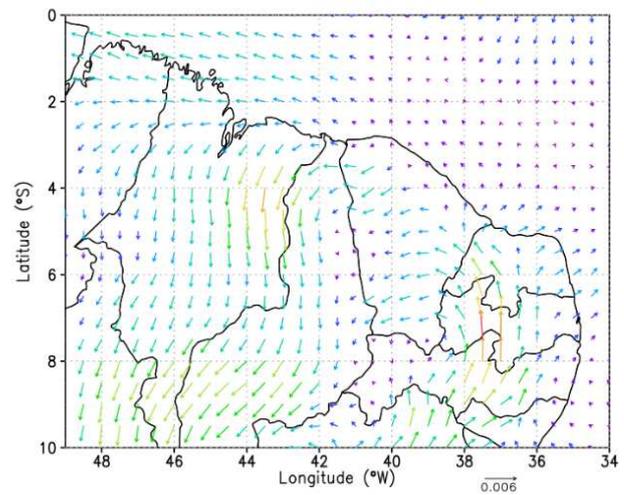
e) 875 hPa



f) 850 hPa

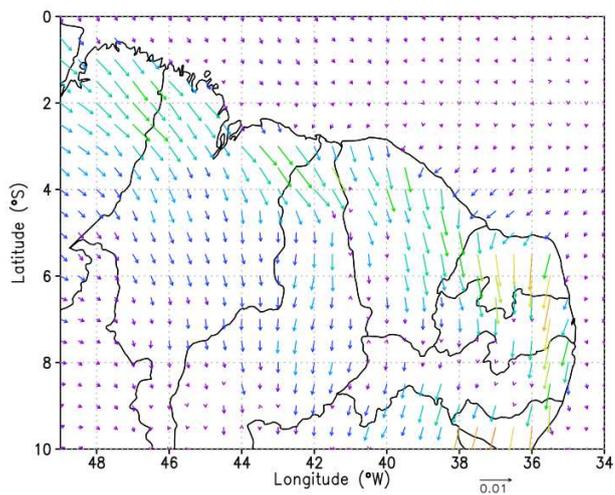


g) 825 hPa

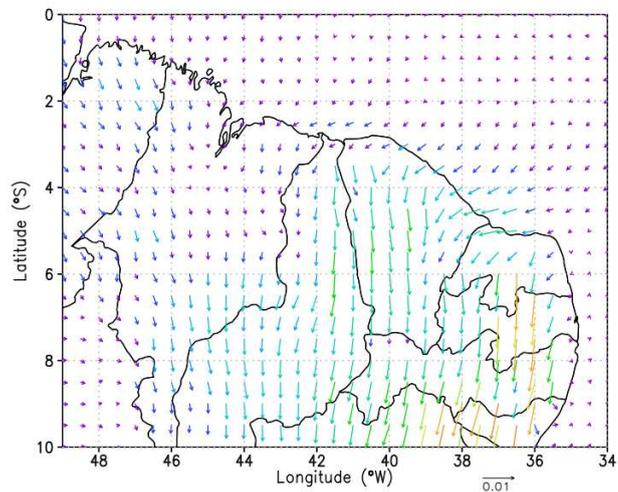


h) 800 hPa

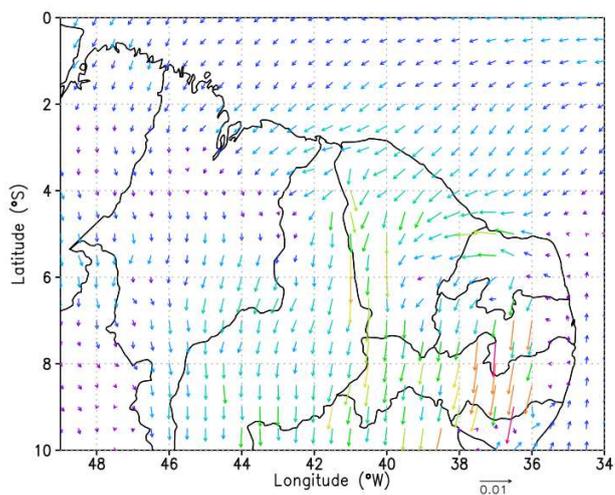
**Figura 17:** Média mensal para o mês de Fevereiro, às 19Z (16h), nos níveis de 975, 950, 900, 875, 850, 825 e 800.



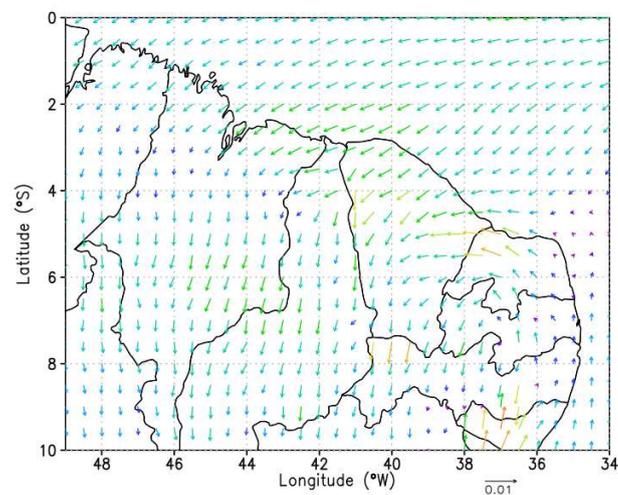
a) 975 hPa



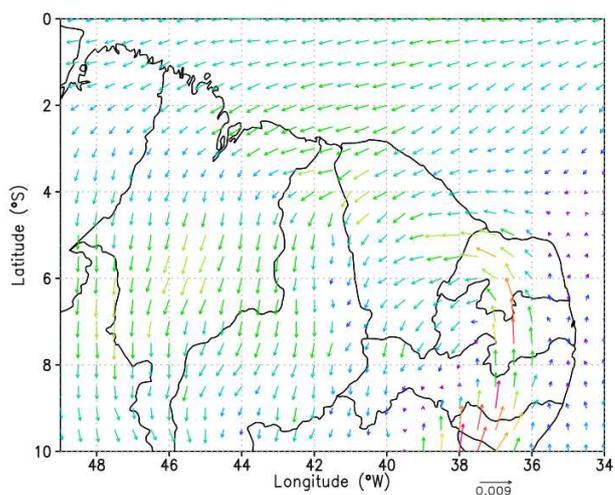
b) 950 hPa



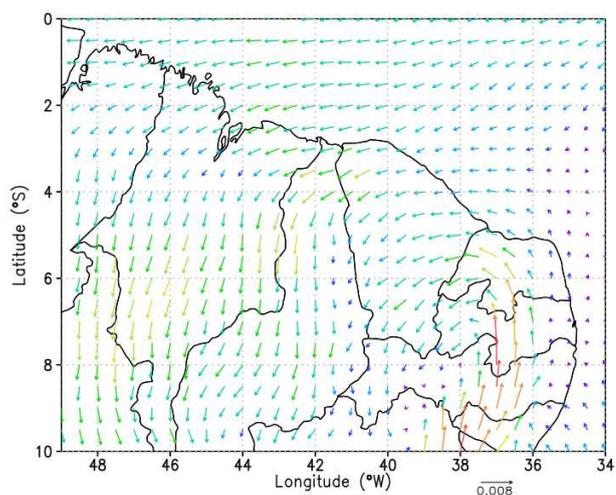
c) 925 hPa



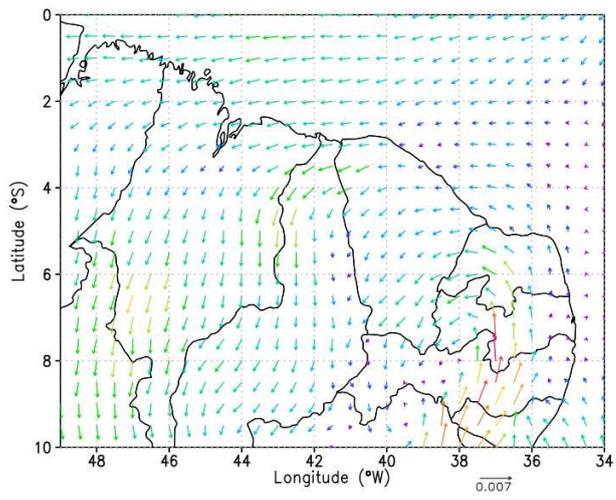
d) 900 hPa



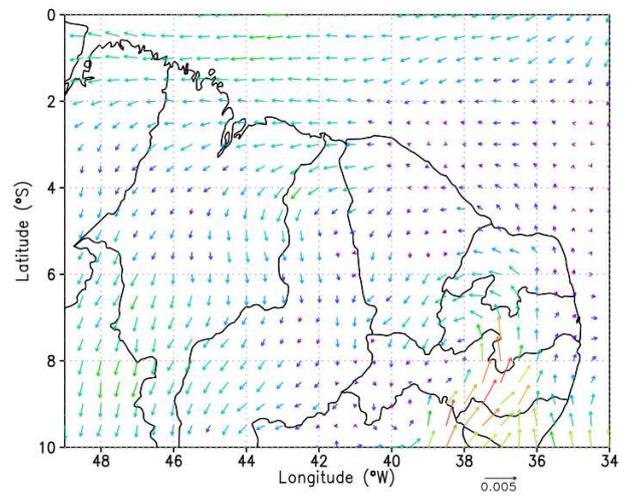
e) 875 hPa



f) 850 hPa

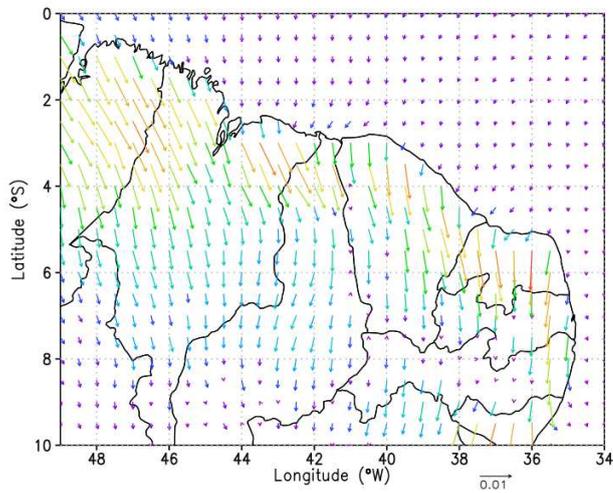


g) 825 hPa

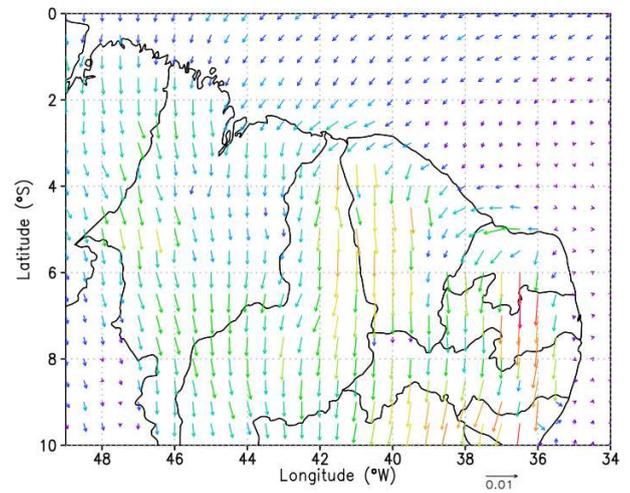


h) 800 hPa

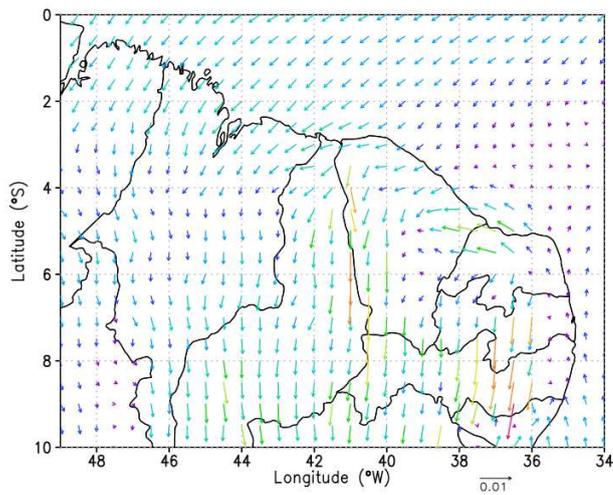
**Figura 18:** Média mensal para o mês de Março, às 19Z (16h), nos níveis de 975, 950, 900, 875, 850, 825 e 800.



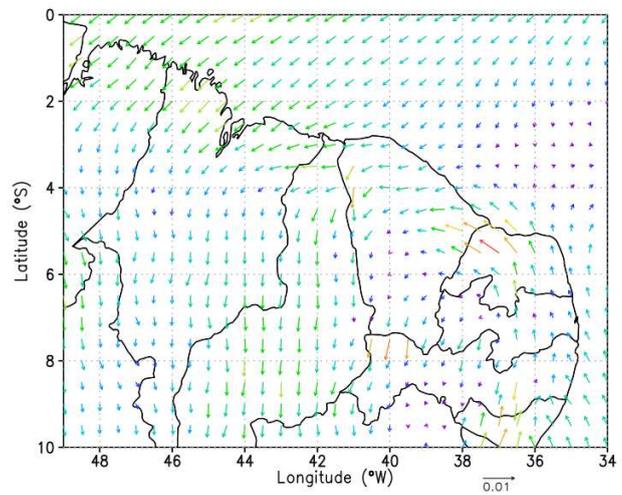
a) 975 hPa



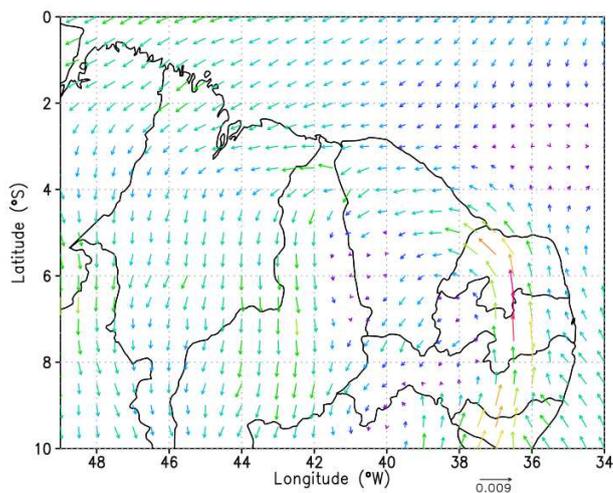
b) 950 hPa



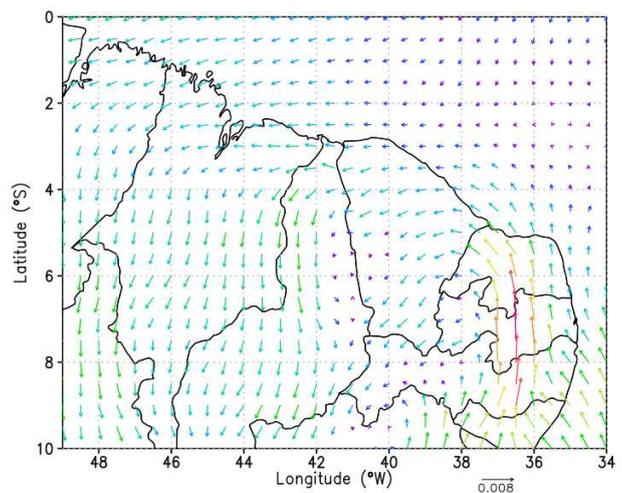
c) 925 hPa



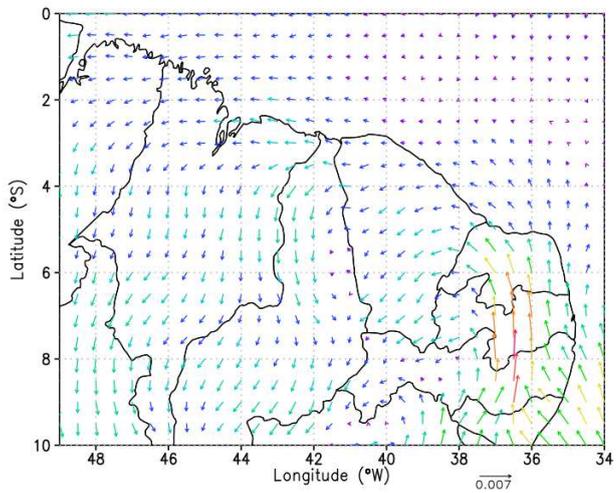
d) 900 hPa



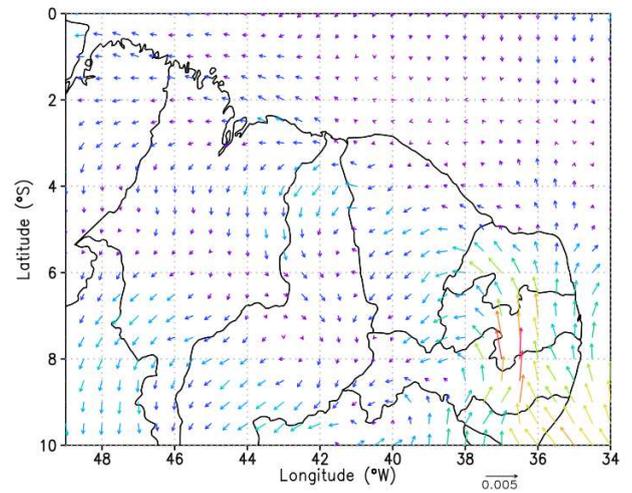
e) 875 hPa



f) 850 hPa

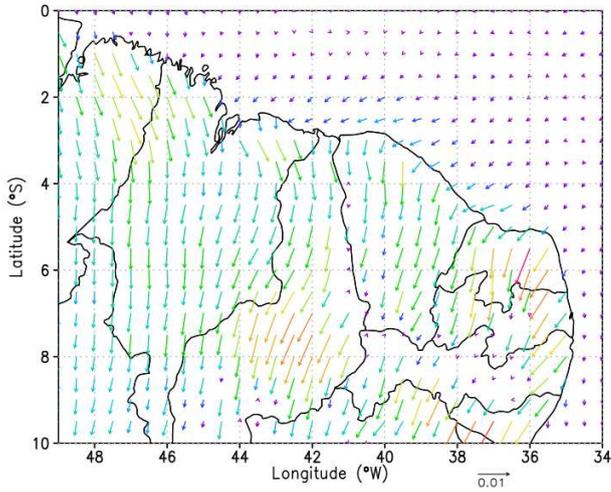


g) 825 hPa

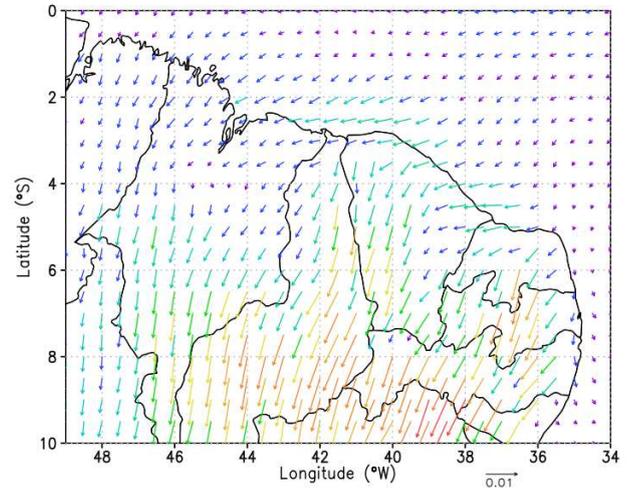


h) 800 hPa

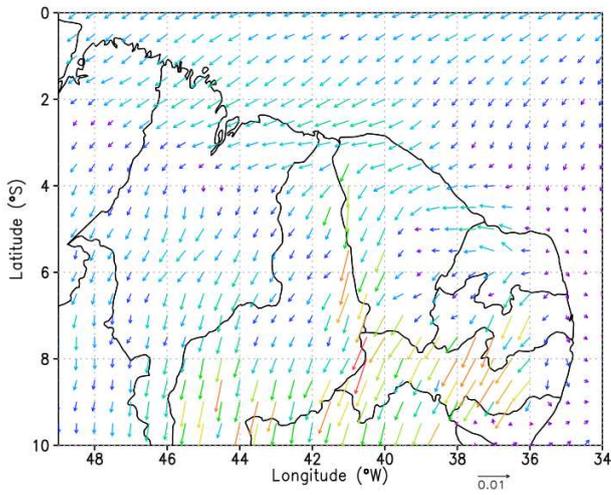
**Figura 19:** Média mensal para o mês de Abril, às 19Z (16h), nos níveis de 975, 950, 900, 875, 850, 825 e 800.



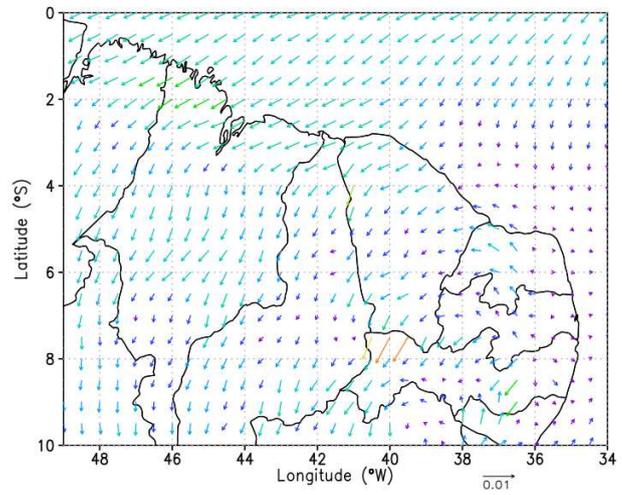
a) 975 hPa



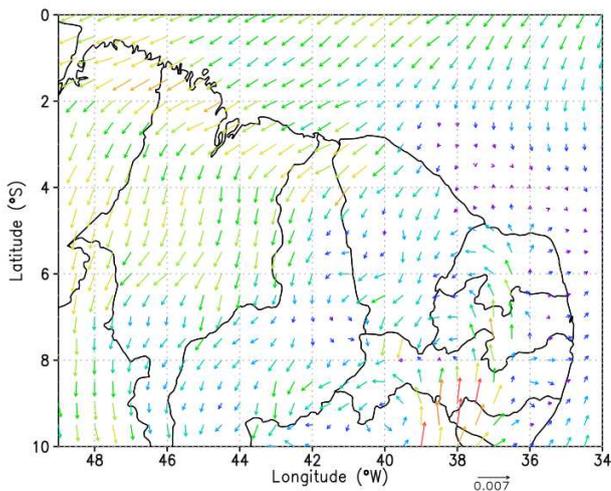
b) 950 hPa



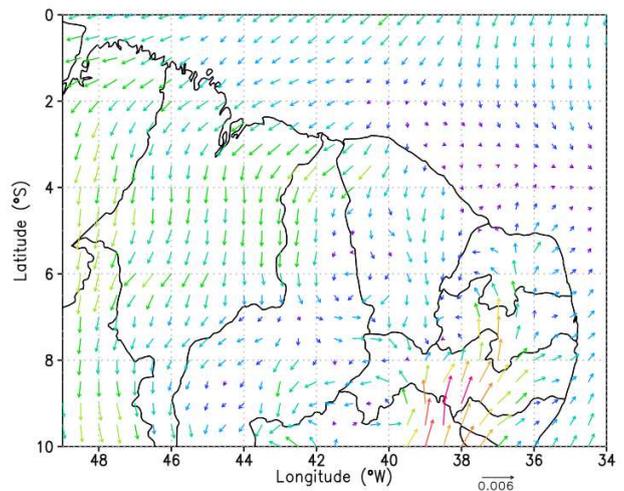
c) 925 hPa



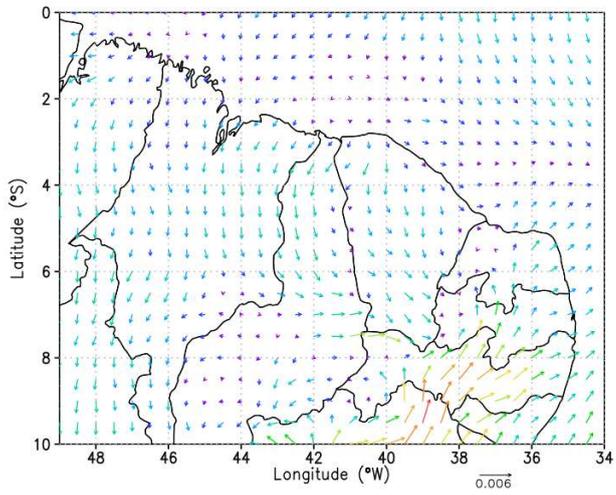
d) 900 hPa



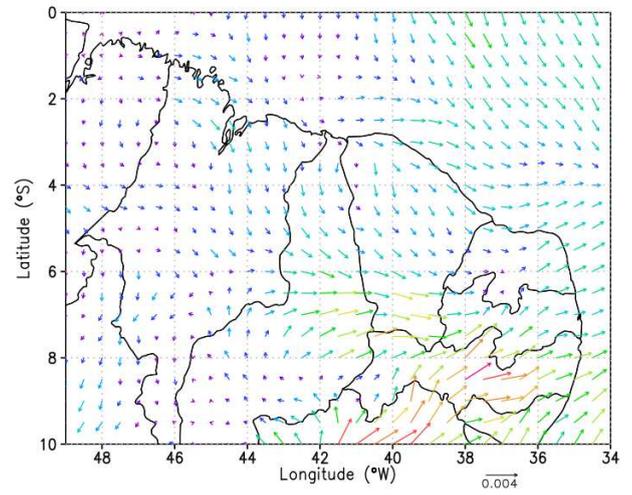
e) 875 hPa



f) 850 hPa

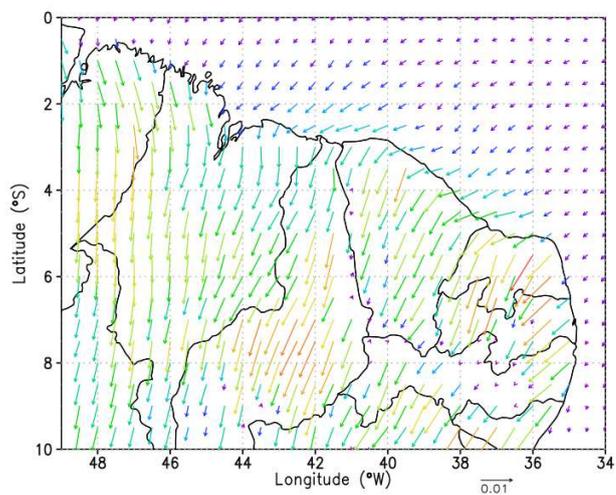


g) 825 hPa

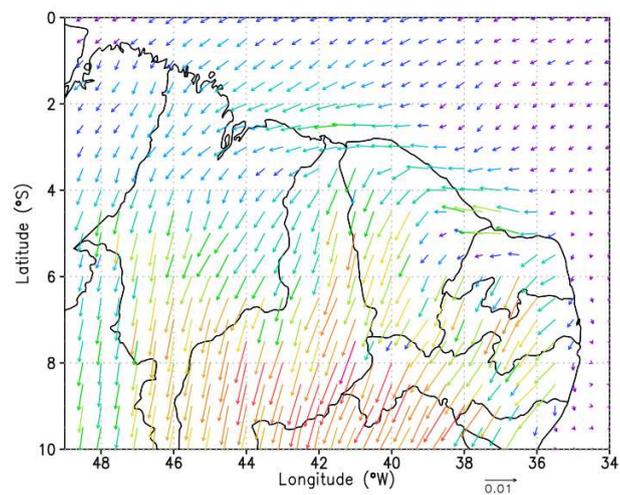


h) 800 hPa

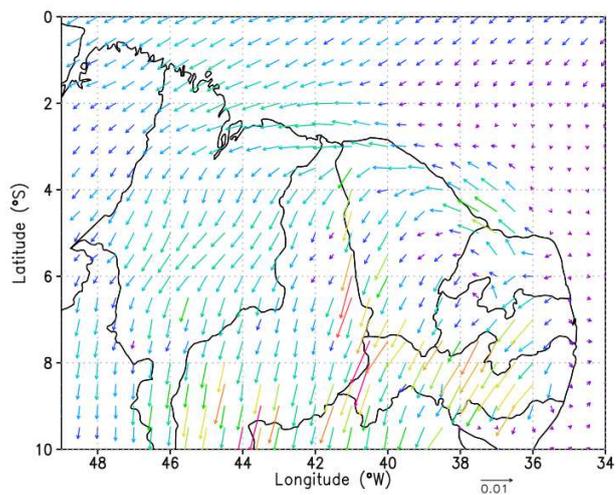
**Figura 20:** Média mensal para o mês de Maio, às 19Z (16h), nos níveis de 975, 950, 900, 875, 850, 825 e 800.



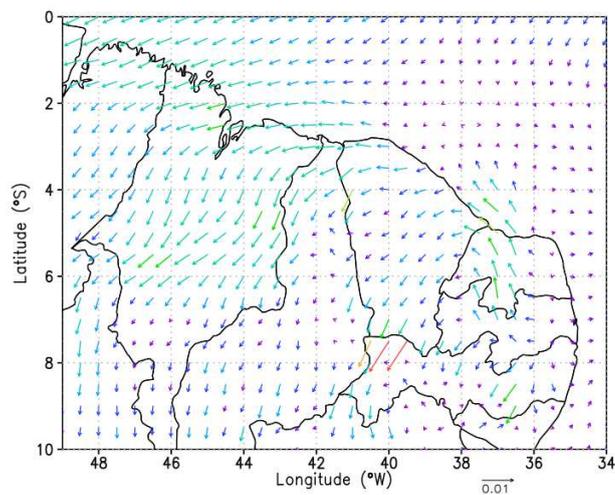
a) 975 hPa



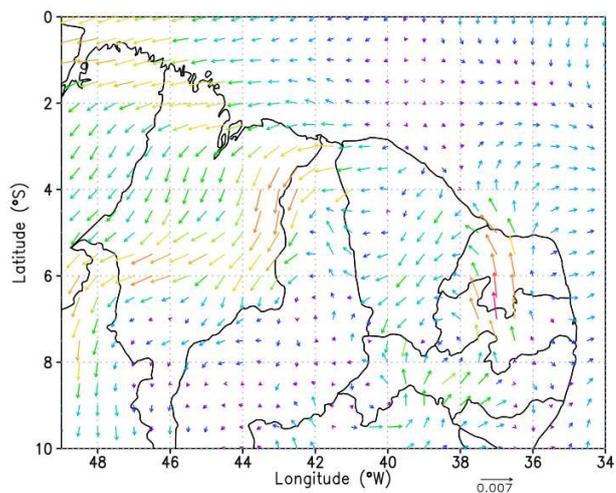
b) 950 hPa



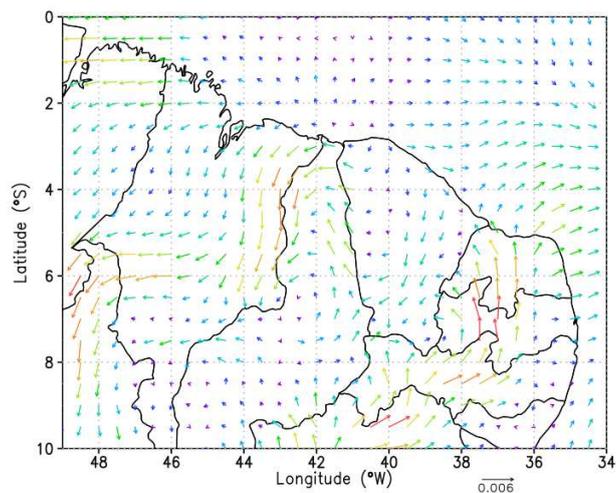
c) 925 hPa



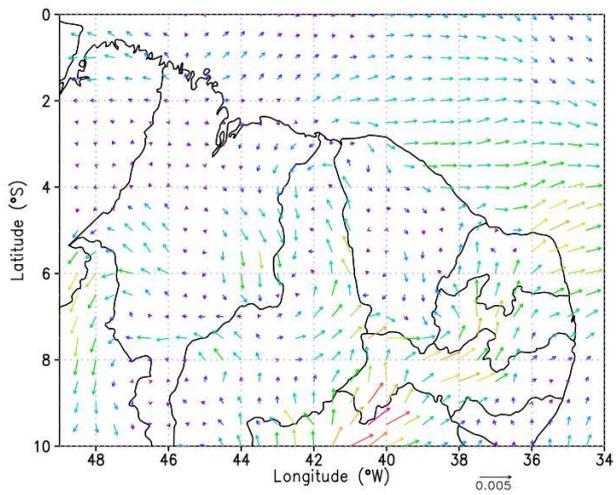
d) 900 hPa



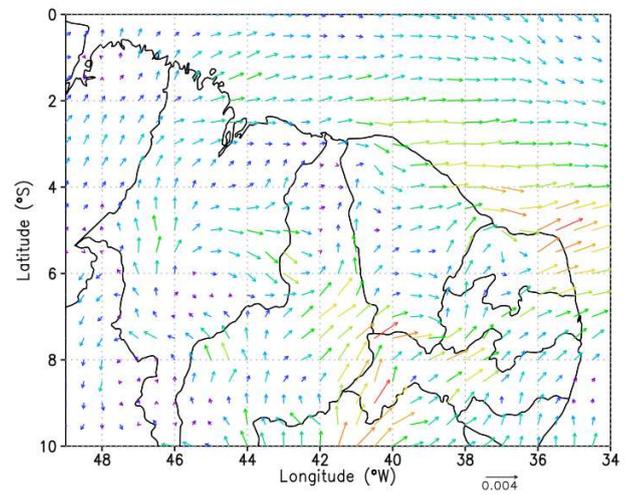
e) 875 hPa



f) 850 hPa

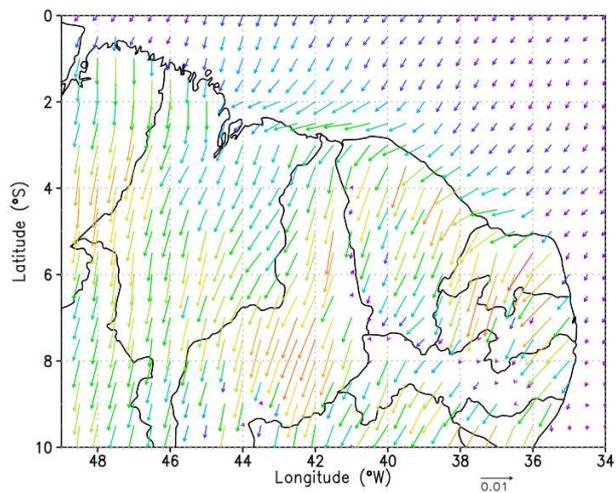


g) 825 hPa

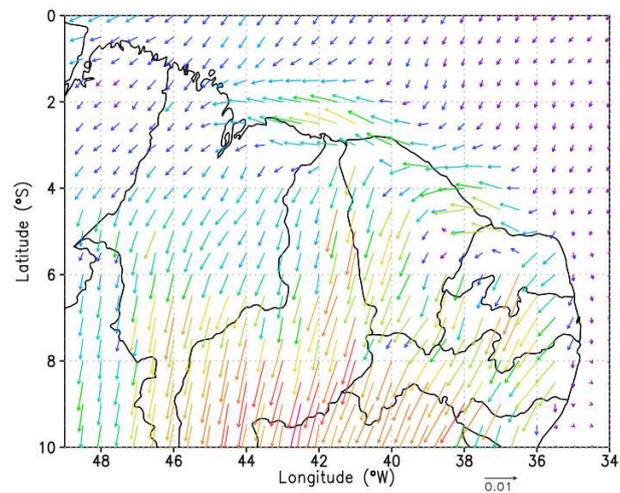


h) 800 hPa

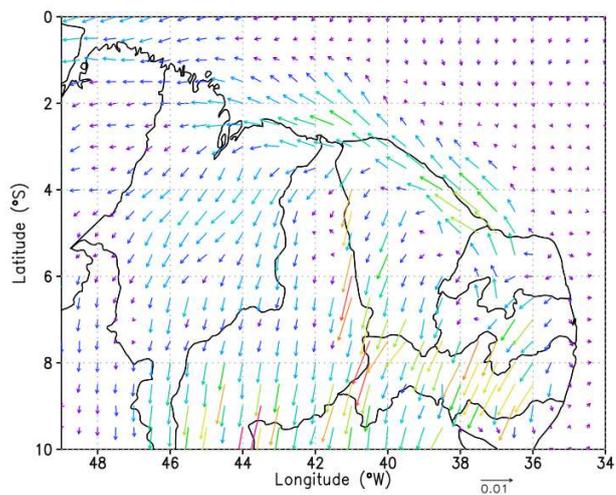
**Figura 21:** Média mensal para o mês de Junho, às 19Z (16h), nos níveis de 975, 950, 900, 875, 850, 825 e 800.



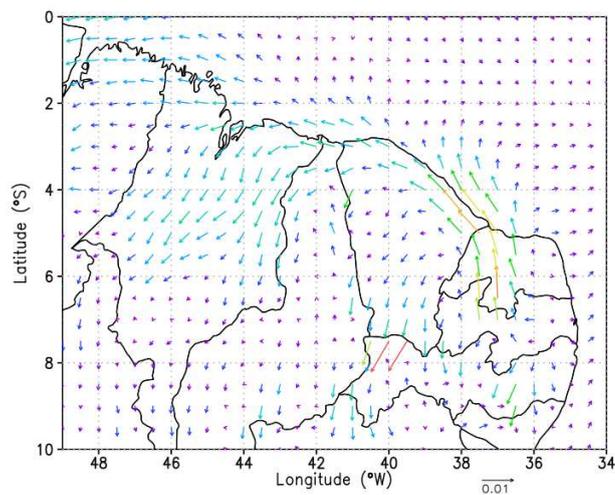
a) 975 hPa



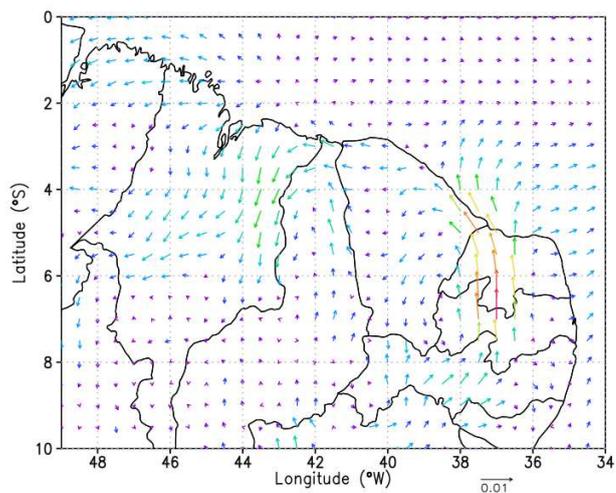
b) 950 hPa



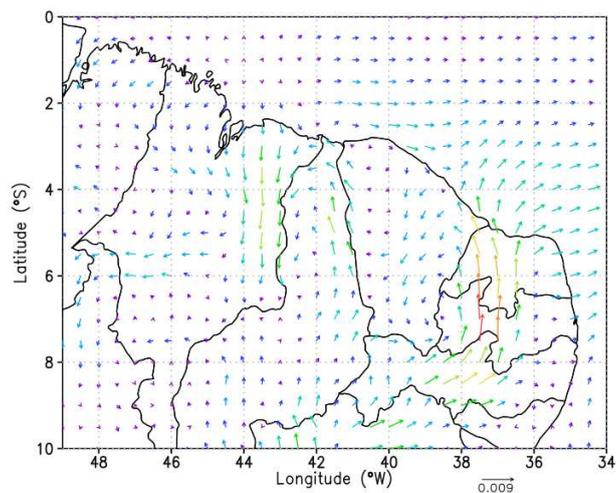
c) 925 hPa



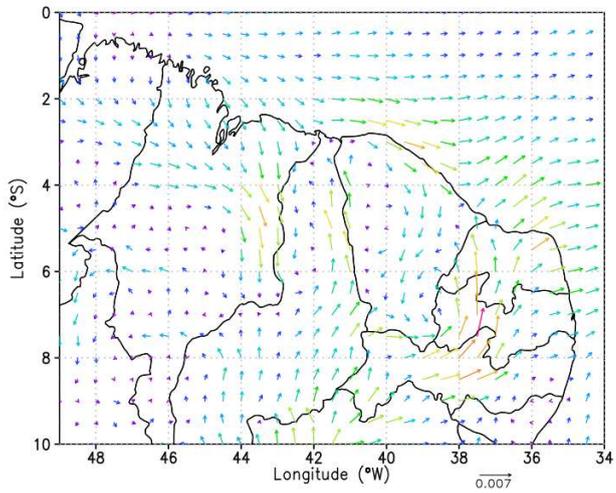
d) 900 hPa



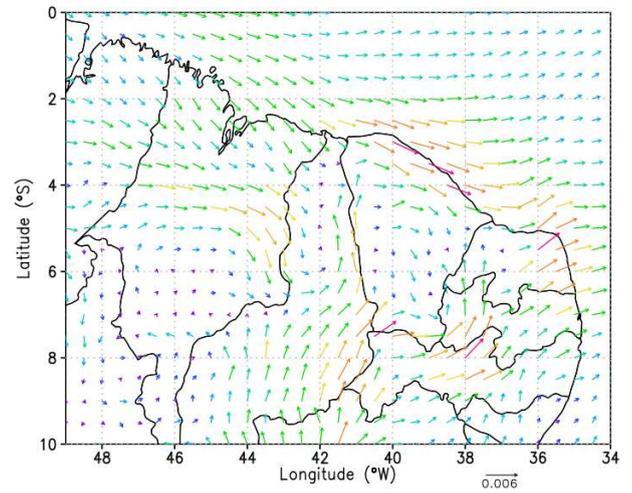
e) 875 hPa



f) 850 hPa

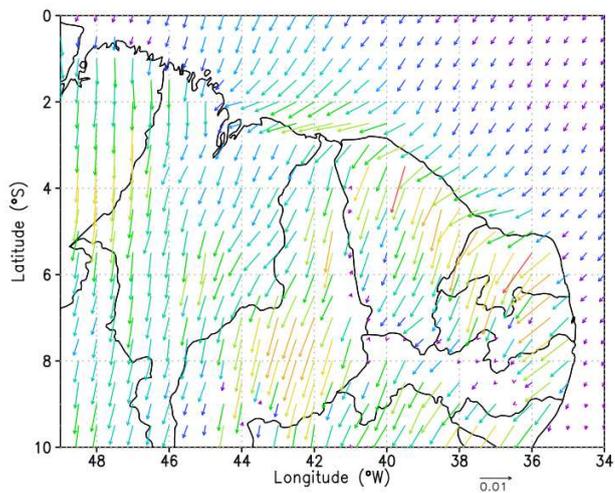


g) 825 hPa

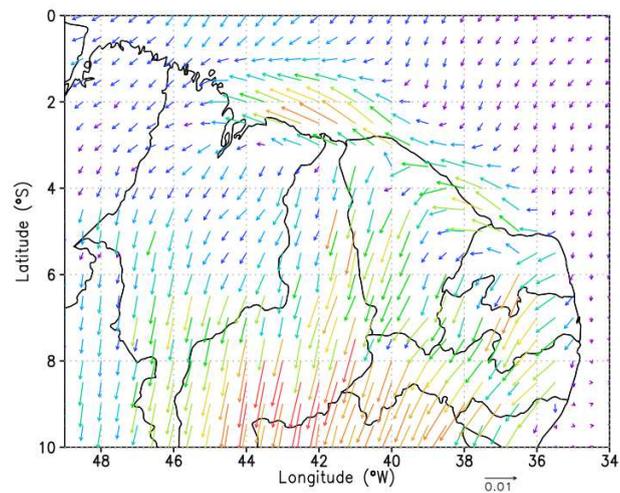


h) 800 hPa

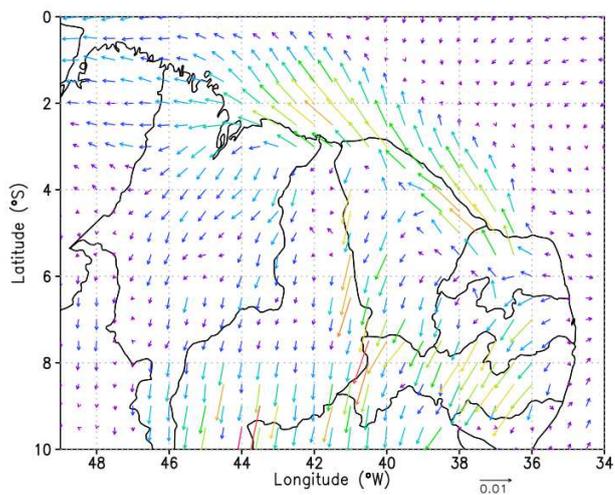
**Figura 22:** Média mensal para o mês de Julho, às 19Z (16h), nos níveis de 975, 950, 900, 875, 850, 825 e 800.



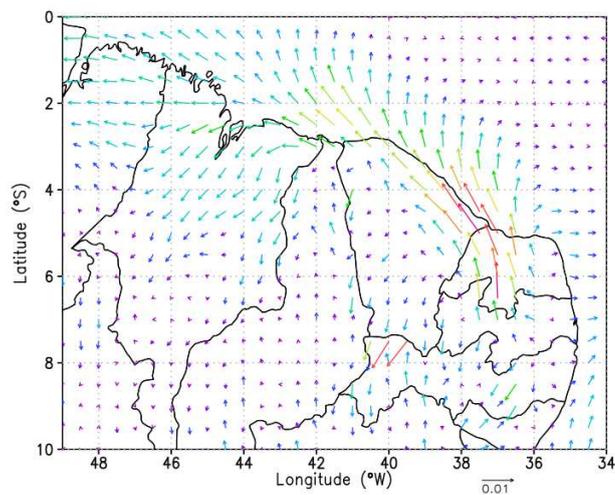
a) 975 hPa



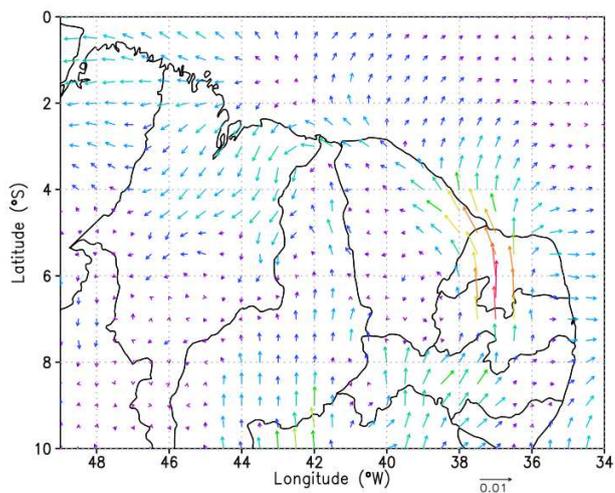
b) 950 hPa



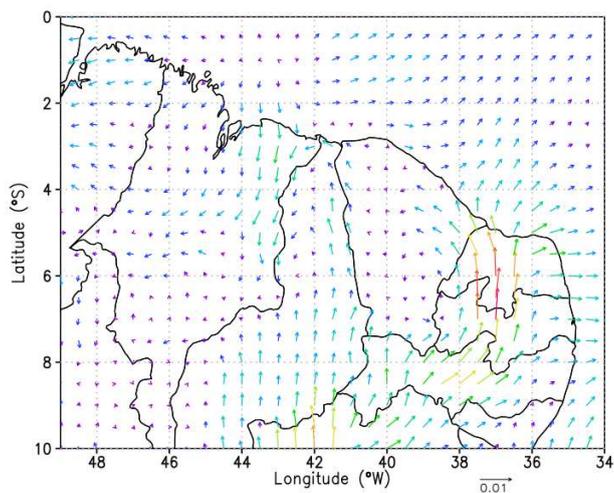
c) 925 hPa



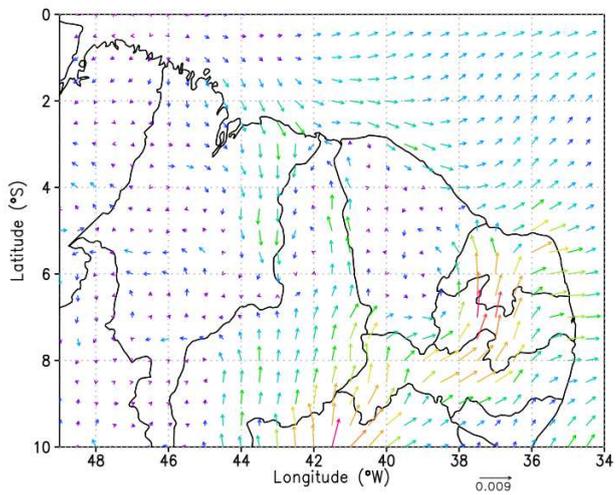
d) 900 hPa



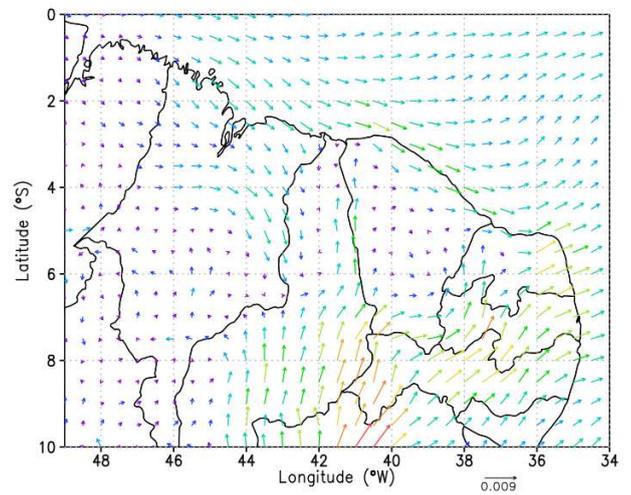
e) 875 hPa



f) 850 hPa

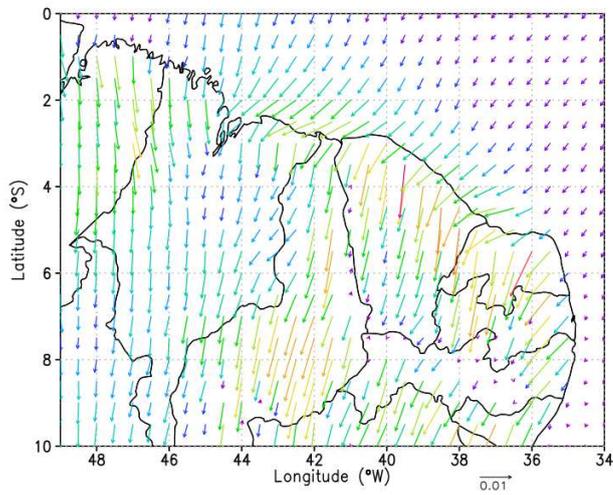


g) 825 hPa

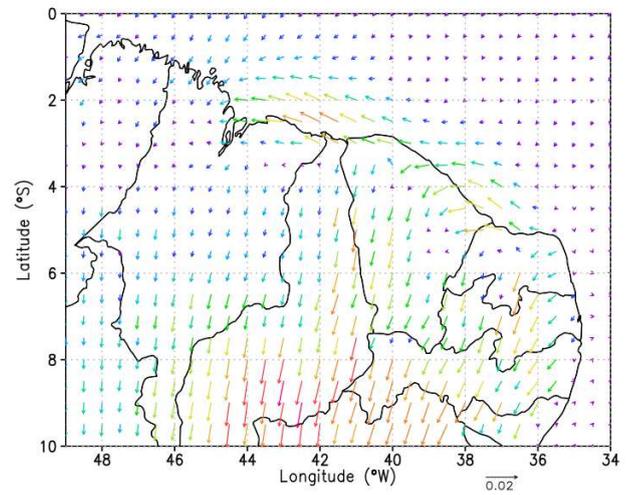


h) 800 hPa

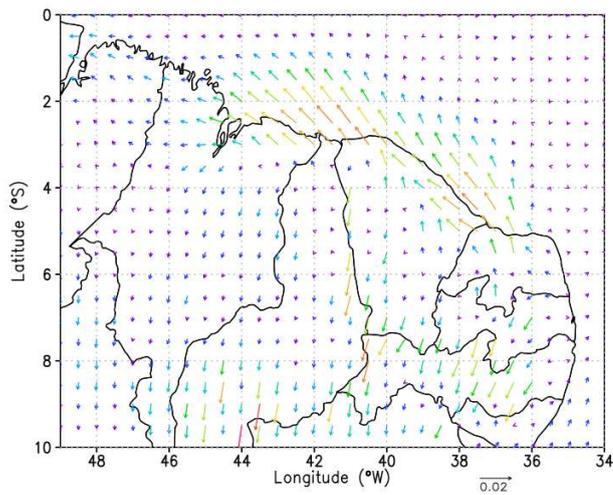
**Figura 23:** Média mensal para o mês de Agosto, às 19Z (16h), nos níveis de 975, 950, 900, 875, 850, 825 e 800.



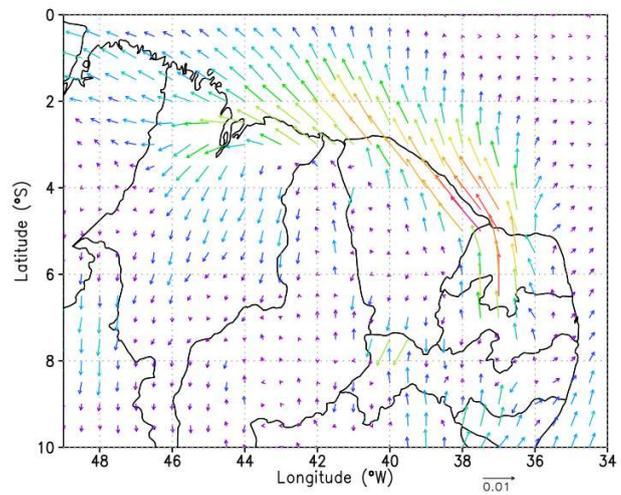
a) 975 hPa



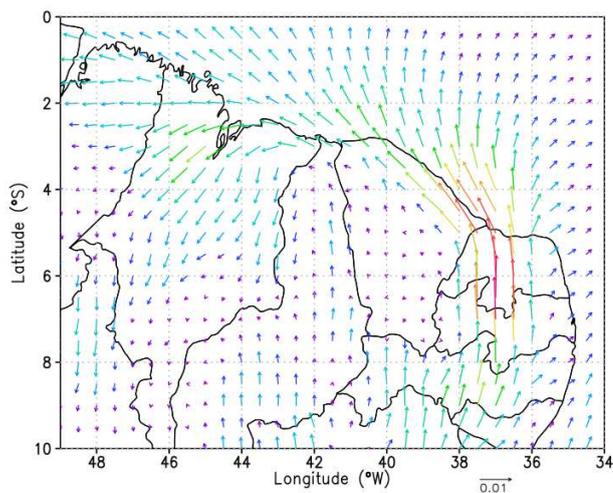
b) 950 hPa



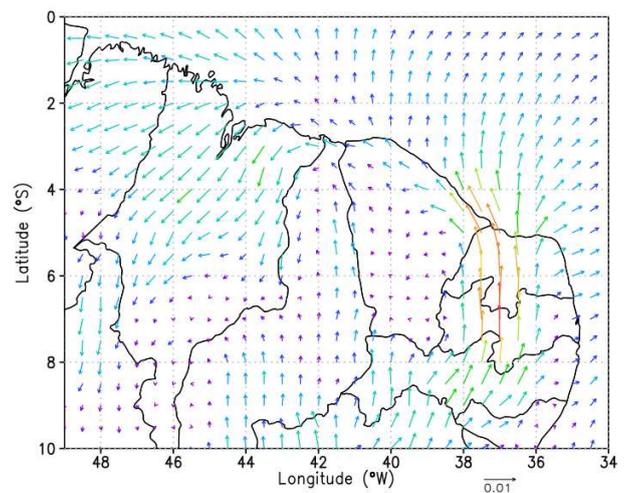
c) 925 hPa



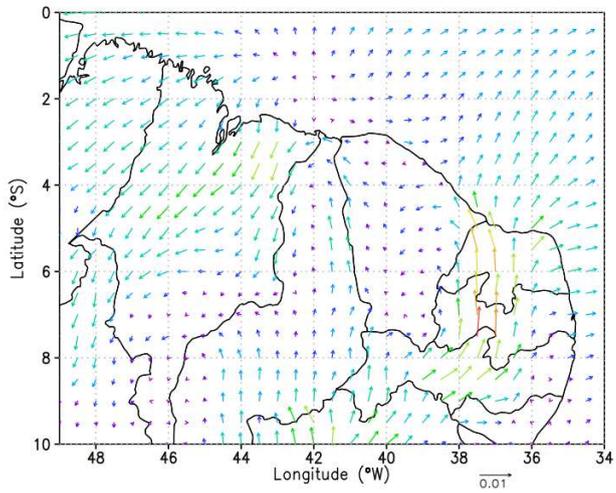
d) 900 hPa



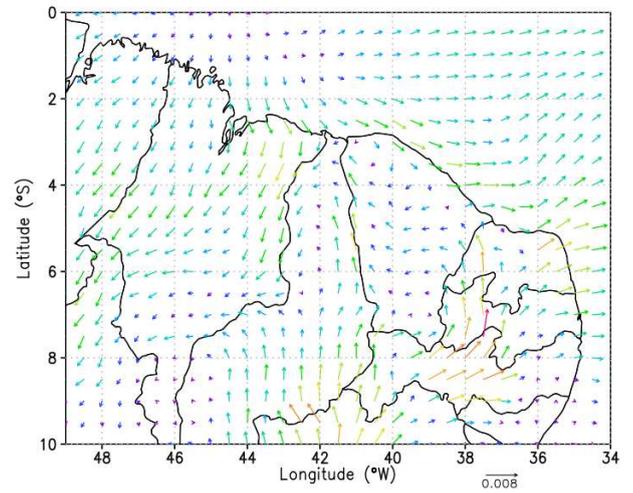
e) 875 hPa



f) 850 hPa

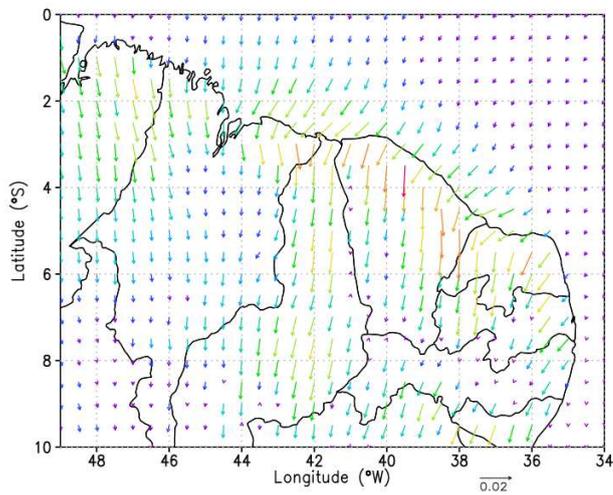


g) 825 hPa

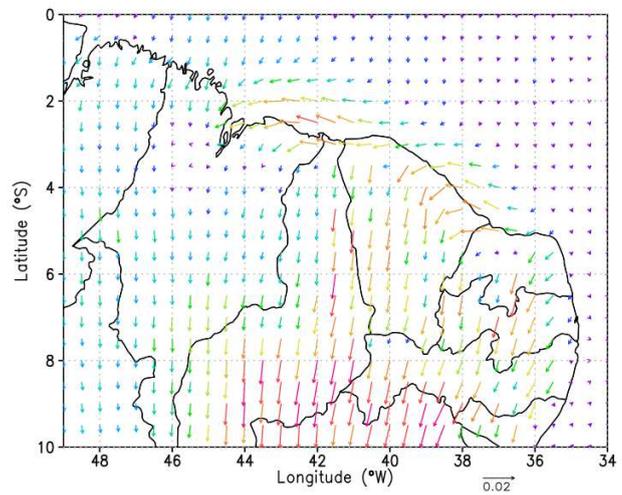


h) 800 hPa

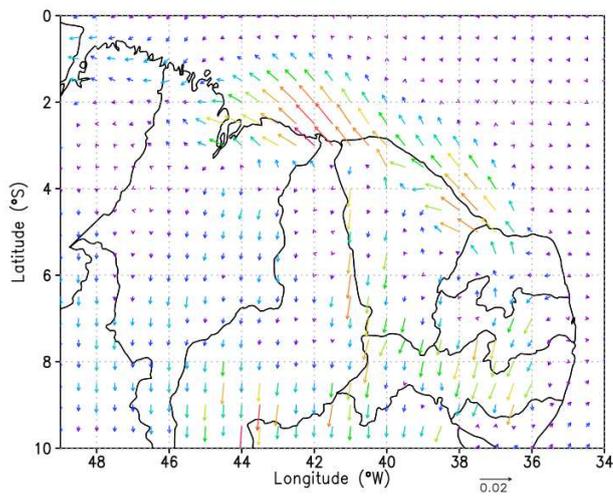
**Figura 24:** Média mensal para o mês de Setembro, às 19Z (16h), nos níveis de 975, 950, 900, 875, 850, 825 e 800.



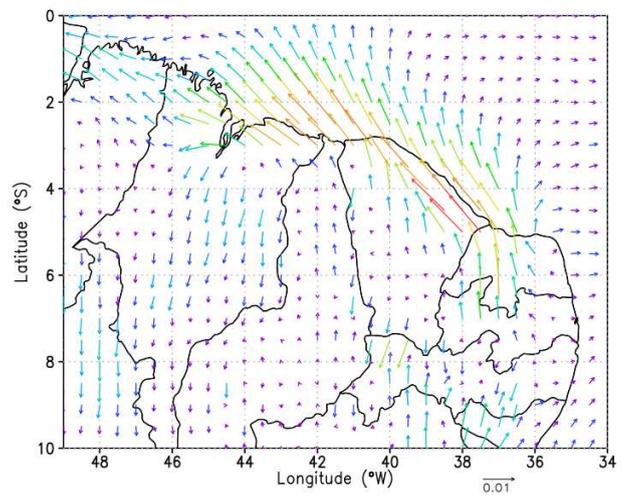
a) 975 hPa



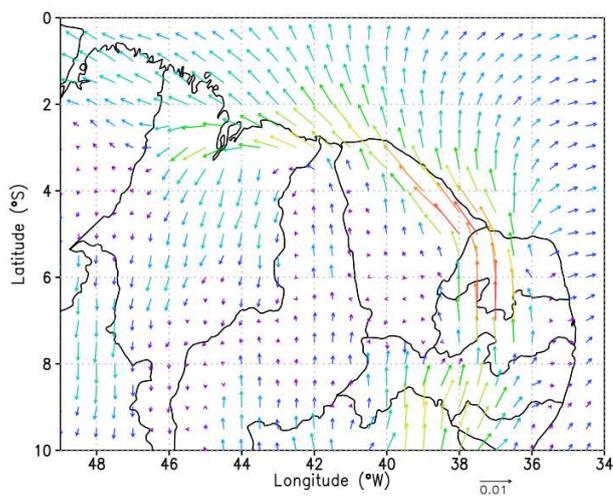
b) 950 hPa



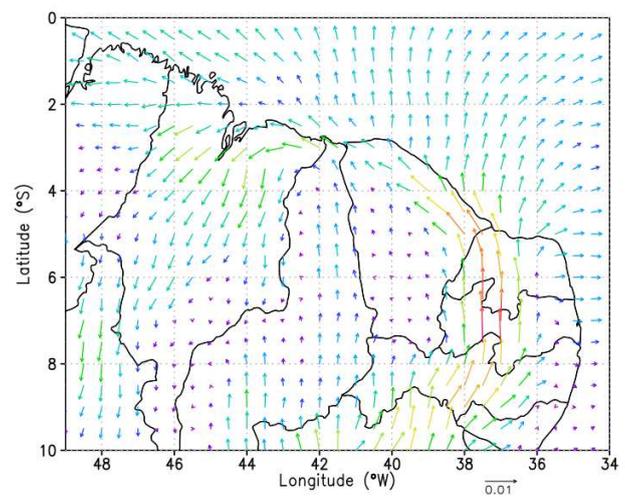
c) 925 hPa



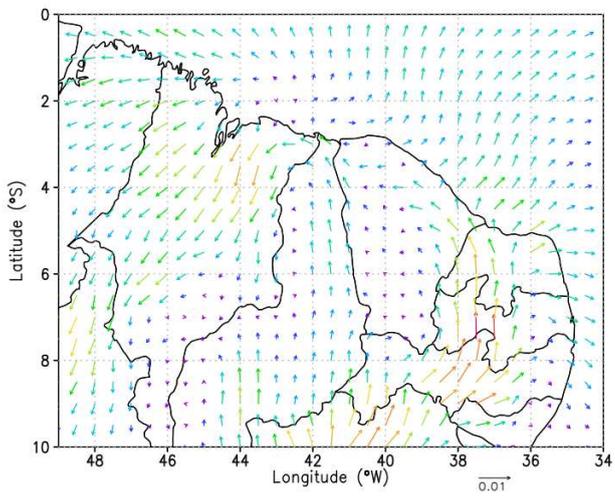
d) 900 hPa



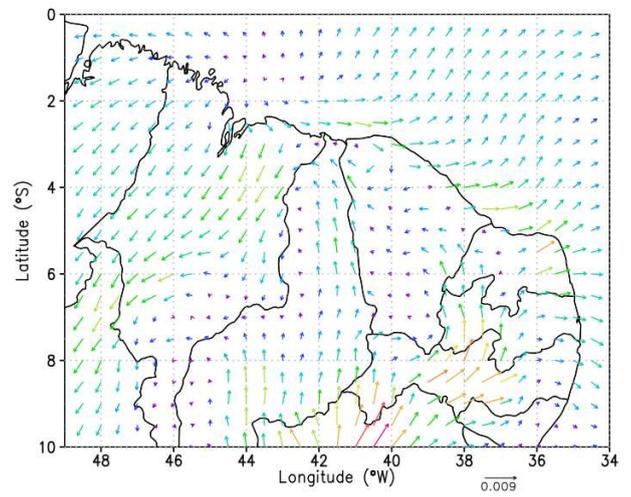
e) 875 hPa



f) 850 hPa

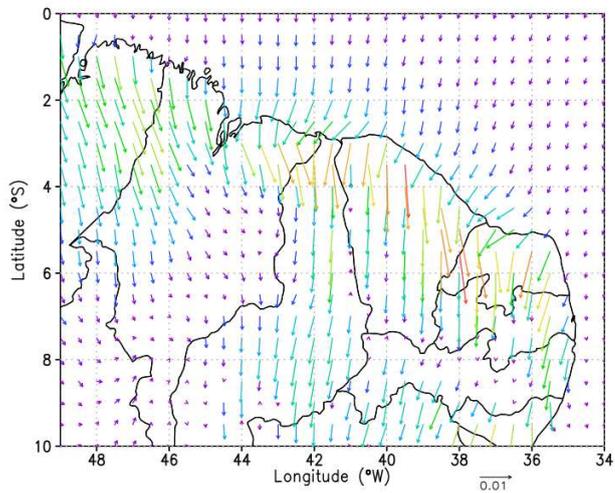


g) 825 hPa

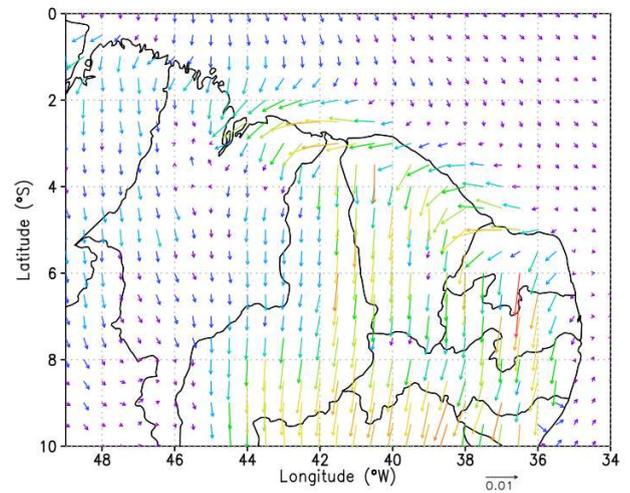


h) 800 hPa

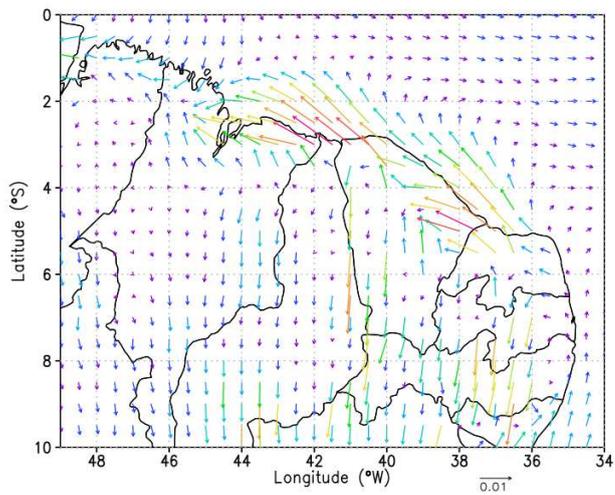
**Figura 25:** Média mensal para o mês de Outubro, às 19Z (16h), nos níveis de 975, 950, 900, 875, 850, 825 e 800.



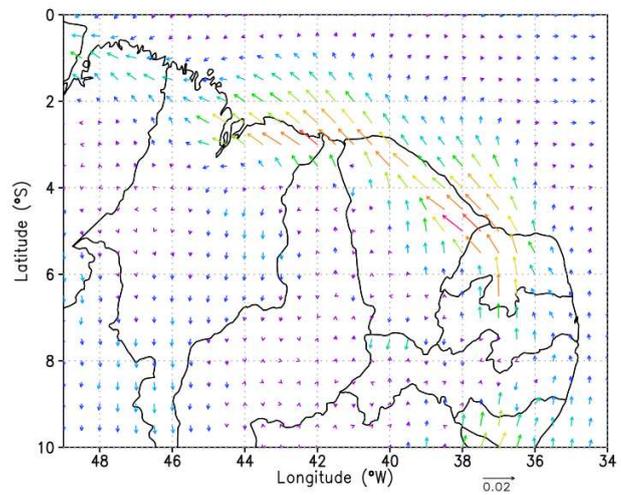
a) 975 hPa



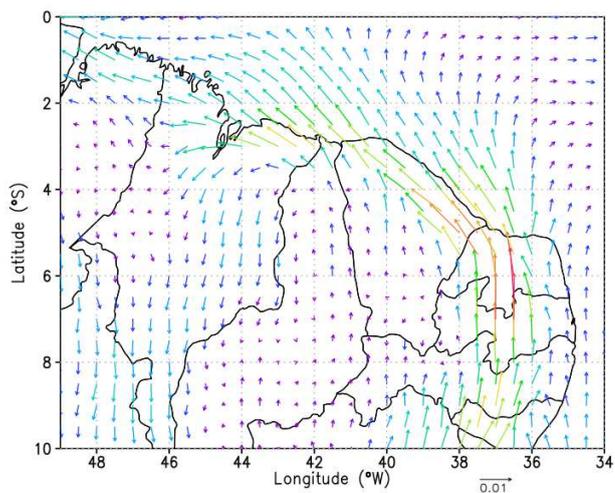
b) 950 hPa



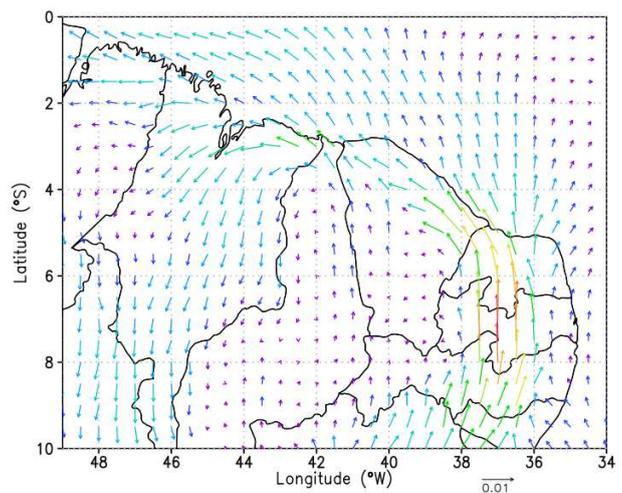
c) 925 hPa



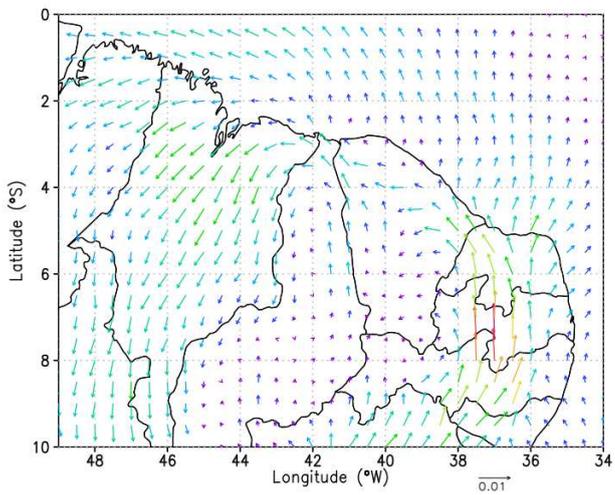
d) 900 hPa



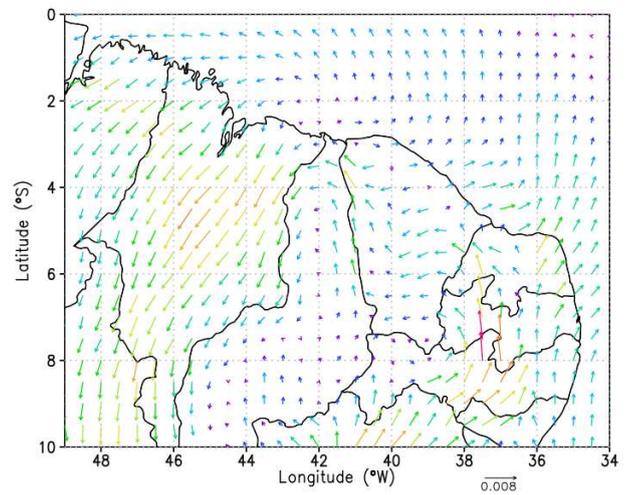
e) 875 hPa



f) 850 hPa

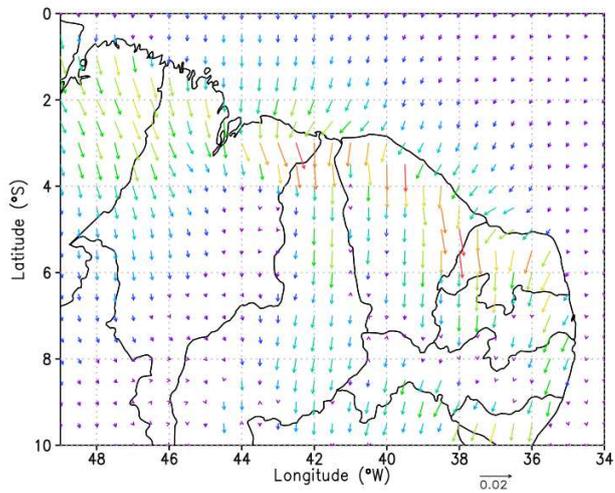


g) 825 hPa

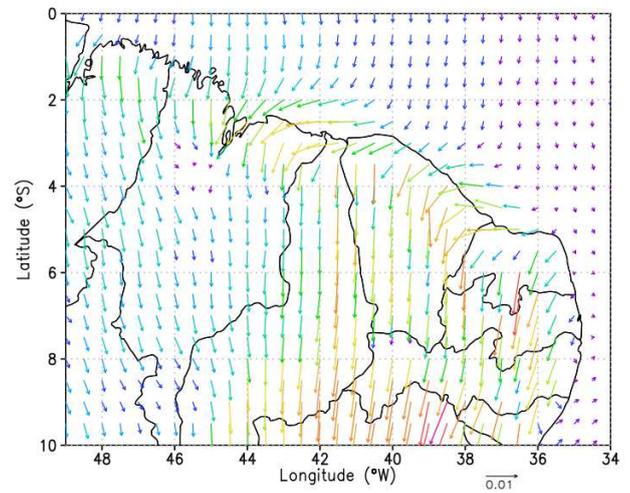


h) 800 hPa

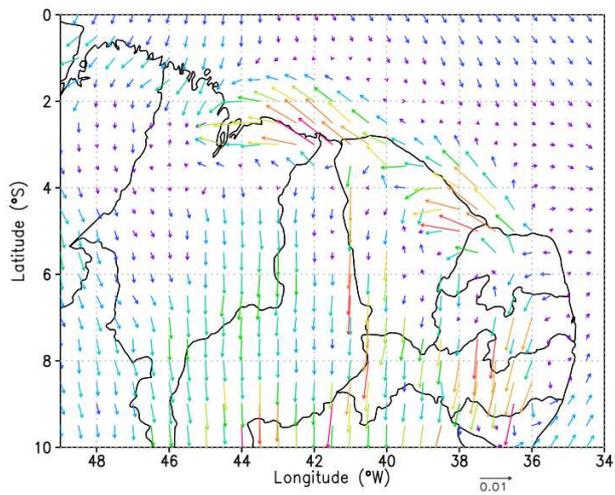
**Figura 26:** Média mensal para o mês de Novembro, às 19Z (16h), nos níveis de 975, 950, 900, 875, 850, 825 e 800.



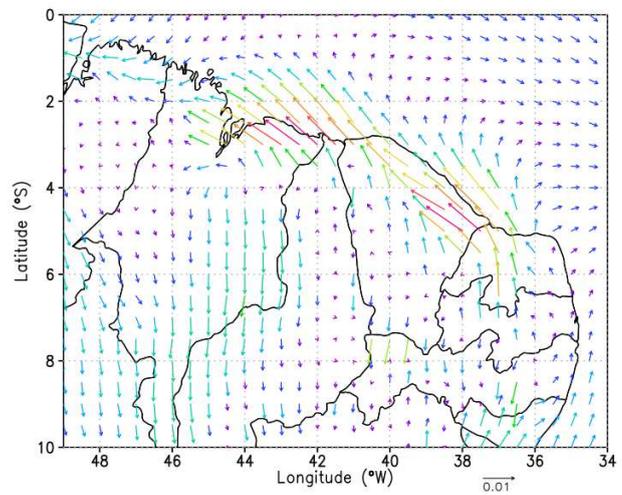
a) 975 hPa



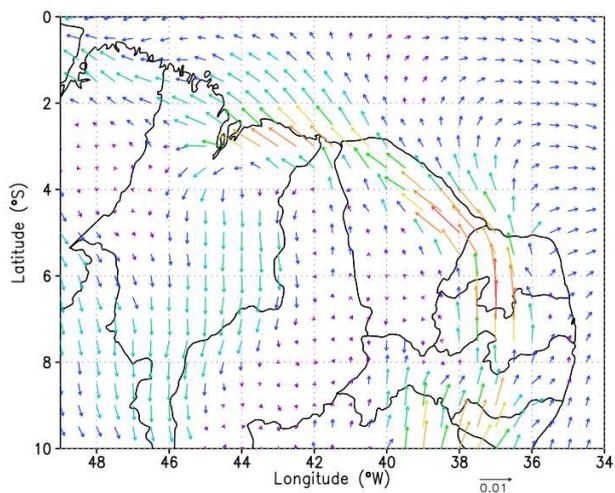
b) 950 hPa



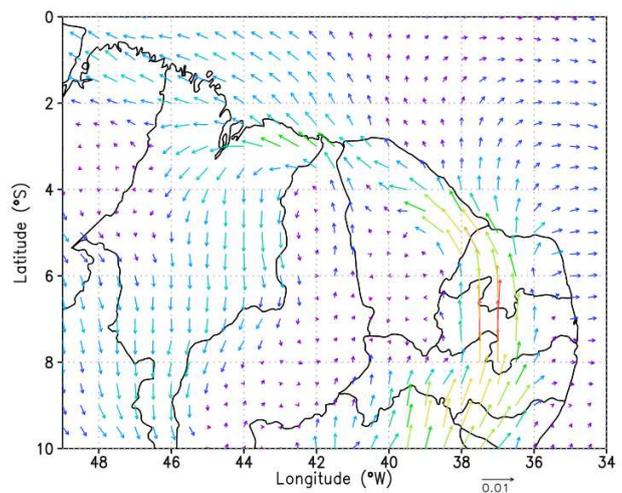
c) 925 hPa



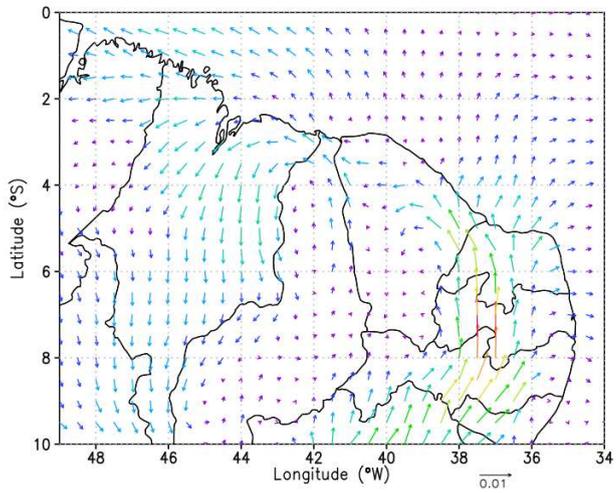
d) 900 hPa



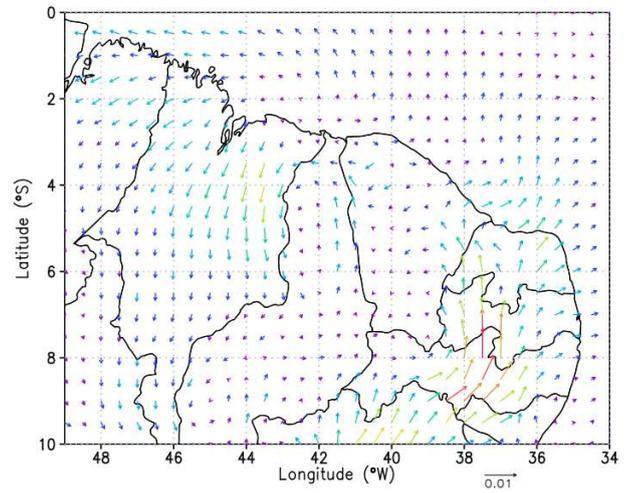
e) 875 hPa



f) 850 hPa

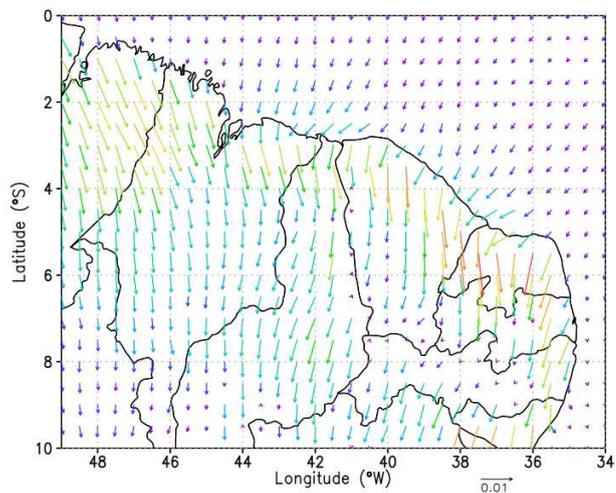


g) 825 hPa

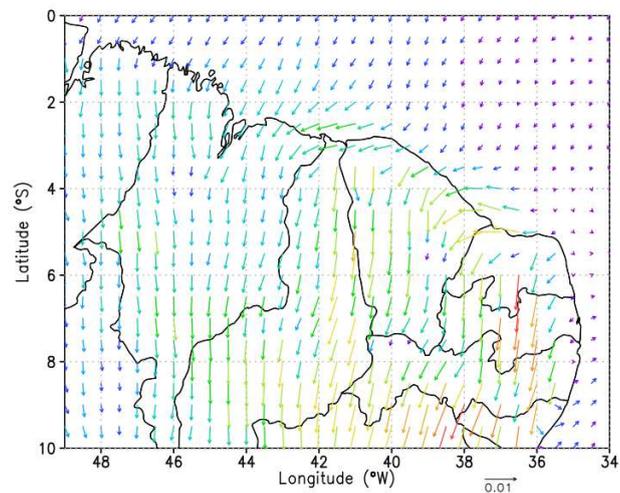


h) 800 hPa

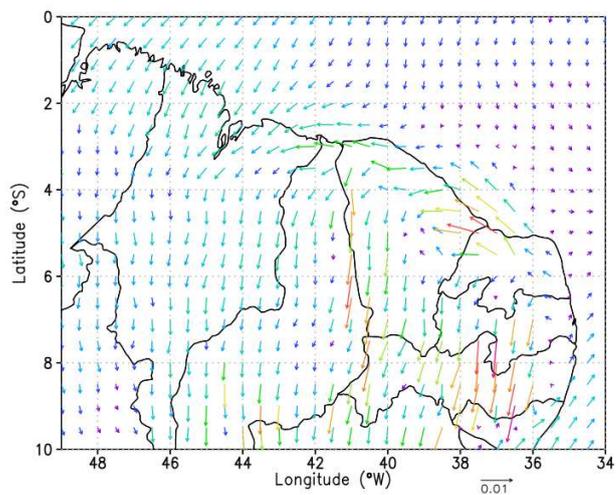
**Figura 27:** Média mensal para o mês de Dezembro, às 19Z (16h), nos níveis de 975, 950, 900, 875, 850, 825 e 800.



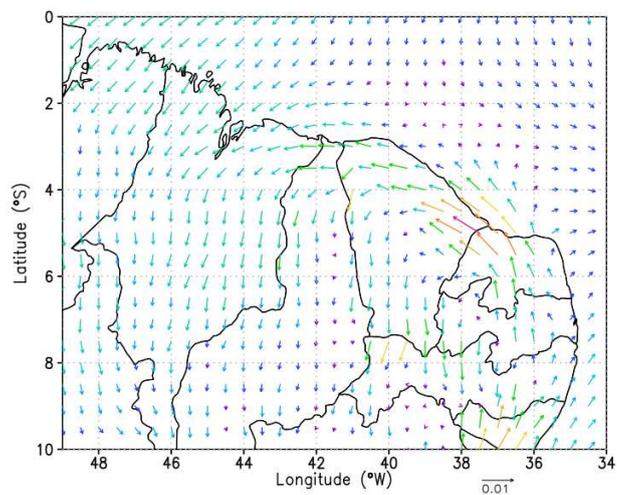
a) 975 hPa



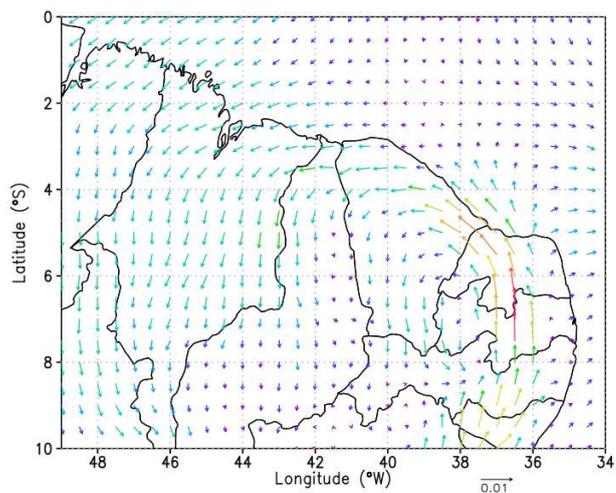
b) 950 hPa



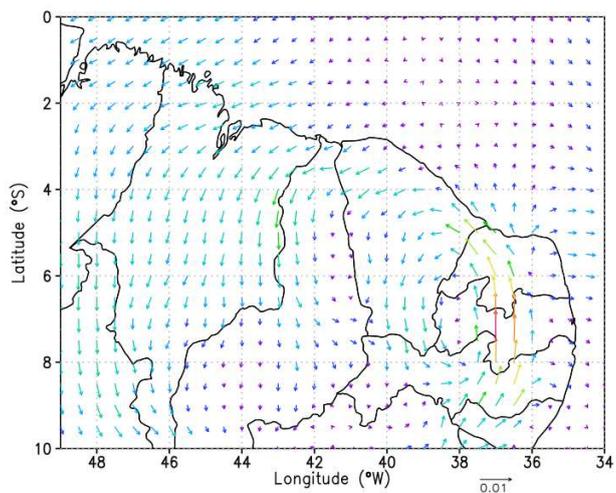
c) 925 hPa



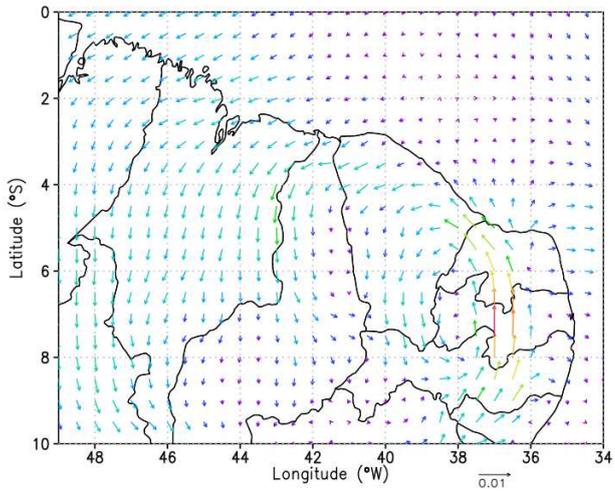
d) 900 hPa



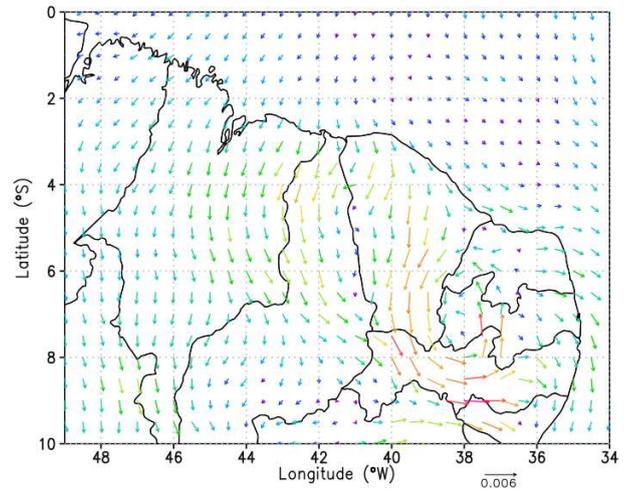
e) 875 hPa



f) 850 hPa



g) 825 hPa



h) 800 hPa