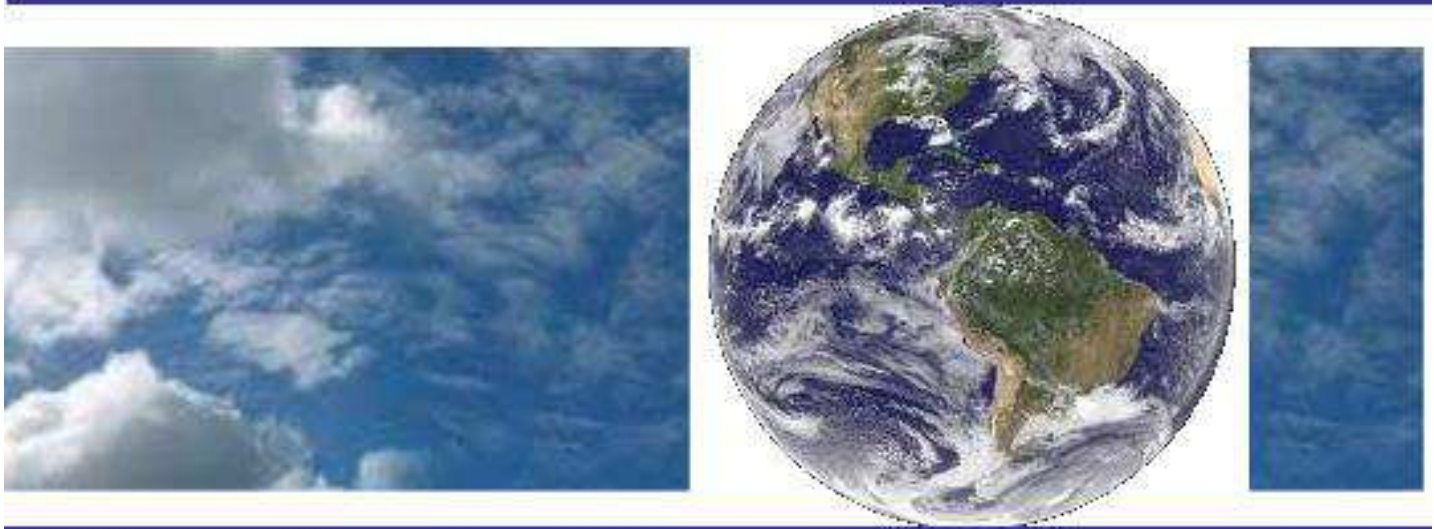


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**

# **METEOROLOGIA**



**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Francielho Fernandes da Silva Justino**

**Análise Das Brisas De Vale e Montanha: Influência  
e Comportamento Na Região Nordeste Do Brasil**

**Campina Grande, outubro de 2024**



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

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**ANÁLISE DAS BRISAS DE VALE E MONTANHA: INFLUÊNCIA E  
COMPORTAMENTO NA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL**

**FRANCIELHO FERNANDES DA SILVA JUSTINO**

Campina Grande-PB  
2024

**FRANCIELHO FERNANDES DA SILVA JUSTINO**

**ANÁLISE DAS BRISAS VALE E MONTANHA: INFLUÊNCIA E  
COMPORTAMENTO NA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL**

Dissertação realizada sob orientação do Prof. Dr. Enio Pereira de Souza, apresentada ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande, complementação aos requisitos para 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

J96a

Justino, Francielho Fernandes da Silva.

Análise das brisas de vale e montanha: influência e comportamento na região Nordeste do Brasil / Francielho Fernandes da Silva Justino. – Campina Grande, 2024.

61 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. Circulação de Brisas de Vale e Montanha – Nordeste Brasileiro. 3. Topografia. 4. Vetor Vorticidade. I. Souza, Enio Pereira de. II. Título.

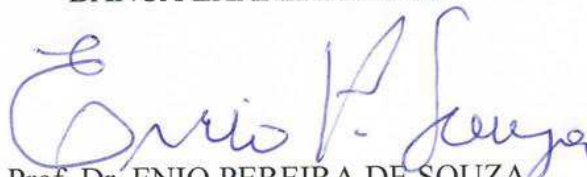
CDU 551.515.6(043)

FRANCIELHO FERNANDES DA SILVA JUSTINO

ANÁLISE DAS BRISAS DE VALE E MONTANHA: INFLUÊNCIA E  
COMPORTAMENTO NA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 29/08/2024

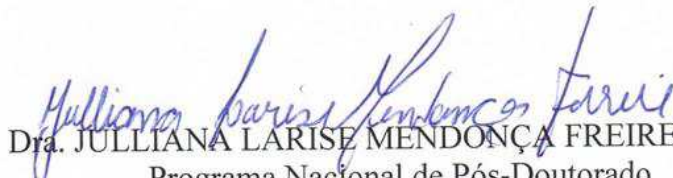
BANCA EXAMINADORA



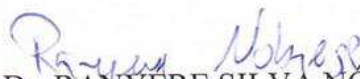
Prof. Dr. ENIO PEREIRA DE SOUZA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



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. RANYERE SILVA NOBREGA  
Unidade Acadêmica de Geografia  
Universidade Federal de Campina Grande

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus amados pais meus avós, que sempre me apoiaram com amor e dedicação inabalável. Aos meus queridos irmãos, que compartilharam risos, desafios e memórias inesquecíveis ao longo da minha jornada. À minha namorada Larissa, cujo carinho e compreensão tornaram cada passo mais significativo. E a todos os meus familiares e amigos, cujo apoio e encorajamento moldaram meu caminho e fizeram deste momento possível. Cada um de vocês é uma parte fundamental do meu coração e inspiração, e é com profundo carinho que dedico este trabalho a todos os que fazem parte de minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus e a Nossa Senhora, pela força concedida diariamente, por não me deixar fracassar em meios aos obstáculos, e por fazer com que eu perseverasse na fé para conclusão deste trabalho.

Em especial ao meu orientador, Prof. Dr. Enio Pereira de Souza pela sua orientação, paciência e sabedoria que foram fundamentais para meu crescimento acadêmico e pessoal. Suas orientações não apenas esclareceram os caminhos mais complexos da pesquisa, mas também me ensinaram lições valiosas sobre persistência, dedicação e a importância de nunca parar de aprender.

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos os membros que compõem o departamento do PPGMET, em especial a Arilene, pela atenção e responsabilidade para com o seu serviço e comunicação. E a tantos outros que tornaram possível a minha jornada acadêmica.

A CAPES, pela concessão da bolsa.

*“Por uma graça fielmente recebida, Ele me concedia uma multidão de outras.”*

*– Santa Teresinha do Menino Jesus*



## **RESUMO**

As brisas de vale e montanha são circulações atmosféricas locais que ocorrem em regiões de relevo acentuado, como montanhas e vales, devido às diferenças de aquecimento entre as encostas e as áreas baixas. Essas brisas têm um ciclo diário bem definido e influenciam a circulação atmosférica local, afetando variáveis como temperatura, umidade e vento. Este trabalho investigou a circulação de brisas de vale e montanha na região Nordeste do Brasil ao longo do ano de 2018, utilizando dados da quinta geração do projeto de reanálise do Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF). O objetivo foi analisar o comportamento e a intensidade dessas circulações nas regiões do vale do Açu e da Chapada Diamantina, utilizando como base os componentes zonal e meridional do vetor vorticidade horizontal. Os resultados indicaram que as brisas de vale, predominam durante o dia, e as brisas de montanha, que ocorrem à noite, apresentam padrões distintos de intensidade e direção, fortemente influenciados pela topografia de cada área. A análise ressalta como as características topográficas específicas de cada região moldam a dinâmica dessas circulações.

Palavras-chaves: Relevo, Circulações, Vetor Vorticidade.

## **ABSTRACT**

Valley and mountain breezes are local atmospheric circulations that occur in regions of pronounced relief, such as mountains and valleys, due to differences in heating between slopes and low-lying areas. These breezes have a well-defined daily cycle and influence local atmospheric circulation, affecting variables such as temperature, humidity and wind. This work investigated the circulation of valley and mountain breezes in the Northeast region of Brazil throughout 2018, using data from the fifth generation of the reanalysis project of the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). The objective was to analyze the behavior and intensity of these circulations in the Açu valley and Chapada Diamantina regions, using as a basis the zonal and meridional components of the horizontal vorticity vector. The results indicated that valley breezes predominate during the day, and mountain breezes, which occur at night, present distinct patterns of intensity and direction, strongly influenced by the topography of each area. The analysis highlights how the specific topographic characteristics of each region shape the dynamics of these circulations.

Keywords: Relief, Circulations, Vorticity Vector.

## LISTA DE FIGURAS

**Figura 1:** Representação das brisas de vale (a) dia e de montanha (b) noite setas indicam sentido das circulações. Fonte (adaptada de Miranda, 2012).

**Figura 2:** Esquema de fluxos termicamente impulsionados em terreno montanhoso. " $z_i$ " indica a altura da camada mista (linha tracejada vermelha) sobre a planície adjacente. Setas azuis indicam a circulação da planície para a montanha e a circulação do vento do vale; setas pretas representam o fluxo de declive e a ventilação da montanha. Situação durante o dia. Fonte: Adaptado de (ROCHAT et al., 2015). Detalhes são discutidos no texto;

**Figura 3:** Representação hipsométrico da região do NEB. Fonte: Autor

**Figura 4:** Representação do vetor vorticidade e sua orientação sempre no sentido anti-horário. Fonte: Autor.

**Figura 5:** Representação esquemática do sistema brisa de vale e monta: Fonte: Geografia opinativa

**Figura 6:** Área de estudo, representação hipsométrico e recorte topográfico. As linhas tracejadas representam a localização das seções verticais que foram analisadas. Fonte: Autor.

**Figura 7:** Ciclo médio mensal do vetor vorticidade ( $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ), ao longo do ano de 2018, para o ponto P1.

**Figura 8:** Ciclo médio mensal do vento U, ao longo do ano de 2018, para o ponto P1.

**Figura 9:** Ciclo médio mensal do vetor vorticidade ( $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ), ao longo do ano de 2018, para o ponto P2.

**Figura 10:** Ciclo médio mensal do vento U, ao longo do ano de 2018, para o ponto P2.

**Figura 11:** Ciclo médio dos meses do ano de 2018, vetor vorticidade, no ponto P1.

**Figura 12:** Ciclo médio vetor vorticidade para meses do ano de 2018, no ponto P2.

**Figura13:** Representação da direção do vetor vorticidade. Fonte: Autor

**Figura 14:** Mapa médio anual do vetor vorticidade para a região Nordeste do Brasil. Fonte: Autor.

**Figura 15:** Média mensal do vetor vorticidade para as 01:00 UTC (22H) na região do vale do Açu. Fonte: Autor.

**Figura 16:** Média mensal do vetor vorticidade para as 01:00 UTC (22H) na região da chapada diamantina. Fonte: Autor.

**Figura 17:** Média mensal do vetor vorticidade para as 17:00 UTC (14h) na região do vale do Açu. Fonte Autor.

**Figura 18:** Média mensal do vetor vorticidade para as 17:00 UTC (14h) na região da chapada diamantina. Fonte: Autor.

## LISTA DE SÍMBOLO

$u$  - Componente zonal

$v$  - Componente meridional

$w$  - Componente vertical

$\vec{w}$  - Vetor vorticidade

$\eta$  - Componente zonal da vorticidade

$\vartheta$  - Componente meridional da vorticidade

$\zeta$  - Componente vertical da vorticidade

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ECMWF	Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo
SBCR	Sistema Brasileiro de Classificação do Relevo
GRADS	Sistema de Visualização e análises de dados em ponto de grade
MSG	Meteosat Second Generation
NEB	Nordeste Brasileiro
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
UGB	União da Geomorfologia Brasileira
UTC	Coordinated Universal Time

## SUMÁRIO

Capítulo - 1 .....	16
Introdução .....	16
Capítulo - 2 .....	18
Revisão Bibliográfica .....	18
2.1 Brisa de vale e montanha .....	18
2.2 Processos de troca forçada termicamente em terrenos montanhosos .....	19
2.3 Ventos de vale.....	20
.....	21
2.4 Ondas de montanha.....	21
2.2 Circulação do tipo fluvial .....	22
Capítulo - 3 .....	24
Materiais e métodos .....	24
3.1- descrição da área de estudo. ....	24
3.3 dados .....	27
3.3.1 – Era5 .....	27
Capítulo – 4.....	31
Resultados.....	31
4.1 Resultados e discussão.....	31
.....	31
4.2 Média mensal para cada mês do vetor vorticidade para o ponto p1. ....	33
4.2 Média mensal para cada mês do vetor vorticidade para o ponto p2. ....	36
.....	36
4.3 Análise do vetor vorticidade em diferentes níveis de pressão .....	39
4.4 Mapas das médias mensais do vetor vorticidade .....	40
Capítulo – 5.....	50
Conclusão.....	50
Referências.....	51
Apêndices.....	56

## CAPÍTULO - 1

### INTRODUÇÃO

A brisa de vale e montanha (MVB - Sigla do Inglês, Mountain valley breeze) é impulsionada pelo aquecimento desigual entre a montanha e o vale (ZHANG et al. 2024). Essas circulações ocorrem devido às diferenças de temperatura entre pontos em distintas posições do relevo em consequência de intensas diferenças do aquecimento superficial.

Nas encostas mais inclinadas e nas partes mais estreitas dos vales, o aquecimento ocorre de forma mais intensa que nos vastos níveis dos vales. Essas condições resultam em brisas de vale durante o dia e brisas de montanha durante a noite. Durante as horas de incidência solar, o ar sob as encostas se aquece e conseqüentemente se expande, tornando-se menos denso, logo o ar sob o vale movimentando-se no sentido ascendente ao longo das encostas. Esse movimento, conhecido como brisa de vale ou anabática, esse tipo de circulação contribui para a formação de nuvens no topo da montanha. À noite, o topo da montanha resfria-se mais rapidamente, invertendo a direção dos ventos. O ar frio das montanhas desce e se acumula nos vales, fenômeno conhecido como brisa de montanha ou catabática. Em noites de intenso resfriamento do ar, provocado pela ausência de nuvens no céu, o ar próximo ao solo sofre um forte resfriamento devido à intensa emissão de radiação de onda longa, o que pode levar à formação de nevoeiros e geadas (MIRANDA et al., 2012).

Whiteman (2000) descreve que os fluxos forçados pelo terreno ocorrem quando ventos em larga escala são modificados ou canalizados pelo terreno complexo subjacente. Os ventos diurnos das montanhas são gerados por contrastes de temperatura que se formam dentro das montanhas ou entre as montanhas e as planícies circundantes, sendo assim também conhecidos como circulações termicamente conduzidas. Normalmente, os fluxos forçados pelo terreno e os ventos diurnos das montanhas se combinam. Ambos podem ocorrer juntamente com ventos em pequena escala, como entradas e saídas de tempestades, ou com ventos em larga escala que não são influenciados pelo terreno montanhoso subjacente. A influência do terreno pode fazer com que um fluxo de ar que se aproxima de uma barreira montanhosa seja transportado sobre ou ao redor da barreira, forçado a passar por lacunas na barreira ou bloqueando por ela. Três fatores determinam o comportamento de um fluxo que se aproxima em resposta a uma barreira montanhosa: A estabilidade do ar que se aproxima das



montanhas, a velocidade do fluxo de ar que se aproxima das montanhas e as características topográficas do terreno subjacente. A presença de diferentes tipos de superfícies, pode levar a diferenças nos gradientes de temperatura e, conseqüentemente, na formação de brisas.

O aquecimento uniforme sobre terreno elevado produz uma resposta dinamicamente semelhante ao aquecimento diferencial em terreno plano. Portanto, estudos sobre circulações forçadas pela topografia (como fluxos induzidos pela heterogeneidade da superfície terrestre) são relevantes para entender como funciona esses sistemas (KIRSHBAUM et al., 2013).

### Objetivo Principal

Este trabalho tem como objetivo geral utilizar os componentes horizontais da vorticidade como identificador do mecanismo que causa o surgimento das brisas de vale e montanha na região Nordeste do Brasil, com foco principal na área do Vale do Açu, a fim de compreender seu impacto nas condições ambientais locais e melhorar a compreensão das circulações mesoescala usando dados do conjunto ERA5 (quinta geração de reanálises atmosférica globais) do (ECMWF- Sigla do inglês, European Forecast Center Medium Term Weather).

Os objetivos específicos são:

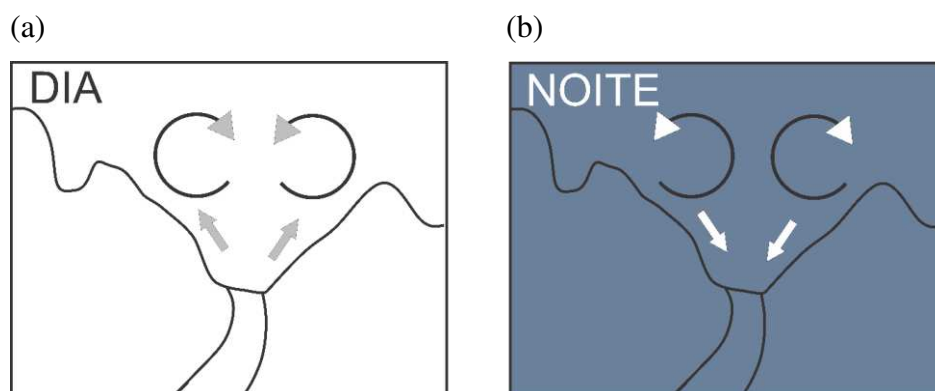
- Analisar os dados de reanálise do ERA5 para a região do Vale do Açu e da região da chapada Diamantina, identificando padrões de vento e pressão atmosférica.
- Analisar o comportamento das brisas de vale e montanha, incluindo sua intensidade, direção e momento de ocorrência, utilizando dados de reanálise
- Identificar padrões climáticos sazonais e diários que influenciam as brisas de vale e montanha nessas regiões.

## CAPÍTULO - 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1- Brisa de vale e montanha

Dentro das circulações clássicas, encontram-se os padrões de circulação de vale e montanha. Em regiões cercados por topografia elevada, geralmente ocorre um movimento de ar do vale em direção à montanha durante o dia, e da montanha para o vale durante a noite. Durante o período diurno, o ar sobre as encostas montanhosas expostas ao sol aquece mais rapidamente do que o ar sobre o vale adjacente. Isso resulta em um gradiente de pressão direcionado do vale para a montanha, dando origem às brisas de vale, também conhecidas como ventos anabáticos. Durante a noite, acontece o inverso, ocorre um resfriamento mais rápido do ar nas montanhas em comparação ao ar sobre o vale. Isso resulta em um movimento de ar que se desloca da montanha em direção ao vale, dando origem às brisas de montanha, também conhecidas como ventos catabáticos (Atkinson, 1981).



**Figura 1:** Representação das brisas de vale (a) dia e de montanha (b) noite setas indicam sentido das circulações. Fonte (adaptada de Miranda, 2012).

As montanhas induzem diversos tipos de circulações térmicas e dinâmicas, como fluxos catabáticos e anabáticos, influenciando as características da camada limite e a dispersão de poluentes. Além disso, as montanhas podem bloquear camadas de ar fortemente estratificadas,

resultando na formação de fluxos em lacunas e poças de ar frio, com implicações para a segurança rodoviária, poluição, danos às plantações, entre outros (TEIXEIRA et al., 2016).

Estudos como o de (SCHMIDLI et al., 2015) que analisaram o limite de estado quase estacionário de um sistema de vento diurno do vale sobre uma topografia tridimensional idealizada, visando fornecer *insights* sobre os fluxos de massa e calor associados ao vento ao longo do vale. Resultam de uma relação de escala para o fluxo de massa ao longo do vale em estado quase estacionário, considerando a geometria e o tamanho do vale, a estratificação atmosférica e o forçamento do fluxo de calor sensível à superfície. Além disso, comparam essa relação com simulações numéricas do sistema de vento do vale.

## **2.2 Processos de troca forçada termicamente em terrenos montanhosos**

A troca entre a Terra e a atmosfera está associada a fluxos induzidos por aquecimento diferencial em relação à topografia, ocorrendo em diversas escalas horizontais devido aos ângulos de declive e à exposição variáveis. Fluxos forçados termicamente, impulsionados por aquecimento radiativo, apresentam um ciclo diário claro e ocorrem preferencialmente em condições de céu limpo com fraco forçamento sinótico. Em condições nubladas, a variabilidade espacial do aquecimento diabático é essencialmente zero, mesmo em topografia complexa (MATZINGER et al., 2003).

O fluxo de ar sobre a orografia gera uma ampla gama de fenômenos, que abrangem todas as escalas do movimento atmosférico. As montanhas influenciam o fluxo atmosférico ao modificar os processos de advecção em escala sinótica e gerar ondas planetárias (SMITH, 1979).

Nesse sentido, a troca se dá pela transferência de propriedades de fluidos através de uma superfície, podendo ocorrer tanto na fronteira de um fluido (como na troca terra-atmosfera) quanto através de uma superfície imaginária dentro do fluido (como entre a camada limite atmosférica e a atmosfera livre). Transporte é um sinônimo de troca, enquanto fluxo denota a taxa de troca de uma quantidade por unidade de área (SERAFIN et al., 2018).

O ciclo diário da radiação da superfície e do balanço energético resulta em fases alternadas de aquecimento e resfriamento nas camadas atmosféricas mais baixas. Em terrenos planos e homogêneos, os efeitos de estratificação e flutuabilidade intensificam a turbulência durante o dia e a suprimem à noite. O ciclo diário da radiação da superfície e do balanço energético resulta em fases alternadas de aquecimento e resfriamento nas camadas atmosféricas mais baixas.

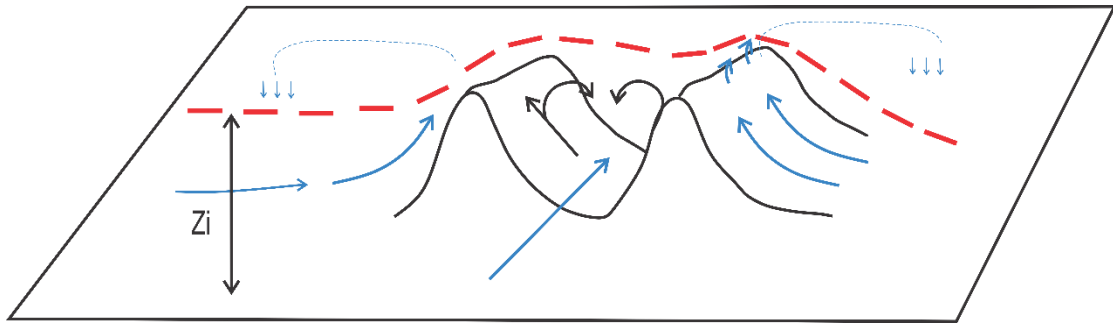
Em terrenos planos e homogêneos, os efeitos de estratificação e flutuabilidade intensificam a turbulência durante o dia e a suprimem à noite. A análise dimensional permite descrever o impacto da produção e perda de turbulência flutuante nos perfis verticais das propriedades atmosféricas como uma função de um conjunto limitado de variáveis de escala. Durante o dia, o aquecimento da superfície devido à radiação solar causa a elevação do ar quente, aumentando a instabilidade e promovendo a mistura turbulenta, processo intensificado pela flutuabilidade, que contribui para a formação de correntes ascendentes e nuvens convectivas. À noite, a ausência de radiação solar leva ao resfriamento da superfície, estabilizando a camada limite atmosférica e suprimindo a turbulência, com a estratificação térmica resultante formando uma camada de ar mais estável, com menor movimento vertical e menor mistura turbulenta.

### **2.3 Ventos de Vale**

Os ventos de vale são circulações de ar locais que ocorrem em regiões montanhosas, resultantes de diferenças de temperatura e pressão entre as áreas mais altas e mais baixas do relevo. Esses ventos são influenciados pelo aquecimento e resfriamento diários da superfície terrestre e apresentam comportamentos distintos durante o dia e a noite (VERGEINER et al., 1987).

O estudo de (RAMPANELLI et al., 2004) investigou os mecanismos físicos básicos que governam a evolução diurna dos ventos ascendentes em vales de montanha, utilizando uma série de simulações numéricas de fluxo termicamente dirigido sobre topografia tridimensional idealizada. De acordo com o estudo o aquecimento por subsidência no núcleo do vale é o principal contribuinte para a diferença de temperatura entre o vale e a planície, o que, sob a aproximação hidrostática, é o principal fator para a diferença de pressão que impulsiona o vento ascendente no vale

O fluxo da planície para a montanha é uma situação clássica e idealizada onde a diferença de temperatura entre alturas iguais sobre a planície e sobre a montanha estabelece um fluxo termicamente impulsionado. Na Figura 2, esse fluxo seria normalmente perpendicular à montanha ou à cadeia de montanhas. Esses fluxos podem transportar poluentes atmosféricos de grandes cidades situadas na planície ou umidade da camada limite úmida sobre a planície para as montanhas (ou vice-versa). Uma planície localizada na entrada de um grande vale que corre perpendicularmente à cadeia de montanhas pode fazer com que o fluxo da planície para a montanha seja o principal impulsionador do sistema de vento do vale (ROCHAT et al., 2015).



**Figura 2:** Esquema de fluxos termicamente impulsionados em terreno montanhoso. " $z_i$ " indica a altura da camada mista (linha tracejada vermelha) sobre a planície adjacente. Setas azuis indicam a circulação da planície para a montanha e a circulação do vento do vale; setas pretas representam o fluxo de declive e a ventilação da montanha. Situação durante o dia. Fonte: Adaptado de (ROCHAT et al., 2015).

As diferenças de temperatura e, conseqüentemente, de pressão entre o "vale" e a "planície" dão origem a um sistema de vento de vale, que se dirige para cima do vale durante o dia e para baixo do vale durante a noite. Além disso, esse ciclo diário de ventos pode afetar significativamente o transporte de poluentes e umidade, influenciando tanto o microclima local quanto a qualidade do ar nas regiões montanhosas e adjacentes.

## 2.4 Ondas de Montanha

Tanto as brisas de vale e montanha quanto as ondas de montanha são influenciadas pela topografia. Durran (1986) descreve que as montanhas atuam como barreiras que modificam o fluxo de ar, levando à formação de circulações específicas. Elas se formam sob determinadas condições, como a presença de um fluxo de ar estável e forte sobre um relevo elevado. A estrutura das ondas de montanha se desenvolve a partir da interação do fluxo de ar com as montanhas; quando o ar sobe pela encosta da montanha, ele esfria e, ao descer, aquece, criando um padrão de onda estacionária.

Durran discute modelos teóricos, incluindo a teoria linear e a teoria não linear, que explicam a formação e a estrutura dessas ondas. Ele diferencia entre ondas internas, que ocorrem na troposfera média e superior, e ondas superficiais, que afetam as camadas mais baixas da atmosfera, bem como ondas estacionárias que permanecem fixas em relação ao terreno. As ondas de montanha podem gerar turbulência severa, especialmente na região sotavento da montanha, criando riscos significativos para a aviação, e podem levar à formação de rotors, correntes de ar rotativas perigosas para a aviação. Elas também influenciam padrões

climáticos locais e regionais, afetando a distribuição de nuvens e precipitação. É importante trazer esse ponto, pois à análise dos dados, um comportamento de formação de rotor foi localizado, dados serão discutidos ó próximo capítulo.

As brisas de vale e montanha podem contribuir para a formação de ondas de montanha ao modificar o padrão de fluxo de ar local. Por exemplo, o ar ascendente durante o dia pode reforçar a formação de ondas de montanha ao fornecer um impulso adicional ao fluxo de ar que já está subindo a encosta.

Segundo (Rajib et al., 2011), Os sistemas atmosféricos de mesoescala são categorizados em duas classes: (1) aqueles que são primordialmente influenciados pelas disparidades na superfície terrestre (sistemas de mesoescala induzidos por características do relevo e da topografia) e (2) aqueles que são primordialmente impulsionados por instabilidades em perturbações de grande escala, sistemas de mesoescala induzidos sinopticamente.

Avisar e Pielke (1989) compreendem que em situações em que heterogeneidades na superfície terrestre geram contrastes acentuados no fluxo total de calor sensível, podem surgir circulações igualmente intensas às brisas marítimas. Assim como as brisas marítimas e terrestres, circulações semelhantes podem ser originadas devido a variações na evapotranspiração superficial, reflexão ou absorção de radiação solar, e outros fatores. Em outras palavras, essas circulações podem ser resultado das disparidades nos fluxos de calor sensível e latente presentes entre duas superfícies diferentes.

## **2.2 Circulação do tipo Fluvial**

É importante trazer esse ponto, pois, embora os fenômenos não sejam idênticos, a interação entre a topografia e o fluxo de água pode criar condições atmosféricas que são semelhantes em termos de movimentação de ar e formação de microclima.

A brisa fluvial representa um processo físico em que o movimento do ar é influenciado pelo contraste térmico entre a água e a terra. Durante o dia, o ar se desloca em direção ao continente devido a essa diferença de temperatura, e à noite, o movimento se inverte em direção à água. Imagens de satélite indicam uma tendência de formação de nuvens sobre áreas

continentais durante o dia, acompanhada por movimentos de subsidência nas regiões dos rios (OLIVEIRA e FITZJARRALD et al., 1993).

Pesquisas conduzidas por Oliveira e Fitzjarrald (1993) confirmaram essa circulação fluvial em altitudes mais baixas (até 1500-2000 m). Durante a noite e o início da manhã, a circulação se dá da floresta para o rio, enquanto durante a tarde e início da noite, o sentido é revertido, do rio para a floresta. Observações radiométricas realizadas durante o experimento ABLE registraram um gradiente térmico entre rio e floresta, alcançando  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante o dia e  $+6\text{ }^{\circ}\text{C}$  à noite.

De acordo com Fisch et al., 1996, essas circulações certamente se intensificam nas áreas onde os rios têm uma largura considerável, como é o caso das proximidades de Manaus, onde os rios Negro e Solimões se encontram, em Santarém, onde os rios Tapajós e Amazonas se juntam, e em Belém, abrangendo os rios Tocantins e a porção sul da Foz do Rio Amazonas.

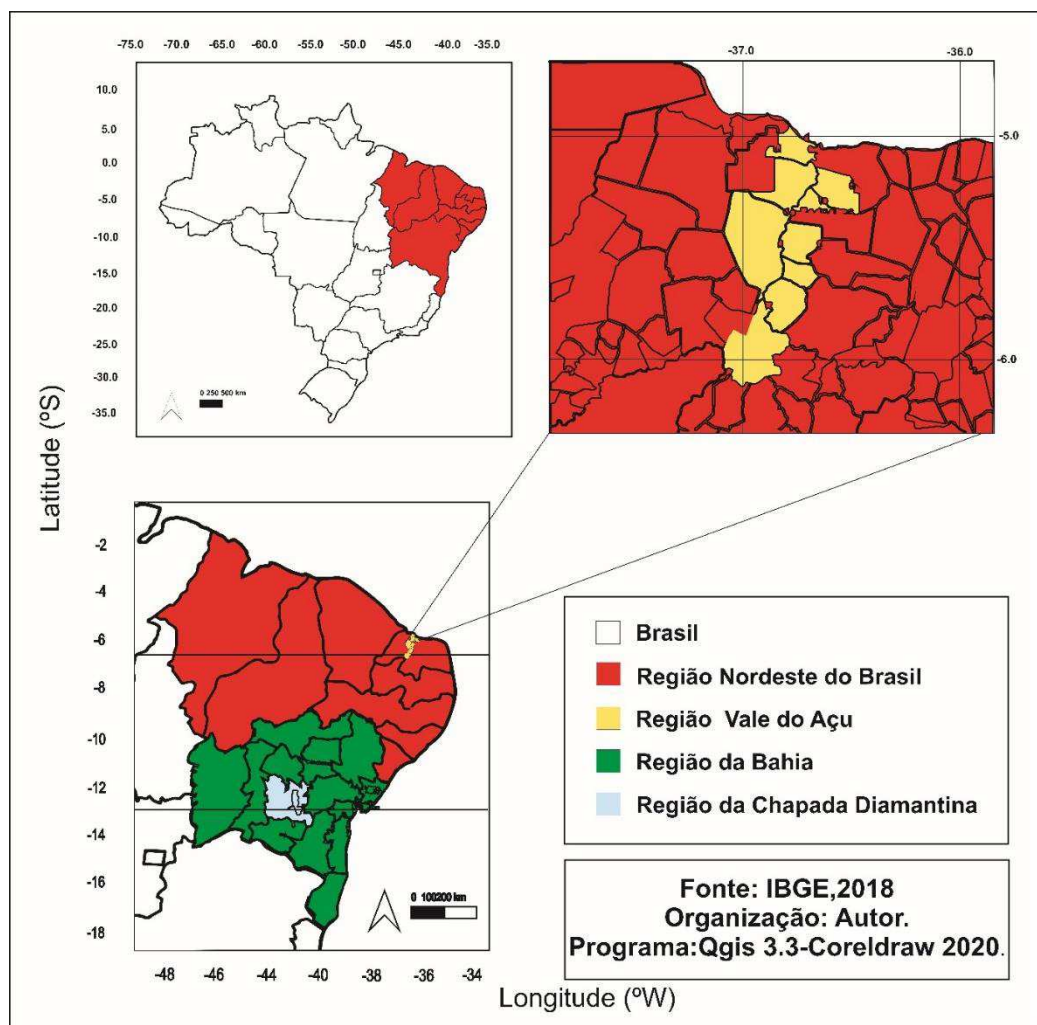
## CAPÍTULO - 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1- Descrição da área de estudo.

Este trabalho utilizou dados de reanálise do ERA 5, a fim de representar a circulação sobre o vale do açúcar e a chapada diamantina com dados do ano de 2018. Esse período foi escolhido, como complemento de uma pesquisa que abordou estudos sobre brisas na costa do nordeste para o referido ano.

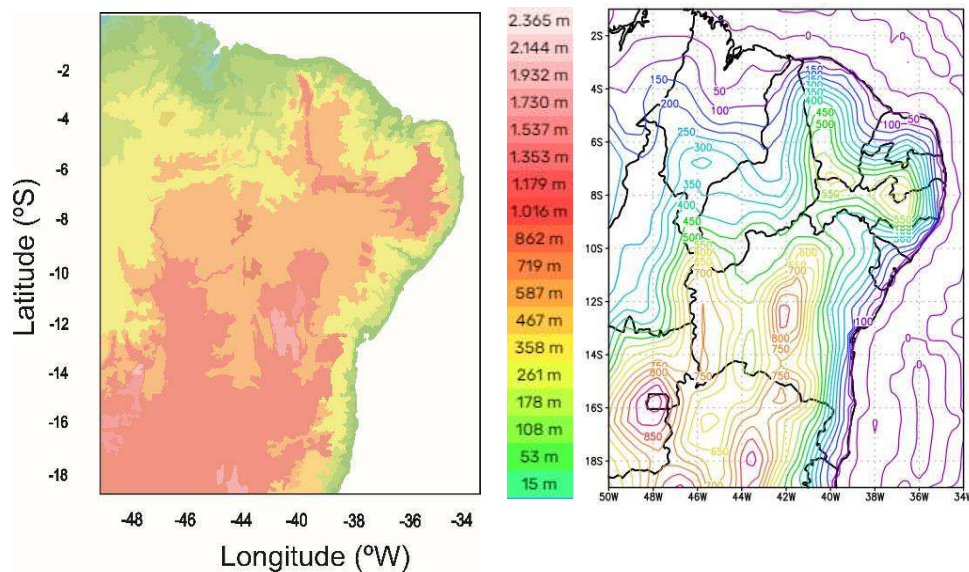
A Região Nordeste do Brasil é composta por nove estados e é a segunda região mais populosa do país, abrigando aproximadamente 54.658.515 milhões de habitantes em uma área de cerca de 1.554.291,6 km<sup>2</sup>, de acordo com Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023).



**Mapa 1:** Localização das áreas de estudos. As linhas tracejadas representam a localização das seções verticais que serão analisadas. Fonte: autor.



O (NEB) oferece uma rica área de estudo para a análise das brisas de vale e montanha. Esta região diversificada, marcada por elevações em seu relevo. A topografia do Nordeste brasileiro é notável por sua diversidade, variando de áreas de baixa altitude a elevações significativas, como as áreas costeiras, serras, chapadas e vales. A topografia desempenha um papel crucial na formação de diferentes climas, paisagens e ecossistemas na região (ROSS et al., 1996).



**Figura3:** Representação hipsométrica da região do NEB. Fonte: Autor

Ambientes com esse tipo de topografia são propícios para a ocorrência desses fenômenos atmosféricos. As brisas de vale e montanha são influenciadas pela topografia acidentada, com vales profundos e pelas variações de temperatura ao longo do dia e das estações do ano.

Relevos que formam o Planalto da Borborema, com altitudes variando de 400 a 1.200 metros de altura, a Chapada Diamantina, que possui o ponto mais alto da região, que é o Pico do Barbado, com 2.033 metros, influencia o clima local e abrigam ecossistemas únicos. Além disso, as depressões sertanejas e do São Francisco, juntamente com as planícies costeiras, são notáveis incluem a Chapada do Araripe e diversas serras isoladas como a Serra de Baturité e a Serra do Teixeira compõem a variada paisagem da região. Essa diversidade geológica e climática, que inclui desde áreas de rochas pré-cambrianas até formações sedimentares, molda profundamente o uso do solo e as atividades humanas na região (MAIA et al., 2014; BARRETO et al., 2020).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2004; SALES, 2023;) as regiões montanhosas e os planaltos que apresentam altitudes consideráveis do (NEB) são:

- **Chapada Diamantina (Bahia):** A região mais elevada do Nordeste, com o Pico do Barbado atingindo 2.033 metros de altitude.
- **Chapada do Araripe (Ceará, Pernambuco e Piauí):** Conhecida por suas escarpas, a Chapada do Araripe tem altitudes de aproximadamente 900 metros.
- **Chapada das Mangabeiras (Bahia e Piauí):** Estendendo-se entre a Bahia e o Piauí, alcança até 800 metros de altitude.
- **Planalto Baiano (Bahia):** Inclui diversas serras e chapadas, como a Chapada Diamantina, com elevações consideráveis e rica hidrografia.
- **Planalto da Borborema (Pernambuco, Paraíba, Alagoas e Rio Grande do Norte):** Com altitudes variando, o ponto mais alto é o Pico do Jabre, com 1.197 metros.
- **Serra da Capivara (Piauí):** Reconhecida tanto por sua elevação, em torno de 600 metros, quanto por seu valor arqueológico.
- **Serra de Ibiapaba (Ceará e Piauí):** Cordilheira com altitudes de até 1.000 metros, rica em biodiversidade.
- **Serra do Espinhaço (Bahia):** Parte do complexo montanhoso do Brasil, com altitudes entre 900 e 1.200 metros.
- **Serra de Baturité (Ceará):** Conhecida pelo clima ameno, chega a 1.115 metros de altitude.
- **Serra do Espigão Mestre (Bahia):** Com altitudes elevadas, é uma das importantes formações geológicas da região.

No Nordeste do Brasil, há de fato montanhas, conforme a definição apresentada pelo Sistema Brasileiro de Classificação do Relevo (SBCR). Criado em 2019, o SBCR propõe uma sistematização detalhada do relevo brasileiro. Este sistema foi desenvolvido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em colaboração com o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e a União da Geomorfologia Brasileira (UGB), contando com a contribuição de professores doutores de instituições de ensino superior.

### 3.3 DADOS

#### 3.3.1 – ERA5

O ERA5 é a quinta geração de reanálises climáticas e meteorológicas do (ECMWF), abrangendo as últimas oito décadas com dados disponíveis a partir de 1940. Esta reanálise substitui a versão anterior, ERA-Interim. A metodologia subjacente à reanálise envolve a combinação de dados de modelos com observações globais, seguindo as leis da física.

Essa abordagem, conhecida como assimilação de dados, é baseada no mesmo princípio utilizado pelos centros de previsão meteorológica, onde previsões anteriores são constantemente aprimoradas com observações recentes para estimar o estado atmosférico atual, chamado de análise. O ERA5 segue um processo semelhante, mas em uma resolução menor para fornecer um conjunto de dados que abrange décadas. Ao contrário das previsões em tempo real, a reanálise não está sujeita a restrições de tempo, o que permite uma coleta mais abrangente de observações retrospectivas. O ERA5 oferece estimativas horárias de uma ampla gama de variáveis atmosféricas, de ondas oceânicas e de superfície terrestre, fornecendo uma estimativa de incerteza amostrada por um conjunto de 10 membros a cada três horas. Essa incerteza está relacionada à disponibilidade e qualidade das observações e varia ao longo do tempo. Além disso, o ERA5 fornece médias mensais pré-calculadas para facilitar análises climáticas HERSBACH (2018).

De acordo com Hersbach et al., 2020, outra característica inovadora é a disponibilidade de um produto preliminar e oportuno em tempo real, que fica disponível em até 5 dias. Este produto é posteriormente substituído por uma versão final de maior qualidade, dois meses após o lançamento inicial.

Estes dados contemplam variáveis igualmente essenciais, como as componentes horizontais do vento em diferentes altitudes, o geopotencial atmosférico, informações fornecidas de temperatura, velocidade vertical do ar e a umidade específica em diferentes níveis da atmosfera. Essa abordagem abrangente permitirá uma análise completa e minuciosa das condições atmosféricas na região do NEB, auxiliando na compreensão dos padrões climáticos e específicos atmosféricos específicos que ocorreram durante o período testado. Para esse primeiro momento, os dados analisados foram feitos para o ano de 2018.

### 3.3.2 Variação da Vorticidade

A vorticidade é um conceito fundamental na meteorologia e na oceanografia, desempenhando um papel crucial na compreensão da dinâmica dos fluidos na atmosfera e nos oceanos. Ela representa a rotação ou a tendência ao movimento rotacional de massas de ar ou água. A vorticidade é influenciada pela curvatura do fluxo de vento ou corrente oceânica e é frequentemente usada para explicar a formação de sistemas meteorológicos, como ciclones e anticiclones. Ela desempenha um papel importante na previsão do tempo e na análise de características meteorológicas complexas, tornando-se uma ferramenta valiosa para os meteorologistas e oceanógrafos na compreensão e antecipação de mudanças nas condições atmosféricas e oceânicas HOLTON (2004).

Os três componentes da vorticidade são obtidos através do rotacional do vetor velocidade:

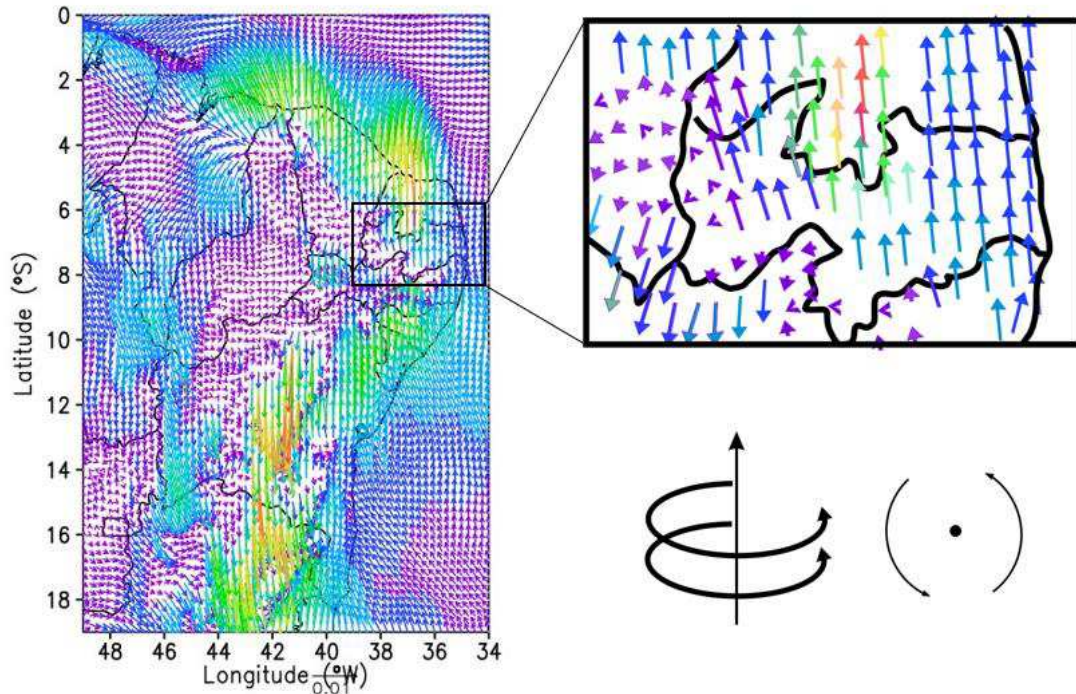
$$\vec{\omega} = \nabla \times \mathbf{V} \quad (1)$$

A fórmula (1) representa o vetor vorticidade em um campo de velocidade  $\mathbf{V}$  em um fluido. Onde  $\vec{\omega}$  (vorticidade): É um vetor que descreve a rotação local de um fluido em um ponto específico. Em outras palavras, indica a tendência desse ponto do fluido a girar. A direção do vetor vorticidade é perpendicular ao plano de rotação e seu comprimento está relacionado às taxas de rotação locais. O (nabla)  $\nabla$  é o operador gradiente, que atua sobre o campo de velocidade  $\mathbf{V}$ . Ele é usado para calcular as derivadas parciais em relação às coordenadas espaciais  $x$ ,  $y$  e  $z$ . O operador de produto vetorial é aplicado entre o operador nabla ( $\nabla$ ) e o campo de velocidade  $\mathbf{V}$ . Isso resulta em uma vorticidade vetorial que representa a rotação do fluido em um ponto específico HOLTON (2004).

Assim;

$$\vec{\omega} = \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}, \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) = (\eta, \vartheta, \zeta) \quad (2)$$

Em resumo, a fórmula descreve como calcular a vorticidade de um fluido em um ponto específico com base em sua velocidade local.



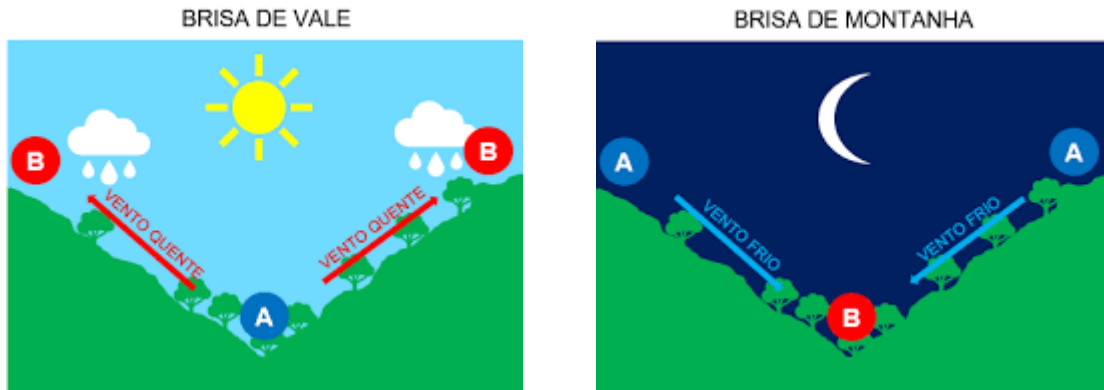
**Figura 4:** Representação do vetor vorticidade e sua orientação sempre no sentido anti-horário. Fonte: Autor.

O vetor de vorticidade girando no sentido anti-horário é uma representação da rotação do vento. Esse comportamento da vorticidade é característico de uma circulação ciclônica. No contexto das brisas de vale e montanha, isso pode ser interpretado da seguinte forma:

- Durante o dia, quando o aquecimento do vale é menos rápido do que nas montanhas circundantes, o ar quente e menos denso se eleva na Montanha, criando uma circulação ascendente. Esse movimento ascendente é representado pelo giro anti-horário da vorticidade.
- Durante a noite, o ar que está sob o vale se aquece e se eleva, ele é substituído pelo ar mais frio e denso das encostas das montanhas, que desce para ocupar o espaço vazio, criando uma circulação descendente nas montanhas. Essa circulação descendente é também caracterizada pelo giro anti-horário da vorticidade.

Portanto, o giro anti-horário da vorticidade está associado ao ciclo diurno das brisas de vale e montanha, com a circulação ascendente durante o dia no vale e a circulação

descendente nas montanhas. Esse comportamento é uma parte fundamental da dinâmica das brisas e contribui para os padrões de vento e circulação que ocorrem nessas áreas durante diferentes momentos do dia.



**Figura 5:** Representação esquemática do sistema brisa de vale e monta: Fonte: Geografiaopinativa

Após essas análises, também é oportuno citar os rotores atmosféricos, que são tradicionalmente definidos como vórtices atmosféricos quase bidimensionais que se formam paralelamente e a favor do fluxo de vento em relação a uma cordilheira, sob condições favoráveis ao desenvolvimento de ondas de montanha de grande amplitude. Esses rotores são caracterizados por sua intermitência, altos níveis de turbulência e uma estrutura interna complexa em pequena escala. Devido a essas características, os rotores atmosféricos representam um risco significativo para a aviação geral (GRUBIŠIĆ et al., 2008).

## CAPÍTULO – 4

### RESULTADOS

#### 4.1 Resultados e discussão

Para analisar o vetor vorticidade, a pesquisa concentrou-se em dois pontos específicos, denominados P1 e P2, representados na Figura 6. Um recorte topográfico foi inserido com o propósito de proporcionar uma melhor experiência de visualização dos vetores e das isolinhas. O mapa hipsométrico destaca as variações do relevo, promovendo uma melhor compreensão dos padrões analisados. O Ponto P1, está localizado nas coordenadas 37°W e 6°S, Região que comporta uma parcela do vale do açu. O ponto P2, está localizado nas coordenadas 42° W e 13°S, região da chapada diamantina.

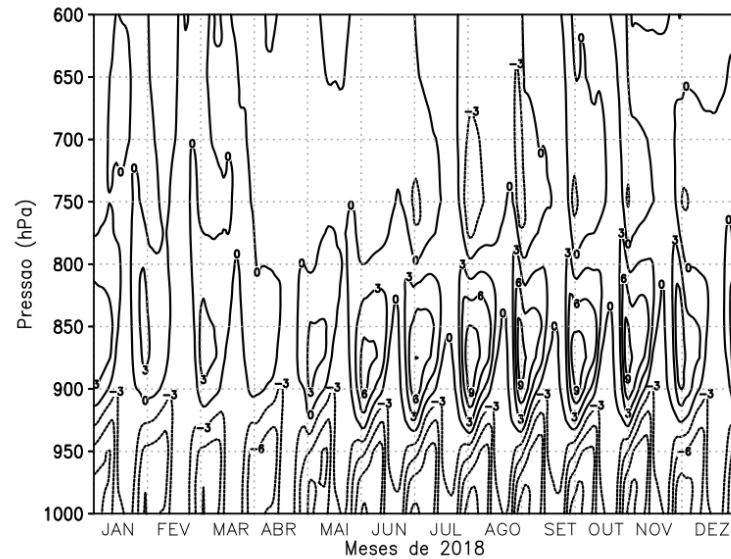


**Figura 6:** Área de estudo, representação hipsométrico e recorte topográfico. As linhas tracejadas representam a localização das seções verticais que foram analisadas. Fonte: Autor.

A Figura 7 ilustra o ciclo anual da vorticidade ao longo do ano de 2018 para o ponto P1, com médias mensais calculadas para cada mês. A vorticidade é mais evidente durante os meses com menos índices de precipitação.

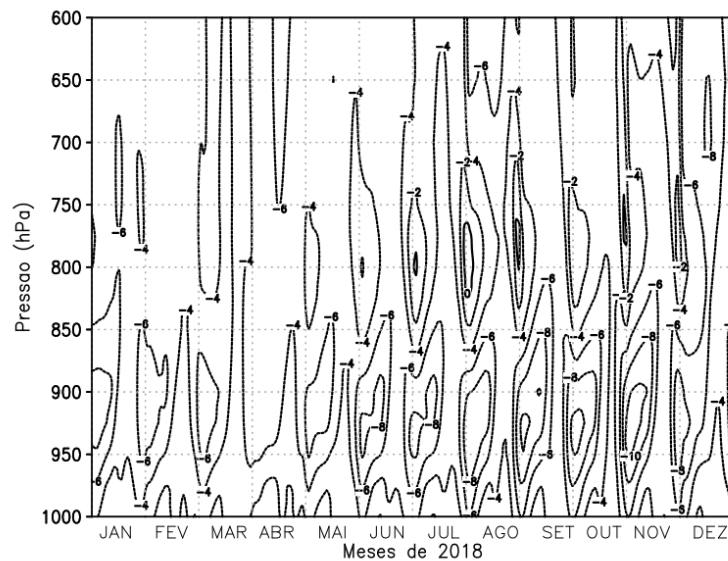
Durante esse período, a ausência de chuvas intensas permite que as circulações atmosféricas, induzidas termicamente, se destaquem com maior clareza. Nos meses de chuva, particularmente de fevereiro a maio, a vorticidade tende a ser menos pronunciada devido à influência da precipitação, que estabiliza a atmosfera e reduz as variações nos padrões de circulação. A variação anual destacada na figura é crucial para compreender como os padrões sazonais de vorticidade se relacionam com o regime de chuvas na região. Os valores

negativos e positivos indicam a orientação do vetor vorticidade, logo, a direção para onde ele vai apontar.



**Figura 7:** Ciclo médio mensal do vetor vorticidade ( $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ), ao longo do ano de 2018, para o ponto P1.

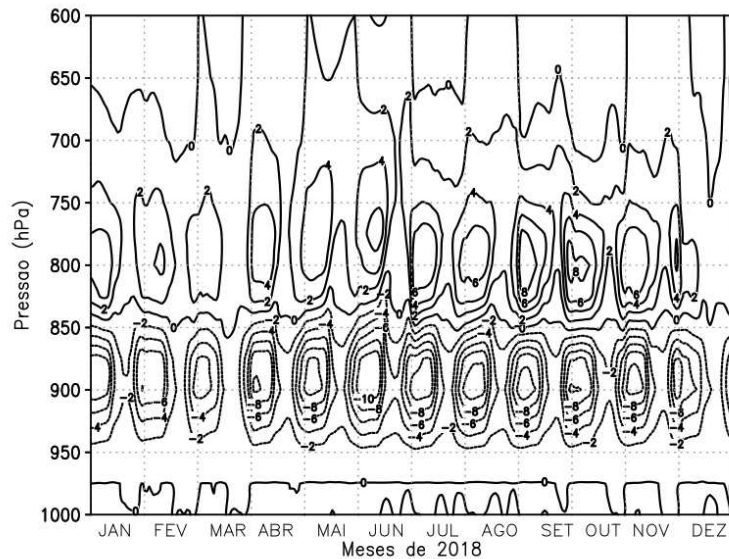
Para analisar a influência e comportamento dessas circulações, também foi gerado o perfil U do vento para cada ponto. A figura 8 mostra o perfil U do Vento para o ponto P1, o vetor U se refere a componente zonal do vento, logo, os valores negativos indicam a circulação do vento ao longo do eixo Leste-Oeste.



**Figura 8:** Ciclo médio mensal do vento U, ao longo do ano de 2018, para o ponto P1.

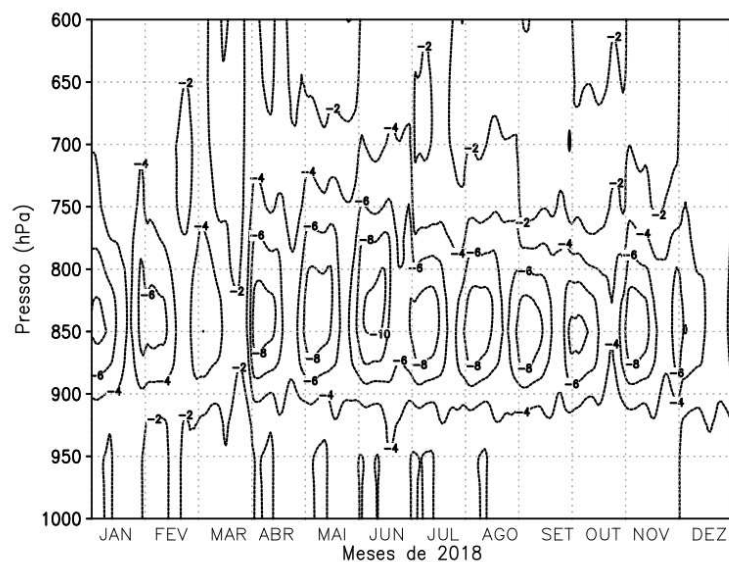


No ponto P2, é notável como a topografia da região pode influenciar as circulações. A figura 9 representa a média mensal para cada mês com valores mais definidos.



**Figura 9:** Ciclo médio mensal do vetor vorticidade ( $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ), ao longo do ano de 2018, para o ponto P2.

No Ponto P2, também foi gerado o perfil do componente U do vento. A Figura 10 apresenta o perfil do vento.

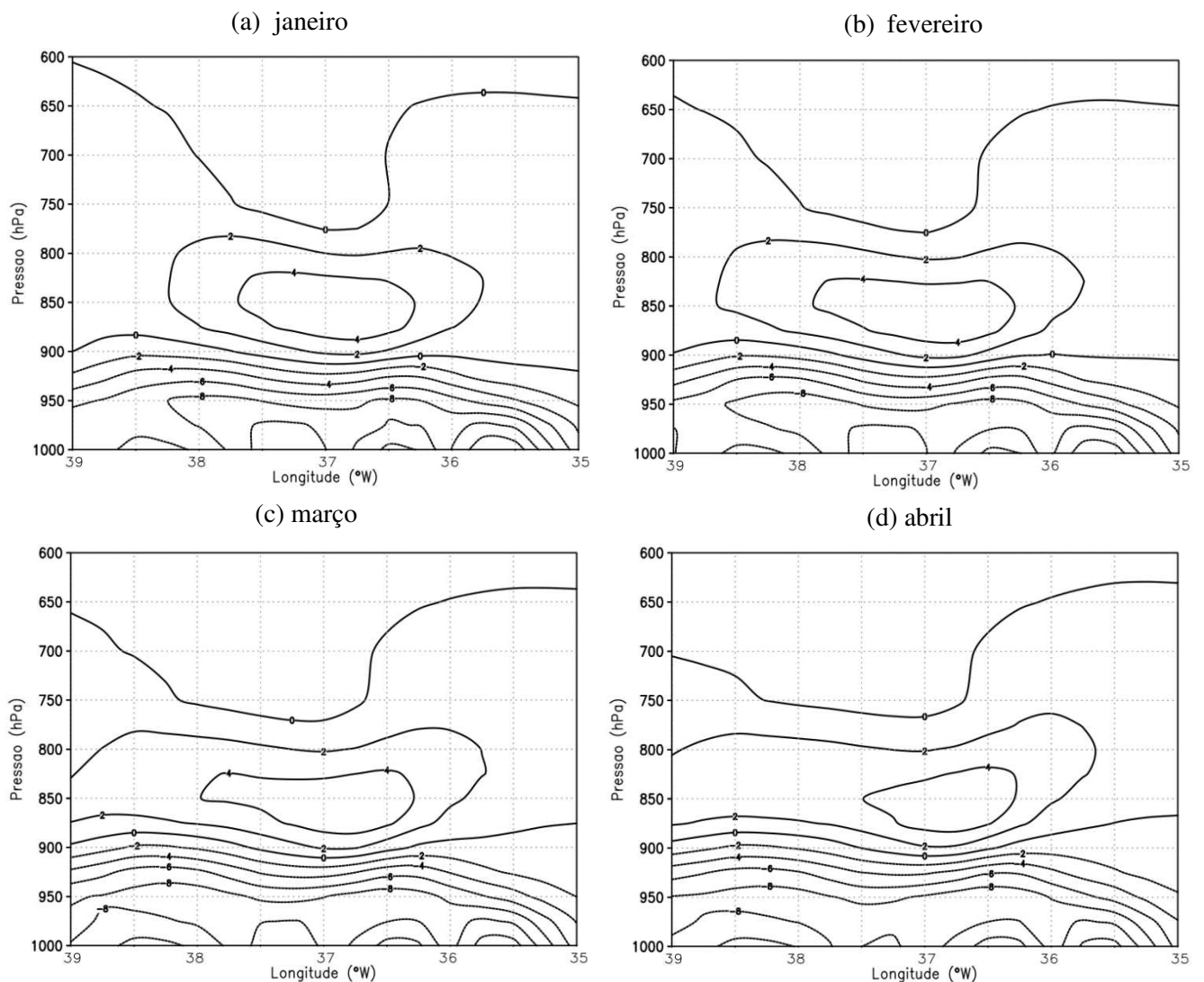


**Figura 10:** Ciclo médio mensal do vento U, ao longo do ano de 2018, para o ponto P2.

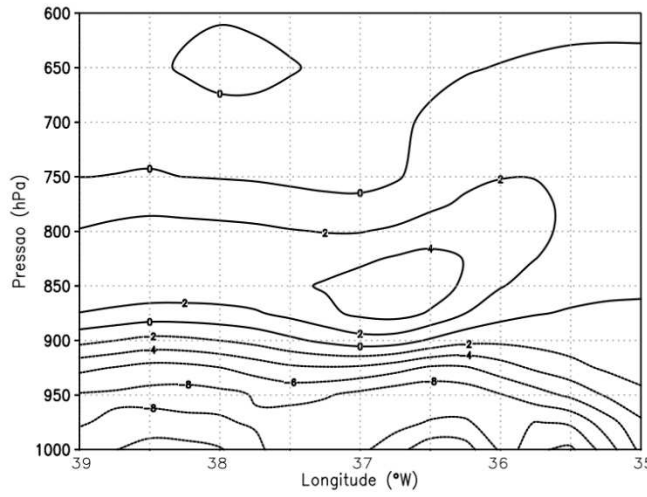
#### 4.2 Média mensal para cada mês do vetor vorticidade para o ponto P1.

Deste modo, a Figura 11 mostra o comportamento das isolinhas para cada mês ao longo do ano de 2018 para o ponto P1(37°W e 6°S). É interessante apresentar essas figuras separadamente, pois elas demonstram que, durante o período mais seco, é possível ver que a topografia exerce influência significativa nas circulações atmosféricas, consequentemente pelo fato do gradiente de temperatura mais definido nesse período, o que permite uma melhor compreensão dos padrões de movimento e suas variações.

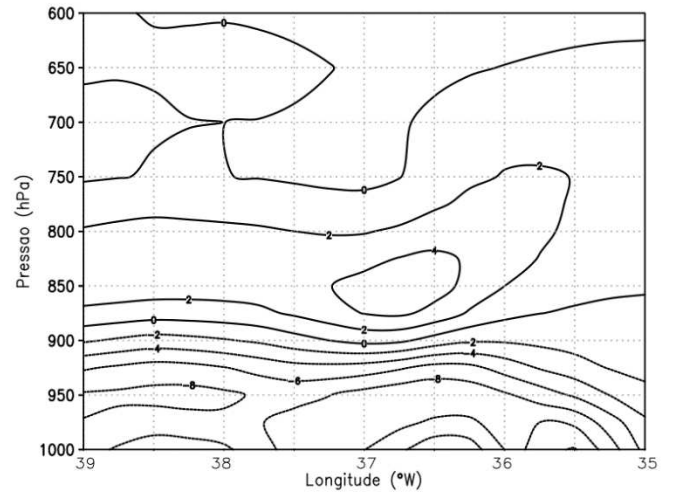
A região do vale do Açu devido à sua topografia, é possível notar um comportamento diferente, os vetores de vorticidade tem uma inteiração nesse ponto, atuando com característica de um “rotor”, ou seja, amplificando os efeitos nas circulações atmosféricas, isso fica claro nos níveis de 800 e 900 hpa (Hectopascal). Sem contar, como essa região é próxima do litoral, pode sofrer influências das brisas marítimas, ocasionando as chamadas “brisas longas”.



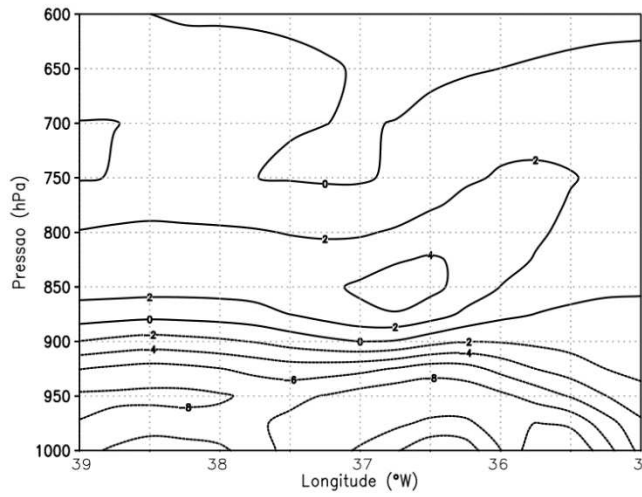
(e) maio



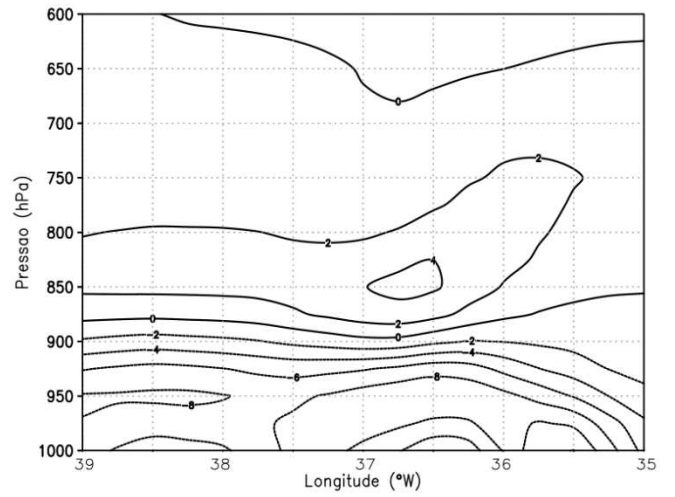
(f) junho



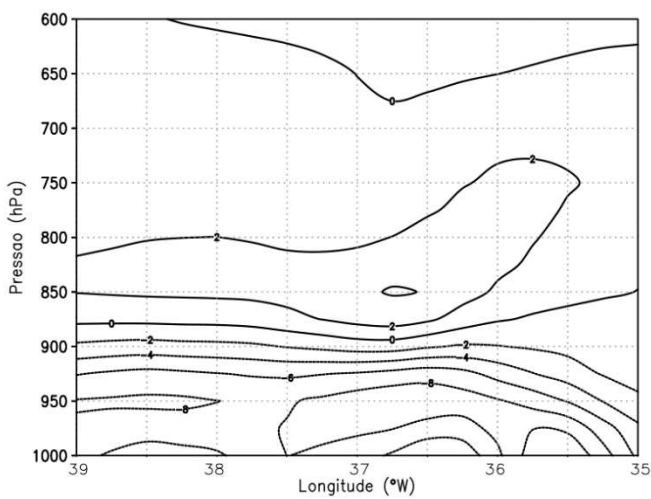
(g) julho



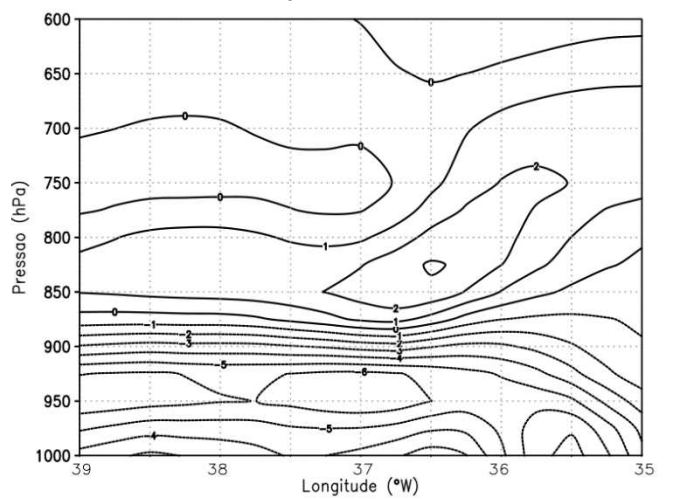
(h) agosto

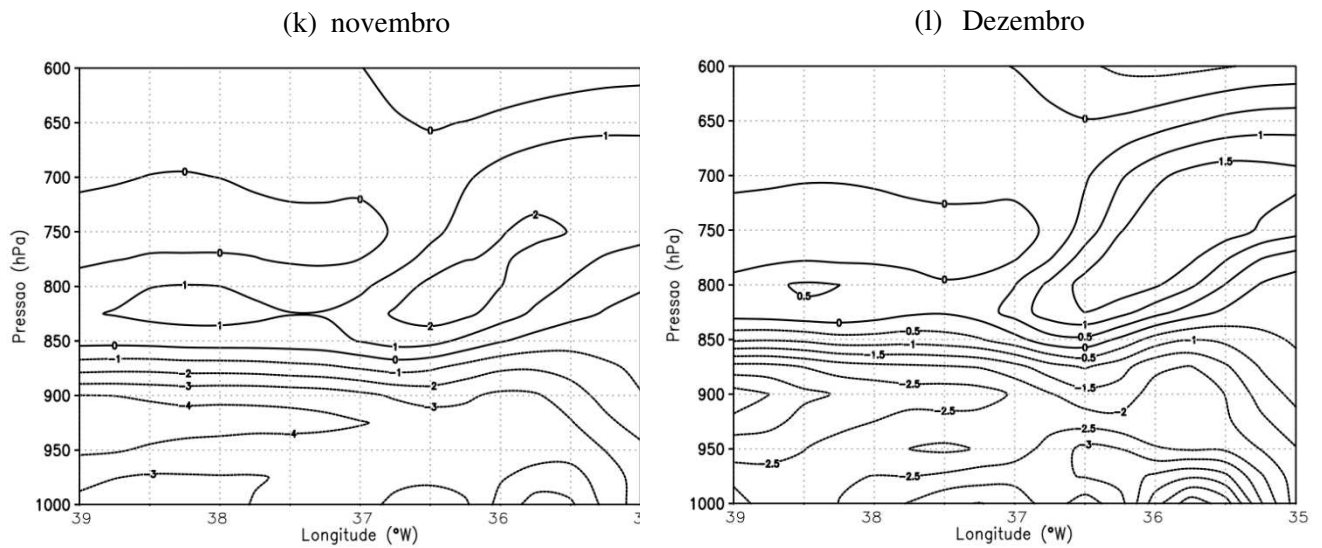


(i) setembro



(j) outubro

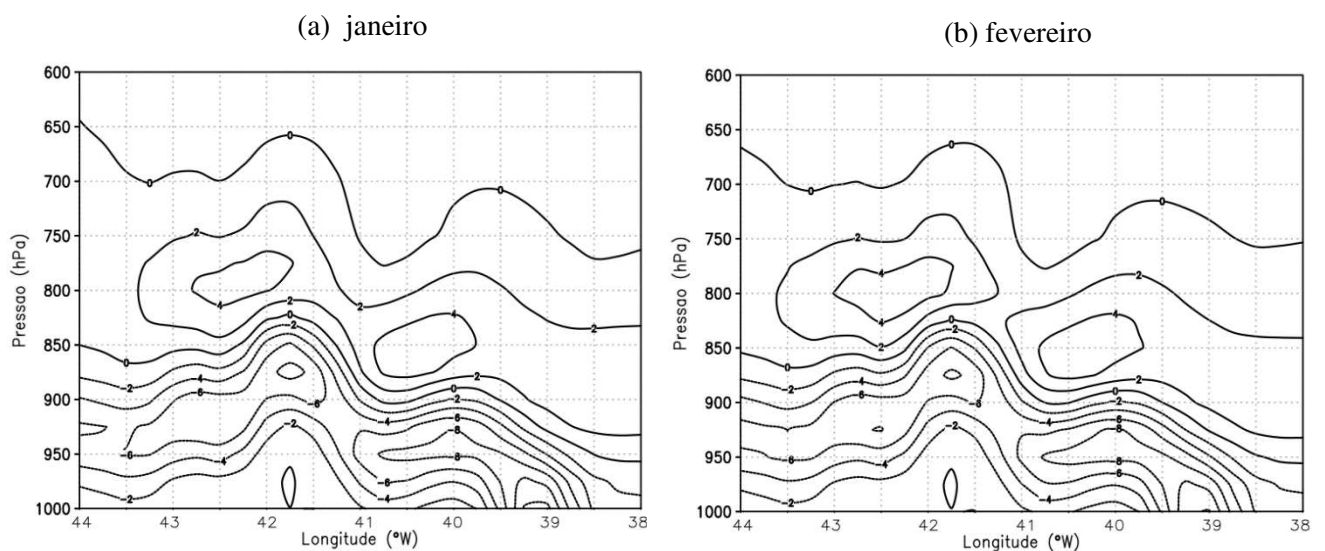




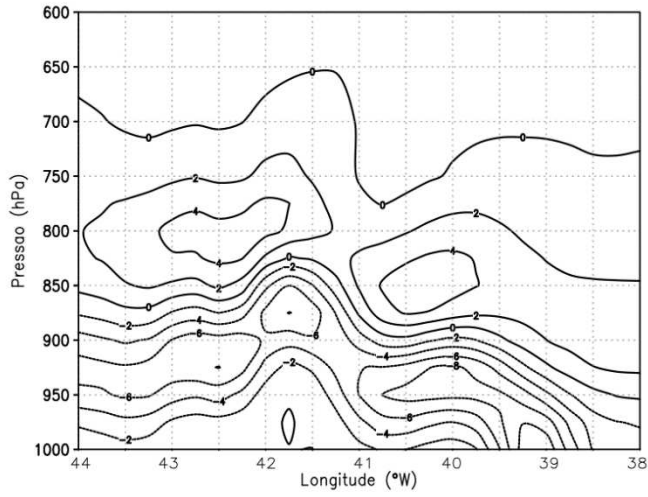
**Figura 11:** Ciclo médio dos meses do ano de 2018, vetor vorticidade, no ponto P1.

#### 4.2 Média mensal para cada mês do vetor vorticidade para o ponto P2.

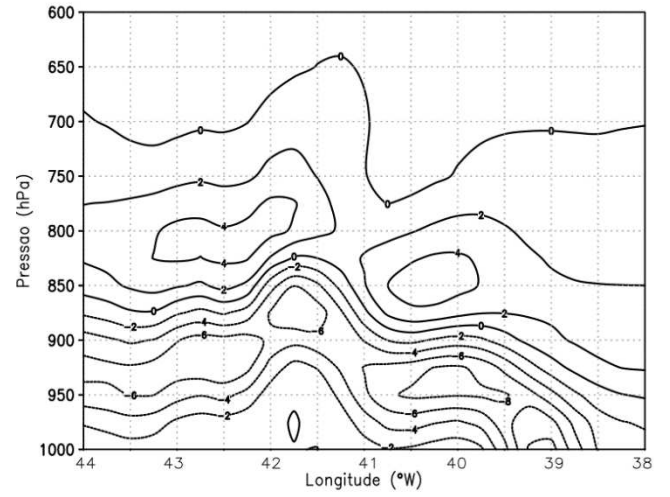
No ponto P2 (42°W e 13°S) figura 12, na região da Chapada Diamantina, a topografia e o relevo têm um impacto significativo na dinâmica atmosférica local. As variações no relevo, incluindo elevações e depressões, afetam os padrões de circulação do vento. Essas características topográficas influenciam diretamente as brisas e outros fenômenos atmosféricos. Valores mais definidos entre os níveis de 800 e 900 hpa, para os meses de maio a novembro



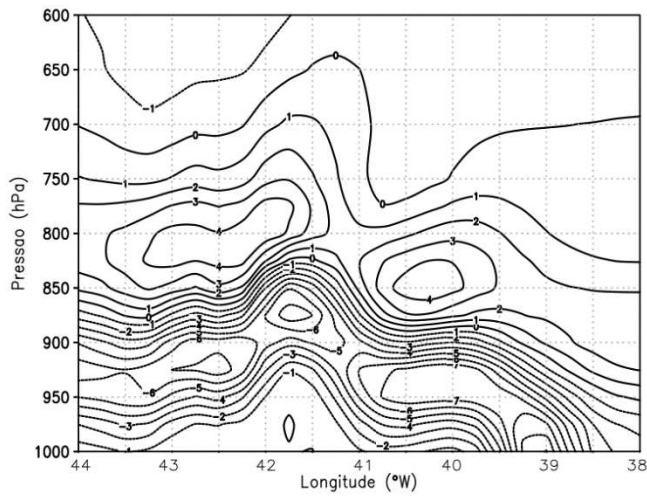
(c) março



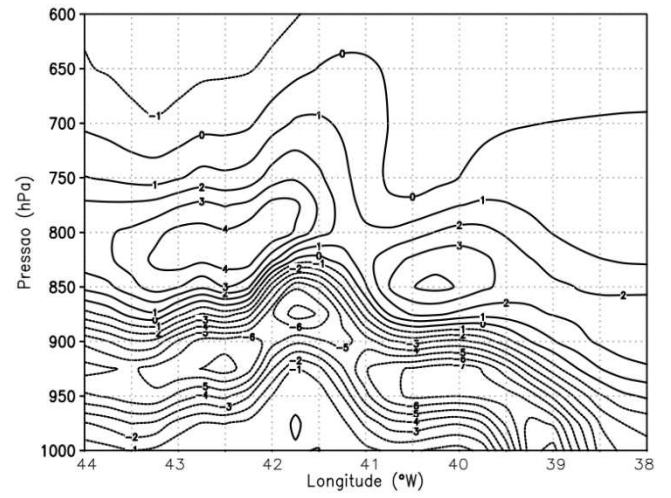
(d) abril



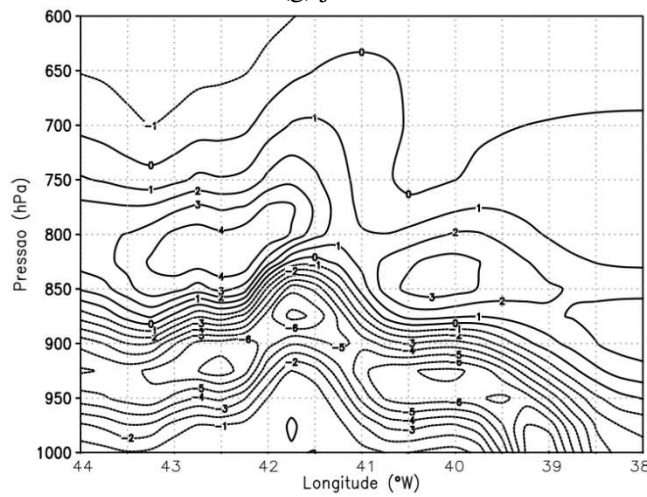
(e) maio



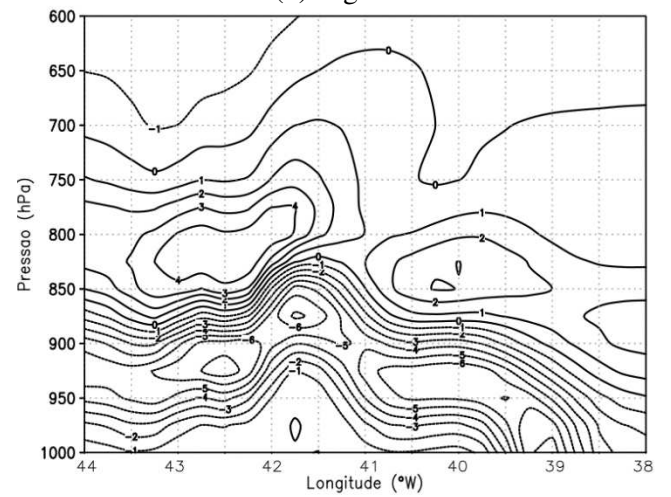
(f) junho

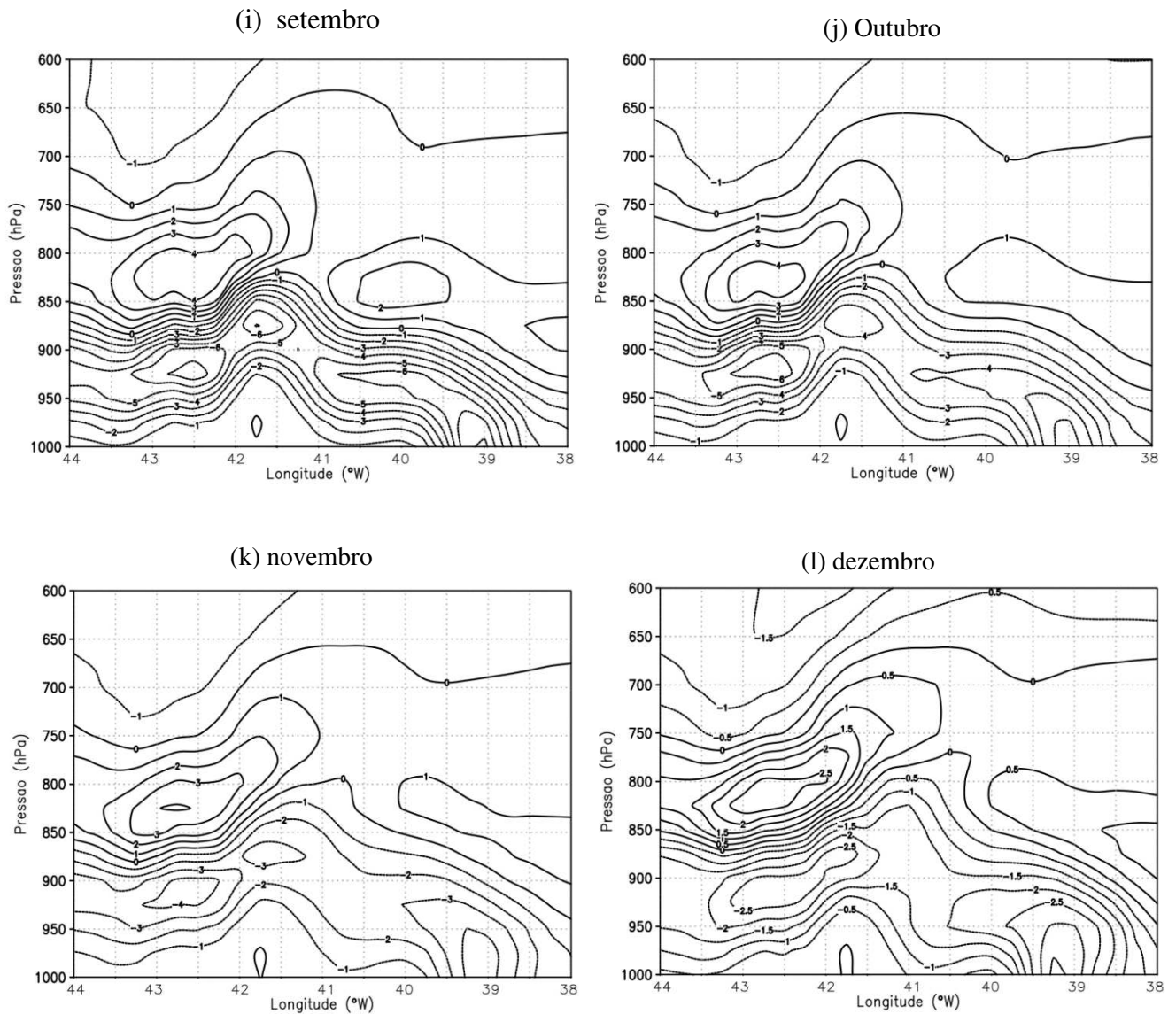


(g) julho



(h) Agosto





**Figura 12:** Ciclo médio vetor vorticidade para meses do ano de 2018, no ponto P2.

O escoamento de ar em terrenos montanhosos é notoriamente complexo. As montanhas atuam como barreiras ao fluxo de ar, por um lado, por outro, o fluxo se intensifica e torna-se mais turbulento ao descer as encostas e picos. Nos níveis mais baixos, dependendo da direção do vento, ele pode ser canalizado por vales, como mostra as isolinhas, aumentando significativamente sua velocidade.

A apresentação dos dados do vetor vorticidade separados por mês é importante para captar as variações nas circulações atmosféricas influenciadas pela topografia ao longo do ano. Essa abordagem permite identificar padrões específicos de vorticidade que podem ser

ocultados em análises baseadas apenas em médias anuais. Além disso, ao calcular a média mensal do vetor vorticidade para cada ponto de estudo, torna-se possível observar as isolinhas de tendência mensais de forma clara e distinta da média anual. Isso evidencia como as condições atmosféricas variam em diferentes momentos do ano, proporcionando uma compreensão mais precisa da dinâmica atmosférica e facilitando a elaboração de previsões mais acuradas, especialmente em regiões com topografia complexa onde as brisas de vale e montanha têm grande influência.

### **4.3 Análise do vetor vorticidade em diferentes níveis de pressão**

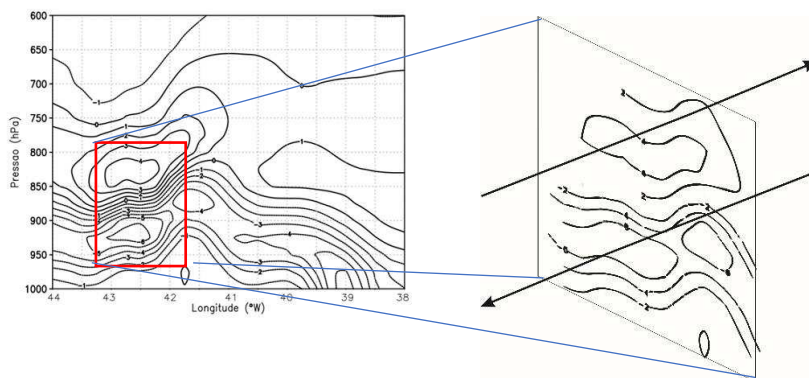
Para entender melhor esses padrões, o vetor vorticidade foi analisado em diferentes níveis de pressão (800, 850 e 900hPa) e em diferentes horários, 00:00 UTC (sigla do inglês, Coordinated Universal Time) que corresponde à (22h, hora local) e 17:00h UTC (4h, hora local). Como já esperado, a orientação do vetor varia de acordo com o nível de pressão. Entre 800 e 900 hPa, dependendo da região, o vetor vorticidade aponta para o sul, logo, assume valores negativos, indicando uma circulação ciclônica que pode estar associada à convergência de ar e possíveis movimentos ascendentes (brisa de vale). Por outro lado, quando o vetor vorticidade aponta para o norte, ele assume valores positivos, sugerindo uma circulação anticiclônica, com uma tendência de divergência e movimentos descendentes (brisa de montanha). Foi feita uma análise para todos os meses do ano de 2018 para dois horários, que são característicos dessas circulações.

Os horários de 01:00 UTC (22 hl) e 17:00 UTC (14 hl) foram escolhidos devido à sua relevância na dinâmica dessas circulações. Às 22h, a brisa de montanha, que se manifesta à noite, está em pleno desenvolvimento, sendo o momento em que o ar frio e denso desce pelas encostas em direção ao fundo dos vales. Esse horário é crucial para capturar a intensidade e a extensão do escoamento catabático que caracteriza a brisa de montanha. Por outro lado, às 14h, a brisa de vale, que ocorre durante o dia, está em seu ponto máximo, quando o ar aquecido nas encostas sobe, formando um escoamento anabático. Esse horário permite observar a influência máxima da brisa de vale na circulação atmosférica local.

Como citado anteriormente, a direção do vetor será definida a partir do nível de pressão em destaque e conseqüentemente dos valores (positivos ou negativos). A Figura 13 exemplifica a análise que foi feita. No nível de pressão (800 hPa) os valores são positivos, isso indica que o vetor da vorticidade aponta para o norte (em ambos os pontos analisados). No nível de pressão 900 hPa os valores são negativos, logo, há uma inversão no vetor vorticidade, ele aponta para a direção sul. Como o vetor da vorticidade gira no sentido anti-

horário, logo, fica evidente se o fluxo se desloca nos sentidos “horário ou anti-horário”, seguindo a topografia de acordo com cada horário.

Os resultados obtidos demonstram como o vetor vorticidade pode variar em direção, intensidade e magnitude em diferentes níveis de pressão. Uma questão relevante que pode ser levantada é: "Por que não considerar outros níveis de pressão?". A resposta reside no fato de que os dados utilizados são provenientes de reanálises, e a escolha dos níveis de pressão considerados, entre 800 e 900 hPa, foi baseada na altitude das montanhas e na pressão atmosférica exercida nessas regiões. Analisar níveis de pressão diferentes poderia gerar dados incoerentes, pois não refletiriam adequadamente o comportamento atmosférico sobre as montanhas. Portanto, é essencial selecionar níveis de pressão que correspondam à realidade topográfica da região de estudo, garantindo uma análise mais precisa e representativa do comportamento das circulações atmosféricas nesses ambientes específicos.



**Figura13:** Representação da direção do vetor vorticidade. Fonte: Autor

#### 4.4 Mapas das médias mensais do vetor vorticidade

A topografia e o relevo desempenham papéis cruciais na dinâmica das circulações de brisas, influenciando a intensidade e o padrão desses fenômenos atmosféricos. No Vale do Açu, a sua topografia cria um ambiente propício para a intensificação dessas circulações. Analisando os meses (julho, agosto, setembro, outubro e novembro) mostra, que a noite, as circulações são mais intensas onde o resfriamento das áreas elevadas ao redor do vale contribui para a formação de brisas de montanha que descem em direção ao fundo do vale.

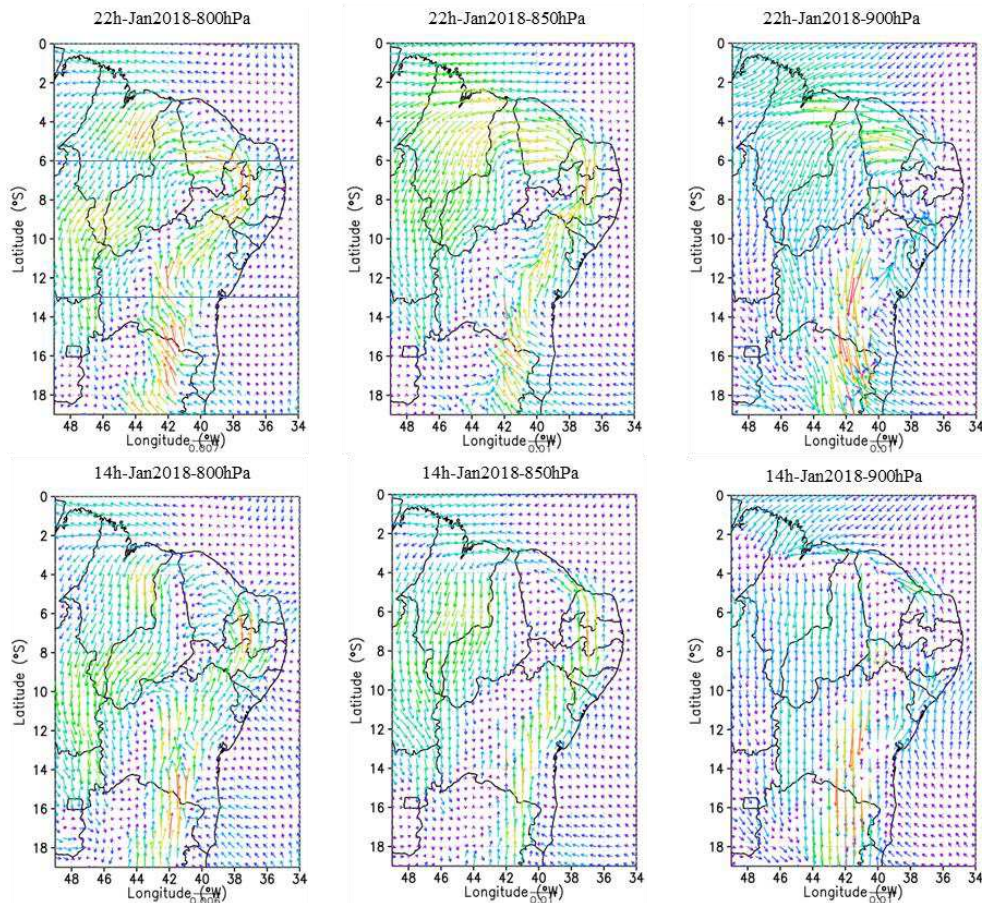
Na região da Chapada Diamantina, a topografia montanhosa e os vales presentes na região favorecem a intensificação das brisas de vale durante o dia. A combinação da altitude elevada da chapada e as diferenças térmicas entre as áreas de relevo elevado e os vales

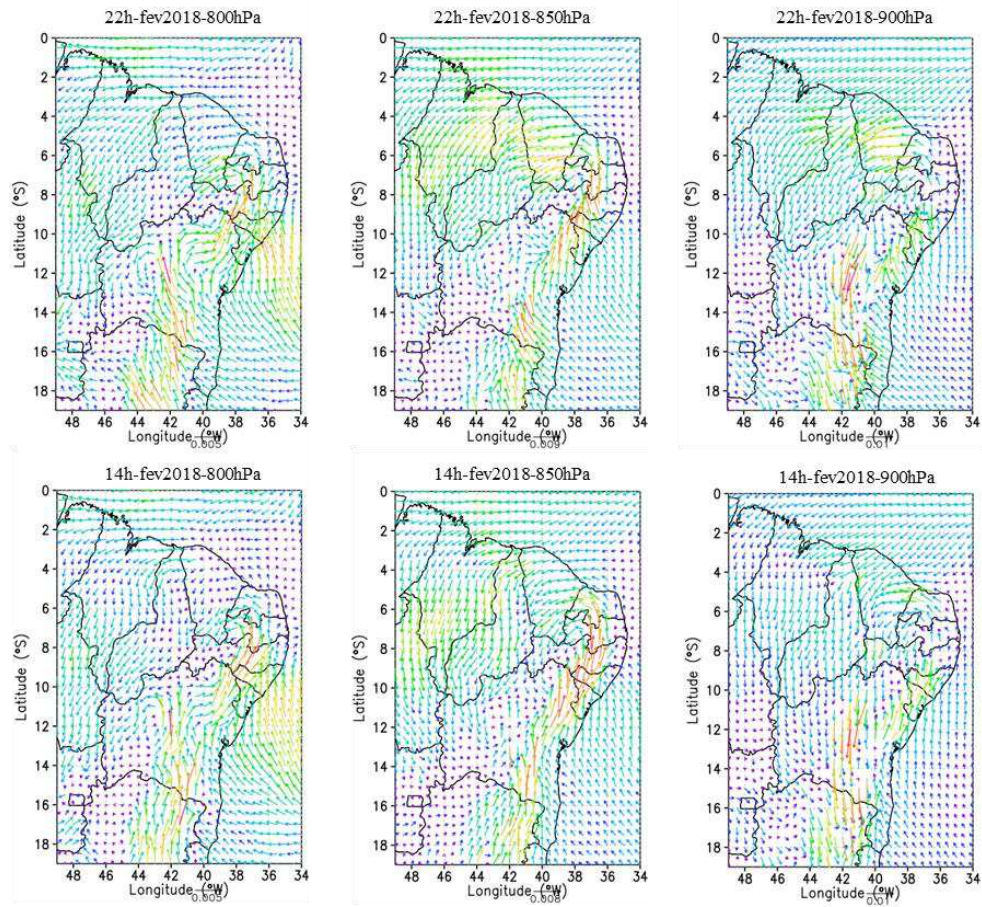
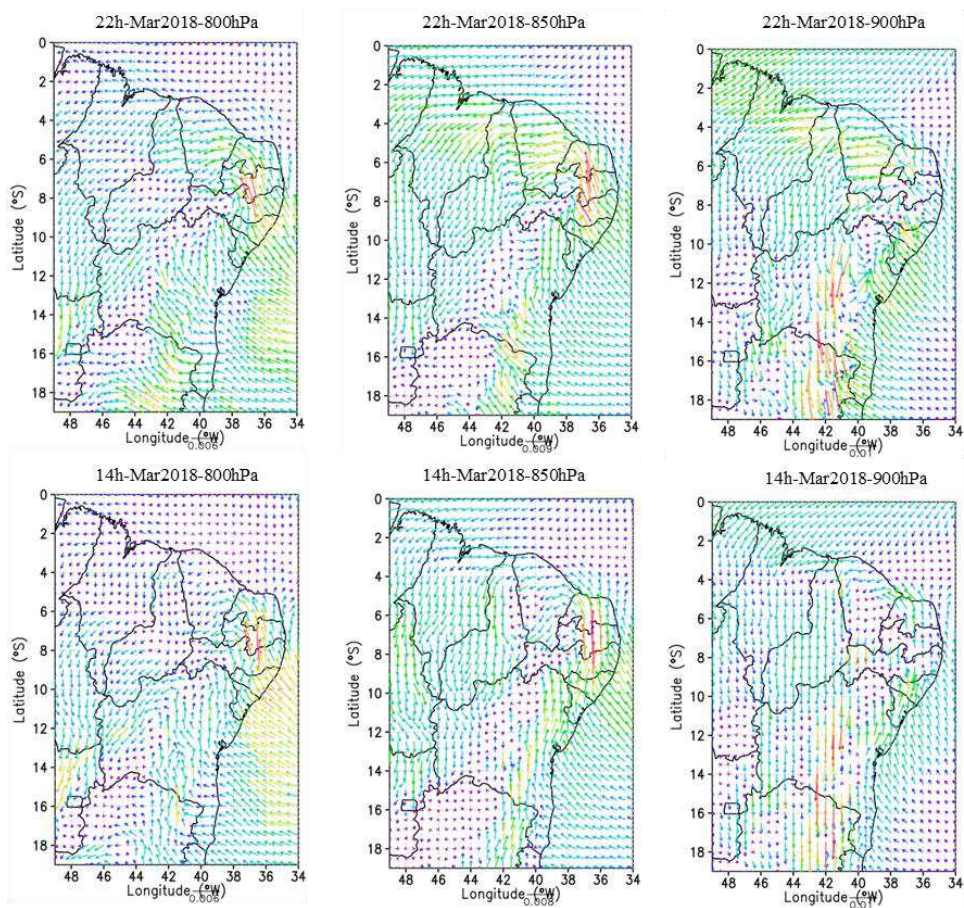


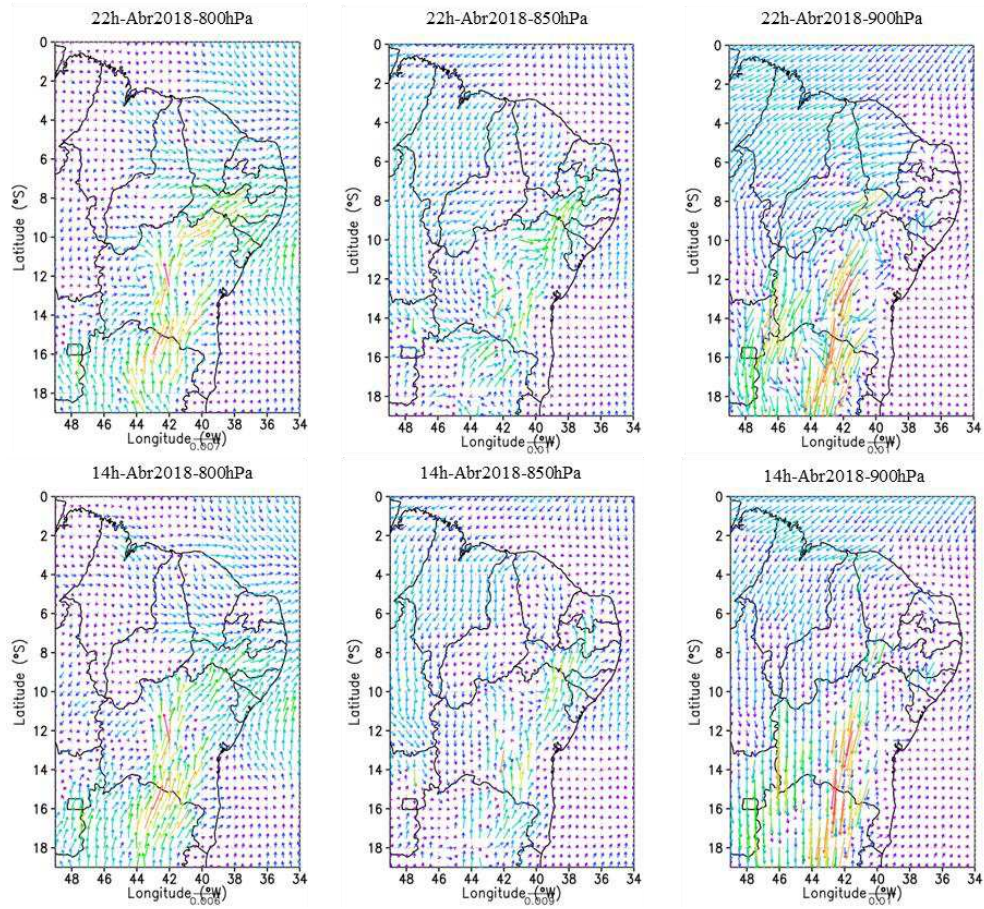
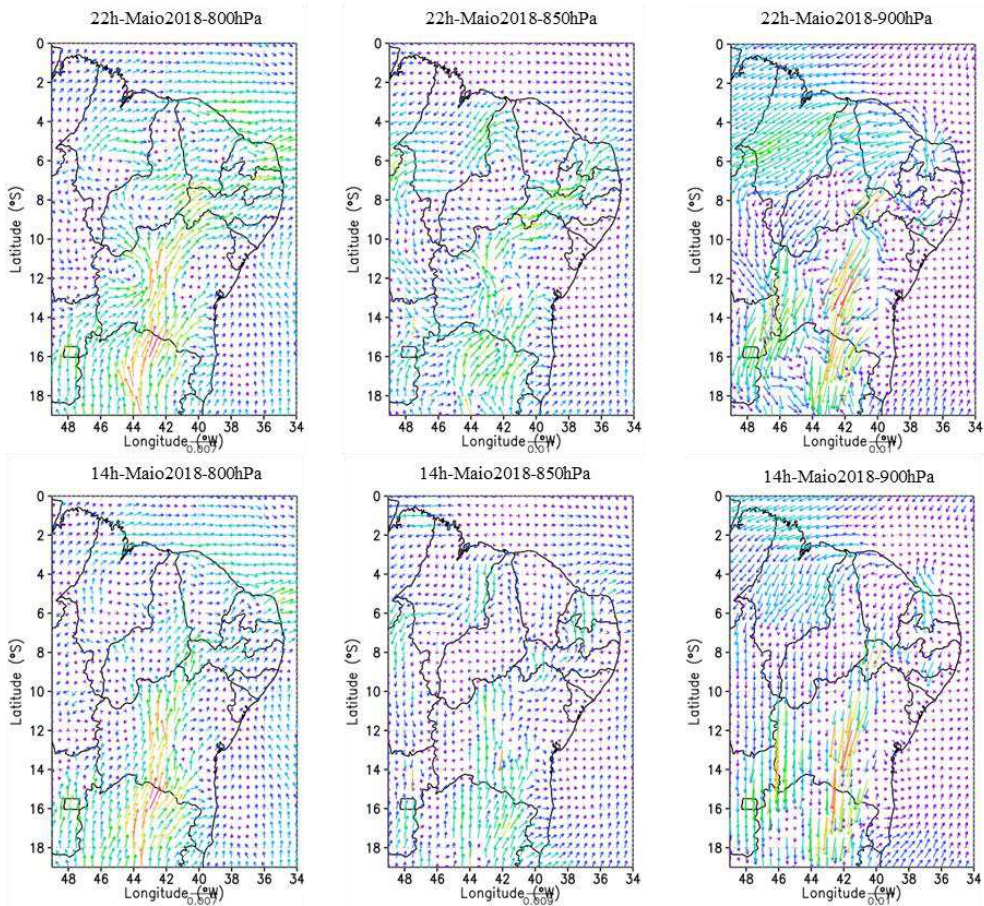
profundos amplifica esses fenômenos, resultando em circulações atmosféricas bem definidas e mais intensas.

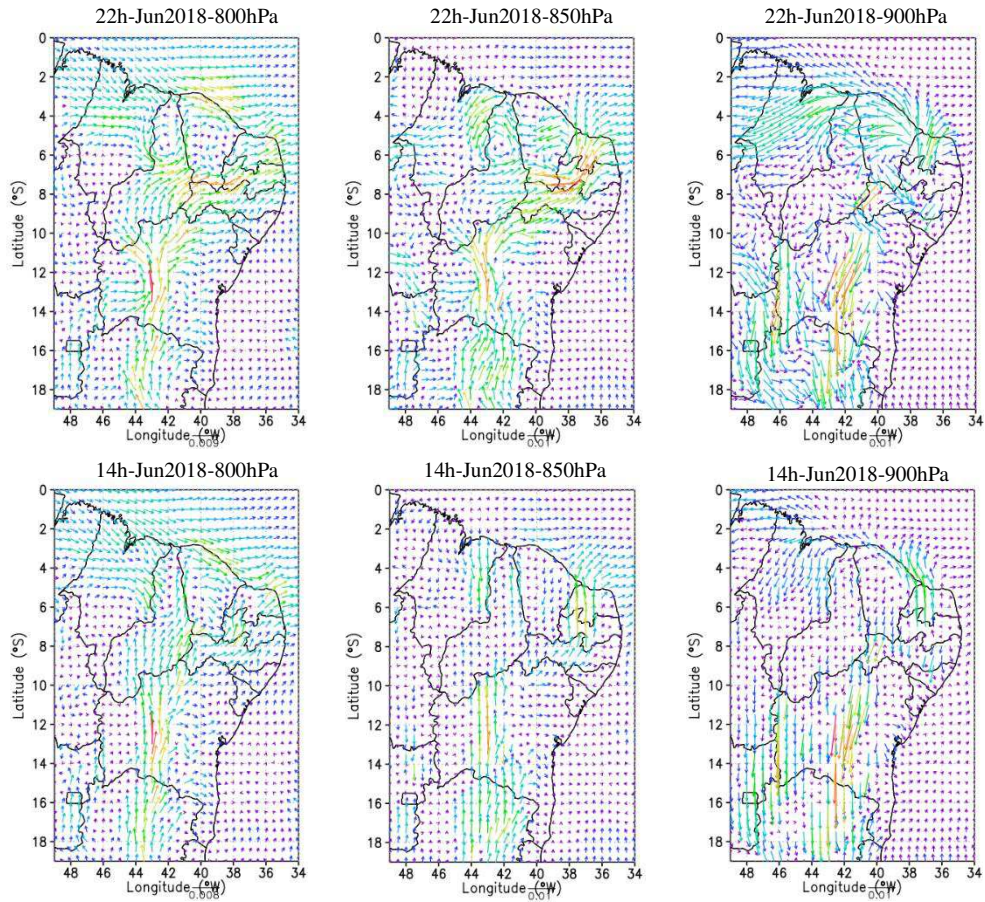
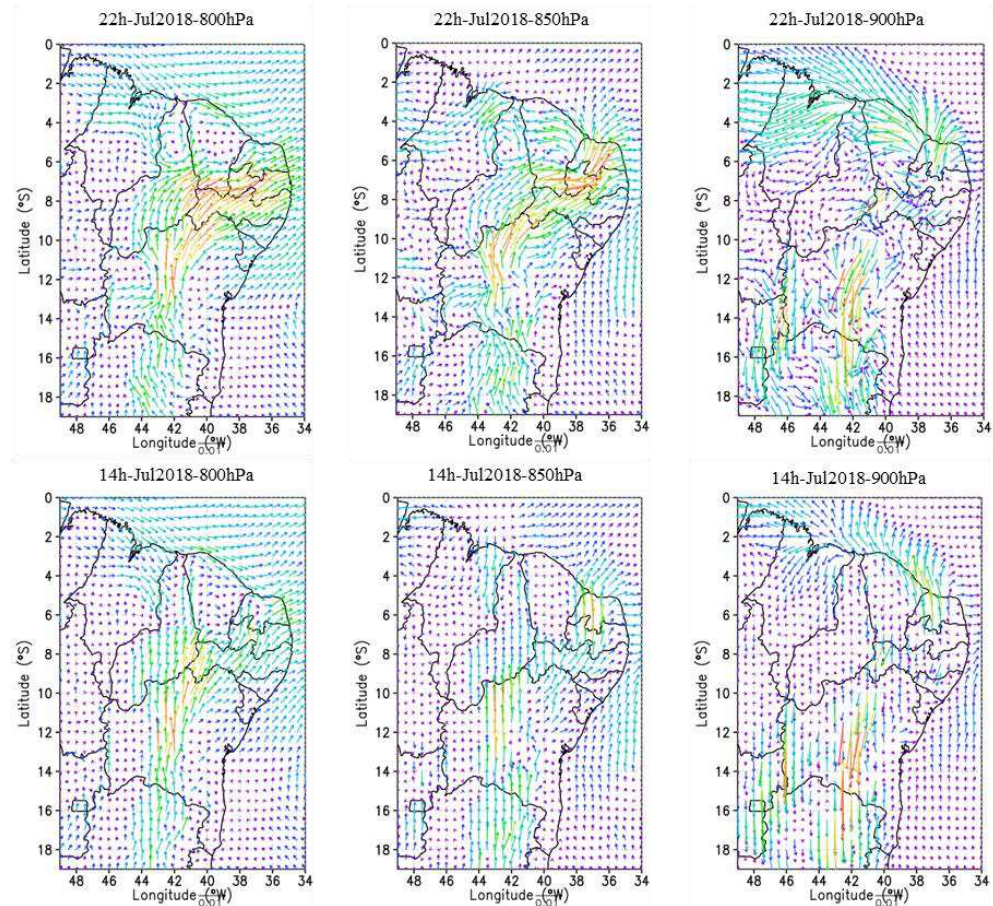
Em outras regiões a intensidade também é apresentada de forma significativa, como por exemplo no planalto baiano ( $10^{\circ}\text{S}$  e  $39^{\circ}\text{W}$ ), no Pico do Jabre ( $7^{\circ}\text{S}$  e  $37^{\circ}\text{W}$ ) e na região do rio São Francisco. A coloração associada ao vetor vorticidade é fundamental para interpretar sua intensidade de maneira visualmente intuitiva. Quando o vetor é representado em vermelho, ele indica uma vorticidade intensa, sugerindo uma rotação forte do ar. A cor amarela também indica uma vorticidade forte, embora um pouco menos intensa que a vermelha. A cor verde geralmente denota uma vorticidade de intensidade moderada, indicando uma rotação média do ar que ainda pode influenciar padrões de vento e formação de nuvens. O azul, por sua vez, representa uma vorticidade fraca, com rotação mínima do ar, o que muitas vezes está relacionado a condições atmosféricas mais estáveis e menos dinâmicas. Quando não há coloração associada ao vetor, isso indica a ausência de vorticidade, ou seja, não há rotação do ar detectável na área analisada, correspondendo a regiões de calmaria ou áreas de movimentos verticais insignificantes.

### (a) Janeiro de 2018

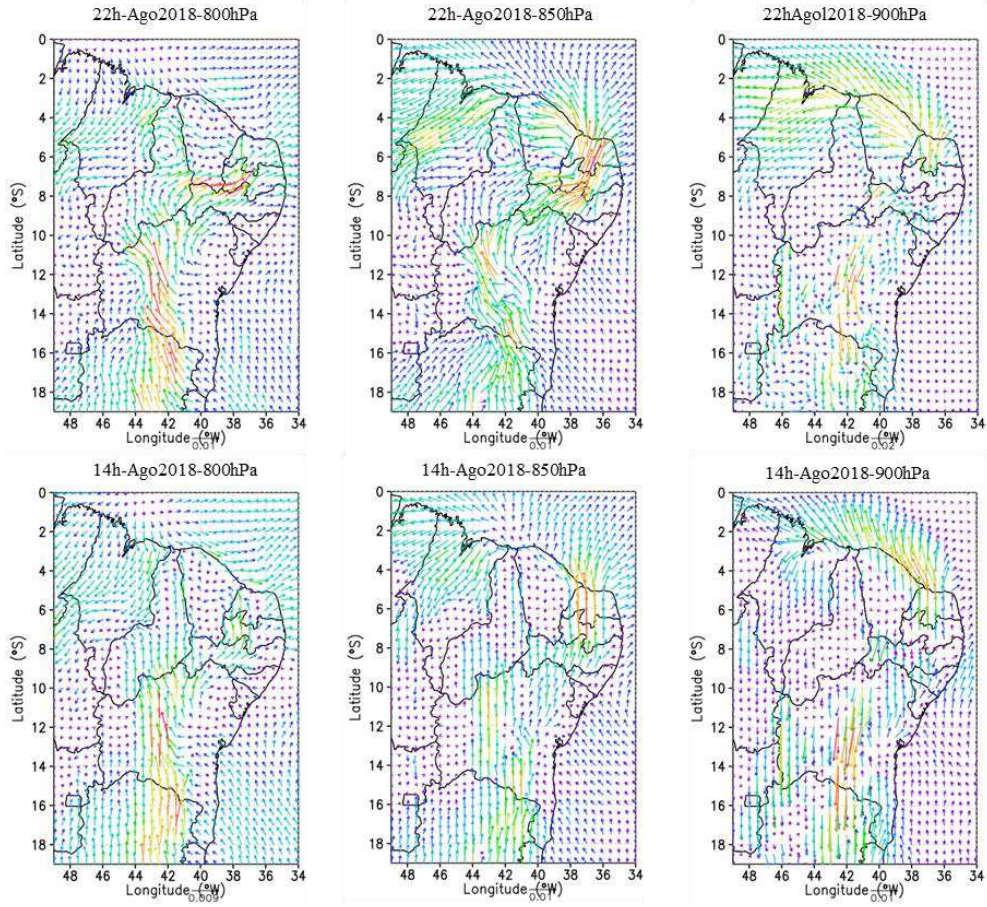


**(b) Fevereiro de 2018****(c) Março de 2018**

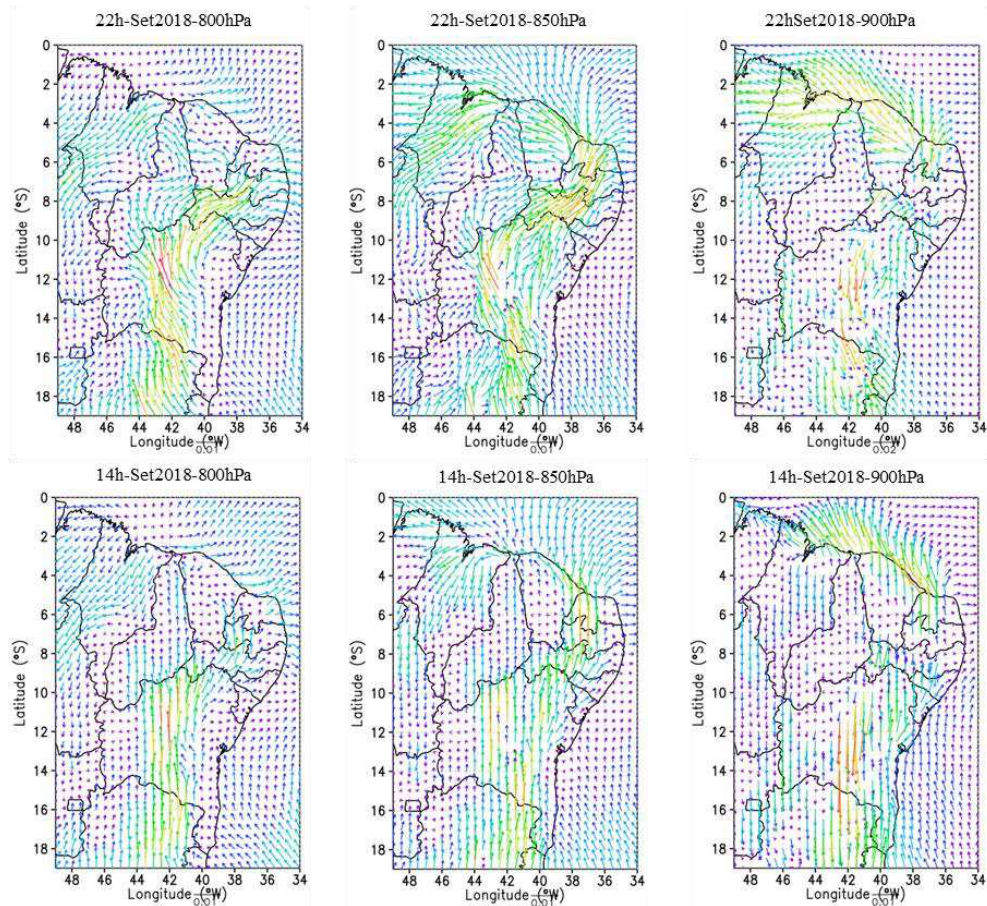
**(d) Abril de 2018****(e) Maio de 2018**

**(f) Junho de 201****(g) Julho de 2018**

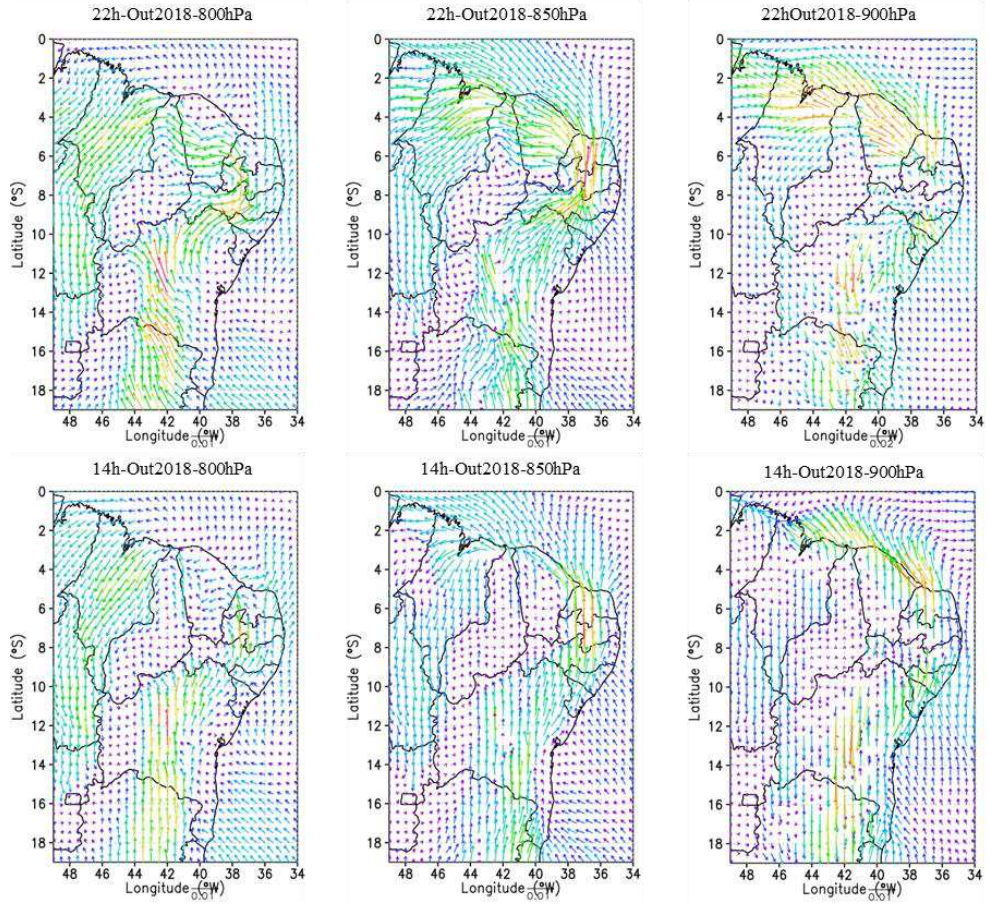
**(h) Agosto de 2018**



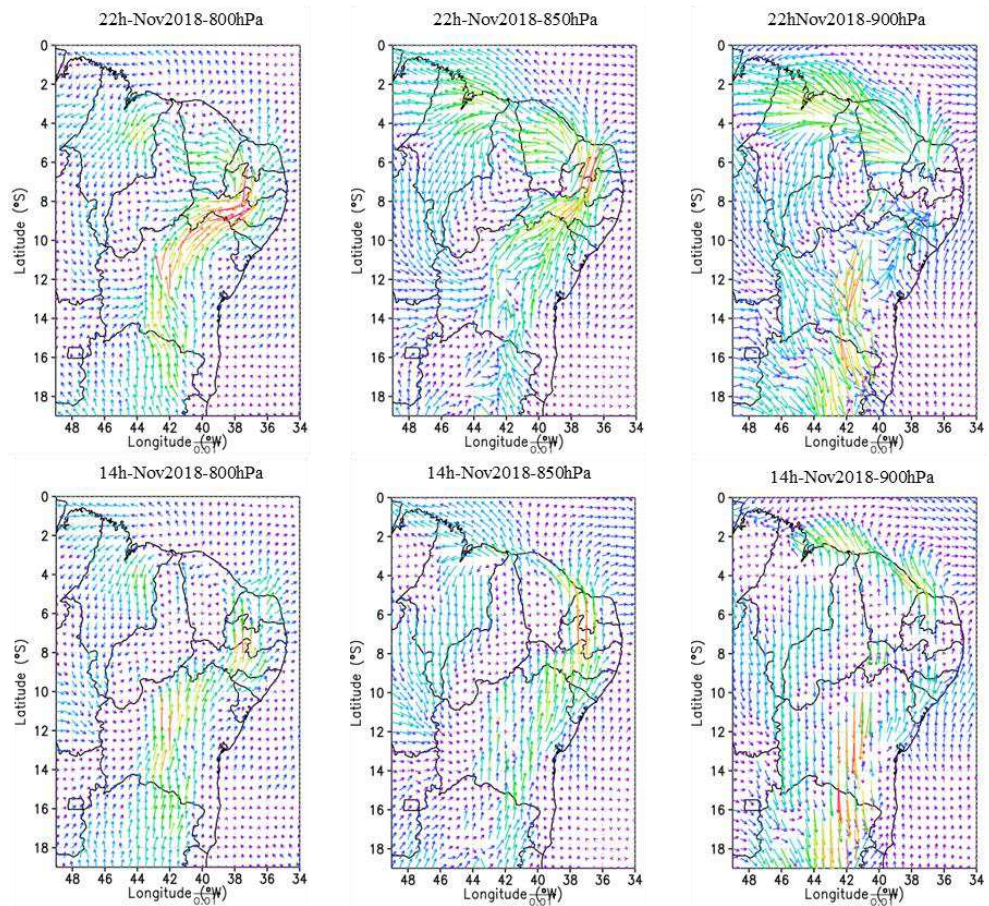
**(i) Setembro de 2018**



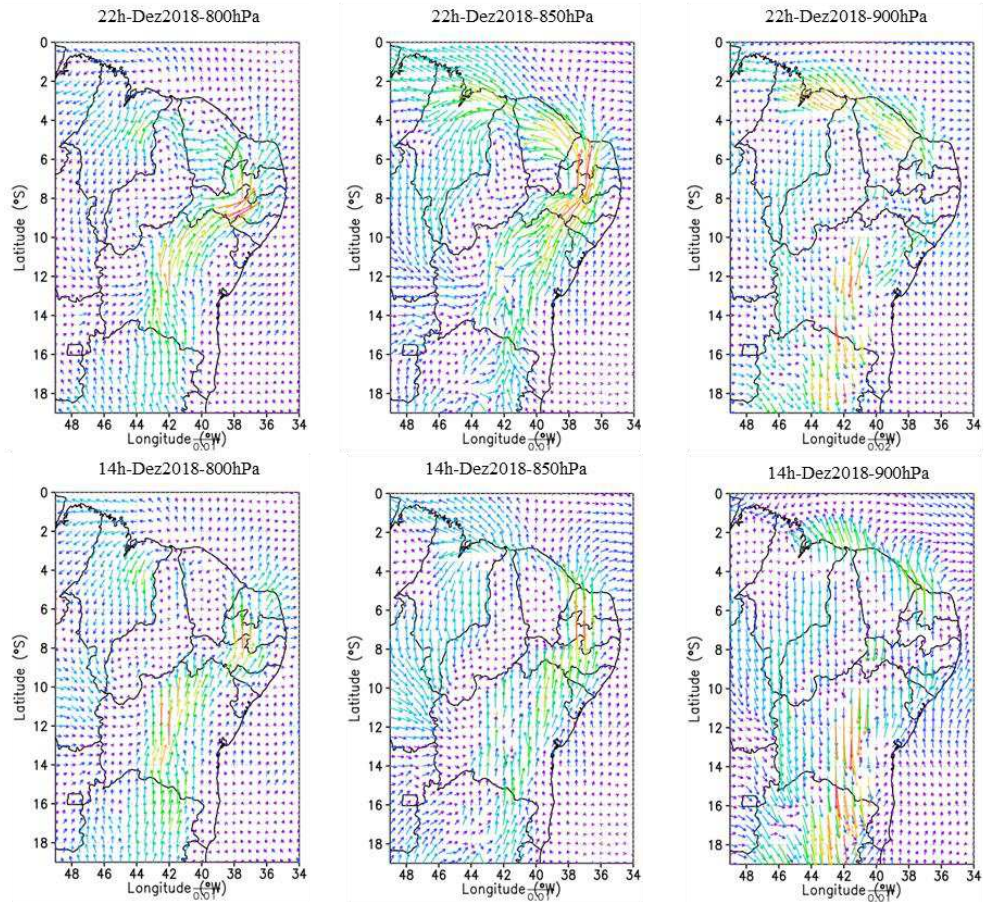
**(j) Outubro de 2018**



**(k) Novembro de 2018**



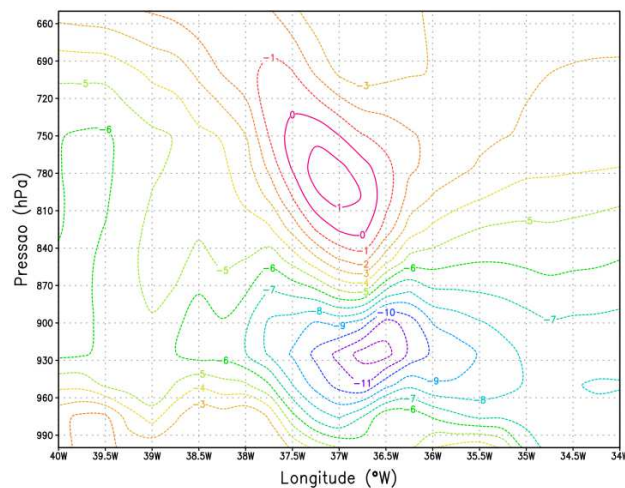
## (I) Dezembro de 2018



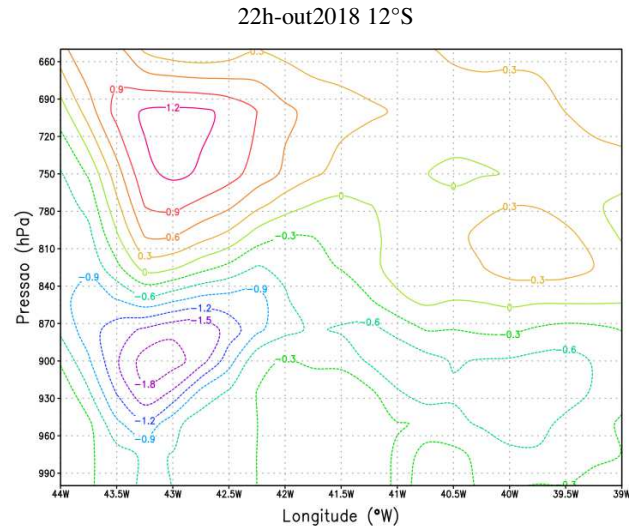
**Figura 14:** Mapa médio anual do vetor vorticidade para a região Nordeste do Brasil. Fonte: Autor.

Seguindo o padrão de cores apresentados nos mapas para verificar a intensidade do vetor vorticidade, foi gerado esse mesmo padrão para as isolinhas para o mês de outubro, onde o padrão obedece aos níveis de pressão e conseqüentemente ao horário. Nas Figuras 15,16,17 e 18 fica evidente como o comportamento do vetor vorticidade se comporta nessas condições.

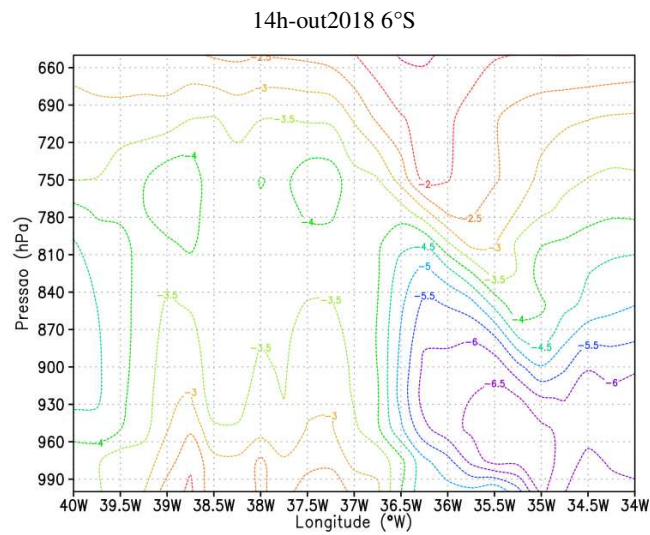
22h-out2018 6°S



**Figura 15:** Média mensal do vetor vorticidade para as 01:00 UTC (22h) na região do vale do Açú.

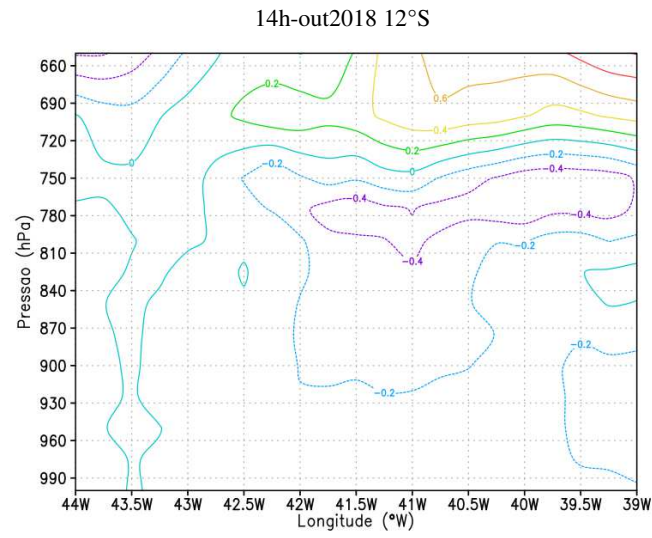


**Figura 16:** Média mensal do vetor vorticidade para as 01:00 UTC (22h) na região da chapada diamantina.



**Figura 17:** Média mensal do vetor vorticidade para às 17:00 UTC (14h) na região do vale do Açú.





**Figura 18:** Média mensal do vetor vorticidade para às 17:00 UTC (14h) na região da chapada diamantina.

## **CAPÍTULO – 5**

### **CONCLUSÃO**

Estudos sobre essas circulações são fundamentais para compreender as particularidades regionais que influenciam o clima e os padrões de vento nessas áreas. A análise revelou que a topografia e o relevo desempenham papéis determinantes na modulação das brisas locais, com impactos significativos no seu comportamento. No Vale do Açu, o seu relevo mostrou como uma circulação pode ter um comportamento diferente do que se imagina, agindo como um intensificador de corrente de ar. Durante o dia, a brisa de vale é reforçada pelo aquecimento diferencial das encostas e do fundo do vale, resultando em correntes de ar ascendentes que afetam a distribuição de umidade e temperatura na região. À noite, a brisa de montanha, influenciada pelo rápido resfriamento das áreas mais elevadas, contribui para uma circulação descendente que pode impactar a estabilidade atmosférica e as condições de vento. Na Chapada Diamantina, a dinâmica é semelhante, porém mais complexa devido à maior variação altitudinal e à diversidade de formações geológicas. A brisa de vale durante o dia é vigorosa, especialmente nas regiões onde os vales são mais pronunciados, facilitando o transporte de ar frio das áreas mais baixas para as partes elevadas. À noite, a brisa de montanha se torna dominante, potencializada pela vasta extensão de áreas elevadas que favorecem um rápido resfriamento

## REFERÊNCIAS

- ATKINSON, B. W. Meso-scale atmospheric circulations. Academic Press, London-New York. 1981.
- AVISSAR, Roni; PIELKE, Roger A. A parameterization of heterogeneous land surfaces for atmospheric numerical models and its impact on regional meteorology. *Monthly Weather Review*, v. 117, n. 10, p. 2113-2136, 1989.
- BIGOT, S.; PLANCHON, Olivier. Identification and characterization of sea breeze days in northern France using singular value decomposition. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 23, n. 11, p. 1397-1405, 2003.
- CROSMAN, Erik T.; HOREL, John D. Sea and lake breezes: A review of numerical studies. *Boundary-layer meteorology*, v. 137, p. 1-29, 2010.
- FISHER, Edwin L. Um estudo teórico da brisa marítima. *Revista de Ciências Atmosféricas*, v. 18, n. 2, pág. 2016-233, 1961.
- GILLIAM, Robert C.; RAMAN, Sethu; NIYOGI, Dev Dutta S. Observational and numerical study on the influence of large-scale flow direction and coastline shape on sea-breeze evolution. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 111, p. 275-300, 2004.
- GRUBIŠIĆ, Vanda et al. The Terrain-Induced Rotor Experiment: Uma visão geral da campanha de campo incluindo destaques observacionais. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 89, n. 10, p. 1513-1534, 2008.
- HAURWITZ, Bernard. Comments on the sea-breeze circulation. *Journal of Atmospheric Sciences*, v. 4, n. 1, p. 1-8, 1947.
- HERSBACH, Hans et al. Operational global reanalysis: progress, future directions and synergies with NWP. 2018.
- HERSBACH, Hans et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 146, n. 730, p. 1999-2049, 2020.

HINDMAN, Edward E. Air currents in a mountain valley deduced from the breakup of a stratus deck. *Monthly Weather Review*, v. 101, n. 3, p. 195-200, 1973.

HOLTON, J. R., 2004: *An Introduction to Dynamic Meteorology*, 4th Edition, Elsevier Academic Press, New York, 535 pp.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2022. <http://www.ibge.gov.br>

KIRSHBAUM, Daniel J. On thermally forced circulations over heated terrain. *Journal of the atmospheric sciences*, v. 70, n. 6, p. 1690-1709, 2013.

IBGE-INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Área territorial brasileira. 2004.

MAIA, Rubson P.; BEZERRA, Francisco HR. Condicionamento estrutural do relevo no Nordeste setentrional brasileiro. *Mercator (Fortaleza)*, v. 13, p. 127-141, 2014.

MATZINGER, N. et al. Surface radiation budget in an Alpine valley. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography*, v. 129, n. 588, p. 877-895, 2003.

MAHRER, Ytzuaq; PIELKE, Roger A. The effects of topography on sea and land breezes in a two-dimensional numerical model. *Monthly weather review*, v. 105, n. 9, p. 1151-1162, 1977.

MASSELINK, Gerhard. The effect of sea breeze on beach morphology, surf zone hydrodynamics and sediment resuspension. *Marine Geology*, v. 146, n. 1-4, p. 115-135, 1998.

MIRANDA, RAC. *Climatologia geográfica*. v.1. / Lucio de Souza, Ricardo Augusto Calheiros de Miranda. - Rio de Janeiro: Fundação CECIERJ, 2012. 246 p.; 19 x 26,5 cm. ISBN: 978-85-7648-882-8 1. Geografia. 2. Climatologia. I. Souza, Lucio de. II. Título.

MILLER, S. T. K. et al. Sea breeze: Structure, forecasting, and impacts. *Reviews of geophysics*, v. 41, n. 3, 2003.

OKE, Timothy R. City size and urban heat island. *Atmospheric Environment*. v. 8, p. 769-779, 1967.

OKE, Timothy R. The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects. *Wind climate in cities*, p. 81-107, 1995.

PIELKE SR, Roger A. Examples of mesoscale models. In: *International Geophysics*. Academic Press, 2013. p. 427-500.

PIELKE, Roger A. A comparison of three-dimensional and two-dimensional numerical predictions of sea breezes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 31, n. 6, p. 1577-1585, 1974.

POKHREL, Rajib; LEE, Heekwan. Estimation of the effective zone of sea/land breeze in a coastal area. *Atmospheric Pollution Research*, v. 2, n. 1, p. 106-115, 2011.

RAMPANELLI, Gabriele; ZARDI, Dino; ROTUNNO, Richard. Mecanismos de ventos de vale alto. *Journal of the atmosphere sciences*, v. 61, n. 24, p. 3097-3111, 2004.

REDDY, L. Ram Gopal; REDDY, B. M. Sea breeze signatures on line-of-sight microwave links in tropical coastal areas. *Radio Science*, v. 42, n. 04, p. 1-13, 2007.

ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. Relevô brasileiro: uma nova proposta de classificaçãõ. *Revista do Departamento de Geografia*, v. 4, p. 25-39, 1985.

ROTACH, Mathias W. et al. Sobre a troca vertical de calor, massa e momento sobre terrenos montanhosos complexos. *Frontiers in Earth Science*, v. 3, p. 76, 2015.

ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. *Geografia do Brasil*. Edusp, 1996.

SCHMIDLI, Juerg; ROTUNNO, Richard. O estado quase estável do sistema de vento do vale. *Frontiers in Earth Science*, v. 3, p. 79, 2015.

SCHMIDLI, Juerg; BÖING, Steven; FUHRER, Oliver. Precisão de ventos simulados de vales diurnos nos Alpes Suíços: Influência da resolução da grade, filtragem de topografia e conjuntos de dados de superfície terrestre. *Atmosphere* , v. 9, n. 5, p. 196, 2018.

SMITH, Ronald B. A influência das montanhas na atmosfera. Em: *Avanços em geofísica* . Elsevier, 1979. p. 87-230.

SERAFIN, Stefano et al. Processos de troca na camada limite atmosférica sobre terreno montanhoso. *Atmosphere* , v. 9, n. 3, p. 102, 2018.

SEGAL, M.; ARRITT, R. W. Nonclassical mesoscale circulations caused by surface sensible heat-flux gradients. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 73, n. 10, p. 1593-1604, 1992.

SETO, Karen C.; SHEPHERD, J. Marshall. Global urban land-use trends and climate impacts. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v. 1, n. 1, p. 89-95, 2009.

SILVA, Gustavo Rodrigues. Características de Vento da Região Nordeste: análise, modelagem e aplicações para projetos de centrais eólicas. 2003. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

SOUZA, E. B. GrADS – Fundamentos e Programação Básica. Curso de Extensão, Departamento de Meteorologia, Centro de Geociências, UFPA, 2004.

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

STULL, Roland B. An introduction to boundary layer meteorology. Springer Science & Business Media, 2012.

TEIXEIRA, Miguel AC et al. The atmosphere over mountainous regions. *Frontiers in Earth Science* , v. 4, p. 84, 2016.

VIEIRA, V. R. REGIONALIZAÇÃO E RISCOS DE ÍNDICES DE CHUVAS INTENSAS NO NORDESTE DO BRASIL. 2014. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

VERGEINER, IGNAZ; DREISEITL, EKKEHARD. Valley Winds and Slope Winds — Elementary Observations and Thoughts. *Meteorology and Atmospheric Physics (Print)*, v. 36, n. 1-4, p. 264-286, 1987.

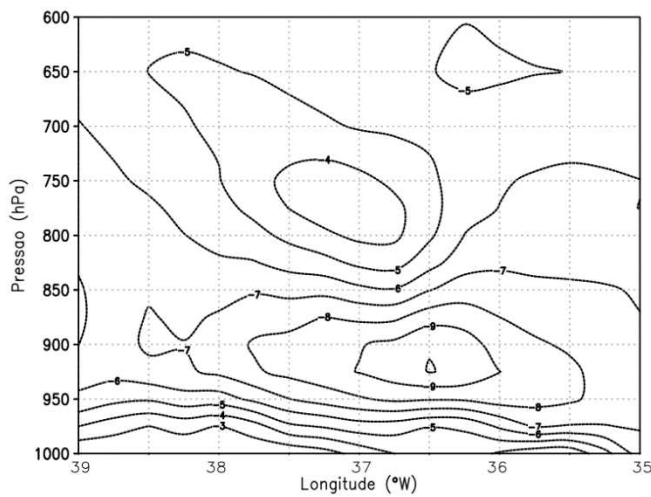
WHITEMAN, C. David. *Mountain meteorology: fundamentals and applications*. Oxford University Press, 2000.

ZHANG, Yuqing et al. Ozone pollution aggravated by mountain-valley breezes over the western Sichuan Basin, southwest China. *Chemosphere*, p. 142445, 2024.

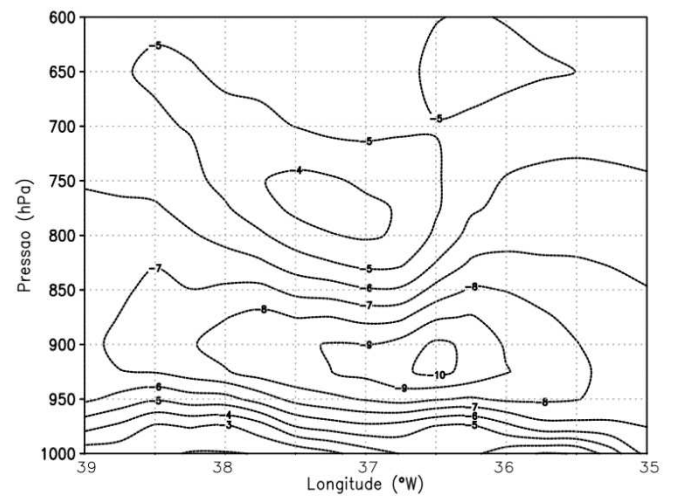
## APÊNDICES

Ciclo médio mensal do perfil U do vento, ao longo do ano de 2018, para o ponto P1.

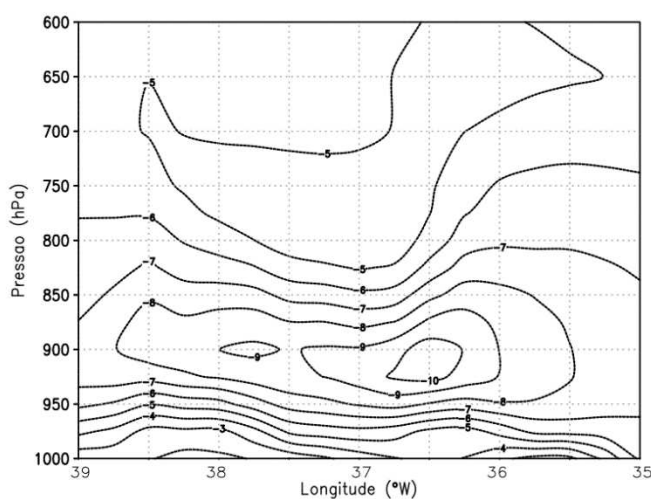
(a) Janeiro



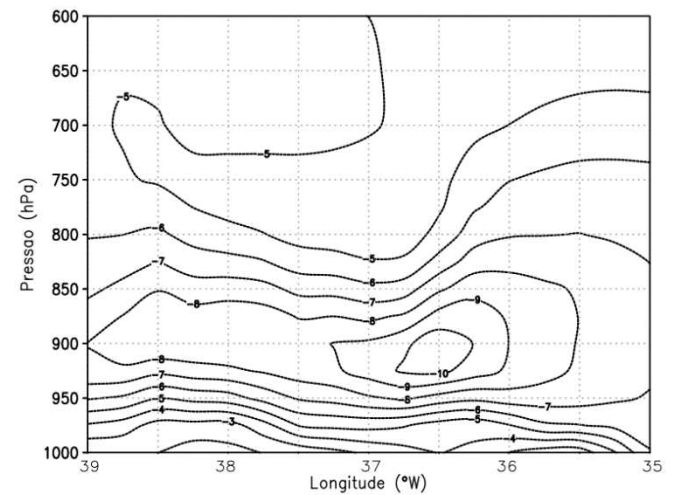
(b) Fevereiro



(c) Março

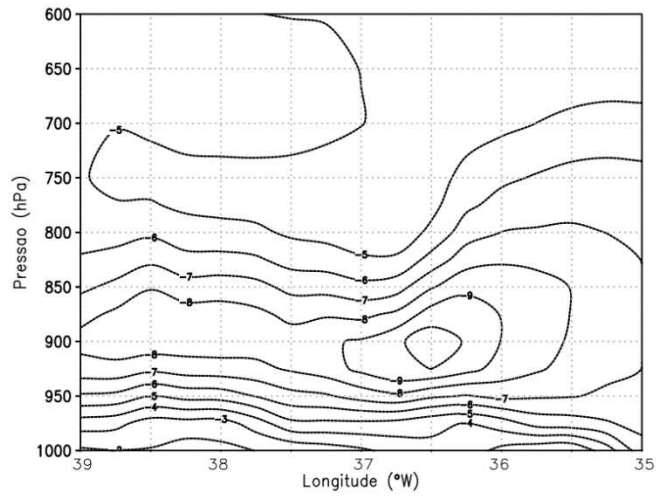


(d) Abril

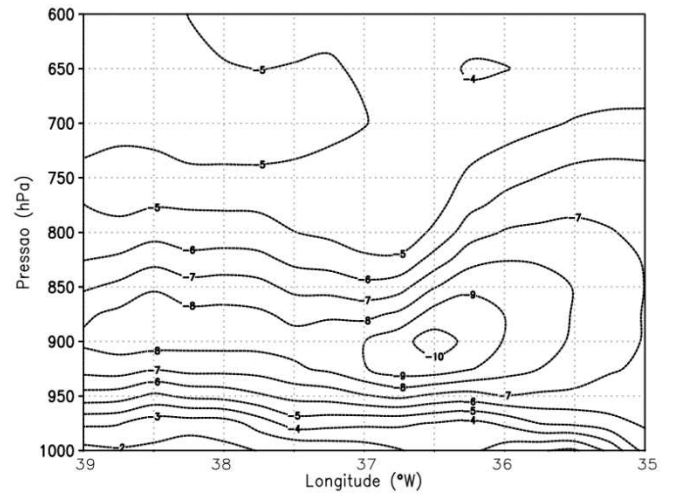




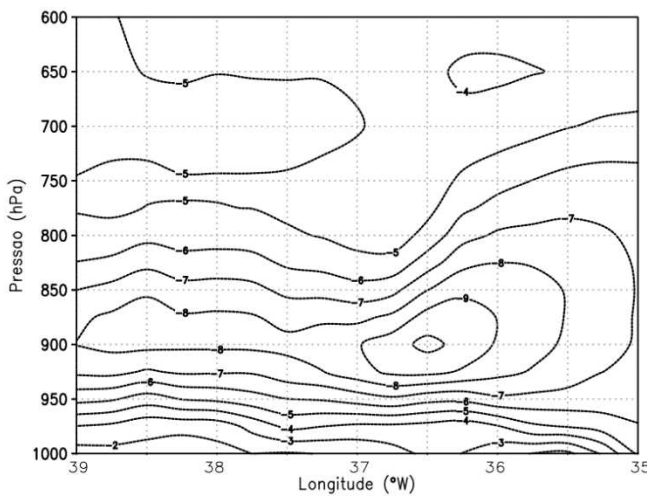
(e) Maio



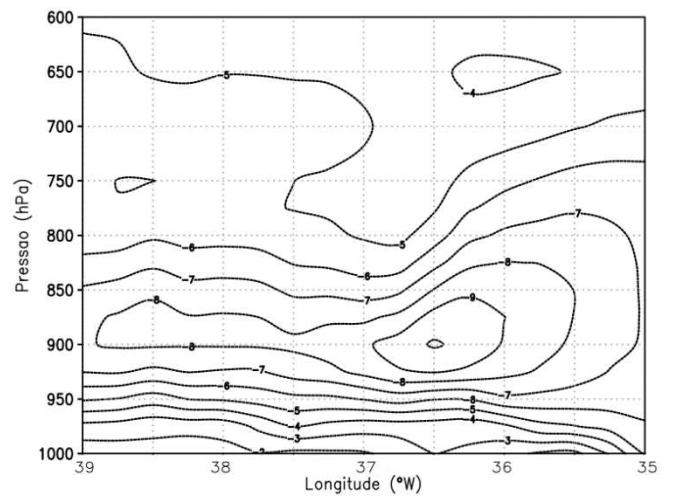
(f) Junho



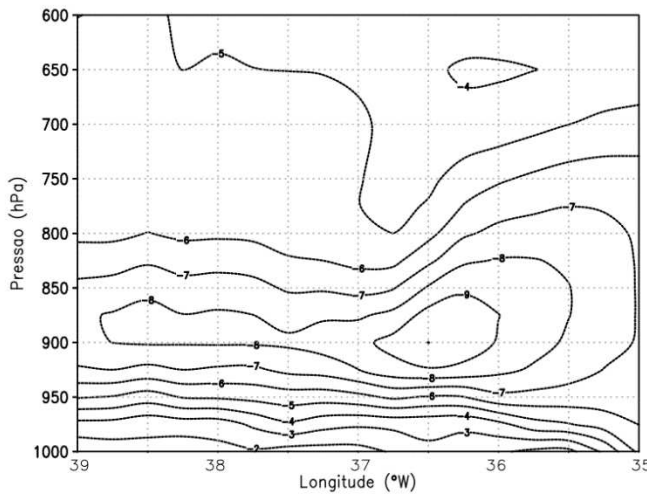
(g) Julho



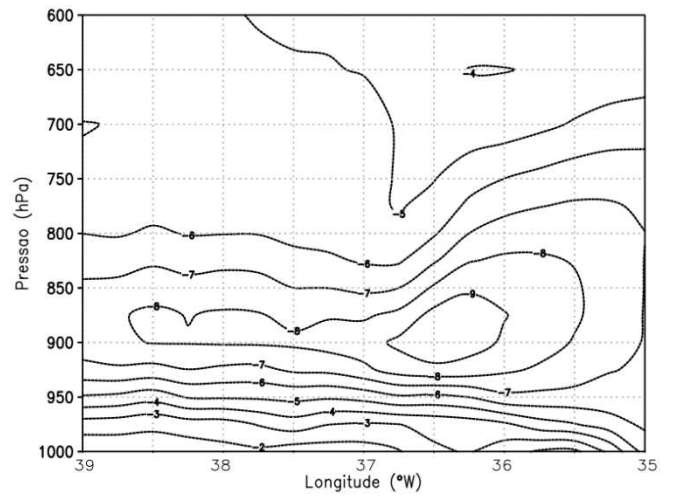
(h) Agosto



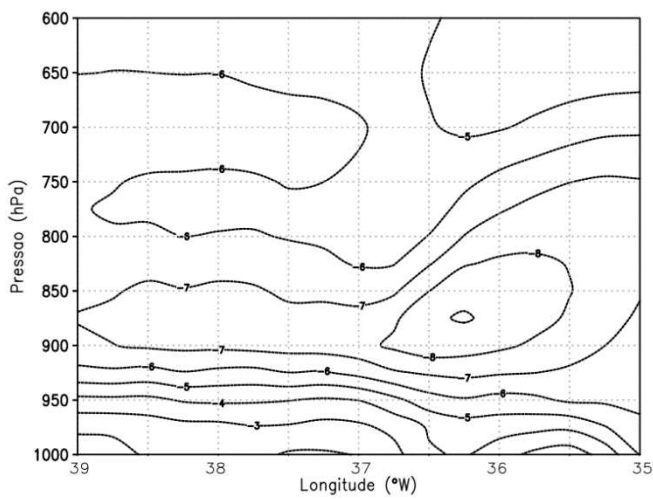
(i) Setembro



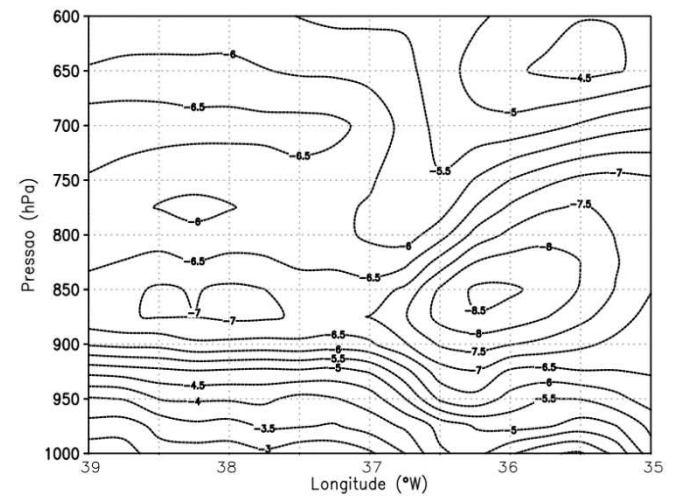
(j) Outubro



(k) Novembro

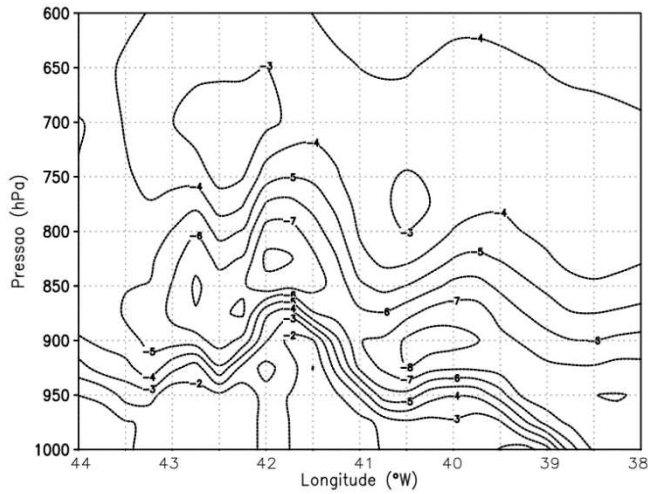


(l) Dezembro

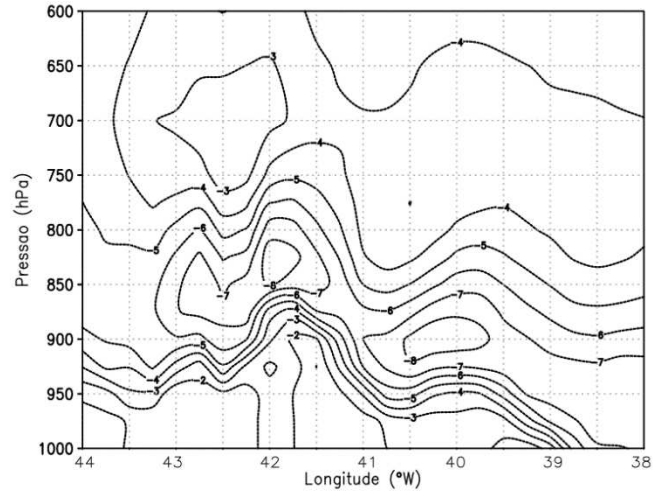


**Ciclo médio mensal do perfil U do vento, ao longo do ano de 2018, para o ponto P2.**

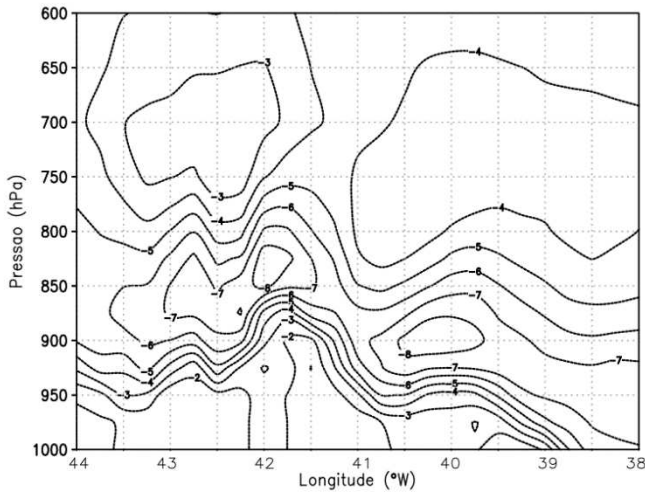
(a) Janeiro



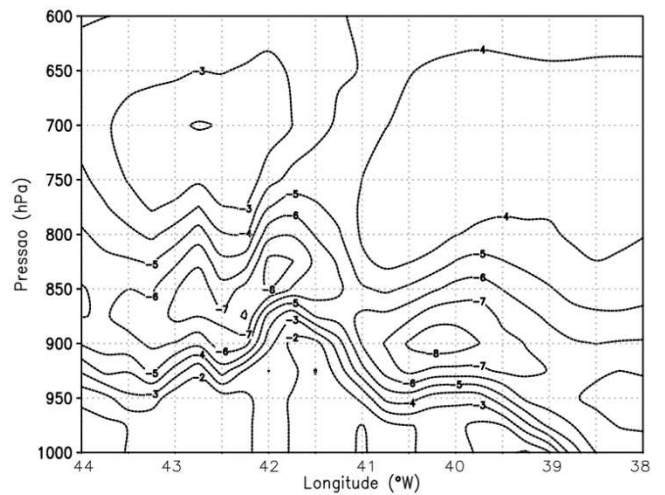
(b) Fevereiro



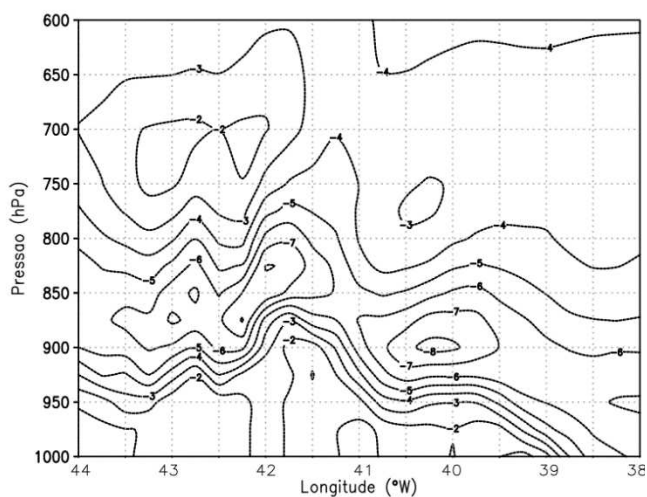
(c) Março



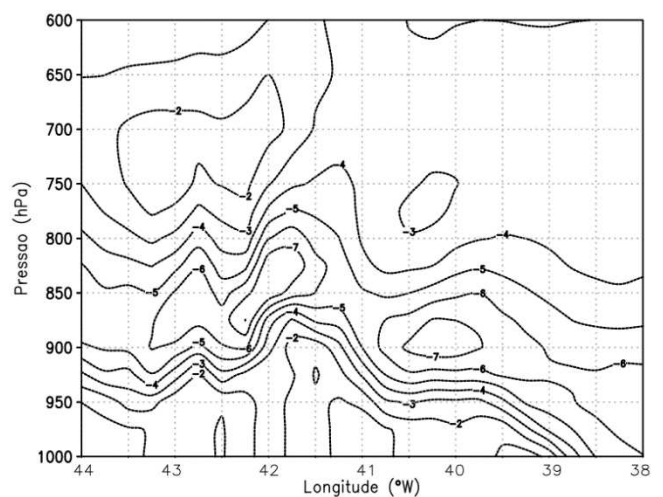
(d) Abril



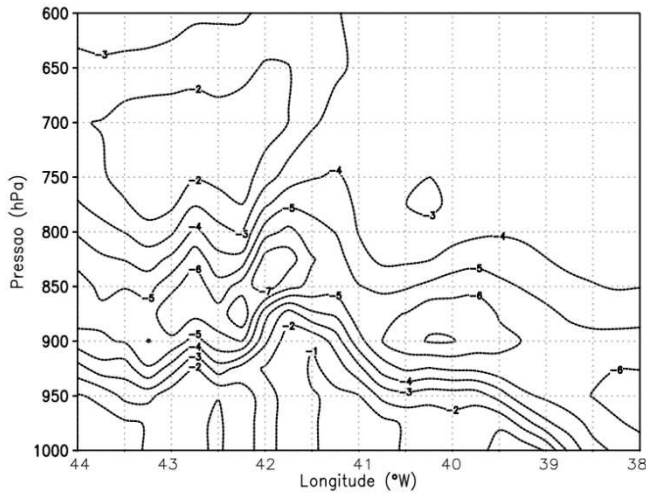
(e) Maio



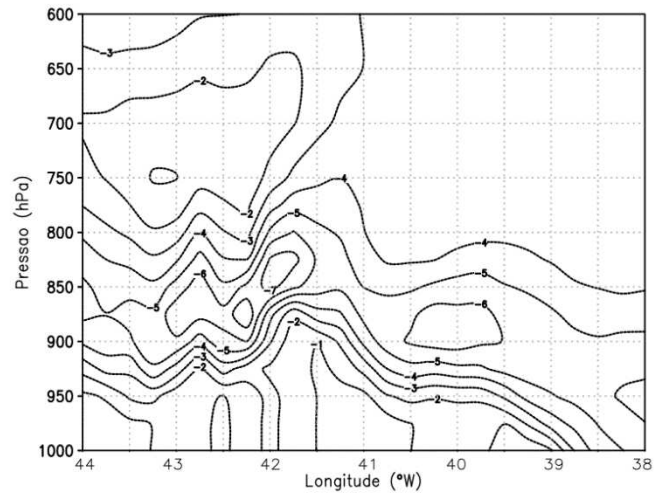
(f) Junho



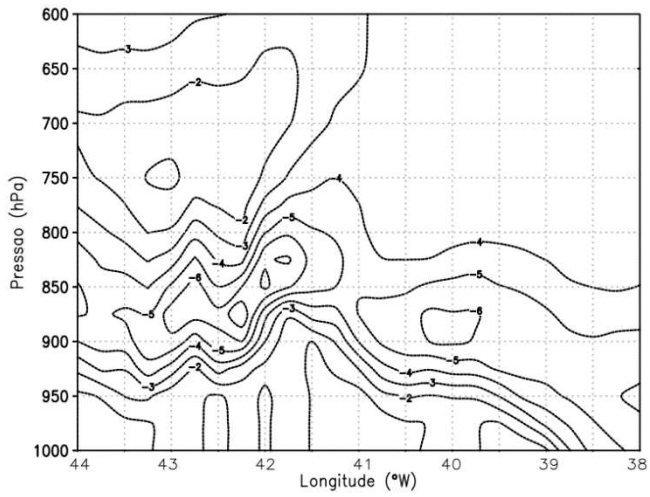
(g) Julho



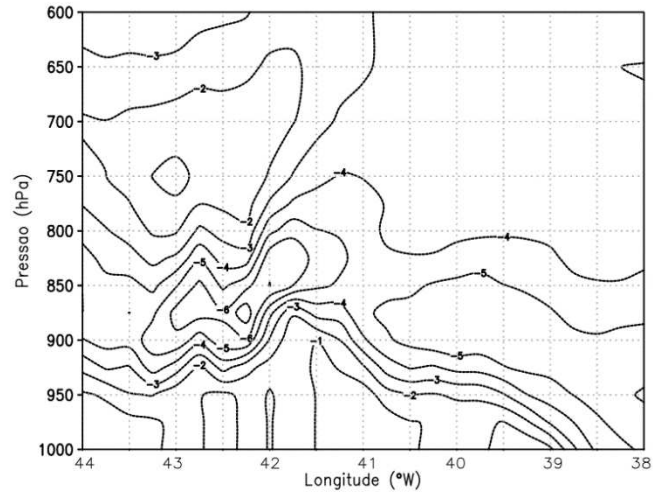
(h) Agosto



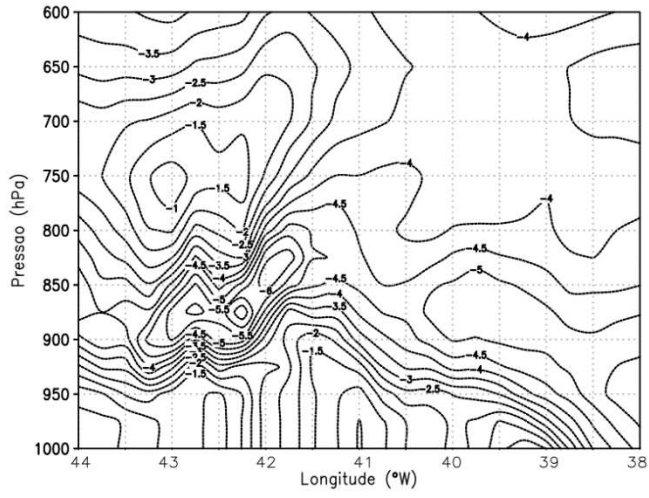
(i) Setembro



(j) Outubro



(k) Novembro



(l) Dezembro

