



Universidade de São Paulo  
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas  
Departamento de Ciências Atmosféricas

Grupo de Micrometeorologia  
Laboratório de Interação Ar-Mar

Relatório de atividades do mestrado  
Abril - Setembro 2014

**Investigação dos fluxos verticais turbulentos de calor e momento na região  
da Base Científica Brasileira na Antártica**

Marco Aurélio Alvarenga Alves  
Orientadora: Profa. Dra. Jacyra Soares

São Paulo, 06 de outubro de 2014



Universidade de São Paulo  
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas  
Departamento de Ciências Atmosféricas

## Sumário

1. Resumo.....	3
2. Objetivos .....	3
3. Região de estudo e dados utilizados.....	4
4. Estimativas dos fluxos verticais turbulentos pela TSMO .....	6
5. Resultados preliminares .....	7
6. Conclusões preliminares .....	11
7. Referências bibliográficas .....	12
8. Outras atividades desenvolvidas no período .....	12
8.1. Disciplinas do programa de mestrado .....	12
9. Estágio PAE .....	12
10. Treinamento Pré-Antártico .....	13
11. Exame de proficiência em inglês.....	13
12. Preparação para a viagem a EACF .....	13
13. Cronograma de atividades futuras .....	13



## 1. Resumo

O continente antártico é um dos lugares mais preservados e também um dos mais vulneráveis às mudanças no clima global, visto que ~98% de sua superfície é coberta por gelo, um componente importante para o balanço energético do sistema climático global (BAS, 2005; LAINE, 2008). O monitoramento da Camada Limite Planetária (CLP), bem como na determinação dos fluxos verticais turbulentos de calor, de massa e momento contribui para um melhor conhecimento das condições de tempo na região, bem como na investigação sobre as mudanças climáticas. Deste modo, tem-se por objetivo, estimar os fluxos verticais turbulentos de calor latente (LE), sensível (H) e de momento (FM) na Estação Antártica Brasileira Comandante Ferraz (EACF). A estimativa destes fluxos será realizada de forma direta e indireta, e em seguida, ambas serão comparadas. A obtenção simultânea dos fluxos turbulentos (método direto) e dos gradientes verticais médios de temperatura, umidade e vento (método indireto) permitirão a validação e calibração das parametrizações utilizadas em modelos numéricos atmosféricos. Vale ressaltar ainda que, este estudo é parte do Projeto “ETA - Estudo da Turbulência na Antártica” (financiado pelo CNPq e coordenado pela Profa. Dra. Jacyra Ramos Soares), que está vinculado ao Módulo 1: “Atmosfera Antártica e os Impactos ambientais na América do Sul” do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia Antártico de Pesquisas Ambientais (INCT-APA).

## 2. Objetivos

De forma geral, pretende-se investigar as trocas verticais turbulentas de calor e momento na superfície na região da EACF. Mais especificamente pretende-se:

- Analisar os dados observacionais disponíveis;
- Estimar de forma indireta os fluxos verticais turbulentos de calor utilizando Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov (TSMO);
- Comparar os fluxos estimados indiretamente com os fluxos estimados de forma direta;
- Estimar os coeficientes de transferência de temperatura e umidade.



### 3. Região de estudo e dados utilizados

A EACF está localizada na Península Keller, no interior da Baía do Almirantado, da Ilha Rei George, no Arquipélago Shetland do Sul, na Península Antártica ( $62^{\circ}05'07''$  S,  $58^{\circ}23'33''$  W) e está a 20 m acima do nível médio do mar. O arquipélago está situado a 130 km do continente Antártico e a 849 km do ponto mais ao sul do continente americano - Cabo de Hornos (Fig. 1).



Figura 1 – Localização da EACF.

Os dados utilizados no trabalho (tab. 1) foram coletados na EACF em uma torre micrometeorológica (Fig.2)

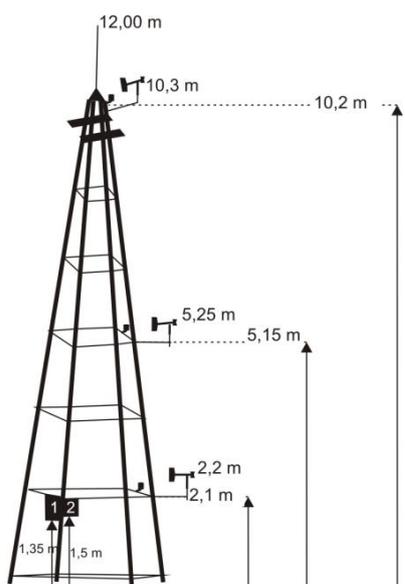


Figura 2 - Representação dos sensores utilizados para medir a temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento.



Universidade de São Paulo  
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas  
Departamento de Ciências Atmosféricas

Tabela 1 – Instrumentos instalados da torre micrometeorológica na EACF.

Qtde.	Variável	Fabricante/Modelo	Tempo de resposta	Níveis de altura (m)
3	Temperatura e umidade relativa do ar	Vaisala - termistores e transdutores - Modelo CS215, N. Série E5692	20 e 10 s., respectivamente.	Nível 1- 2,1 Nível 2- 5,15 Nível 3- 10,2
3	Vento e direção do vento	RM Young - Modelo 05103, N. Série 105237	2 a 5 min. e 1 s, respectivamente	Nível 1 - 2,2 Nível 2 - 5,25 Nível 3 – 10,3
1	Barômetro	Vaisala PTB110	0,5 s.	1,35

A torre micrometeorológica está instalada em uma região que apresenta diferentes características em seu terreno, no norte há a Geleira Domeyko, ao sul há a Baía do Almirantado e uma parte de terra, para o leste há a Baía do Almirantado e oeste aponta-se para a terra (Fig. 3).

Os dados obtidos nesta torre micrometeorológica possuem frequência de amostragem de 10 s, sendo que o dado final é uma média amostral de 5 min.

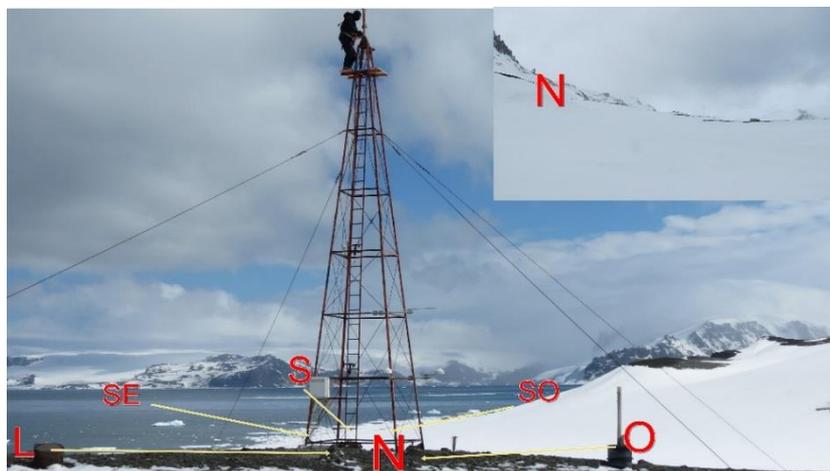


Figura 3 - Torre sul vista do norte, com os instrumentos instalados, na EACF.



#### 4. Estimativas dos fluxos verticais turbulentos pela TSMO

A estimativa dos fluxos verticais turbulentos na EACF foi realizada pelo método aerodinâmico gráfico ou como também conhecido, método do perfil (BUSINGER et al., 1970), utilizando programa numérico desenvolvido em linguagem de programação FORTRAN 90, que pertence ao Laboratório de Interação Ar-Mar (LIAM), do Grupo de Micrometeorologia, do Departamento de Ciências Atmosféricas da USP.

O método utilizado (método perfil) é iterativo e expressa os gradientes de velocidade horizontal do vento ( $\bar{u}$ ), temperatura potencial ( $\bar{\theta}$ ) e umidade específica do ar ( $\bar{q}$ ) como funções universais da estabilidade atmosférica, no nível de medida do anemômetro sônico pelo parâmetro de estabilidade  $\xi$  (MONIN; OBUKHOV, 1954). Pelo método são ajustadas curvas teóricas aos perfis médios de cada parâmetro na Camada Limite Superficial (CLS) através das observações em três diferentes níveis de altura da velocidade do vento ( $u$ ), temperatura potencial ( $\theta$ ) e umidade específica ( $q$ ), pelo método dos mínimos quadrados, para obter as respectivas escalas características ( $u^*$ ,  $\theta^*$  e  $q^*$ ), as quais definem o regime da intensidade da turbulência da CLP, em condição de convecção livre ( $u^*$ ) ou térmica ( $\theta^*$  e  $q^*$ ). A partir disso, obtém-se os fluxos verticais de calor e momento, expressos pelas seguintes equações:

$$H = -u^* \theta^* \rho_0 C_p$$

$$LE = -u^* Q^* \rho_0 L_V$$

$$\tau = -(u^*)^2 \theta^* \rho_0$$

Onde:

H – fluxo de calor sensível ( $\text{Wm}^{-2}$ )

LE – fluxo de calor latente ( $\text{Wm}^{-2}$ )

$\tau$  – fluxo de momento ( $\text{Nm}^{-2}$ )

$u^*$  - escala de velocidade do vento ( $\text{ms}^{-1}$ )

$\theta^*$  - escala de temperatura (K)

$Q^*$  - escala de umidade específica ( $\text{gkg}^{-1}$ )

$\rho_0$  – densidade do ar ( $1.15 \text{ kgm}^{-3}$ )

$C_p$ - calor específico do ar a pressão constante ( $1004 \text{ Jk}^{-1}\text{kg}^{-1}$ )

$L_V$ - calor latente de condensação da água ( $\text{Jg}^{-1}$ )



## 5. Resultados preliminares

Como forma de avaliar o funcionamento do programa numérico, bem como do método utilizado, foi realizado um estudo sobre os fluxos de calor ( $H$  e  $LE - Wm^{-2}$ ) e momento ( $\tau - Nm^{-2}$ ) no mês de janeiro de 2014 na EACF. Vale ressaltar, que para melhor visualização destas variáveis, optou-se por aplicar uma média móvel em cada uma das variáveis.

Durante o período investigado a velocidade do vento atingiu valor máximo de  $22,3 ms^{-1}$  no dia 12/01, sendo o valor médio do mês de  $4,9 ms^{-1}$  (Fig.4a). A direção do vento preferencial observada foi do quadrante norte - leste, oriundo da Geleira Domeyko e da Baía do Almirantado (Fig.4b e Fig.5). A mínima de temperatura do ar ficou em torno de  $-4,1^{\circ}C$  no dia 09/01 e a máxima de  $8,2^{\circ}C$  no dia 13/01, sendo a temperatura média do mês de  $1,2^{\circ}C$  (Fig.4c).

Os valores de umidade específica do ar na EACF apresentaram seu mínimo de  $1,91 gkg^{-1}$  no dia 09/01 e máximo de  $5,26 gkg^{-1}$  no dia 13/01, sendo que o valor médio foi de  $3,27 gkg^{-1}$  (Fig. 4d). Ressalta-se ainda que, não foram observadas grandes diferenças nas medidas realizadas nos três níveis da torre.

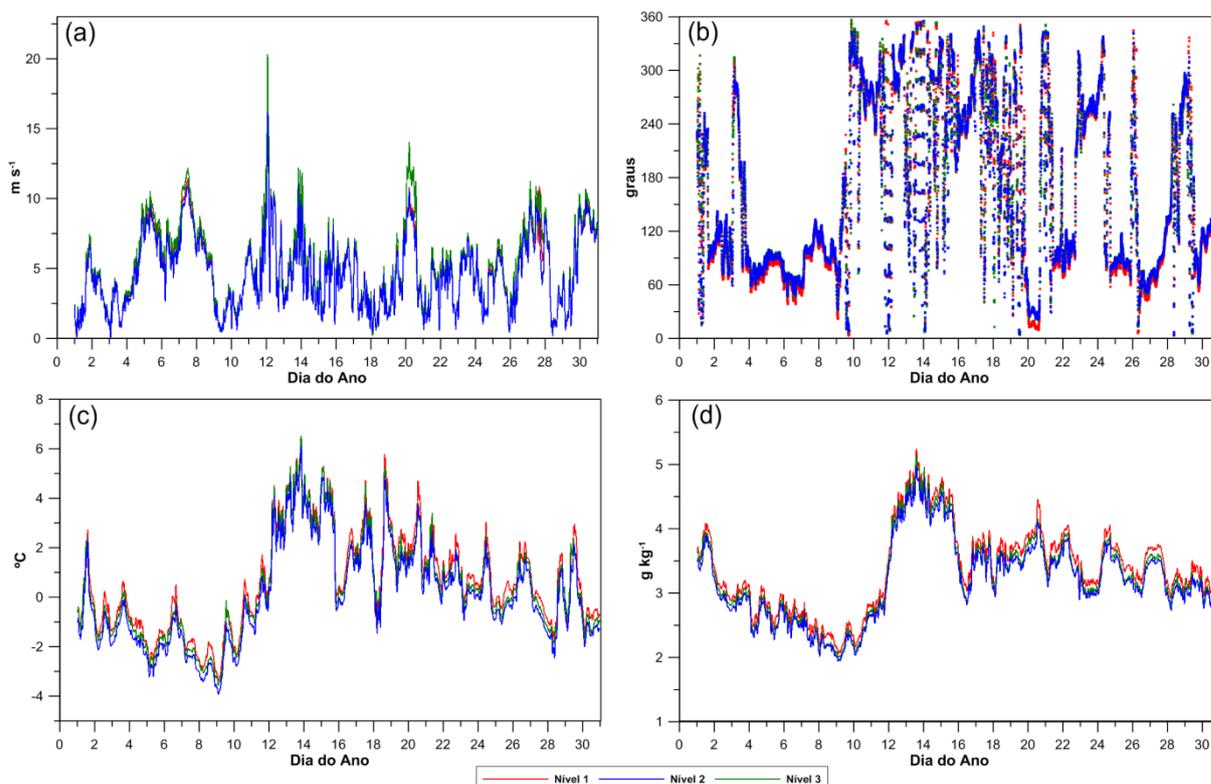


Figura 4 – Variação temporal da (a) velocidade do vento ( $ms^{-2}$ ), (b) direção do vento (graus), (c) temperatura ( $^{\circ}C$ ) e (d) umidade específica do ar ( $g kg^{-1}$ ) para o mês de janeiro de 2014, nos três níveis de altura da torre micrometeorológica instalada na EACF.



Universidade de São Paulo  
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas  
Departamento de Ciências Atmosféricas

Através da distribuição da frequência e variação da direção do vento nos três níveis, nota-se que no nível mais próximo a superfície o vento tem uma direção preferencial de norte, enquanto que, para o nível mais elevado da torre (nível 3 - 10,30 m) é observada direção preferencial de leste (Fig. 5). A posição norte da torre aponta para a Geleira Domeyko (Fig. 3), por onde o vento Foehn (KING; TURNER, 1955) escoava advectando ar quente e seco para a superfície, enquanto na direção leste há a Baía do Almirantado.

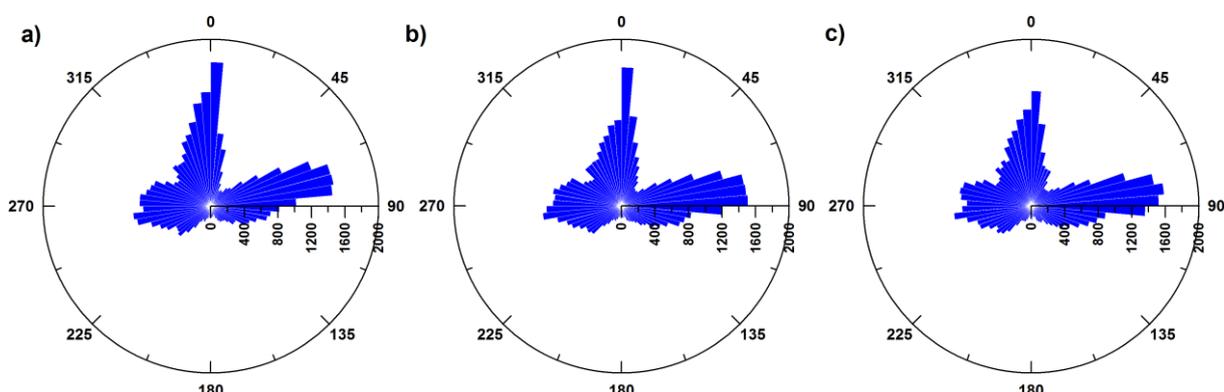


Figura 5 – Distribuição da frequência e direção do vento medido na EACF em (a) 2,20 m, (b) 5,25 m e (c) 10,30 m de altura.

Dos valores registrados da pressão atmosférica (Fig. 6), tem-se que o máximo foi de 1004,2 hPa no dia 09/01 e o mínimo de 976,4 hPa no dia 26/01. Analisando as variações da pressão atmosférica e contrastando com as outras variáveis medidas (Fig 4), observam-se alguns períodos marcantes.

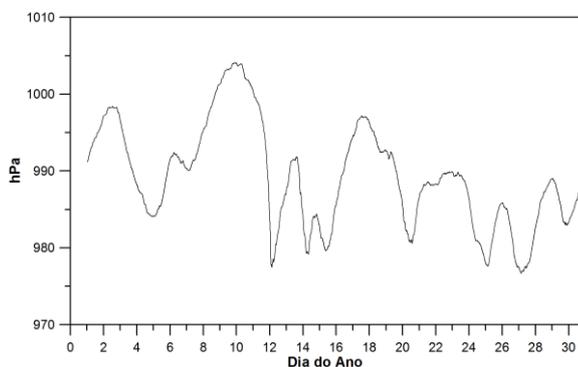


Figura 6 – Variação temporal da pressão atmosférica (hPa) durante o mês de janeiro de 2014 na EACF.

No dia 07/01 um sistema de alta pressão avançou sobre a região influenciando na diminuição da velocidade do vento e na diminuição da temperatura e umidade específica do ar. Este sistema atingiu o seu máximo no dia 09/01 elevando a pressão até o valor máximo



Universidade de São Paulo  
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas  
Departamento de Ciências Atmosféricas

observado no mês, enquanto isso, os valores de temperatura e umidade específica do ar atingiram o mínimo observado e a velocidade do vento foi próxima de  $0 \text{ ms}^{-1}$ . Os fluxos de H e LE tiveram uma contribuição significativa do vento oriundo de direções de NW - SE (sentido horário), enquanto que, o  $\tau$  foi influenciado principalmente pelos ventos de leste, apesar do maior valor do fluxo obtido não ter sido desta direção (Fig. 7).

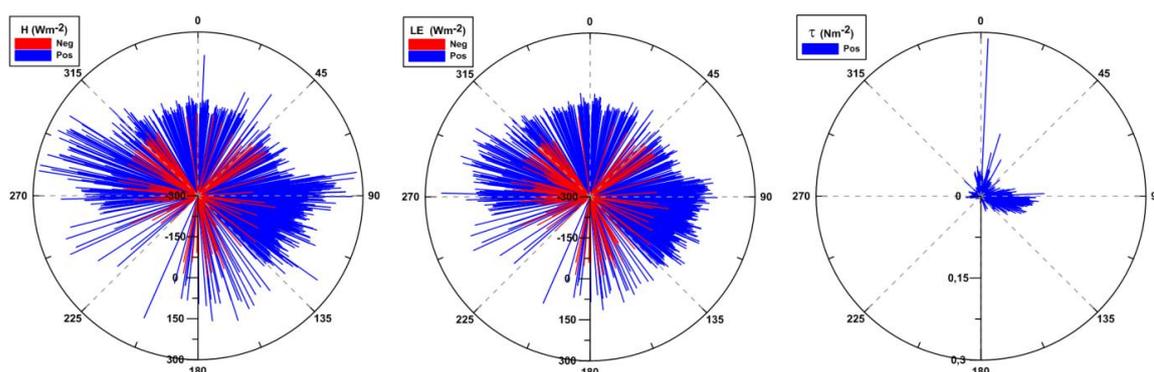


Figura 7 – Distribuição dos fluxos positivos e negativos de H, LE e  $\tau$ , com relação à direção do vento observada no nível 3 da torre micrometeorológica da EACF entre os dias 07 e 11/01/2014.

Após o enfraquecimento deste sistema sobre a região que ocorreu por volta do dia 11/01, o surgimento de um sistema de baixa pressão no dia 12/01 favoreceu a intensificação da velocidade do vento, e o aumento na temperatura e umidade específica do ar. Durante este período, nota-se que houve uma mudança na direção do vento que antes era preferencialmente de Leste-Sudeste (Baía do Almirantado) e neste período passou a ser de Norte-Oeste (Geleira Domeyko e terra). Observa-se ainda que, os fluxos de H e LE foram influenciados por esta direção (fluxos negativos e positivos), mas o  $\tau$  teve maior contribuição dos ventos de noroeste (Fig. 8).

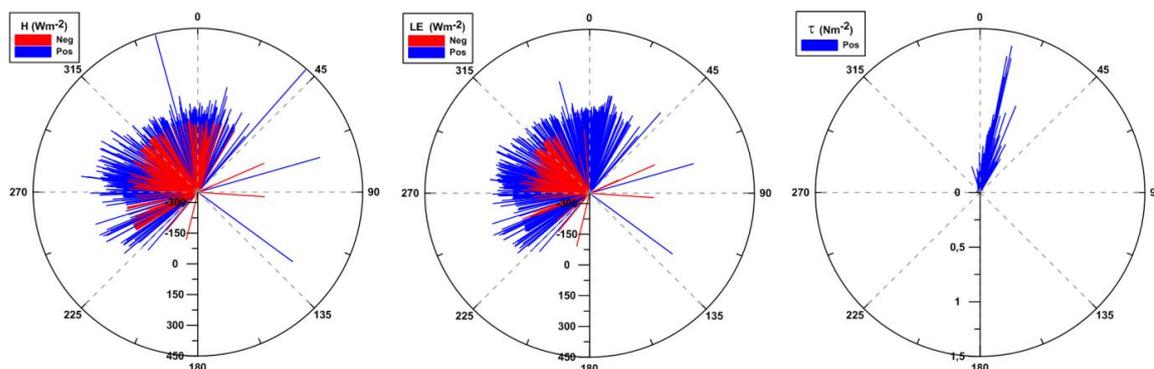


Figura 8 – Distribuição dos fluxos positivos e negativos de H, LE e  $\tau$ , com relação à direção do vento observada no nível 3 da torre micrometeorológica da EACF entre os dias 11 e 13/01/2014.



Universidade de São Paulo  
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas  
Departamento de Ciências Atmosféricas

O fluxo de calor sensível foi preferencialmente positivo, com maiores valores de fluxo durante o dia e menores a noite, indicando que neste período o ar foi aquecido pela superfície. Valores negativos foram observados principalmente a noite e em períodos em que havia a atuação de sistemas de alta pressão, com ventos fracos e queda nos valores de temperatura (Fig. 9). Na média o fluxo foi de  $40,62 \text{ Wm}^{-2}$  e os percentis 5 e 95 foram de  $-99,65$  e  $210,4 \text{ Wm}^{-2}$ , respectivamente (Fig. 10).

O fluxo de calor latente também apresentou preferencialmente valores positivos (Fig. 9), o que pode estar relacionado ao derretimento do gelo que cobre as superfícies em torno da torre, visto que este é um período de maior incidência de radiação solar nesta região (verão austral). O valor médio deste fluxo para o mês de janeiro foi de  $47,33 \text{ Wm}^{-2}$ , com os percentis 5 e 95 de  $-97,76$  e  $157,5 \text{ Wm}^{-2}$ , respectivamente (Fig. 10).

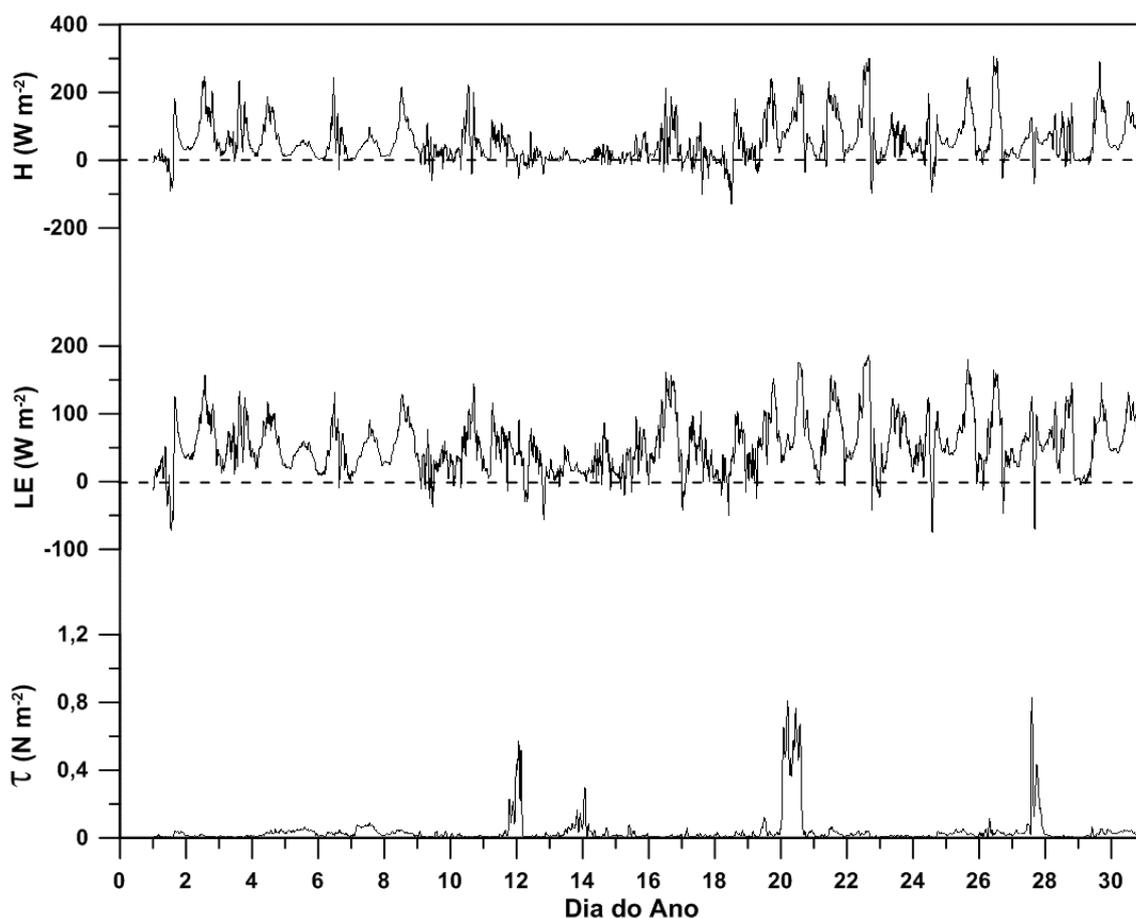


Figura 9 – Distribuição mensal dos fluxos de: a) calor sensível ( $H - \text{Wm}^{-2}$ ) b) calor latente ( $LE - \text{Wm}^{-2}$ ) e c) momento ( $\tau - \text{Nm}^{-2}$ ) no mês de janeiro de 2014 na EACF.



O fluxo de momento apresentou magnitude da ordem de  $10^{-2}$  (Fig. 9), sendo o valor médio de  $\sim 0,015 \text{ Nm}^{-2}$ , e os percentis de 5 e 95 de  $0,000791$  e  $0,1205 \text{ Nm}^{-2}$ , respectivamente (Fig. 10). Contudo, houve dias (12, 20, 27/01) com elevados picos positivos. Este transporte de energia é facilitado pelo vento, por este motivo, nos dias em que ocorreram tais picos deste fluxo foram observados também intensos valores de velocidade do vento (Fig. 4a).

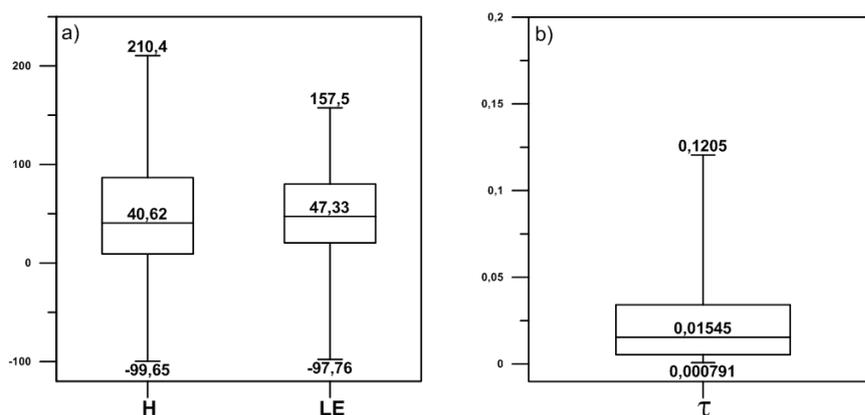


Figura 10 – Distribuição dos valores médios e dos percentis de 5 e 95 para os fluxos de H, LE e  $\tau$ , durante o mês de janeiro de 2014 na EACF.

## 6. Conclusões preliminares

Mostrou-se aqui a distribuição temporal das variáveis medidas na torre micrometeorológica instalada na EACF no mês de janeiro de 2014. Também foram apresentados os resultados obtidos dos fluxos de H, LE e  $\tau$  para este mesmo período e local utilizando o método perfil pela TSMO. O que se pode observar é uma importante contribuição do vento e da sua direção para os valores dos fluxos obtidos. Contudo, o que se sugere para estudos futuros é uma análise mais aprofundada sobre a relação das variáveis medidas, principalmente no que se refere a variação da pressão atmosférica, direção do vento, temperatura e umidade específica do ar, pois a região onde está instalada a torre micrometeorológica apresenta heterogeneidade na superfície, com presença ao redor de terra, água e gelo.



## 7. Referências bibliográficas

BAS – British Antarctic Survey. Weather in the Antarctic. Acesso em: 09 de julho de 2014.  
Disponível em: < <http://www.antarctica.ac.uk/met/jds/weather/weather.htm> >

BUSINGER, J. A., WYNGAARD, J. C., IZUMI, Y. e BRADLEY, E. F., 1971: Flux-Profile Relationships in the Atmospheric Surface Layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 28, 181-189.

LAINE, V, 2008: Antarctic ice sheet and sea ice regional albedo and temperature change, 1981–2000, from AVHRR Polar Pathfinder data. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3, 646-667.

MONIN, A. S. e OBUKHOV, A. M, 1954: Basic Laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Tr. Akad. Nauk. SSSR Geophys. Inst.*, 24, 151, 163-187.

## 8. Outras atividades desenvolvidas no período

### 8.1. Disciplinas do programa de mestrado

Até o presente momento, das disciplinas cursadas e concluídas totalizam em 25 dos 46 créditos. Além dessas, está em andamento 1 disciplina que equivale a 10 créditos.

Disciplina	Créditos	Conceito	Situação
AGM5713 – Dinâmica da Atm. I	6	B	Concluída
AGM5716 – Termodinâmica da Atm.	6	B	Concluída
AGM5822 – Radiação Atmosférica I	6	B	Concluída
AGG5900 – Preparação Pedagógica	1	B	Concluída
AGM5714 – Dinâmica da Atm. II	6	B	Concluída
AGM5804 – Micrometeorologia	10	-	Em andamento

## 9. Estágio PAE

Durante o segundo semestre de 2014 está sendo realizado um estágio PAE na disciplina de Meteorologia Dinâmica II – ACA0538, sob a orientação do Prof. Dr. Ricardo Hallak.



#### **10. Treinamento Pré-Antártico**

Durante a primeira semana de agosto foi realizado o Treinamento Pré-Antártico na Ilha da Marambaia – RJ no CADIM (Centro de Adestramento da Ilha da Marambaia), o qual faz parte dos pré-requisitos exigidos para a viagem à Base Brasileira na Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF), que será realizada no período de novembro do corrente ano.

#### **11. Exame de proficiência em inglês**

Aprovado em 14/08/2014 no exame de proficiência em inglês.

#### **12. Preparação para a viagem a EACF**

Durante o período de agosto e setembro, o aluno deu suporte às atividades no laboratório de Interação Ar-Mar, referente aos instrumentos micrometeorológicos que serão instalados na EACF no mês de novembro de 2014 durante a Operação Antártica XXXIII.

#### **13. Cronograma de atividades futuras**

<b>Atividades</b>	<b>Período</b>
<b>Disciplinas (AGM5804 e AGM5801)</b>	Agosto a Dezembro
<b>Estágio PAE</b>	Agosto a Dezembro
<b>Viagem à EACF</b>	Novembro/2014
<b>Revisão bibliográfica (em andamento)</b>	2014/2 a 2015/1
<b>Preparação de artigo para congresso</b>	2014/2 a 2015/1
<b>Viagem à EACF</b>	Fevereiro/2015