

Relatório Final de Pesquisa de Iniciação Científica Atividades  
do Programa Ensinar com Pesquisa  
Pró Reitoria de Graduação

**Período: Fevereiro de 2007 a Fevereiro de 2008**

*ESTIMATIVA DOS FLUXOS VERTICAIS TURBULENTOS  
DE CALOR NA SUPERFÍCIE*

Aluna: Lívia Márcia Mosso Dutra

Orientadora: Jacyra Soares

**Departamento de Ciências Atmosféricas  
IAG - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas  
USP - Universidade de São Paulo**

**Março de 2008**

# ÍNDICE

<b>Resumo</b>	<b>3</b>
<b>1. Introdução</b>	<b>4</b>
1.1 Objetivos	5
1.2 Região e dados de estudo	6
1.2.1 Região de estudo	6
1.2.2 Projeto PIRATA	7
1.2.3 Dados de reanálise do NCEP	8
<b>2. Cálculo dos fluxos turbulentos</b>	<b>9</b>
<b>3. Aplicação do trabalho no campo do ensino de graduação</b>	<b>10</b>
<b>4. Resultados</b>	<b>11</b>
4.1 Médias diárias	12
4.2 Médias horárias mensais	18
4.3 Caracterização climatológica	20
<b>5. Considerações finais</b>	<b>24</b>
5.1 Etapas futuras	24
<b>6. Referências</b>	<b>25</b>
<b>7. Outras atividades</b>	<b>26</b>
7.1 Disciplinas cursadas	26
7.2 Participações em eventos	26

Anexo 1 - Lista de exercícios ACA0321

Anexo 2 - Certificado de participação no XII Simpósio do IAG

Anexo 3 - Certificado de participação no 15º SIICUSP

Anexo 4 - Certificado de participação no 26º Treinamento Pré-Arquipélago

## Resumo

A presente bolsa está dentre as fornecidas pela Pró-Reitoria de Graduação, no Programa Ensinar com Pesquisa. A principal finalidade deste programa é contribuir para o desenvolvimento do conhecimento no campo do ensino de graduação, incentivando o início à pesquisa e facilitando o processo de ensino.

Estabelecendo um vínculo deste processo de ensino com o Grupo de Micrometeorologia, pode-se encaixar o projeto *FluTuA* (Fluxos Turbulentos sobre o Atlântico) como principal ferramenta de pesquisa nos estudos da aluna bolsista.

O FluTuA tem como objetivo investigar a interação oceano-atmosfera através da determinação observacional de parâmetros meteorológicos e oceanográficos no oceano Atlântico Tropical.

O projeto proposto denomina-se “*Estimativa dos Fluxos Verticais Turbulentos de calor na atmosfera*”, e visa a implementação de atividades de ensino relacionadas à pesquisa em desenvolvimento no projeto FluTuA, com o objetivo de melhorar o ensino de técnicas de estimativa de fluxos verticais turbulentos de calor sensível e latente na superfície do oceano, aos alunos do curso de ACA0321- Micrometeorologia.

## 1. Introdução

Uma questão atual de suma importância tem preocupado os cientistas e a sociedade como um todo: a mudança climática que o planeta vem sofrendo, seja por fatores antrópicos, seja pela variabilidade natural do clima. A quantificação dos possíveis efeitos dessas mudanças no clima terrestre vem sendo feita através da simulação de diferentes cenários em modelos numéricos de sistemas climáticos. Um aspecto importante dessas simulações é a transferência de energia, massa e momento entre o oceano e a atmosfera, que ocorre através dos fluxos verticais turbulentos de calor, massa e momento. Esses fluxos estabelecem o acoplamento entre o oceano e a atmosfera, representando, dessa forma, processos chave no sistema climático (WGASF, 2000).

Uma dificuldade potencial para a previsão climática no Atlântico tropical é a inicialização de modelos acoplados oceano-atmosfera que requer o conhecimento dos fluxos turbulentos na interface. Dessa forma, a obtenção de estimativas dos fluxos de calor sensível, latente e de momento através de observações diretas com a maior precisão possível, é de fundamental importância não só para melhorar a atual rede de observações no Atlântico mas também para determinar as escalas de variabilidade que são importantes na interação oceano-atmosfera (Wainer et al., 2001).

Apesar da importância, estudos observacionais da camada limite superficial (CLS) realizados em regiões marítimas brasileiras por grupos de pesquisadores brasileiros são praticamente inexistentes (Bacellar, 2004). Essa ausência se deve em grande parte as dificuldades técnicas associadas aos métodos de medidas e a falta de pessoal técnico/científico habilitado para realizar essas medidas no Brasil.

Observações meteorológicas sobre o oceano requerem equipamentos robustos, pois a severidade do ambiente marinho provoca a rápida deterioração dos sensores, alterando o desempenho dos mesmos (Bradley et al., 1991). Além disso, quando as observações são realizadas em *plataformas móveis* (bóias, navios ou aviões) a interferência do movimento da plataforma dificulta a obtenção de medidas das flutuações de velocidade do escoamento turbulento, especialmente na direção vertical, inviabilizando a estimativa dos fluxos turbulentos nesta direção.

Todas essas limitações impedem uma amostragem representativa das trocas turbulentas na interface oceano-atmosfera através de plataformas móveis.

Comparativamente às plataformas móveis, as estimativas de fluxos verticais turbulentos na CLS através de plataformas fixas são consideravelmente mais simples tecnicamente e mais baratas. A grande limitação das plataformas fixas está relacionada à representatividade espacial dessas estimativas, que, em geral, fica circunscrita às regiões oceânicas que permitam a instalação de bases fixas (regiões litorâneas ou ilhas oceânicas com topografia suave).

O presente projeto de pesquisa se encaixa dentro do projeto FluTuA (Fluxos Turbulentos sobre o Atlântico). O principal objetivo deste projeto é investigar a interação oceano-atmosfera através da determinação observacional de parâmetros meteorológicos e oceanográficos no oceano Atlântico Tropical. O método direto de estimar os fluxos turbulentos (método da covariância) utilizado no FluTuA é o método que apresenta os melhores resultados (Blanc, 1983). Essa investigação será feita utilizando uma torre Micrometeorológica de 10 metros de altura, instrumentada com sensores de resposta rápida e lenta, em uma plataforma fixa Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP), localizado na região de mar aberto do oceano Atlântico Tropical.

## **1.1 Objetivos**

O programa Ensinar com Pesquisa tem como intuito incentivar o início à pesquisa, no campo do ensino da graduação. O principal objetivo deste trabalho é investigar a metodologia de estimativa dos fluxos verticais turbulentos de calor sensível e latente na interface oceano-atmosfera para aplicação na disciplina Micrometeorologia – ACA 0321.

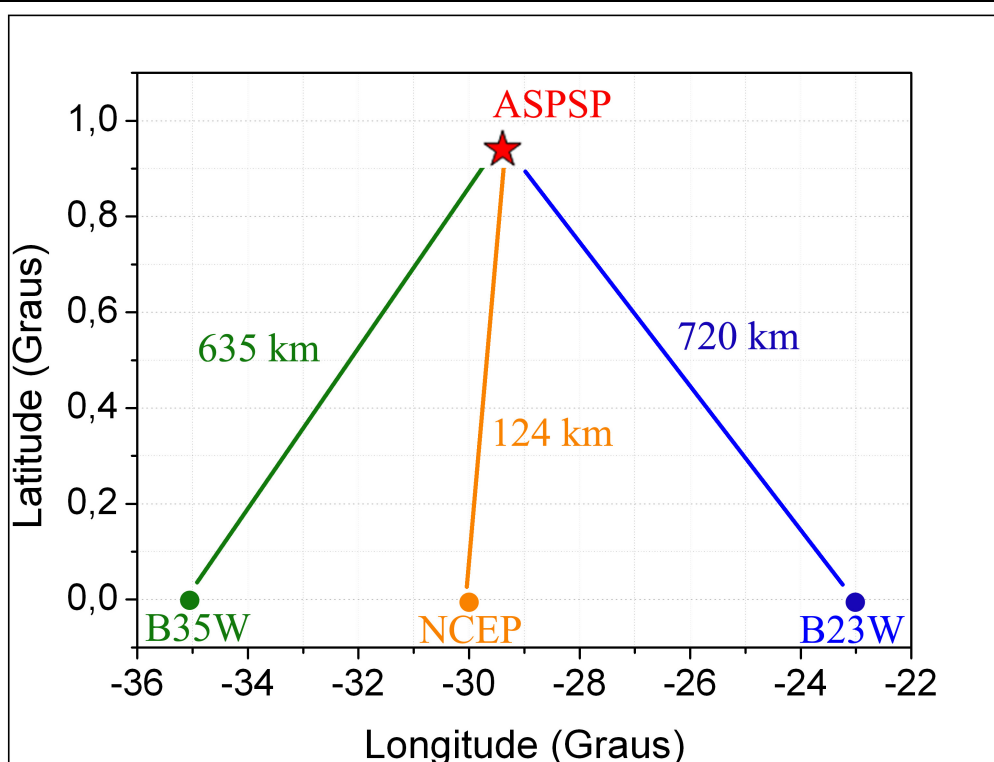
Na primeira etapa do trabalho, os fluxos foram estimados em valores diários para uma região próxima ao ASPSP. Posteriormente, quando a torre Micrometeorológica do projeto FluTuA estiver gerando resultados, os fluxos serão estimados com os dados desta plataforma.

## 1.2 Região e dados de estudo

### 1.2.1 Região de estudo

O arquipélago é formado por um grupo de pequenas ilhas rochosas, desabitadas e desprovidas de qualquer tipo de vegetação, localizadas a cerca de 1.100 quilômetros do litoral do Estado do Rio Grande do Norte ( $00^{\circ} 56' N$  e  $29^{\circ} 22' W$ ). Trata-se de uma região privilegiada para o desenvolvimento de pesquisas meteorológicas e oceanográficas. Devido a sua topografia, suave, o ASPSP apresenta condições ideais para a obtenção da caracterização climatológica da camada limite superficial sobre o Oceano Atlântico Tropical.

No intuito de realizar um levantamento das variáveis meteorológicas médias da região foram utilizados dados obtidos no projeto PIRATA (Pilot Research Moored Array in the Tropical Atlantic) e dados de reanálise do NCEP (National Centers for Environmental Prediction), conforme *Figura 1*. Como pode ser visto, o ASPSP situa-se no meio das duas Bóias escolhidas, um pouco acima da linha do Equador e o ponto de grade utilizado do NCEP é o ponto geográfico mais próximo do arquipélago.



*Figura 1:* Localização geográfica do ASPSP, das Bóias PIRATA em ( $0^{\circ}N$ ,  $35^{\circ}W$ ) e em ( $0^{\circ}N$ ,  $23^{\circ}W$ ), do ponto de grade utilizado no NCEP em ( $0^{\circ}N$ ,  $30^{\circ}W$ ).

## 1.2.2 Projeto PIRATA – Pilot Research Moored Array in the Tropical Atlantic

Projeto em atividade desde 1997, realizado no âmbito internacional entre Brasil, França e EUA, que tem como objetivo a aquisição de dados oceanográficos e meteorológicos utilizando uma rede de quinze Bóias oceanográficas espalhada pelo oceano Atlântico tropical. Nessas Bóias estão instalados diversos instrumentos, a maioria realizando medidas de alta resolução (10 minutos). Os dados estão disponíveis no endereço <http://www.pmel.noaa.gov/pirata/>.

Este trabalho utiliza dados obtidos por duas Bóias oceanográficas do projeto PIRATA, uma situada em (0°N, 23°W) (B23W) e outra em (0°N, 35°W) (B35W). Elas foram escolhidas por serem as mais próximas ao ASPSP, estando a respectivamente 720 e 635 quilômetros aproximados de distância.

Nas Bóias do projeto PIRATA, a temperatura do ar e a umidade relativa (UR) são medidas a uma altura de três metros, a TSM a um metro e a velocidade do vento é estimada a uma altura de quatro metros. A *Figura 2* é um exemplo da Bóia utilizada para a aquisição dos dados:



---

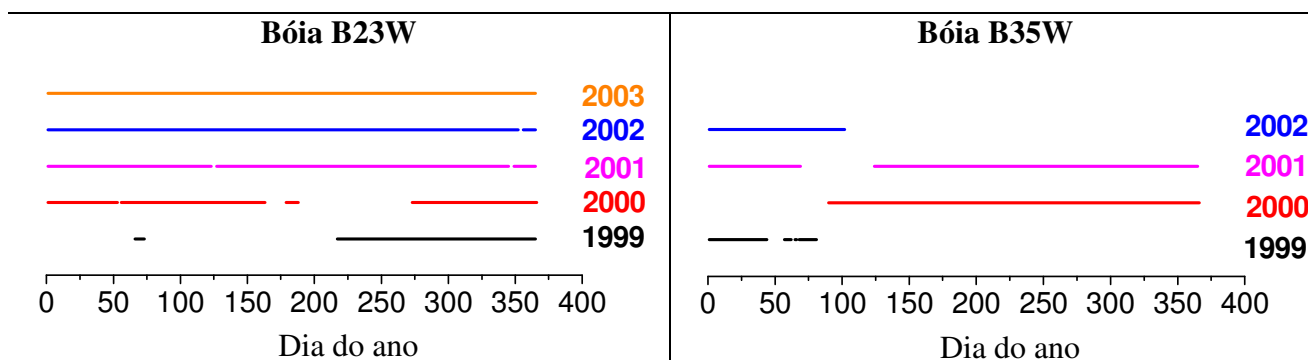
*Figura 2:* Bóia PIRATA utilizada na aquisição das variáveis meteorológicas e oceanográficas.

---

Para o cálculo dos fluxos de calor sensível e latente, são necessárias três variáveis meteorológicas (temperatura do ar, vento e umidade relativa) e uma oceanográfica (temperatura superfície do mar – TSM). As séries temporais disponíveis no site do projeto PIRATA possuem dados com falhas temporais devido, provavelmente, a fatores técnicos. Devido às falhas foi necessário verificar os horários

em que existia a disponibilidade das quatro variáveis utilizadas na estimativa dos fluxos turbulentos.

A *Figura 3* ilustra a série temporal dos dados contendo simultaneamente as 4 variáveis necessárias para a estimativa dos fluxos turbulentos, das Bóias B23W e B35W.



*Figura 3:* Série temporal dos dias que continham as 4 variáveis necessárias para o cálculo dos fluxos de calor sensível e latente (temperatura do ar e da superfície do mar, vento e umidade relativa) das Bóias B23W e B35W do projeto PIRATA.

Como pode ser visto na *Figura 3*, o período disponível das médias diárias dos fluxos para a Bóia B23W é de 1999 até 2003, e para a Bóia B35W de 1999 a 2002.

### ***1.2.3 Dados da reanálise do NCEP - National Centers for Environmental Prediction***

O NCEP serve como ponto de partida para muitas das previsões meteorológicas realizadas, tendo disponível no endereço (<http://www.ncep.noaa.gov/>) uma grande variedade de dados de variáveis meteorológicas e oceanográficas para longo espaço de tempo. Estes dados são inclusive frequentemente utilizados pela comunidade científica.

Neste trabalho, foram utilizados dados de fluxo de calor sensível e latente em (0°N, 30°W), distando aproximadamente 125 quilômetros do arquipélago, com uma resolução de 6 em 6 horas (0h, 6h, 12h e 18h, horário de Greenwich). Os anos disponíveis (salvo poucas interrupções) vão de 1948 a 2007.



## 2. Cálculo dos fluxos turbulentos

A seguir são descritos os cálculos e procedimentos numéricos realizados na estimativa dos fluxos turbulentos de calor sensível e latente.

Neste trabalho de iniciação científica, os fluxos turbulentos foram calculados a partir das fórmulas *bulk*, que embora consideradas de determinação puramente empírica, podem ser derivadas utilizando as equações adimensionais do perfil vertical e a Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov (Greenaert, 1990). As equações tipo *bulk* são dadas por:

$$H = -\rho_0 c_p C_H \bar{u} (\bar{T}_{ar} - \bar{T}_{\acute{a}gua}) \quad (1)$$

$$LE = -\rho_0 L C_E \bar{u} (\bar{q}_{ar} - \bar{q}_{sat \acute{a}gua}) \quad (2)$$

onde H e LE são respectivamente os fluxos de calor sensível e latente,  $\rho_0$  é a densidade do ar ( $1,15 \text{ kg m}^{-3}$ ),  $c_p$  é o calor específico do ar a pressão constante ( $1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ),  $C_H$  e  $C_E$  são os coeficientes aerodinâmicos de transferências (adotado aqui como 0,001; Smith, 1989), L é o calor latente de vaporização ( $2,5 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ ), u é a velocidade do vento,  $T_{ar}$  e  $T_{\acute{a}gua}$  representam a temperatura do ar e a TSM, e  $q_{ar}$  e  $q_{sat \acute{a}gua}$  são respectivamente a umidade específica do ar e a umidade específica de saturação, calculada a partir da TSM (em  $\text{kg kg}^{-1}$ ).

Sendo conhecidas as temperaturas, a velocidade do vento e a UR (projeto PIRATA), resta determinar a umidade específica ( $q_{ar}$ ) e a de saturação ( $q_{sat}$ ). Esta última pode ser calculada pela equação (3):

$$q_{sat} = 0,622 \left( \frac{e_s}{P} \right) 1000 \quad (3)$$

onde P é a pressão à superfície (aqui considerada como 1010 hPa), e  $e_s$  é a pressão de vapor de saturação, dada por:

$$e_s = e_0 \exp \left( \frac{T_2(T - T_0)}{T - T_3} \right) \quad (4)$$

na qual  $e_0$  é a pressão de vapor de saturação a 0 °C (6,11 hPa),  $T_0$ ,  $T_2$  e  $T_3$  são constantes e equivalem a 273,16 , 17,67 e 29,66 respectivamente, e  $T$  é a temperatura da água ou a TSM.

Para o cálculo da umidade específica do ar, utilizou-se a relação:

$$q = UR q_s \tag{5}$$

na qual UR é a umidade relativa do ar e  $q_s$  é a umidade específica de saturação, calculada a partir da temperatura do ar.

Todos os cálculos foram realizados utilizando a linguagem de programação Fortran 90.

### 3. Aplicação do trabalho no campo do ensino de graduação

A Prof<sup>a</sup> doutora Jacyra Soares, orientadora deste projeto de iniciação científica, ministrou a matéria Micrometeorologia (ACA0321) do curso de bacharelado em Meteorologia do IAG/USP, no período do primeiro semestre de 2007, sendo esta matéria o vínculo com o projeto da aluna bolsista. A matéria é oferecida aos alunos do sétimo semestre do curso.

Como a sala de ACA0321 possuía 18 alunos, os dados disponíveis das variáveis vento, UR, temperatura do ar e da superfície do mar foram analisados e divididos em 18 grupos com 90 dados cada, para que cada aluno recebesse uma série temporal de dados diferente, com as quais deveriam estimar os fluxos turbulentos de calor sensível e latente. A série temporal dos dados distribuídos aos alunos segue na *Figura 4*:

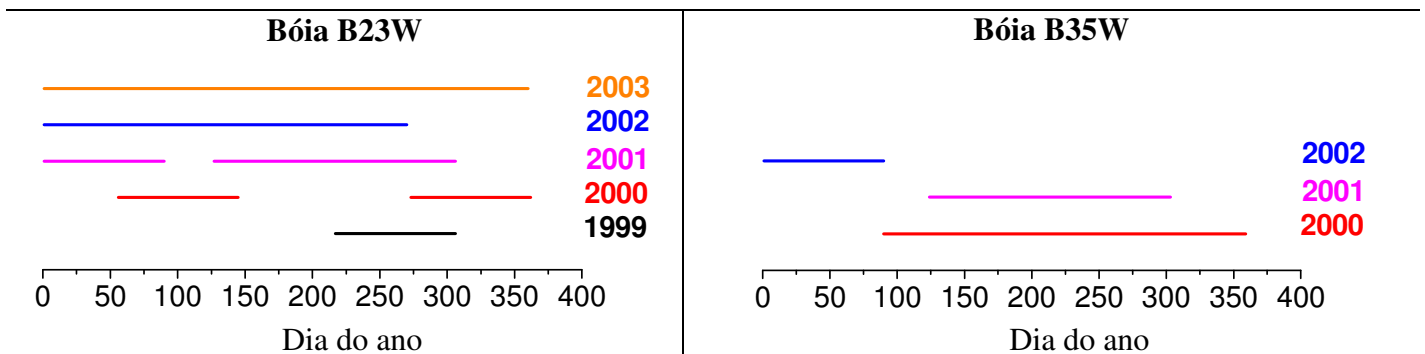


Figura 4: Série temporal dos dados de temperatura do ar e da superfície do mar, vento e umidade relativa distribuídos aos alunos do curso de Micrometeorologia.

Tomou-se o cuidado de separar os 18 conjuntos de dados em séries sem interrupções, para uma melhor análise futura do comportamento dos fluxos turbulentos ao longo do tempo.

Nota-se que os dados do ano de 1999 foram desconsiderados para a Bóia B35W, pois este ano não possuía 90 dados diários contínuos (ver *Figura 3*).

Os dados foram anexados on-line na intranet do departamento de ciências atmosféricas (<http://www.dca.iag.usp.br/www/material/index.htm>), e o arquivo de cada aluno estava indicado com seu respectivo nome. Junto com estes dados, foi anexada também uma lista de instruções elaborada pela bolsista, com a supervisão da orientadora Jacyra Soares (vide *Anexo 1*).

Além de estimar e plotar os fluxos, os alunos deveriam plotar os valores de cada variável para seu grupo de dados e a umidade específica de saturação calculada, descrever as fórmulas utilizadas e os procedimentos para a realização dos cálculos, e analisar os resultados obtidos.

Após período estipulado, os resultados numéricos e gráficos da atividade entregue pelos alunos foram conferidos pela bolsista de IC. As partes redigidas que continham a metodologia, análise e discussão, foram corrigidas em conjunto, orientadora e bolsista.

#### **4. Resultados**

A Bolsista elaborou 126 gráficos (sete gráficos para cada um dos 18 grupos de dados), para posterior comparação com os resultados obtidos pelos alunos de ACA0321.

A seguir, alguns exemplos dos resultados obtidos, para cada Bóia em dois períodos diferentes de tempo. Os gráficos (a) e (b) das *Figuras 5 a 10* são referentes às médias diárias dos meses de janeiro a março do ano de 2002 (dia do ano 1 a 90), e os gráficos (c) e (d) referentes às médias diárias dos meses de outubro a dezembro de 2000 (dia do ano 370 a 359).

Todos os gráficos foram desenvolvidos no Software Origin 7.0.

#### 4.1 Médias diárias

A seguir é apresentada a evolução média diária das variáveis na região das duas Bóias, para os três primeiros e três últimos meses do ano de 2000 e 2002. Estes gráficos e análises são exemplos do que deveria ser entregue pelos alunos da disciplina Micrometeorologia, no 1º semestre de 2007, e por esta razão estão divididos em blocos de 90 dias cada.

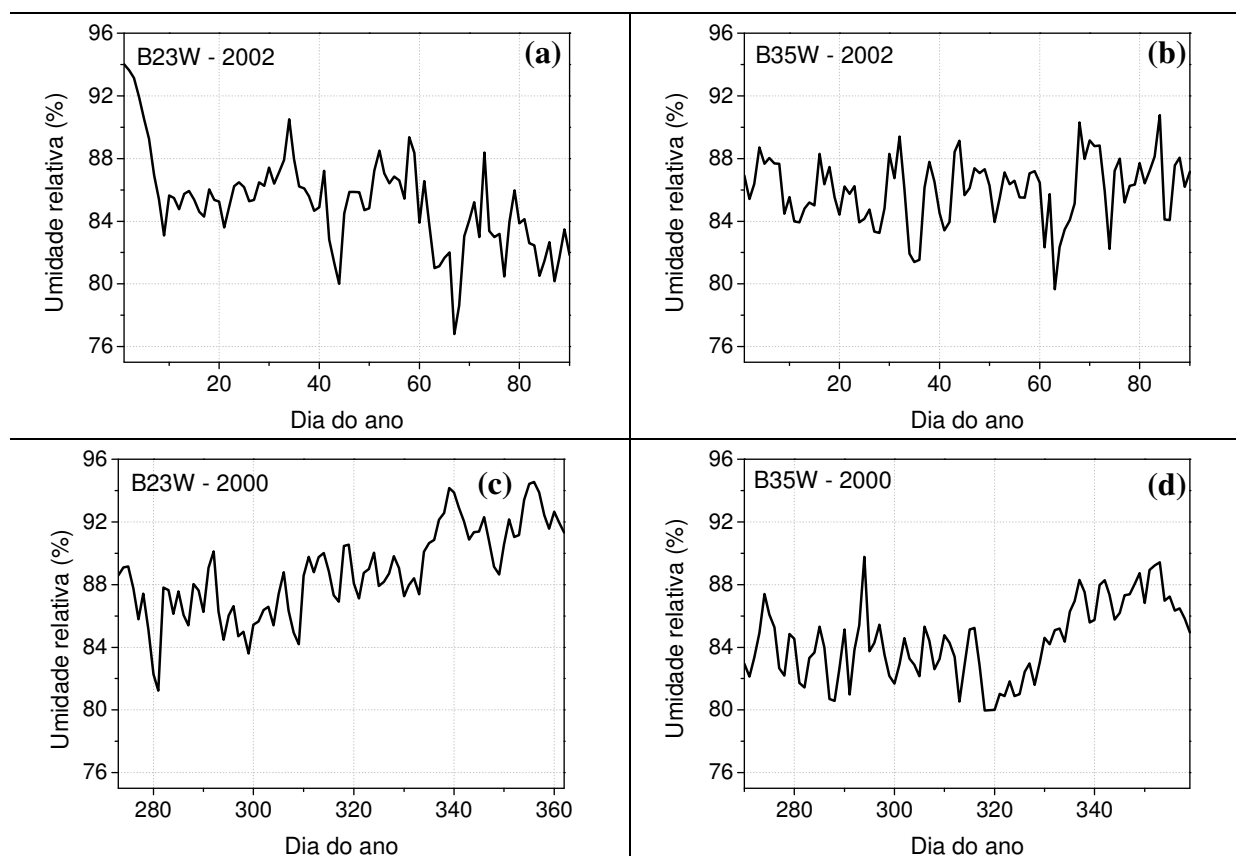
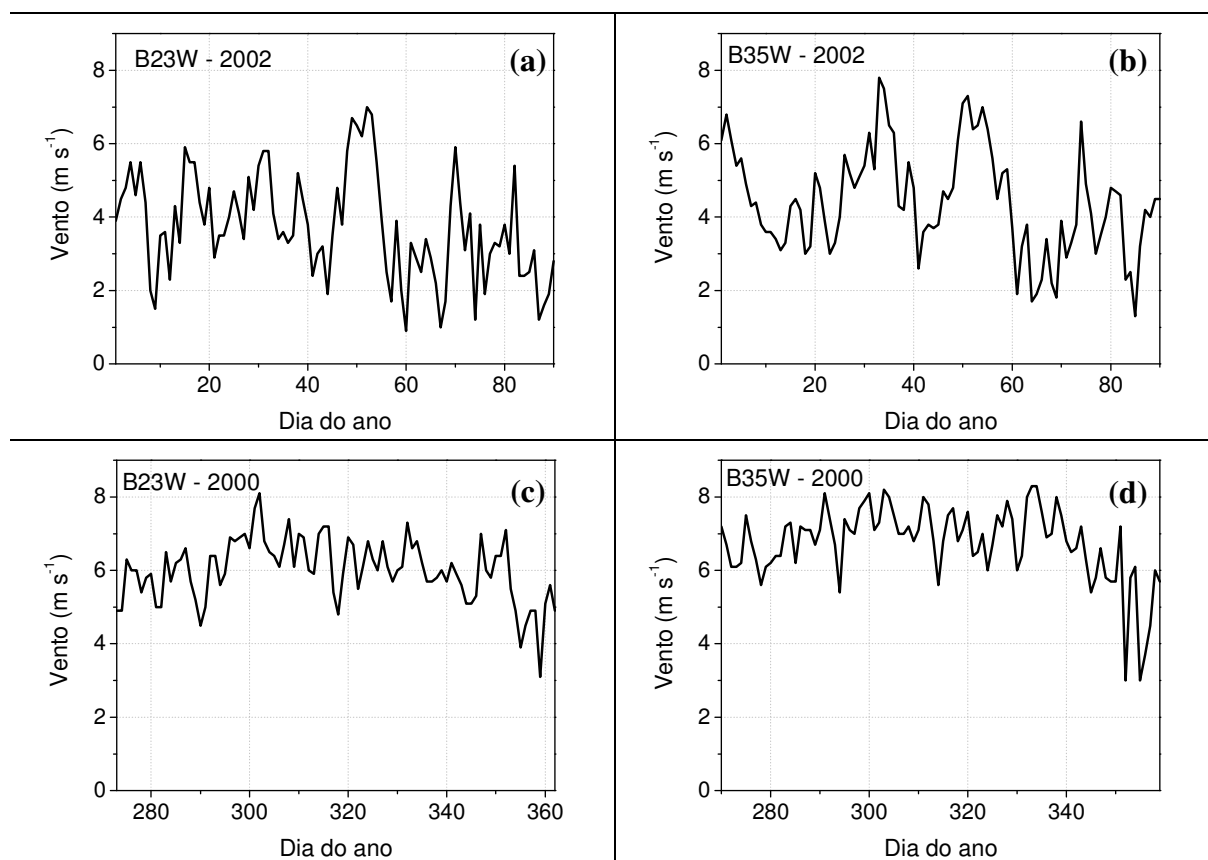


Figura 5: Evolução da umidade relativa do ar obtida pelas Bóias PIRATA B23W e B35W, em quatro períodos de tempo diferentes.

Como observado na *Figura 5*, a umidade relativa sobre o oceano é alta e não apresenta um ciclo sazonal bem definido. Na B23W há uma tendência da UR a diminuir nos primeiros três meses do ano (2002), e aumentar no fim do ano (2000). Para a B35W, os valores médios da UR no fim do ano de 2000 são ligeiramente inferiores aos valores do começo do ano de 2002.

A *Figura 6* ilustra a intensidade do vento, para as duas Bóias, no mesmo período de tempo já mencionado.



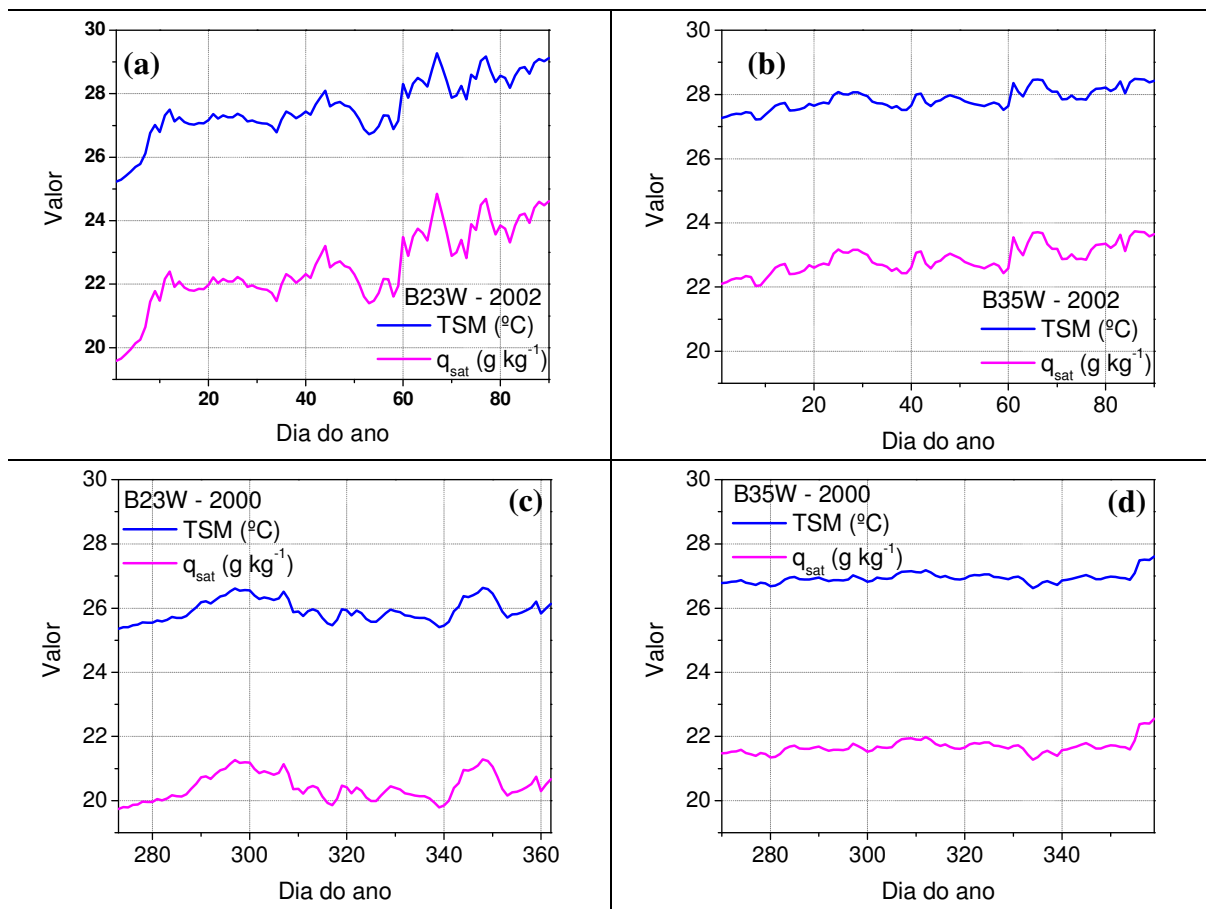
*Figura 6:* Evolução do módulo da velocidade do vento obtido pelas duas Bóias PIRATA B23W e B35W, em dois períodos de tempo diferentes.

Observa-se na *Figura 6*, para ambas as Bóias, ventos menos intensos nos primeiros meses do ano e mais intensos nos meses de outubro a dezembro (2000 e 2002). A B35W apresenta ventos ligeiramente mais intensos que a B23W em ambos os períodos observados.

O vento observado em ambas as regiões é fraco, raramente ultrapassando  $8\text{m s}^{-1}$ .

Vale ressaltar que o vento é um fator importante para a estimativa dos fluxos, sendo influente tanto para o fluxo de calor sensível quanto para o de calor latente.

A *Figura 7* ilustra a dependência da umidade específica de saturação com a temperatura do mar, conforme calculada pela expressão 3.



*Figura 7:* Temperatura da superfície do mar e a respectiva umidade específica de saturação calculada para esta temperatura, obtidas pelas duas Bóias PIRATA B23W e B35W, em dois períodos de tempo diferentes.

Analisando a *Figura 7* observa-se que a umidade específica de saturação ( $q_{sat}$ ) apresenta o mesmo comportamento da TSM, com valor deslocado. Isto indica que o cálculo realizado está correto, para todos os períodos de tempo.

A B23W apresentou a maior amplitude dos valores durante o início do ano de 2002, chegando a 29°C para a TSM e quase 25g kg<sup>-1</sup> para o  $q_{sat}$ . No período de outubro a novembro de 2000, a TSM da B35W permaneceu praticamente constante em 27°C.

A Figura 8 mostra a evolução da temperatura do ar e da superfície do mar, para as duas Bóias nos diferentes períodos de tempo.

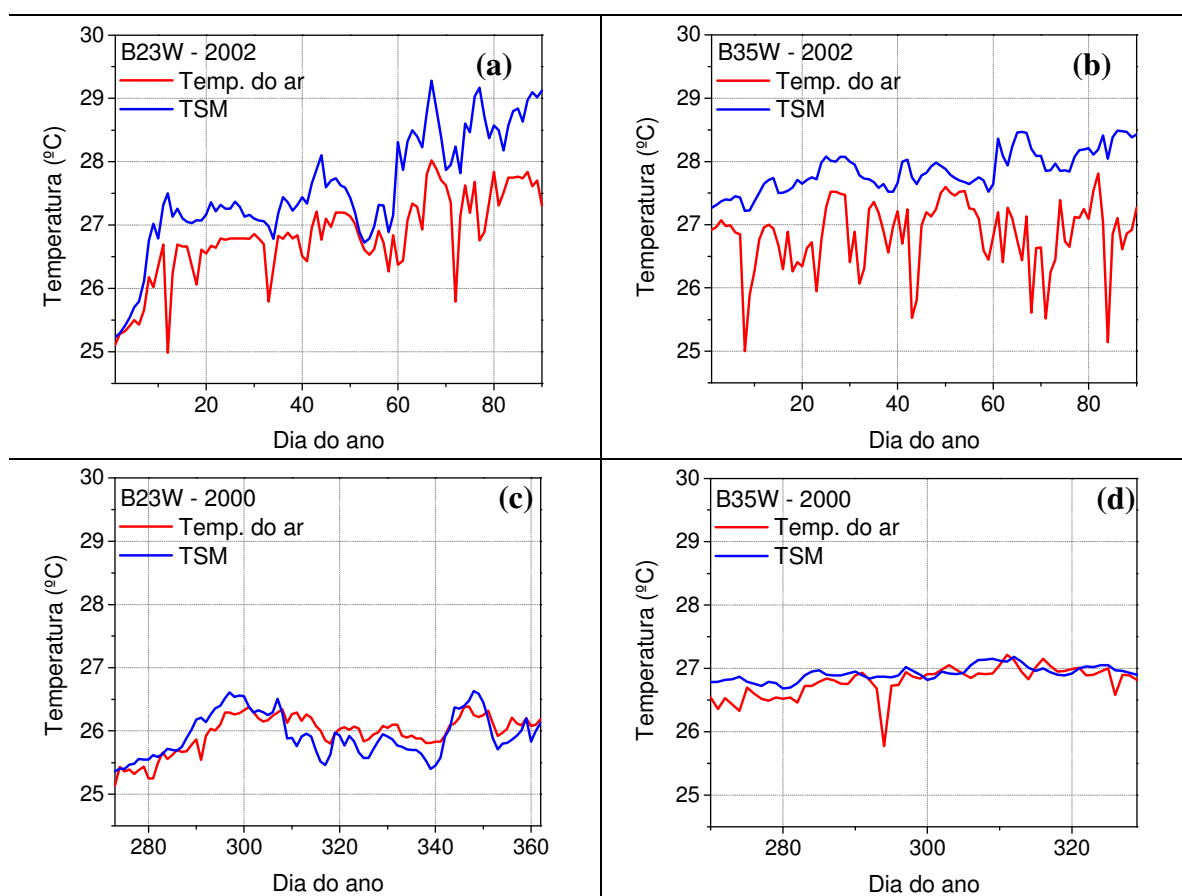


Figura 8: Temperatura do ar e TSM, obtidas pelas Bóias PIRATA B23W e B35W, em dois períodos de tempo diferentes.

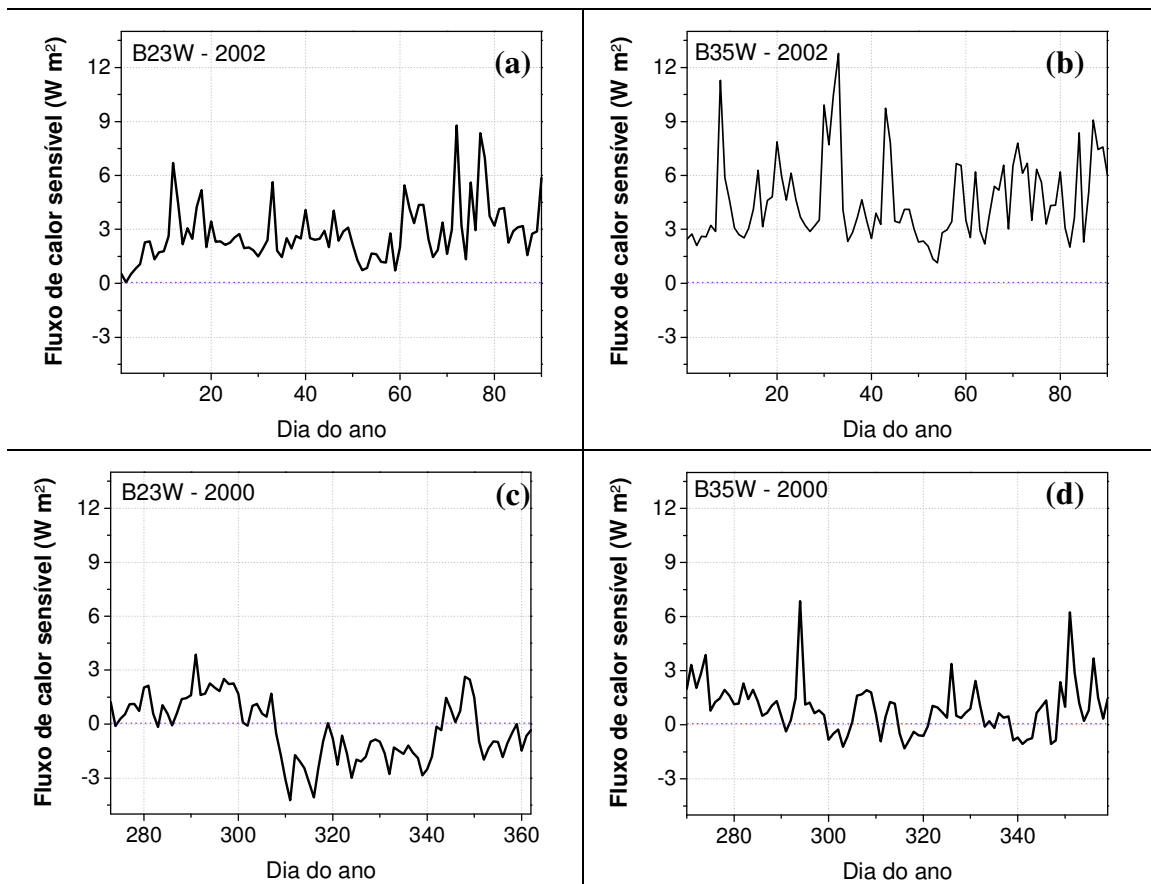
Analisando os resultados obtidos, verifica-se que para os meses de janeiro a março dos anos de 2000 e 2002, a temperatura média diária do ar manteve-se sempre inferior ao valor médio da TSM, sem nenhuma exceção. Já para os meses de outubro a dezembro dos mesmos anos, houve dias em que ocorreu o contrário, o ar estava mais quente que a água.

Em geral, a temperatura da água apresenta um ciclo diurno menor do que a temperatura do ar, pois sua capacidade de adquirir e perder calor é mais lenta.

Observa-se também que para as duas Bóias, as temperaturas nos primeiros meses do ano são mais elevadas do que no período de outubro a dezembro, e sabe-se que a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) desloca-se em direção ao local em que a temperatura do mar é mais elevada, ocasionando maiores chuvas, o que confere com os resultados obtidos, pois a precipitação acumulada para estas regiões é

predominantemente maior nos primeiros meses do ano e muito baixa para os meses finais (Skielka e Soares, 2006).

A *Figura 9* ilustra os fluxos estimados de calor sensível. A linha roxa é um guia visual, cortando o eixo da abscissa, para facilitar a visualização de valores negativos para os fluxos turbulentos.



*Figura 9:* Fluxo turbulento vertical de calor sensível estimado para a região das duas Bóias PIRATA B23W e B35W, em dois períodos de tempo diferentes.

Na *Figura 9* observa-se que os três primeiros meses do ano para ambas as Bóias não apresentam nenhum valor negativo para os fluxos de calor sensível, o que confere com o esperado pelos gráficos (a) e (b) da *Figura 8*, já que nestes gráficos a TSM manteve-se sempre superior à temperatura do ar. Nesta situação, os fluxos são dirigidos da superfície para a atmosfera.

Observa-se também que para a B35W no ano de 2002 os valores dos fluxos de calor sensível (*Figura 9*) nos primeiros meses do ano foram superiores aos valores estimados para a região da B23W, no mesmo período de tempo. Isto aconteceu pois o vento médio diário e a variação entre a temperatura da água e a TSM foram maiores nesta região. Raramente, os fluxos ultrapassaram  $12 \text{ W m}^2$ .



Observa-se contudo que nas duas Bóias, no período de outubro a dezembro de 2000, ambas as regiões apresentaram fluxo turbulento de calor sensível negativo, para os dias em que a temperatura média do ar era superior à TSM (ver gráficos (c) e (d) da Figura 8). Nestes dias, o sentido do fluxo médio de calor sensível era da atmosfera em direção à superfície.

Analisando os gráficos, é possível perceber que para a B35W, em módulo, os fluxos estimados de calor sensível na direção da superfície para a atmosfera são significativamente maiores que no sentido inverso. Isto mostra que a TSM é, na maior parte do tempo, superior à temperatura do ar, e quando ocorre inversão desse gradiente, o módulo da diferença entre as temperaturas é bem menor.

Na Figura 10, os fluxos turbulentos de calor latente estimados para cada Bóia, nos mesmos períodos de tempo mencionados.

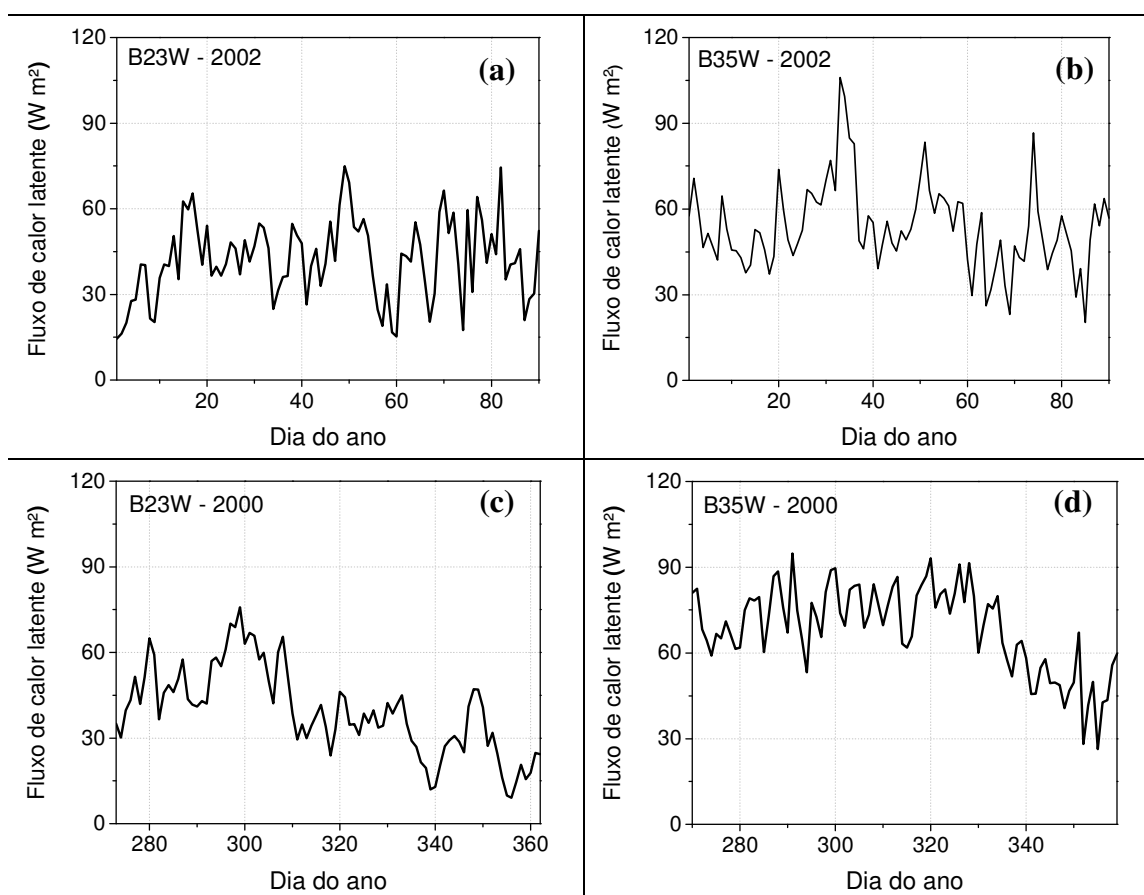


Figura 10: Fluxo turbulento vertical de calor latente estimado para a região das duas Bóias PIRATA B23W e B35W, em dois períodos de tempo diferentes.

Os fluxos turbulentos de calor latente estimados não apresentaram uma variação sazonal bem definida, já que não há grande variação na umidade do ar para a região do oceano tropical.

Analisando a *Figura 10*, a B35W apresenta os maiores valores e as maiores variações, ultrapassando  $100 \text{ W m}^{-2}$  no início do mês de fevereiro. Os valores estimados no período de outubro a dezembro de 2000 também foram maiores que o estimado para a B23W no mesmo período.

Estes valores estimados pelo método bulk não são muito elevados, se tratando de uma região oceânica, e isso deve aos ventos nesta região que não são intensos.

#### 4.2 Médias horárias mensais

Na segunda etapa deste trabalho de IC, foram utilizadas as variáveis disponíveis do projeto PIRATA em uma maior resolução, com médias horárias. Após estimar os fluxos para cada hora do dia (do ano 1999 ao 2006, salvo algumas interrupções de dados devido a ocorrências técnicas), foi elaborado outro programa em Fortran que calcula as médias dos fluxos turbulentos em cada hora do dia, para cada mês do ano. Neste relatório, são apresentados os resultados obtidos apenas para os meses de janeiro e junho. As Figuras estão apresentadas em uma mesma escala, para facilitar a visualização do comportamento médio horário dos fluxos para os dois diferentes meses.

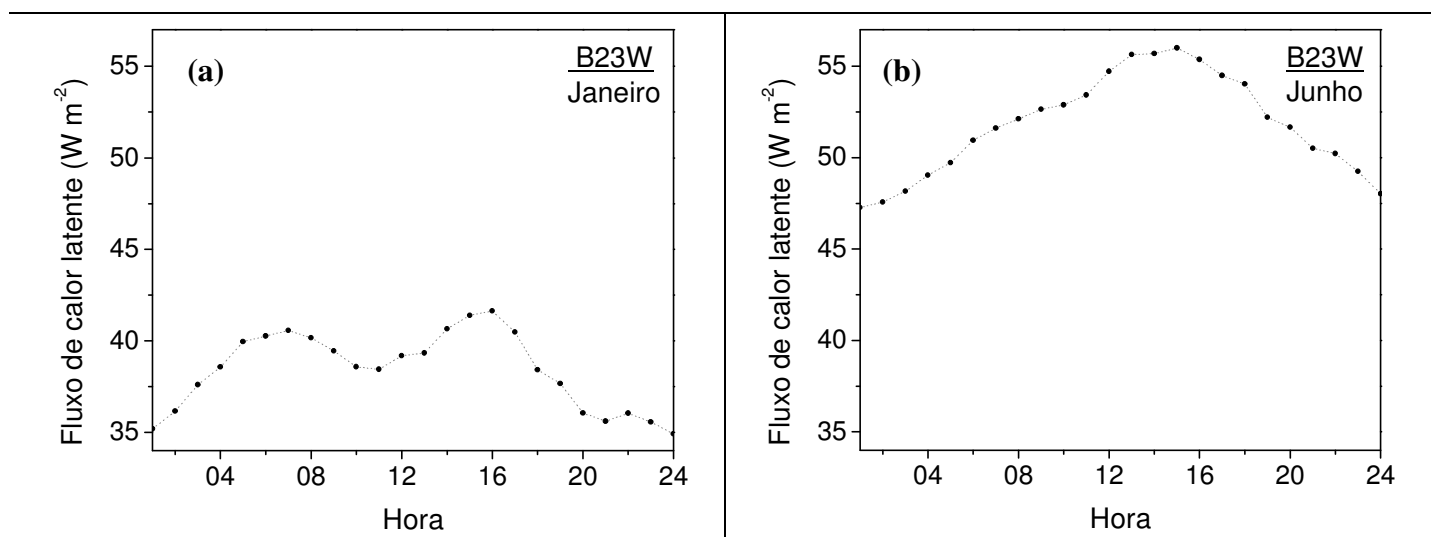


Figura 11: Médias horárias para os meses de janeiro e junho do fluxo turbulento vertical de calor latente estimado para a região da Bóia PIRATA B23W.

Percebe-se que os valores médios horários para o mês de junho dos fluxos de calor latente são maiores que no mês de janeiro, cerca de  $15 \text{ W m}^{-2}$ . Os valores seguem também uma tendência, sendo mais baixos nas primeiras e nas últimas horas do dia, e maiores nas demais horas.

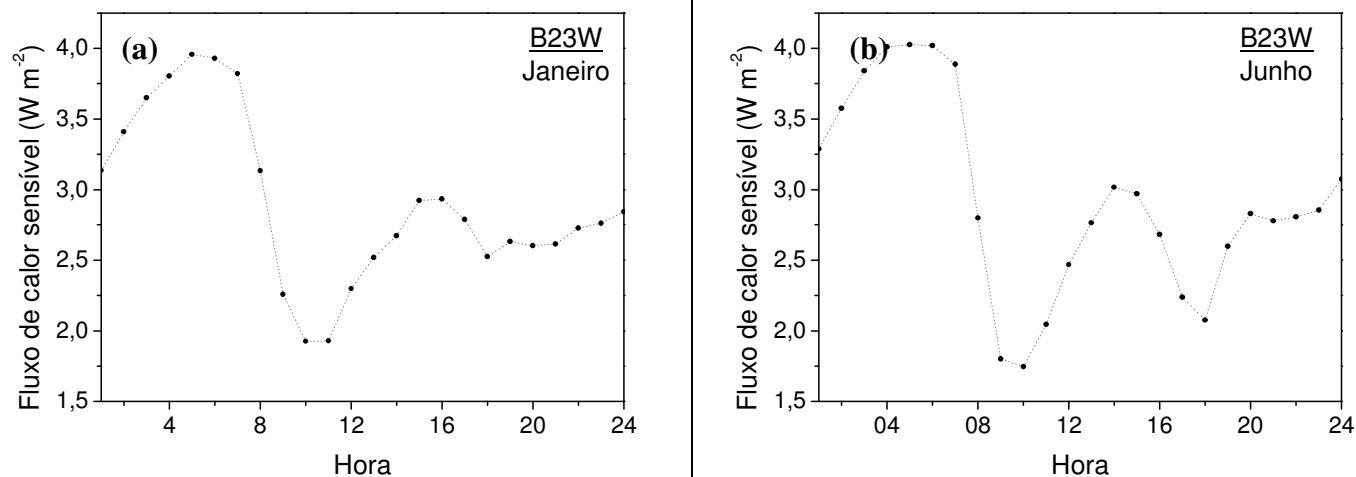


Figura 12: Médias horárias para os meses de janeiro e junho do fluxo turbulento vertical de calor sensível estimado para a região da Bóia PIRATA B23W.

Os valores médios horários estimados para o fluxo de calor sensível (Figura 12) não apresentaram grandes variações para os meses de janeiro e junho, e não ultrapassaram o valor de  $4 \text{ W m}^{-2}$ .

A seguir, os fluxos de calor latente para os meses de janeiro e junho são plotados simultaneamente a média horária para os horários 00Z, 06Z, 12Z e 18Z (únicos horários disponíveis) dos dados de reanálise do NCEP:

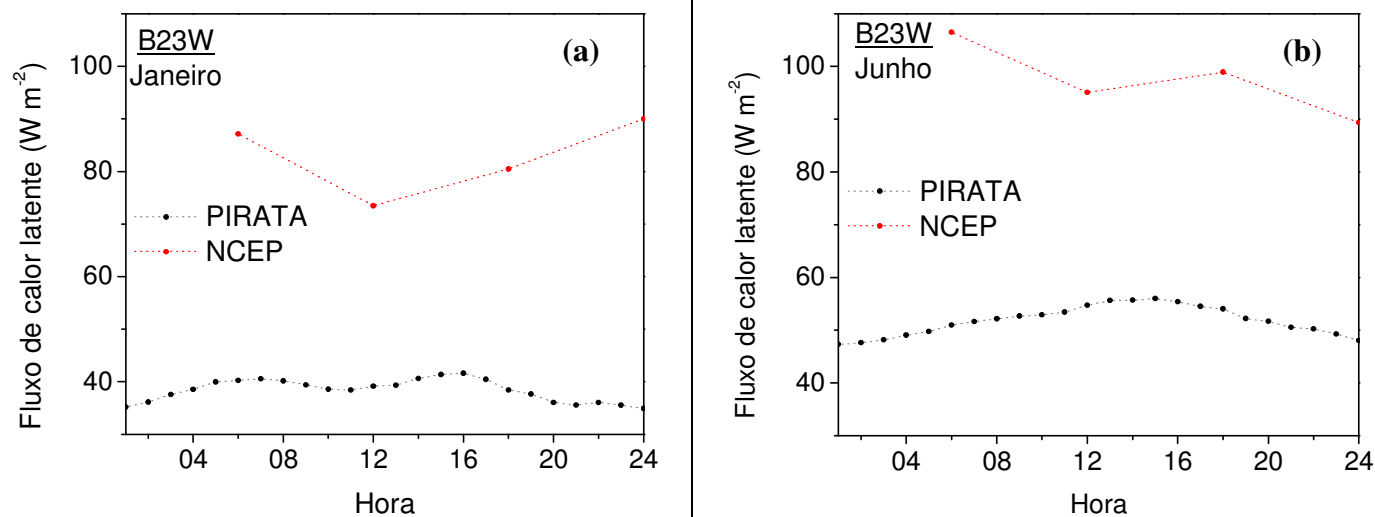


Figura 13: Médias horárias para os meses de janeiro e junho do fluxo turbulento vertical de calor latente estimado para a região da Bóia PIRATA B23W (pontos pretos) e para a região ( $0^{\circ}\text{N}$ ,  $30^{\circ}\text{W}$ ) dos dados de reanálise do NCEP.

Observa-se que os fluxos médios horários de calor latente obtidos com os dados de reanálise do NCEP para janeiro e junho foram 100% maiores dos estimados pelo método bulk, para a região da B23W. Isto pode ter ocorrido pois além de os pontos geográficos não serem os mesmos (a B23W dista aproximadamente 780 km do ponto de grade utilizado para os dados do NCEP), o valor do coeficiente de troca turbulenta

utilizado foi de  $10^{-3}$ , entretanto este coeficiente não deve ser o mesmo para toda e qualquer região oceânica.

O projeto FluTuA visa a determinação correta deste coeficiente aerodinâmico de transferência, a partir dos fluxos diretamente observados pelos instrumentos de alta frequência.

### 4.3 Caracterização climatológica

Os resultados finais de cada Bóia PIRATA e do ponto de grade utilizado do NCEP foram interpolados no programa SURFER e plotados em um único gráfico cada, caracterizando a evolução média horária dos fluxos verticais turbulentos para cada mês do ano.

As médias horárias mensais dos fluxos turbulentos de calor sensível e latente com os dados disponíveis do NCEP seguem respectivamente nas figuras 14.a e 14.b. Os horários disponíveis eram às 0h, 6h, 12h e 18h – GMT, e nesta fase do trabalho, os dados foram plotados na hora local do ASPSP, atrasado em duas horas do horário de Greenwich.

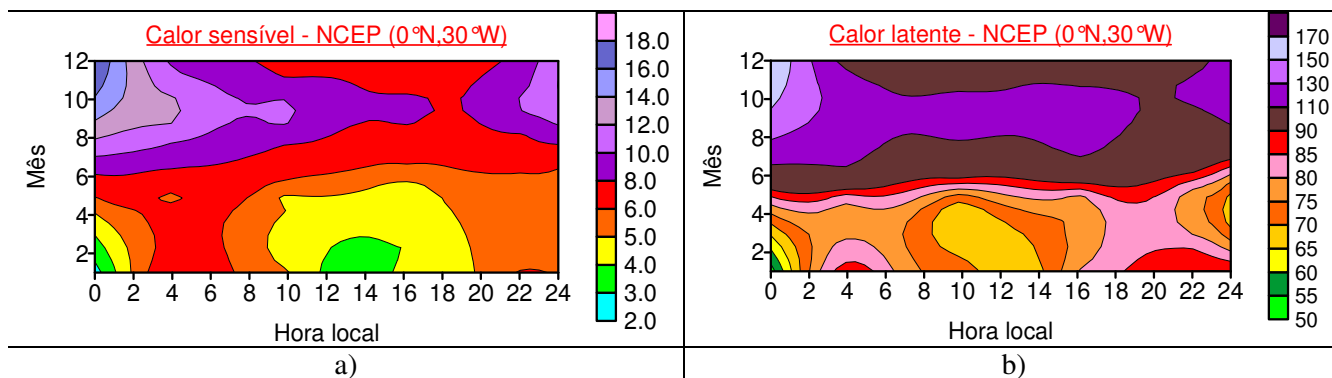


Figura 14: Evolução dos fluxos verticais turbulentos de a) calor sensível e b) calor latente para o NCEP na localização 0°N e 30°W.

É importante observar que os gráficos a) e b) da Figura 14 não estão na mesma escala de cores. O fluxo turbulento de calor latente é sempre maior que o calor sensível em regiões oceânicas.

A Figura 15 apresenta a evolução do fluxo de calor sensível estimado com os dados do projeto PIRATA, para as duas bóias escolhidas. Este projeto disponibiliza os dados em alta resolução, e as médias efetuadas foram interpoladas no software Surfer para elaboração da figura.

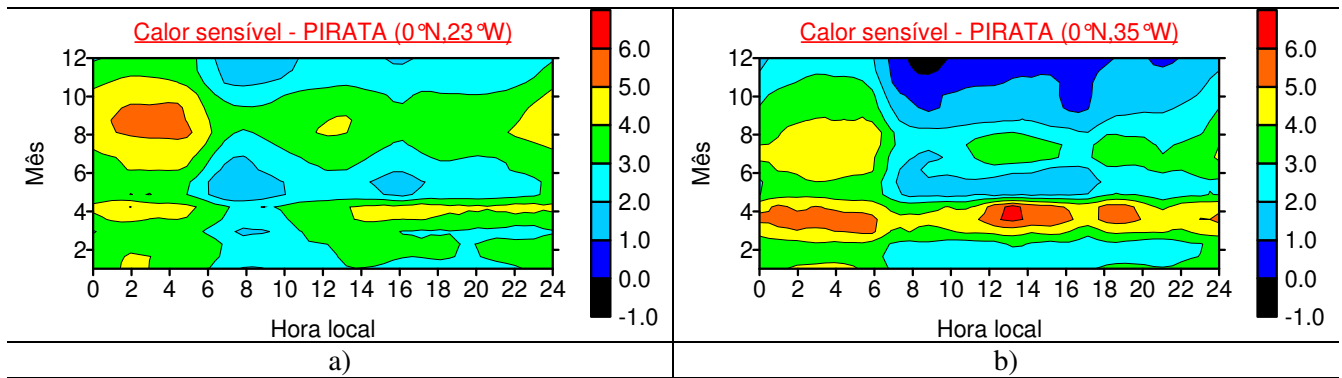


Figura 15: Evolução do fluxo vertical turbulento de calor sensível calculado com os dados do projeto PIRATA, para as localizações a) 0°N e 23°W – B23W e b) 0°N e 35°W – B35W.

Vale ressaltar que o sentido do fluxo adotado neste trabalho é positivo quando vai da superfície em direção à atmosfera, e negativo quando ocorre o inverso.

Na Figura 16, o resultado da evolução média horária do fluxo de calor latente, para as bóias PIRATA.

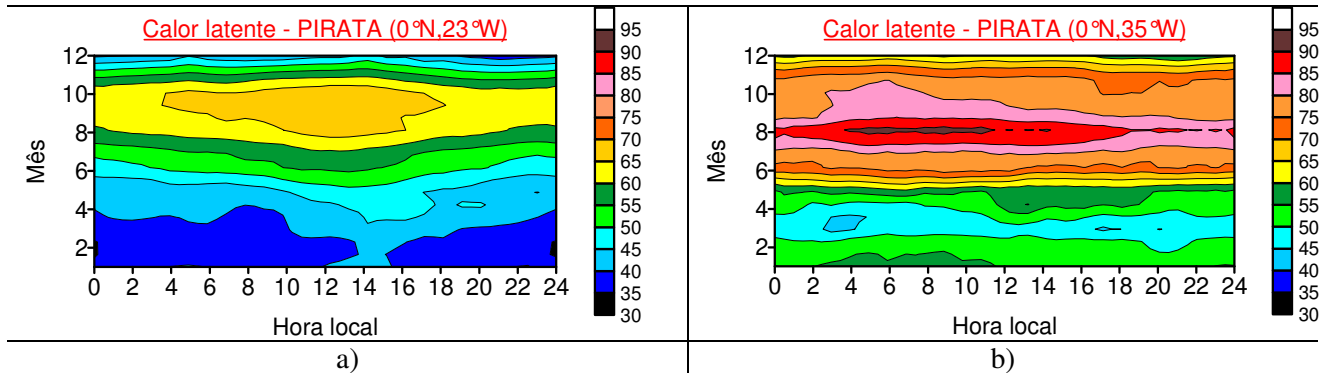


Figura 16: Evolução do fluxo vertical turbulento de calor latente calculado com os dados do projeto PIRATA, para as localizações a) 0°N e 23°W – B23W e b) 0°N e 35°W – B35W.

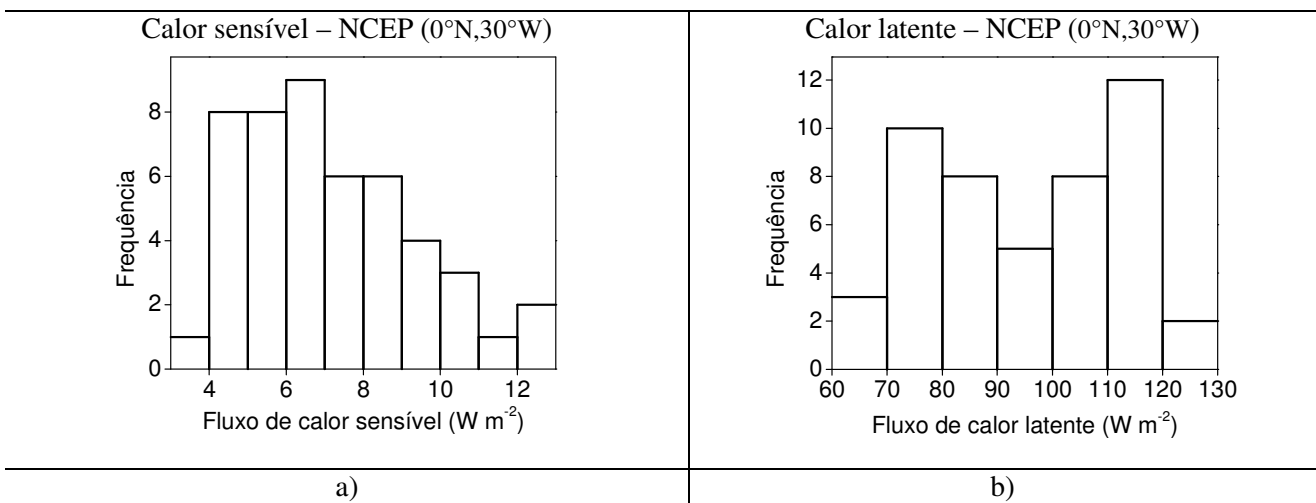
Comparando o resultado apresentado nas Figuras 14 a 16, a principal diferença que se destaca é que na Figura 14 os gráficos parecem ter formas mais geométricas e largas em todos os pontos. Isto ocorre pois os dados disponíveis do NCEP eram em baixa resolução, com apenas quatro dados ao dia, o que resulta em interpolações menos precisas e não tão definidas. Como o projeto PIRATA disponibiliza as variáveis coletadas em alta resolução, os resultados obtidos com estes dados são melhores definidos.

Contudo, os resultados obtidos na Figura 14, tanto para o fluxo de calor sensível quanto para o de calor latente apresentam tendências em aumentar nos últimos meses do ano, e diminuir nos primeiros meses. O mesmo observa-se na Figura 16, para o fluxo de calor latente estimado com os dados PIRATA; os resultados obtidos pelas duas bóias estão na mesma escala de cores, e apesar de não apresentarem a mesma intensidade (a B35W chega a valores até  $30 \text{ W m}^{-2}$  superiores aos da B23W), os fluxos crescem ao

longo do ano, atingindo seu valor médio máximo entre agosto e outubro. Observa-se assim, a forte dependência da evolução média horária dos fluxos no tempo e no espaço.

Na *Figura 15*, a evolução média dos fluxos de calor sensível não parece seguir uma tendência linear de crescimento ao longo do ano, embora os valores obtidos por cada bóia não apresentem grande variação entre si. É importante notar que apenas a B35W apresentou valores médios negativos para o fluxo turbulento de calor sensível, indicando que o sentido do fluxo médio de calor sensível era da atmosfera em direção à superfície, em algumas horas do dia nos meses de outubro a dezembro. Fora este curto período, o sentido de direção predominante do fluxo é da superfície em direção à atmosfera, indicando que a temperatura do oceano é mais elevada que a temperatura do ar.

Nesta fase do trabalho, foram também elaborados histogramas das médias horárias mensais calculadas, nos quais pode-se verificar mais precisamente a frequência das intensidades dos fluxos. Os resultados seguem nas *Figuras 17 a 19*.



*Figura 17:* Histograma das médias diárias mensais dos fluxos verticais turbulentos de a) calor sensível e b) calor latente para o NCEP na localização 0°N e 30°W.

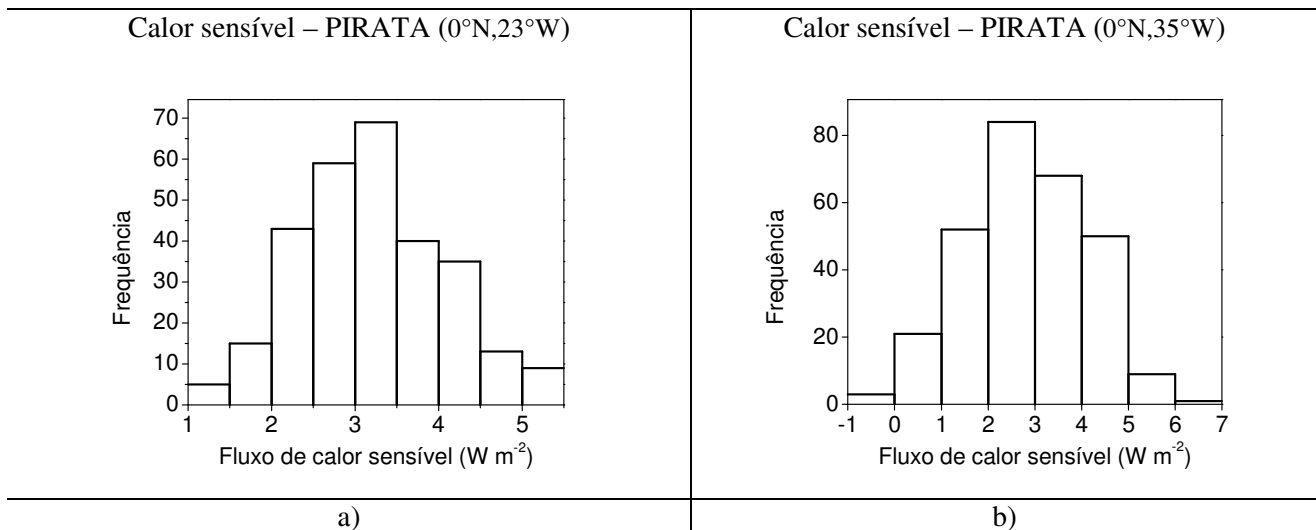


Figura 18: Histograma das médias diárias mensais do fluxo vertical turbulento de calor sensível calculado com os dados do projeto PIRATA, para as localizações a) 0°N e 23°W – B23W e b) 0°N e 35°W – B35W.

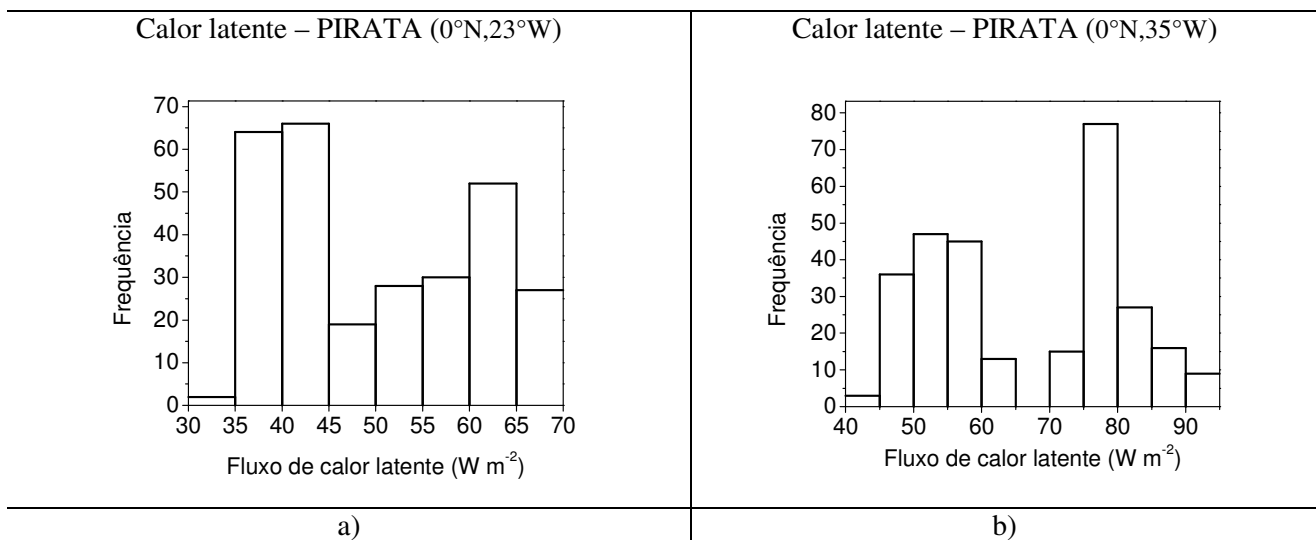


Figura 19: Histograma das médias diárias mensais do fluxo vertical turbulento de calor latente calculado com os dados do projeto PIRATA, para as localizações a) 0°N e 23°W – B23W e b) 0°N e 35°W – B35W.

Comparando o resultado apresentado nas Figuras 17 a 19, nota-se que a frequência dos dados na Figura 17 é menor, já que o NCEP possuiu menos dados disponíveis ao dia. A intensidade dos fluxos nesta figura também é maior que a intensidade dos fluxos calculada com os dados PIRATA, em mais de 100%.

Na Figura 18, observa-se uma distribuição normal para o fluxo estimado de calor sensível, contudo, os valores calculados para a Bóia B23W apresentaram-se ligeiramente maiores que os calculados para a Bóia B35W.

Na Figura 19, os fluxos de calor latente estimados não apresentaram uma distribuição gaussiana normal em ambas as Bóias. Para a Bóia B23W, as intensidades de maior frequência do fluxo estão entre 35 e 45  $W m^{-2}$ , e para a Bóia B35W entre 75 e

80 W m<sup>-2</sup>. Isto demonstra novamente a forte dependência da intensidade dos fluxos com a região em que estão sendo estimados.

## **5. Considerações finais**

O objetivo geral deste trabalho foi investigar a metodologia de estimativa dos fluxos turbulentos de calor sensível e latente na interface oceano-atmosfera, para aplicação à matéria ACA0321 do curso de Meteorologia. Esta investigação foi feita utilizando os dados disponíveis na internet, sejam dados medidos *in situ*, sejam de programas de pesquisa que estimam variáveis utilizando diferentes algoritmos. O exercício proposto foi importante para os alunos colocarem em prática os conceitos vistos durante a disciplina.

Neste trabalho foram apresentados os resultados dos cálculos dos fluxos turbulentos calculados a partir das variáveis meteorológicas disponíveis no site do projeto PIRATA, e estes resultados foram comparados com os fluxos turbulentos estimados pelo NCEP. Estes valores estão sendo estimados para uma região próxima ao ASPSP, e posteriormente, quando a torre micrometeorológica estiver instalada no arquipélago, os fluxos serão estimados utilizando os dados obtidos pela Torre.

Neste relatório final, foram inclusos os resultados da caracterização climatológica para a região estudada. As médias horárias mensais de cada Bóia e do ponto de grade do NCEP foram interpoladas no programa SURFER e plotadas em um único gráfico, caracterizando a evolução média horária dos fluxos verticais turbulentos para cada mês do ano. Esta caracterização é importante na investigação e análise do comportamento climatológico dos fluxos turbulentos na região tropical, já que são escassos os estudos e pesquisas das condições meteorológicas neste local.

Com este projeto de iniciação científica vinculado ao campo do ensino da graduação, foi possível introduzir os primeiros passos no ramo da pesquisa, e aprender mais sobre uma área específica da profissão.

### **5.1 Etapas futuras**

Como continuidade ao projeto, para o primeiro semestre de 2008 serão propostos novos objetivos relacionados à matéria Micrometeorologia, envolvendo os fluxos turbulentos para a região do ASPSP. Seria interessante e de extrema relevância o



cálculo das incertezas dos valores estimados, bem como a aquisição de novas fontes de dados para estimativa dos fluxos na região, já que estes possuem forte dependência no tempo e no espaço.

Com a instalação da Torre Micrometeorológica no arquipélago, será possível a determinação mais precisa do coeficiente turbulento de transferência de calor utilizando os dados de fluxos obtidos diretamente pelos instrumentos de alta frequência e indiretamente pelos instrumentos convencionais (fórmula bulk). A definição do coeficiente turbulento de transferência de calor adequado à região estudada permitirá a estimativa posterior mais precisa através do uso de fórmulas bulk. Essas fórmulas bulk são utilizadas na maioria dos modelos numéricos de previsão de tempo.

## **6. Referências**

- Bacellar, S., A. P. Oliveira, J. Soares, J. Servain, 2004: Preliminary results of the surface radiation balance over the Tropical Atlantic Ocean. XIII *Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 29/8 a 03/9 em Fortaleza, Ceará. CD.
- Blanc, T.V., 1983: A Practical Approach to Flux Measurements of Long Duration in the Marine Atmospheric Surface Layer. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, **22**, 1093-1110.
- Bradley, E.F. P.A. Coppin and J.S. Godfrey, 1991: Measurements of sensible and latent heats fluxes in the western equatorial Pacific ocean. *J. Geophys. Res.*, **96** Suppl. 3375-3389.
- Wainer, I., A. Taschetto, J. Soares, A. P. Oliveira, B. Otto-Bliesner, E.Brady, 2003: Intercomparison of heat fluxes in the South Atlantic. Part I: The seasonal cycle. *Journal of Climate*. (16)4, 706-714.
- Skielka, U. T. e Soares, J., 2006: Estudo das Condições Meteorológicas e Oceanográficas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo. In: XIV Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP, 2006, São Paulo.
- Smith, S.D., 1989: Water vapor flux at the sea surface. *Boundary-Layer Meteorol.*, **47**, 277-293.
- Soares, J., A.P. Oliveira, J. Servain, S. A. Bacellar, 2004: Resultados preliminares do balanço de energia sobre o oceano Atlântico tropical observado, em 2002, durante

a campanha de medidas do projeto FluTuA. *XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 29/8 a 03/9 em Fortaleza, Ceará. CD.

WGASF (2000): Intercomparison and validation of ocean-atmosphere energy flux fields. Final report of Joint WCRP/SCOR Working Group on Air-Sea fluxes (SCOR working group 110).

## **7. Outras atividades**

A seguir são descritas outras atividades acadêmicas realizadas durante a vigência da bolsa do programa Ensinar com Pesquisa.

### **7.1. Disciplinas cursadas**

- Climatologia I
- Meteorologia Física II
- Física II
- Cálculo Diferencial e Integral III
- Meteorologia Física I
- Física III
- Física Experimental III
- Introdução às Equações Diferenciais Ordinárias e Aplicações
- Cálculo Diferencial e Integral IV

### **7.2 Participações em eventos**

- Participação no XII Simpósio de Iniciação Científica do IAG, com apresentação do trabalho em painel (*Anexo 2*).
- Participação no 15º Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP – SIICUSP-2007, com apresentação do trabalho em painel (*Anexo 3*).
- Participação no 26º Treinamento Pré-Arquipélago (*Anexo 4*).

• **Anexo 1 - Lista de exercícios ACA0321 – Micrometeorologia**

*Data máxima de entrega: 13/06/2007*

**Instruções:**

- Os dados estão disponíveis na intranet (<http://www.dca.iag.usp.br/www/material/amauri/jacyra/aca0321/>)
- Cada aluno deverá pegar seu próprio arquivo de dados, identificado com seu nome no site;
- Plotar os seguintes valores para seu grupo de dados:
  - Temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ );
  - Temperatura da água ( $^{\circ}\text{C}$ );
  - Velocidade do vento ( $\text{m s}^{-1}$ );
  - Umidade relativa (%);
  - Umidade específica de saturação à temperatura da água ( $\text{g kg}^{-1}$ );
- Calcular os fluxos turbulentos de calor sensível e latente (em  $\text{W m}^{-2}$ ) para cada dia e imprimir seus valores.
- Plotar em gráficos separados os fluxos turbulentos de calor sensível e os fluxos turbulentos de calor latente, para seu grupo de dados;
- Escrever as fórmulas utilizadas e os procedimentos para a realização dos cálculos, identificando cada termo;
- **Analisar os resultados.** Trabalho que contenha somente os gráficos não será considerado.

**Disposição dos dados:**

*Notas:*

- Identificação das colunas no arquivo:
  - A) Dia do ano
  - B) Temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ )
  - C) Temperatura da água ( $^{\circ}\text{C}$ )
  - D) Velocidade do Vento ( $\text{m s}^{-1}$ )
  - E) Umidade Relativa (%)
- A segunda linha indica o número de dias que contém o arquivo.
- Os valores disponíveis para cada variável são valores médios diários obtidos por uma Bóia na região do Oceano Atlântico Tropical, na linha do Equador.
- Utilizar os seguintes valores para as constantes nos cálculos:

pressão à superfície (P):  $1010,0 \text{ hPa}$   
pressão de vapor de saturação a  $0^{\circ}\text{C}$  ( $e_0$ ):  $6,11 \text{ hPa}$   
constantes da fórmula de Tetens:  $T_1 = 273,16$ ;  $T_2 = 17,67$  e  $T_3 = 29,66$   
densidade do ar ( $\rho_0$ ):  $1,15 \text{ kg m}^{-3}$   
calor específico do ar a pressão constante (cp):  $1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$   
coeficiente aerodinâmico de transferência (C):  $0,001$   
calor Latente de vaporização (L):  $2,5 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}$

**Observações:**

Cada aluno deve utilizar o grupo de dados identificado com seu próprio nome! Trabalhos repetidos serão desconsiderados!!!  
Utilizar *preferencialmente* o programa Origin para fazer os gráficos.

# CERTIFICADO

Certificamos que **LÍVIA MÁRCIA MOSSO DUTRA**, sob a orientação da Profa. Dra. Jacyra Ramos Soares, participou do XII Simpósio de Iniciação Científica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, com o trabalho intitulado "*Estimativa dos Fluxos Verticais Turbulentos de Calor na Superfície*", realizado nos dias 17 e 18 de maio de 2007.

São Paulo, 18 de maio de 2007.



Prof. Dr. Laerte Sodré Jr.  
Presidente Comissão de Pesquisa



Prof. Dra. Marcia Ernesto  
Diretora IAG



### Anexo 3



## UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA USP

# Certificado



Certificamos que **Livia Márcia Mosso Dutra** participou do 15º Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP - SIICUSP com o trabalho "Fluxos verticais turbulentos de calor na superfície da região do Arquipélago de São Pedro e São Paulo", no evento Engenharias e Exatas, realizado nos dias 26, 27 e 28 de novembro de 2007, no *campus* da USP em São Carlos, SP.

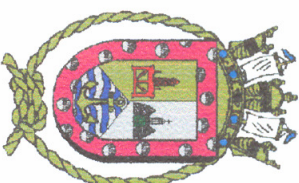
São Paulo, 26 de novembro de 2007.

  
Prof. Dra. Mayana Zatz  
PROFESSORA DE PESQUISA DA  
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

  
Prof. Dra. Maria Angélica Migliano  
PRESIDENTE DA COMISSÃO COORDENADORA DO  
PROGRAMA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA USP

# CERTIFICADO

SECRETARIA DA COMISSÃO INTERMINISTERIAL PARA OS RECURSOS DO MAR




## PROGRAMA ARQUIPÉLAGO DE SÃO PEDRO E SÃO PAULO

A Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar confere o presente Certificado à pesquisadora LÍVIA MÁRCIA MOSSO DUTRA, pela participação no 26º Treinamento

Pré-Arquipélago, realizado no período de 23 a 30 de setembro de 2007, na Base Naval de Natal.

Brasília - DF, em 30 de setembro de 2007.

  
MARCO ANTONIO CARVALHÃO DE SOUZA  
Capitão-Tenente  
Encarregado da Divisão de Apoio ao PROARQUIPÉLAGO