

Relatório Parcial de Pesquisa de Iniciação Científica

**PIBIC/CNPq**

**Período – Março de 2006 a Julho de 2006**

*Estudo das condições meteorológicas e oceanográficas no  
Arquipélago de São Pedro e São Paulo*

Aluno: Udo Tersiano Skielka

**Orientador: Jacyra Soares**

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

**Agosto de 2006**

## Resumo

Devido à ausência de dados observacionais é limitado o número de estudos de processos físicos atmosféricos e oceânicos no Atlântico Sul que contribuem para as variações encontradas nos parâmetros de superfície marinha ou para os fluxos entre o oceano e a atmosfera. O presente projeto de pesquisa de Iniciação Científica se encaixa dentro do projeto FluTuA (Fluxos Turbulentos sobre o Atlântico). O FluTuA tem como objetivo primeiro investigar a interação oceano-atmosfera através da determinação observacional direta e contínua dos fluxos verticais turbulentos de calor sensível, calor latente e de momento sobre o oceano Atlântico no Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP), localizado na região de mar aberto do oceano Atlântico tropical. Há poucas referências, na literatura, de observações meteorológicas e oceanográficas efetuadas diretamente no ASPSP. Existem, entretanto, vários resultados de modelos numéricos sobre a região em estudo, o Atlântico tropical. O ASPSP localiza-se em mar aberto, sobre a fratura tectônica de São Paulo e 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  $29^{\circ} 22' W$ ), em uma região privilegiada para o desenvolvimento de pesquisas meteorológicas e oceanográficas - o oceano Atlântico tropical. Este projeto de iniciação científica tem como objetivo estudar as características meteorológicas e oceanográficas do ASPSP utilizando dados de variáveis meteorológicas e oceanográficas disponíveis na internet. Na primeira parte do trabalho (Relatório Parcial/PIBIC – Fevereiro/2006) foi feito um estudo das características climáticas da região do oceano Atlântico equatorial utilizando dados, medidos e estimados, de dois projetos (Pirata e OAFlux) em três localizações diferentes, a fim de caracterizar o clima do ASPSP. Nesta segunda etapa do trabalho, foi realizado um estudo dos fluxos turbulentos verticais na região de estudo, calculando-os com os dados das bóias oceanográficas utilizando equações de parametrizações (fórmulas bulk), e os resultados comparados com fluxos estimados pelo projeto OAFlux.

## 1. Introdução

Entre os oceanos tropicais, o oceano Atlântico se distingue por apresentar um ciclo sazonal pronunciado (Philander, 1979; Merle, 1980). Numerosos estudos (Merle et al., 1979; Servain et al., 1985; Servain and Legler, 1986; Arnault and Cheney, 1994) mencionam a presença de eventos climáticos anormais no Atlântico com duração variável de algumas semanas a vários anos. Eventos de curta duração, em particular no Golfo da Guiné, podem ser explicados pela dinâmica equatorial de origem puramente atlântica, como observado em 1968 (Servain and Legler, 1986; Reverdin and du Penhoat, 1987). Outras anomalias no Atlântico, de duração maior, como em 1984 (Delecluse et al., 1994) podem ser consideradas como uma combinação da dinâmica local e indiretamente da dinâmica equatorial associada ao fenômeno El Niño no oceano Pacífico equatorial. Em termos mais gerais, pode-se caracterizar a variabilidade do Atlântico como uma combinação de efeitos locais e indiretos.

As anomalias no Atlântico de duração de meses a alguns anos estão em geral associadas principalmente à combinação de fases do Atlântico Sul ou Norte. Quando o Atlântico Sul e Norte estão fora de fase, tem-se uma situação conhecida como “dipolo”, a qual apresenta uma forte componente decadal. Nesse caso a variabilidade do oceano está associada também à variabilidade da posição da Zona de Convergência Inter-Tropical (ZCIT).

A ZCIT apresenta um ciclo aproximadamente de um ano, estando entre 2°S e 1°N nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, e entre 8°N e 14°N nos meses de junho, julho e agosto (Hastenrath and Lamb, 1997; Hastenrath and Heller, 1997; Citeau et al., 1988; Nobre e Molion, 1998). A figura 1 ilustra a posição média da ZCIT para os meses de julho e janeiro.



**Figura 1.1 :** Movimento sazonal da ZCIT.

O deslocamento norte-sul anômalo da ZCIT corresponde a estações secas e chuvosas, respectivamente. Em particular, anos de secas no Nordeste estão associados ao deslocamento anômalo da ZCIT para norte da sua posição climatológica (Wainer and Soares, 1997; Hastenrath and Heller, 1977; Moura and Schukla, 1981; Servain, 1991) que por sua vez podem afetar os recursos pelágicos do Golfo da Guiné (Binet and Servain, 1993) ou ao longo da costa Brasileira (Vianna et al., 1996). Dessa forma, o estudo e a eventual previsão de eventos climáticos na região do Atlântico deve constituir uma das prioridades de pesquisa pelo seu impacto sócio-econômico análogo aos eventos associados ao fenômeno El Niño/Oscilação Sul no Oceano Pacífico.

É sabido que a temperatura da superfície do mar (TSM) é a variável oceânica que mais afeta a atmosfera e, portanto, qualquer tentativa de previsão da variabilidade do sistema oceano-atmosfera será sempre limitada pela capacidade de entender (e prever) os processos que modificam a TSM. Hoje em dia já existe uma quantidade significativa de modelos acoplados operacionais que prevêem a TSM com moderado sucesso usando uma formulação de fluxos de calor extremamente simplificada (Cane et. al. 1986; Chen et. al, 1995). Melhorar a previsão da TSM e conseqüentemente do sistema acoplado oceano-atmosfera requer um tratamento mais realístico dos fluxos de calor e movimento entre o oceano-atmosfera.

Devido à ausência de dados observacionais é limitado o número de estudos de processos físicos relacionados com a variabilidade da região do Atlântico, em particular, à investigação dos vários processos atmosféricos e oceânicos que contribuem para as variações encontradas nos parâmetros de superfície marinha ou para os fluxos na interface oceano-atmosfera. Além dos estudos diagnósticos e prognósticos de mudança climática, muitos outros estudos requerem o conhecimento dos parâmetros de interação ar-mar de superfície: modelos operacionais de previsão de tempo, estudos sinóticos de meteorologia e oceanografia, estudos na região da plataforma continental, estudos dos ciclos biogênicos, modelos de previsão de onda, engenharia marinha, etc.

O *Projeto FluTuA – Fluxos Turbulentos sobre o Atlântico* (Soares et al., 2000), o qual tem como objetivo o estudo dos processos físicos de interação entre o oceano e a atmosfera tem como principal base de estudo sobre o Oceano Atlântico Tropical o Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP).

O ASPSP é constituído de um grupo de pequenas ilhas rochosas, desabitadas, localizadas no hemisfério norte, a cerca de 1100 quilômetros da costa do Rio Grande do Norte (0°56'N 29°22'W), onde são realizadas pesquisas em diversas áreas da ciência.

Apesar do conhecimento de fenômenos meteorológicos atuantes, pouco se sabe sobre as características climatológicas da região equatorial do Oceano Atlântico devido à falta de monitoramento e de dados observacionais, o que limita o desenvolvimento de pesquisas.

## **1.1.Objetivo**

O objetivo geral deste trabalho é fazer uma caracterização oceanográfica e meteorológica e um estudo da interação oceano-atmosfera (ar-mar) – fluxos verticais turbulentos de calor sensível, calor latente e momento - da região do ASPSP, cujo conhecimento é pouco, mas de extrema importância, não apenas para o projeto FluTuA, mas também para outros projetos existentes com interesses científicos na região.

Na primeira etapa do trabalho apresentada no Relatório Parcial/CNPQ – fevereiro de 2006 - os esforços se concentraram na caracterização meteorológica e oceanográfica da região do ASPSP utilizando dados de projetos científicos que medem (Projeto Pirata) ou estimam (Projeto OAFlux) as variáveis na região próxima ao ASPSP.

Nesta segunda etapa do trabalho foram calculados, com os dados do Projeto Pirata, os fluxos verticais turbulentos de momento, calor latente e calor sensível utilizando fórmulas bulks. Com os fluxos de calor latente e sensível calculados, foi possível compará-los com os fluxos

estimados pelo Projeto OAFflux, o qual tem como principal objetivo estimar os fluxos em grande parte do globo a uma resolução de  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ .

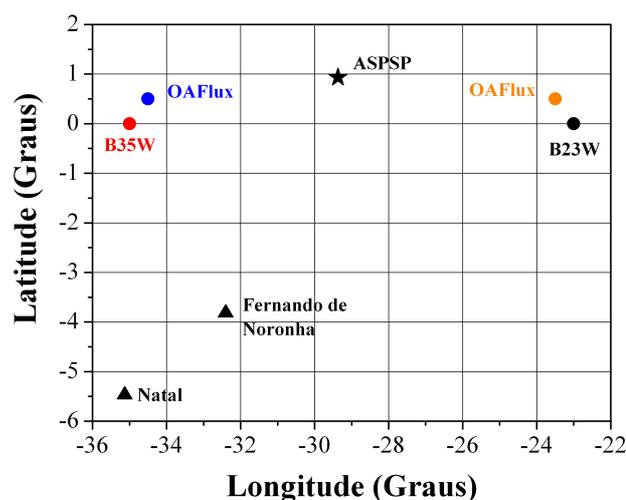
Os resultados são de vital importância na verificação de futuros estudos do projeto FluTuA, o qual pretende instalar no ASPSP uma torre de medição direta de fluxos e, portanto, necessita de conhecimentos prévios dessas variáveis, além de ser uma forma de, futuramente, validar ou não os coeficientes utilizados para a região do Atlântico tropical.

## 2. Região de estudo

Neste estudo de investigação da região do ASPSP foram utilizados os dados de duas das quinze bóias oceanográficas do *Projeto Pirata: Jazz* - situada a  $0^\circ\text{N } 23^\circ\text{W}$  (B23W) - a aproximadamente 720 quilômetros de distância do arquipélago; e *Samba* - situada a  $0^\circ\text{N } 35^\circ\text{W}$  (B35W) - a aproximadamente 635 quilômetros do arquipélago. O motivo da escolha das bóias foi devido à maior proximidade que as duas têm com o arquipélago, sendo que este se encontra, geograficamente, entre as duas bóias, conforme ilustrado na Figura 2.1.

Na primeira parte do trabalho, a qual foi apresentada no relatório parcial (RP) em fevereiro, os dados do OAFflux utilizados foram a do ponto de grade mais próximo do ASPSP, já que o objetivo era de fazer um reconhecimento do clima da região. Para esta segunda parte, na qual o objetivo foi estimar fluxos turbulentos a fim de verificar os métodos de parametrização, foram utilizados dados de dois pontos de grade do OAFflux, e, nesse caso, os pontos com maior proximidade das bóias oceanográficas utilizadas, no intuito de comparar os fluxos estimados indiretamente com fluxos calculados com as fórmulas bulk de parametrização.

Os pontos de grade do OAFflux selecionados para o estudo foram  $0,5^\circ\text{N } 34,5^\circ\text{W}$ , próximo à bóia B35W, e  $0,5^\circ\text{N } 23,5^\circ\text{W}$ , próximo à bóia B23W, ambos a, aproximadamente, 70km de cada bóia. A figura 2.1 ilustra as localizações geográficas das fontes de dados e das cidades mais próximas ao arquipélago. O ASPSP encontra-se aproximadamente a 1100 km da cidade de Natal.



**Figura 2.1:** Localização geográfica dos dados utilizados no estudo dos fluxos turbulentos: bóia Pirata em  $35^\circ\text{W}$  (círculo vermelho), bóia Pirata em  $23^\circ\text{W}$  (círculo preto) e dados do Projeto *OAFflux* – (círculo azul e laranja). Como referência foram colocados alguns locais geográficos (triângulos).

### 3. Dados Utilizados

No intento de fazer uma caracterização climática e um estudo de interação ar-mar da região do ASPSP foi feito um levantamento na *internet* em *web sites* de projetos que dispõem de dados de variáveis meteorológicas e TSM, medidos ou estimados, o mais próximo possível do arquipélago.

A seguir são comentados os projetos dos quais foram utilizados os dados neste trabalho e suas características

#### 3.1. Projeto Pirata – Pilot Research Moored Array in the Tropical Atlantic

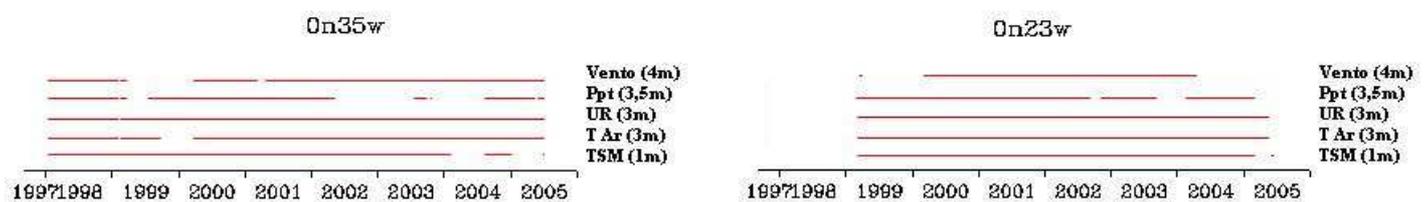
Projeto em atividade desde 1997, realizado no âmbito internacional entre Brasil, França e EUA, o qual tem como objetivo a aquisição de dados oceanográficos e meteorológicos utilizando uma rede de quinze bóias oceanográficas espalhada pelo oceano Atlântico tropical. Nessas bóias estão instalados diversos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

#### 3.2. Projeto OAFlux – Objectively Analyzed Air-Sea Flux

Projeto do *Woods Hole Oceanographic Institute*, tem como principal objetivo estimar, através de métodos numéricos acoplados - utilizando dados de observações em superfície, satélites e gerados por modelos numéricos - os fluxos de troca de energia entre o oceano e a atmosfera (exceto o fluxo de momento) em todo o globo, a cada 0°30' de latitude por 0°30' de longitude. O projeto disponibiliza também estimativas de algumas variáveis meteorológicas como temperatura do ar e TSM, disponibilizando-as em seu *web site* - <http://www.whoi.edu/science/PO/people/lyu/res-flux.html>. Atualmente o projeto apresenta dados diários e mensais no intervalo de 1981 até 2002.

#### 3.3. Variáveis utilizadas e especificações

São mostradas na Figura 3.1 as variáveis do Projeto Pirata utilizadas no trabalho e a disposição dos instrumentos instalados nas bóias oceanográficas. No trabalho foram utilizadas médias diárias.



**Figura 3.1** – Série temporal de medidas realizadas nas respectivas bóias oceanográficas do projeto Pirata utilizadas no trabalho (B35W e B23W). Essas informações estão disponibilizadas no site do projeto Pirata.

Como mostradas na Figura 3.1, as séries de medidas do *Projeto Pirata* eventualmente possuem intervalos com falta de dados devido a ocorrências técnicas.

Os dados do projeto OAFlux utilizados foram de 1999 a 2002, utilizando as variáveis de temperatura do ar e TSM na primeira parte do trabalho e os fluxos turbulentos de calor sensível e calor latente nesta segunda parte, sem interrupções na série temporal.

#### 4. Considerações teóricas

Fórmulas de parametrizações são utilizadas na determinação de fluxos turbulentos a partir de variáveis básicas (temperatura ar, TSM, umidade, intensidade do vento) medidas *in situ* ou estimadas por sensoriamento remoto. Essas parametrizações são utilizadas em modelos numéricos na estimativa dos fluxos em grande escala, já que são poucos os locais existentes que medem esses fluxos diretamente sobre o oceano.

A utilização das fórmulas bulk é o método mais comum no meio científico para parametrização de fluxos turbulentos verticais sobre o oceano e tem sido constantemente aprimoradas por pesquisadores. De modo mais simplificado, as fórmulas bulk podem ser representadas pela relação

$$F \propto C_{XZ} u_z (\Delta s_z) \quad (4.1)$$

onde  $F$  é o fluxo,  $u_z$  é velocidade do vento medida a uma altura de referência  $z$  e  $\Delta s_z$  é a diferença do valor da variável básica apropriada ao fluxo (velocidade do vento, temperatura ou umidade) entre a superfície e a altura  $z$ . A maioria dos processos físicos têm sido parametrizados pelos chamados “coeficiente de transferência”,  $C_{XZ}$ , para cada fluxo ( $C_D$ ,  $C_E$ ,  $C_H$  – coeficiente de arrasto, de transferência de umidade e de calor, respectivamente), os quais variam com a altura  $z$  e a estabilidade atmosférica em relação à superfície (intensidade do vento e rugosidade da superfície), tendo, geralmente, a altura de dez metros e estabilidade neutra como referência ( $C_{X10m}$ ). Dependendo do fluxo a ser calculado e do estado da atmosfera em relação às variáveis influentes, ou seja, em relação às características da região de estudo, estes coeficientes podem ser considerados constantes (WGASF, 2000).

Alguns experimentos estimaram valores para esses coeficientes para diferentes condições do oceano Pacífico. Na Tabela 4.1 são mostrados alguns dos coeficientes estimados empiricamente.

Autores	Valores dos Coeficientes
Enriquez e Friehe (1997)	$10^3 C_{DN}=0,509+0,65 \bar{u}_z$ $10^3 C_{HN}=10^3 C_{EN}=1,05$
Dupuis et al. (1997)	$10^3 C_{DN}=0,66+117000 \bar{u}_z^{-2}$ para $\bar{u}_z < 5,2 \text{ms}^{-1}$ $10^3 C_{HN}=10^3 C_{EN}=1,2$ para $\bar{u}_z < 5,2 \text{ms}^{-1}$
Garrat (1977)	$10^3 C_{DN}=0,75+0,067 \bar{u}_z$ para $4 < \bar{u}_z < 21 \text{ms}^{-1}$
Smith (1989)	$10^3 C_{HN}=1,0$ para $4 < \bar{u}_z < 14 \text{ms}^{-1}$ $10^3 C_{EN}=1,2 \pm 0,1$ para $4 < \bar{u}_z < 14 \text{ms}^{-1}$
<b>Tabela 4.1:</b> Coeficientes de transferência estimados empiricamente e as condições de intensidade média do vento a altura z e de estabilidade neutra.	

Apesar de existirem poucos locais de medições diretas de fluxos sobre o oceano, esses experimentos são muito importantes e necessários para o desenvolvimento, calibração e verificação das equações de parametrização. Os fluxos medidos diretamente são tidos como um limite para a acurácia de estimativas indiretas. Apesar disso, esses estudos diretos, em geral sobre camada limite superficial (CLS), no Atlântico tropical e sul ainda são inexistentes.

#### 4.1. Cálculo de fluxos turbulentos

Os fluxos turbulento de momento ( $\vec{\tau}$ ), calor sensível ( $H$ ) e calor latente ( $LE$ ) são representados pelas Equações (4.2).

$$\begin{aligned}
 |\vec{\tau}| &= \rho \overline{w'u'} = -\rho u_*^2 \\
 H &= \rho c_p \overline{w'T'} = -\rho c_p u_* T_* \\
 LE &= \rho L_e \overline{w'q'} = -\rho L_e u_* q_*
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

Na Equação (2.1),  $w'$ ,  $T'$ ,  $q'$  e  $u'$  representam as flutuações da velocidade vertical, temperatura, umidade e vento, respectivamente, em torno de um valor médio definido experimentalmente de acordo com a região de estudo. Como pode ser observado nas Equações (4.2), a turbulência é calculada através da covariância entre essas flutuações. As constantes  $\rho$  é a densidade do ar ( $1,15 \text{ kg m}^{-3}$ ),  $c_p$  é o calor específico do ar a pressão constante ( $1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) e  $L_e$  é o calor latente de vaporização ( $2,5 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ ). As escalas características  $T_*$ ,  $q_*$  e  $u_*$  são baseadas na teoria da similaridade de Monin-Obukhov (TSMO) (Panofsky e Dutton, 1984; Greenaert, 1990).

Na CLS, os fluxos verticais turbulento são aproximadamente constantes, o que permite escrever as Equações (4.1) em termo de escalas características de velocidade, também conhecida como velocidade de fricção, ( $u_*$ ), temperatura ( $T_*$ ) e umidade específica ( $q_*$ ). De acordo com a TSMO (Panofsky e Dutton, 1984; Greenaert, 1990):

$$\begin{aligned} u_* &= \sqrt{C_D} (\bar{u}_z - \bar{u}_0) \\ T_* &= (C_H / \sqrt{C_D}) (\bar{T}_z - \bar{T}_0) \\ q_* &= (C_E / \sqrt{C_D}) (\bar{q}_z - \bar{q}_0) \end{aligned} \quad (4.3)$$

Pela Equação (4.2), a velocidade de fricção também pode ser representada como  $u_* = \sqrt{-\overline{w'u'}}$ .

Embora consideradas de determinação puramente empírica, as fórmulas bulk podem ser derivadas utilizando as equações adimensionais do perfil vertical e a TSMO (Greenaert, 1990). Aqui será mostrada de forma sucinta a determinação das fórmulas bulk através das equações mostradas.

A determinação dos fluxos turbulentos pode ser dada utilizando as relações empíricas:

$$\begin{aligned} \overline{u'w'} &= -C_D (\bar{u}_z - \bar{u}_0) (\bar{u}_z - \bar{u}_0) \\ \overline{T'w'} &= -C_H (\bar{T}_z - \bar{T}_0) (\bar{u}_z - \bar{u}_0) \\ \overline{q'w'} &= -C_E (\bar{q}_z - \bar{q}_0) (\bar{u}_z - \bar{u}_0) \end{aligned} \quad (4.4)$$

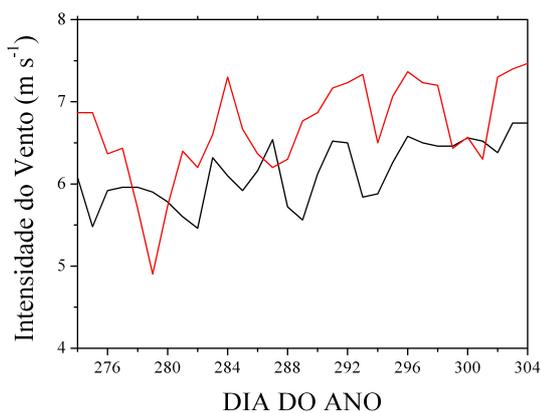
onde os fluxos turbulentos são representados pelas covariâncias. As variáveis  $u_0$ ,  $T_0$  e  $q_0$  correspondem à velocidade do vento, temperatura e umidade, representativas na camada superficial, descritas mais adiante.

Substituindo (4.4) em (4.2), chega-se às fórmulas bulks:

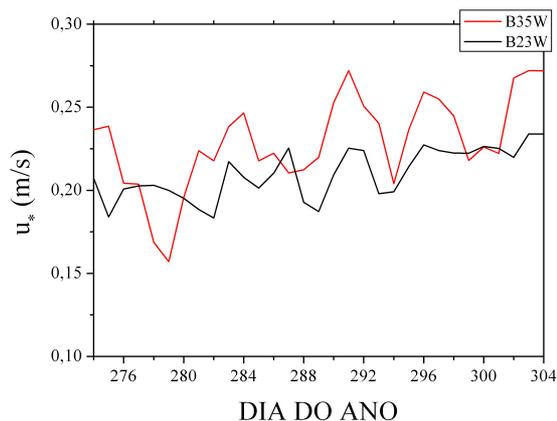
$$\begin{aligned} \left| \vec{\tau} \right| &= \rho_0 C_D (\bar{u}_z - \bar{u}_0)^2 \\ H &= -\rho_0 c_p C_H (\bar{u}_z - \bar{u}_0) (\bar{T}_z - \bar{T}_0) \\ LE &= -\rho_0 c_p C_E (\bar{u}_z - \bar{u}_0) (\bar{q}_z - \bar{q}_0) \end{aligned} \quad (4.5)$$

As quais permitem o cálculo dos fluxos turbulento através das variáveis meteorológicas básicas. Substituindo as Equações (4.3) nas (4.4) é possível representar os fluxos como a Equação (4.2) em função das escalas características.

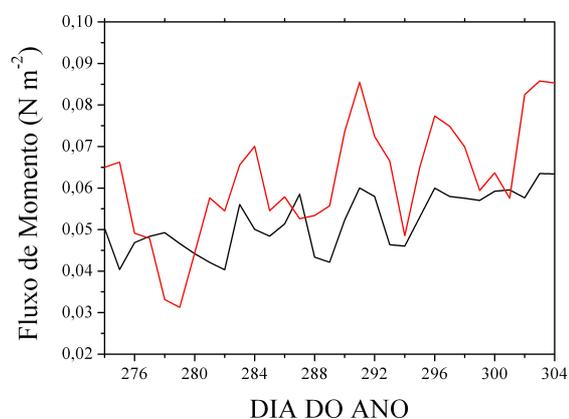
A Figura 4.1 mostra um exemplo, para o mês de outubro (dia do ano 274 ao 304), do fluxo de momento e a escala característica de velocidade do vento juntamente com a média diária da intensidade do vento entre todos os anos de dados disponíveis das variáveis medidas pelo Projeto Pirata.



(a)



(b)



(c)

**Figura 4.1:** Intensidade do vento (a) , escala de velocidade (b) e fluxo de momento (c). Médias para as bóias Pirata B35W (linha vermelha) e B23W (linha preta) para o mês de outubro.

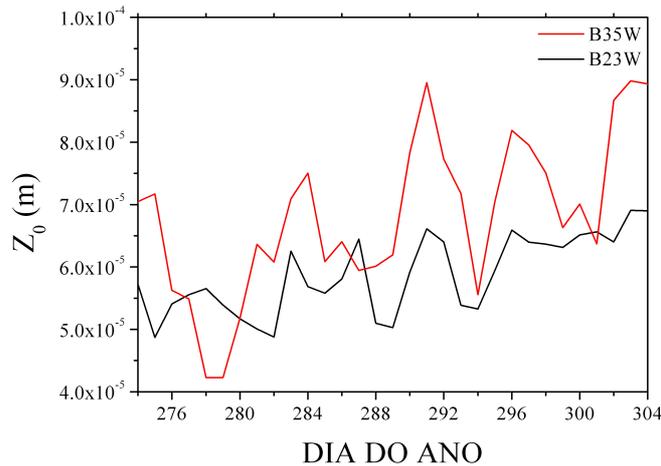
## 4.2. Considerações sobre a camada limite sobre o oceano

Sobre a superfície oceânica a velocidade média do ar pode ser diferente de zero e corresponde ao valor da velocidade média na altura  $z_0$ , ou seja,  $\bar{u}_0 = \bar{u}(z_0)$ , na qual  $z_0$  é o comprimento de rugosidade da superfície, que pode ser calculado pela relação (Smith, 1988):

$$z_0 = \alpha_c \frac{u_*}{g} + 0,11 \frac{\nu}{u_*} \quad (4.6)$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade ( $9,8 \text{ m s}^{-2}$ ),  $\nu$  é a viscosidade cinemática do ar ( $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) e  $\alpha_c$  é constante de Charnock, para a qual, o melhor valor sugerido na literatura é 0,011 (Fairall, 1996a). Dentre outras equações existentes para o cálculo de  $z_0$ , a de Smith é a mais utilizada por ser válida para superfícies lisas - segundo termo do lado direito da equação - ou rugosas, enquanto outras relações são dadas para superfícies com características aerodinâmicas específicas. Porém é muito difícil saber o valor exato de  $\bar{u}_0$ , o qual é considerado nulo.

Na Figura 4.2 são mostradas médias de  $z_0$  para as bóias B35W e B23W para o mês de outubro (dia do ano de 274 até 304). Os valores estão dentro do esperado para a superfície oceânica, que é no intervalo de, aproximadamente,  $10^{-5}$  metro para regiões de mar aberto calmo até  $10^{-3}$  metro para áreas costeiras com vento moderado (Arya, Introduction to micrometeorology), e condizentes também com os resultados preliminares obtidos na campanha de medições do projeto FluTuA (Soares et al., 2004).



**Figura 4.2** – Rugosidade da superfície calculados com os dados da B23W (linha preta) e B35W (linha vermelha) para o mês de outubro. Médias dos dias do ano entre os anos de dados disponíveis.

A temperatura do ar e a umidade específica média na superfície correspondem aos valores médios desses parâmetros nas alturas  $z_{0T}$  e  $z_{0q}$ , ou seja,  $\bar{T}_0 = \bar{T}(z_{0T})$  e  $\bar{q}_0 = \bar{q}(z_{0q})$ . Esses parâmetros são equivalentes ao  $z_0$ , para a temperatura e umidade específica média na CLS. Na presença de intensa mistura turbulenta, a temperatura do ar representativa da superfície corresponde ao valor da TSM e a umidade específica representativa da superfície corresponde à umidade específica de saturação na temperatura da superfície.

## 5. Resultados

O cálculo dos fluxos turbulentos foram feitos utilizando as médias diárias das variáveis do Projeto Pirata, mostradas na Figura 3.1, as quais foram apresentadas no RP. Assim, foram calculados os fluxos médios diários de momento, calor sensível e calor latente utilizando as fórmulas bulk (Equações (4.5)). Os cálculos foram realizados utilizando a linguagem de programação Fortran 90 (Anexo I).

Para o cálculo das umidades específicas (necessárias para o cálculo do fluxo de calor latente (Equação 4.2)) a partir da umidade relativa, utilizou-se a relação:

$$UR = \frac{q}{q_s} \Rightarrow q = q_s \cdot UR \quad (5.1)$$

na qual  $q$  é a umidade específica que deseja-se calcular e  $q_s$  é a umidade específica de saturação, a qual é calculada através da pressão de saturação do vapor d'água ( $e_s$ ), da constante dos gases para o ar seco e do ar saturado ( $Rd/Rv = 0,622$ ) e da pressão à superfície ( $P = 1010 \text{ hPa}$ ) pela relação

$$q_s = 0,622 \left( \frac{e_s}{P} \right) * 1000 \quad (5.2)$$

para a qual é necessário calcular a pressão de vapor de saturação, que foi calculada pela fórmula de Tetens:

$$e_s = e_0 \exp(T_2(T - T_0)/(T - T_3)) \quad (5.3)$$

na qual  $T$  é a temperatura correspondente à superfície ou à altura de referência  $z$ , dependendo do nível de interesse em que deseja calcular a umidade específica (se for na superfície utiliza-se a TSM),  $T_0$  é a temperatura de congelamento, igual a 273,16K,  $e_0$  é a pressão de vapor de saturação a 0°C, igual a 0,611hPa,  $T_2$  e  $T_3$  são as constantes da fórmula de Tetens, sendo seus valores iguais a, respectivamente, 17,67 e 29,66 K.

Os coeficientes de transferência utilizados nas equações foram aqueles mais utilizados atualmente no meio científico e que são mais adequados à intensidade média dos ventos na região em estudo. Foram utilizados os coeficientes de arrasto determinado por Garrat (1977) e os coeficientes de calor e umidade determinados por Smith (1988) mostrados na Tabela 4.1.

Os cálculos dos fluxos foram feitos somente para os dias que haviam todas as variáveis necessárias. Por exemplo: para dias do ano que faltassem qualquer uma das quatro variáveis necessárias para o cálculo (intensidade do vento, temperatura do ar, TSM ou umidade), não eram calculados os fluxos para esse dia, ou na falta de uma dessas variáveis o ano inteiro, que ocorreu no caso da B35W, para a qual não há dados de TSM para 2003, esse ano era desconsiderado. Assim, para cada bóia há um intervalo de tempo de fluxos calculados. Os intervalos de tempo com os dados de fluxos disponíveis para cada região são mostrados na Tabela 5.1.

<b>Programas &gt;</b>	<b>PIRATA</b>		<b>OAFlex</b>	
<b>Fluxos / Locais</b>	<b>B35W</b>	<b>B23W</b>	<b>0,5N 34,5W</b>	<b>0,5N 23,5W</b>
<b>Momento</b>			Não disponível	
<b>Calor sensível</b>	Fluxos calculados de 1999 a 2002	Fluxos calculados de 1999 a 2003	Disponíveis de 1999 a 2002	
<b>Calor latente</b>			Disponíveis de 1999 a 2002	

**Tabela 5.1:** Dados de fluxos utilizados no estudo.

Com os dados de fluxos disponíveis foram calculadas médias para cada dia do ano entre os anos de dados disponíveis para cada região a fim de estabelecer uma climatologia diária de fluxos. Foram também calculados os erros estatísticos, descritos pela Equação (5.4), de cada média a partir dos desvios padrão (Equação (5.5)) e dos números de anos disponíveis  $n$  (Equação (5.6)), dos conjuntos de dados.

$$Erro = \frac{DP}{\sqrt{n}} \quad (5.4)$$

$$DP = \sqrt{Variância} \quad (5.5)$$

$$Variância = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (5.6)$$

Alguns erros aparecem com valores absurdos (~100%), nesses casos, trata-se de poucos anos de dados disponíveis para aquele dia, no qual a média pode apresentar um valor “distante” dos dados, aumentando o valor da variância (Equação (5.6)) e, conseqüentemente, aumentando o erro. Isso pode ocorrer também em períodos do ano quando há uma maior variabilidade nas variáveis, sendo difícil definir uma climatologia com poucos anos de dados. Para erros iguais a zero, trata-se de dias com apenas um ano de dados disponíveis, e, para erros pequenos, pode-se dizer que para esse dia há um maior número de dados (ano) e que há nesse período do ano uma menor variabilidade nas variáveis, obtendo assim uma média bem definida. Através da Figura 3.1 é possível observar os períodos em que houve falta de dados e que provavelmente aumentam as incertezas das médias.

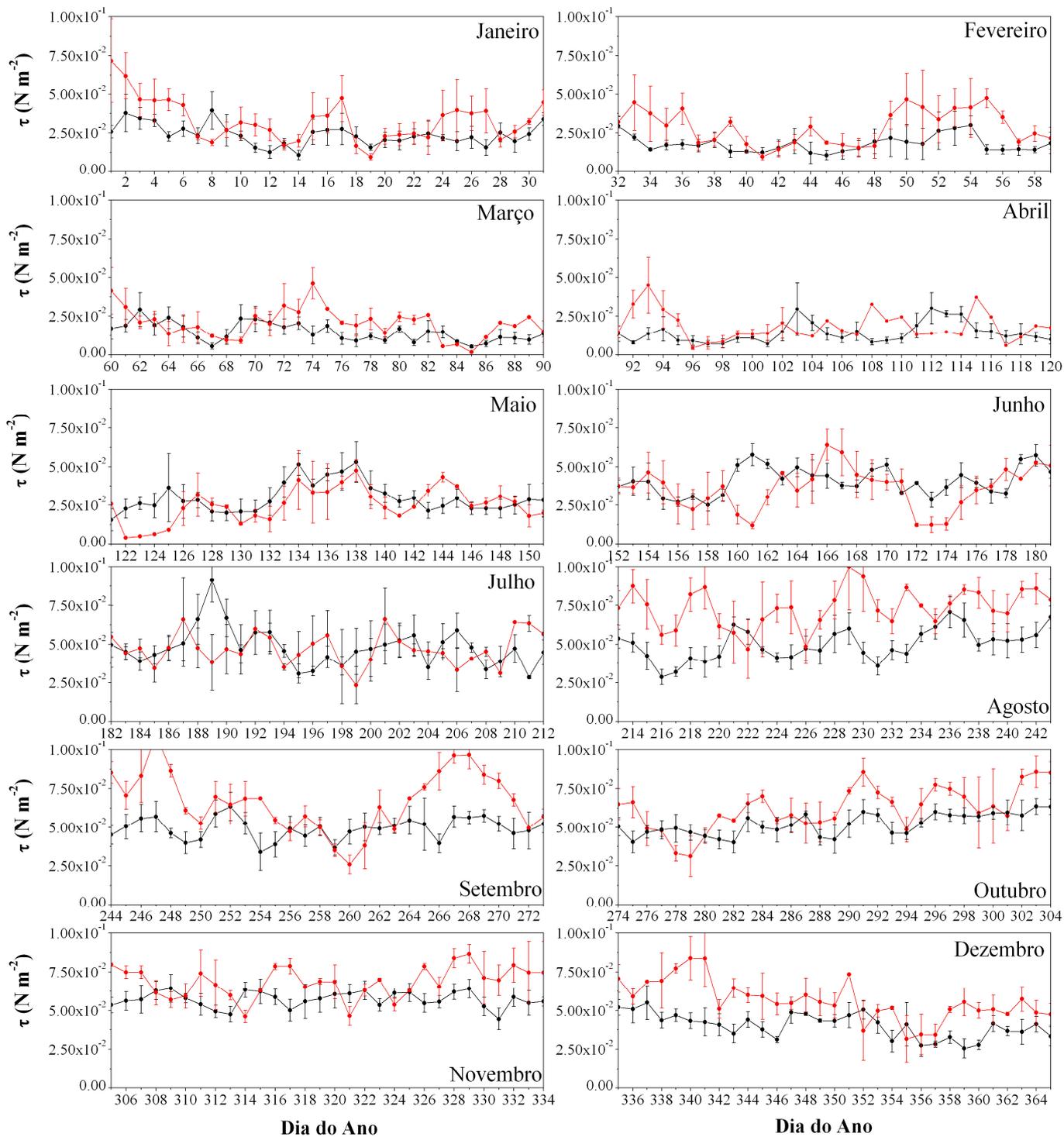
## 5.1 Climatologia dos fluxos e comparações

A seguir é apresentada a climatologia de fluxos calculados com os dados das bóias Pirata comparando-os com os dados estimados do OAFlux.

Analisando os resultados mostrados nas figuras a seguir, pode-se dizer que as climatologias dos fluxos calculados com os dados das bóias oceanográficas estão dentro do que era esperado, se baseando no estudo climatológico feito no RP, apesar da pouca representatividade de alguns períodos do ano nos quais a falta de dados dificultou a análise (março e abril para a B35W).

### 5.1.1. Fluxo de momento na B35W e B23W

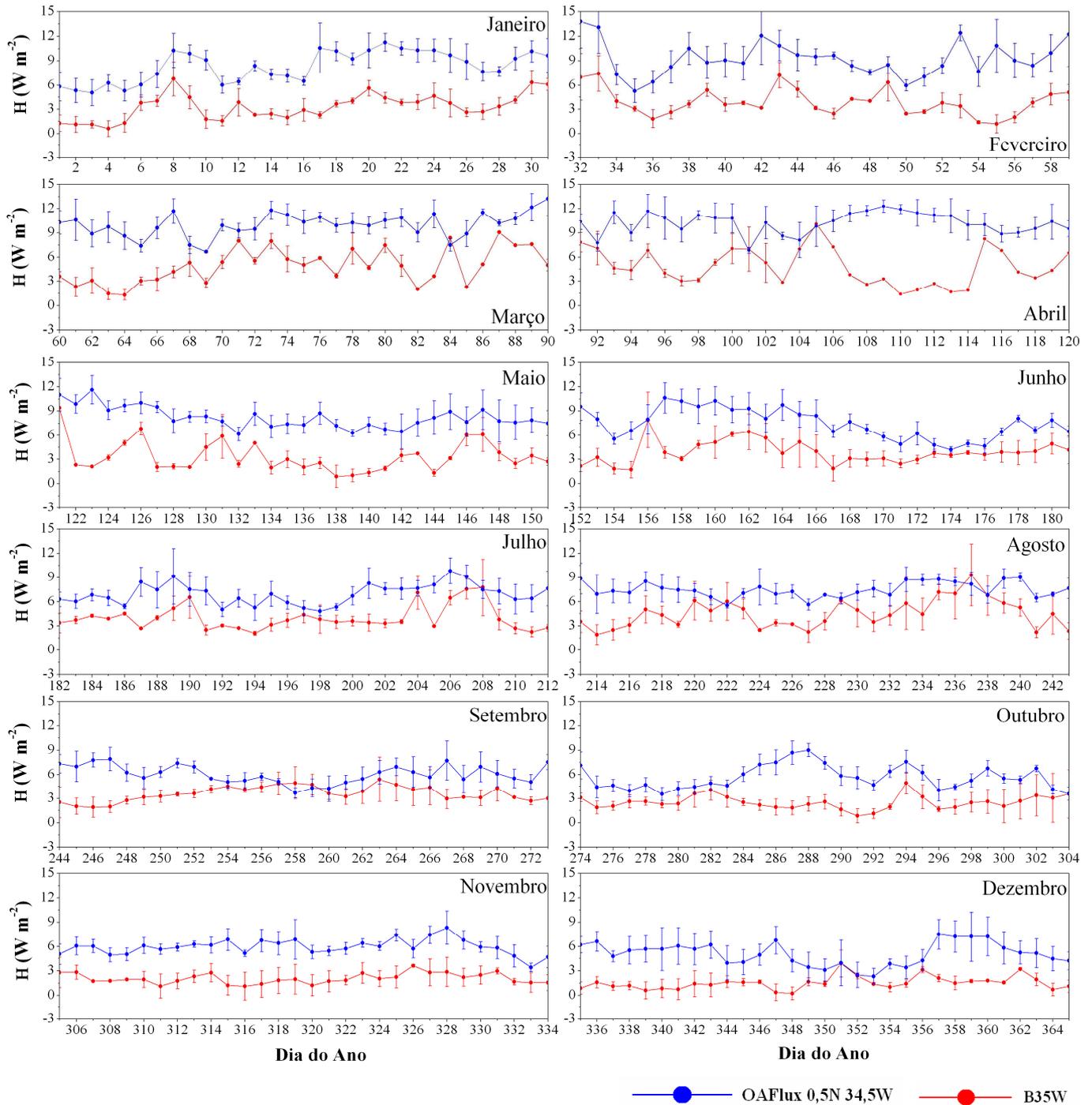
Analisando a climatologia dos fluxos de momento para ambas as bóias, na Figura 5.1.1, estes são menos intensos nos primeiros meses do ano, de janeiro a abril, aumentando de intensidade a partir de maio, tendo valores máximos entre agosto e novembro, como era de se esperar com o que foi visto no estudo da climatologia da intensidade do vento apresentado no RP. Os fluxos, para as duas bóias, apresentam valores praticamente iguais se levado em conta os erros estatísticos.



**Figura 5.1.** - Climatologia dos fluxos de momento com os dados da bóia B35W (linha vermelha) e B23W (linha preta) e os erros estatísticos, para cada dia do ano.

### 5.1.2.a. Fluxo de calor sensível na B35W e comparação com os dados do OAFlux em 0,5N 34,5W

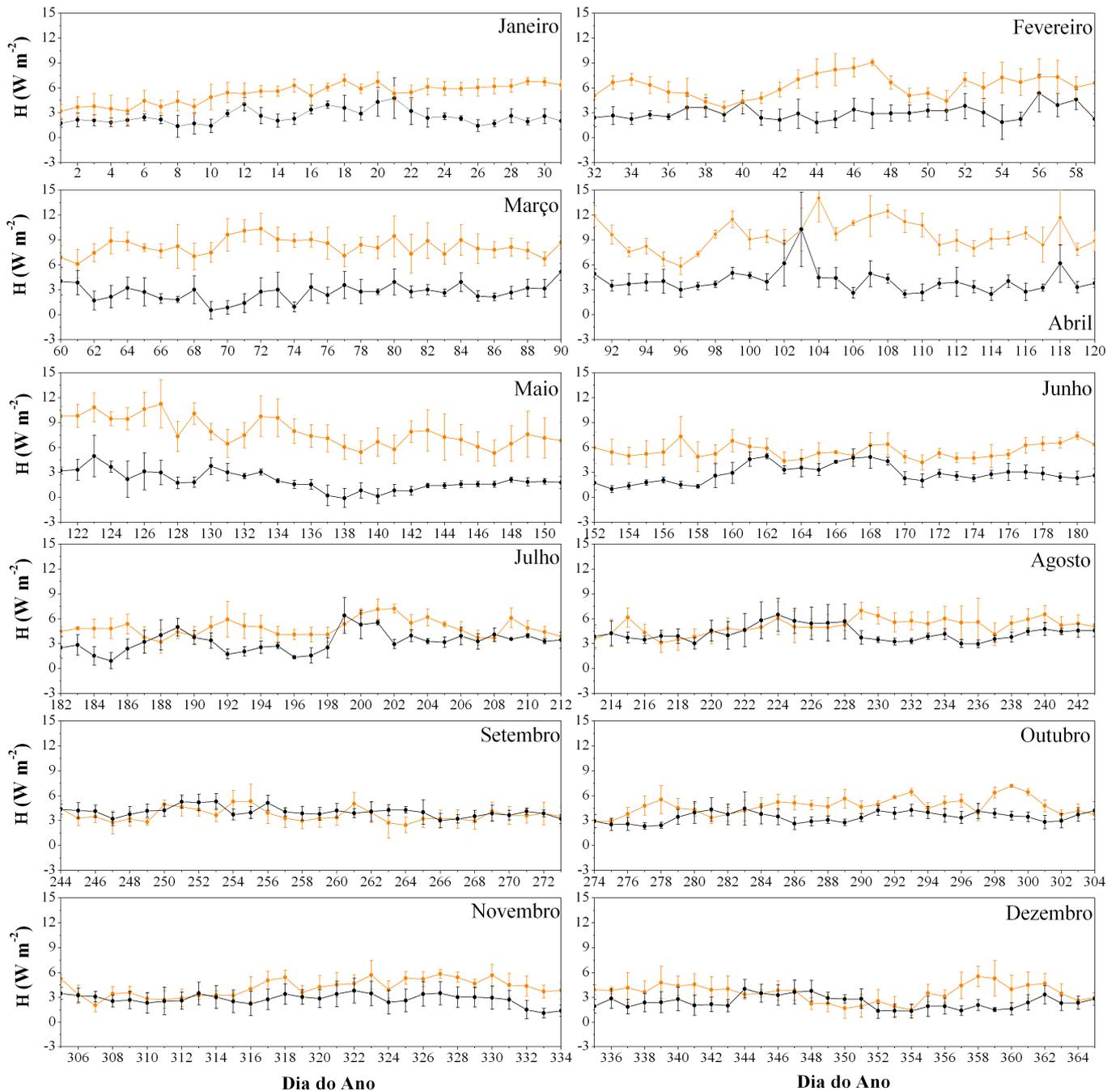
A Figura 5.1.2.a mostra que os fluxos de calor sensível variando, em média, entre 0 e  $10\text{Wm}^{-2}$  para a B35W, tendo valores maiores entre fevereiro e agosto e menores entre setembro e dezembro.



**Figura 5.1.2.a** - Climatologia de fluxos de calor sensível com os dados da B35W (linha vermelha) comparando-a com a climatologia dos dados do OAFlux obtidos próximos à bóia (linha azul). As barras representam os erros estatísticos dos dados.

### 5.1.2.b. Fluxo de calor sensível na B23W e comparação com os dados do OAFlux em 0,5N 23,5W

Analisando a Figura 5.1.2.b, os valores dos fluxos de calor sensível na bóia a 23W ficam entre 0 e  $10\text{Wm}^{-2}$ , tendo valores maiores entre fevereiro e abril e entre agosto e outubro, e menores em junho e dezembro.



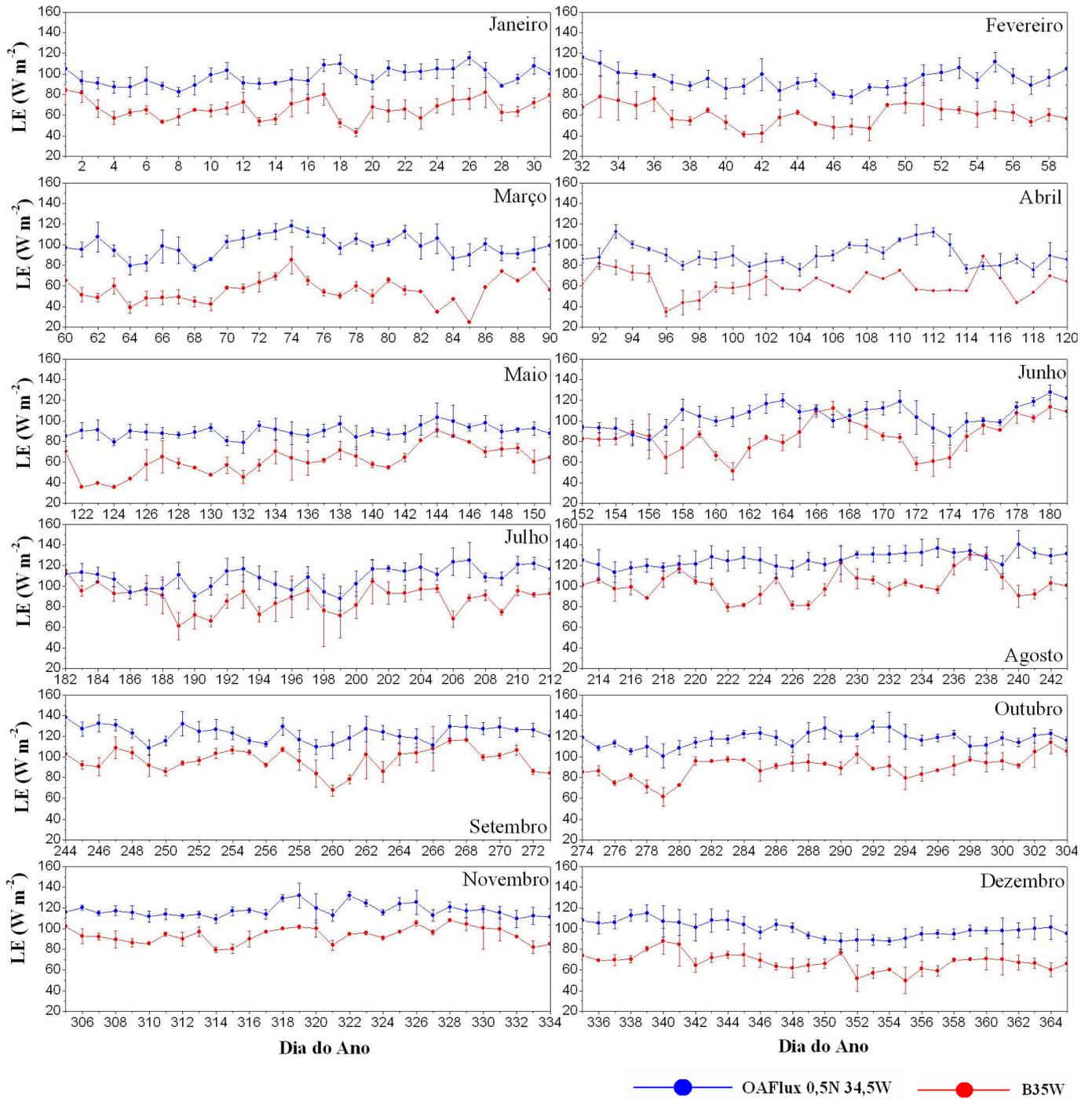
—●— OAFlux 0,5N 23,5W      —●— B23W

**Figura 5.1.2.b** - Climatologia de fluxos de calor sensível com os dados da B23W (linha preta) comparando-a com a climatologia dos dados do OAFlux obtidos próximos à bóia (linha laranja). As barras representam os erros estatísticos dos dados.

Há uma dependência térmica do fluxo devido ao gradiente de temperatura entre a superfície do mar e do ar e uma dependência mecânica devido à intensidade do vento (Equação (4.5)), tendo fluxos mais elevados quando esses dois fatores são maiores (Tabela 3.1, RP). Em geral, o fluxo de calor sensível é menor na B23W se comparado com a B35W.

### **5.1.3.a. Fluxo de calor latente na B35W e comparação com os dados do OAFlux em 0,5N 34,5W**

O fluxo de calor latente tem dependência mecânica e do gradiente de umidade entre a camada superficial oceânica e a do ar (Equação (4.5)), logo, apresentará valores maiores quando o gradiente de umidade relativa for maior e o vento mais intenso. A Figura 5.1.3.a mostra a B35W apresenta uma variação anual maior deste fluxo, tendo valores mais elevados entre junho e novembro, quando, neste período, há um decréscimo da umidade relativa e aumento da intensidade do vento.

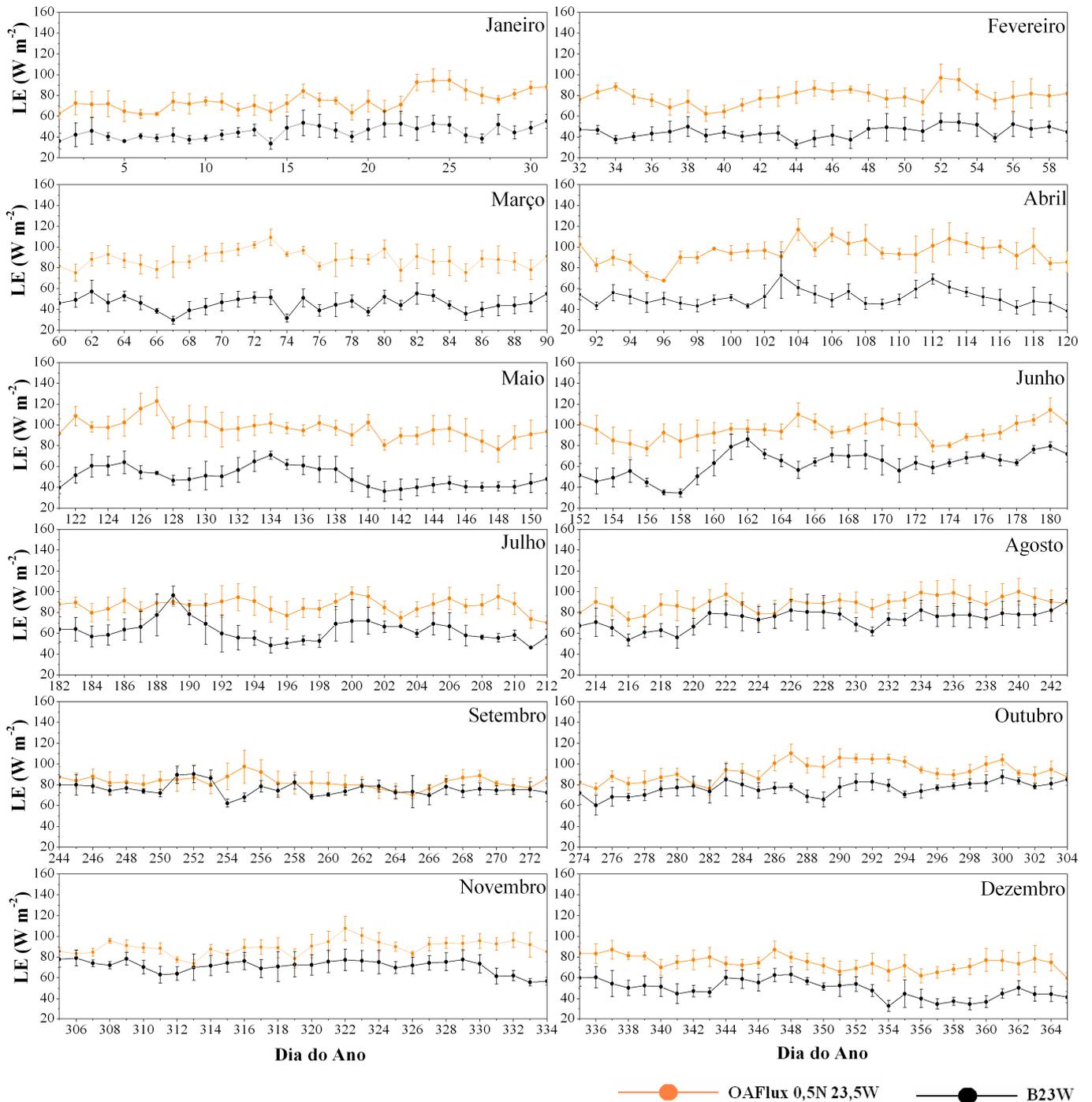


**Figura 5.1.3.a** - Climatologia de fluxos de calor latente com os dados da B35W (linha vermelha) comparando-a com a climatologia dos dados do OAFlux obtidos próximos à bóia (linha azul). As barras representam os erros estatísticos dos dados.

### 5.1.3.b. Fluxo de calor latente na B23W e comparação com os dados do OAFlux em 0,5N 23,5W

Como visto no RP, a bóia B23W não apresenta grandes variações de umidade relativa, tendo sua dependência do fluxo de calor latente principalmente da intensidade do vento. Logo, os

valores dos fluxos são maiores entre agosto e novembro, coincidindo com os valores mais elevados de intensidade do vento. A Figura 5.1.3.b mostra que o fluxo de calor latente é, em geral, maior na bóia a 35W, tendo valores entre 20 e 130Wm<sup>-2</sup>, e entre 30 e 97 W m<sup>-2</sup> na B23W.



**Figura 5.1.3.b** - Climatologia de fluxos de calor latente com os dados da B23W (linha preta) comparando-a com a climatologia dos dados do OAF flux obtidos próximos à bóia (linha laranja). As barras representam os erros estatísticos dos dados.

#### 5.1.4. Comparação entre os fluxos do OAFlux e os calculados utilizando fórmulas bulk

Quanto aos dados do OAFlux, estes, em geral, subestimam os fluxos calculados, mas apresentam praticamente as mesmas variações durante o ano, apresentando na região da bóia de 35W, valores entre 75 e 140 W m<sup>-2</sup> para o fluxo de calor latente (Figura 5.1.3.a) e entre 2 e 14W m<sup>-2</sup> para o fluxo de calor sensível (Figura 5.1.2.a). Na região da B23W, o OAFlux apresentou valores entre 60 e 123W m<sup>-2</sup> para o calor latente (Figura 5.1.3.b) e 2 e 14W m<sup>-2</sup> para o fluxo de calor sensível (Figura 5.1.2.b). As Figuras 5.1.2 e 5.1.3 mostram que a partir de junho a diferença entre os fluxos diminui para a região da B35W e é quase nula para a região da bóia B23W.

### 6. Considerações finais

Os dois métodos de estimativas de fluxos possuem suas incertezas. Como não há registro de nenhum experimento de medição direta de fluxos turbulentos que tenha sido feito na região do oceano Atlântico tropical, não é possível definir qual dos métodos é o melhor na parametrização dos fluxos turbulentos. Assim como os coeficientes de transferência turbulenta utilizados neste trabalho podem não ser os mais adequados nessa região, os dados utilizados na parametrização do OAFlux podem conter erros de calibração dos dados de satélites para a região em estudo, já que pouco se sabe sobre as características físicas dessa região, e erros dos dados gerados por modelos numéricos devido ao mesmo motivo (lembrando que o método de parametrização de fluxos do OAFlux utiliza dados de satélite, de superfície e gerados por modelos numéricos). Porém, os fluxos estimados pelos dois métodos são representativos da região do oceano Atlântico equatorial, já que em alguns períodos apresentaram valores próximos e a variação anual é semelhante.

Como afirmado anteriormente, os coeficientes de transferência utilizados nas fórmulas bulk variam com a intensidade do vento, rugosidade da superfície e a estabilidade da atmosfera. Supondo que os dados estimados pelo OAFlux estivessem corretos, seria possível afirmar que as características atmosféricas e de superfície são ideais, no período em que os valores dos fluxos dos dois projetos são próximos, para os coeficientes de transferência de calor e umidade de Smith (1989) e o coeficiente de arrasto de Garrat (1977), aqui utilizados.

Concluindo, obteve-se neste trabalho, possivelmente, o primeiro estudo de fluxo turbulentos utilizando variáveis medidas diretamente sobre o oceano Atlântico tropical. Esses dados irão auxiliar em futuros estudos do projeto FluTuA sobre a região em questão, verificando a validade dos coeficientes utilizados, os quais são considerados hoje como os mais representativos pelos grupos de estudos de interação ar-mar, assim como a validade de fluxos estimados por modelos, satélites e outras formas de parametrizações, como a do projeto OAFlux.

## 7. Referências

- Arnault S. and R.E. Cheney, 1994, Tropical Atlantic sea level variability from GEOSAT (1985-1989). *J. Geophys. Res.*, **99**, C9, 18207-18224.
- Arya, S. P.: *Introduction to micrometeorology*.
- Binet D. and J. Servain, 1993: Have the recent hydrological changes in the Northern Gulf of Guinea induced the *Sardinella aurita* outburst?, *Oceanologica Acta*, 16, 247-260. Bjerknes J., 1964, Atlantic air-sea interaction. *Advances in Geophysics*, **10** (1), 1-82.
- Cane, M. A., S. E. Zebiak, and S. C. Dolan, 1986: Experimental forecasts of El Niño, *Nature*, **321**, 827-832.
- Chen, D., S. E. Zebiak, A. J. Busalacchi and M. A. Cane, 1995: An improved procedure for El Niño forecasting: implications for predictability, *Science*, **269**, 1699-1702.
- Citeau, J.; Berges, J.; Demarcq, H.; Mahé G., 1988. The watch of ITCZ migrations over tropical Atlantic as an indicator in drought forecast over Sahelian area. *Ocean-Atmosphere Newsletter*. **45**:1-3.
- Delecluse P., J. Servain, C. Levy, K. Arpe, L. Bengtsson, 1994: On the connection between the 1984 Atlantic warm event and the 1982-83 ENSO. *Tellus*, **46A**, 448-464.
- Fairall, C. W., E.F. Bradley, D.P. Rogers, J.B. Edson and G.S. Young, 1996, Bulk parameterization of air-sea fluxes for Tropical Ocean-Global Atmosphere Coupled-Ocean Atmosphere Response Experiment. *J. Geophys. Res.*, **101**, 3747-3764.
- Garratt, J.R., 1977: Review of Drag Coefficients over Oceans and Continents, *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 915-929.
- Geernaert, G.L., 1990: Bulk parameterization for the wind stress and heat fluxes. *Surface Waves and Fluxes*, **1**, 91-172.
- Hastenrath S. and L. Heller, 1977: Dynamics of climate hazards in northeast Brazil. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, **103**, 77-92.
- Merle J., 1980: Seasonal heat budget in the equatorial Atlantic. *J. Phys. Oceanogr.*, **10**, 464-469.
- Merle J., M. Fieux, P. Hisard, 1979: Annual signal and interannual anomalies of Sea Surface Temperature in the eastern equatorial Atlantic. *Gate Sup II, Deep Sea Res.*, **26**, 77-101.
- Moura A.D. and J. Shukla, 1981: On the dynamics of droughts in northeast Brazil: observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, **38**, 2653-2675.
- Nobre, C. A. e Molion, 1986: *Climanálise Especial. Edição Comemorativa de 10 anos*.
- Panofsky, H.A. and J.A. Dutton, 1984: *Atmospheric Turbulence*. 397pp, Wiley-Interscience, Nova York.
- Philander S.G.H., 1979: Variability of the tropical oceans. *Dyn. Atm. Ocean*, **3**, 191-208.
- Reverdin G. and Y. du Penhoat, 1987: Modeled surface dynamic height in 1964-1984: an effort to assess how well the low frequencies in the equatorial Atlantic were sampled in 1982-1984. *J. Geophys. Res.*, **92**, 1899-1913.
- Servain J., 1991: Simple climatic indices for the tropical Atlantic ocean and some applications. *J. Geophys. Res.*, **96**, 15137-15146.
- Servain J., J. Picaut, A.J. Busalacchi, 1985: Interannual and seasonal variability of the tropical Atlantic ocean depicted by 16 years of sea surface temperature and wind stress. *Coupled ocean-atmosphere models, J.C.J. Nihoul ed., Elsevier*, 211-235.
- Servain J. and D.M. Legler, 1986: Empirical orthogonal function analysis of tropical Atlantic sea surface temperature and wind stress: 1964-1979. *J. Geophys. Res.*, **91**, 14181-14191.
- Smith D.S., 1988: Water vapor flux at the sea surface. *Boudary – Layer Meteorology*, **47**, 277-293

- Smith D.S., 1988: Coefficients for sea surface wind stress, heat flux, and wind profiles as a function of wind speed and temperature. *J. Geophys. Res.*, **93**, 15467-15472.
- Soares, J.; A.P. Oliveira, J. Servain and S. A. Bacellar, 2004: Resultados preliminares do balanço de energia sobre o oceano Atlântico tropical (PROJETO FluTuA). In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2004, Fortaleza, Ceará.. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia. CD.
- Vianna M., G.H.J. Pedras and J. Servain, 1996: Climatic driving and prediction of spiny lobster catches in Northeast Brazil. Submetido a *Oceanologica Acta*.
- Wainer, I. and J. Soares, 1997: North Northeast Brazil rainfall and its decadal - scale relationship to wind stress and sea surface temperature. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 277-280.
- 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).

## **8. Outras atividades**

A seguir são mostradas outras atividades acadêmicas realizadas durante a segunda metade da vigência da bolsa PIBIC, primeiro semestre de 2006.

### **8.1. Disciplinas cursadas**

- Climatologia II
- Micrometeorologia
- Tópicos da Matemática Aplicada II (Equações Diferenciais Parciais)
- Dinâmica da Meteorologia II
- Meteorologia Sinótica

### **8.2 Participação em evento**

Participação no Simpósio de Iniciação Científica do IAG/USP – 2006, com apresentação do trabalho em painel (Anexo II).