

# Estudo do balanço de energia na interface ar-mar do oceano Atlântico tropical

*Lívia Dutra e Jacyra Soares*

Inst. de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, Bra.  
[livia.dutra@uol.com.br](mailto:livia.dutra@uol.com.br) , [jacyra@usp.br](mailto:jacyra@usp.br)

**RESUMO:** O objetivo principal deste trabalho de pesquisa consiste em caracterizar os parâmetros radiométricos da atmosfera e do oceano na região do arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP), localizado em mar aberto no oceano Atlântico tropical. O trabalho está vinculado ao projeto FluTuA (Fluxos Turbulentos sobre o Atlântico), que utiliza uma torre micrometeorológica de dez metros de altura instalada no ASPSP, com o objetivo investigar a interação oceano-atmosfera através da determinação observacional de parâmetros meteorológicos no oceano Atlântico tropical. Neste trabalho, utilizaram-se dados disponíveis na internet medidos *in situ* e dados de programas de pesquisa que estimam variáveis utilizando diferentes algoritmos. Através da análise da evolução temporal da onda curta incidente, foi possível verificar os dias de céu claro (sem nuvens) ocorridos na região de estudo, para todo o período de dados disponível. A radiação incidente no topo da atmosfera (TOA) também foi calculada, para auxiliar a análise. Estimou-se inclusive o balanço de radiação e o resíduo do balanço de energia para a região do arquipélago.

**ABSTRACT:** Study of the energy balance at the air-sea interface of the Tropical Atlantic Ocean. The main goal of this work is to characterize the radiometric parameters of the atmosphere and of the ocean in the Archipelago of São Pedro e São Paulo (ASPSP) region, located in the tropical Atlantic Ocean. This work is connected to the FluTuA (Fluxos Turbulentos sobre o Atlântico) project, that uses a ten meter micrometeorological tower installed at the ASPSP, to investigate the ocean-atmosphere interaction through the observation of meteorological parameters in the Tropical Atlantic Ocean. This work used internet available data measured *in situ* and data of programs of research that estimate variables using different algorithms. Through the analysis of the temporal evolution of the incident short wave, it was possible to verify the clear sky days (without clouds) occurred at the study region for the data period available. The incident radiation at the top of the atmosphere (TOA) was also calculated in order to aid the analysis. The radiation balance and the residue of the energy balance were also estimated for the Archipelago region.

**Palavras-Chave:** balanço de energia, balanço de radiação, ASPSP, oceano Atlântico.

## 1. INTRODUÇÃO

Estudos sobre mudanças climáticas levantaram o problema da pouca informação existente sobre a interação ar-mar em micro escala. As discrepâncias entre os resultados de modelos numéricos climáticos são conhecidas em todo o mundo e são particularmente importantes sobre as regiões tropicais e subtropicais do oceano Atlântico no hemisfério do sul. Nessa região, os modelos climáticos divergem sobre a intensidade das componentes do balanço de radiação (WGASF, 2000). Para avaliar a incerteza dos valores climáticos e melhorar o conhecimento da climatologia da interação oceano-atmosfera é necessário dados de medidas *in situ*. Entretanto, praticamente não há medidas *in situ* sobre o oceano Atlântico tropical em mar aberto, mas há resultados de modelos numéricos e de satélites sobre a região em estudo.

Devido a essa 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 (Wainer *et al.*, 2003).

Além de mudanças climáticas, o conhecimento do balanço de energia na interface ar-mar é importante para estudos diagnósticos e prognósticos aplicados à previsão numérica, às atividades de monitoramento ambiental que utilizam modelos operacionais de dispersão de poluentes atmosféricos e oceânicos, estudos oceanográficos, estudos dos ciclos biogeoquímicos, modelos de previsão de onda, engenharia marinha, etc.

De acordo com MacWhorter e Weller (1991) medidas de radiação solar sobre o oceano, realizadas em navios ou bóias, contém muitos erros devido ao movimento da plataforma.

Este projeto pretende investigar o balanço de radiação e as propriedades radiométricas sobre o oceano Atlântico tropical, usando observações disponíveis em bancos de dados meteorológicos na internet. Posteriormente, esses dados poderão ser comparados aos dados obtidos observacionalmente, no âmbito do projeto FluTuA (Fluxos Turbulentos sobre o Atlântico).

## 2. METODOLOGIA

Inicialmente realizou-se um levantamento bibliográfico relativo à região do ASPSP, o que possibilitou um melhor conhecimento da região de estudo. Utilizou-se dados disponíveis na internet, obtidos por bóias oceanográficas do PIRATA (Pilot Research Moored Array in the Tropical Atlantic; Servain *et al.*, 1998). O PIRATA é um 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 espalhadas pelo oceano Atlântico tropical. Para este trabalho, foram escolhidas as bóias situadas em (0°N, 23°W) (B23W) e em (0°N, 35°W) (B35W), por serem as mais próximas ao ASPSP, estando a respectivamente 720 e 635 quilômetros aproximados de distância.

A Tabela 1 resume os dados PIRATA utilizados neste trabalho.

Tabela 1: Dados e suas respectivas fontes utilizadas no trabalho.

Parâmetro	Símbolo	Posição geográfica	Período	Resolução
Onda curta incidente	O C↓	(0°N, 23°W) (0°N, 35°W)	1999 - 2007 1998 - 2007	2 minutos
Onda longa emitida pela atmosfera	O L↓	(0°N, 23°W)	2006 - 2008	2 minutos
Temperatura da superfície do mar	TSM	(0°N, 23°W) (0°N, 35°W)	1999 - 2006 1998 - 2002	10 minutos

O albedo da região foi estimado baseado na expressão de Fresnel (expressão 1), proposta por Cogley (1979) e válida para dias de céu claro.

$$\alpha_{teórico} = 0,50 \left[ \frac{\text{sen}^2(z-r)}{\text{sen}^2(z+r)} + \frac{\tan^2(z-r)}{\tan^2(z+r)} \right] \quad (1)$$

onde  $z$  é o ângulo zenital solar e  $r$  é o ângulo de refração da luz na água, dado por:

$$r = \arcsen \left[ \frac{\text{sen}(z)}{n} \right] \quad (2)$$

onde  $n$  é o índice de refração da água do mar, igual a 1,33 (Cogley, 1979).

A onda curta refletida pela superfície do mar ( $OC\uparrow$ ) foi calculada a partir do albedo teórico (expressão 3), e a onda longa emitida pela superfície ( $OL\uparrow$ ) foi estimada pela TSM, pela lei de Stefan-Boltzmann (expressão 4).

$$OC\uparrow = -\alpha_{teórico} OC\downarrow \quad (3)$$

$$OL\uparrow = \varepsilon \sigma TSM^4 \quad (4)$$

onde  $\varepsilon$  é a emissividade, adotada como sendo 0,97 (Soares *et al.*, 2004) e  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ kg s}^{-3} \text{ K}^{-4}$ ).

O balanço de radiação ( $R_n$ ) foi obtido, pela soma das componentes de onda curta e onda longa (expressão 5):

$$R_n = OC\downarrow + OC\uparrow + OL\downarrow + OL\uparrow \quad (5)$$

Obteve-se a quantidade de calor armazenado/perdido pelo oceano como resíduo do balanço de energia, pela soma do balanço de radiação e dos fluxos de calor sensível ( $H$ ) e latente ( $LE$ ) (expressão 6). Os fluxos foram obtidos de um estudo anterior das autoras do trabalho (Dutra e Soares, 2008), em que foi realizada a caracterização dos fluxos não radiativos na região do arquipélago.

$$resíduo = R_n + H + LE \quad (6)$$

Calculou-se também a radiação solar incidente no TOA (expressão 7). Este cálculo auxilia a posterior identificação dos dias de céu claro, além de possibilitar o cálculo da transmissividade atmosférica.

$$I_0 = S_0 \left( \frac{d_m}{d} \right)^2 \cos z \quad (7)$$

onde  $S_0$  é a constante solar média ( $1366 \text{ W m}^{-2}$ ), e  $d_m$  e  $d$  são respectivamente as distâncias média e real entre o Sol e a Terra.

Uma forma de verificar os dias de céu claro (DCC) é através da análise da evolução temporal da  $OC\downarrow$  medida pelos sensores. Em um DDC, esta evolução é praticamente contínua e não apresenta variações abruptas em sua intensidade. Já em um dia nublado, a intensidade de onda curta incidente na superfície medida no sensor é menor (já que as nuvens presentes na atmosfera refletem parte da radiação incidente), e nota-se variações significativas em sua evolução diária. Para verificar quantos e quais foram os DCC que ocorreram na região das bóias PIRATA durante todo o período de dados disponível, desenvolveu-se um programa em Shell script, que lê os arquivos de dados e plota automaticamente a evolução da  $OC\downarrow$  medida na superfície das bóias e da  $OC\downarrow$  que chega no TOA (calculada pela expressão 1). O programa foi feito de forma a gerar um arquivo diferente para cada dia. Com a análise visual de cada figura gerada, foi possível identificar os DCC.

### 3. RESULTADOS

A fim de verificar a evolução diária dos parâmetros estudados ao longo do ano, elaborou-se um programa em Fortran que calcula as médias das variáveis em cada hora do dia, para cada mês do ano. Primeiramente calculou-se a média horária (já que os dados possuem resolução de 2 e 10 minutos). Os resultados finais foram interpolados no programa SURFER, caracterizando a evolução média horária das variáveis para cada mês do ano.

A Figura 1 ilustra a evolução média horária mensal do balanço de radiação e do calor armazenado/liberado pelo oceano, para a região da bóia B23W. Na Figura 1b valores negativos indicam que o oceano está ganhando calor e valores positivos que o oceano está perdendo calor.

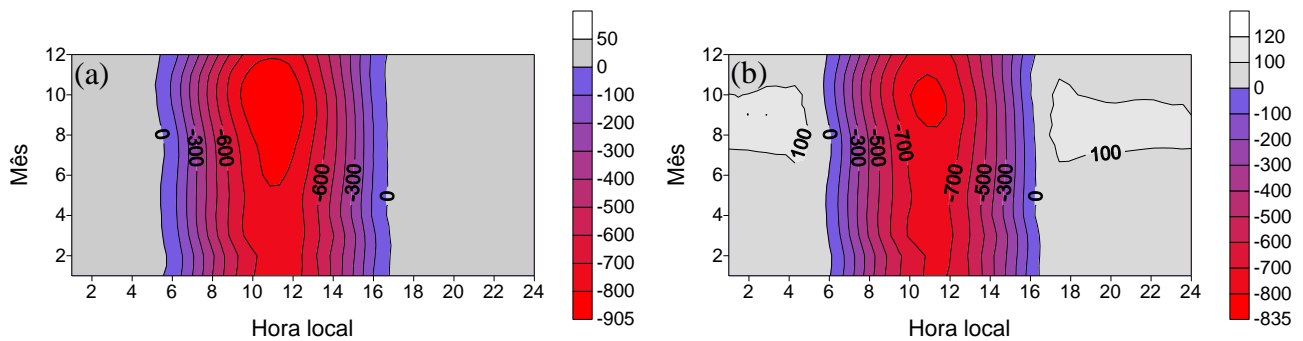


Figura 1: Evolução média horária mensal (a) do balanço de radiação e (b) da quantidade calor armazenada/liberada pelo oceano, para a região da bóia PIRATA em (0°N, 23°W).

Na Figura 2 segue a evolução média horária mensal do albedo teórico e da transmissividade observada, para a região da bóia B23W.

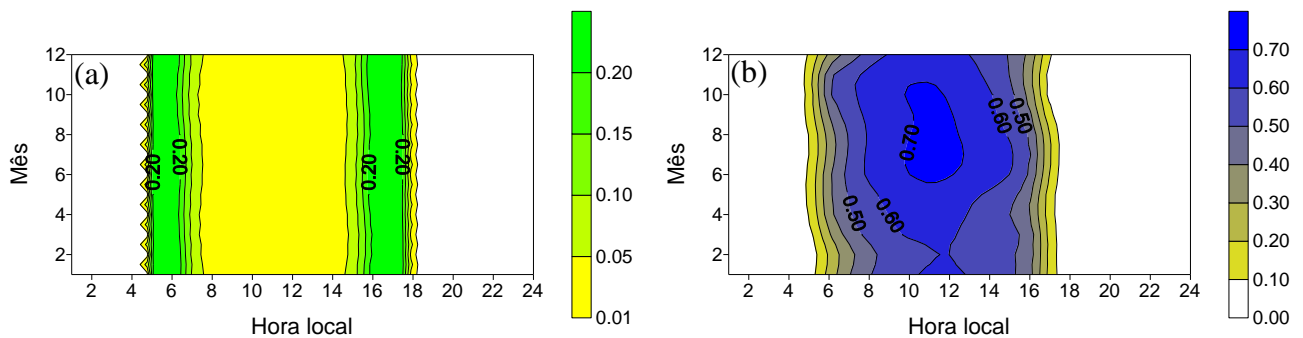


Figura 2: Evolução média horária mensal (a) do albedo teórico e (b) da transmissividade observada, para a região da bóia PIRATA em (0°N, 23°W).

Nos histogramas da Figura 3, observa-se a frequência dos dias de céu claro em cada mês do ano, para a região das duas bóias PIRATA.

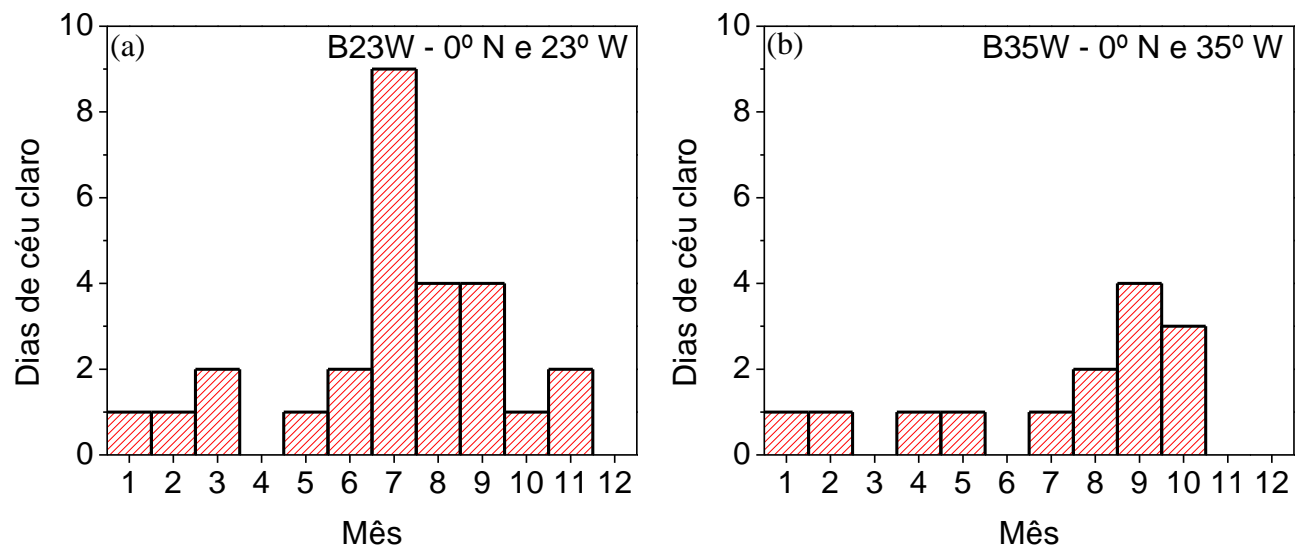


Figura 3: Histograma da freqüência de dias de céu claro, para a região das bóias (a) B23W e (b) B35W do PIRATA. A análise foi feita com todo o período disponível de medidas.

#### 4. CONCLUSÕES

Na evolução média de  $R_n$  (Figura 1a), verifica-se picos de até  $-900 \text{ W m}^{-2}$  em horários próximos ao meio dia (hora local), entre os meses de julho a outubro. Os valores positivos durante a noite indicam que o oceano está emitindo  $OL\uparrow$ , mas esses valores positivos não ultrapassam  $50 \text{ W m}^{-2}$  para a região da bóia B23W.

Na análise do calor armazenado pelo oceano (Figura 1b), observam-se picos de calor armazenado pelo oceano de até  $-835 \text{ W m}^{-2}$  durante o dia e, à noite, de calor perdido pelo oceano de até  $120 \text{ W m}^{-2}$ , no segundo semestre do ano, entre os meses de julho a outubro.

Valores maiores de albedo ocorrem nos horários em que o Sol está mais próximo ao horizonte (quando o ângulo zenital é maior, Figura 2a). Para ângulos zenitais de até  $40^\circ$ , o albedo teórico é em média 0,02, e observa-se que o albedo estimado não apresenta variações médias significativas ao longo do ano. É importante lembrar que a expressão teórica só é válida para dias de céu claro, o que é muito raro de se observar na região de estudo.

Nota-se que a transmissividade é maior no segundo semestre do ano (Figura 2b), uma vez que a  $OC\downarrow$  durante este período também é maior. Verifica-se que a fração de radiação transmitida é menor nos instantes em que o Sol está perto do horizonte, e os máximos ocorrem por volta do meio dia local.

Conclui-se que DCC são pouco frequentes na região estudada (Figura 3), não chegando a representar 1% do total. Os meses que mais apresentaram DCC foram julho e setembro, respectivamente para as bóias B23W e B35W, e o mês de dezembro não apresentou nenhum dia claro, em todo o período analisado de ambas as bóias. Observa-se também que em ambas as regiões, o segundo semestre do ano (julho a dezembro) apresentou mais DCC que o primeiro semestre (janeiro a junho). Um estudo anterior (Skielka, 2006) verificou que a precipitação na região das bóias é maior no primeiro semestre do ano, quando a Zona de Convergência Inter Tropical (ZCIT) encontra-se em sua posição mais ao Sul.

**AGRADECIMENTOS:** As autoras gostariam de agradecer ao CNPq e à FAPESP pelo auxílio e apoio ao projeto FluTuA.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- COGLEY JG. 1979. The albedo of water as a function of latitude. *Monthly Weather Review* 107: 775 – 781.
- DUTRA L.M.M. e SOARES J., 2008: Estimativa dos fluxos turbulentos verticais de calor na superfície do oceano Atlântico. In: XV Congresso Brasileiro de Meteorologia, São Paulo, São Paulo. Anais do XV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Em CD.
- MACWHORTER, M. A. e R. A. WELLER, 1991: Error in Measurements of Incoming Shortwave Radiation Made from Ships and Buoys. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 8, 108-117.
- SERVAIN, J., BUSALACCHI, A. J., McPHADEN, M. J., MOURA, A. D., REVERDIN, G., VIANNA, M., ZEBIAK, S.E., 1998: A Pilot Research Moored Array in the Tropical Atlantic (PIRATA). *The Bulletin of American Meteorological Society*, 79, 2019–2031.
- SOARES J., OLIVEIRA A.P., SERVAIN J. e BACELLAR S.A., 2004: Resultados preliminares do balanço de energia sobre o oceano Atlântico tropical (PROJETO FluTuA); In: XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Fortaleza, Ceará. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Em CD.
- WAINER, I., G.CLAUZET, J.SERVAIN, J.SOARES, 2003: Time Scales of Upper Ocean temperature Variability Inferred from the PIRATA data (1997-2000). *Geophysical Research Letters*. 30 (5), 8004.
- 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).