

RESULTADOS PRELIMINARES DO BALANÇO DE ENERGIA SOBRE O OCEANO ATLÂNTICO TROPICAL (PROJETO FluTuA)

Jacyra Soares¹, Amauri Pereira de Oliveira¹, Jacques Servain² e
Sarasvati de Araújo Bacellar¹

Resumo: A campanha de medidas observacionais, ocorrida entre 15 e 24 de maio de 2002, como parte do projeto FluTuA (Fluxos Turbulentos sobre o Atlântico) é descrita aqui. Durante 10 dias foram realizadas medidas de (i) fluxos de radiação solar (da atmosfera para a superfície e da superfície para a atmosfera) e fluxos de radiação de onda longa (emissão da superfície e da atmosfera), a 6 metros de altura; (ii) temperatura do ar, umidade relativa e componentes horizontais do vento, a 11 metros de altura e (iii) temperatura da superfície do mar. Essas observações foram realizadas a bordo do Navio da Marinha do Brasil (*Comte. Manhães*), entre Natal (6°S, 35.2°W) e Arquipélago de São Pedro e São Paulo (1°N, 29.3°W). Esses dados foram usados para estimar as componentes de energia turbulenta, sobre a superfície oceânica. Também é feita uma validação e caracterização espacial preliminar dos dados coletados durante a campanha observacional usando os dados coletados nas bóias PIRATA.

Palavras-chave: FluTuA, Balanço de energia, Oceano Atlântico tropical e Interação ar-mar.

Abstract: The observational campaign carried out on May 15-24, 2002, as part of the FluTuA Program, is described here. During 10 days, 5 minute averaged measurements of (i) solar radiation fluxes (incoming and outgoing) and long wave radiation fluxes (atmospheric and surface emission), at 6 m above the sea level; (ii) air temperature, relative humidity and horizontal wind components, at 11 m and (c) sea surface temperature were gathered continuously. These observations were carried out on board of the Brazilian Navy Ship (*Comte. Manhães*), between Natal (6°S, 35.2°W) and Archipelago de São Pedro e São Paulo (1°N, 29.3°W). The data was used to estimate the turbulent energy components at the surface of the ocean. A preliminary characterization and spatial validation of the observed data are also performed here using the data collected by the PIRATA buoys.

Key words: FluTuA, Energy balance, Tropical Atlantic Ocean, Air-sea interaction.

¹ Departamento de Ciências Atmosféricas, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo. Rua do Matão, 1226, São Paulo, 05508-900, SP, Brasil. Tel: (11) 3091-4711, FAX: (11) 3091-4714. (jacyra@usp.br)

² FUNCEME, Av. Rui Barbosa, 1246, Aldeota, Fortaleza, 60115-221, CE, Brasil. (servain@funceme.br)

INTRODUÇÃO

Os fluxos turbulentos de superfície acoplam os processos que ocorrem entre o oceano e a atmosfera, sendo crucial o conhecimento desses fluxos para o entendimento da interação oceano-atmosfera. A descrição quantitativa da troca de energia na interface oceano-atmosfera é importante para estudos de processos físicos e para o desenvolvimento de modelos oceânicos e atmosféricos de diferentes escalas espacial e temporal.

A campanha de medidas observacionais, ocorrida entre 15 e 24 de maio de 2002, como parte do projeto FluTuA (Soares *et al.*, 2001) é descrita aqui. As observações foram realizadas a bordo do navio da Marinha do Brasil, entre Natal (6°S , 35.2°W) e Arquipélago de São Pedro e São Paulo (1°N , 29.3°W). A trajetória descrita pelo navio está esquematizada na Figura 1.

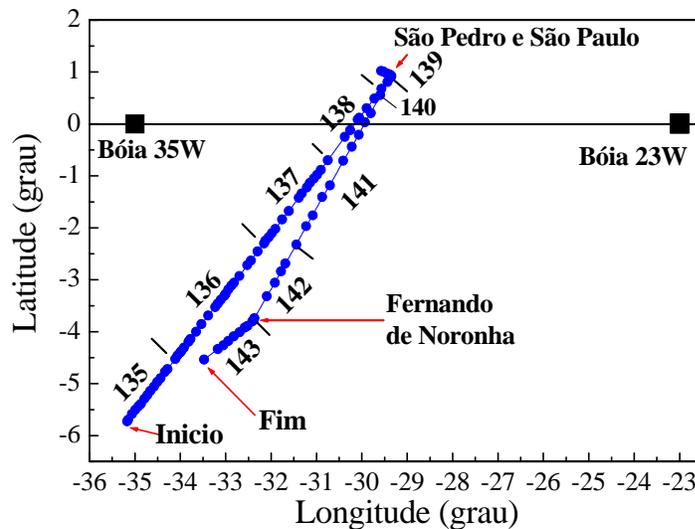


Figura 1: Trajetória descrita pelo navio durante a campanha observacional, ocorrida entre 15 de maio (dia do ano 135) às 0940 HL e 23 de maio (dia do ano 143) às 1721 HL de 2002. As posições das bóias PIRATA estão representadas por quadrados ao longo do equador. Os números indicam os dias do ano.

Esses dados foram usados para validar expressões empíricas comumente usadas para estimar as componentes de energia turbulenta, sobre a superfície oceânica. Também é discutida uma caracterização preliminar da interação ar-mar no Oceano Atlântico Tropical, através da comparação dos dados obtidos a bordo do navio com os dados coletados pelas bóias PIRATA (Servain, *et al.*, 1998).

CAMPANHA OBSERVACIONAL

Durante a campanha observacional o navio foi equipado com (i) dois anemômetros orientados na direção paralela e perpendicular ao navio, na altura de 11 metros acima da superfície do mar; (ii) sensores de temperatura e umidade do ar, a 11 metros de altura; (iii) sensores de radiação, a cerca de 1 metro do navio e 6 metros acima do nível do mar e (iv) sensor de temperatura da água, a cerca de 1 metro de profundidade.

Os dados observacionais e as estimativas dos fluxos de energia serão apresentados a seguir. A título de exemplo, serão discutidos os resultados obtidos para um dia de céu claro, dia 16 de maio de 2002 (dia do ano 136).

Balço de radiação

A seguir será descrito o balanço de radiação realizado usando as medidas obtidas durante a campanha observacional e algumas estimativas teóricas. Maiores detalhes sobre o balanço de radiação podem ser encontrados em Bacellar *et al.* (2004).

Radiação de onda curta

A radiação solar no topo da atmosfera (Figura 2a) foi estimada usando:

$$I_0 = S_0 (d_m / d)^2 \cos \gamma \quad (1)$$

onde, d_m é a distância média entre o Sol e a Terra, d é a distância real entre o Sol e a Terra e γ é o ângulo zenital.

A radiação solar que chega a superfície (Figura 2a) foi parametrizada como:

$$OC_{DW} = -I_0 T_R \quad (2)$$

Verifica-se através da Figura 2a que há uma boa concordância entre os valores de onda curta emitida pela atmosfera observado e estimado. A onda curta refletida pela superfície observada,

entretanto, apresenta valores superiores que a estimada, devido provavelmente à reflexão do casco do navio (Figura 2b).

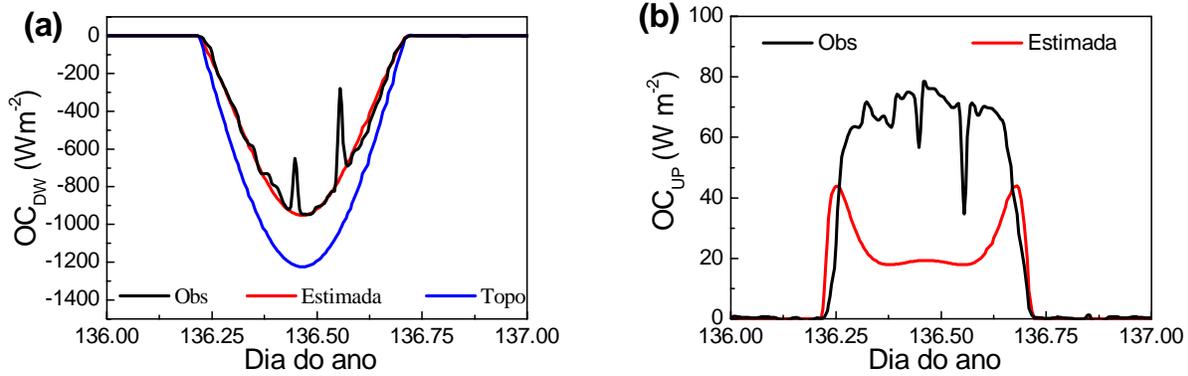


Figura 2: Radiação de onda curta (a) incidente na superfície (observada e estimada) e no topo da atmosfera e (b) refletida pela superfície (observada e estimada).

A transmissividade atmosférica integrada em todos os comprimentos de onda (Figura 3) foi parametrizada de uma forma bastante simples (Bacellar *et al.*, 2004):

$$T_R = 0.5 + 0.3 \cos \gamma \quad (3)$$

Nota-se a excelente concordância entre os valores observados e estimados da transmissividade atmosférica (Figura 3a).

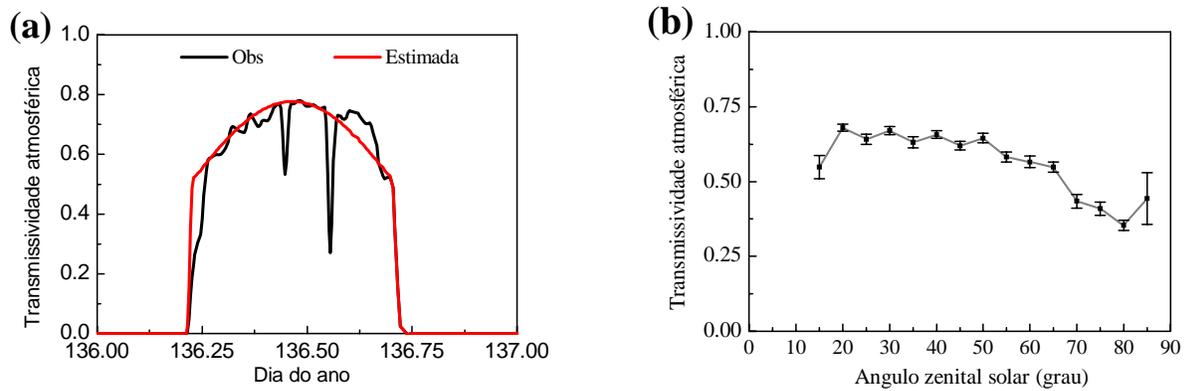


Figura 3: (a) Transmissividade atmosférica em função do tempo, para o dia 136 e (b) transmissividade média atmosférica em função do ângulo zenital, para todo o experimento. As barras verticais indicam os erros estatísticos.

A radiação solar emitida pela superfície (Figura 2b) foi estimada como:

$$OC_{UP} = -\alpha OC_{DW} \quad (4)$$

onde, α é o albedo da superfície (Figura 4). Para evitar valores incorretos de albedos (muito altos) para elevações solares muito baixas, foram calculados valores médios da razão entre as radiações de onda curta emitida e incidente na superfície. O valor do albedo médio obtido, para ângulos zenitais baixos, é de cerca de 0.06 (Figura 4). Esse valor é compatível com o albedo obtido por Payne (1972) para condições de ventos calmos e mar relativamente liso. O algoritmo de cálculo de fluxo do COARE utiliza um albedo de 0.058 (WGASF, 2000).

O albedo também pode ser estimado baseado na expressão de Fresnel (Figura 4), proposta por Cogley (1979):

$$\alpha = 0.5 \left[\frac{\sin^2(\gamma - r)}{\sin^2(\gamma + r)} + \frac{\tan^2(\gamma - r)}{\tan^2(\gamma + r)} \right] \quad (5)$$

onde $r = \sin^{-1}[(\sin \gamma)/1.33]$.

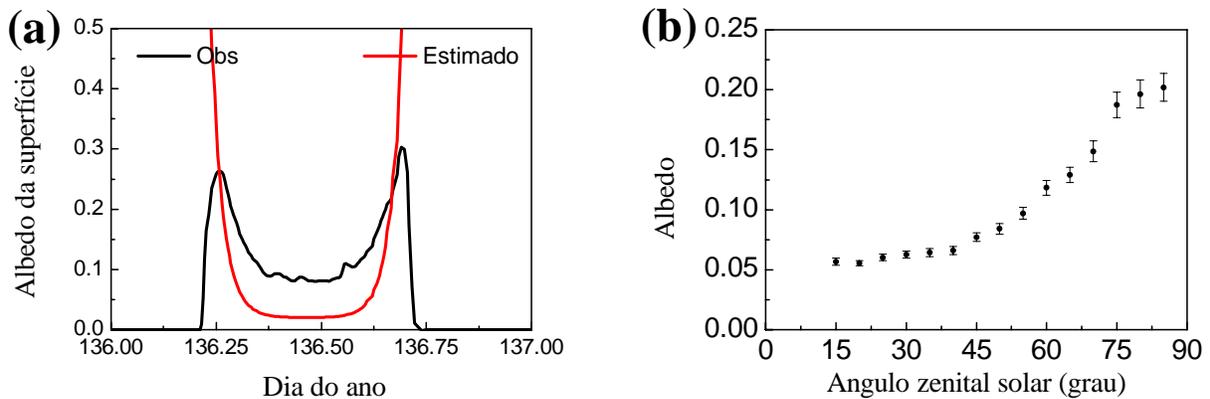


Figura 4: Albedo da superfície em função (a) do tempo, para o dia 136 e (b) do ângulo zenital, para todo o experimento. As barras verticais indicam os erros estatísticos.

A discrepância existente entre os valores observados e estimados do albedo se explica pela possível reflexão espúria de onda curta pelo casco do navio (Figura 2b) aumentando, dessa forma, o albedo observado.

Radiação de onda longa

A radiação de onda longa emitida pela superfície (Figura 5a) pode ser estimada através de:

$$OL_{UP} = \varepsilon \sigma T_S^4 \quad (6)$$

onde ϵ é a emissividade da superfície (Figura 6), σ é a constante de Stefan-Boltzman e T_s é a temperatura da superfície (Figura 7a), no caso a TSM.

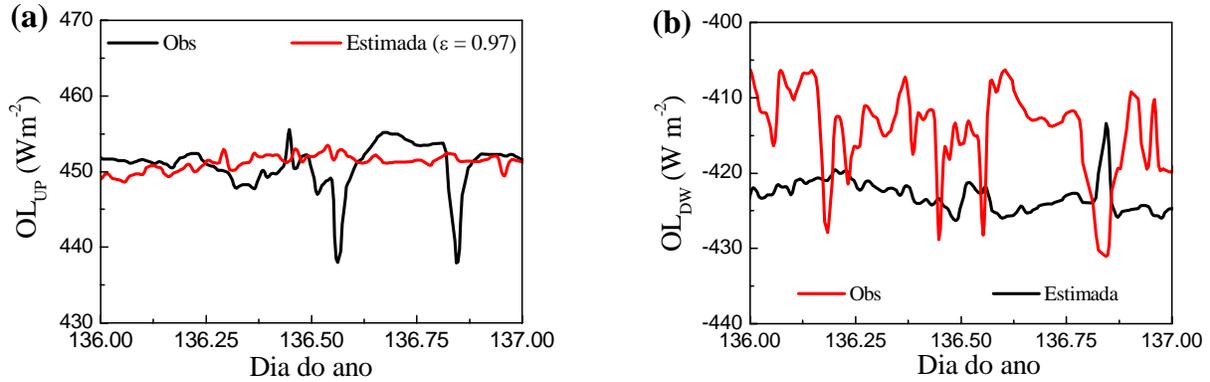


Figura 5: Radiação de onda longa emitida pela (a) superfície e (b) atmosfera.

A frequência de valores de emissividade da superfície é mostrada na Figura 6a, sendo que o valor mais provável é cerca de 0.97. Esse valor é consistente com o valor observado por Bhat *et al.* (2003) para o oceano Índico tropical.

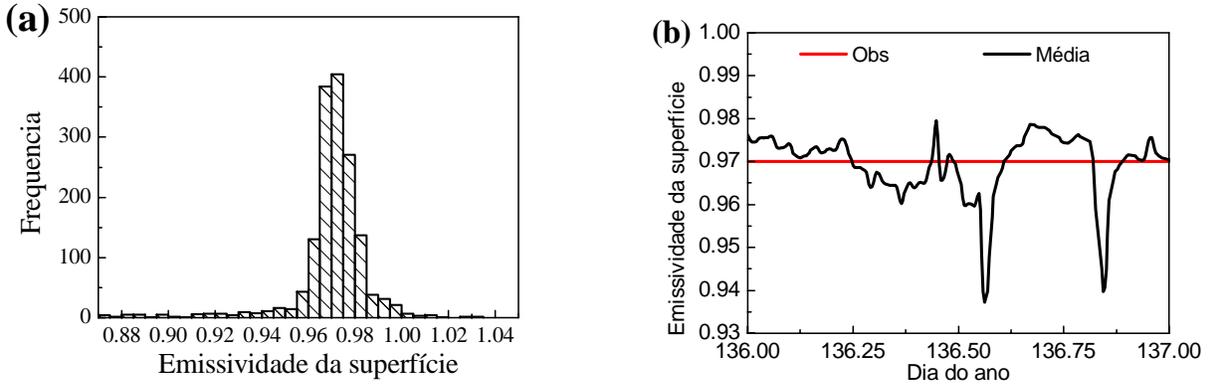


Figura 6: (a) Frequência de valores de emissividade da superfície, considerando todo o experimento e (b) emissividade da superfície em função do tempo, para o dia 136. A linha vermelha indica o valor médio.

A radiação de onda longa emitida pela atmosfera (Figura 5b) foi estimada usando:

$$LW_{DW} = -(a+b\sqrt{e}) \sigma T_r^4 \quad (7)$$

onde T_r é a temperatura no nível de referência (Figura 7a); e é a pressão de vapor no nível de referência, em mb (Figura 7b) e a e b são constantes iguais a 0.52 e 0.064, respectivamente. Essa expressão só é válida para dias de céu claro.

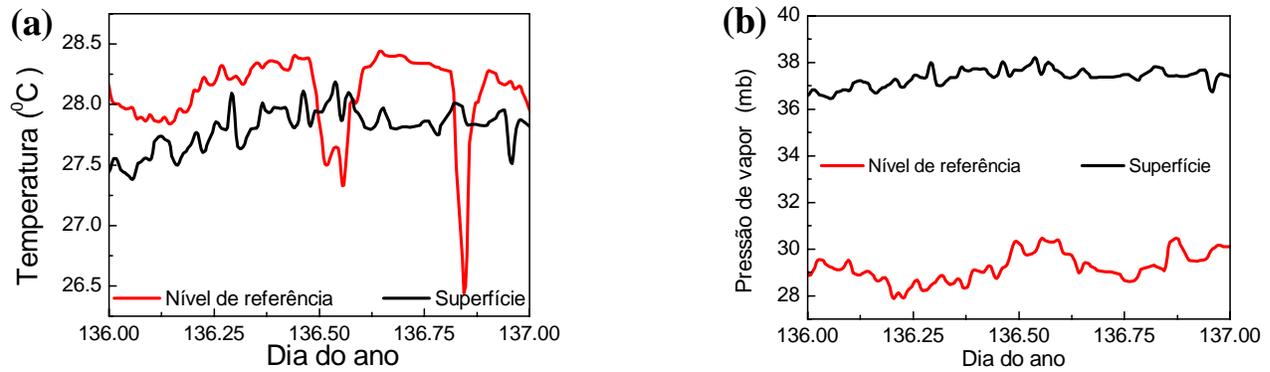


Figura 7: Valores das variáveis no nível de referência e na superfície (a) temperatura e (b) pressão de vapor em função do tempo.

Fluxos de energia

A radiação líquida, na superfície do oceano, (Figura 8) foi avaliada considerando o balanço de onda longa e onda curta:

$$R_N = OC_{DW} + OC_{UP} + OL_{DW} + OL_{UP} \quad (8)$$

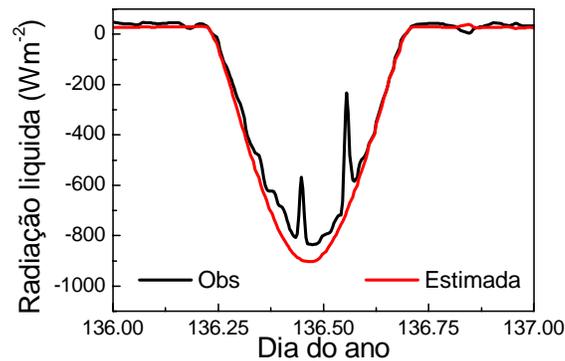


Figura 8: Radiação líquida em função do tempo.

Verifica-se, através da Figura 8, que há uma boa concordância entre os valores de radiação líquida observado e estimado usando as propriedades radiométricas obtidas das observações.

Os fluxos de momento e energia foram estimados considerando o caso mais simples, onde:

(i) A estabilidade da atmosfera neutra;

(ii) A velocidade de atrito foi considerada como $u_* = \sqrt{C_D} \bar{u}_r$ (Figura 9b), com \bar{u}_r sendo o vento no nível de referência (Figura 9a) e o coeficiente de transferência de momento igual a $10^3 C_{DN} = 0.75 + 0.067 \bar{u}_r$ (Garrat, 1977);

(iii) O comprimento de rugosidade da superfície como $z_0 = \alpha_c \frac{u_*^2}{g} + 0.11 \frac{\nu}{u_*}$ (Figura 9c), onde ν é a viscosidade cinemática do ar ($1.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$); g é a aceleração da gravidade e α_c é a constante de Charnock (= 0.011);

(iv) O coeficiente de transferência de calor:

$$10^3 C_{\text{HN}} = 1.0 \quad (\text{Smith, 1989}) \quad (9)$$

(iv) O coeficiente de transferência de umidade:

$$10^3 C_{\text{EN}} = 1.2 \pm 0.1 \quad \text{Smith (1989)} \quad (10)$$

O fluxo de momento (Figura 9d) foi estimado utilizando:

$$|\bar{\tau}| = \rho_0 C_{\text{DN}} (\bar{u}_r)^2 \quad (11)$$

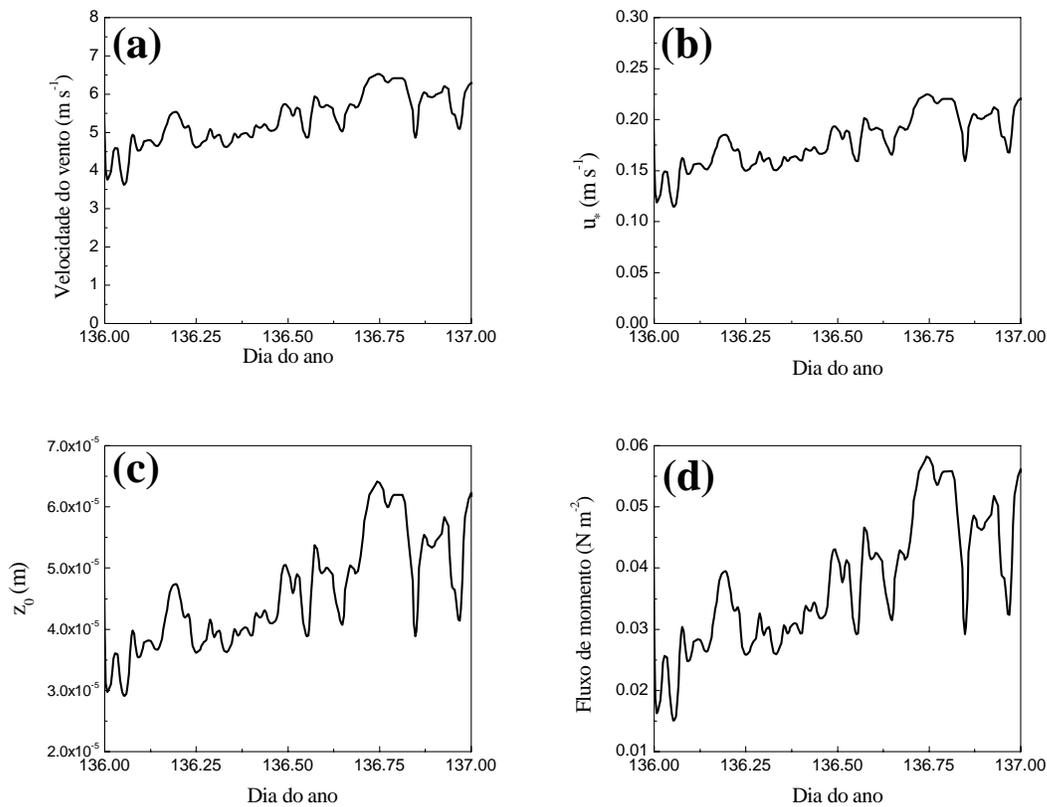


Figura 9: (a) Velocidade do vento, (b) velocidade de atrito (c) comprimento de rugosidade e (d) fluxo de momento, em função do tempo.

Os fluxos turbulentos de calor sensível e latente (Figura 10) foram estimados utilizando:

$$H = -\rho_0 c_p C_{HN} \bar{u}_r (\bar{T}_r - \bar{T}_s) \quad (12)$$

$$LE = -\rho_0 L_V C_{EN} \bar{u}_r (\bar{q}_r - \bar{q}_s) \quad (13)$$

onde ρ_0 é a densidade do ar; L_V é o calor latente de vaporização; \bar{q}_r e \bar{q}_s são os valores de umidade específica, respectivamente, no nível de referência e na superfície (Figura 11).

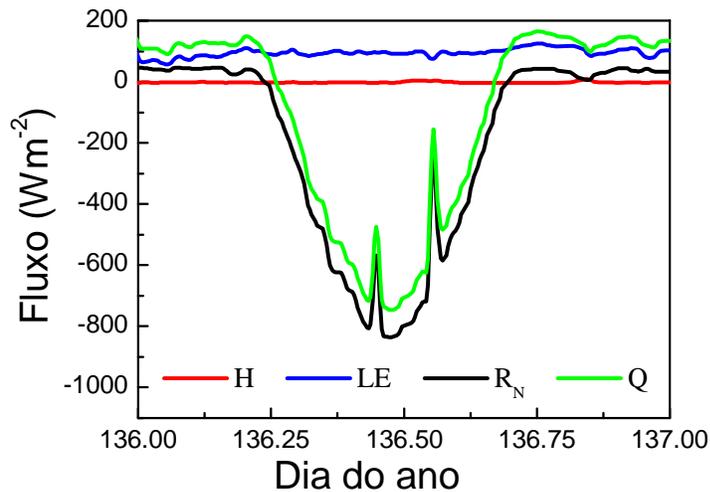


Figura 10: Fluxos de calor sensível (em vermelho), calor latente (em azul), radiação líquida (em preto) e fluxo líquido de calor no oceano (em verde). Foi considerado, aqui, que o oceano perde energia quando ocorre evaporação e quando o fluxo de calor sensível é positivo.

Verifica-se, pela Figura 10, que o termo de armazenamento no oceano é um termo bastante importante.

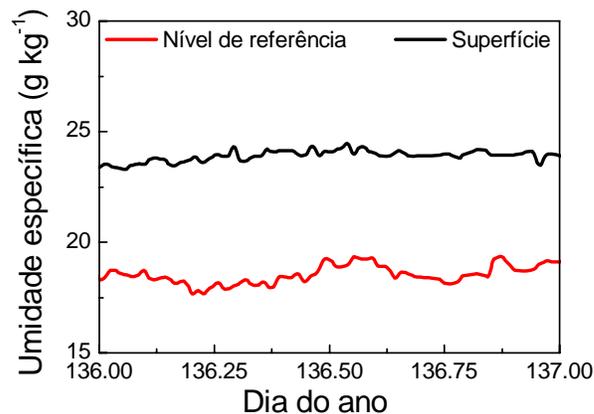


Figura 11: Umidade específica em função do tempo.

DADOS DO PIRATA (Pilot Research Moored Array in the Tropical Atlantic)

Para investigar a representatividade espacial dos dados coletados durante a campanha observacional foram utilizados os dados de 2 bóias Atlas, do PIRATA (Figura 1). A tabela 1 mostra as variáveis coletadas pelas bóias PIRATA e a altura de coleta no navio e nas bóias.

	Altura acima do nível médio do mar (m)	
	Bóias PIRATA	Navio
Temperatura do ar	3	11
TSM	1	1
Vento	4	11
Umidade relativa	3	11
Radiação de onda curta incidente	3.5	6

Tabela 1: Altura acima do nível médio do mar onde foram coletados os dados pelo navio e pelas bóias PIRATA.

Os dados coletados pelo PIRATA são médias diárias das variáveis e dessa forma também foram realizadas médias diárias dos dados observados durante toda a campanha para facilitar a comparação.

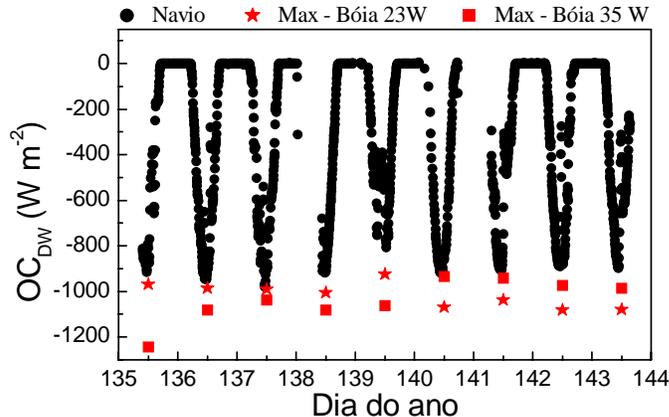


Figura 12: Radiação de onda curta incidente em função do tempo, obtida durante toda a campanha. Os círculos pretos indicam os dados obtidos no navio. As estrelas e os quadrados vermelhos indicam os valores máximos diários obtidos pelas bóias, respectivamente, em 23 W e 35 W.

A Figura 12 ilustra a radiação de onda curta incidente na superfície observada durante todo o experimento e os valores máximos diários obtidos pelas bóias PIRATA. Verifica-se que há uma razoável concordância entre os valores máximos dessa componente do balanço de radiação.

A Figuras 13 ilustra a comparação entre os demais dados obtidos no experimento observacional e pelas bóias PIRATA. Verifica-se que, exceto no caso da umidade relativa, todas as outras variáveis são

bastante semelhantes, indicando que as medidas coletadas a bordo do navio podem ser consideradas representativas do Oceano Atlântico tropical.

No caso da umidade relativa, as medidas coletadas a bordo do navio são sempre menores que as das bóias. Essa diferença provavelmente ocorre devido ao intenso gradiente vertical de umidade existente sobre o oceano. A umidade relativa foi medida no navio a 11 metros de altura e nas bóias a 3 metros de altura (Tabela 1).

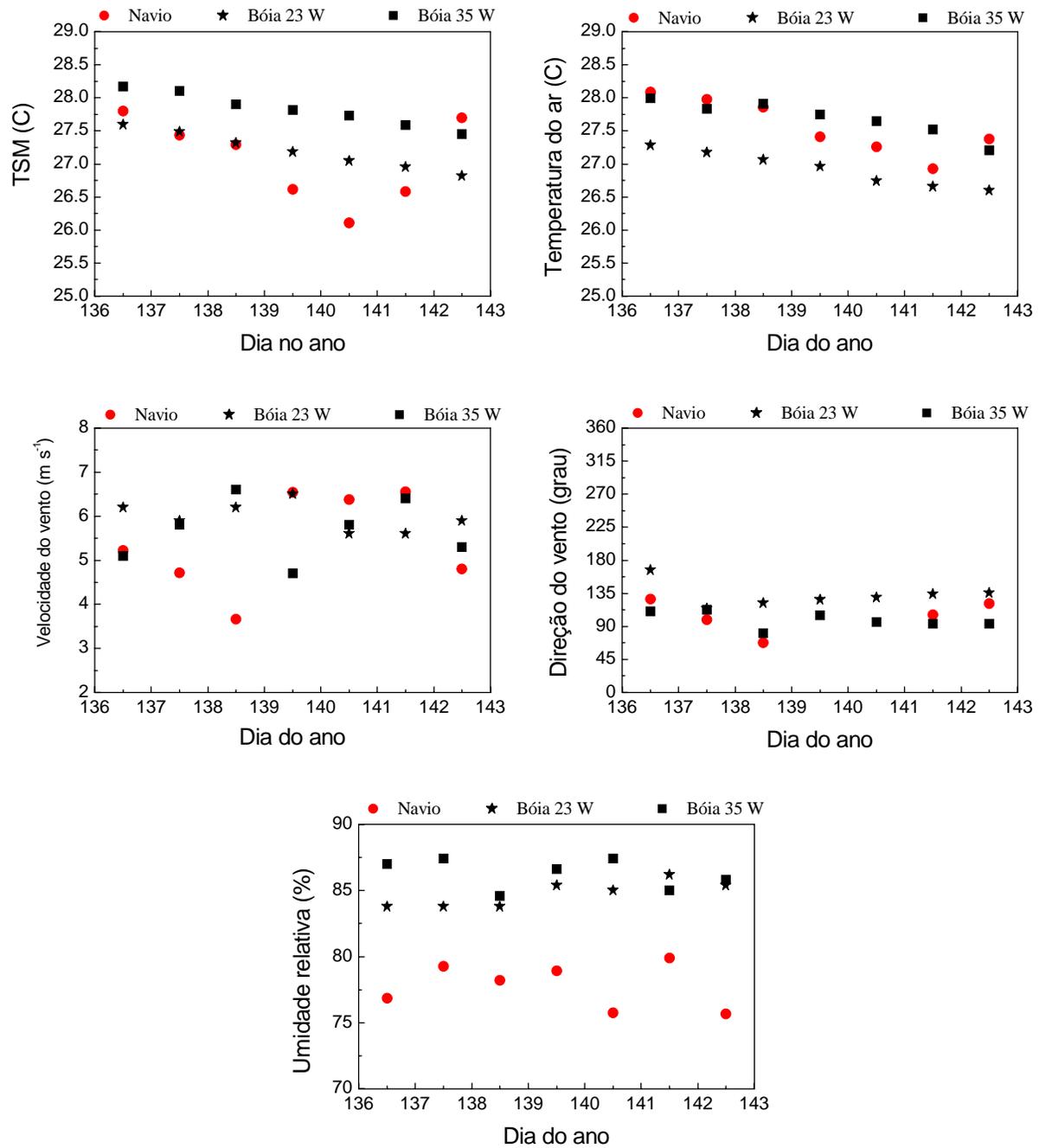


Figura 13: Valores médios diários de (a) TSM, (b) temperatura do ar, (c) velocidade do vento, (d) direção do vento e (e) umidade relativa. Os círculos vermelhos indicam os dados obtidos no navio. As estrelas e os quadrados pretos indicam os valores obtidos pelas bóias, respectivamente, em 23 W e 35 W.

DISCUSSÃO

Apesar da sua enorme importância, estudos observacionais da interface oceano-atmosfera regiões marítimas brasileiras são praticamente inexistentes. Essa ausência se deve em grande parte as dificuldades técnicas associadas aos métodos de medidas. Observações meteorológicas sobre o oceano requerem equipamentos robustos (Bradley *et al.*, 1991), pois a severidade do ambiente marinho provoca a rápida deterioração dos sensores, alterando o desempenho dos mesmos.

Foi descrito aqui o balanço de energia na interface oceano-atmosfera utilizando dados obtidos a bordo do navio da Marinha Brasileira, durante 10 dias, no oceano Atlântico tropical.

Constatou-se uma boa concordância entre a evolução temporal da radiação líquida estimada utilizando o albedo, a transmissividade atmosférica e a emissividade da superfície e a radiação líquida observada, indicando que os parâmetros obtidos com os dados observados são representativos das propriedades radiométricas da interface ar-mar do oceano Atlântico tropical.

A comparação entre os dados observacionais e os coletados por 2 bóias PIRATA também validou os dados da campanha observacional indicando que os mesmos apresentam boa representatividade espacial do Atlântico tropical.

Agradecimentos: Os autores agradecem o suporte financeiro do CNPq, FAPESP, USP/COFECUB (UC 27/96) e CNPq/SCI (910072/00-0). Agradecemos também a Marinha do Brasil, em especial ao Comandante Jean Félix de Oliveira e sua tripulação.

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, Fortaleza, Ceará.
- Bradley, E. F., P. A. Coppin, and J. S. Godfrey, 1991: Measurements of sensible and latent heat flux in the western equatorial Pacific Ocean. *J. Geophys. Res.*, **96**, 3375-3389.

- Bhat, G.S., Thomas, M.A., Raju, J.V.S. and Chandrasekhara, C.P., 2003: Surface Characteristics observed near the central tropical indian ocean during INDOEX IFP99. *Bound.-Layer Meteorol.*, **106**, 263-281.
- Cogley, J.G., 1979: The albedo of water as a function of latitude. *Monthly Weather Review*, **107**, 775-781.
- Garratt, J.R., 1977: Review of Drag Coefficients over Oceans and Continents, *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 915-929.
- Payne, R.E., 1972: Albedo of the sea surface. *J. Atmos. Sci.*, **29**, 959-970.
- Servain, J., A.J. Busalacchi, M.J. McPhaden, A.D. Moura, G. Reverdin, M. Vianna and S.E. Zebiak, 1998: A Pilot Research Moored Array in the Tropical Atlantic (PIRATA). *Bull. Am. Met. Soc.*, **79**, 2019-2031.
- Soares, J., A.P. Oliveira, I. Wainer and J. Servain, 2001: Turbulent fluxes over the tropical Atlantic Ocean. *Proceedings of the WCRP/SCOR Workshop Intercomparison and Validation of Ocean-Atmosphere Flux Field*, 21-24 May 2001, Washington, DC, EUA, 334-337.
- 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).