



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE METEOROLOGIA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

VERENA DE FÁTIMA DAS CHAGAS

**ESTIMATIVA DO FLUXO DE CALOR SENSÍVEL E
LATENTE SOBRE A BAÍA DE CAXIUANÃ - PA,
COMPARANDO COM A TÉCNICA DE EDDY COVARIATION**

Nº 332

BELÉM - PA

Março - 2014

VERENA DE FÁTIMA DAS CHAGAS

**ESTIMATIVA DO FLUXO DE CALOR SENSÍVEL E
LATENTE SOBRE A BAÍA DE CAXIUANÃ - PA,
COMPARANDO COM A TÉCNICA DE EDDY COVARIATION**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Meteorologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará – UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de bacharel em Meteorologia.

Orientador: Prof. Msc. José Danilo da Costa Souza Filho.

BELÉM - PA
2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

C435e Chagas, Verena de Fátima das

Estimativa do fluxo de calor sensível e latente sobre a baía de Caxiuanã - PA, comparando com a técnica de Eddy Covariation. / Verena de Fátima das Chagas – 2014

33f. : il.

Orientador: José Danilo da Costa Souza Filho

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Meteorologia, Belém, 2014.

1. Micrometeorologia - Amazônia. 2. Fluxo de calor superficial. 3. Sistema baía-floresta. 4. Vórtices turbulentos. I. Título.

CDD 22.ed.: 551.6609811

VERENA DE FÁTIMA DAS CHAGAS


ESTIMATIVA DO FLUXO DE CALOR SENSÍVEL E
LATENTE SOBRE A BAÍA DE CAXIUANÃ - PA,
COMPARANDO COM A TÉCNICA DE EDDY
COVARIATION


Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Meteorologia
da Universidade Federal do Pará-UFPA,
em cumprimento às exigências para
obtenção do grau de Bacharel em
Meteorologia.

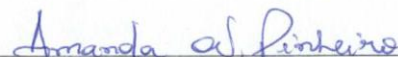
Data de aprovação: 13/03/14

Conceito: B04

Banca examinadora:


Prof. José Danilo da Costa Souza Filho -
Orientador
Mestre em Meteorologia
Universidade Federal do Pará


Prof. Hernani José Brazão - Membro
Doutor em Agrometeorologia
Universidade Federal do Pará


Amanda Nascimento Pinheiro - Membro
Mestranda em Ciências Ambientais
Universidade Federal do Pará

Dedico esse trabalho a minha mãe Cristina, que foi indispensável nessa jornada, acreditando sempre no meu potencial e ajudando-me a buscar a perfeição a cada dia.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me proporcionou trilhar esse caminho cheio de curvas e obstáculos, pois Ele sabia que eu teria a capacidade de alcançar o fim por mais difícil que fosse;

A minha mãe, Cristina e meu avô Luiz que me ensinaram o verdadeiro significado de lutar e persistir por um ideal. Por toda a confiança, apoio e amor de dedicado durante toda graduação;

Ao meu orientador José Danilo Souza Filho por todo aprendizado e paciência durante o período de desenvolvimento desse trabalho;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida na graduação;

Ao professor Cattanio pela disponibilidade dos dados do projeto “Rede de mudanças climáticas e ambientais do Pará: Uma perspectiva de estudos integrados” e pela contribuição nesse trabalho;

À Universidade Federal do Pará, pelos equipamentos e espaço cedido durante minha formação acadêmica;

A minha tia Dinete e batian Tomoyo pela confiança depositada em mim e também a minha hibatian Shin (in memorian) por todos os ensinamentos;

Ao meu eterno apaixonado Diogo que sempre acreditou em mim, até quando eu mesma desacreditei. Por todo afeto e por ser meu confidente inclusive nas horas mais difíceis;

As minhas amigas Ingrid e Jéssica que me acompanharam durante toda a graduação. Aos colegas de classe que compartilharam diversos momentos felizes e a Amanda Nascimento que mesmo sem me conhecer compartilhou seu conhecimento e foi muito importante na finalização desse trabalho.

"Meteorologista é um sujeito que semeia ventos e colhe dias belíssimos".

Millor Femandes

RESUMO

A Baía de Caxiuanã tem grande importância na manutenção de transporte de calor e umidade para o interior da floresta. No presente trabalho utilizou dados do projeto Rede de mudanças climáticas e ambientais do Pará: Uma perspectiva de estudos integrados coletados de uma torre micrometeorológica localizada na Baía de Caxiuanã. Foram avaliados os componentes do fluxo de balanço de calor sensível e latente, representativo do período menos chuvoso, compreendido entre 01/10 e 31/10/2012. Os elementos meteorológicos, incluindo-se vento e temperatura, foram medidos em uma estação meteorológica automática localizada no topo da torre. Os fluxos de calor latente e sensível foram medidos através da técnica de covariância de vórtices turbulentos. O objetivo deste trabalho foi avaliar as variações temporais dos fluxos de calor sensível e latente e observar quando é mais significativa a perda de calor por meio de processos de convecção e advecção na Baía de Caxiuanã-PA. A temperatura da água esteve sempre acima da temperatura do ar. A magnitude da velocidade do vento foi maior durante o dia e a direção predominante é de nordeste. O fluxo de calor sensível medido de modo geral se manteve na maioria dos dias acima do fluxo sensível estimado. Há uma superestimativa do fluxo de calor latente, quando utilizamos a temperatura da água no cálculo da pressão de saturação de vapor. Os valores dos fluxos de calor latente medido e estimado apresentaram valores positivos principalmente durante o dia.

Palavras-chave: Micrometeorologia–Amazônia. Fluxo de calor superficial. Sistema baía-floresta. Vórtices turbulentos.

ABSTRACT

The Bay Caxiuanã has great importance in maintaining the transport of heat and moisture into the forest. In the present study used data from the Network Project Environmental and climate changes Pará: A perspective of integrated studies collected from a micrometeorological tower in Caxiuanã Bay. Flow components balance sensible and latent representative heat less rainy period, between 01/10 and 31/10/2012 were evaluated. The weather data, including wind and temperature were measured in an automatic weather station on top of the tower. The fluxes of latent and sensible heat were measured using the technique of eddy covariance. The objective of this study was to evaluate the temporal variations of the flow of sensible and latent heat and watch when it is most significant heat loss through convection and advection processes in the Caxiuanã Bay-PA. The water temperature was always higher than the air temperature. The magnitude of the wind speed was higher during the day and the prevailing direction is from the northeast. The sensible heat flux measured generally remained on most days above the estimated flow sensitive. There are an overestimate of the flow of latent heat when the water temperature used to calculate the saturation pressure of steam. The values of the latent heat fluxes measured and estimated values were positive mainly day.

Keywords: Micrometeorology - Amazon. Surface heat flow. System bay-forest. Eddy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1- Torre micrometeorológica na Baía de Caxiuanã (Melgaço-PA). Fonte: Projeto de pesquisa “Rede de mudanças climáticas e ambientais do Pará: Uma perspectiva de estudos integrados”18
- Figura 2- Comparativo médio diário entre a Tar e Tágua (°C) do mês de outubro de 2012 na Baía de Caxiuanã, Melgaço-PA.....23
- Figura 3- Comparativo médio horário entre a Tar e Tágua(°C) do mês de outubro de 2012 na Baía de Caxiuanã, Melgaço-PA.....24
- Figura 4- Comportamento médio horário da velocidade do vento de outubro de 2012 na Baía de Caxiuanã, Melgaço-PA.....25
- Figura 5- Comportamento médio da direção do vento de outubro de 2012 na Baía de Caxiuanã, Melgaço-PA.....26
- Figura 6- Comparativo médio diário entre o fluxo de H medido e estimado do mês de outubro de 2012 na Baía de Caxiuanã, Melgaço-PA.....27
- Figura 7- Comparativo médio horário entre o fluxo de H medido e estimado do mês de outubro de 2012 na Baía de Caxiuanã, Melgaço-PA.....28
- Figura 8- Comparativo médio diário entre o fluxo de LE medido e estimado do mês de outubro de 2012 na Baía de Caxiuanã, Melgaço-PA. (Utilizando a Tar para encontrar a pressão de vapor de saturação para o método estimado).....29
- Figura 9- Comparativo médio diário entre o fluxo de LE medido e estimado do mês de outubro de 2012 na Baía de Caxiuanã, Melgaço-PA. (Utilizando a Tágua para encontrar a pressão de vapor de saturação para o método estimado).....29
- Figura 10- Comparativo médio horário entre o fluxo de LE medido e estimado do mês de outubro de 2012 na Baía de Caxiuanã, Melgaço-PA.....30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CLA camada limite atmosférica

CO₂ gás carbônico

E leste

FLONA floresta nacional

H calor sensível

H₂O vapor d'água

LE calor latente

N norte

NE nordeste

NW noroeste

PA Pará

S sul

SE sudeste

SW sudoeste

T_{água} temperatura da água

T_{ar} temperatura do ar

W oeste

LISTA DE SÍMBOLOS

$ \vec{V} $	velocidade do vento (ms^{-1}).
c_p	calor específico do ar ($1,005 \times 10^3 \text{JKg}^{-1}\text{K}^{-1}$).
e_{sat}	pressão de vapor saturado (hPa).
r	umidade relativa do ar (%).
T_a	temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$).
T_s	temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$).
ρ_a	densidade do ar (Kgm^{-3}).
ρ_t	pressão atmosférica (mb).
ϕ_{lf}	fluxo de calor latente.
ϕ_{sf}	fluxo de calor sensível.
c_E	coeficiente de troca turbulenta ($1,1 \times 10^{-3}$).
c_H	coeficiente de troca turbulenta ($1,1 \times 10^{-3}$).
LE	calor latente de evaporação ($2,50 \times 10^6 \text{J Kg}^{-1}$).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO LITERÁRIA	16
3	MATERIAIS E MÉTODOS	18
3.1	Área de estudo	18
3.2	Sistemas de fluxos e instrumentos meteorológicos	19
3.3	Estimativa do fluxo de calor sensível	19
3.4	Estimativa do fluxo de calor latente	20
4	RESULTADOS	22
4.1	Temperatura do ar (Tar) e da água (Tágua)	22
4.2	Direção e velocidade do vento	24
4.3	Fluxo de calor sensível	26
4.4	Fluxo de calor latente	28
5	CONCLUSÃO	31
	REFERÊNCIAS	32

1 INTRODUÇÃO:

A Amazônia é considerada um importante ecossistema para o controle do clima local e global da região Norte do Brasil. Possui cerca de 7 milhões de km², dispõem de uma riqueza imensurável composta por uma abundante biodiversidade de fauna e flora. Esse ecossistema está localizado na região tropical do globo terrestre, intensificando o fornecimento de energia para as circulações na atmosfera, resultando em trocas energéticas mais significativas, pois é a região que recebe maior incidência solar durante todo o ano.

A Floresta Nacional (FLONA) de Caxiuanã integra esse grande ecossistema que possui uma baía que é resultado de um alargamento do baixo rio Anapu, e por sua vez tem grande importância tanto no transporte de calor e umidade para atmosfera, quanto para o interior da floresta. Daí a relevância da baía principalmente no microclima da floresta quanto na pesquisa científica.

Os experimentos pioneiros já realizados na floresta amazônica contribuíram decisivamente para a compreensão de muitos processos importantes que ocorrem na camada limite atmosférica (CLA) da região (GASH; NOBRE, 1997; SHUTTLEWORTH, 1989; SILVA DIAS et al., 2002). No entanto, os estudos referentes ao fluxo de calor sobre a água precisam de muita investigação, visto que a bacia amazônica é a mais extensa bacia hidrográfica do globo terrestre, ocupando uma área total da ordem de 6.110.000 km², desde suas nascentes nos Andes Peruanos até sua foz no oceano Atlântico. Daí a importância de se estudar os fluxos de calor sobre a água.

A quantidade de calor transferida a uma superfície durante um intervalo de tempo é denominada como fluxo de calor e têm grande importância nas trocas de energia entre superfície-atmosfera, seja analisando o impacto sobre um determinado local ou sobre escala global. Os fluxos de calor sensível e calor latente na superfície terrestre são parâmetros essenciais no estudo dos processos de transporte de calor e umidade na interface superfície-atmosfera, fundamentais para a organização, por exemplo, de convecção e de precipitação (ROTUNNO E EMANUEL, 1987; TAO; SIMPSON, 1991). Da mesma forma, as condições atmosféricas (cobertura de nuvens, precipitação e vento) podem alterar os parâmetros da superfície, modificando os fluxos (WEBSTER; LUKAS, 1992). Em geral, o fluxo de calor sensível está dirigido da superfície para a atmosfera devido ao aquecimento diurno desta primeira em função da radiação solar.

A água é um dos componentes mais importantes do balanço de energia e é continuamente transportada pela atmosfera e pela superfície em todas as direções, dando origem aos fluxos de calor latente (OORT; PEIXOTO, 1992).

Mudanças climáticas descrevem respostas imediatas das relações decorrentes no regime hidrológico e térmico de corpos d'água. É fundamental entender o sistema atmosfera-baía, pois é através do efeito dessas mudanças que será compreendido o seu perfil vertical e sua influência sobre o transporte de energia entre a superfície aquática e a atmosfera. A variação da área e volume de um corpo d'água é determinada pelo balanço de entrada e saída de água e a sua temperatura é governada pelo balanço de energia na superfície da água; ambos acoplados à atmosfera (MORENO-OSTOS et al., 2008). Em resposta às entradas de massa, energia e momentum (precipitação, radiação e cisalhamento do vento), os corpos d'água retornam à atmosfera calor e umidade, por meio de processos como condução (fluxo de calor sensível) e evaporação (fluxo de calor latente) (ALCÂNTARA et al., 2011).

Segundo (SOUZA FILHO et al., 2002) nos trópicos, a superfície terrestre e a atmosfera formam um sistema fortemente acoplado. Nos últimos anos a técnica de covariância de vórtices turbulentos vem sendo utilizada em estudos sobre os fluxos de superfície. Este método determina os fluxos de gás carbônico (CO_2) e vapor d'água (H_2O) através da covariância entre as flutuações na velocidade vertical do vento, na temperatura e na concentração de CO_2 e H_2O . Esses fluxos são utilizados para estimar as trocas líquidas de carbono, água, calor sensível e calor latente, entre a atmosfera e os ecossistemas.

O fluxo de energia na FLONA de Caxiuanã varia no tempo e é controlado por vários fatores, como o climático que pode causar alteração no ciclo hidrológico e energético e mudar temporalmente, conforme dois períodos distintos (chuvoso e menos chuvoso). As trocas de energia na interface vegetação-atmosfera, que ocorrem por meio dos componentes do balanço de radiação e dos fluxos de calor sensível e latente à superfície, são essenciais para modelagem climática, sendo a magnitude desses fluxos, e suas variações em períodos menores que um dia, muito importantes na calibração de modelos climáticos e hidrológicos (BALDOCCHI; MEYER, 1998).

O fluxo de calor possui variação diária, mensal e anual, havendo épocas em que o mesmo alcança valores bastante elevados devido a influência das diversas variáveis meteorológicas nesse sistema. Rocha et al. (2003) ressaltou que a maior parte dos estudos que estão sendo realizados na Amazônia enfocam preferencialmente os fluxos de CO₂ e que os fluxos de energia merecem mais atenção. Daí a importância de se estimar o fluxo de calor sensível e latente como Large et al (1997) fez, para posteriormente comparar com a técnica de eddy covariance que é utilizada pelo datalog. Isso consiste na análise em conjunto desses dois métodos para posteriormente avaliar se é eficaz aplicar ambos os métodos, para diversas estimativas de calor na baía de Caxiuanã.

O objetivo deste trabalho é comparar os fluxos de calor sensível e latente com equações empíricas, observar quando é mais significativa a perda de calor por meio de processos de convecção e advecção e quais variáveis meteorológicas estariam influenciando esses fluxos energéticos, durante o mês de outubro de 2012 na Baía de Caxiuanã-PA.

2 REVISÃO LITERÁRIA

A Floresta Nacional de Caxiuanã é uma extensa área de floresta com cerca de 330.000 hectares, localizada no município de Melgaço-PA, as margens da baía que leva o mesmo nome ($1^{\circ}42'S$, $51^{\circ}31'W$) e fica a oeste de Belém-PA. Essa reserva é constituída, em 85% de sua área por floresta densa de terra firme, com dossel médio de 40 m de altura, porém, algumas árvores chegam a 50 m. O clima da região é do tipo Am, segundo a classificação de Köppen, ou seja, quente e úmido com precipitação pluviométrica muito elevada durante alguns meses, e com a ocorrência de um a dois meses (outubro e novembro) de pluviosidade inferior a 60 mm. A temperatura média anual é de $26^{\circ}C$ e as temperaturas extremas (máximas e mínimas) em torno de $32^{\circ}C$ e $22^{\circ}C$, respectivamente. A região possui período mais chuvoso, entre os meses de janeiro e maio, e menos chuvoso de setembro a dezembro. (MORAES et. al., 1997).

A Baía de Caxiuanã exerce um papel fundamental no transporte de calor e umidade para dentro da floresta, uma vez que o vento predominante nessa região é de nordeste (NE), assumindo um comportamento distinto ao longo de algumas horas do dia.

Os fluxos de calor sensível (H) e latente (LE) são transferidos por uma mistura turbulenta do ar de forma ascendente na atmosfera. Esse movimento turbulento é caracterizado por vórtices transversais, do vento médio que são gerados pela convecção, essa convecção é usualmente a mistura da convecção forçada com a convecção livre. A convecção forçada depende da superfície e é particularmente importante próximo da superfície. Já a convecção livre é o aparato dominante para o transporte do calor sensível e latente na baixa atmosfera em que consiste na mistura de ar em um ambiente flutuante e sob condições instáveis.

Quando a energia solar incide sobre uma superfície vegetada, uma parte é refletida de volta para o espaço, uma segunda parte é absorvida pela vegetação, contribuindo para o aumento de sua temperatura, e uma terceira parte é transportada para a atmosfera através de processos predominantemente turbulentos, que se manifestam por transportes verticais, tanto de calor sensível quanto de calor latente.

A partição de energia, particularmente entre calor sensível e calor latente, determina o conteúdo de vapor d'água e o aquecimento da atmosfera, contribuindo, em última instância, para os processos climáticos em escala regional e global (DIRMEYER, 1994; SETH e GIORGI, 1996). As transferências de energia e água são as interações mais importantes entre a biosfera e a atmosfera, sendo as magnitudes de cada fluxo variável entre biomas. O transporte vertical (convecção) e transporte horizontal (advecção) de energia e massa na atmosfera determinam as características da camada limite planetária. Desde então, destaca-se a importância dessas trocas sobre as florestas tropicais e sobre os cursos d'água. Os balanços de água e energia são reconhecidos por sua importância na determinação dos recursos hídricos globais, devido à existência de uma grande interação de troca de energia, água e quantidade de movimento, entre a vegetação amazônica e a atmosfera (GASH et al., 1996).

Nas florestas tropicais úmidas, este processo não é limitado regionalmente, pois exerce influência sobre outras regiões em razão da alta disponibilidade de água e energia. O período chuvoso e menos chuvoso, característico dessas regiões, são fatores que determinam as trocas de vapor d'água nessas florestas, em razão da variação na quantidade de energia disponível e na disponibilidade de água no solo, sendo parte dela proveniente de rios e lagos que beiram esse ecossistema.

A ocorrência de trocas de calor na atmosfera que não são acompanhadas de mudanças de estado físico compreende o fluxo de calor sensível. Na camada limite laminar e turbulenta o fluxo de calor sensível causa uma mudança considerável próximo da superfície. Esses fluxos de calor são frequentemente determinados usando três métodos, o método do gradiente de fluxo, o método aerodinâmico e o método de correlação de eddy que será utilizado posteriormente no estudo.

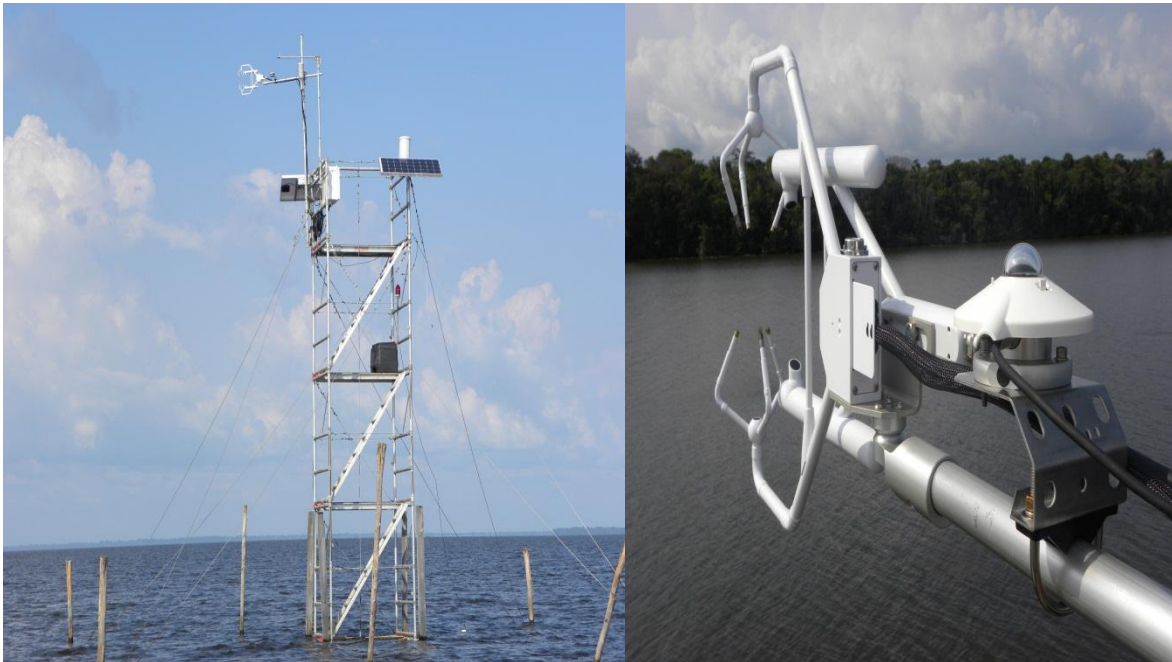
Quando o fluxo de calor sensível for positivo, o fluxo é ascendente (para cima). Já quando o fluxo de calor sensível for negativo, o fluxo de calor é descendente (para baixo). Quando o calor é necessário para efetuar uma mudança de estado, esse processo é chamado de calor latente, tanto de um nível mais baixo para o mais alto, quanto o inverso. Podemos afirmar que a troca de calor latente em larga escala é o maior encarregado da transferência de calor na atmosfera, tanto na vertical quanto na horizontal. Segundo Molion (1987) a floresta amazônica é considerada uma importante fonte de calor para a circulação geral da atmosfera, uma vez que grande quantidade da radiação solar incidente é absorvida pela superfície e transportada na forma de calor latente.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A área de estudo está localizada na Floresta Nacional de Caxiuanã ($1^{\circ}42'S$, $51^{\circ}31'W$), no município de Melgaço, Pará, a 400 km em linha reta da cidade de Belém. É uma área de aproximadamente 330.000 hectares de floresta, a qual fica margeando a baía de mesmo nome, em que está localizada a torre micrometeorológica que possui cerca de 9 metros, (7 metros acima da baía e 2 metros dentro da água) de onde foram utilizados os dados coletados pela estação automática, localizada no topo da torre.

Figura 1- Torre micrometeorológica na Baía de Caxiuanã (Melgaço-PA). Fonte: Projeto de pesquisa “Rede de mudanças climáticas e ambientais do Pará: Uma perspectiva de estudos integrados”.



A FLONA de Caxiuanã abrange cerca de 330.000 ha, englobando rios e floresta, deste último tem-se em maior parte floresta de terra firme e em sua minoria floresta alagada de Várzea e Igapó e pequenas porções de manchas de vegetação de savana não florestal (LISBOA, 1997), quase intocáveis pelo homem, como resposta a isto se configura uma baixa densidade demográfica na região.

Segundo Costa et al. (2002) a baía de Caxiuanã e seus tributários caracterizam-se pela ausência ou pouco material em suspensão, exceto pela presença de matéria orgânica algal e espículas de caixi. Apresenta como consequência água límpida e transparente, sendo classificada como água preta (ionicamente pobre – baixo teor de sedimentos em suspensão), havendo variação em sua coloração de preto a verde.

Os dados micrometeorológicos utilizados neste trabalho foram obtidos através do plano de trabalho “Estudos micrometeorológicos na Floresta Nacional de Caxiuanã: A importância da baía para a manutenção do microclima em floresta primária” que é parte integrante do projeto de pesquisa “Rede de mudanças climáticas a ambientais do Pará: uma perspectiva de estudos integrados” o qual está sendo desenvolvido em etapa de campo

3.2 Sistemas de fluxos e instrumentos meteorológicos

Os dados foram obtidos por meio de uma estação instalada em uma torre micrometeorológica (figura 1). Em que foi feita a coleta de dados de fluxos atmosféricos turbulentos utilizando o método de eddy covariance que emprega equações para estimar o fluxo de calor acima da água, em coletor Cambell CR500, com sensores anemômetro sônico 3D, analisador de gás infra-vermelho CO₂/H₂O que foram instalados no topo da torre acima da superfície da água. O período de estudo compreende o mês de outubro de 2012, que está representando a época menos chuvosa na Amazônia, em que foram coletados dados a cada 30 minutos de temperatura do ar (°C), temperatura da água (°C), fluxo de calor sensível e latente (Wm²), umidade relativa (%), vento resultante (m/s). Os dados foram convertidos em médias horárias (meia hora) e diárias para se ajustar à análise temporal deste estudo.

3.3 Estimativa do fluxo de calor sensível

A interação do vento com ondas de superfície do corpo d’água domina o transporte turbulento do calor da superfície enquanto modifica a característica da superfície e o transporte turbulento de calor na água. As ondas de superfície aumentam a área da superfície para troca de calor, enquanto ocorre um aumento da taxa de transporte. O fluxo de calor sensível ϕ_{sf} pode ser estimado por (LARGE et al., 1997):

$$\phi_{sf} = \rho_a c_p c_H |\vec{V}| (T_s - T_a)$$

Onde:

ρ_a é a densidade do ar (Kgm^{-3});

c_p é o calor específico do ar ($1,005 \times 10^3 \text{JKg}^{-1}\text{K}^{-1}$);

c_H é o coeficiente de troca turbulenta ($1,1 \times 10^{-3}$);

$|\vec{V}|$ é a velocidade do vento (ms^{-1});

T_s é a temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$);

T_a é a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$);

As variáveis meteorológicas acima, foram registradas pela torre micrometeorológica localizada sobre a Baía de Caxiuanã-PA.

Segundo Alcântara (2011) quando a água evapora, ocorre uma perda de calor pelo corpo d'água, chamada fluxo de calor latente ϕ_{sf} . A quantidade de evaporação é proporcional ao gradiente de pressão de vapor de água entre a água e a atmosfera. A evaporação é um gradiente entre a pressão de saturação de vapor na temperatura da superfície da água e a pressão de vapor real na temperatura do ar (Lei de Dalton). Sob condições de calmaria, um equilíbrio entre a pressão de vapor da água e o ar imediatamente acima da superfície da água é alcançado rapidamente. A razão de difusão do vapor da camada superficial controla a razão de evaporação. Entretanto, a turbulência induzida pelo vento tanto na água como no ar aumenta o transporte de vapor. Conseqüentemente, a taxa de transferência é uma função da velocidade do vento próximo da superfície da água.

3.4 Estimativa do fluxo de calor latente

A relação entre o movimento do vento sobre a superfície da água, a turbulência gerada no ar e na água, e a evaporação é bastante complexa (MARTIN; MCCUTCHEON, 1999). O fluxo de calor latente pode ser estimado como segue (LARGE et al. 1997):

$$\phi_{lf} = \rho_t c_E L |\vec{V}| [e_{sat}(T_s) - re_{sat}(T_a)] \frac{0,622}{\rho_t}$$

Onde:

ρ_t é a pressão atmosférica (mb);

c_E é o coeficiente de troca turbulenta ($1,1 \times 10^{-3}$);

LE é o calor latente de evaporação ($2,50 \times 10^6 \text{ J Kg}^{-1}$);

$|\vec{V}|$ é a velocidade do vento (ms^{-1});

e_{sat} é a pressão de vapor saturado (hPa), obtido por meio da equação a seguir:

$$e_s = 6,1078 \cdot 10^{\frac{(7,5T_a)}{(T_a+237,3)}}$$

T_s é a temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$);

r é a umidade relativa do ar (%);

T_a é a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$).

É importante observar que a temperatura da água (T_s) utilizada para a estimativa dos fluxos de calor sensível e latente foi obtida por meio do coletor Cambell CR500, fixado sobre a água.

4 RESULTADOS

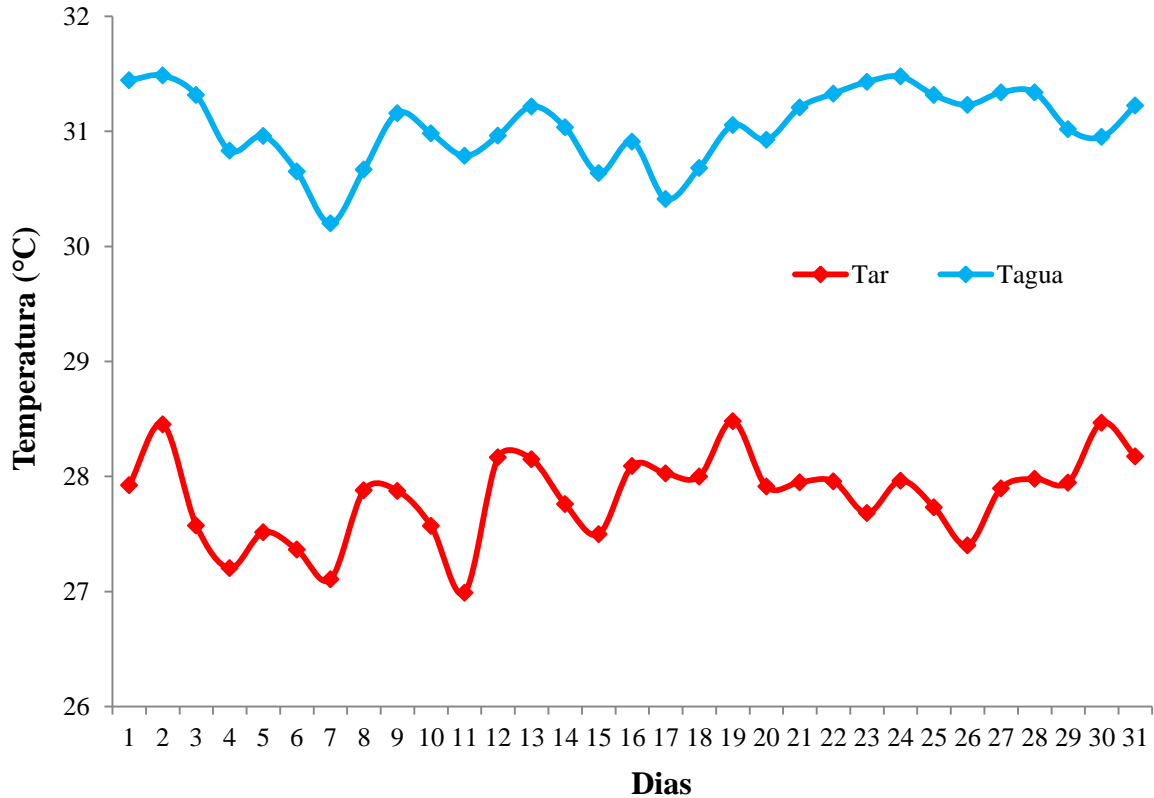
4.1 Temperatura do ar (Tar) e da água (Tágua)

Neste item serão analisadas as variações diárias e horárias da temperatura do ar e da água durante um período de trinta dias (mês de outubro de 2012), correspondente ao período menos chuvoso da região de estudo. Com isso, pretende-se associar as variações de temperatura de ambos e constatar como o sistema água-atmosfera está acoplado regionalmente.

A figura 2 mostra o comportamento médio diário da temperatura do ar e da água, observa-se que a temperatura da água esteve sempre acima da temperatura do ar. A variação de temperatura interdiurna é mais significativa na Tar do que na Tágua, isso expõe a capacidade de armazenamento de energia entre os dois meios, onde a Tar ganha e perde calor com maior rapidez do que a Tágua, mostrando que a água tem uma capacidade térmica maior, devido também a água da baía de Caxiuanã apresentar uma cor escura, resultando em um albedo menor. Os valores médios da Tar e da Tágua foram 27,8°C e 31,0 °C respectivamente, os valores mínimos encontrados foram de 27,0 °C (11/10) e 30,2 °C (07/10) e máximos 28,5 °C (02,19 e 30/10) e 31,5 °C (02 e 24/10) respectivamente.

As temperaturas diárias durante o período de estudo apresentaram uma conexão entre baía-atmosfera. Uma vez que, as temperaturas aumentavam e diminuía concomitantemente durante quase todo período de estudo. Isso mostra como o sistema baía-atmosfera funciona interligado, pois tudo que acontece na superfície tem resposta na atmosfera. Contudo, apresentaram uma singularidade entre os dias 22 e 23/10, em que a Tar aumenta e a Tágua diminui, essa particularidade se repete nos dias 30 e 31/10 também, isso poderá ter ocorrido devido o vento está contribuindo com a turbulência, onde houve o transporte de águas mais frias de profundidades maiores para a superfície.

Figura 2- Comparativo médio diário entre a Tar e Tágua (°C) do mês de outubro de 2012 na Baía de Caxiuanã, Melgaço-PA.

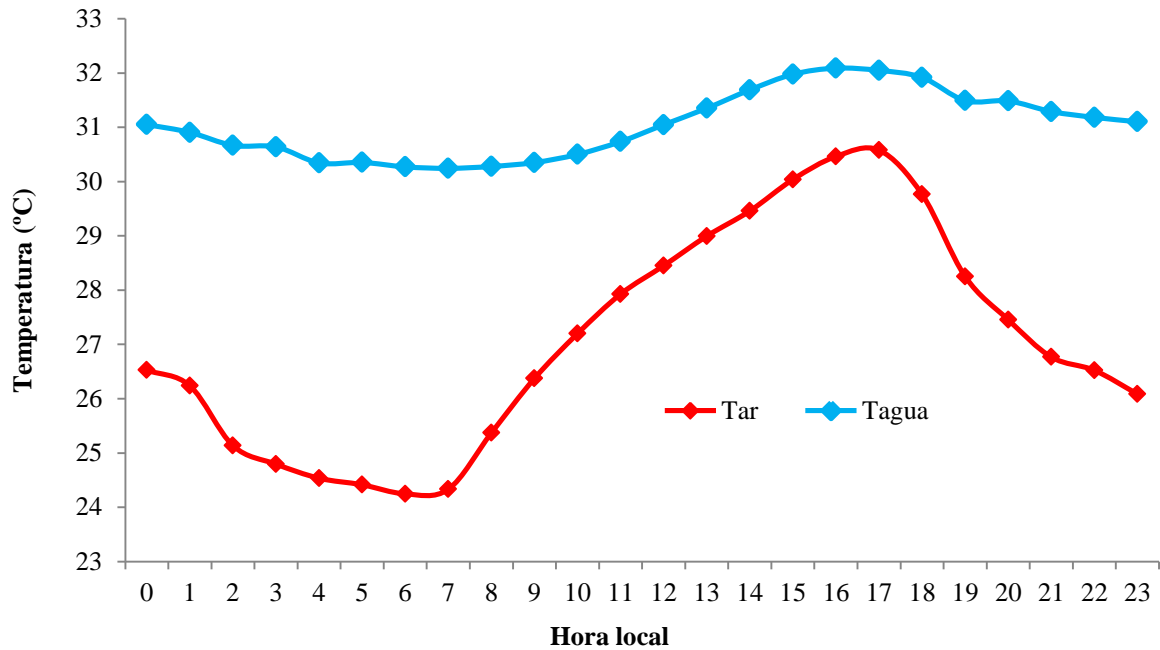


Fonte: Da autora.

A figura 3 apresenta o comportamento médio horário da Tágua e Tar. Notou-se um contraste bem distinto da Tágua em relação a Tar, onde a mesma teve uma distribuição quase que uniforme, variando cerca de 1,8 °C entre a máxima (32,1 °C) as 16 horas e a mínima (30,2 °C) as 7 horas. Em compensação a Tar variou cerca de 6,3°C, onde a máxima (30,6 °C) as 17 horas e a mínima (24,2 °C) as 6 horas. Essa variação entre máximos e mínimos valores demonstra que a água retém maior energia do que o ar, fazendo com que essa variação seja bem significativa ao fazer a comparação entre ambos.

Durante boa parte da madrugada a Tar esteve sempre abaixo de 26°C, enquanto que a Tágua não ultrapassou os 31°C desde a madrugada até por volta das 11 horas, tal fato está relacionado a propriedade da água reter mais energia que o ar. Observa-se que com a incidência da radiação, a partir das 07 horas, a temperatura do ar começou a aumentar gradativamente atingindo o seu máximo às 17 horas.

Figura 3- Comparativo médio horário entre aTar e Tágua (°C) do mês de outubro de 2012 na Baía de Caxiuanã, Melgaço-PA.

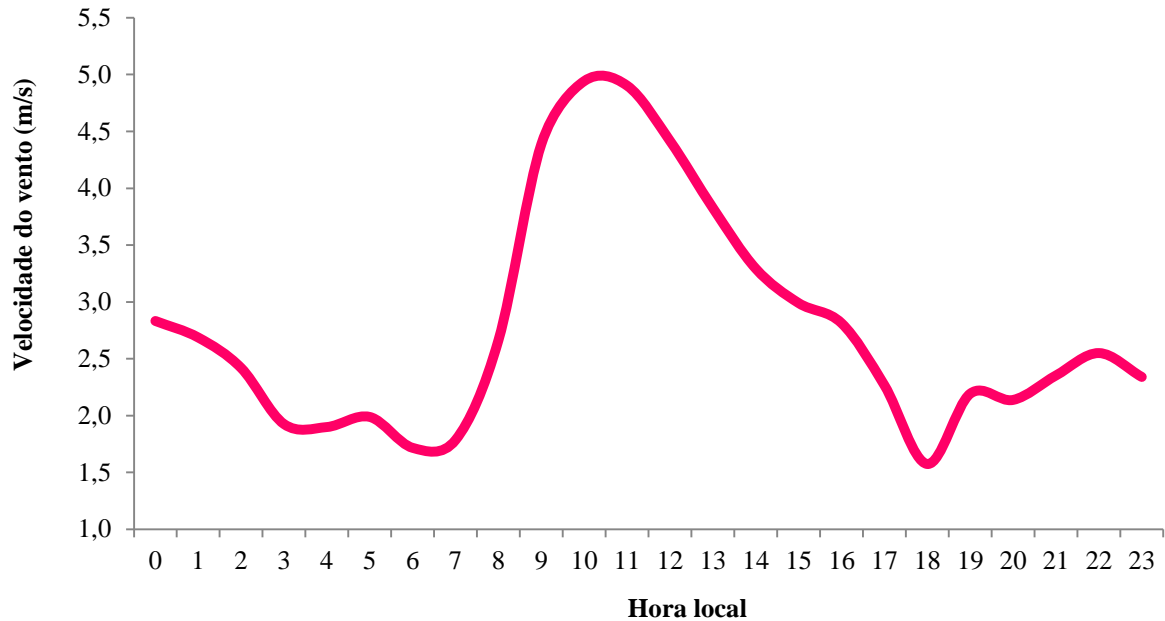


Fonte: Da autora.

4.2 Velocidade e direção do vento.

A figura 4 exibe o comportamento médio horário da velocidade do vento em outubro de 2012, onde foi possível notar que nos horários que correspondem ao período diurno, observa-se que a curva de velocidade do vento se distribui de maneira bastante irregular ao longo das 24 horas, ou seja, a partir das 7 horas, tem o aquecimento da superfície que posteriormente ocasionou o aumento gradativo da velocidade do vento a partir desse horário e atingiu a máxima velocidade média (4,9 m/s) às 10 horas e persistiu com a mesma magnitude no horário seguinte (11 horas). A partir disso, a magnitude diminuiu continuamente até às 18 horas. A média horária correspondeu a 2,8 m/s e o valor mínimo da velocidade do vento ocorreu às 18 horas, equivalendo a 1,6 m/s, quando ocorreu o menor gradiente de temperatura.

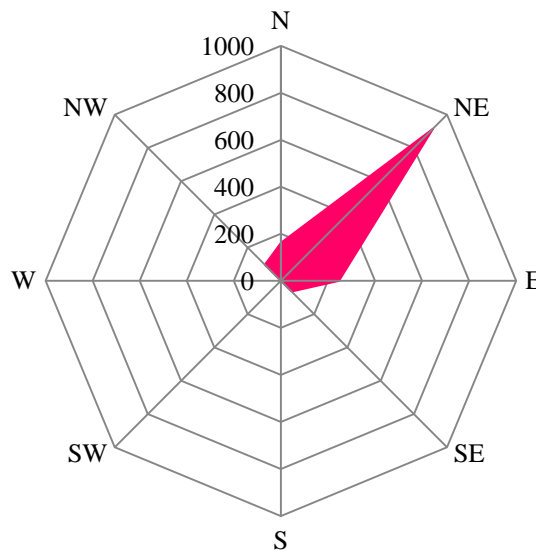
Figura 4- Comportamento médio horário da velocidade do vento de outubro de 2012 na Baía de Caxiuanã, Melgaço-PA.



Fonte: Da autora

A figura 5 mostra o comportamento médio da direção do vento para o mês de outubro de 2012 na baía de Caxiuanã. Foram avaliados cerca de 1488 eventos, que consistiram numa análise feita em conjunto, onde se verificou a predominância do vento na direção nordeste (NE), em que correspondeu cerca de 916 ocorrências (62%) desses eventos nesse período. Isso pode estar associado com a ocorrência dos ventos alíseos de nordeste, que são comuns nessa latitude. A predominância de ventos na direção leste foi a segunda maior equivalendo cerca de 247 ocorrências (17%). A soma da ocorrência de ventos de norte (N) correspondeu cerca de 11% (162 ocorrências), essa porcentagem é vista novamente quando há a soma da ocorrência de ventos de sudeste (SE) e noroeste (NW). Nas direções sul (S), sudoeste (SW) e oeste (W) não houve registro de vento nesse período.

Figura 5- Comportamento médio da direção do vento de outubro de 2012 na Baía de Caxiuanã, Melgaço-PA.

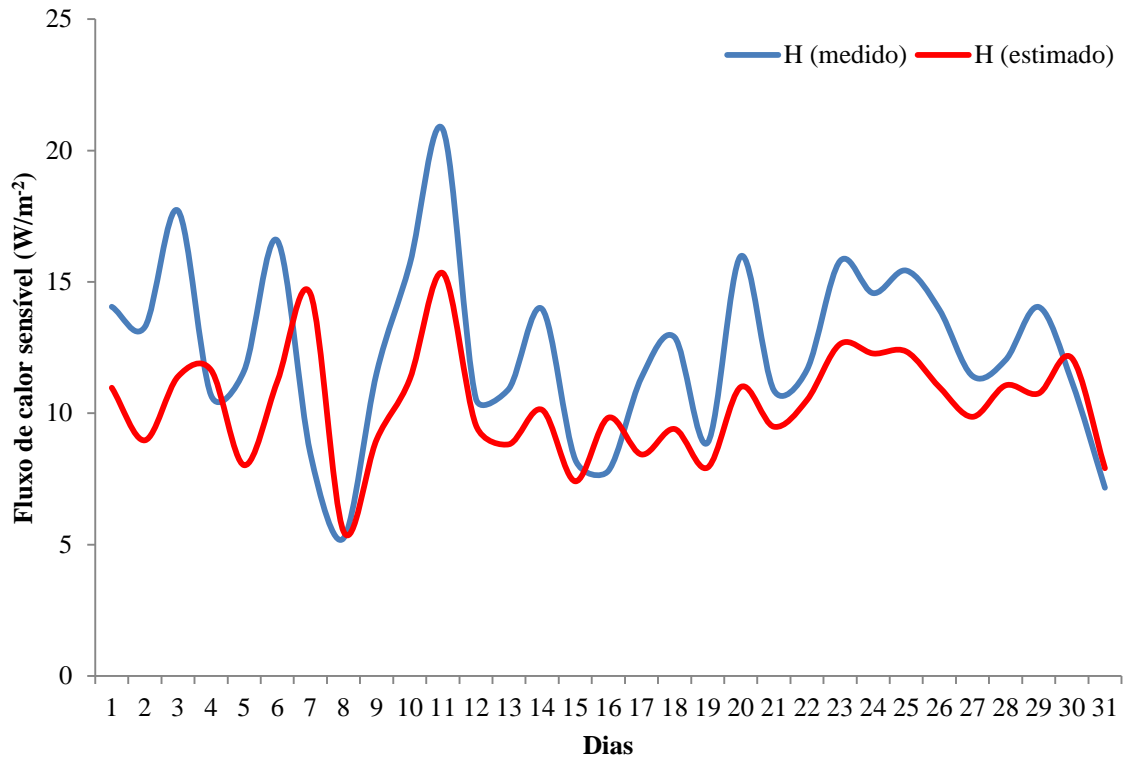


Fonte: Da autora

4.3 Fluxo de calor sensível

A Figura 6 mostra o comparativo médio diário do fluxo de H medido e estimado do mês de outubro de 2012 na Baía de Caxiuanã. Os fluxos de energia medidos e estimados demonstram um comportamento em fase ao longo de todo o mês, havendo uma diferença temporal em alguns dias. É possível notar que o fluxo de H medido de modo geral se manteve na maioria dos dias acima do fluxo sensível estimado, exibindo inversões em seis dias (04, 07, 08, 16, 30 e 31) do mês de outubro, sendo essa inversão mais visível no dia 07 em que o vento registrado teve máxima velocidade em relação os demais dias, chegando aos 4m/s. Os fluxos mínimos ocorreram no dia 08 tanto no método medido quanto no estimado, isso ocorre devido a velocidade do vento está com o menor valor do mês, correspondendo a 1,9 m/s e os máximos valores de fluxos foram notados no dia 11.

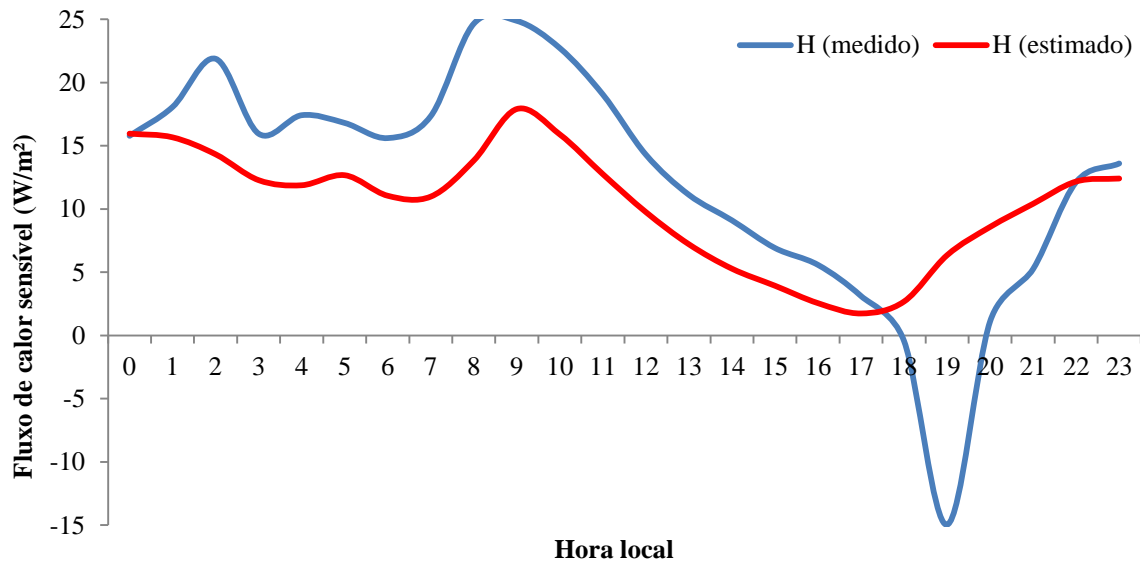
Figura 6- Comparativo médio diário entre o fluxo de H medido e estimado do mês de outubro de 2012 na Baía de Caxiuanã, Melgaço-PA.



Fonte: Da autora.

Através da análise da figura 7, onde se verifica o comparativo médio horário do fluxo de H para o mês de outubro de 2012 na Baía de Caxiuanã, compreendeu-se que a superfície da água ganhou calor durante boa parte dos horários, devido o fluxo de H medido apresentar valores positivos entre o horário das 00:00 as 17:00, expondo uma singularidade a partir das 18:00 e se estendendo até as 19:00, onde o fluxo de H estimado apresentou valores negativos indicando que a água é um meio conservativo, onde o gradiente entre Tagua e Tar é bem mais significativo, isso fez com que o fluxo de H estimado, não acompanhasse o fluxo de H medido. O fluxo de H medido volta ser positivo a partir das 20:00.

Figura 7- Comparativo médio horário entre o fluxo de H medido e estimado do mês de outubro de 2012 na Baía de Caxiuanã, Melgaço-PA.



Fonte: Da autora.

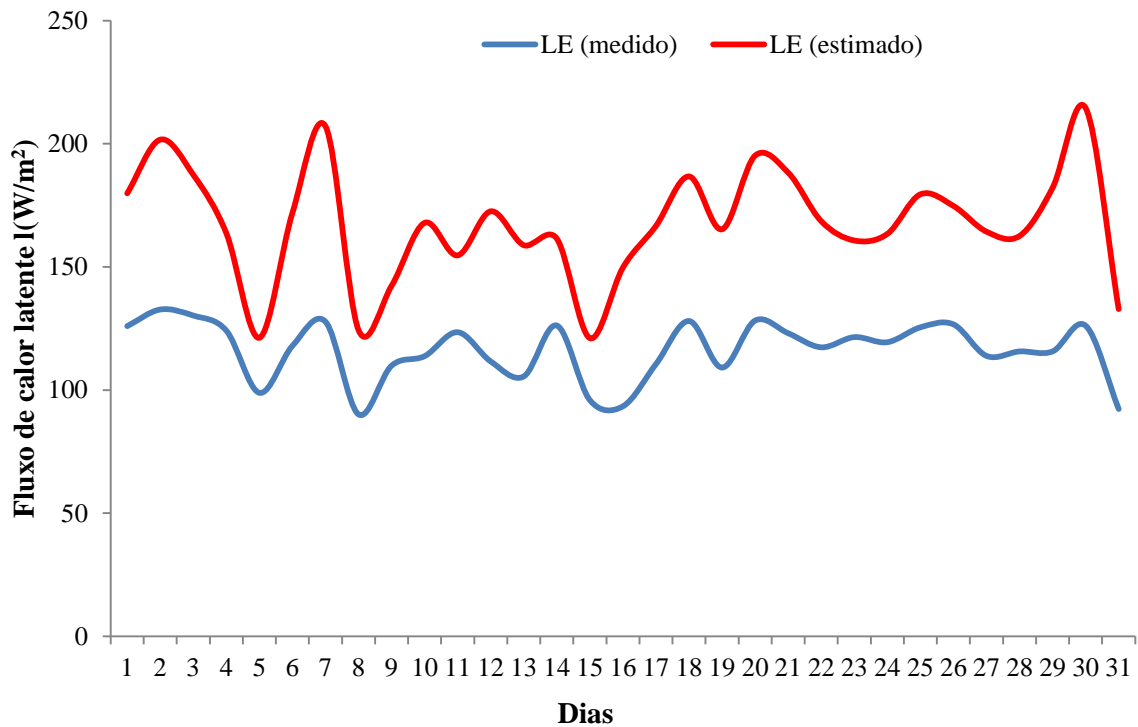
4.4 Fluxo de calor latente

O comparativo médio diário entre o fluxo de LE medido e estimado para o mês de outubro de 2012 está expresso em dois gráficos. Na figura 8 foi utilizada a Tar para encontrar a pressão de saturação de vapor, na equação empírica de estimativa do fluxo de LE, posteriormente a Tágua também foi aplicada como mostra a figura 9.

Com isso, podemos observar que ao utilizarmos a Tar no cálculo da pressão de saturação de vapor para estimar o fluxo de LE, há um contraste bem menor do que quando utilizamos a Tágua no cálculo. Neste último caso é evidente uma superestimativa do fluxo de calor latente.

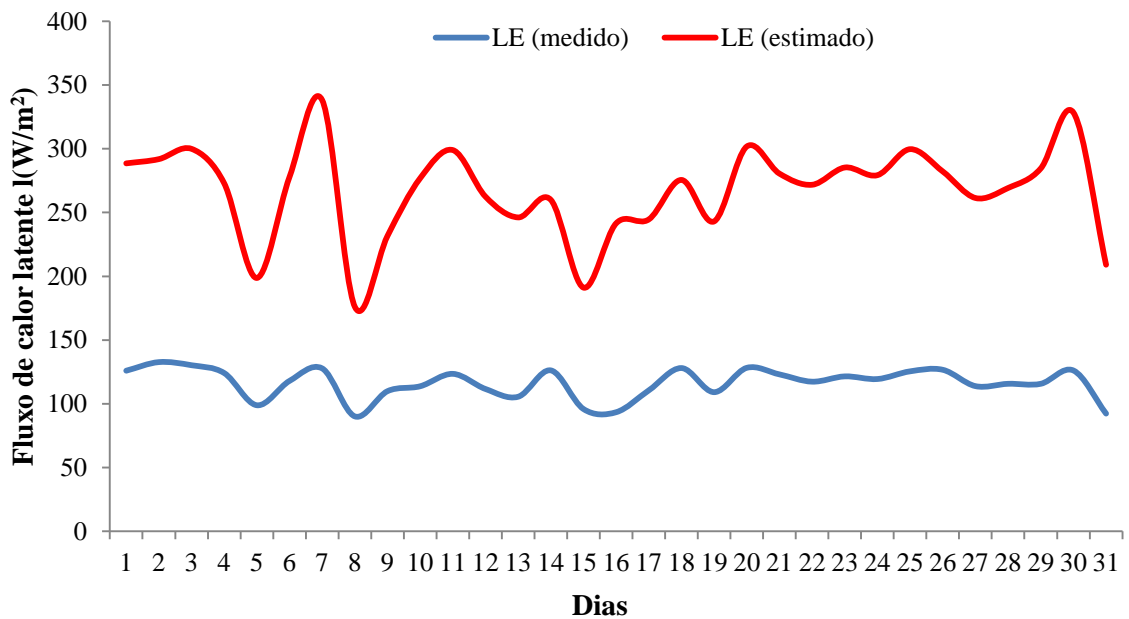
Na Figura 8 identificamos uma diferença entre o fluxo de LE medido e estimado, expressando uma relação proporcional entre ambos durante grande parte do mês, havendo algumas particularidades evidentes nos dias 11 e 12 quando o fluxo de calor medido diminui e o fluxo de calor sensível estimado aumenta. Observando a Figura 9, a diferença entre o fluxo de calor latente medido e estimado é bem elevada tendo a maior amplitude (210 W/m^2) no dia 07, o fluxo de calor latente foi positivo durante todo o mês, onde o fluxo de calor latente medido atingiu uma média de 116 W/m^2 e o estimado correspondeu a 267 W/m^2 .

Figura 8- Comparativo médio diário entre o fluxo de LE medido e estimado do mês de outubro de 2012 na Baía de Caxiuanã, Melgaço-PA. (Utilizando a Tar para encontrar a pressão de vapor de saturação para o método estimado).



Fonte: Da autora.

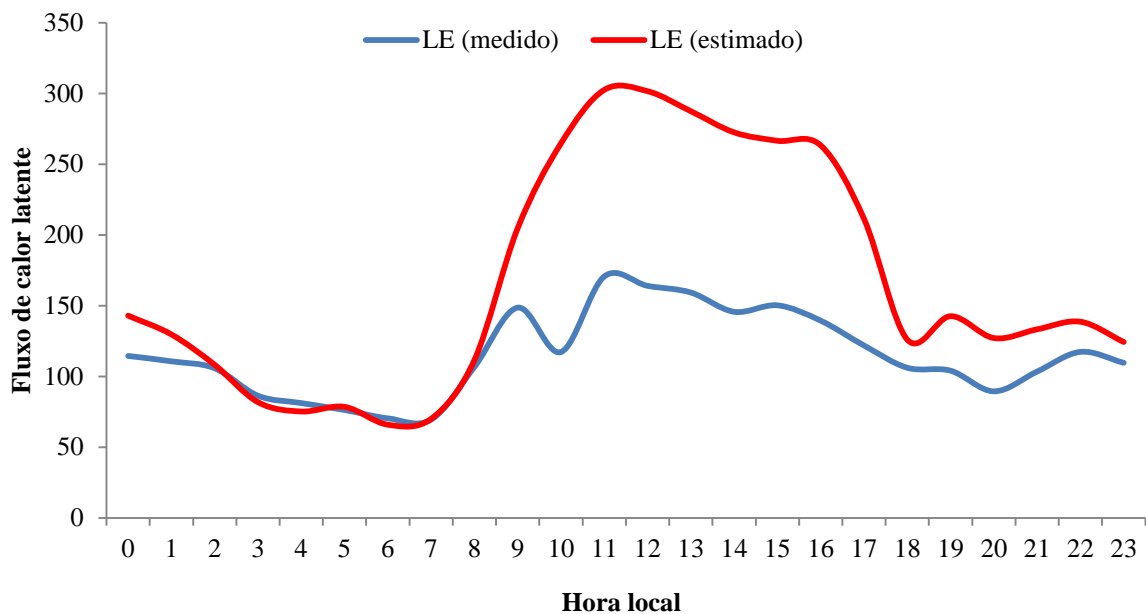
Figura 9- Comparativo diário entre o fluxo de LE medido e estimado do mês de outubro de 2012 na Baía de Caxiuanã, Melgaço-PA. (Utilizando a Tábua para encontrar a pressão de vapor de saturação para o método estimado)



Fonte: Da autora.

A figura 10 mostra o comparativo médio horário do fluxo de calor latente (LE) medido e estimado do mês de outubro de 2012 na Baía de Caxiuanã. Durante boa parte dos horários nota-se que o fluxo de calor estimado é maior que o medido, isso é visto principalmente durante o decorrer do dia coincidindo com os maiores valores de temperatura do ar, durante a madrugada há pouca variação entre ambos. Com isso podemos dizer que esse método superestima o fluxo de energia durante os horários diurnos, quando a diferença entre o fluxo medido e estimado é bem elevada. É importante ressaltar que foi possível ver uma relação, onde a medida que o fluxo latente medido aumentava, tanto a Tar quanto a Tágua aumentavam simultaneamente.

Figura 10- Comparativo médio horário entre o fluxo de LE medido e estimado do mês de outubro de 2012 na Baía de Caxiuanã, Melgaço/Pará.



Fonte: Da autora

5 CONCLUSÃO:

A temperatura da água esteve sempre acima da temperatura do ar, pois a Tar ganha e perde calor com maior rapidez do que a Tágua, tanto na análise diária quanto na horária.

No comportamento médio horário da velocidade do vento foi possível notar que nos horários que correspondem ao período diurno, magnitude da velocidade do vento foi maior, devido o gradiente de temperatura. A predominância do vento é na direção nordeste.

O fluxo de calor sensível medido de modo geral se manteve na maioria dos dias acima do fluxo sensível estimado, mostrando uma subestimativa. O método de estimativa do fluxo de calor sensível acompanhou bem o fluxo de calor medido.

Na análise diária do fluxo de calor latente houve uma superestimativa do mesmo, quando utilizamos a temperatura da água no cálculo da pressão de saturação de vapor, o ideal é utilizar a temperatura do ar para a estimativa. O fluxo de calor estimado horário foi maior que o medido, isso mostra que esse método superestima devido ser levado em consideração um conjunto de variáveis maiores que o fluxo de H, apresentando em alguns horários diurnos uma superestimativa de até 100%, no entanto, nos horários noturnos ele tem uma representação boa. Contudo, de forma geral não é recomendável utilizar esse método para a estimativa de fluxo de LE.

Os valores do fluxo de calor latente medido e estimado apresentaram valores positivos tanto na análise horária dos dias específicos estudados quanto na análise diária para o mês todo. Na análise horária o fluxo de energia era de baixa intensidade nos horários de ausência do Sol, já na análise diária o fluxo de energia apresentava variação pouco evidente em relação à análise diária.

REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, E.; STECH, J.; LORENZZETTI, J.; NOVO, E.; SOUZA, A. Estimativa dos fluxos de calor sensível e latente na superfície da água do reservatório de Itumbiara (GO) por meio de dados MODIS/Terra. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba-PR. Anais... Curitiba-PR : Sociedade de Especialistas Latino-americanos em Sensoriamento Remoto (SELPER), 2011.p.5185.

BALDOCCHI, D. D.; MEYERS, T.P. On using eco-physiological, micrometeorological and biogeochemical theory to valuate carbon dioxide, water vapor and trace gas fluxes over vegetation: a perspective. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.90, n.1, p. 1-25, mar. 1998.

COSTA, M.L; KERN, D.C.; BEHLING, H.; BORGES, M.S. Geologia In: LISBOA, P.L.B. (Org.) **Caxiuanã: Populações tradicionais, meio físico e diversidade biológica**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2002. v.2, p. 179-205.

GASH, J. H. C., NOBRE, C. A. Climatic Effects of Amazonian Deforestation: Some Results from ABRACOS. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 78, 5: 823-830, May, 1997.

LARGE, W.G., DANABASOGLU, G., DONEY, S.C. Sensitivity to surface forcing and boundary layer mixing in a global ocean model: annual-mean climatology. **Journal of Physical Oceanography**. v. 27, p. 2418-2447. 1997.

LISBOA, P. L. B.; SILVA, A. S. L.; ALMEIDA, S. S. Florística e estrutura dos ambientes, Caxiuanã. **Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG)**, Belém/PA, p. 163- 194.1997.

MARTIN, J.L.; MCCUCHEON, S.C. **Hydrodynamics and transport for water quality modeling**. New York: Lewis Publishers. 1999.

MOLION, L. C. B. On the dynamic climatology of the Amazon Basin and associated rain-producing mechanisms. In: DICKINSON, R. (Ed.). **The Geophysiology of Amazonia: vegetation and climate interactions**. New York: Wiley Interscience, 1987. p.391-407.

MORAES, J. C.; COSTA, J. P. R.; ROCHA, E. J. P.; SILVA, I. M. O. **Estudos hidrometeorológicos na Bacia de Caxiuanã, Melgaço/PA**. Belém/PA: Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG), 1997. p 85 - 97.

OORT, A. H.; PEIXOTO, J. P. **Physics of climate**. 1ª Ed. Local: Springer Verlag Pod, 1992.

ROCHA, H. R. DA; GOULDEN, M. L.; MILLER, S. D.; MENTON, M. C.; PINTO, L. D. V. O.; FREITAS, H. C. DEF.; FIGUEIRA, A. M. S. Seasonality of water and heat fluxes over a tropical Forest in eastern Amazonia. **Ecological Application LBA** Special Issue, 2003. (no prelo).

ROTUNNO, R.; EMMANUEL, K. A. An air-sea interaction theory for tropical cyclones. **J. Atmos. Sci.**, v. 44, no. 3, p.542 – 561. 1987.

SILVA DIAS, M. A. F. S., RUTLEDGE, S., KABAT, P., SILVA DIAS , P., NOBRE, C., FISCH, G., DOLMAN, H., ZIPSER, E., GARSGATANG, M., MANZI, A., FUENTES, J., ROCHA, H., MARENGO, J., PLANA-FATTORI, A., SÁ, L. D. A., AVALÁ, R. C. S., ANDREAE, M., ARTAXO, P., GIELOW, R., GATTI, L. Clouds and rain processes in a biosphere atmosphere interaction context in the Amazon Region. **Journal of Geophysical Research**, Volume 107, Issue D20, pages LBA 39-1–LBA 39-18, 27 October 2002.

SHUTTLEWORTH, W. J. Micrometeorology of temperate and tropical forest, **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, Serie B, v. 324, n. 1223, p. 299-334. 1989.

TAO, W. K.; SIMPSON, J. Numerical simulation of a subtropical squall line over Taiwan Strait. **Mon. Wea. Rev.**, n. 119, p. 2699 – 2723. 1991.

WEBSTER, J.; LUKAS, R. TOGA COARE: The Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, n. 73, p. 1377 – 1416. 1992.