

FLUXOS VERTICAIS DE CALOR E ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA NO RESERVATÓRIO PEREIRA DE MIRANDA, CEARÁ.

*Victor Edney Dajtenko Lemos¹; Francisco de Assis de Souza Filho²; Cleiton da Silva Silveira¹;
Samuellson Lopes Cabral¹ & Samiria Maria Oliveira da Silva¹*

Resumo - A estratificação térmica em reservatórios é muito importante visto que implica numa estratificação química, física e biológica, gerando consequências na distribuição espacial de organismos e nos ciclos biogeoquímicos. Este trabalho teve por objetivo geral a identificação da estratificação térmica e de suas forçantes, analisando seus impactos nos processos de mistura e na qualidade da água do reservatório Pereira de Miranda, localizado na cidade de Pentecoste, estado do Ceará. A partir dos dados de temperatura da água foi realizado um balanço térmico do lago que teve por finalidade a determinação da termoclina a cada intervalo de tempo, sua identificação e análise da variação diária e mensal a partir dos fluxos de calor. Os resultados mostraram a influência de alguns fatores climatológicos nas características físicas do reservatório Pereira de Miranda e a tendência de trocas térmicas mais intensas em determinadas camadas ou profundidades, onde foi possível a identificação da termoclina e o limite entre as zonas de diferentes densidades. Concluiu-se que o modelo unidirecional adotado não foi suficiente para explicar a completa transferência vertical de calor; e que os valores negativos encontrados para os fluxos indicaram a importância das correntes aquáticas e sua variação lateral.

Abstract - The thermal stratification in reservoirs is very important since it implies in a chemical, physical and biological stratification, generating consequences in spatial distribution of organisms and biogeochemical cycles. This study aimed to identify the overall thermal stratification and its forcings, analyzing their impact on mixing processes and the water quality of Pereira de Miranda reservoir, in the city of Pentecost, in the Ceara's state. From the data of water temperature, it was carried out a thermal balance of the lake that was aimed at determining the thermocline at each time interval and the analysis of daily and monthly variation from the heat fluxes. The results showed the influence of some climatic factors on the physical characteristics of the Pereira de Miranda reservoir and the trend of heat exchange more intense in certain layers or depths, where it was possible to identify the thermocline and the boundary between zones of different densities. It was concluded that the unidirectional model used was not sufficient to fully explain the vertical transfer of heat, and negative values found for the fluxes indicate the importance of the water currents and its lateral variation.

Palavras-Chave – Estratificação térmica. Pereira de Miranda. Fluxos de calor.

(1) Doutorando do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) pela Universidade Federal do Ceará. E-mail: wictoredney@hotmail.com; samuellsoncabral@hotmail.com; cleitonsilveira@yahoo.com.br; samiriamaria@hotmail.com

(2) Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará. E-mail: assis@ufc.br

1. INTRODUÇÃO

A densidade da água é uma propriedade física muito importante na natureza. Ela é menos densa no estado sólido que no estado líquido. Como consequência direta, o gelo boia sobre a água líquida, fato importante em regiões geladas. O gelo, por ser bom isolante térmico, mantém as camadas mais profundas dos lagos em estado líquido, mantendo a vida mesmo em locais onde a temperatura do ar cai abaixo dos 0°C.

Diferenças na densidade da água propiciam o aparecimento da estratificação térmica, fenômeno que será detalhado mais a frente. Nos reservatórios localizados em regiões tropicais e subtropicais, a grande variabilidade na densidade da água ocorre em função da intensa radiação solar, que gera altas temperaturas. É interessante notar que mesmo pequenas variações de temperatura – na ordem de décimos de grau – podem influenciar na densidade. As diferenças de densidade são em grande parte responsáveis pela regulação de toda a hidrodinâmica lacustre, refletindo impactos em todo o processo metabólico (WETZEL, 1983).

Para o nordeste setentrional brasileiro, variações de 1°C na temperatura da água produzem um efeito similar a variações de até 6°C de certas regiões temperadas (Figura 1).

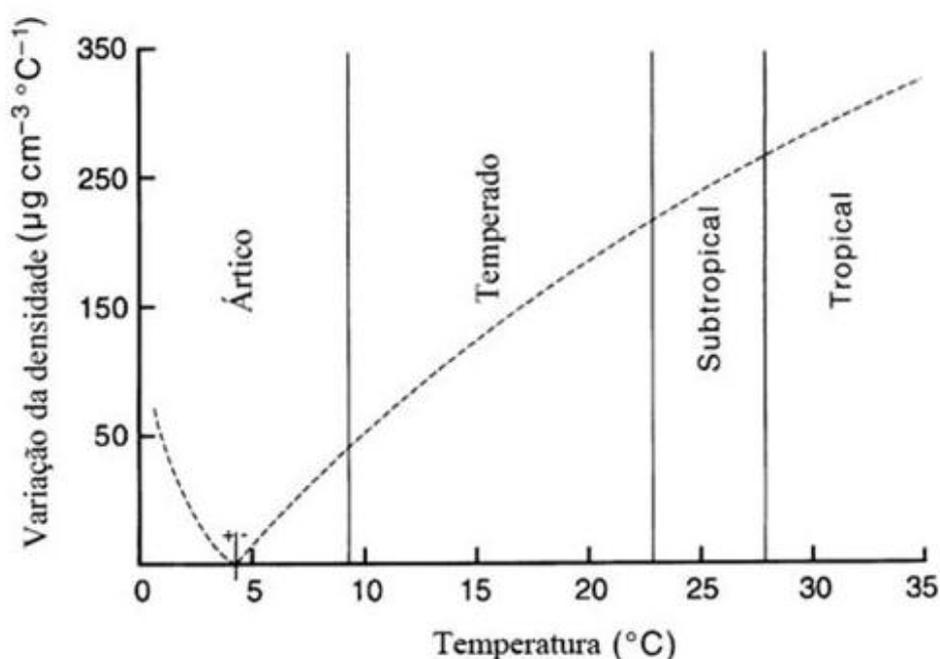


Figura 1. Mudança na densidade relativa ao aumento de 1°C na temperatura da água. Adaptado de Lewis (2000).

Essa relação é devida a não linearidade que a curva densidade-temperatura apresenta. Por ser um parâmetro básico na hidrodinâmica e nos estudos de qualidade de água, seu cálculo deve ser o mais preciso possível.

A distribuição de temperatura em reservatórios é uma característica fundamental desse ecossistema, com repercussão na circulação das águas, processo de mistura, transporte de sedimentos e de nutrientes e no equilíbrio da fauna e da flora do ambiente (RIGHETTO, 1998).

Os ventos e as correntes aquáticas transportam o calor por meio da difusão por turbilhões, levando-o até uma profundidade a qual sua força permita. Estes processos físicos resultam em gradientes de calor, gerando por consequência gradientes químicos que influenciam a distribuição dos organismos dentro do lago. Apesar da condutividade térmica da água ser maior que a de muitos outros líquidos ($0,569\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), a transmissão de calor por difusão molecular é um processo muito lento em comparação com a mistura turbulenta, sendo negligenciado para fins de cálculo em lagos (LAMPERT; SOMMER, 1997).

O efeito da variação de temperatura é de extrema importância nos ambientes aquáticos, visto sua relação direta com a solubilidade de gases. Para o oxigênio, um aumento de 10°C na temperatura reduz sua solubilidade em 20% (LAWS, 1993). Modificações na temperatura também influenciam reações químicas e processos fisiológicos dos organismos, afetando diretamente a resposta de enzimas que controlam suas reações bioquímicas. A conhecida Lei de van't Hoff afirma que um aumento de 10°C duplica a velocidade de uma reação química. Por ser composta por uma série de reações químicas, a atividade metabólica dos organismos aquáticos é afetada por esse incremento de temperatura.

1.1. Estratificação térmica em reservatórios

A estratificação térmica ocorre quando a água do lago atua como dois corpos de diferentes densidades, um flutuando sobre o outro (BARTRAM; BALLANCE, 1996). Assim, a estratificação da densidade é a estratificação não homogênea de um fluido devido às diferenças de densidade (FORD; JOHNSON, 1986).

Dadas as modificações ocorridas pelo represamento de um rio, alterações significativas nos aspectos hidráulicos do sistema transformam o ambiente que antes era lótico em lântico (zona de represamento). Esse ambiente lântico, em algumas épocas do ano, adicionadas de alguns fatores como a profundidade e a temperatura do ar, favorece o aparecimento da estratificação térmica, um processo de gradeamento das temperaturas da superfície e do fundo de um lago (ESTEVES, 1988). Tal processo depende das características físicas da água, provocando efeitos de grande importância nos corpos de água submetidos à radiação solar, visto que as camadas superiores do reservatório absorvem grande parte da energia luminosa, aquecendo-se mais rapidamente. Esse aquecimento diminui a densidade fazendo com que ocorra uma separação das camadas pela diferença de temperatura, criando-se regiões distintas.

A estratificação térmica nos reservatórios é muito importante visto que implica numa estratificação química, física e biológica, gerando consequências na distribuição espacial de organismos e nos ciclos biogeoquímicos. Além disso, todos os processos químicos e biológicos são de alguma forma, dependentes da temperatura (FORD; JOHNSON, 1986).

Um típico perfil térmico de verão que ocorre em lagos temperados pode ser visualizado na Figura 2. De acordo com a faixa de transição térmica, três camadas podem ser descritas:

1. Epilímnio: Camada superior, caracterizada por uma temperatura uniforme e quente devido o recebimento da maior parte da energia solar, possuindo certa turbulência (WETZEL, 1983).
2. Metalímnio: Camada intermediária, localizada entre o epilímnio e o hipolímnio, é marcada por uma grande descontinuidade na temperatura, conhecida também por termoclina.
3. Hipolímnio: Camada inferior, fria e densa; relativamente calmo e subjacente ao metalímnio (WETZEL, 1983).

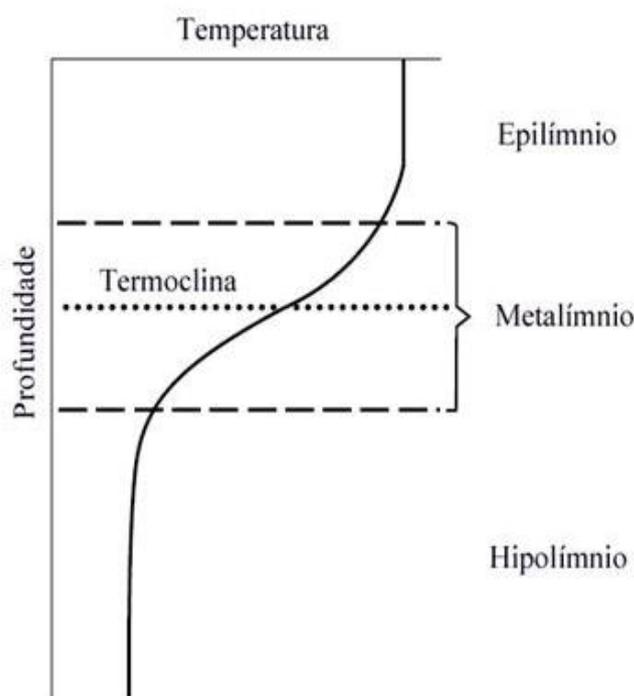


Figura 2. Um típico perfil térmico de verão em lagos temperados. Adaptado de Lampert & Sommer (1997).

O epilímnio é geralmente bem misturado principalmente pela ação direta dos ventos, além de representar a parte menos densa em virtude do aquecimento pela radiação solar (JI, 2007). Este aquecimento juntamente com o aporte de nutrientes (principalmente fósforo e nitrogênio) favorece a produtividade primária, que utiliza essa energia luminosa na produção de matéria orgânica.

Logo abaixo do epilímnio segue o metalímnio, que é uma zona de transição entre as águas mais aquecidas e as águas mais frias. Ele exibe uma taxa máxima de decaimento da temperatura

com relação à profundidade, e o mínimo de mistura vertical (JI, 2007). Embora o termo termoclina seja utilizado frequentemente como sinônimo de metalímnio, a termoclina atualmente representa o plano de taxa máxima de decaimento térmico, que está localizada dentro do metalímnio.

O hipolímnio é a camada que se estende ao longo da profundidade a partir do metalímnio e onde ocorre a sedimentação da matéria orgânica advinda de fontes alóctones e autóctones, dada a estratificação da coluna d'água (ESTEVEZ, 1988; JI, 2007). Nela, uma porção mais densa e fria permanece formada até que alguma força ou energia externa provoque sua mistura. Chin (1996) apresenta uma classificação para lagos com base nos padrões anuais de mistura:

1. Lagos amícticos: Lagos que nunca misturam e estão permanentemente cobertos por gelo, encontrados em regiões frias como a Antártida e em algumas montanhas de grande altitude;
2. Lagos holomícticos: Lagos que apresentam mistura completa da superfície ao fundo, impulsionada pela força dos ventos, não sendo verificada estratificação térmica. Dividem-se em sub-categorias:

- 2.1. Oligomícticos: Caracterizados por uma mistura irregular e de pequena duração; ocorre geralmente em lagos pequenos e médios de regiões tropicais ou em lagos muito profundos;

- 2.2. Monomícticos: Apresentam um período regular de circulação total que ocorre em alguma época do ano. Podem ser quentes, com a temperatura no inverno nunca ficando abaixo de 4°C, ou lagos gelados, com a temperatura máxima de verão não ultrapassando os 4°C. Lagos monomícticos frios estão relacionados com altas latitudes e altitudes e se apresentam congelados a maior parte do ano. O processo de estratificação nesses lagos ocorre devido o aquecimento da superfície. Outro fator importante é o processo de alteração da densidade no hipolímnio, devido a entrada de água de precipitação, que possui uma menor temperatura e com isso, uma maior densidade;

- 2.3. Dimícticos: Lagos que misturam duas vezes por ano, na primavera e no outono;

- 2.4. Polimícticos: Lagos que misturam frequentemente e continuamente, possuindo variações diurnas mais significativas que o caráter sazonal. Muito comum em lagos rasos, que sofrem grande ação dos ventos. A estratificação é formada e mantida por um período curto de tempo, desaparecendo rapidamente.

3. Lagos meromícticos: São lagos que não misturam em toda a extensão da coluna d'água e possuem uma camada que permanece estagnada e sem circulação, denominada monimolímnio. Apresentam uma quantidade significativa de compostos dissolvidos. A anoxia é marcante nesses lagos assim como a formação da quimioclina.

A estratificação térmica pode permanecer formada principalmente em locais onde o vento não atua promovendo a turbulência e a circulação da água, mantendo as camadas de densidades diferentes separadas. Em alguns casos a estratificação das camadas lacustres pode ser resultado de

uma distribuição heterogênea de salinidade, o que é bem menos comum de acontecer (FORD; JOHNSON, 1986).

Segundo Chin (1996), três classes distintas de lagos podem ser identificadas: lagos fortemente estratificados, fracamente estratificados e os não-estratificados. Os primeiros caracterizam-se por apresentarem profundidades elevadas e a presença de isotermas horizontais; o segundo apresenta isotermas inclinadas ao longo de seu eixo longitudinal e por último, lagos não estratificados mostram certa uniformidade na distribuição da temperatura, significando isotermas verticais.

1.2. Objetivos

Este trabalho teve por objetivo geral a identificação da estratificação térmica e em suas possíveis forçantes. Dado sua identificação, objetiva-se traçar seus impactos nos processos de mistura e na qualidade da água do reservatório Pereira de Miranda, localizado na cidade de Pentecoste, estado do Ceará.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização do local de estudo

2.1.1. Bacia hidrográfica do Curu

A bacia do Rio Curu localiza-se na região norte do estado do Ceará e compreendem os municípios de Apuiarés, Canindé, Caridade, Irauçuba, General Sampaio, Itapajé, Paracuru, Paraipaba, Paramoti, Pentecoste, São Gonçalo do Amarante, São Luís do Curu, Tejuçuoca e Umirim, o que representa uma área de aproximadamente 6% do território cearense.

A vegetação é formada principalmente por vestígios de vegetação antiga e da flora inicial da região, além da evolução do ambiente físico global, cujas modificações geológicas, geomorfológicas, pedológicas e climáticas tiveram importância fundamental no estabelecimento e na distribuição da vida vegetal e florística, principalmente nas últimas épocas geológicas com o estabelecimento da caatinga. Seis unidades fito-ecológicas são encontradas, e estão divididas em: complexo vegetacional da Zona Litorânea, que inclui florestas subperinifólias e ciliares de carnaúbas, de caatinga arbustiva densa. É própria de solos planos e profundos; Floresta Subperenifólia Tropical Pluvio-Nebular (Matas Úmidas, Serranas); Floresta Subcaducifólia Tropical Pluvial (Mata Seca); Caatinga Arbustiva Densa - própria de solos ricos e rasos; Caatinga

Arbustiva Aberta - própria de solos pobres e rasos e Floresta Mista Dicótilo-Palmácea (Mata Ciliar com Carnaúba e Dicotiledôneas).

A bacia hidrográfica do açude Pentecoste possui uma área drenada de 2.840 km², abrangendo parte dos municípios de Pentecoste, Apuiarés, Canindé, Caridade e Paramoti. O referido açude se compõe de um maciço de terra compactado, homogêneo, provido de um filtro vertical de alvenaria de pedra arrumada, com uma transição de areia nos paramentos de montante e jusante (ARAÚJO, 1990 *apud* COGERH, 2010). A bacia hidrográfica do açude Pentecoste está inserida na microrregião do Médio Curu. A bacia (Figura 4-1) apresenta características predominantes do semi-árido nordestino, com cobertura vegetal do tipo caatinga arbustiva densa e os solos classificados como bruno não cálcico e litólicos. Com relação ao uso e ocupação do solo, ao longo da bacia hidrográfica existe a prática predominante da cultura do caju e nas áreas próximas à bacia hidráulica são cultivadas, para subsistência, feijão e milho (COGERH, 2010).

2.1.2. Açude pereira de Miranda

O açude Pereira de Miranda, conhecido como açude Pentecoste, localiza-se a 85 km de Fortaleza. Foi construído pelo Departamento de Obras Contra as Secas – DNOCS entre os anos de 1950 e 1957, barrando o rio Canindé na sua foz junto ao rio Curu. Os objetivos da sua construção foram o abastecimento de água, a irrigação, a geração de energia elétrica, a piscicultura e o controle das cheias do rio Curu (COGERH, 2010).

Possui uma área inundável de 54,86 km² e capacidade para armazenar 395.638.000 metros cúbicos e sua barragem, localizada nas coordenadas geográficas 470.797 E e 9.580.258 N, se compõe de um maciço de terra compactado, homogêneo, provido de um filtro vertical de alvenaria de pedra arrumada, com uma transição de areia nos paramentos de montante e jusante (ARAÚJO, 1990 *apud* COGERH, 2010).

Apresenta médios índices pluviométricos, cerca de 817 mm.ano⁻¹, concentrados de janeiro a abril, com temperatura variando de 26 a 28 °C. A classificação climática o enquadra como tropical quente semiárido. A região possui alto poder de evaporação, que provoca um regime de escoamento superficial de alta variabilidade, com cursos d'água intermitentes, apresentando vazões nulas por longos períodos.

2.2. Seleção do ponto de amostragem

Um único ponto de amostragem foi estabelecido, correspondendo a uma posição central aos dois rios afluentes e que não estivesse sobre influência direta dos maciços da barragem.

Neste trabalho procurou-se descrever o fenômeno da estratificação térmica e/ou mistura que ocorre ao longo da coluna d'água, no ponto próximo a tomada d'água. A Figura 5-1 mostra o reservatório Pereira de Miranda e o ponto escolhido (PET-01), localizado às coordenadas UTM 471747,552 e 9579942,792; Zona 24.

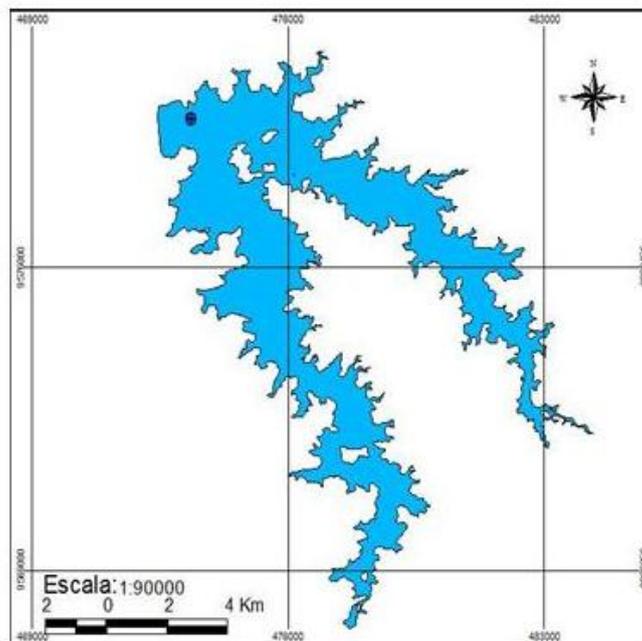


Figura 3. Açude Pereira de Miranda e o ponto escolhido para as amostragens (PET-01), localizado às coordenadas UTM 471747,552 e 9579942,792; Zona 24.

Foi realizada uma campanha de monitoramento mensal que consistiu de medições mensais e nictemerais da temperatura da água, utilizando-se sonda multiparamétrica YSI 6600 ao longo da coluna d'água. O período de amostragem foram os meses de janeiro, fevereiro e abril de 2010, onde foi feita a identificação do processo de estratificação térmica e a análise dos fluxos de calor entre camadas estratificadas.

2.3. Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos mais relevantes foram disponibilizados através das séries históricas das plataformas de coleta de dados (PCD) da FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Os parâmetros destas séries históricas foram a radiação solar, a velocidade e a direção dos ventos, a umidade relativa, a precipitação pluviométrica, a pressão barométrica e a temperatura do ar.

Dados referentes às características geomorfológicas dos açudes foram disponibilizados através de consultas à COGERH (Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará)

e a batimetria do açude Pentecoste, encomendada com a finalidade da futura aplicação de um modelo de qualidade de água.

3. RESULTADOS

A temperatura registrada variou entre 27,03 e 31,77 °C, e apresentou um aquecimento notável da coluna d'água de 3,21°C ao longo do período de amostragem. Tal aquecimento pode ser explicado pela diminuição no volume total do reservatório, que teve pouca ou nenhuma afluência, e permaneceu liberando água através da tomada d'água. Com um volume de água menor, o reservatório tendeu a aumentar sua temperatura, dado a pequena variação da temperatura do ar.

O volume armazenado no reservatório Pereira de Miranda variou entre 283hm³ e 238 hm³ (Figura 4). O volume do reservatório decaiu ao longo das campanhas em virtude da falta de chuvas no período, da intensa evaporação potencial e da contínua liberação de água pela tomada d'água. A redução de 15,6 % e foi decisiva não só para o aumento na temperatura média do reservatório, como também para uma série de outros impactos advindos da diminuição do volume.

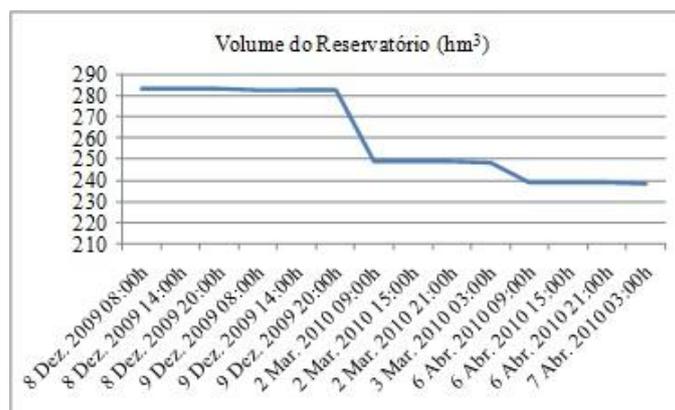


Figura 4. Evolução do volume do reservatório Pereira de Miranda no período de amostragem.

Pela análise dos perfis térmicos do reservatório Pereira de Miranda, pôde-se notar a estratificação térmica em períodos mais ou menos constantes, mostrando certo padrão de mistura ao longo do dia. Este padrão de mistura e estratificação pode ser explicado em grande parte pelo aquecimento do epilímnio durante as horas de influência da luz solar no reservatório, e a tendência de poucos ventos nas primeiras horas do dia. Foi possível notar o deslocamento da termoclina e a variação dos perfis de temperatura que ocorreram em função da hidrodinâmica lacustre.

Este padrão de circulação e estabilidade da coluna d'água em lagos tropicais é função do aquecimento e resfriamento diário. Como é de se esperar, com a radiação solar praticamente constante, os processos hidrodinâmicos passam a ser função da velocidade e duração dos ventos e as afluências principalmente. As amostragens revelaram um padrão governado pela variabilidade

diurna dos ventos. Notou-se uma tendência dos picos na intensidade dos ventos ocorrerem entre as 15h00min e 20h00min (Figuras 5 e 6). Este acréscimo na intensidade dos ventos refletiu diretamente na coluna da água, deslocado a profundidade média da termoclina.

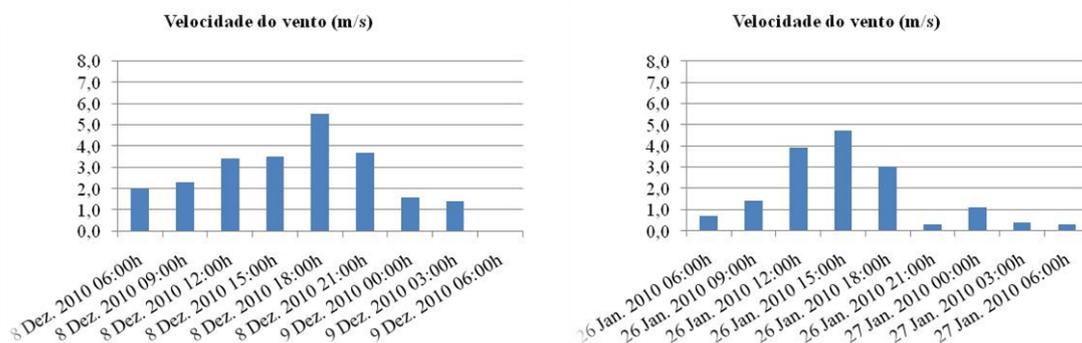


Figura 5. Velocidade dos ventos para o reservatório Perêira de Miranda em 8 e 9 Dez. 2009; 26 e 27 Jan. 2010.

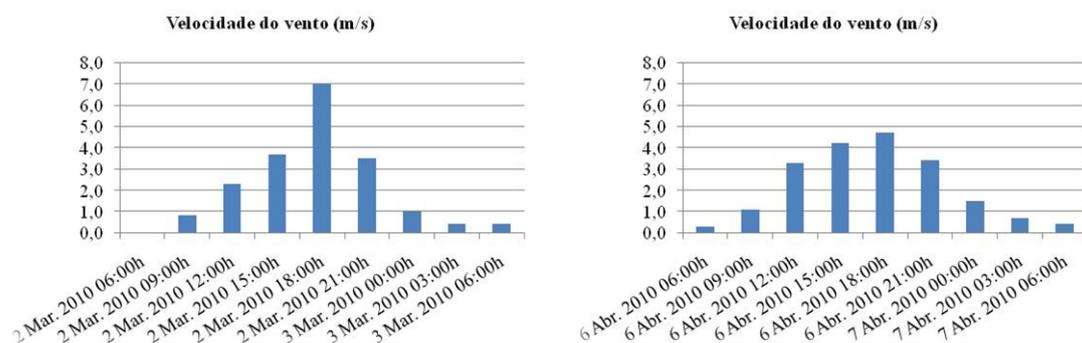


Figura 6. Velocidade dos ventos para o reservatório Perêira de Miranda em 2 e 3 Mar. 2010; 6 e 7 Abr. 2010.

A energia térmica absorvida pela superfície é transferida às camadas mais profundas tanto pela difusão molecular - processo mais lento - como pela advecção da água em movimento, provocado pelas correntes internas. Tal energia é armazenada pelas camadas superiores e se desloca no sentido do fundo do reservatório, sofrendo com a brusca diminuição na transferência devido a formação da termoclina.

De posse dos dados de temperatura da água foi realizada uma avaliação do balanço de energia do lago que teve por finalidade a determinação da profundidade da termoclina a cada intervalo de tempo. Alguns modelos matemáticos são utilizados visando à modelação de tal profundidade, através do balanço entre as energias mecânicas e térmicas (fluxo de calor) que atuam no reservatório. Os ventos, os fluxos de massa (entradas e saídas) e as trocas cinéticas entre o hipolímnio e o epilímnio são as energias mecânicas que promovem a mistura entre as camadas, homogeneizando o sistema.

A energia térmica aquece a camada superficial dos lagos tendo sua origem na radiação solar, e a absorção de tal radiação depende de fatores como comprimento de onda da luz incidente e da

quantidade de material em suspensão. Grande parte dos perfis verticais de temperatura para lagos e reservatórios apresenta características que os tornam particulares. A camada superior (epilímnio) dos lagos geralmente se encontra misturada, devido à ação dos ventos principalmente, e a profundidade deste epilímnio misturado é muito variável, dada as condições hidrometeorológicas locais.

Um modelo bastante simples foi utilizado levando-se em consideração apenas a temperatura como forçante física. Conhecendo-se o perfil térmico da coluna d'água, pôde-se estimar a transferência de calor ao longo da profundidade. Para isso, algumas hipóteses simplificadoras foram assumidas, desconsiderando-se variações longitudinais das camadas e afirmando que o fundo do lago atua como um isolante térmico, portanto, não havendo troca de calor entre o substrato e a camada mais profunda. Chapra (1997) mostrou uma relação para a temperatura e o calor absorvido pela água, mostrado na Equação 1

$$T = \frac{H}{\rho C_p V} \quad (1)$$

Onde T é a temperatura da água em °C; H é o calor, em Joules e Cp é o calor específico, em J (kg °C)⁻¹.

Inicialmente foi realizada a segmentação do lago em camadas horizontais fixas (ΔH) foi calculada a temperatura média para cada camada (Figura 7). Em seguida, foi avaliada a quantidade de calor trocada por cada camada pré-estabelecida, estimando as trocas térmicas, da camada inferior à camada superior.

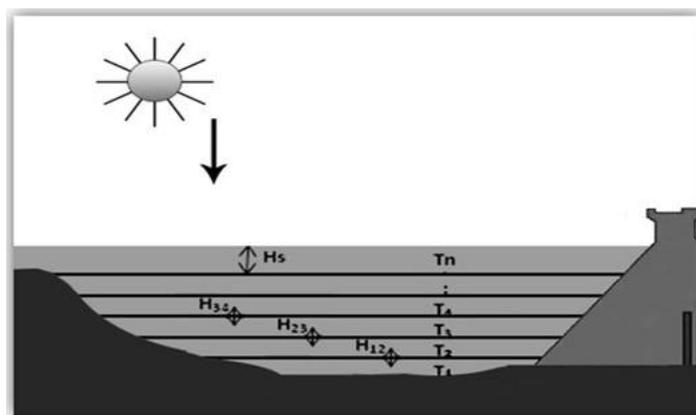


Figura 7. Discretização do reservatório em n camadas horizontais, onde $H_{i,i+1} = H_i + H_{i-1,i}$.

Para cada camada calculou-se a quantidade de calor armazenado, e o perfil formado por todas as diferenças ao longo da coluna d'água forneceu o fluxo de calor por camada por unidade de tempo. Por fim, para a estimação dos fluxos verticais, foram comparados os ganhos caloríficos entre

camadas de igual profundidade, em relação ao tempo. As diferenças ao longo da coluna d'água fornece o fluxo de calor por camada por unidade de tempo, segundo a Equação 2

$$\Delta Q = H_s - H_i \quad (2)$$

Onde ΔQ é a variação no calor armazenado; H_s é o calor da camada superior e H_i o calor da camada inferior.

A diferença da quantidade de calor entre camadas ou a variação na quantidade de calor é resultado da advecção/condução térmica pela coluna d'água. A identificação da termoclina foi feita através deste balanço, pela análise das trocas térmicas. Para variações pequenas ou próximas a zero, pode-se afirmar que não há troca de calor, e, com isso, uma região misturada está presente.

Assim como o balanço de massa, o balanço térmico pode ser escrito com base no volume hídrico. A partir da batimetria do reservatório, foram calculados os volumes do reservatório para cada cota específica. O cálculo do volume do reservatório para cada camada específica foi realizado por meio da ferramenta Solver, ferramenta da planilha do Microsoft Office Excel. O cálculo foi então realizado minimizando os erros relativos entre o cálculo dos volumes e os volumes medidos (batimetria).

Neste modelo unidirecional adotado considerou-se apenas a transferência vertical de calor, em função do aquecimento das camadas superficiais. Mas sabe-se que na realidade os processos de trocas caloríficas ocorrem em todos os sentidos, e isso pôde ser notado com os valores negativos encontrados.

Pontos específicos no reservatório possuem uma tendência em aquecer mais rapidamente e atingir maiores temperaturas. Por exemplo, as margens e a parede da barragem aquecem mais do que a água e esta energia é transferida, deixando alguns pontos do açude com valores térmicos mais elevados. Como consequência direta, correntes convectivas são formadas e são forçadas pela força dos ventos, distribuindo-se em todo o reservatório e criando dinâmicas particulares para cada corpo d'água.

Os gradientes térmicos no epilímnio do reservatório Pereira de Miranda foram evidentes em alguns momentos. O hipolímnio permaneceu com trocas menos intensas e limitadas devido ao bloqueio formado pela termoclina. Na Figura 8 é possível observar um fluxo de calor notável às 14h00min e outro às 18h00min. O primeiro aquecimento foi proporcionado pela radiação solar intensa deste horário. No segundo momento, o fluxo localizado próximo aos seis metros de profundidade indicou o deslocamento da termoclina e o leve aumento da camada misturada, o epilímnio.

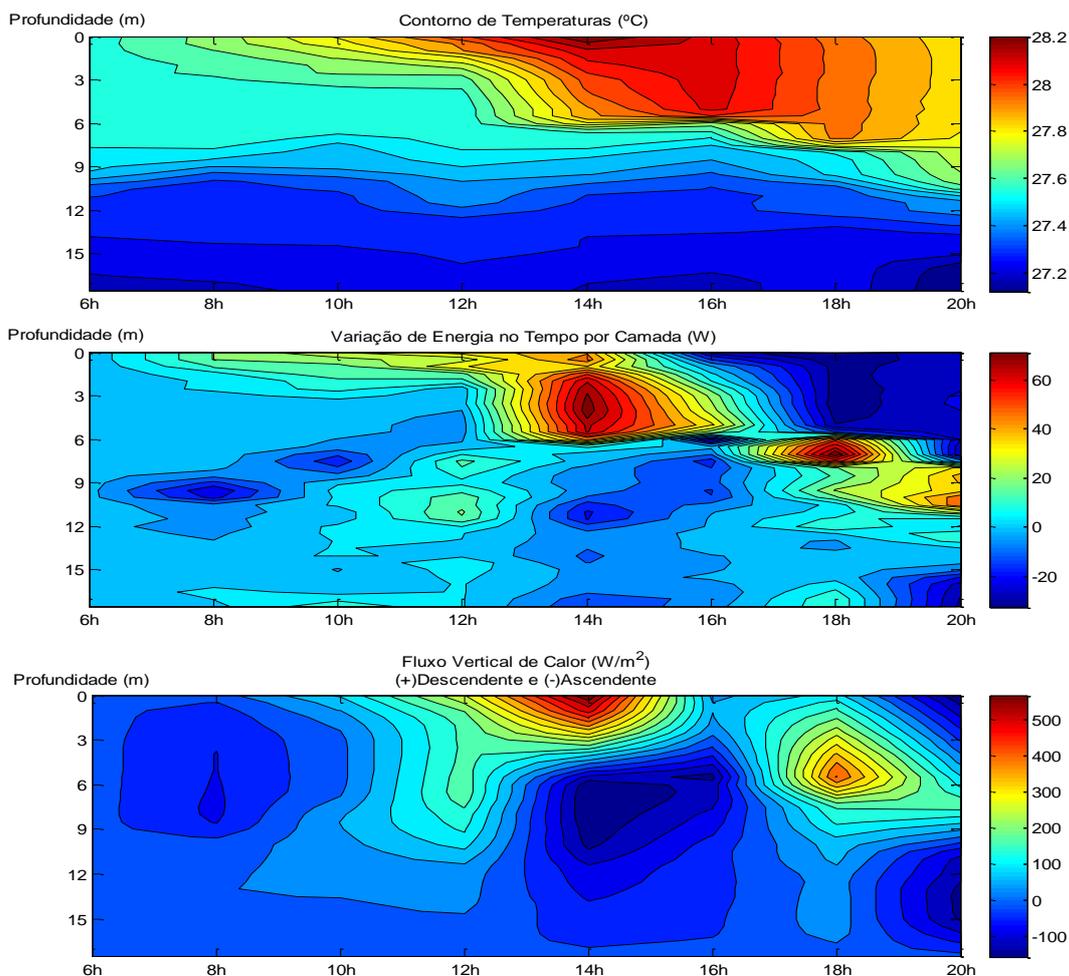


Figura 8. Contornos de temperatura, variação de energia e fluxos verticais de calor em 8 Dez. 2009.

Os gráficos gerados indicaram uma transferência térmica no sentido superfície-fundo e valores negativos, como o valor mínimo para o mês de março significa ganho de calor pela camada mais abaixo, promovida por correntes laterais (Figura 9).

Os ciclos diurnos de estratificação estão ligados ao balanço de energia do reservatório. A transferência de calor por condução, aliada a temperaturas mais altas no período diurno e mais baixas à noite, estaria associada a um processo de diurno/noturno compatível com a estratificação e com a mistura no final do período. Os perfis térmicos muitas vezes mostraram o epilímnio variando ao longo do dia, com a mistura das camadas modificando sua profundidade. É comum ocorrer em reservatórios tropicais uma mistura superficial, com o hipolímnio mantendo-se inalterado.

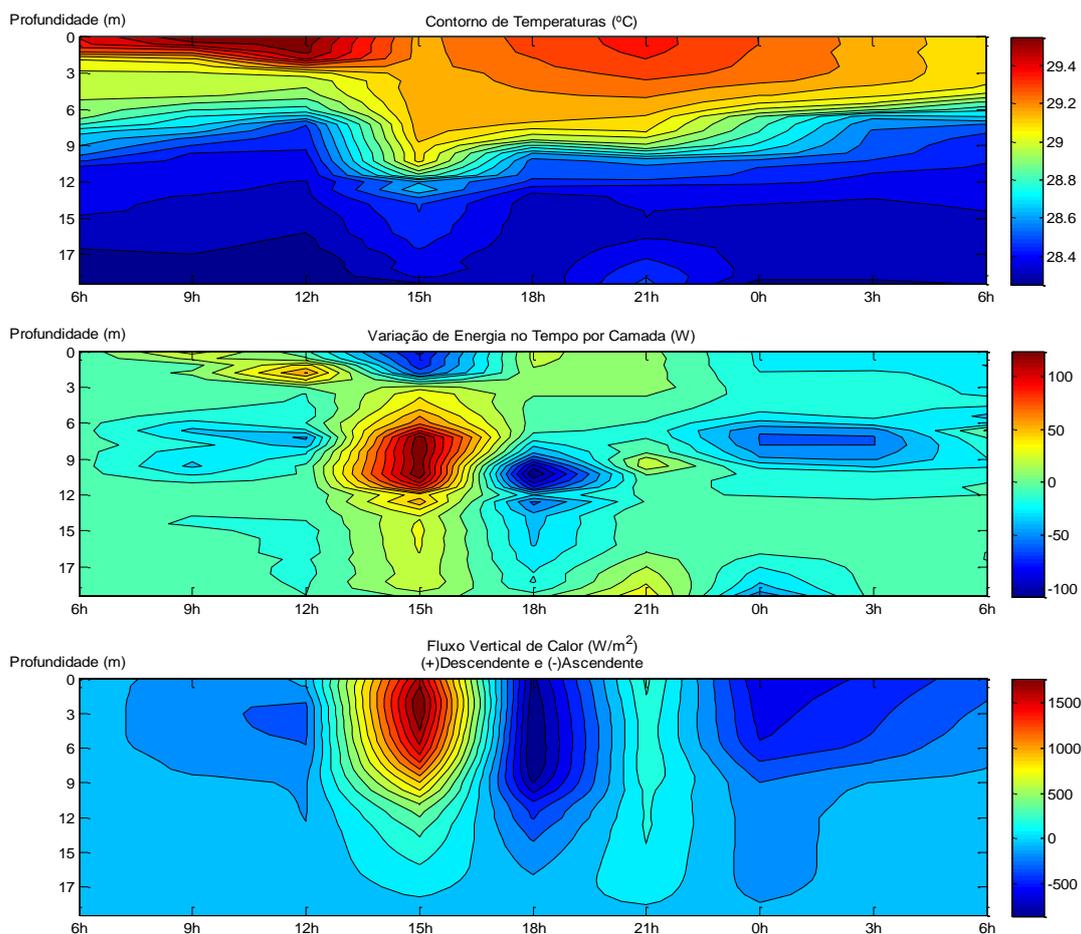


Figura 9. Contornos de temperatura, variação de energia e fluxos verticais de calor em 26 Jan. 2010.

Nota-se na Figura 9 que a variação de temperatura foi mais efetiva às 15h00min, com um aquecimento localizado entre seis e doze metros de profundidade, em função da transferência de calor da camada superficial. Basicamente, em termos de classificação do corpo hídrico, o reservatório Pereira de Miranda variou entre algumas tendências. A análise do padrão de estratificação térmica aplicado ao ponto amostral escolhido no açude Pereira de Miranda permite classificá-lo como polimítico (espaço de tempo em que o reservatório esteve misturado com pequenas estratificações pouco duradouras).

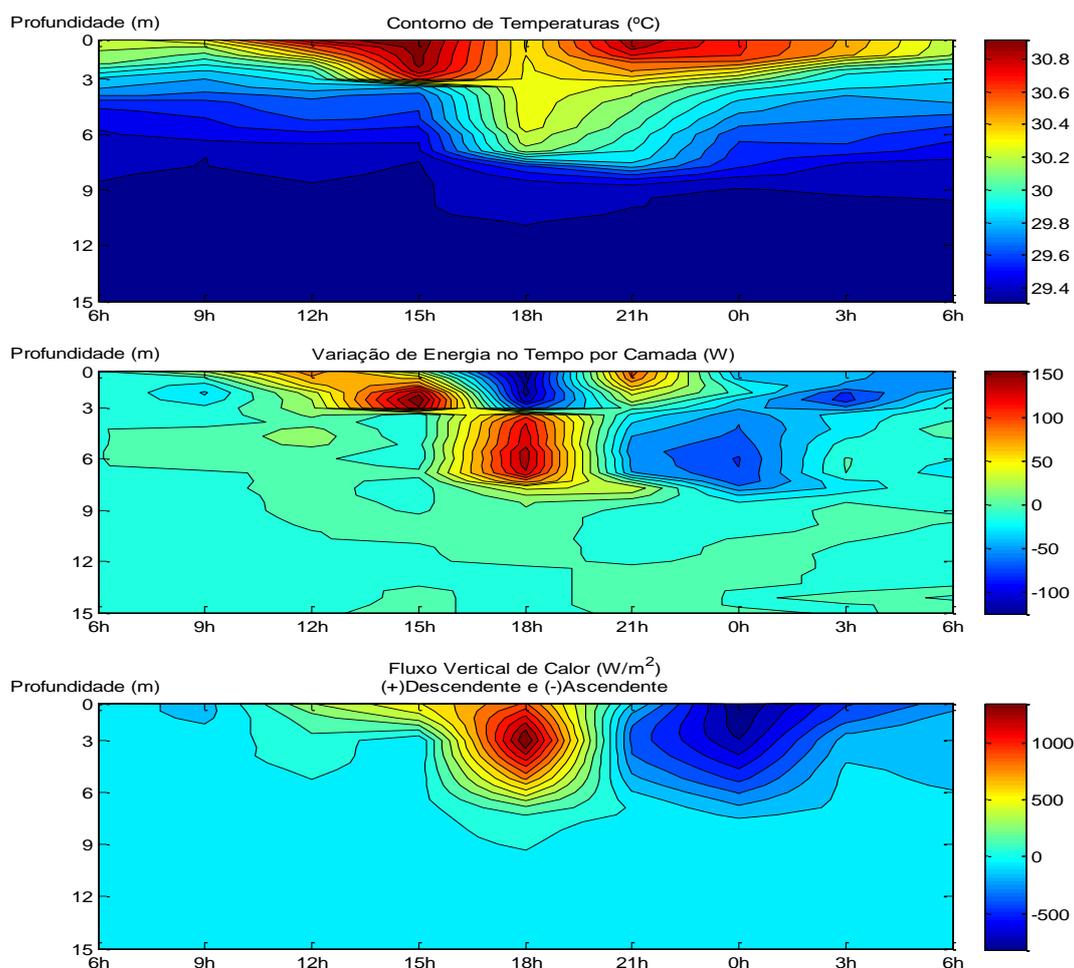


Figura 10. Contornos de temperatura, variação de energia e fluxos verticais em 2 e 3 Mar. 2010.

A caracterização dos perfis verticais de temperatura no reservatório Pereira de Miranda, com base nos dados de campo capturados, forneceu uma base sólida para o entendimento das mudanças provocadas pelo aquecimento da água e a identificação do processo de estratificação térmica. Os resultados mostraram também a clara relação do oxigênio dissolvido e a temperatura da água, e a influência que o processo de estratificação provoca. Em lagos e reservatórios tropicais, como é o caso do reservatório Pereira de Miranda, o consumo de oxigênio é bastante elevado e o efeito da estratificação térmica aumenta os déficits de oxigênio dissolvido a grandes profundidades.

Os fluxos de calor mostraram uma tendência de trocas térmicas mais intensas em determinadas camadas ou profundidades. Na Figura 11 observa-se uma maior homogeneidade das camadas, com uma termoclina fixa próxima aos seis metros de profundidade. Após o aquecimento, às 21h00min, a camada localizada na termoclina passa a perder calor para as camadas limites, formando zonas de resfriamento.

Nota-se que o período noturno representado pelos horários de 21h00min, 00h00min e 03h00min diferem quanto à variação de energia. Isso provavelmente pode ter ocorrido em função

da variabilidade dos ventos, que impactaram mais às 00h00min, provocando uma leve mistura que gerou um impacto no fluxo de calor nas camadas.

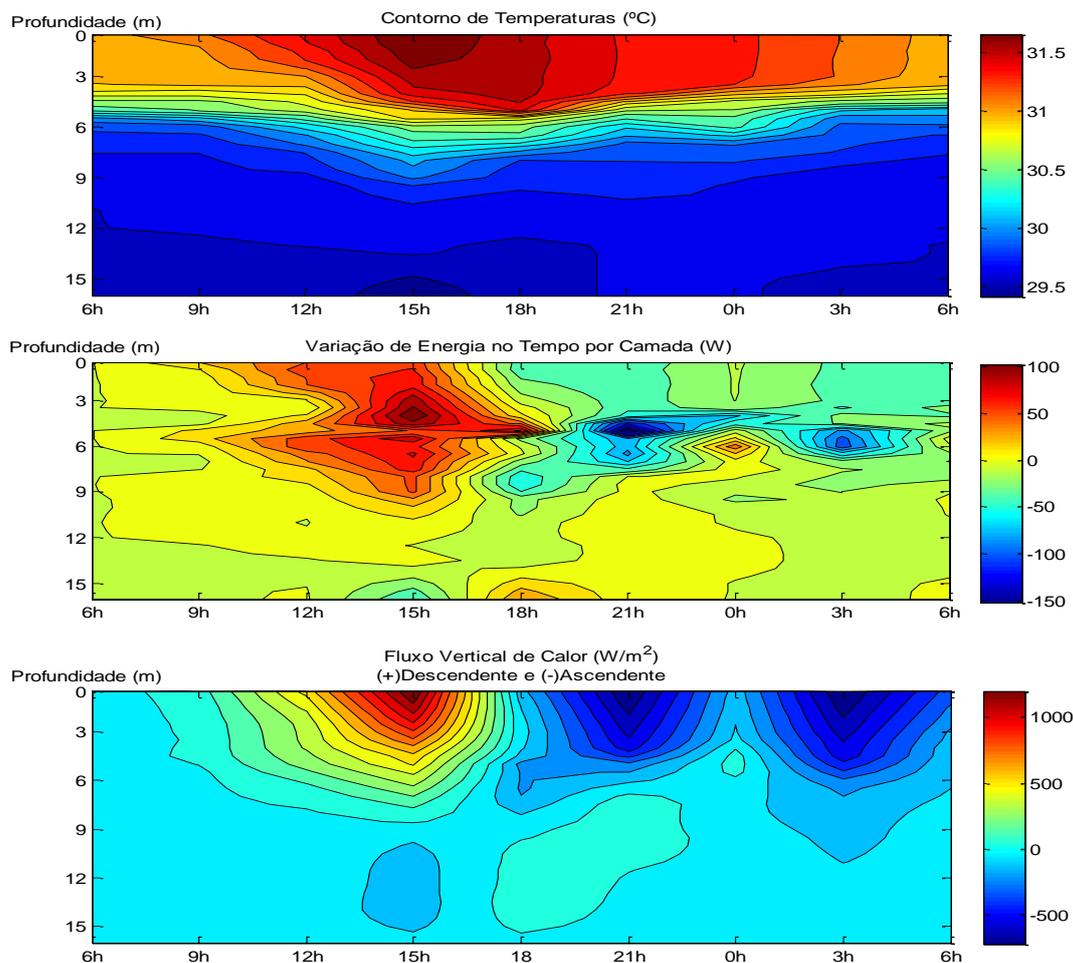


Figura 11. Contornos de temperatura, variação de energia e fluxos verticais em 6 e 7 Abr. 2010.

4. CONCLUSÕES

Os resultados mostraram a influência de alguns fatores climatológicos nas características físicas do reservatório Pereira de Miranda. A temperatura da água é de extrema importância em um ambiente aquático, e representa um dos parâmetros da qualidade da água mais importantes e decisivos na proposição de um sistema de monitoramento. A caracterização dos perfis verticais de temperatura no reservatório Pereira de Miranda, com base nos dados de campo capturados, forneceu uma base sólida para o entendimento das mudanças provocadas pelo aquecimento da água e a identificação do processo de estratificação térmica. Os dados mostraram que o reservatório apresentou-se estratificado em períodos mais ou menos constantes, mostrando certo padrão de mistura e estratificação ao longo do dia. Este padrão de mistura e estratificação pôde ser explicado em grande parte pelo aquecimento do epilímnio durante as horas de influência da luz solar no reservatório, e a tendência de poucos ventos nas primeiras horas do dia.

A partir da primeira campanha de monitoramento do reservatório o volume começou a decair em virtude da falta de chuvas no período, da intensa evaporação potencial e da contínua liberação de água pela tomada d'água. Houve uma redução de 15,6 %, que foi decisiva para o aumento na temperatura média do reservatório.

A variabilidade do perfil térmico diário do reservatório Pereira de Miranda foi uma característica marcante e pôde ser presenciada em todos os meses em que ocorreram medições, caracterizando-o como polimítico (espaço de tempo em que o reservatório esteve misturado com pequenas estratificações pouco duradouras).

Os fluxos de calor mostraram uma tendência de trocas térmicas mais intensas em determinadas camadas ou profundidades, onde foi possível a identificação da termoclina e o limite entre as zonas de diferentes densidades. Os resultados mostraram que o modelo unidirecional adotado não foi suficiente para explicar a completa transferência vertical de calor; e que os valores negativos encontrados para os fluxos indicaram a importância das correntes aquáticas e a variação lateral.

Em pesquisas futuras, a utilização de dados climatológicos, hidrológicos e morfométricos devem ser rotineiras no planejamento de sistemas de monitoramento, visto sua importância na qualidade da água. Com isso, a evolução da modelagem da qualidade da água tornar-se-á ferramenta imprescindível na utilização dos dados obtidos no monitoramento acoplado, com vistas à construção de relatórios que indiquem as reais condições de uso e suporte para a vida e o uso sustentável dos corpos d'água.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudos e ao DEHA (Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental) da Universidade Federal do Ceará, pelo apoio e estrutura fornecida.

BIBLIOGRAFIA

BROWN, L.C; BARNWELL Jr., T.O. (1987). *The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual*. Environmental Research and

CHAPRA, S. C. *Surface water-quality modeling*. McGraw-Hill, New York. 1997. 844 p.

CHIN, David A. *Water-quality engineering in natural systems*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2006. 610p.

COGERH - Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. *Plano de gerenciamento da bacia do Acaraú*. Relatório de tarefas 1 – RT1. Fortaleza, 299 p. 2010.

FORD, D. E.; JOHNSON, L. S. *An Assessment of reservoir Mixing Processes*. Technical Report E-86-7. Prepared by Ford, Thornton, Norton and Associates, Ltd., for the US Army Engineer waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss. 1986.

LAMPERT, W.; SOMMER, U. *LIMNOECOLOGY: The ecology of Lakes and Streams*. New York: Oxford University Press. 382p. 1997.

WETZEL, R G. *Limnology*. Philadelphia: Saunders, (1975) 1983. 860 p.