



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**CARINE FERNANDES PRAXEDES**

**ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO E EUTROFIZAÇÃO EM RESERVATÓRIOS  
ARTIFICIAIS DO SEMIÁRIDO: UMA ABORDAGEM COM MODELAGEM EM  
SENSORIAMENTO REMOTO**

**FORTALEZA**

**2021**

CARINE FERNANDES PRAXEDES

ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO E EUTROFIZAÇÃO EM RESERVATÓRIOS  
ARTIFICIAIS DO SEMIÁRIDO: UMA ABORDAGEM COM MODELAGEM EM  
SENSORIAMENTO REMOTO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Bezerra Lopes  
Coorientador: Prof. Dr. Luis Clenio Jário  
Moreira

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- P91e Praxedes, Carine Fernandes.  
Estimativa da evaporação e eutrofização em reservatórios artificiais do semiárido : Uma abordagem com modelagem em sensoriamento remoto / Carine Fernandes Praxedes. – 2022.  
108 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2022.  
Orientação: Prof. Dr. Fernando Bezerra Lopes.  
Coorientação: Prof. Dr. Luis Clenio Jário Moreira.
1. Imagens de satélite. 2. SEBAL. 3. Influência da sazonalidade climática. 4. Fluxo de nutrientes. 5. Eutrofização. I. Título.

CDD 630

---

CARINE FERNANDES PRAXEDES

ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO E EUTROFIZAÇÃO EM RESERVATÓRIOS  
ARTIFICIAIS DO SEMIÁRIDO: UMA ABORDAGEM COM MODELAGEM EM  
SENSORIAMENTO REMOTO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Aprovada em 30/03/2021

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Fernando Bezerra Lopes (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Luís Clenio Jário Moreira (Coorientador)  
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

---

Prof. Ph.D. Adunias dos Santos Teixeira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Evlyn Marcia Leão de Moraes Novo  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Luciana Gomes Barbosa  
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

Á minha mãe, meus irmãos, minhas irmãs e ao meu companheiro, que tanto acreditaram e se orgulharam de cada pequena conquista.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo.

À minha família, minha mãe Socorro, meus irmãos, em especial à minha irmã Luana e ao meu companheiro e amigo Jonathan, os dois foram muito presentes e fundamentais nessa minha caminhada.

Aos amigos e colegas de estudo que estiveram presentes no meu dia e que vivenciaram comigo os desafios e me ajudaram a vencê-los, agradeço o carinho, o apoio, o acolhimento, a paciência, os conselhos, os ensinamentos, e as palavras motivadoras de todos.

Aos professores do PPGEA, que muito contribuíram com a minha formação, agradeço a todos as orientações, as lições de vida, os risos e a atenção. Vocês são verdadeiros mestres.

A todos os alunos do grupo de pesquisa do MASSA e PPGEA pelos momentos diários de descontração, estudo, ajuda e disponibilização de alguns dados da pesquisa.

Aos professores que me receberam no INPE, professora Evlyn e professor Cláudio e seus orientandos, que tão gentilmente me acolheram no pouco tempo em que estive com eles.

Agradeço em especial ao professor Fernando, que pacientemente ofereceu ajuda, e ajudou compartilhando conhecimento e contribuiu de forma intensa para a construção desse trabalho.

À COGERH pela disponibilização de alguns dados para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará (ADECE) pelo financiamento da pesquisa.

E à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

“Uma vez que você encontra a direção, basta não parar.” Autor desconhecido.

## RESUMO

Longos períodos de seca em regiões áridas e semiáridas geralmente reduzem o nível de água dos reservatórios. Essa redução é intensificada pela elevada evaporação que tende a aumentar a concentração de nutrientes nas águas dos reservatórios, favorecendo o processo de eutrofização. Com isso, objetivou-se estimar a evaporação, utilizando dados de sensoriamento remoto e calcular o balanço de nutrientes, Fósforo (P) e Nitrogênio (N), em reservatórios da região semiárida brasileira. Para isso, os reservatórios Pereira de Miranda, General Sampaio e Orós foram estudados entre 2015 e 2017. A evaporação foi calculada por meio do algoritmo SEBAL e imagens de satélite, e o balanço de nutrientes foi determinado através do fluxo de entrada e saída de nutrientes. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) entre a evaporação estimada pelo SEBAL e métodos de campo foi alto para todos os reservatórios, principalmente para o reservatório General Sampaio, com valor igual a 0,96, seguido de 0,89 do Orós e 0,85 do Pereira de Miranda. O reservatório Pereira de Miranda foi o que apresentou a melhor estimativa média de evaporação ( $4,98 \text{ mm dia}^{-1}$ ) em relação ao dado medido, seguido de General Sampaio ( $4,92 \text{ mm dia}^{-1}$ ) e Orós ( $6,26 \text{ mm dia}^{-1}$ ). O erro médio absoluto (mm) foi de 0,26; 0,11; 0,22, respectivamente, para os reservatórios Pereira de Miranda, General Sampaio e Orós. Portanto, a evaporação em corpos d'água do semiárido brasileiro pode ser quantificada utilizando imagens de satélite. Em relação ao balanço de nutrientes, o fluxo e retenção de nitrogênio total (NT) e fósforo total (PT) pelos reservatórios foi maior nos períodos chuvosos e o reservatório Pereira de Miranda acumulou no período 22,8 toneladas de NT e 2,8 toneladas de PT e o General Sampaio acumulou 13 toneladas de NT e 1,5 toneladas de PT. Os reservatórios Pereira de Miranda e General Sampaio estão retendo os nutrientes NT e PT, sendo considerados locais de armazenamento na bacia hidrográfica do rio Curu, resultando no comprometimento da qualidade das águas pela eutrofização e aumentando os custos para disponibilizar uma água de qualidade para os diferentes usos aos quais os reservatórios se destinam.

**Palavras-chave:** imagens de satélite; SEBAL; influência da sazonalidade climática; fluxo de nutrientes; eutrofização.



## ABSTRACT

Long periods of drought in arid and semi-arid regions often reduce the water level in reservoirs. This reduction is intensified by the high evaporation that tends to increase the concentration of nutrients in the waters of the reservoirs, favoring the eutrophication process. With this, the objective was to estimate evaporation using remote sensing data and calculate the balance of nutrients, Phosphorus (P) and Nitrogen (N), in reservoirs in the Brazilian semi-arid region. For this, the Pereira de Miranda, General Sampaio and Orós reservoirs were studied between 2015 and 2017. Evaporation was calculated using the SEBAL algorithm and satellite images, and the nutrient balance was determined through the inflow and outflow of nutrients. The coefficient of determination ( $R^2$ ) between the evaporation estimated by SEBAL and field methods was high for all reservoirs, mainly for the General Sampaio reservoir with a value equal to 0.96, followed by 0.89 for the Orós and 0.85 for the Pereira de Miranda. The Pereira de Miranda reservoir presented the best average evaporation estimate (4.98 mm day<sup>-1</sup>) in relation to the measured data, followed by General Sampaio (4.92 mm day<sup>-1</sup>) and Orós (6.26 mm Day<sup>-1</sup>). The mean absolute error (mm) was 0.26; 0.11; 0.22, respectively, for the Pereira de Miranda, General Sampaio and Orós reservoirs. Therefore, evaporation in water bodies in the Brazilian semiarid region can be quantified using satellite images. Regarding the nutrient balance, the flow and retention of total nitrogen (NT) and total phosphorus (PT) by the reservoirs was higher in the rainy season and the Pereira de Miranda reservoir accumulated 22.8 tons of NT and 2.8 tons of PT and General Sampaio accumulated 13 tons of NT and 1.5 tons of PT. Pereira de Miranda and General Sampaio reservoirs are retaining NT and PT nutrients, being considered storage sites in the hydrographic basin of the Curu River, resulting in the compromise of water quality by eutrophication and increasing costs to provide quality water for the different uses for which the reservoirs are intended.

**Keywords:** satellite images; SEBAL; influence of climatic seasonality; nutrient flow; eutrophication.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Localização dos reservatórios Pereira de Miranda, General Sampaio e Orós .....	25
Figura 2	– Volume de água armazenada nos reservatórios Pereira de Miranda, General Sampaio e Orós entre 1989 e 2021 .....	26
Figura 3	– Altitude dos reservatórios .....	27
Figura 4	– Fluxograma do cálculo do fluxo de calor sensível (H) .....	46
Figura 5	– Temperatura superficial estimada para o dia 08/08/2015 .....	51
Figura 6	– Temperatura superficial estimada para o dia 25/07/2016 .....	52
Figura 7	– Temperatura superficial estimada para o dia 26/08/2016 .....	52
Figura 8	– Temperatura superficial estimada para o dia 26/06/2017 .....	53
Figura 9	– Temperatura superficial estimada para o dia 13/08/2017 .....	53
Figura 10	– Saldo de radiação médio diário estimado para o dia 08/08/2015 .....	57
Figura 11	– Saldo de radiação médio diário estimado para o dia 25/07/2016 .....	57
Figura 12	– Saldo de radiação médio diário estimado para o dia 26/08/2016 .....	58
Figura 13	– Saldo de radiação médio diário estimado para o dia 26/06/2017 .....	58
Figura 14	– Saldo de radiação médio diário estimado para o dia 13/08/2017 .....	59
Figura 15	– Evaporação estimada para o dia 08/08/2015 .....	62
Figura 16	– Evaporação estimada para o dia 25/07/2016 .....	62
Figura 17	– Evaporação estimada para o dia 26/08/2016 .....	63
Figura 18	– Evaporação estimada para o dia 26/06/2017 .....	63
Figura 19	– Evaporação estimada para o dia 13/08/2017 .....	64
Figura 20	– Validação do modelo de estimativa da evaporação em mm dia <sup>-1</sup> utilizando dados de sensoriamento remoto no reservatório Pereira de Miranda .....	66
Figura 21	– Validação do modelo de estimativa da evaporação em mm dia <sup>-1</sup> utilizando dados de sensoriamento remoto no reservatório General Sampaio .....	66

Figura 22 – Validação do modelo de estimativa da evaporação em $\text{mm dia}^{-1}$ utilizando dados de sensoriamento remoto no reservatório Orós .....	67
Figura 23 – Localização dos pontos de coletas das amostras de água .....	75
Figura 24 – Precipitação e volume de água armazenada .....	79
Figura 25 – Fluxos de entradas de nitrogênio total (NT) e fósforo total (PT) .....	85
Figura 26 – Fluxos de saídas de nitrogênio total (NT) e fósforo total (PT) .....	86
Figura 27 – Fluxos e balanços de nitrogênio total (NT) .....	87
Figura 28 – Fluxos e balanços de fósforo total (PT) .....	87
Figura 29 – Aporte e saída de nitrogênio total (NT) .....	89
Figura 30 – Aporte e saída de fósforo total (PT) .....	89
Figura 31 – Balanço de nitrogênio total (NT) .....	90
Figura 32 – Balanço de fósforo total (PT) .....	90

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Características das bacias hidrográficas dos reservatórios .....	26
Tabela 2	– Dados meteorológicos coletados nas estações .....	32
Tabela 3	– Características dos sensores e bandas utilizadas .....	34
Tabela 4	– Dados das imagens utilizadas do Landsat 8 .....	34
Tabela 5	– Pixels de temperaturas utilizadas em °C .....	42
Tabela 6	– Interpretação dos resultados do R <sup>2</sup> .....	49
Tabela 7	– Avaliação do desempenho do modelo de eficiência de Nash-Sutcliffe .....	49
Tabela 8	– Temperatura superficial em °C .....	54
Tabela 9	– Saldo de radiação médio diário em W m <sup>-2</sup> .....	59
Tabela 10	– Evaporação estimada com o SEBAL em mm dia <sup>-1</sup> .....	64
Tabela 11	– Evaporação nos reservatórios em mm dia <sup>-1</sup> .....	64
Tabela 12	– Análise de erros das estimativas realizadas para o período estudado .....	67
Tabela 13	– Área do espelho de água dos reservatórios em m <sup>2</sup> .....	69
Tabela 14	– Volume diário de água evaporada nos reservatórios em m <sup>3</sup> .....	69
Tabela 15	– Pontos de coletas .....	74
Tabela 16	– Concentrações de nitrogênio total (NT) e fósforo total (PT) .....	81
Tabela 17	– Nutriente limitante de cada período .....	82
Tabela 18	– Vazões de entrada e saída de água .....	83
Tabela 19	– Aportes e saídas de nitrogênio total (NT) e fósforo total (PT) .....	91

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
2	<b>HIPÓTESE</b> .....	14
3	<b>OBJETIVOS</b> .....	14
3.1	Objetivo geral .....	14
3.2	Objetivos específicos .....	14
4	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	15
4.1	Evaporação por sensoriamento remoto .....	15
4.1.1	<i>Evaporação em reservatórios</i> .....	15
4.1.2	<i>Sensoriamento remoto</i> .....	16
4.1.3	<i>SEBAL</i> .....	17
4.1.4	<i>Aplicações do SEBAL para estimar evaporação em reservatórios</i> .....	17
4.2	Disponibilidade e escassez hídrica no semiárido brasileiro .....	19
4.3	Balanco de nutrientes .....	20
4.3.1	<i>Eutrofização</i> .....	20
4.3.2	<i>Nutrientes: N e P</i> .....	21
4.3.3	<i>Aplicações do balanço de nutrientes em reservatórios de água</i> .....	23
5	<b>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	24
6	<b>CAPÍTULO 1 – QUANTIFICAÇÃO DA EVAPORAÇÃO UTILIZANDO DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO EM RESERVATÓRIOS SUPERFICIAIS DO SEMIÁRIDO</b> .....	29
6.1	Introdução .....	30
6.2	Material e métodos .....	32
6.2.1	<i>Dados de campo</i> .....	32
6.2.2	<i>Imagens de satélite</i> .....	33
6.2.3	<i>Tratamento das imagens</i> .....	34
6.2.4	<i>Albedo</i> .....	36
6.2.5	<i>Temperatura superficial</i> .....	36
6.2.6	<i>Índices de vegetação</i> .....	37
6.2.7	<i>SEBAL</i> .....	38
6.2.8	<i>Validação</i> .....	47
6.3	Resultados e discussão .....	50

6.3.1	<i>Temperatura superficial</i> .....	50
6.3.2	<i>Saldo de radiação médio diário (R<sub>nday</sub>)</i> .....	54
6.3.3	<i>Evaporação</i> .....	59
6.3.4	<i>Validação</i> .....	64
6.3.5	<i>Volume evaporado nos reservatórios</i> .....	68
6.4	<b>Conclusões</b> .....	70
7	<b>CAPÍTULO 2 - BALANÇO DE NUTRIENTES EM RESERVATÓRIOS SUPERFICIAIS DO SEMIÁRIDO EM PERÍODO DE SECA EXTREMA</b> .....	72
7.1	<b>Introdução</b> .....	73
7.2	<b>Material e métodos</b> .....	74
7.2.1	<i>Monitoramento</i> .....	74
7.2.2	<i>Balanço hídrico e fluxos de nutrientes</i> .....	75
7.2.3	<i>Balanço de nutrientes: entrada e saída</i> .....	77
7.3	<b>Resultados e discussão</b> .....	78
7.3.1	<i>Precipitação pluviométrica e volume de água armazenada</i> .....	78
7.3.2	<i>Concentrações de nutrientes</i> .....	79
7.3.3	<i>Vazões e fluxos de nutrientes</i> .....	82
7.3.4	<i>Balanço de nutrientes: entrada e saída</i> .....	88
7.4	<b>Conclusões</b> .....	92
8	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	93
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	94

## 1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso estratégico para o desenvolvimento das regiões áridas e semiáridas em todo o mundo. A sua distribuição desigual, o seu consumo excessivo e a poluição causam graves problemas de abastecimento que impactam a harmonia e o desenvolvimento dessas regiões (YU *et al.*, 2018).

Longos períodos de seca em regiões semiáridas geralmente reduzem o nível de água dos reservatórios e dos lagos (ROCHA *et al.*, 2018). A redução do nível de água causada pela alta evaporação e seca tendem a aumentar a concentração de nutrientes da água em reservatórios, favorecendo a dominância e desenvolvimento de cianobactérias (COSTA *et al.*, 2018) e consequente redução da qualidade dessas águas.

As concentrações de nutrientes na água estão associadas à atividade humana na paisagem, e sua carga em águas superficiais é amplamente influenciada por eventos hidrológicos, demandando diferentes práticas de manejo para reduzir seu efeito negativo sobre sua qualidade (RATTAN *et al.*, 2017).

Desde a década de 1980, há um consenso de que a variabilidade espacial da evaporação é importante para o balanço hídrico, o manejo dos recursos hídricos e para o planejamento hídrico, e que por isso são necessários métodos eficazes para sua determinação em escala de paisagem (KALMA; MCVICAR; MCCABE, 2008).

Uma melhor estimativa da evaporação é importante, pois afeta diretamente o manejo dos reservatórios (ALTHOFF *et al.*, 2019). A sua estimativa pode ser realizada utilizando a tecnologia de Sensoriamento Remoto (SR), a partir da entrada de dados espectrais e medições baseadas na superfície (LIU *et al.*, 2019).

Estudos recentes sugeriram que a mudança climática pode exacerbar o processo de eutrofização dos reservatórios (BRASIL *et al.*, 2015), que é intensificado pelo aumento da temperatura, aumento da evaporação e mudança no regime hidrológico das bacias hidrográficas, com consequente alteração no balanço de nutriente, o que torna fundamental seu conhecimento em diferentes períodos para previsão e planejamento hídrico de regiões áridas e semiáridas (OLIVER; RIBEIRO, 2014).

Sendo assim, nesta pesquisa buscou-se aplicar em período de seca extrema, entre 2015 e 2017, em três reservatórios localizados no semiárido brasileiro, métodos de sensoriamento remoto para estimar a evaporação utilizando o algoritmo de fluxo de energia, e realizar o balanço de nutrientes, a fim de verificar a influência da sazonalidade climática sobre o processo de eutrofização.

## **2 HIPÓTESE**

- A utilização de dados de sensoriamento remoto fornece dados espacialmente distribuídos da estimativa de evaporação e reduz o erro na quantificação da evaporação nos reservatórios de água superficial do semiárido;

- A importação e exportação de nutrientes em reservatório de água superficial sofre influência das variações sazonais climáticas e implicam na eutrofização da água dos reservatórios do semiárido.

## **3 OBJETIVOS**

### **3.1 Objetivo Geral**

Estimar a evaporação da água utilizando dados de sensoriamento remoto orbital em reservatórios do semiárido brasileiro, e calcular o balanço dos nutrientes, Fósforo e Nitrogênio, a fim de investigar a influência climática sobre o processo de eutrofização das águas no semiárido.

### **3.2 Objetivos Específicos**

- Estimar a evaporação nos reservatórios com o uso do SEBAL;
- Validar estimativa de evaporação a partir do tanque Classe “A” e de PENMAN (1948);
- Realizar o fluxo de nutrientes;
- Determinar se os reservatórios são detentores ou exportadores de nutrientes.



## 4 REVISÃO DE LITERATURA

### 4.1 Evaporação por sensoriamento remoto

#### 4.1.1 Evaporação em reservatórios

Os reservatórios de regiões áridas e semiáridas atuam como amortecedores para garantir o fornecimento de água para a população e a agropecuária, mitigar inundação e gerar energia hidrelétrica, mas perdem quantidades significativas de água por evaporação (FRIEDRICH, 2018).

A evaporação é um dos principais processos envolvidos no balanço hídrico e de calor em reservatórios (VIEIRA, 2016) sendo responsável por transferir grandes quantidades de água e energia (por meio do fluxo de calor latente) para a atmosfera (CURTARELLI *et al.*, 2013).

Os impactos da evaporação da água em reservatórios variam com sua localização, diferenças climáticas, suas características hidrodinâmicas e com as práticas de gerenciamento e uso da água (WURBS; AYALA, 2014). Fatores como temperatura, pressão atmosférica, pressão de vapor, umidade relativa do ar, vento, aspectos fisiográficos e radiação solar são intensificadores ou amenizadores da evaporação (CARVALHO, 2006).

Com isso, conhecer a taxa de evaporação das águas superficiais, como canais e lagos, é essencial para o gerenciamento preciso do balanço hídrico. No entanto, é difícil realizar medidas de evaporação sobre superfícies de água experimentalmente (TANNY *et al.*, 2008), o que tem motivado pesquisas voltadas ao desenvolvimento de métodos e modelos matemáticos para sua estimativa (SUN *et al.*, 2011).

Alguns dos modelos meteorológicos para a estimativa da evapotranspiração são os de Penman (1948), Kohler *et al.* (1955), Morton (1983) e Linacre (1993). Muitos deles são usados em escala de campo, são pontuais, limitando-se a uma pequena área, e requerem parâmetros complexos de entrada, os quais são estimados e medidos por instrumentos meteorológicos incorrendo em alto custo de monitoramento, pois são dispendiosos, de difícil obtenção, não fornecendo dados em tempo real (MELESSE; ABTEW; DESSALEGNE, 2009). A utilização de sensoriamento remoto é uma opção de baixo custo e com grande cobertura que tem sido usada para a obtenção da evapotranspiração em diversas áreas (SILVA, 2012).

#### 4.1.2 Sensoriamento remoto

Sensoriamento Remoto (SR) é a técnica que permite obter imagens e outros tipos de dados da superfície terrestre, por meio da captação e do registro da energia refletida ou emitida pela superfície (FLORENZANO, 2011).

A obtenção de imagens da superfície terrestre se dá por meio de sensores remotos acoplados a plataformas de SR. O sensor capta a energia refletida pelo objeto e fornece dados em número digital (STEFFEN, 2016). Esse processo ocorre através do registro da energia refletida/emitida pela superfície terrestre em faixas do espectro eletromagnético (STEFFEN, 2016).

O espectro eletromagnético representa a distribuição por regiões da radiação eletromagnética diferenciado pelo seu comprimento de onda e frequência (SUN *et al.*, 2011). As faixas de ondas eletromagnéticas frequentemente utilizadas no estudo de processos hidrológicos têm sido a do visível (VIS) e a do infravermelho (IV), dividido em regiões do infravermelho próximo, médio e distante ou termal (TEIXEIRA, 2018).

Com o avanço da tecnologia, imageamentos orbitais da superfície terrestre têm sido direcionados a fornecer informações sobre os processos do sistema terrestre e para aumentar as previsões das variáveis relacionadas ao clima, superfície terrestre e processos hidrológicos (PFEIFER *et al.*, 2012). Informações de cobertura da terra, cobertura vegetal, emissividade, albedo, temperatura da superfície e fluxo de energia são exemplos de variáveis que podem ser estimadas por meio de SR (MELESSE; ABTEW; DESSALEGNE, 2009).

O monitoramento de processos hidrológicos em grande escala como a evapotranspiração é de grande importância para avaliar o impacto do clima e dos efeitos antropogênicos sobre os ecossistemas naturais ou agrícolas na superfície terrestre (KUSTAS; NORMAN, 1996). Os métodos de sensoriamento remoto podem ser aplicados a grandes áreas onde os dados meteorológicos não estão disponíveis e a coleta de dados em escala de campo é dispendiosa, morosa e de difícil aquisição (MELESSE; ABTEW; DESSALEGNE, 2009).

Durante as duas últimas décadas, vários métodos de SR para a obtenção de medidas de evapotranspiração foram desenvolvidos dentre os quais pode-se destacar o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL) e o *Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration* (METRIC), sendo o SEBAL considerado bastante preciso em suas estimativas (SILVA, 2012). As imagens de sistemas de SR, frequentemente combinadas com informações terrestres auxiliares, permitem gerar informações precisas em escala temporal e espacial dos

principais parâmetros que caracterizam as interações da superfície terrestre (PETROPOULOS *et al.*, 2009), inclusive os fluxos de energia de superfície utilizados no algoritmo SEBAL.

#### **4.1.3 SEBAL**

O SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) é um modelo proposto por Bastiaanssen *et al.* (1998) buscando maior eficiência na determinação do balanço de energia de superfície em grande escala, uma vez que os modelos até então desenvolvidos eram resumidos e insatisfatórios para lidar com superfícies de características heterogêneas e de grande escala. Após sua formulação foi implementado e validado por diversos autores em diferentes países (TEIXEIRA, 2018).

O algoritmo SEBAL utiliza imagens de satélites que propiciam informações sobre a radiação eletromagnética na região do visível, na região do infravermelho próximo e do infravermelho termal. Além disto, requer dados meteorológicos como a velocidade do vento e a temperatura do ar para o cômputo do balanço de energia (BASTIAANSSEN *et al.*, 1998; ALLEN *et al.*, 2001; ALLEN *et al.*, 2002).

No modelo, além de serem utilizados alguns dados meteorológicos, informações como a temperatura superficial, reflectância, índices de vegetação e as suas interrelações são estimados e usados para inferir os fluxos de radiação que ocorrem na superfície terrestre em uma ampla área, seja ela com presença ou não de água (BASTIAANSSEN *et al.*, 1998).

#### **4.1.4 Aplicações do SEBAL para estimar evaporação em reservatórios**

Aynew (2003) estudou a aplicação do SEBAL em quatro reservatórios inseridos em fendas tectônicas na Etiópia. O autor utilizou uma imagem TM (*Thematic Mapper*) do dia 21/11/1989 e validou seus resultados a partir de dados de tanques Classe “A”. Seu objetivo foi verificar a evaporação nos reservatórios e seu entorno. As estimativas obtidas indicaram que existem grandes variações nos valores obtidos no entorno dos reservatórios, sendo dentro deles encontradas as melhores estimativas. O autor concluiu que o modelo SEBAL tem grandes implicações e relevância para estudos dos recursos hídricos da África devido à escassez de dados hidrometeorológicos da região.

Sun *et al.* (2011) avaliaram a aplicação do SEBAL em uma zona úmida, no lago Nansi, localizada na China. Para isso utilizaram uma imagem do satélite Landsat 7 sensor ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) do dia 23/04/2000. A validação do modelo foi realizada a

partir de dados de três estações meteorológicas próximas à área de estudo. O maior valor da estimativa realizada pelo SEBAL foi encontrado para corpos de água. Foi verificado que essa estimativa está na mesma ordem de grandeza da observação de evaporação no tanque Classe “A” das estações meteorológicas. Isso permitiu aos autores inferirem que o SEBAL pode ser uma ferramenta viável para a estimativa diária da evaporação da área estudada.

Hassan (2013) aplicou o SEBAL utilizando dados de SR a um dos mais importantes reservatórios de água doce do Egito e do mundo, o lago Nasser, localizado na região árida do sul do Egito. O autor estimou a evaporação nesse lago e comparou seus resultados a outros obtidos por seis diferentes métodos convencionais de estimativa de evaporação. Foram utilizadas sete imagens do sensor TM, do período de outubro de 1998 a outubro de 2000. Os resultados obtidos indicaram que os métodos de evaporação, que incluíam em seus cálculos energia disponível e termos aerodinâmicos, forneceram as melhores comparações com a evaporação obtida pelo SEBAL.

Kiptala *et al.* (2013) investigaram a aplicação do SEBAL na bacia hidrográfica do Alto Pangani, savana semiárida, localizada na África. Um de seus objetivos foi avaliar a evaporação no lago Nyumba ya Mungu (Nym). Para isso utilizaram 138 imagens do sensor MODIS (*MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer*) obtidas por meio dos satélites Terra e Aqua entre 2008 e 2010. Seus resultados foram validados a partir de dados medidos em tanques Classes A. Com isso obtiveram correlações robustas, com erro médio absoluto e raiz quadrática média do erro inferiores a 5%. Concluíram que os resultados obtidos da estimativa da evaporação teriam potencial para uso em análise hidrológica e contabilização da água em corpos hídricos.

Losgedaragh e Rahimzadegan (2018) utilizaram o SEBAL para estimar a evaporação do lago barrado pela represa Amirkabir, localizado no semiárido do Irã, e compararam às metodologias METRIC (*Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration*) e SEBS (*Surface Energy Balance System*). Para isso utilizaram 16 imagens dos satélites Landsat 5 sensor TM (*Thematic Mapper*) e Landsat 8 sensor OLI (*Operational Land Imager*), do período de 2011 a 2017. A validação foi realizada a partir de dados medidos no tanque Classe “A”. Com relação aos resultados, os autores concluíram que com as metodologias foi possível estimar a evaporação de lago de água doce, com aproximações satisfatórias.

As várias aplicações anteriormente citadas demonstraram a capacidade do SEBAL em estimar a evapotranspiração e evaporação diária com precisão, com pouco ou nenhum dado meteorológico em terra. Em contrapartida, métodos convencionais de estimativa de evapotranspiração (tanque, lisímetro, razão de Bowen, correlação de vórtices ou técnicas

aerodinâmicas) possuem grandes limitações, pois exigem dados e informações meteorológicas que podem não estar disponíveis localmente e em escalas temporais adequadas ao estudo (KIPTALA *et al.*, 2013). Além disso produzem essencialmente valores pontuais de evaporação e, portanto, são aplicáveis apenas a uma área homogênea ao redor do equipamento que é exposto aos mesmos fatores ambientais.

#### **4.2 Disponibilidade e escassez hídrica no semiárido brasileiro**

A água é a substância mais importante na natureza. Isto ocorre porque a existência de todas as formas de vida conhecidas depende dela e, atualmente, sua disponibilidade e qualidade são temas discutidos mundialmente. Questões como a pouca oferta e grande demanda em algumas regiões do Brasil são situações críticas para o seu gerenciamento e garantia de atendimento dos usos múltiplos. É fundamental destacar que o abastecimento de água não só depende da quantidade, mas em especial da qualidade, e este é um desafio a ser superado por toda a sociedade (LOPES *et al.*, 2014).

Desde os primórdios até os dias atuais, a água passou por mudanças de qualidade. Esse problema é mais grave em regiões secas, pois persiste um déficit hídrico natural devido a fatores climáticos (ROCHA *et al.*, 2016). Dentre tais alterações físicas, químicas e biológicas que podem ocorrer na qualidade das águas destacam-se as decorrentes do processo de eutrofização, definida como o aumento da fertilidade dos ambientes aquáticos. Neste sentido, entende-se que o excesso de nutrientes no ambiente aquático propicia o desenvolvimento de plantas aquáticas na superfície da água, interferindo na entrada de raios solares no ambiente e afetando a vida ali existente em todas as suas formas (BATISTA *et al.*, 2014).

As secas extremas e a escassez hídrica causam danos socioeconômicos e ambientais significativos em todo o mundo (GETIRANA, 2016). Nesse contexto, o fenômeno das secas é apontado em diversos estudos como uma das principais variáveis responsáveis pelo atraso no desenvolvimento de uma região (PRAXEDES *et al.*, 2020).

Conforme aborda a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA (2017), nos últimos anos têm sido observados eventos extremos de excesso ou escassez de chuva no Brasil. Apesar da alta disponibilidade de água por habitante, sua distribuição ocorre de forma desigual. Cerca de 75% da água doce do país está localizada na Bacia do rio Amazonas, que é habitada por 8% da população brasileira (IBGE, 2010).

O semiárido brasileiro está presente em 1.262 municípios distribuídos pelos estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Minas Gerais, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do

Norte e Sergipe (SUDENE, 2017). Ele possui uma área muito extensa, que geralmente sofre com os déficits hídricos em função das frequentes secas (PRAXEDES *et al.*, 2020).

Os critérios utilizados para a determinação da região semiárida foram a precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm, o índice de Aridez de Thornthwaite igual ou inferior a 0,50 e o percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60%, considerando todos os dias do ano (BRASIL, 2017).

Entre os estados brasileiros contidos no semiárido o Ceará é o mais seco, apresentando alta variabilidade temporal e espacial das precipitações pluviométricas, assim como altas taxas de evaporação (SOUZA *et al.*, 2017).

No Ceará, além da escassez hídrica ocasionada pelo baixo índice pluviométrico, ocorrem altas taxas de evaporação e pequena capacidade de acumulação de água em aquíferos. Noventa e três por cento de seu território estão inseridos na região semiárida e 75% de sua área é formada por rochas cristalinas (COGERH, 2018).

O Ceará é o estado brasileiro com maior número de reservatórios construídos, sendo em 2013 contabilizado um total 28.195 corpos de água com espelho de água acima de 0,30 hectares (FUNCEME, 2016). A disponibilidade de água nesta região é baseada na construção de reservatórios de superfície de pequeno, médio e grande porte (CHAVES *et al.*, 2019) que enfrentam sérios problemas, além de quantidade, de qualidade de água devido a problemas relacionados com a questão da eutrofização.

### **4.3 Balanço de nutrientes**

#### **4.3.1 Eutrofização**

Os reservatórios artificiais foram construídos no semiárido para mitigar os efeitos da escassez hídrica, baixo índice pluviométrico, irregularidade espacial e temporal das chuvas e pela distribuição concentrada da chuva em poucos meses do ano. Entretanto, a degradação desses reservatórios artificiais ao longo do tempo tem sido um dos mais sérios problemas socioambientais do Nordeste no Brasil (OLIVEIRA, 2006).

À medida que a população humana aumenta e o uso da terra se intensifica, as florações das algas são cada vez mais frequentes em reservatórios artificiais de água doce (SCHINDLER *et al.*, 2016). A presença dessas algas está relacionada às respostas do sistema aquático ao excesso de nutrientes e consequente eutrofização.

A eutrofização, de acordo com Esteves (1988), é o aumento da concentração de nutrientes, especialmente fósforo e nitrogênio, nos ecossistemas aquáticos, que tem como

consequência o aumento de suas produtividades. Em outras palavras, a eutrofização consiste no enriquecimento da água dos reservatórios artificiais com nutrientes, principalmente, fósforo e nitrogênio, causando a rápida proliferação das cianobactérias. Elas são resultado principalmente das atividades antrópicas desenvolvidas nas áreas de contribuição desses reservatórios, e são agravadas devido às características naturais de escassez hídrica do semiárido (BARROS, 2013).

Algumas das características das regiões semiáridas contribuem para a degradação da qualidade das águas dos seus reservatórios artificiais, dentre as quais, os longos períodos de seca, o regime intermitente dos rios, e as altas taxas de evaporação. Esses fatores favorecem a condição de eutrofização e inviabilizam o uso da água dos mananciais devido ao aumento da concentração de nutrientes como o N e P (COSTA *et al.*, 2009).

Tal degradação da qualidade da água nos reservatórios artificiais gera diversos impactos negativos. Os impactos negativos ocasionados são anaerobiose no corpo d'água, mortandade da fauna, dificuldade e alto custo para o tratamento da água e redução da navegação e da capacidade de transporte (VON SPERLING, 2005).

Em face das dificuldades relativas à disponibilidade de água no semiárido brasileiro tanto quanto ao volume disponível (quantidade) e a sua qualidade, o monitoramento limnológico torna-se ferramenta essencial para o seu desenvolvimento, uma vez que proporciona diretrizes para o gerenciamento e exploração sustentável da água disponibilizada nesses reservatórios artificiais, contribuindo assim para a redução de conflitos entre os usuários pelo uso da água e dando fundamentação à tomada de decisões, favorecendo o desenvolvimento econômico-social e ambiental (SILVA, 2003).

#### **4.3.2 Nutrientes: N e P**

O nitrogênio, assim como o fósforo, é considerado um dos macronutrientes mais importantes para o desenvolvimento da vida aquática, sendo conhecido como um dos principais constituintes das células de todos os seres vivos (BARROS, 2013). O transporte de água por meio de rios e córregos é o caminho mais importante da entrada desses nutrientes em lagos (BHAT; MERAJ; PANDIT, 2015). A sua entrada também está associada à contribuição de esgotos que são lançados nos lagos sem tratamento e como consequência ocorre o enriquecimento do corpo hídrico (LAMPARELLI, 2004). Sendo a medição da carga de nutrientes dos sistemas lênticos o primeiro passo para o manejo sustentável dos lagos.

O excesso de nutrientes, especificamente o nitrogênio e o fósforo, são os principais responsáveis pela proliferação de algas em corpos hídricos, que pode resultar no processo de

eutrofização; associado a isso, tem-se as variáveis climáticas que intensificam ou atenuam esse processo de eutrofização. Segundo Rocha *et al.* (2019) “as concentrações de fósforo total (PT) e nitrogênio total (NT) têm grande influência na produtividade de ecossistemas aquáticos como parte do metabolismo do fitoplâncton, incluindo cianobactérias”.

A precipitação pluviométrica, associada às condições ambientais locais, é uma das variáveis que influenciam o processo de eutrofização. Soma-se a isto, sua atuação no aporte de água ao reservatório, fazendo com que as cargas dos nutrientes sejam aumentadas devido ao escoamento e carreamento de sedimentos para dentro do reservatório (COPPENS *et al.*, 2016). A pluviometria também está relacionada com a dissolução desses nutrientes, ocasionando uma redução de sua concentração devido ao aumento do volume de água armazenada nos reservatórios (IPIRANGA, 2016).

A evaporação atua na intensificação do processo de eutrofização, pois ela pode influenciar nos diversos atributos determinantes da qualidade da água, como por exemplo, aumentar a concentração de nutrientes por evaporação devido ao grande volume de água retirada dos reservatórios artificiais. Acrescenta-se como consequência, o aumento no tempo de residência da água, fato que reduz a sua renovação (BEZERRA, 2011).

Diversos estudos discutem a importância da relação N:P para a determinação do nutriente limitante em corpos hídricos (ROCHA *et al.*, 2019). Segundo Wiegand, Piedra e Araújo (2016) a razão entre nitrogênio total e fósforo total da água (N:P) tem sido amplamente utilizada para identificar a limitação da produtividade primária fitoplanctônica pelo nutriente. Essa discussão teve início com o trabalho de Redfield (1958), no qual observou a existência de uma razão média atômica relativamente uniforme de  $C_{106}:N_{16}:P_1$  em um material particulado marinho.

Embora o trabalho de Redfield (1958) tenha sido elaborado na década de 50, ainda hoje os limites da razão N:P têm sido comumente utilizados em pesquisas de avaliação da suficiência – deficiência nutricional dos organismos fitoplanctônicos. No estudo de Redfield (1958), em plâncton marinho, foi observado que quando um sistema possui sua razão N:P alta, ou seja  $\geq 16:1$ , assume-se que esse sistema seja limitado por fósforo, entretanto, quando o inverso ocorre, baixa razão N:P, assume-se que a limitação é por nitrogênio (LOURO, 2011).

Sturner *et al.* (2008) examinaram os dados e a consistência da razão C:N:P do trabalho de Redfield, tanto para água doce como para água salgada, e concluíram que numa ampla escala espacial e temporal, em um ecossistema aquático, marinho ou de água doce, rico em C e pobre em N e P a razão clássica de Redfield é apropriada.

Outros estudos avaliaram a dominância de cianobactérias em baixas razões de N:P em que foi verificada a abundância de cianobactérias com relações próximas a 15:1 (HAVENS *et*



*al.*, 2003). Em estudos no semiárido foi identificado que a relação 10:1 foi adequada na identificação do nutriente limitante (VIDAL; CAPELO NETO, 2014).

Sendo assim, o balanço hídrico, com grandes flutuações sazonais e anuais do nível da água, tem influência crítica na dinâmica de nitrogênio e fósforo de lagos rasos na zona climática semiárida (COPPENS *et al.*, 2016). Com isso, conhecer a influência da sazonalidade sobre a concentração desses nutrientes pode facilitar os esforços para gerenciar melhor os problemas atuais de eutrofização (STOW *et al.*, 2015).

#### **4.3.3 Aplicações do balanço de nutrientes em reservatórios de água**

Amancio, Farias e Silva Neto (2005) avaliaram os níveis de nutrientes do reservatório Pentecoste localizado em região semiárida brasileira no período de março a dezembro de 2002. As amostras de água foram coletadas mensalmente a uma profundidade de 2 metros. Os dados obtidos foram submetidos a uma análise de correlação de Pearson, com nível de significância de 1% e 5%. Os resultados demonstraram que as concentrações de nutrientes ficaram dentro dos valores tolerados pelos organismos aquáticos e que as estações localizadas nas desembocaduras dos rios foram fortemente afetadas pela precipitação, e que o aumento do volume de água resultou em um decréscimo na concentração de nutrientes.

Cook *et al.* (2009) estudaram o balanço de nutrientes em dois reservatórios artificiais de água localizados no semiárido da Austrália ao longo de 17 anos. O objetivo do estudo foi realizar o balanço de nutrientes e compará-lo com o das regiões temperadas. Os resultados indicaram que os reservatórios do semiárido se comportaram como sumidouros de  $\text{NO}_x$ , mas que houve pequena retenção de N, e que, conseqüentemente, houve uma mudança marcante nas relações de N:P das cargas exportadas pelos reservatórios em comparação às cargas de entradas. Em relação às regiões temperadas, o N dos reservatórios do semiárido mostrou taxas menores de retenção, enquanto o P apresentou valores bastante similares a elas.

Ozen *et al.* (2010) objetivaram em estudo realizado em região semiárida na Turquia, nos Lagos Mogan e Eymir, calcular o balanço de massa em um período de 11 anos, e verificar a influência da sazonalidade climática na entrada e saída de nutrientes nesses lagos. Eles estimaram que as concentrações de fósforo e nitrogênio tiveram um aumento em suas concentrações durante os períodos secos, apesar da menor entrada de nutrientes nesse período. Com isso, os autores concluíram que o aquecimento do clima na região potencializou a eutrofização.

Freitas, Ighetto e Attayde (2011) quantificaram as cargas de fósforo total e sólidos em suspensão exportadas pela bacia hidrográfica do reservatório Cruzeta no RN, região semiárida brasileira. Foram descritos os padrões de variação temporal das concentrações de nutrientes, sólidos em suspensão e clorofila “a” na água do reservatório, para isso fizeram coletas quinzenais em cinco pontos dentro do reservatório entre o período de março/2007 e maio/2008. Os resultados do balanço de massa demonstram que o reservatório reteve cerca de 94% da carga de sólidos em suspensão e 50% da carga de fósforo total. As medianas das concentrações de fósforo total e clorofila “a” foram  $0,12 \text{ mgL}^{-1}$  e  $12 \text{ }\mu\text{gL}^{-1}$ , respectivamente, durante o período de estudo. Por fim, concluíram que reservatórios de regiões semiáridas são fortemente susceptíveis ao assoreamento e à eutrofização devido às grandes cargas de sedimentos e nutrientes da bacia hidrográfica que são carregados anualmente para o reservatório.

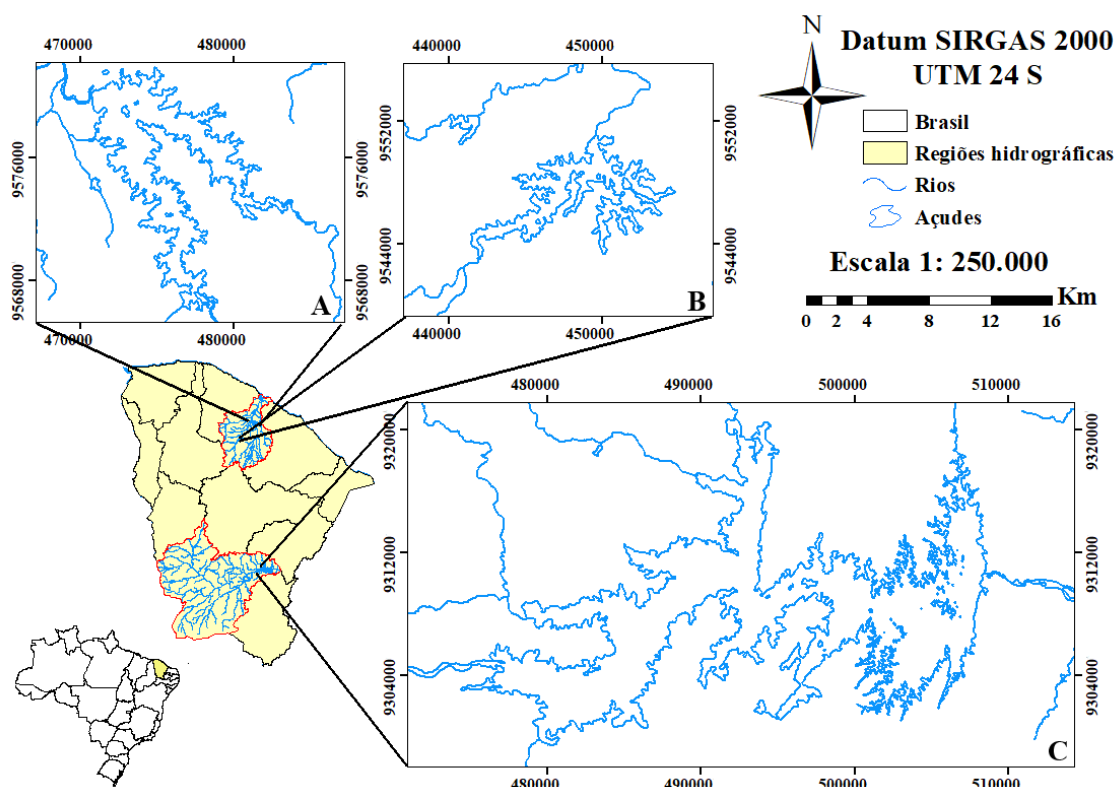
Bhat, Meraj e Pandit (2015) aplicaram o balanço de nutrientes ao lago Wular, um dos maiores lagos de água doce da Ásia, em um período de 12 meses. Eles mediram as concentrações de nutrientes e íons principais e verificaram a sua relação com os regimes de descarga e precipitação na região. Com isso, a variação sazonal na carga de nutrientes e os coeficientes de exportação apresentaram relação linear com altas concentrações durante a primavera e verão e baixas concentrações durante o outono e inverno.

Andrade *et al.* (2020) estudaram, no período de abril/2008 a dezembro/2012, o aporte e balanço dos nutrientes fósforo e nitrogênio, e também o efeito da sazonalidade climática na dinâmica desses nutrientes, no reservatório Orós localizado em região semiárida brasileira. Foi identificado que o reservatório atuou como um sumidouro dos nutrientes transportados pelo escoamento superficial, com uma retenção de 176 toneladas de NT e 230 toneladas de PT durante o período de estudo. Concluiu-se, ainda, que, por se tratar de uma bacia hidrográfica predominantemente agropecuária e os nutrientes apresentarem a mesma tendência de aporte no reservatório, a fonte primária dos nutrientes são da agricultura e a pecuária.

## **5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

A área de estudo corresponde aos reservatórios Pereira de Miranda, General Sampaio e Orós que barram os rios Canindé, Curu e Jaguaribe nos municípios Pentecoste, General Sampaio e Orós, respectivamente, no semiárido do estado do Ceará. Eles apresentam classificação climática BSw’h’ da classificação de Köppen (1918), estando Pereira de Miranda e General Sampaio contidos na bacia hidrográfica do rio Curu, e Orós na bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe (FIGURA 1).

Figura 1 - Localização dos reservatórios Pereira de Miranda, General Sampaio e Orós



Fonte: Elaborada pelo autor. Legenda: A: Pereira de Miranda; B: General Sampaio e C: Orós.

O reservatório General Sampaio foi construído no ano de 1935, o reservatório Pereira de Miranda em 1956 e o reservatório Orós em 1962 (DNOCS, 2006), pela antiga Inspetoria Federal de Obras Contra as Secas - IFOCS, hoje Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS).

A bacia hidrográfica onde os reservatórios Pereira de Miranda e General Sampaio estão localizados possui precipitação pluviométrica em torno de 700 mm anualmente, evapotranspiração potencial anual entre 1.899 e 1.998 mm, respectivamente, sendo os meses de agosto a dezembro o período de maiores índices de evaporação, e março a maio o período de menores índices de evaporação (COGERH, 2009).

A bacia hidrográfica do reservatório Orós possui uma pluviometria média anual entre 500 e 700 mm e uma evapotranspiração potencial média anual em torno de 2.020 mm (COGERH, 2009), sendo os meses de setembro, outubro e novembro os meses mais escassos de chuvas, e janeiro a maio o período mais chuvoso (FUNCEME, 2018).

Entre os três reservatórios, o Orós é o de maior dimensão em capacidade de armazenamento, bacia hidrográfica e bacia hidráulica, depois vem o reservatório Pereira de Miranda e depois o General Sampaio (TABELA 1).

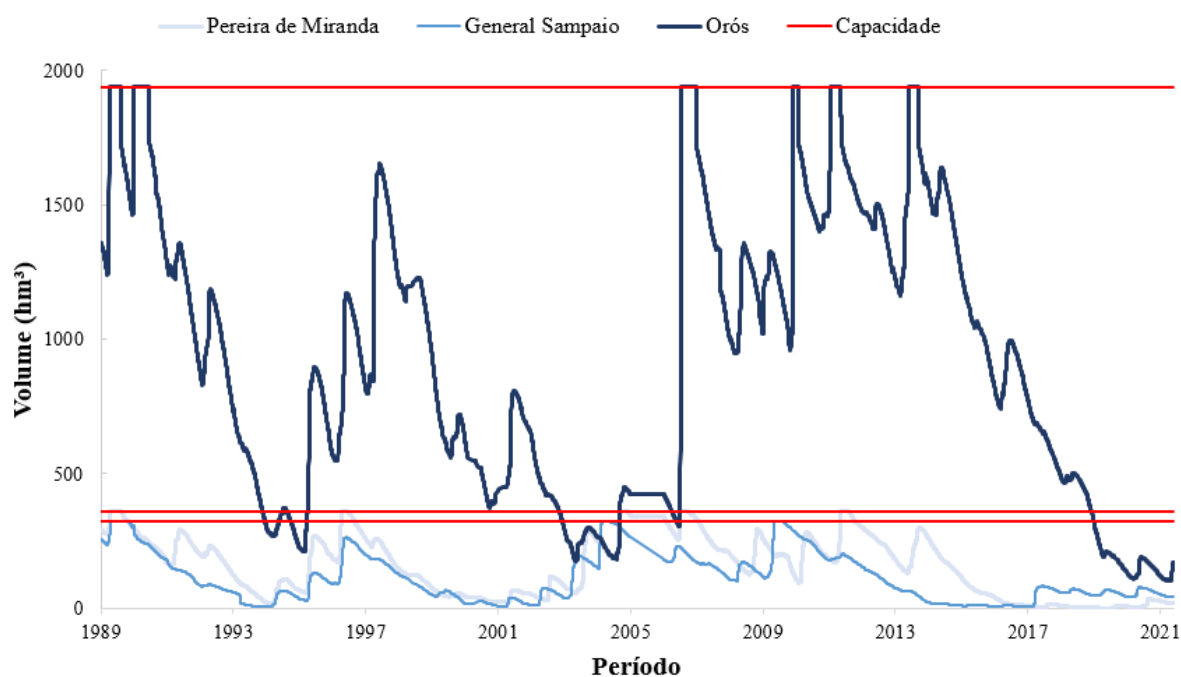
Tabela 1 - Características das bacias hidrográficas dos reservatórios

Características	Pereira de Miranda	General Sampaio	Orós
<b>Clima (Köppen)</b>	Tropical quente semiárido	Tropical quente semiárido	Tropical quente semiárido
<b>Geologia</b>	Embasamento cristalino	Embasamento cristalino	Embasamento cristalino
<b>Bioma</b>	Caatinga	Caatinga	Caatinga
<b>Bacia hidrográfica (km<sup>2</sup>)</b>	3254,46	1582,06	25.696,43
<b>Bacia hidráulica do reservatório (ha)</b>	5.700	3.300	35.000
<b>Capacidade do reservatório (m<sup>3</sup>)</b>	360.000.000	322.200.000	1.940.000.000
<b>Altitude média (m)</b>	51	115	198
<b>Temperatura (°C)</b>	27,3	27,3	28,5
<b>Radiação solar média anual (W/m<sup>2</sup>)</b>	217,8	218,4	227,5
<b>Precipitação (mm/ano)</b>	817	763	725
<b>Velocidade do vento (m/s)</b>	3,70	3,70	3,27
<b>Direção do vento</b>	NE para SO	NE para SO	NE para SO
<b>Tipos de uso do entorno dos reservatórios</b>	Agricultura, vegetação natural e antropismo	Agricultura, pastagem, vegetação natural, antropismo e solo exposto	Agricultura, pecuária, piscicultura, vegetação natural e antropismo

Fonte: Dados COGERH (2009), FUNCEME (2010), COGERH (2011) e COGERH (2021).

Neste estudo, tem-se um reservatório de grande porte e dois menores com características diferentes e com volumes próximos. A variação de volume de água armazenada neles ao longo do tempo é monitorada pela COGERH/FUNCEME e pode ser observada na Figura 2.

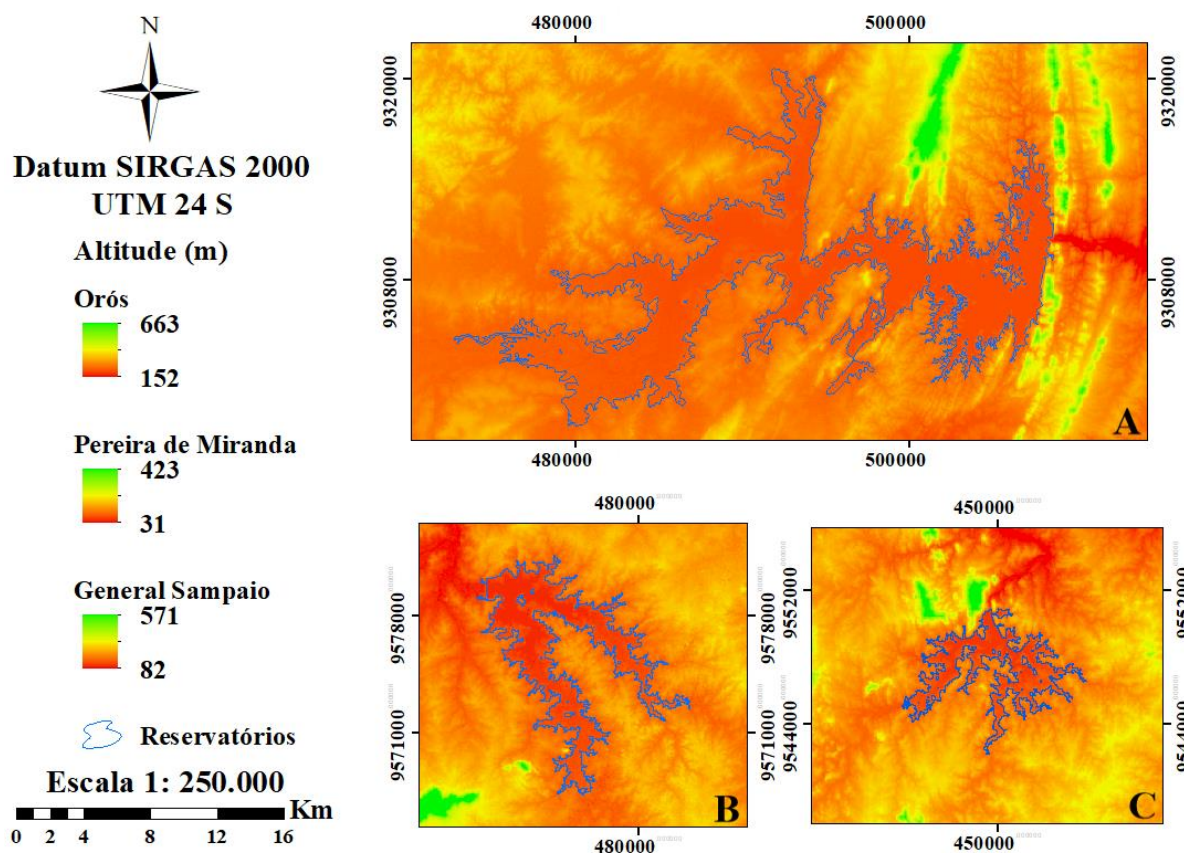
Figura 2 - Volume de água armazenada nos reservatórios Pereira de Miranda, General Sampaio e Orós entre 1989 e 2021



Fonte: COGERH/FUNCEME (2021).

As altitudes dos 3 reservatórios variam em decorrência da posição geográfica em que se encontram e características fisiográficas de cada região. O reservatório Orós é o mais distante do mar, localizado em maiores altitudes e em regiões mais secas. Pereira de Miranda e General Sampaio, apesar de estarem na mesma bacia hidrográfica, possuem altitudes bastante diferentes, com o General Sampaio localizado em maiores altitudes em relação ao açude Pereira de Miranda (FIGURA 3).

Figura 3 - Altitude dos reservatórios



Fonte: elaborada pelo autor. Legenda: A: Orós, B: Pereira de Miranda e C: General Sampaio.

A geologia das bacias hidrográficas dos três reservatórios é predominantemente constituída por rochas do embasamento cristalino de idade pré-cambriana. O embasamento do reservatório Pereira de Miranda é constituído também por gnaisses, xistos, quartzitos, calcários e granitos, além de sedimentos arenosos a arenoargilosos. No caso do reservatório General Sampaio possui substrato rochoso formado por gnaisses e migmatitos diversos, além de coberturas aluvionares ao longo dos principais rios (CPRM, 1998). E no reservatório Orós há a presença de gnaisses migmatíticos e granitos, aos quais se associam restos supracrustais, sob a forma de estreitas faixas preenchidas por xistos, quartzitos, metacalcários e anfibolitos (COGERH, 2009).

Os solos da bacia hidrográfica dos reservatórios Pereira de Miranda e General Sampaio são predominantemente do tipo luvisolos, podzólicos e planossolos, com a ocorrência de argissolos no município Pentecoste. Na bacia hidrográfica de Orós é encontrada uma diversidade maior de solos como latossolos, luvisolo crômico, neossolo flúvico, neossolo litólico, planossolo háplico e vertissolo, além de chernossolos na região do reservatório (FUNCEME, 2018).

A vegetação predominante da bacia hidrográfica dos três reservatórios é a caatinga arbustiva densa (CPRM, 1998). Na bacia dos reservatórios Pereira de Miranda e General Sampaio também ocorre o complexo vegetacional da zona litorânea e a floresta mista Dicotillo-Palma em Pentecoste (IPECE, 2009), e Dicotilo-Palmácea em Orós (COGERH, 2011).

O uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica dos reservatórios Pereira de Miranda e General Sampaio é predominantemente agrícola (culturas anuais, temporárias e permanentes), pastagem, vegetação natural (matas e capoeiras), áreas antropizadas e áreas com solo e substrato expostos (FUNCEME, 2018). A bacia hidrográfica do reservatório Orós é destinada para a agricultura, pecuária, piscicultura, vegetação natural e área antropizada (COGERH, 2011).

Os usos múltiplos atendidos pelos reservatórios Pereira de Miranda e General Sampaio pelas atividades realizadas em seu entorno e jusante são dessedentação de animais, usos domésticos locais, recreação de contato primário, usos públicos, irrigação, pesca artesanal, piscicultura intensiva (criação em gaiolas), indústria, balneário, e agricultura de vazante, já o reservatório Orós atende aos usos de dessedentação animal e doméstica local, recreação de contato primário, recreação de contato secundário, usos públicos (empresas concessionárias), irrigação, pesca artesanal, piscicultura intensiva (criação em gaiolas e viveiros), balneário e agricultura de vazante (COGERH, 2020).

A partir das diversas maneiras de como as bacias hidrográficas dos reservatórios Pereira de Miranda, General Sampaio e Orós são utilizadas surgem as suas principais fontes de poluição. Essas fontes de poluição contribuem para o aumento do aporte de nutrientes nos reservatórios e sua consequente degradação. Esse aporte é realizado nas bacias hidrográficas dos reservatórios estudados principalmente por meio de esgotos doméstico, industrial e hospitalar, lavagem de roupas, lavagem de carros, balneários, banho, uso de agrotóxicos e fertilizantes, lixão, matadouro, dejetos de animais, efluentes de ETAs/ETEs, entre outros (COGERH, 2020).

## 6 CAPÍTULO 1 – QUANTIFICAÇÃO DA EVAPORAÇÃO UTILIZANDO DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO EM RESERVATÓRIOS SUPERFICIAIS DO SEMIÁRIDO

**Resumo** - A evaporação é um dos principais processos envolvidos e responsável pela diminuição do volume de água disponível em reservatórios do semiárido, sendo um parâmetro de difícil estimativa devido à baixa representatividade espacial do seu dado. O SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) é um modelo de estimativa de balanço de energia, formulado com o objetivo de se obter dados precisos e espacializados do balanço de energia em grandes áreas. Nesse sentido, foi utilizado o Modelo SEBAL para se estimar a evaporação em reservatórios do semiárido brasileiro utilizando imagens de satélite como entrada para o modelo, de modo a se obter dados espacialmente distribuídos da evaporação sobre os reservatórios Pereira de Miranda, General Sampaio e Orós. Foram utilizadas imagens dos sensores *Operational Land Imager* - OLI e do *Thermal Infrared Sensor* - TIRS do satélite Landsat 8. O processamento das imagens foi realizado usando linguagem de programação C++ no software Dev-C++ v. 4.9.9.2. As estimativas de evaporação dos reservatórios Pereira de Miranda e General Sampaio foram comparados com medidas de evaporação de um tanque Classe “A” pertencente à fazenda experimental da Universidade Federal do Ceará (UFC) e estimativas de evaporação para o reservatório de Orós foram comparados à evaporação estimada pelo método de Penman a partir de dados da estação de Iguatu, fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Na acurácia das estimativas de evaporação pelo modelo SEBAL foram utilizadas as seguintes métricas: coeficiente de determinação ( $R^2$ ), erro absoluto (EA), erro relativo (ER), raiz do erro quadrático médio (RMSE) e o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE). O coeficiente de determinação ( $R^2$ ), apresentou valores altos para todos os reservatórios, principalmente para o reservatório General Sampaio com valor igual a 0,96, seguido de 0,89 para o Orós e 0,85 para o Pereira de Miranda. Foi observado para o reservatório Pereira de Miranda a melhor estimativa média de evaporação ( $4,98 \text{ mm dia}^{-1}$ ) em relação ao dado medido, seguido de General Sampaio ( $4,92 \text{ mm dia}^{-1}$ ) e Orós ( $6,26 \text{ mm dia}^{-1}$ ). O erro médio absoluto e o erro médio relativo também apresentaram resultados robustos, principalmente para o reservatório General Sampaio, com erro absoluto e relativo iguais a 0,11 mm e 2,18 %, respectivamente. E o pior desempenho do modelo foi registrado no reservatório Pereira de Miranda, com erro médio absoluto igual a 0,26 mm e erro médio relativo igual a 5,68%. Já o reservatório Orós teve um erro médio absoluto igual a 0,22 mm e erro médio relativo igual a 3,47%. A raiz do erro médio quadrático (RMSE) também resultou em baixos

valores com o maior erro registrado no reservatório Pereira de Miranda (0,35 mm), seguido pelo de Orós (0,28 mm) e o mínimo em General Sampaio (0,18 mm). O coeficiente Nash-Sutcliffe de desempenho do modelo SEBAL foi classificado como muito bom para todos os reservatórios. O SEBAL é eficiente para estimar a evaporação em corpos d'água do semiárido brasileiro. Portanto, é possível quantificar e monitorar a evaporação da água em sistemas aquáticos superficiais da região semiárida a partir de dados de sensoriamento remoto orbital.

**Palavras-chave:** regiões semiáridas; imagens de satélite; balanço de energia; SEBAL; landsat 8.

## 6.1 Introdução

A escassez de água é um problema socioambiental, cujos impactos tendem a ser cada vez mais graves caso o manejo dos recursos hídricos não seja revisto pelos países (FERNANDES; NOGUEIRA; RABELO, 2008).

Uma gestão de recursos hídricos eficiente é fundamental para garantir a oferta de água em quantidade e qualidade para a população. Os recursos hídricos de grande parte da região semiárida do Brasil se encontram em situação de escassez e, em alguns casos, apresentam níveis de poluição de forma a se encontrarem comprometidos para atendimento dos usos múltiplos (OLIVEIRA; LIMA; SOUSA, 2017).

A gestão dos recursos hídricos no semiárido brasileiro é considerada complexa devido às mudanças das variáveis climatológicas da região; isso tem proporcionado elevadas taxas de evaporação, contribuindo significativamente para o agravamento das crises hídricas (OLIVEIRA *et al.*, 2019).

As mudanças climáticas, a ocorrência de secas prolongadas ou fenômenos físicos naturais, como a evaporação, podem limitar o uso dos recursos hídricos, afetando o desenvolvimento socioeconômico regional (PINTO, 2020).

A precipitação média anual da região semiárida brasileira é de 750 mm, porém, em algumas áreas, a precipitação média não ultrapassa os 400 mm anuais. Somado a isto, a evapotranspiração tem potencial médio de 2.500 mm ano<sup>-1</sup>, gerando elevados déficits hídricos e limitando os cultivos agrícolas (OLIVEIRA *et al.*, 2019).

A população do semiárido necessita substancialmente de água armazenada em reservatórios para atender as suas demandas. Para que haja uma eficiente gestão desses recursos



hídricos é importante o entendimento preciso dos processos de recarga e retirada de água, principalmente a evaporação.

Ao longo da história, diferentes profissionais e pesquisadores têm desenvolvido estudos com o objetivo de minimizar os impactos da evaporação em regiões áridas e semiáridas do mundo (MARINHO *et al.*, 2015), no entanto, sua medição ainda é difícil de ser realizada com precisão, principalmente na superfície de reservatórios, sendo o seu estudo auxiliado com o uso de modelos hidrológicos (RODRIGUES, 2020).

Métodos meteorológicos ou climatológicos são baseados em dados pontuais, que podem não fornecer uma boa estimativa em grandes áreas (SUN *et al.*, 2011). Alternativas para a estimativa da evaporação em áreas espacialmente distribuídas tiveram que ser exploradas para que fosse possível entender as variações espaciais da evaporação nas superfícies terrestre (AYENEW, 2003).

Na área de hidrologia e Sensoriamento Remoto (SR) a estimativa da evapotranspiração real em grandes áreas tem sido usada como base para o balanço de energia e a utilização de respostas espectrais fornecidas por sensores orbitais (BASTIAANSSEN *et al.*, 1998; AYENEW, 2003).

O SEBAL é um modelo proposto por Bastiaanssen *et al.* (1998) em que utiliza imagens de satélite na estimativa do balanço de energia (MELESSE; ABTEW; DESSALEGNE, 2009), formulado com objetivo de se obter dados espacializados do balanço de energia de uma superfície a partir das bandas do visível, infravermelho próximo e termal do espectro eletromagnético, além de dados meteorológicos (ALLEN *et al.*, 2001).

A taxa de evaporação obtida pelo SEBAL é instantânea, uma vez que é estimada durante a passagem de satélites sobre o lago (HASSAN, 2013). No entanto, isso é corrigido por meio de uma extrapolação diária utilizando o método da fração evaporativa. Sendo assim, pode-se conhecer as perdas de água por evaporação na superfície dos reservatórios do semiárido com a utilização do sensoriamento remoto para reduzir erros nessa estimativa e torná-la espacialmente mais representativa. Diante disto, objetivou-se aplicar o algoritmo SEBAL para estimar a evaporação em reservatórios do semiárido brasileiro e obter dados de evaporação espaciais que podem auxiliar na gestão dos recursos hídricos.

## 6.2 Material e métodos

### 6.2.1 Dados de campo

Para análise da evaporação dos reservatórios Pereira de Miranda e General Sampaio foram utilizadas duas estações meteorológicas localizadas no município Pentecoste, uma pertencente a Universidade Federal do Ceará (UFC), e outra à Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). Já no reservatório Orós foi utilizada uma estação meteorológica localizada no município Iguatu com dados fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Os dados coletados nas estações meteorológicas foram temperatura do ar, velocidade do vento, umidade relativa do ar, radiação solar global diária e evaporação medida no tanque Classe “A” referentes aos mesmos dias das 5 (cinco) imagens de satélite utilizadas. Os dados de campo coletados para esses reservatórios podem ser observados da Tabela 2.

Tabela 2 - Dados meteorológicos coletados nas estações

Data	Temperatura do ar (°C)		Velocidade do vento a 2 m de altura (m s <sup>-1</sup> )		Umidade relativa do ar		Radiação solar global diária (W m <sup>-2</sup> )		Evaporação medida (mm)	
	Pentecoste	Iguatu	Pentecoste	Iguatu	Pentecoste	Iguatu	Pentecoste	Iguatu	Pentecoste	Iguatu
08/08/2015	31,8	26,2	2,43	3,30	0,50	0,55	122,69	122,69	5,40	6,26
25/07/2016	33,6	27,2	1,50	3,75	0,56	0,60	127,31	127,31	4,26	6,38
26/08/2016	31,8	27,6	2,43	2,53	0,73	0,50	128,47	128,47	5,82	6,22
26/06/2017	29,4	26,4	2,33	4,73	0,64	0,55	122,69	122,69	4,12	7,50
13/08/2017	31,4	27,0	2,07	3,03	0,57	0,67	127,31	127,31	5,40	5,25

Fonte: elaborado pelo autor

A evaporação medida utilizando as estações de Pentecoste foi realizada com um tanque Classe “A”. Para isso seu resultado foi multiplicado por um coeficiente de correção da evaporação medida no tanque e a ocorrida nos reservatórios. Esse coeficiente foi igual a 0,71, proposto por Peixoto *et al.* (2016) em seu estudo na região semiárida de Mossoró, RN no Brasil. Já a evaporação medida na estação de Iguatu foi obtida utilizando o método de Penman (1948), não sendo possível neste caso a utilização de um tanque Classe “A” devido à ausência de dados.

A evaporação fornecida na Tabela 2 já é a corrigida com o coeficiente utilizado e seu resultado foi utilizado na validação das estimativas da evaporação pelo modelo SEBAL para os reservatórios Pereira de Miranda e General Sampaio. Já para a validação das estimativas de evaporação do SEBAL para o reservatório Orós foi utilizado o método de Penman (1948), expresso na equação (1), e já calculada e apresentada na Tabela 2.

$$E = \frac{\left(\frac{s * Q}{L}\right) + \gamma * Ea}{s + \gamma} \quad (1)$$

em que: E = Evaporação (mm); Q = Saldo de radiação sobre a água livre (cal cm<sup>2</sup> /d); s = Tangente à curva de pressão de saturação (hPa /°C) expressa na Equação (2); L = Calor latente de vaporização (58,47 cal cm<sup>2</sup>/ mm);  $\gamma$  = Coeficiente psicrométrico (0,626 hPa/°C); e Ea = Poder evaporante da superfície expresso na equação (4).

$$s = \frac{4098 * es}{(T + 237,3)^2} \quad (2)$$

em que: es = Pressão de saturação do vapor (hPa), calculado pela equação (3); e T = Temperatura do ar (°C) medida na estação meteorológica.

$$es = 6,108 * 10^{\left(\frac{7,5 * T}{237,3 + T}\right)} \quad (3)$$

$$Ea = f(u) * (es - ea) \quad (4)$$

em que: u = Velocidade do vento a 2 m de altura (km/d) com f(U) expresso na equação (5); e ea = Pressão atual de valor (hpa).

$$f(U) = 0,27 * \left(1 + \frac{u}{100}\right) \quad (5)$$

### 6.2.2 *Imagens de satélite*

Nesta pesquisa foram utilizadas cinco imagens do satélite Landsat 8, sensores *Operational Land Imager - OLI* e *Thermal Infrared Sensor - TIRS*, do período de 2015 a 2017. As características de cada banda utilizada do satélite Landsat 8 e seus sensores podem ser observadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Características dos sensores e bandas utilizadas

Satélite	Sensor	Resolução espectral / bandas	Resolução espacial	Resolução temporal	Resolução radiométrica
Landsat 8	OLI	(B2) Azul (0.450 - 0.515 $\mu\text{m}$ ) (B3) Verde (0.525 - 0.600 $\mu\text{m}$ ) (B4) Vermelho (0.630 - 0.680 $\mu\text{m}$ ) (B5) Infravermelho próximo (0.845 - 0.885 $\mu\text{m}$ ) (B6) Infravermelho médio (1.560 - 1.660 $\mu\text{m}$ ) (B7) Infravermelho médio (2.100 - 2.300 $\mu\text{m}$ )	30 m	16 dias	12 bits
	TIRS	(B10) Lwir - 1 (10.30 - 11.30 $\mu\text{m}$ )	100 m		

Fonte: elaborada pelo autor.

As imagens foram escolhidas a partir do critério de presença de até 10% de nuvens. Também foi utilizada a imagem do Modelo Digital de Elevação - MDE da missão *Shuttle Radar Topography Mission* - SRTM, com resolução espacial de 30 m, para o cálculo da transmissividade atmosférica da área de estudo. Todas estas imagens foram obtidas gratuitamente da plataforma *United States Geological Survey* - USGS.

A aplicação do algoritmo SEBAL foi realizada para imagens da cobertura da órbita/ponto 217/63 dos reservatórios Pereira de Miranda e General Sampaio e órbita/ponto 217/64 do reservatório Orós; para isso foi recortado um polígono em torno de cada reservatório e seus dados foram processados. Na Tabela 4 podem ser verificados o dia e hora do imageamento (GMT), dia juliano ou dia sequencial do ano (d), distância relativa inversa Terra-Sol (dr), ângulo zenital de elevação solar ( $\Theta$ ) e ângulo de elevação do sol ( $\theta_{SE}$ ) no local das imagens utilizadas.

Tabela 4 - Dados das imagens utilizadas do Landsat 8

Dia	Hora	d	dr	$\Theta$		$\theta_{SE}$	
				Ponto 63	Ponto 64	Ponto 63	Ponto 64
08/08/2015	12:46:27	220	0,74	53,83	52,42	54,74	53,71
25/07/2016	12:46:48	207	0,70	49,31	48,02	52,72	51,52
26/08/2016	12:46:57	239	0,81	62,32	60,46	58,66	57,79
26/06/2017	12:46:34	177	0,67	43,67	42,68	50,90	49,70
13/08/2017	12:46:51	225	0,75	55,98	54,45	55,86	54,86

Fonte: elaborada pelo autor.

### 6.2.3 Tratamento das imagens

As imagens obtidas necessitam passar por calibração radiométrica, ou seja, foi realizada a conversão do Número Digital (ND) em radiância e depois em reflectância no topo da

atmosfera (USGS, 2019). A equação (6) foi utilizada para realizar a conversão da imagem de ND para radiância espectral utilizando os fatores de calibração disponíveis no arquivo MTL. Para isso, a imagem foi processada no software Dev-C++ com a utilização da linguagem de programação C++.

$$L_{\lambda} = M_L * Q_{cal} + A_L \quad (6)$$

em que:  $L_{\lambda}$  = Radiância espectral no topo da atmosfera ( $W.m^{-2} * srad * \mu m$ );  $M_L$  = Fator de redimensionamento multiplicativo específico de cada banda no metadados;  $A_L$  = Fator de redimensionamento aditivo específico de cada banda no metadados; e  $Q_{cal}$  = Valores do número digital de cada pixel.

Em seguida foi realizada a conversão da radiância espectral no topo da atmosfera para reflectância planetária no topo da atmosfera aplicando a equação (7).

$$\rho_{\lambda}' = M_p * Q_{cal} + A_p \quad (7)$$

em que:  $\rho_{\lambda}'$  = Reflectância planetária no topo da atmosfera, sem correção para o ângulo solar;  $M_p$  = Fator de redimensionamento multiplicativo específico de cada banda no metadados;  $A_p$  = Fator de redimensionamento aditivo específico de cada banda no metadados; e  $Q_{cal}$  = Valores do número digital de cada pixel.

Após o cálculo, a reflectância foi corrigida para o ângulo de elevação do sol para cada imagem utilizada, para isso foi utilizada a equação (8).

$$\rho_{\lambda} = \frac{\rho_{\lambda}'}{\sin(\theta_{SE})} \quad (8)$$

em que:  $\rho_{\lambda}$  = Reflectância planetária, com correção para o ângulo solar;  $\rho_{\lambda}'$  = Reflectância planetária, sem correção para o ângulo solar;  $\theta_{SE}$  = Ângulo de elevação do sol no local, disponibilizado no metadados da imagem.

#### 6.2.4 Albedo

O albedo de superfície foi calculado por meio da conversão do albedo calculado no topo da atmosfera para o albedo de superfície. Onde, no albedo no topo da atmosfera foi realizada uma combinação linear das reflectâncias espectrais calculadas aplicando a equação (8) e de acordo com pesos adaptados por Alves *et al.* (2017). Verifica-se na equação (9) a combinação realizada com seus respectivos pesos já inseridos na fórmula para as bandas espectrais 2 a 7.

$$\alpha_{toa} = (0,3 * \rho_{\lambda,2}) + (0,277 * \rho_{\lambda,3}) + (0,233 * \rho_{\lambda,4}) + (0,143 * \rho_{\lambda,5}) + (0,036 * \rho_{\lambda,6}) + (0,012 * \rho_{\lambda,7}) \quad (9)$$

em que:  $\alpha_{toa}$  = Albedo no topo da atmosfera; e  $\rho_{\lambda,n}$  = Reflectância de cada banda do sensor OLI.

Em seguida, o albedo no topo da atmosfera foi corrigido para albedo de superfície, utilizando a equação (10), proposta por Tasumi *et al.* (2008).

$$\alpha_{sup} = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_{atm}}{\tau_{sw}^2} \quad (10)$$

em que:  $\alpha_{sup}$  = Albedo superficial;  $\alpha_{toa}$  = Albedo no topo da atmosfera;  $\alpha_{atm}$  = Porção da radiação solar refletida pela atmosfera, adotou-se 0,03 de acordo com Bastiaanssen (2000); e  $\tau_{sw}$  = Transmissividade atmosférica para dias de céu claro calculado de acordo com a equação (11) de Allen, Tasumi e Trezza (2002).

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2 * 10^{-5} * z \quad (11)$$

em que:  $z$  = Elevação de cada pixel acima do nível do mar (m) obtido no MDE-SRTM disponibilizado pela USGS.

#### 6.2.5 Temperatura superficial

Para o cálculo da temperatura de superfície utilizada no balanço de energia do SEBAL foi primeiro calculada a temperatura de brilho medida pelas imagens que então foi convertida para temperatura superficial (AVDAN; JOVANOVSKA, 2016). No cálculo da temperatura de brilho foi utilizada a equação (12).

$$TB = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L\lambda} + 1\right)} \quad (12)$$

em que: TB = Temperatura de brilho no sensor (K);  $K_1$  = Constante de calibração da banda 10 obtida nos metadados com valor utilizado igual a 774,8853;  $K_2$  = Constante de calibração da banda 10 obtida no metadados com valor utilizado igual a 1321,0789; e  $L\lambda$  = Radiância espectral da banda 10 calculado na equação (6). A temperatura superficial foi calculada utilizando a equação (13).

$$T_{sup} = \frac{TB}{1 + \left(\frac{0,00115 * TB}{1,4388}\right) * \ln(\epsilon_{sup})} \quad (13)$$

em que:  $T_{sup}$  = Temperatura superficial (K); TB = Temperatura de brilho no sensor (K); e  $\epsilon_{sup}$  = Emissividade de superfície, para corpos de água foi utilizado o valor de 0,991 obtido por Wang *et al.* (2015), os quais afirmam que corpos d'água apresentam valor estável em comparação com outras superfícies, apresentando somente mudanças negligenciáveis em caso de mistura de sedimentos ou biomassa na água.

### 6.2.6 Índices de vegetação

O Índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) foi calculado com a equação (14) de Rouse *et al.* (1974), tendo sido utilizadas as reflectâncias das bandas 4 e 5 (vermelho e do infravermelho próximo, respectivamente) do sensor OLI.

$$NDVI = \frac{\rho_{\lambda,5} - \rho_{\lambda,4}}{\rho_{\lambda,5} + \rho_{\lambda,4}} \quad (14)$$

em que:  $\rho_{\lambda,5}$  = Reflectância da banda 5; e  $\rho_{\lambda,4}$  = Reflectância da banda 4.

O SAVI (Índice de vegetação ajustado ao solo) é um índice que tenta ajustar os efeitos do solo no NDVI, o que elimina seu efeito da reflectância na superfície nas áreas áridas e, assim, diminui os impactos da umidade do solo nos resultados deste índice (ALLEN *et al.*, 2002). Com isso, o SAVI foi calculado aplicando a equação (15).

$$SAVI = \frac{(1 + L) * (\rho_{\lambda,5} - \rho_{\lambda,4})}{(L + \rho_{\lambda,5} + \rho_{\lambda,4})} \quad (15)$$

em que:  $\rho_{\lambda,5}$  = Reflectância da banda 5;  $\rho_{\lambda,4}$  = Reflectância da banda 4; e L é um valor constante igual a 0,5 frequentemente utilizado na literatura, sendo um valor que está em função do solo.

### 6.2.7 SEBAL

O SEBAL utiliza a equação do balanço de energia para estimar a evapotranspiração instantânea de uma área, onde é estimado o Fluxo de Calor Latente instantâneo ( $\lambda ET_{inst}$ ), utilizando a equação (16) (BASTIAANSEN, 1998), de um alvo localizado na superfície terrestre com o uso de dados de SR e dados meteorológicos. A metodologia utilizada para esta estimativa foi a descrita no manual do SEBAL, publicado em 2002, e modificações realizadas por alguns autores a seguir mencionados. O processamento do algoritmo foi realizado com a criação de uma rotina de programação em linguagem C++. Essa rotina foi criada e processada no software Dev-C++ v. 4.9.9.2. Também foram utilizados os softwares ArcMap® v.10.5 e Envi® v.5.1 para criação dos *layouts* dos mapas.

$$\lambda ET_{inst} = R_n - G - H \quad (16)$$

em que:  $R_n$  é o saldo de radiação ( $Wm^{-2}$ ); G é o fluxo de calor no solo ( $Wm^{-2}$ ), e; H é o fluxo de calor sensível ( $Wm^{-2}$ ).

O saldo de radiação ou fluxo de radiação ( $R_n$ ) representa a energia disponível na superfície do alvo e foi obtido conforme equação (17). No cálculo foi realizada a diferença entre a radiação que incidiu nos alvos, e o que foi emitido e refletido.

$$R_n = (1 - \alpha_{sup}) * R_{oci} + R_{oli} - R_{ole} - (1 - \epsilon_{sup}) * R_{oli} \quad (17)$$

em que:  $R_n$  = Saldo de radiação ( $Wm^{-2}$ );  $R_{oci}$  = Radiação de onda curta incidente ( $Wm^{-2}$ );  $R_{ole}$  = Radiação de onda longa emitida ( $Wm^{-2}$ );  $R_{oli}$  = Radiação de onda longa incidente ( $Wm^{-2}$ );  $\alpha_{sup}$  = Albedo da superfície; e  $\epsilon_{sup}$  = Emissividade da superfície.

A radiação de onda curta incidente ( $R_{oci}$ ) em  $Wm^{-2}$  foi calculada conforme a equação (18) (BASTIAANSEN, 1995; ALLEN, TREZZA, e TASUMI, 2002).

$$R_{oci} = \beta * \cos(\Theta) * dr * tws \quad (18)$$



em que:  $\beta$  = Constante solar igual a  $1367 \text{ Wm}^{-2}$ ;  $\Theta$  = Ângulo zenital solar disponibilizado no metadados da imagem;  $dr$  = Inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol calculado pela equação (19); e  $tws$  = Transmissividade atmosférica calculada na equação (11).

$$dr = 1 + 0.33 * \cos \left( d * \frac{2 * \pi}{365} \right) \quad (19)$$

em que:  $dr$  = Inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol; e  $d$  = Dia juliano de captura da imagem. A expressão  $\cos \left( d * \frac{2 * \pi}{365} \right)$  é obtida em radiano.

A radiação de onda longa emitida ( $R_{ole}$ ) em  $\text{Wm}^{-2}$  foi calculada segundo equação (20) de Stefan Boltzmann.

$$R_{ole} = \varepsilon_{sup} * \sigma * T_{sup}^4 \quad (20)$$

em que:  $\varepsilon_{sup}$  = Emissividade da superfície com valor utilizado igual a 1;  $\sigma$  = Constante de Stefan Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ); e  $T_{sup}$  = Temperatura superficial (K) calculada na equação (13).

A radiação de onda longa incidente ( $R_{oli}$ ) foi calculada conforme equação (21).

$$R_{oli} = \varepsilon_{atm} * \sigma * T_{ar}^4 \quad (21)$$

em que:  $\varepsilon_{atm}$  = Emissividade da atmosfera calculada pela equação (22) de Bastiaanssen (1995);  $\sigma$  = Constante de Stefan Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ); e  $T_{ar}$  = localizada na região de estudo (K).

$$\varepsilon_{atm} = 1,08 * (-\ln \tau_{sw})^{0,265} \quad (22)$$

em que:  $\tau_{sw}$  = Transmissividade atmosférica.

O fluxo de calor do solo e da água ( $G$ ) é a taxa de transferência e armazenamento de calor no solo, planta e água (LOSGEDARAGH; RAHIMZADEGAN, 2018), podendo ser estimado aplicando a equação (23). Para efeito de correção dos valores do fluxo de calor no solo para

corpos de água, onde o NDVI < 0, o fluxo de calor foi calculado pela equação (24) de Allen, Trezza e Tasumi (2002).

$$G = [T_{\text{sup}}(0,0038 + 0,0074 \alpha_{\text{sup}}) * (1 - 0,98 \text{NDVI}^4)] * R_n \quad (23)$$

$$G = 0,5 * R_n \quad (24)$$

em que: G = Fluxo de calor no solo ou na água ( $\text{Wm}^{-2}$ );  $T_{\text{sup}}$  = Temperatura superficial (K);  $\alpha_{\text{sup}}$  = Albedo superficial; NDVI = Índice de vegetação da diferença normalizada; e  $R_n$  = Saldo de radiação ( $\text{Wm}^{-2}$ ).

O fluxo de calor sensível é a taxa de perda de calor para o ar pelo processo de convecção e condução devido a uma diferença de temperatura. Ele é calculado, conforme o Manual do SEBAL, pela equação (25) de Bastiaanssen *et al.* (1998).

$$H = \frac{\rho C_p dt}{r_{\text{ah}}} \quad (25)$$

em que:  $\rho$  = Densidade do ar com valor utilizado igual a  $1,2 \text{ kgm}^{-3}$ ;  $C_p$  = Calor específico do ar úmido com valor utilizado igual a  $1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ;  $dt$  = Diferença de temperatura entre duas alturas diferentes; e  $r_{\text{ah}}$  = Resistência aerodinâmica ao transporte de calor ( $\text{sm}^{-1}$ ) que pode ser estimada utilizando a equação (26).

$$r_{\text{ah}} = \frac{1}{K^2 u^*} * \left(\ln \frac{Z}{Z_0}\right)^2 \quad (26)$$

em que: Z e  $Z_0$  = São as alturas acima do deslocamento do plano zero da superfície (m);  $u^*$  = Velocidade de fricção do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) e K = Constante de Von Karman que é igual a 0,41.

A velocidade de fricção foi estimada utilizando-se o perfil logarítmico do vento considerando-se uma condição de neutralidade atmosférica aplicando a equação (27).

$$u^* = \frac{u_x * K}{\ln\left(\frac{Z_x}{Z_{0m}}\right)} \quad (27)$$

em que:  $u_x$  = Velocidade do vento em  $m s^{-1}$  medida na estação meteorológica a 2 m de altura da superfície;  $K$  = Constante de Von Karman que é igual a 0,41;  $Z_x$  = Altura em que foi tomado a medida da velocidade do vento na estação meteorológica, que neste caso foi igual a 2 m; e  $Z_{0m}$  = Coeficiente de rugosidade da estação meteorológica dependente da altura média da vegetação ao redor da estação meteorológica calculado pela equação (28) de Brutsaert (1982).

$$Z_{0m} = 0,123 * h \quad (28)$$

em que:  $h$  = Altura média da vegetação existente no entorno da estação com valor utilizado igual a 0,3 m.

Utilizando a velocidade de fricção calculada na equação (27) foi calculada a velocidade do vento a 100 m de altura onde foi assumido que os efeitos da rugosidade da superfície não interferiam nos resultados, tornando-a, assim, desprezível. A equação do cálculo da velocidade do vento a 100 m de altura é a (29).

$$u_{100} = u^* \frac{\ln \frac{100}{Z_{0m}}}{K} \quad (29)$$

Assumindo a hipótese de que a velocidade do vento a 100 m de altura é constante em toda a área, pode-se estimar a velocidade de fricção para cada pixel da imagem utilizando a equação (30).

$$u^* = \frac{u_{100} * K}{\ln \left( \frac{100}{Z_{0m100}} \right)} \quad (30)$$

em que:  $u_{100}$  = É o resultado obtido na equação (24);  $K$  = Constante de Von Karman que é igual a 0,41; e  $Z_{0m100}$  = Obtido através da equação (31) de Bastiaanssen (1995).

$$Z_{0m100} = \exp (-5,809 + 5,62 * SAVI) \quad (31)$$

em que:  $Z_{0m100}$  = Rugosidade da superfície para cada pixel; e  $SAVI$  = Índice de Vegetação Ajustado ao Solo calculado na equação (15).

No SEBAL são utilizados dois pixels âncoras de temperatura para fixar condições limites para o cálculo do balanço de energia, o pixel frio e o pixel quente. Bastiaanssen *et al.* (2005) orientam que a escolha do pixel frio seja em áreas com culturas saudáveis, bem regadas, com cobertura total do solo ou em corpos de águas rasas. Compaoré *et al.* (2008) orientam que o pixel quente seja escolhido em área de solo exposto ou campo agrícola nu seco com evaporação insignificante.

Esses pixels de temperatura foram determinados de acordo com condições extremas do local de estudo, sendo o pixel frio escolhido criteriosamente dentro de um corpo hídrico e o pixel quente em área de solo exposto, além disso, foi observada a frequência de ocorrência desses pixels, foram escolhidos pixels em condições extremas e que se apresentavam em grande quantidade em toda área da imagem recortada para processamento. Os pixels escolhidos podem ser observados na Tabela 5, sendo o ponto 63, referente aos reservatórios Pereira de Miranda e General Sampaio e o ponto 64, referente ao reservatório Orós.

Tabela 5 - Pixels de temperaturas utilizadas em °C

Data	Pixel frio		Pixel quente	
	Ponto 63	Ponto 64	Ponto 63	Ponto 64
08/08/2015	25,4	23,9	36,9	30,9
25/07/2016	24,2	25,9	38,73	32,1
26/08/2016	27,0	27,0	31,9	35,7
26/06/2017	22,7	22,1	29,0	31,2
13/08/2017	24,7	24,2	37,4	35,2

Fonte: elaborada pelo autor.

Para o pixel frio foi considerado que a temperatura do ar próxima à superfície e a temperatura na superfície do pixel escolhido eram iguais, assumindo-se, assim, que o fluxo de calor sensível (H) foi igual a zero devido à diferença de temperatura entre as duas alturas ter sido igual a zero. Com isso, o fluxo de calor latente ( $\lambda ET_{inst}$ ) para o pixel frio foi calculado pela equação (32).

$$\lambda ET_{inst} = R_n - G \quad (32)$$

Para o pixel quente, assumiu-se que o fluxo de calor latente foi igual a zero, podendo assim ter sido obtido o fluxo de calor sensível para o pixel quente aplicando a equação (33).

$$H_{quente} = R_{nquente} - G_{quente} = \frac{\rho * C_p * (a * T_{sup} + b)_{quente}}{r_{ahquente}} \quad (33)$$

em que:  $R_{\text{nquente}}$ ,  $G_{\text{quente}}$ ,  $r_{\text{ahquente}}$ ,  $T_{\text{sup}}$  são obtidos nos pixels considerados quente;  $a$  e  $b$  = Coeficientes empíricos que dependem dos pixels frio e quente;  $\rho$  = Densidade do ar com valor utilizado igual a  $1,2 \text{ kgm}^{-3}$ ; e  $C_p$  = Calor específico do ar úmido com valor utilizado igual a  $1004 \text{ Jkg}^{-1}\text{k}^{-1}$ .

Com base nos valores dos pixels âncoras, calculou-se o  $dt$  da equação (34) utilizando os coeficientes empíricos  $a$  e  $b$  das equações (35) e (36), respectivamente.

$$dt = a * T_{\text{sup}} + b \quad (34)$$

$$a = \frac{(R_n - G) * r_{ah}}{(T_{\text{quente}} - T_{\text{frio}}) * \rho * C_p} \quad (35)$$

$$b = - a * T_{\text{frio}} \quad (36)$$

Como no pixel frio a diferença de temperatura é igual a zero ( $dt = 0$ ), tem-se um sistema com duas equações e duas incógnitas, onde é possível realizar o cálculo de  $a$  e  $b$  e do fluxo de calor sensível inicial para cada pixel. No entanto, os valores obtidos não representam adequadamente os fluxos de calor sensível que está ocorrendo devido os efeitos que a superfície causa na atmosfera, servindo somente como valores iniciais da iteração. Com isso é aplicada a Teoria de Monin-Obukhov no processo iterativo utilizando a equação (37) com o objetivo de corrigir os valores da resistência aerodinâmica do ar cuja influência é grande devido às condições instáveis da atmosfera, de forma que o valor de  $r_{ah}$  seja estabilizado e assim o fluxo de calor sensível seja calculado para todos os pixels.

$$L = - \frac{\rho * C_p * u_*^3 * T_{\text{sup}}}{k * g * H} \quad (37)$$

em que:  $L$  = Comprimento de Monin-Obukhov;  $\rho$  = Densidade do ar com valor utilizado igual a  $1,2 \text{ kgm}^{-3}$ ; e  $C_p$  = Calor específico do ar úmido com valor utilizado igual a  $1004 \text{ Jkg}^{-1}\text{k}^{-1}$ ;  $u_*$  = Velocidade de fricção em  $\text{s.m}^{-1}$ ;  $T_{\text{sup}}$  = Temperatura superficial em K;  $k$  = Constante de Von Karman que é igual a 0,41;  $g$  = Aceleração da gravidade igual a  $9,81 \text{ m.s}^{-2}$ ; e  $H$  = Fluxo de calor sensível.

Os valores do comprimento de Monin-Obukhov definem as condições de estabilidade atmosféricas, sendo as condições:  $L < 0$  a atmosfera é considerada instável,  $L > 0$  a atmosfera é considerada estável, e se  $L = 0$  a atmosfera é considerada neutra.

Ao serem estabelecidas as condições de estabilidade atmosférica, as correções de estabilidade para o transporte de momentum ( $\Psi_m$ ) e de calor ( $\Psi_h$ ) também devem ser consideradas, para isso foram utilizadas as formulações de Paulson e Webb (1970), conforme se segue:

Quando  $L < 0$ , utilizam-se as equações (38), (39), (40), (41), (42) e (43).

$$\Psi_{m(100m)} = 2 \ln \left( \frac{1+x_{100m}}{2} \right) + \ln \left( \frac{1+x_{100m}^2}{2} \right) - 2 \arctan(x_{100m}) + 0,5\pi \quad (38)$$

$$\Psi_{h(2m)} = 2 \ln \left( \frac{1+x_{2m}^2}{2} \right) \quad (39)$$

$$\Psi_{h(0,1m)} = 1 \ln \left( \frac{1+x_{0,1m}^2}{2} \right) \quad (40)$$

$$x_{100m} = \left( 1 - 16 * \frac{100}{L} \right)^{0,25} \quad (41)$$

$$x_{2m} = \left( 1 - 16 * \frac{2}{L} \right) \quad (42)$$

$$x_{0,1m} = \left( 1 - 16 * \frac{0,1}{L} \right) \quad (43)$$

Quando  $L > 0$ , utilizam-se as equações (44), (45) e (46).

$$\Psi_{m(100m)} = -5 * \left( \frac{100}{L} \right) \quad (44)$$

$$\Psi_{h(2m)} = -5 * \left( \frac{2}{L} \right) \quad (45)$$

$$\Psi_{h(0,1m)} = -5 * \left( \frac{0,1}{L} \right) \quad (46)$$

Quando  $L = 0$ , ou seja, condição neutra, então  $\Psi_m$  e  $\Psi_h = 0$ .

Aplicado o comprimento de Monin-Obukhov para cada pixel das imagens foi calculada a velocidade de fricção e a resistência aerodinâmica do ar corrigidas, aplicando as equações (47) e (48), respectivamente.

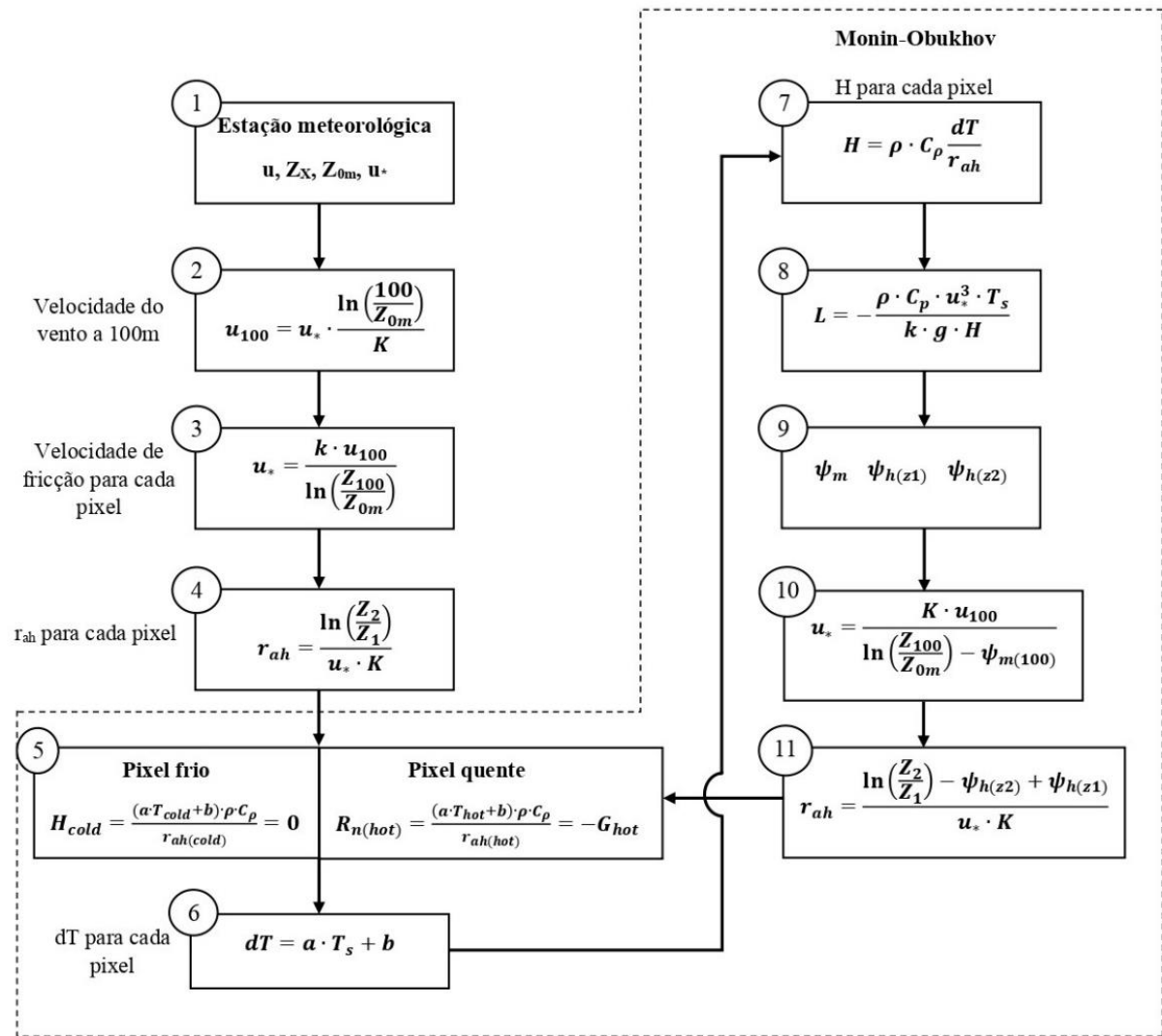
$$u^* = \frac{u_{100} * K}{\ln\left(\frac{100}{z_{0m}}\right) - \Psi_m(100m)} \quad (47)$$

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right) - \Psi_h(2m) + \Psi_h(0,1m)}{K * u^*} \quad (48)$$

em que:  $u_{100}$  = Velocidade do vento a 100m;  $K$  = Constante de Von Karman;  $z_{0m}$  = Rugosidade de cada pixel;  $Z_2$  = Altura do termômetro que realizou a medida da temperatura do ar, com valor igual a 2 m;  $Z_1$  = Altura da vegetação em volta da estação, com valor igual a 0,1 m;  $\Psi_{m(100m)}$  = Correção de estabilidade atmosférica para o transporte de momentum a 100 m;  $\Psi_{h(2m)}$  e  $\Psi_{h(0,1m)}$  = Correções de estabilidade para transferência de calor em 2 m e 0,1 m, respectivamente.

Calculados os valores da  $r_{ah}$  corrigidos, o processo de iteração é repetido até que os valores da  $r_{ah}$  de cada pixel estejam convergindo para um mesmo valor e assim o último valor de iteração do fluxo de calor sensível seja o que representa a área estudada e que será utilizado na equação do fluxo de calor latente. A representação do processo iterativo na busca do fluxo de calor sensível mais adequado pode ser observada na Figura 4.

Figura 4 - Fluxograma do cálculo do fluxo de calor sensível (H)



Fonte: adaptada de Bastiaanssen *et al.* (1998)

Inserindo-se os valores de  $R_n$ ,  $G$  e  $H$  em  $Wm^{-2}$  na equação (16) e obtido o fluxo de calor latente instantâneo ( $\lambda ET_{inst}$ ) foi calculada a evaporação total diária usando o método da fração evaporativa. Estudos micrometeorológicos mostraram que a fração de evaporação permanece inalterada ao longo do dia para superfícies de água (BASTIAANSSEN, 1995). A partir disto, essa constância temporal pode ser utilizada para calcular a taxa de evaporação integrada ao longo de 24h (AYENEW, 2003). Já o fluxo de calor de solo em condições diárias em reservatórios pode ser considerado aproximadamente zero (AYENEW, 2003), significando uma baixa influência no cálculo da evaporação diária. Com isso a fração evaporativa foi calculada aplicando a equação (49), e a evaporação diária utilizando a equação (50) (AYENEW, 2003).

$$\Lambda_{inst} = \frac{\lambda ET_{inst}}{R_n - G} = \frac{R_n - G - H}{R_n - G} \quad (49)$$



$$E_{\text{day}} = \frac{\Lambda_{\text{inst}} * R_{\text{nday}}}{28} \quad (50)$$

em que:  $\Lambda_{\text{inst}}$  = Fração evaporativa instantânea;  $\lambda ET_{\text{inst}}$  = Fluxo de calor latente instantâneo;  $E_{\text{day}}$  = Evaporação diária em mm dia<sup>-1</sup>;  $R_{\text{nday}}$  = Saldo de radiação médio diário em W m<sup>-2</sup> estimado pela equação (51); E o denominador 28 é necessário para a conversão da unidade W m<sup>-2</sup> para mm dia<sup>-1</sup>.

$$R_{\text{nday}} = (1 - \alpha_{\text{sup}}) * R_{\text{oci}} + L_{\text{day}} \quad (51)$$

em que:  $\alpha_{\text{sup}}$  = Albedo superficial;  $R_{\text{oci}}$  = Radiação de onda curta incidente em Wm<sup>-2</sup>; e  $L_{\text{day}}$  = Radiação de onda longa incidente diária em Wm<sup>-2</sup> calculado pela equação (52).

$$L_{\text{day}} = \sigma * (0,34 - 0,14 * e_{\text{pv}}^{0,5}) * T_{\text{ar}}^4 \quad (52)$$

em que:  $\sigma$  = Constante de Stefan Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8}$  Wm<sup>-2</sup> K<sup>-4</sup>);  $e_{\text{pv}}$  = Pressão de vapor real expressa em milibar calculado pela multiplicação entre a umidade relativa medida na estação meteorológica e o resultado da equação (3); e  $T_{\text{ar}}$  = Temperatura do ar.

Aplicada a metodologia do SEBAL, com dados de sensoriamento remoto do Landsat 8 e a fração evaporativa para estimar a evaporação diária nos reservatórios Pereira de Miranda, General Sampaio e Orós, foi realizada a comparação e correlação com as taxas de evaporação medidas por dois métodos convencionais: o tanque Classe “A” e o método de Penman.

### 6.2.8 Validação

Os cálculos estatísticos de validação foram realizados utilizando o software estatístico RStudio que possui licença livre e que é utilizado para análise de dados e o software Excel<sup>®</sup> para elaboração dos gráficos de correlação. Através deles foi realizado o processamento de dados entre as estimativas do SEBAL e os dados medidos de evaporação no tanque classe “A” e Penman.

Os dados de evaporação dos reservatórios utilizados na validação foram as das máximas diárias estimadas dentro dos reservatórios, estes dados foram comparados aos dados medidos no tanque Classe A e Penman.

Assumiu-se para a realização da validação que os dados medidos em campo eram os dados verdadeiros e avaliou-se o quanto estaticamente os dados estimados pelo SEBAL se correlacionavam com eles.

Para isso, os indicadores estatísticos utilizados para avaliar estaticamente o desempenho das estimativas realizadas foram o erro absoluto (EA), erro relativo (ER), raiz do erro quadrático médio (RMSE), coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) (1970).

Os erros absolutos, Equação (53), e erros relativos, Equação (54), possibilitaram a avaliação da margem de erro da estimativa de evaporação realizada tendo como referência o dado medido em campo e assumindo-se que este dado era o verdadeiro. Estes erros foram aplicados como forma de medir a precisão dos dados estimados.

$$EA = |E_{\text{Medida}} - E_{\text{SEBAL}}| \quad (53)$$

$$ER = \frac{E_{\text{Medida}} - E_{\text{SEBAL}}}{E_{\text{Medida}}} \quad (54)$$

em que: EA = Erro absoluto (mm); ER = Erro relativo (mm);  $E_{\text{Medida}}$  = Evaporação medida na estação meteorológica (mm); e  $E_{\text{SEBAL}}$  = Evaporação estimada pelo SEBAL (mm).

O RMSE, Equação (55), foi utilizado para avaliar a acurácia dos resultados numéricos obtidos com a metodologia do SEBAL. Seu resultado é dado em mm e indica o desvio médio entre a evaporação medida e a evaporação estimada. Com isso, resultados baixos, ou com uma pequena variação, indicam que houve um bom ajuste dos dados estimados em relação aos dados medidos.

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ), Equação (56), descreve a fração da variância total nos dados estimados pelo modelo SEBAL. Ele é o quadrado do coeficiente de correlação de Person ( $r$ ) que mede a correlação entre dados estimados e dados medidos. Valores de  $R^2$  próximos a 1 indicam que houve uma ótima correlação, já valores próximos de 0 indicam não haver uma relação linear entre os dados. Essa interpretação dos resultados pode ser observada na Tabela 6.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2} \quad (55)$$

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^N x_i * y_i - \frac{(\sum_{i=1}^N x_i) * (\sum_{i=1}^N y_i)}{N} \right]^2}{\left[ \sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^N x_i)^2}{N} \right] * \left[ \sum_{i=1}^N y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^N y_i)^2}{N} \right]} \quad (56)$$

em que: RMSE = Raiz do erro médio quadrático;  $R^2$  = Coeficiente de determinação; N = Número de observações;  $y_i$  = Valores de evaporação estimados pelo SEBAL e  $x_i$  = Valores de evaporações medidas.

Tabela 6 - Interpretação dos resultados do  $R^2$

Escala de Person		
Fraca	Moderada	Forte
$0 \leq R^2 \leq 0,25$	$0,25 \leq R^2 \leq 0,81$	$0,81 \leq R^2 \leq 1,00$

Fonte: Adaptada de Milton (1992).

Conforme avaliação proposta por Moriasi *et al.* (2007) valores de NSE, Equação (57), podem variar de - infinito a 1, sendo o valor 1 indicativo de forte ajuste entre os dados medidos e estimados e menor que 0,5 um ajuste insatisfatório (TABELA 7). Em outras palavras significa dizer que quando o desempenho for insatisfatório a média das estimativas resultaria numa predição tão boa quanto a do modelo, o que evidentemente não é muito bom do ponto de avaliação do modelo SEBAL. Por sua vez, valores negativos para NSE indicam que seria melhor usar a simples média do que os resultados fornecidos pelo modelo.

$$NSE = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_m - E_e)}{\sum_{i=1}^n (E_m - \bar{E}_e)^2} \right) \quad (57)$$

em que: NSE = Coeficiente de Nash-Sutcliffe;  $E_m$  = Evento observado, que é o valor de evaporação medida na estação meteorológica (mm);  $E_s$  = Evento simulado, que são os valores de evaporação estimados pelo SEBAL (mm); e  $\bar{E}_e$  = Média dos valores estimados de evaporação da área de estudo (mm).

Tabela 7 - Avaliação do desempenho do modelo de eficiência de Nash-Sutcliffe

Avaliação de desempenho	Nash-Sutcliffe
<b>Muito bom</b>	$0,75 < NSE \leq 1,00$
<b>Bom</b>	$0,65 < NSE \leq 0,75$
<b>Satisfatório</b>	$0,50 < NSE \leq 0,65$
<b>Insatisfatório</b>	$NSE \leq 0,50$

Fonte: Nash-Sutcliffe (1970).

## 6.3 Resultados e discussão

### 6.3.1 Temperatura superficial

A temperatura é um dos parâmetros climáticos que mais contribuem para a evaporação de água, sendo esta sensibilidade da temperatura da superfície identificada em diferentes reservatórios (PEREIRA *et al.*, 2009; RONG *et al.*, 2013; VIEIRA *et al.*, 2016).

Utilizando a banda termal do sensor TIRS foi identificado que a temperatura superficial atingiu as suas máximas nas menores profundidades das margens dos reservatórios em todas as datas de imageamento, sendo as maiores temperaturas identificadas predominantemente para o reservatório Pereira de Miranda, seguido de Orós e depois de General Sampaio (FIGURAS 5, 6, 7, 8, 9).

Resultado semelhante foi obtido em estudo de campo realizado por Angelocci *et al.* (1995) que de acordo com as diferenças de profundidades ocorria também uma estratificação térmica, ou seja, em menores profundidades durante o dia a temperatura superficial registrada era maior.

A altura de lâmina de água do período analisado de cada reservatório foi de 43,55 m para Pereira de Miranda, 108,47 m para General Sampaio e 187,38 m para Orós (COGERH, 2021). Sendo nas menores profundidades, nas margens dos reservatórios, registradas as maiores temperaturas superficiais (FIGURAS 5, 6, 7, 8, 9).

Altos valores de temperatura também são um indicativo da presença de nutrientes que podem estar no reservatório, oriundos por motivos naturais ou por ações antrópicas, que desencadeiam a presença de algas e cianobactérias, e que são muito comuns nos reservatórios estudados e com crescimento favorável devido à temperatura média deles (FRANÇA *et al.*, 2013).

A temperatura superficial média de cada reservatório não teve variações significativas entre o período estudado. Variou entre 23 °C e 26 °C para Pereira de Miranda e General Sampaio, e entre 23 °C e 25°C para Orós (TABELA 8).

As máximas temperaturas superficiais estimadas e atingidas nos reservatórios Pereira de Miranda e General Sampaio foram na data 26/08/2016 e 08/08/2015, respectivamente, ao mesmo tempo em que ocorreram máximas de temperatura do ar e velocidade do vento (TABELA 2).

O reservatório Orós apresentou sua máxima média de temperatura superficial na data de 26/08/2016 (TABELA 8), além de uma máxima de temperatura do ar e máxima de radiação

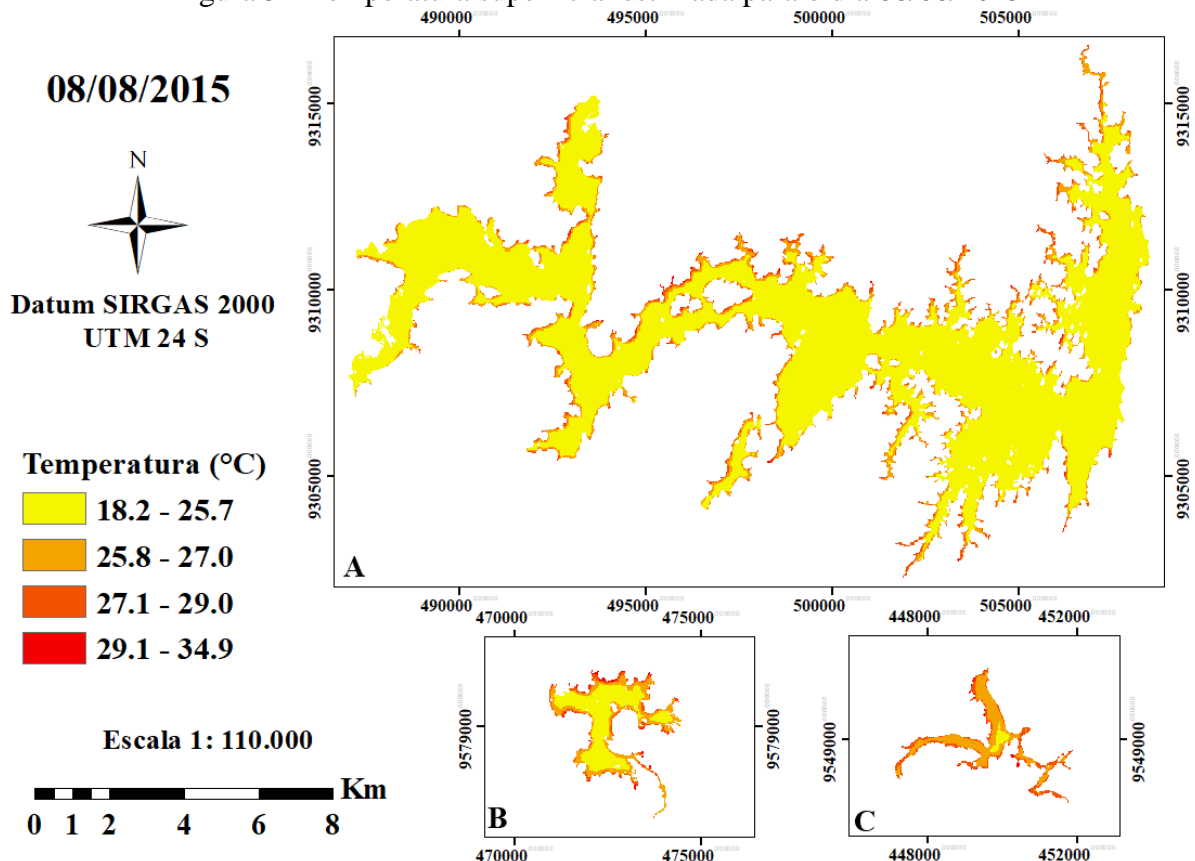
solar global (TABELA 2). No entanto, nesta data a velocidade do vento atingiu o menor valor no período.

Já as mínimas temperaturas superficiais dos três reservatórios ocorreram na data 26/06/2017, ao mesmo tempo em que foram registradas as mínimas dos parâmetros climatológicos temperatura do ar e radiação solar global, exceto a velocidade do vento que esteve nesta data entre seus valores máximos.

Em relação ao desvio padrão da média do período dos três reservatórios estudados foram obtidos valores menores que 1 °C, indicando que no período não houve grandes variações na temperatura média estimada nos espelhos de água (TABELA 8). O desvio da temperatura média do período para General Sampaio e Pereira de Miranda diferiram somente na segunda casa decimal, enquanto Orós teve quase 1 °C a menos estimado.

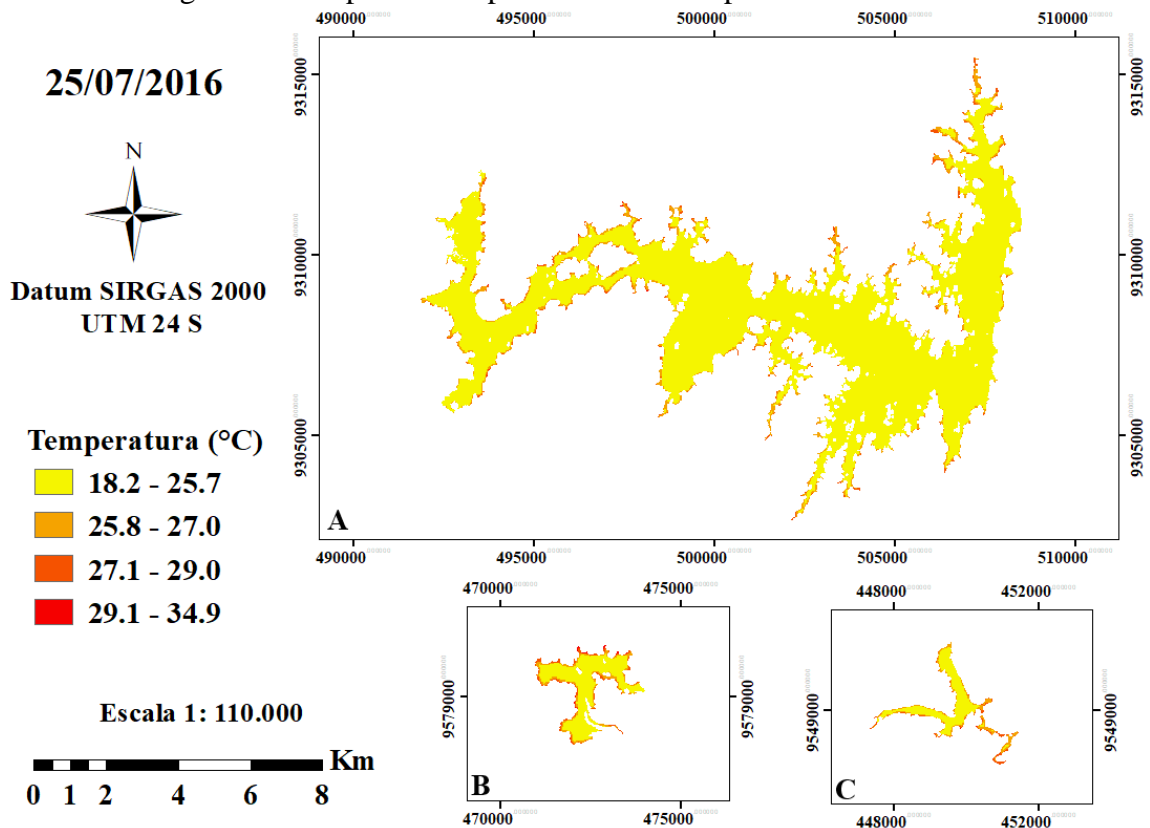
Estes resultados indicam que foi possível estimar e obter dados representativos da temperatura superficial utilizando o sensoriamento remoto orbital em períodos diferentes no espelho de água dos três reservatórios estudados. Foi percebida também uma dependência maior do resultado obtido com os parâmetros climatológicos temperatura do ar e radiação solar global.

Figura 5 - Temperatura superficial estimada para o dia 08/08/2015



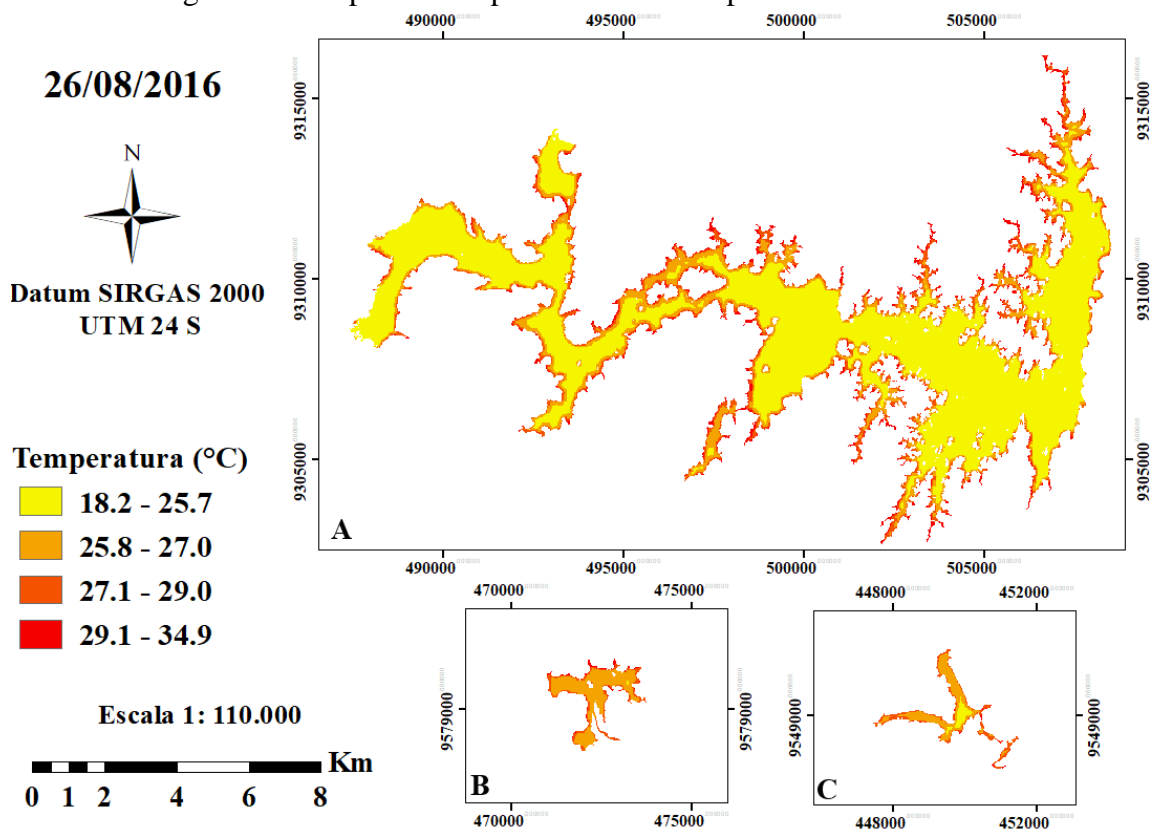
Fonte: elaborada pelo autor. Legenda: A: Orós, B: Pereira de Miranda e C: General Sampaio.

Figura 6 - Temperatura superficial estimada para o dia 25/07/2016



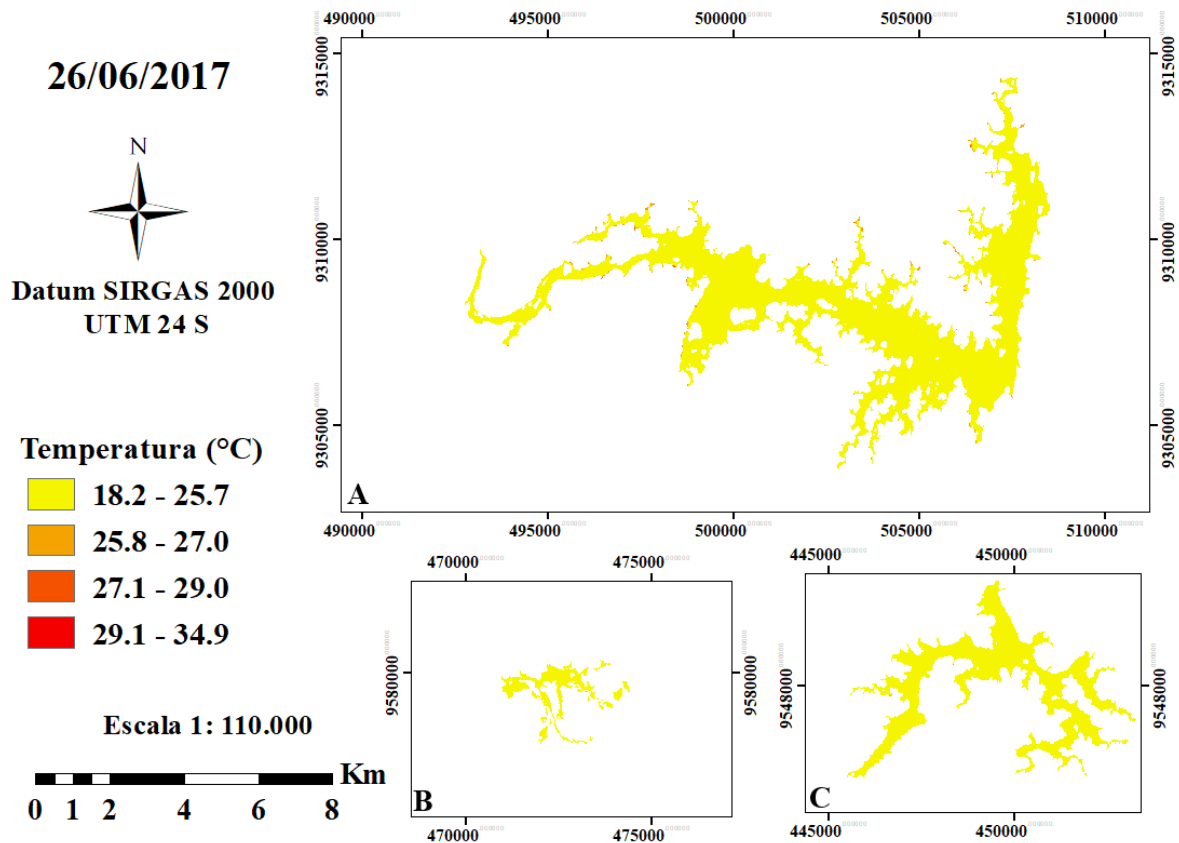
Fonte: elaborada pelo autor. Legenda: A: Orós, B: Pereira de Miranda e C: General Sampaio.

Figura 7 - Temperatura superficial estimada para o dia 26/08/2016



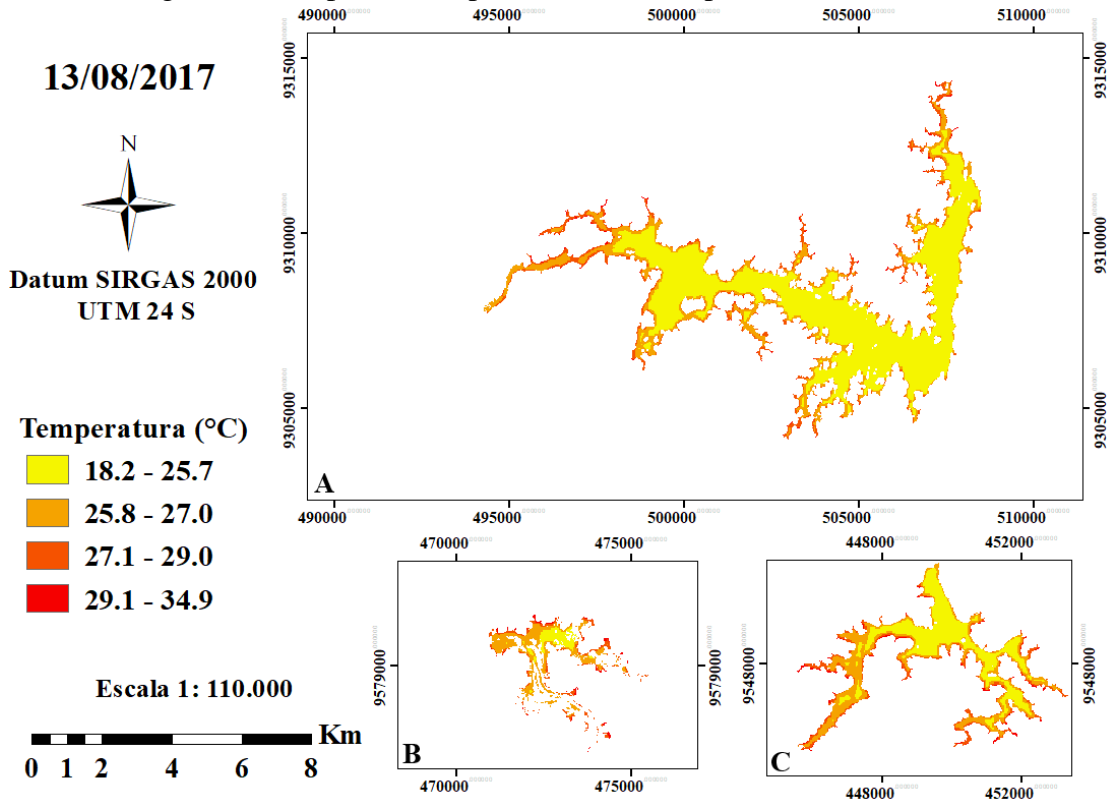
Fonte: elaborada pelo autor. Legenda: A: Orós, B: Pereira de Miranda e C: General Sampaio.

Figura 8 - Temperatura superficial estimada para o dia 26/06/2017



Fonte: elaborada pelo autor. Legenda: A: Orós, B: Pereira de Miranda e C: General Sampaio.

Figura 9 - Temperatura superficial estimada para o dia 13/08/2017



Fonte: elaborada pelo autor. Legenda: A: Orós, B: Pereira de Miranda e C: General Sampaio.

Tabela 8 - Temperatura superficial em °C

Dia	Pereira de Miranda		General Sampaio		Orós	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
<b>08/08/2015</b>	26,07	1,04	26,80	0,94	24,98	0,86
<b>25/07/2016</b>	25,46	1,00	25,44	0,98	24,59	0,70
<b>26/08/2016</b>	26,76	1,04	26,69	1,02	25,62	1,44
<b>26/06/2017</b>	23,28	0,45	23,27	0,45	23,16	0,86
<b>13/08/2017</b>	26,59	1,18	26,13	1,16	25,53	1,08
<b>Média</b>	<b>25,63</b>	<b>0,94</b>	<b>25,67</b>	<b>0,91</b>	<b>24,78</b>	<b>0,99</b>

Fonte: dados da pesquisa.

### 6.3.2 Saldo de radiação médio diário ( $Rn_{day}$ )

O saldo de radiação, também chamado de fluxo de radiação líquida, é um dos principais componentes na estimativa de evaporação pelo algoritmo SEBAL. Foi estimado seu valor médio diário em  $W m^{-2}$  e suas variações nos espelhos de água dos reservatórios Pereira de Miranda, General Sampaio e Orós (FIGURAS 10, 11, 12, 13 e 14). É importante destacar que, no geral, o saldo de radiação médio diário assumiu valores menores que o saldo de radiação instantâneo calculado pelo SEBAL. Isso decorreu pelo fato de o balanço diário também considerar na estimativa horários sem insolação, o que provoca a redução do valor do  $Rn$  em escala diária (BEZERRA *et al.*, 2021).

A distribuição espacial do saldo de radiação médio diário no período de estudo teve pequenas variações, isso é constatado pela baixa variabilidade identificada nas imagens e também pelos baixos desvios padrões obtidos. Pereira de Miranda teve um desvio padrão da média de  $2,82 W m^{-2}$ , General Sampaio  $1,58 W m^{-2}$  e Orós  $2,49 W m^{-2}$  (TABELA 9). Bezerra *et al.* (2021) também identificaram uma pequena variabilidade nas imagens do reservatório Dourado no RN, e nos resultados que eles obtiveram, o desvio padrão da média das 5 imagens teve como resultado o valor de  $11,7 W m^{-2}$ . Com esses resultados pode-se perceber que há uma estabilidade na variabilidade da radiação média diária em reservatórios de regiões semiáridas (GIONGO *et al.*, 2011). Resultados semelhantes foram obtidos por Silva, Braga e Braga (2011).

No período estudado o reservatório Pereira de Miranda teve uma variação de saldo de radiação médio diário entre  $112 W m^{-2}$  e  $154 W m^{-2}$ , General Sampaio  $116 W m^{-2}$  e  $149 W m^{-2}$  e Orós  $119 W m^{-2}$  e  $171 W m^{-2}$  (TABELA 9). No reservatório de água Dourado, localizado em região semiárida do RN, Bezerra *et al.* (2021) calcularam valores próximos aos calculados neste estudo, o saldo de radiação médio diário que foi estimado para o reservatório Dourado variou entre  $180 W m^{-2}$  e  $220 W m^{-2}$ . E Silva, Braga e Braga (2011) encontraram valores entre



173,4 W m<sup>-2</sup> e 196,6 W m<sup>-2</sup> no reservatório São Gonçalo na Paraíba. Estando estes resultados de acordo com os obtidos no presente estudo para Pereira de Miranda, General Sampaio e Orós.

Também não foi observado um padrão de crescimento do saldo de radiação no sentido das margens em direção ao centro ou meio dos reservatórios, talvez isso tenha ocorrido devido às características fisiográficas dos reservatórios (FIGURAS 10, 11, 12, 13, 14). Isso também foi identificado por Alcântara (2010) no reservatório hidrelétrico de Itumbiara em Goiás, os resultados obtidos não indicaram haver um padrão de crescimento do saldo de radiação no sentido das margens ao centro do reservatório.

O saldo de radiação médio diário nesta pesquisa representou o balanço de energia diário que ocorreu na superfície dos reservatórios, seu resultado esteve intrinsecamente ligado aos parâmetros de albedo, presença de sedimentos ou vegetação na água. De toda radiação que incide nos reservatórios, em média, 92% é absorvida pela água e convertida em calor (HENDERSON-SELLERS, 1986; SHUTTLEWORTH, 2012), podendo esse percentual ser reduzido devido à turbidez e conseqüente aumento da reflexão da água dos reservatórios (FINCH; HALL, 2001).

Apesar de bastante sutis, as características de presença de sedimentos ou vegetação na água possivelmente interferiram nos resultados obtidos. No caso da vegetação presente nas margens dos reservatórios, foi percebido que as ocorrências dos maiores saldos de radiação médios diários tenderam a acompanhar as áreas com maiores valores de NDVI e SAVI, ou seja, nas margens dos reservatórios onde ocorria presença de vegetação (BEZERRA *et al.*, 2021).

Na água, o saldo de radiação pode alcançar grandes profundidades dependendo, entre outros fatores, da turbidez associada aos sedimentos em suspensão (JENSEN; ALLEN, 2016). O reservatório Pereira de Miranda apresentou predominantemente os menores saldos de radiação, isso ocorreu devido às suas características físicas-químicas-microbiológicas, como menores profundidades, tamanho do espelho de água e água com potencial maior de eutrofização (COGERH, 2022). Em seguida, foi General Sampaio que apresentou os menores saldos de radiação e depois foi o Orós.

O saldo de radiação médio diário estimado para o período foi muito semelhante ao dos reservatórios Pereira de Miranda e General Sampaio, divergindo a partir da primeira casa decimal. Já Orós, apresentou um saldo positivo em quase 14 W m<sup>-2</sup> em relação a Pereira de Miranda e General Sampaio (TABELA 9). O que significa que no período, Orós absorveu mais energia que os outros dois reservatórios. Isso ocorreu devido ao maior volume de água armazenada e assim maior capacidade de armazenamento de energia (BEZERRA *et al.*, 2021).

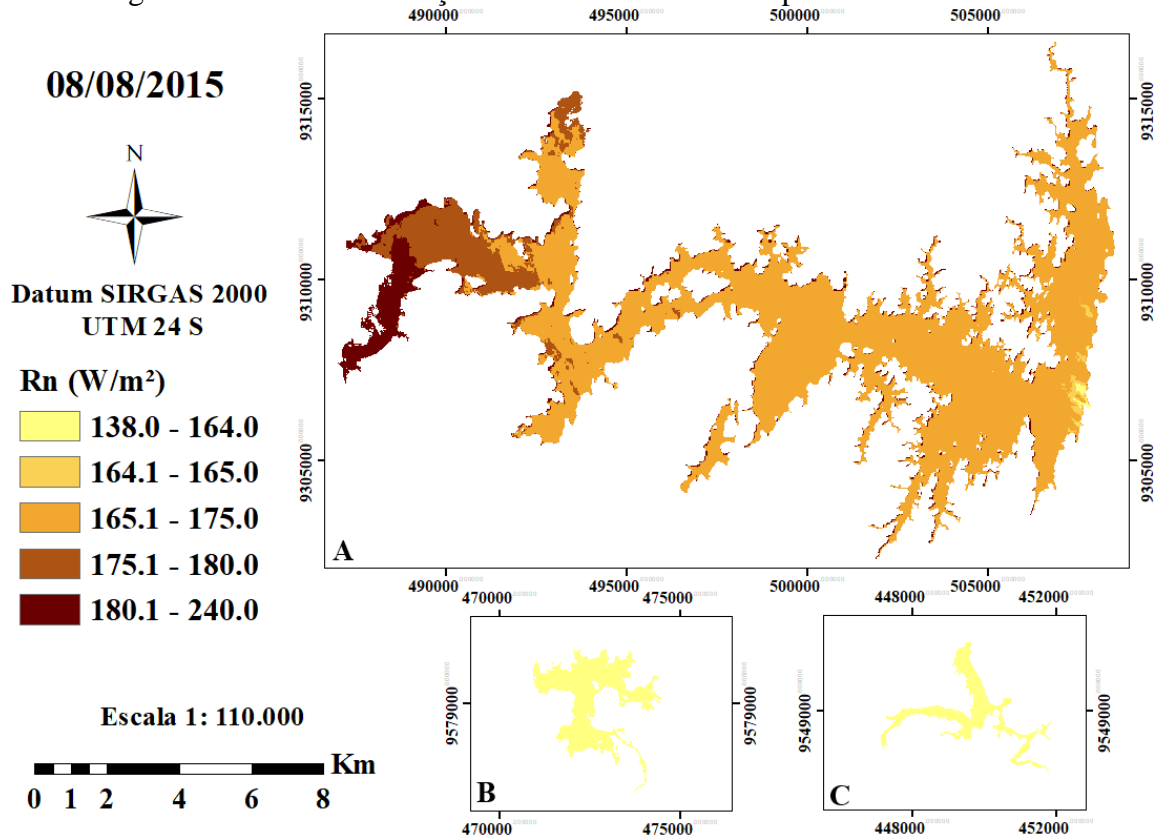
Alcântara (2010) também identificou esta relação de quanto maior o volume de água armazenada maior é o conteúdo de calor acumulado no reservatório.

As máximas dos reservatórios Pereira de Miranda e General Sampaio foram registradas na data 13/08/2017. Um pouco antes desta data, estes reservatórios tiveram um aporte de água, que pode ser observada nas Figura 2 e nas Tabelas 13 e 14. Este aporte de água favoreceu uma maior absorção de energia pelos reservatórios devido ao aumento do espelho de água dos reservatórios e volume de água disponível.

Em contrapartida, na data anterior em 26/06/2017, o aporte de água nos reservatórios Pereira de Miranda e General Sampaio era mais recente ou ainda estava ocorrendo e foram obtidos os menores valores de saldo de radiação diário (TABELA 9). A explicação deste fato está no revolvimento dos sedimentos ocorridos nesses reservatórios devido o aporte de água recente, e no favorecimento do desenvolvimento de plantas por causa da maior disponibilidade de nutrientes oriundas do aporte de água.

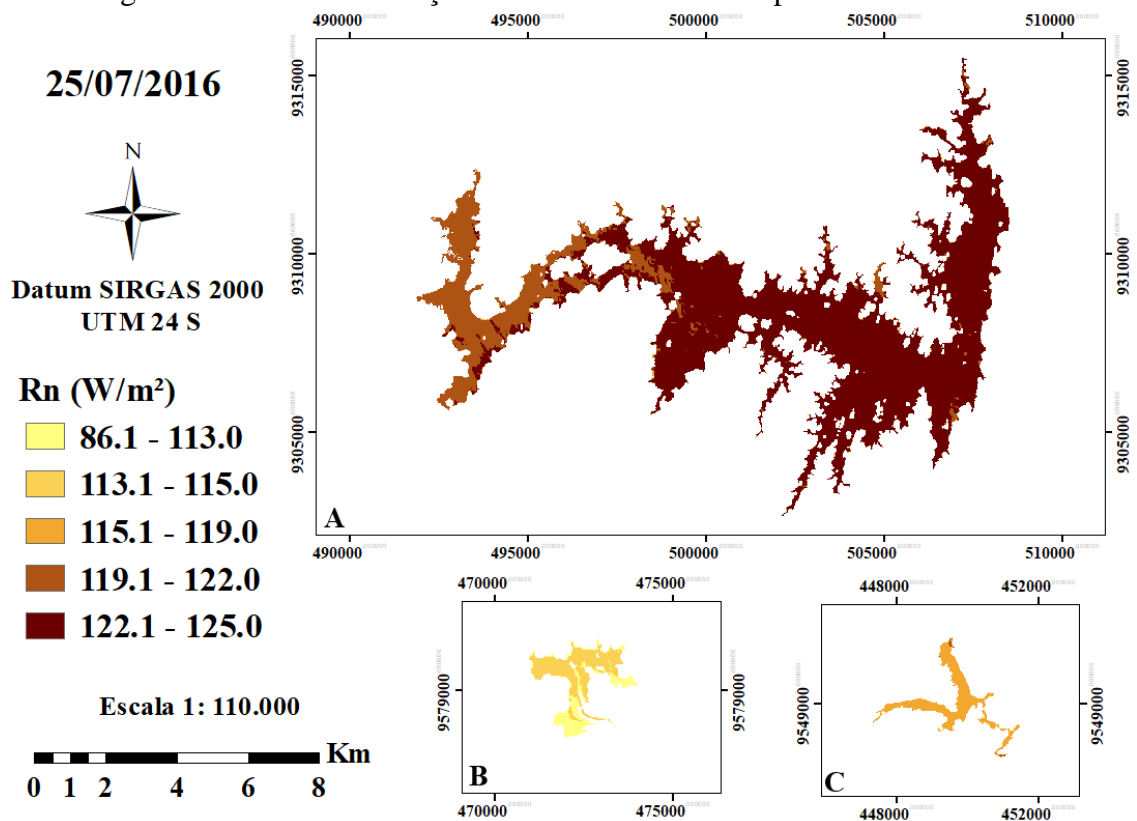
Entre os três reservatórios, Pereira de Miranda é o mais impactado por ações antrópicas em suas margens e à montante (COGERH, 2022). Estas ações aumentaram a presença de nutrientes e sedimentos nos reservatórios, que favoreceram a elevação da turbidez e desenvolvimento de plantas, e, que por sua vez, aumentaram a reflectância da água do reservatório (BEZERRA *et al.*, 2021). No geral, o reservatório Orós teve ao longo do período os maiores saldos de radiação, exceto para a data 13/08/2017 que foi o Pereira de Miranda. Orós foi, predominantemente, o que mais absorveu energia e se manteve com saldo positivo em relação aos outros reservatórios.

Figura 10 - Saldo de radiação médio diário estimado para o dia 08/08/2015



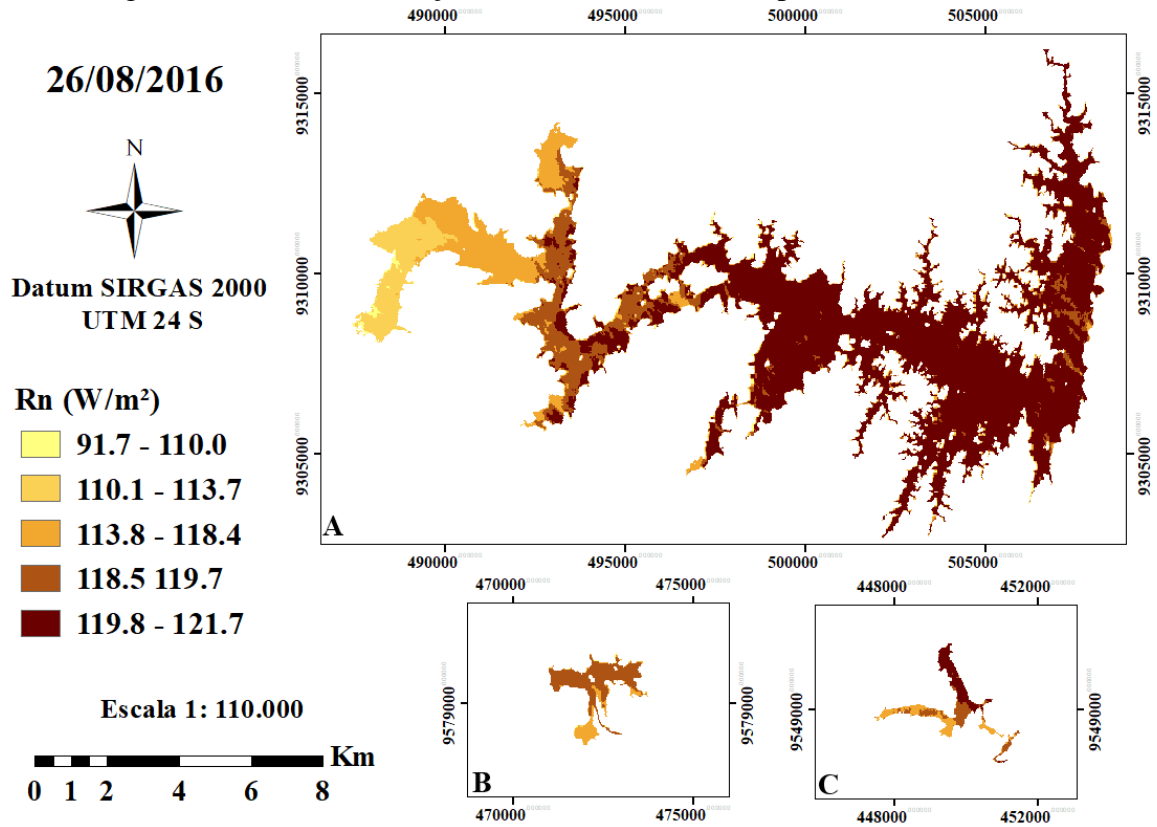
Fonte: elaborada pelo autor. Legenda: A: Orós, B: Pereira de Miranda e C: General Sampaio.

Figura 11 - Saldo de radiação médio diário estimado para o dia 25/07/2016



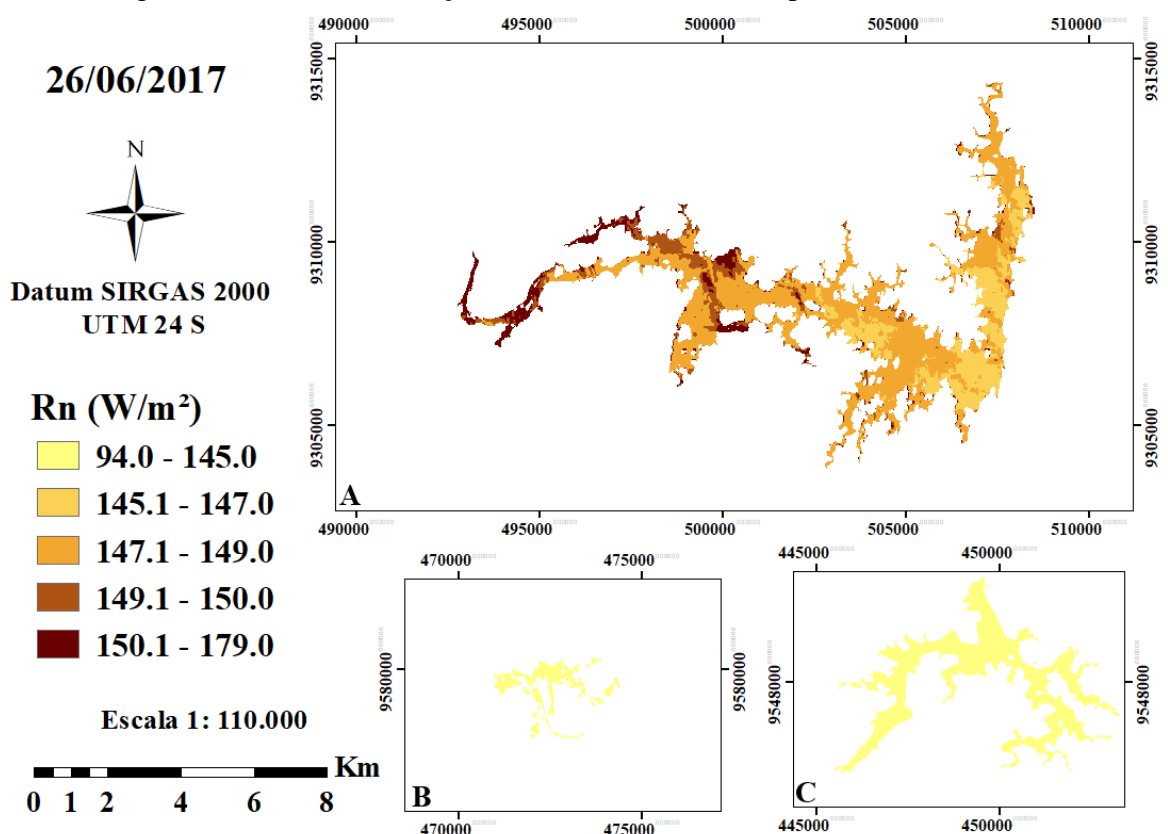
Fonte: elaborada pelo autor. Legenda: A: Orós, B: Pereira de Miranda e C: General Sampaio.

Figura 12 - Saldo de radiação médio diário estimado para o dia 26/08/2016



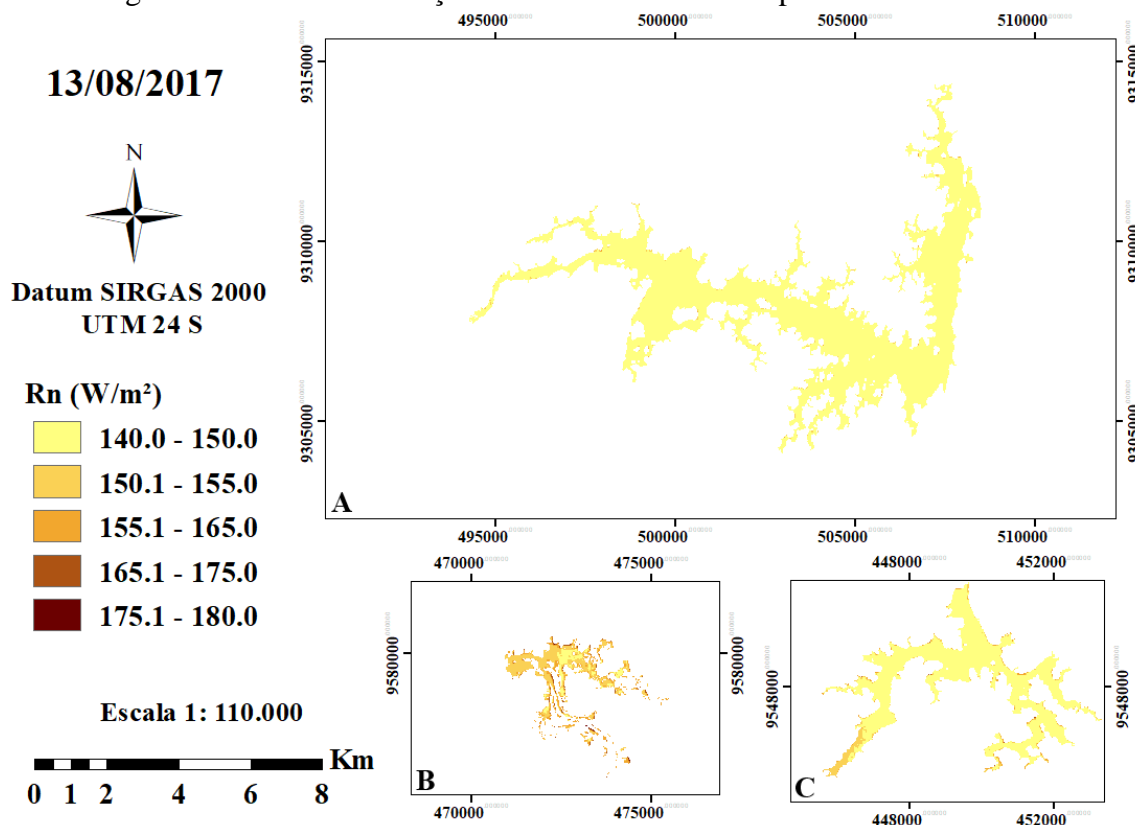
Fonte: elaborada pelo autor. Legenda: A: Orós, B: Pereira de Miranda e C: General Sampaio.

Figura 13 - Saldo de radiação médio diário estimado para o dia 26/06/2017



Fonte: elaborada pelo autor. Legenda: A: Orós, B: Pereira de Miranda e C: General Sampaio.

Figura 14 - Saldo de radiação médio diário estimado para o dia 13/08/2017



Fonte: elaborada pelo autor. Legenda: A: Orós, B: Pereira de Miranda e C: General Sampaio.

Tabela 9 - Saldo de radiação médio diário em W m<sup>2</sup>

Dia	Pereira de Miranda		General Sampaio		Orós	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
08/08/2015	141,77	2,30	141,37	1,97	171,97	5,79
25/07/2016	112,63	2,61	117,72	1,27	122,73	0,99
26/08/2016	117,86	1,62	119,07	1,29	119,31	3,05
26/06/2017	114,53	2,39	116,04	1,69	148,12	1,73
13/08/2017	154,14	5,16	149,08	1,69	146,88	0,93
<b>Média</b>	<b>128,19</b>	<b>2,82</b>	<b>128,66</b>	<b>1,58</b>	<b>141,80</b>	<b>2,49</b>

Fonte: Dados de pesquisa.

### 6.3.3 Evaporação

Espacialmente, a evaporação foi diferente em toda a superfície dos reservatórios (FIGURAS 15, 16, 17, 18, 19), verificou-se que ela mudou significativamente em toda sua superfície, com valores médios para o período analisado variando entre 1,52 mm e 4,98 mm para o reservatório Pereira de Miranda, 2,03 mm e 4,91 mm para o reservatório General Sampaio, e 1,13 mm e 6,26 mm para o reservatório Orós (TABELA 10). Altas variações

também foram identificadas por Ayenew (2003) na superfície de quatro reservatórios, identificados como lagos ‘rifles’, que ele estudou na Etiópia utilizando o algoritmo SEBAL.

Em todas as datas de imageamento dos reservatórios Orós, Pereira de Miranda e General Sampaio registraram-se menores evaporações nas margens, ao contrário do que se poderia supor devido à influência que menores profundidades de água têm em maiores evaporações.

Assim como a profundidade variável dos reservatórios, que gradualmente são maiores no centro das barragens, ocorreu a influência dos parâmetros climatológicos de velocidade do vento, temperatura do ar, radiação solar, aspectos fisiográficos e de qualidade de água das regiões. Estas regiões, apesar de serem semiáridas, são diferentes e impactaram de diferentes formas nos resultados de evaporação obtidos.

No reservatório Pereira de Miranda, em 08/08/2015, foi medida a maior velocidade do vento do período (TABELA 2) com a ocorrência da maior evaporação média dentre todos os períodos (TABELA 10). Ou seja, nesta data, a velocidade do vento influenciou na evaporação média estimada no reservatório Pereira de Miranda.

Para o reservatório General Sampaio, na data 26/08/2016, ficou evidenciado o impacto que a velocidade do vento e a radiação solar tiveram na estimativa de evaporação. Nesta data, o reservatório General Sampaio apresentou seu maior valor de evaporação estimada pelo SEBAL entre os dados máximos deste reservatório (TABELA 10), ao mesmo tempo em que ocorreram máximas de velocidade do vento e máxima de radiação solar (TABELA 2).

Já em relação ao reservatório Orós, na data 26/06/2017, quando ocorreu a maior velocidade do vento (TABELA 2), ocorreu também a maior evaporação estimada entre todos os reservatórios (TABELA 10).

Analisando os três reservatórios, percebe-se haver uma relação maior entre a velocidade do vento medida nos reservatórios e seu valor estimado de evaporação, sendo as velocidades do vento medidas para o reservatório Orós ligeiramente superiores às medidas para os reservatórios Pereira de Miranda e General Sampaio (TABELA 10). Acredita-se que esta característica tenha influenciado nos resultados obtidos, assim como a altitude ao qual cada reservatório se encontra (FIGURA 3).

A altitude dentro do reservatório Orós em relação ao mar varia com valor médio de 198 m, enquanto que Pereira de Miranda com valor médio de 51 m e General Sampaio com valor médio de 115 m (TABELA 1), estando Orós localizado em uma região mais seca com regime de chuva inferior aos dos outros reservatórios que estão mais próximos ao litoral. Todos esses fatores juntos em um local fixo determinaram a taxa de evaporação de cada pixel através do algoritmo SEBAL, com o Orós apresentando as maiores lâminas de água evaporada.

Além disso, as datas estudadas se referem a um período em que o semiárido brasileiro estava passando por uma severa crise hídrica, o que impactou significativamente o volume de água armazenada e diversas variáveis limnológicas de qualidade de água, como a concentração de nutrientes que foi aumentada e que proporcionou a proliferação de cianobactérias às margens desses reservatórios.

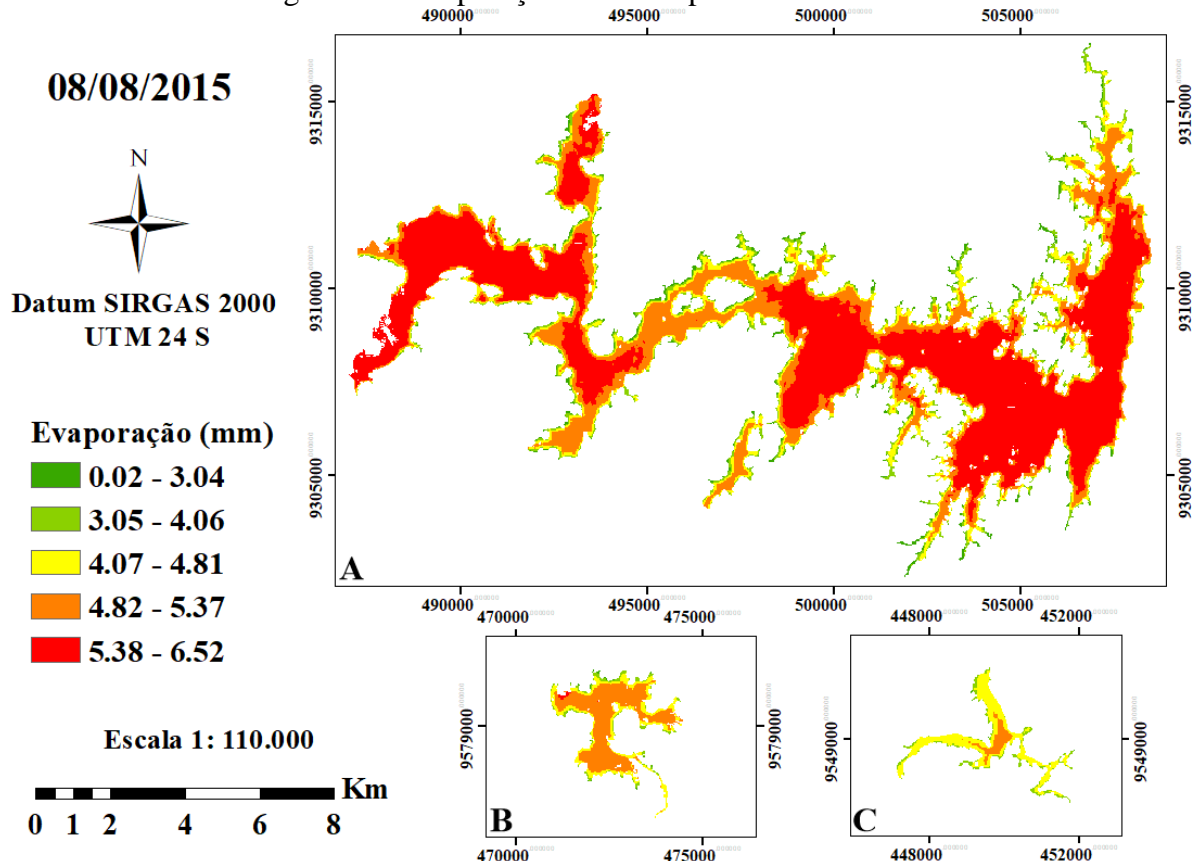
Assim, em algumas partes das margens dos reservatórios de todas as imagens (FIGURAS 15, 16, 17, 18, 19) foram obtidas evaporações mínimas, que estão identificadas na cor azul nos mapas, que foram associadas à vegetação que é abundante nas margens destes reservatórios, e que foram intensificadas pelo contexto hídrico e período de estudo da região (FIGURA 2).

Apesar de ter sido no reservatório Orós que ocorreram as maiores lâminas de água evaporada entre os três reservatórios, este reservatório foi o que apresentou as menores temperaturas superficiais (TABELA 8) em todo o período estudado, além disso, apresentou predominantemente maiores valores de saldo de radiação, indicando assim uma maior relação da evaporação estimada com a velocidade do vento medida na estação meteorológica e com os saldos de radiação estimados pelo SEBAL.

Hassan (2013) também estimou a evaporação com o SEBAL aplicado ao lago Nasser em região semiárida do Egito e comparou a seis outros métodos. Seus resultados indicaram que os métodos de evaporação que incluíam em seus cálculos energia disponível e termos aerodinâmicos forneceram as melhores comparações com a evaporação obtida pelo SEBAL.

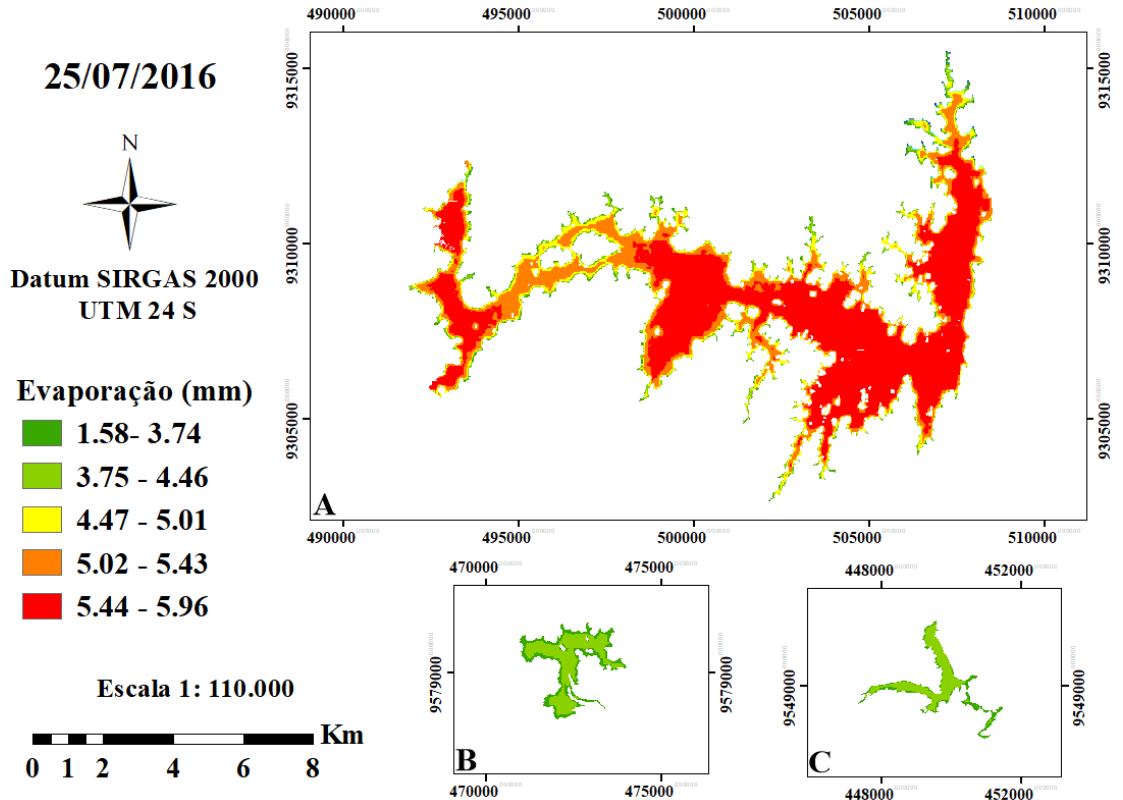
Comparando os reservatórios Pereira de Miranda e General Sampaio que estão localizados na mesma bacia hidrográfica, perceberam-se estimativas de evaporação próximas, no entanto, com valor máximo estimado para Pereira de Miranda e também valor mínimo estimado para Pereira de Miranda em todo o período (TABELA 10). Apesar de sutis as diferenças, associou-se as evaporações máximas às menores profundidades e maior área hidráulica deste reservatório (TABELA 1), e associaram-se os valores mínimos à presença de plantas mais frequentes e abundantes às margens do reservatório Pereira de Miranda.

Figura 15 - Evaporação estimada para o dia 08/08/2015



Fonte: elaborada pelo autor. Legenda: A: Orós, B: Pereira de Miranda e C: General Sampaio.

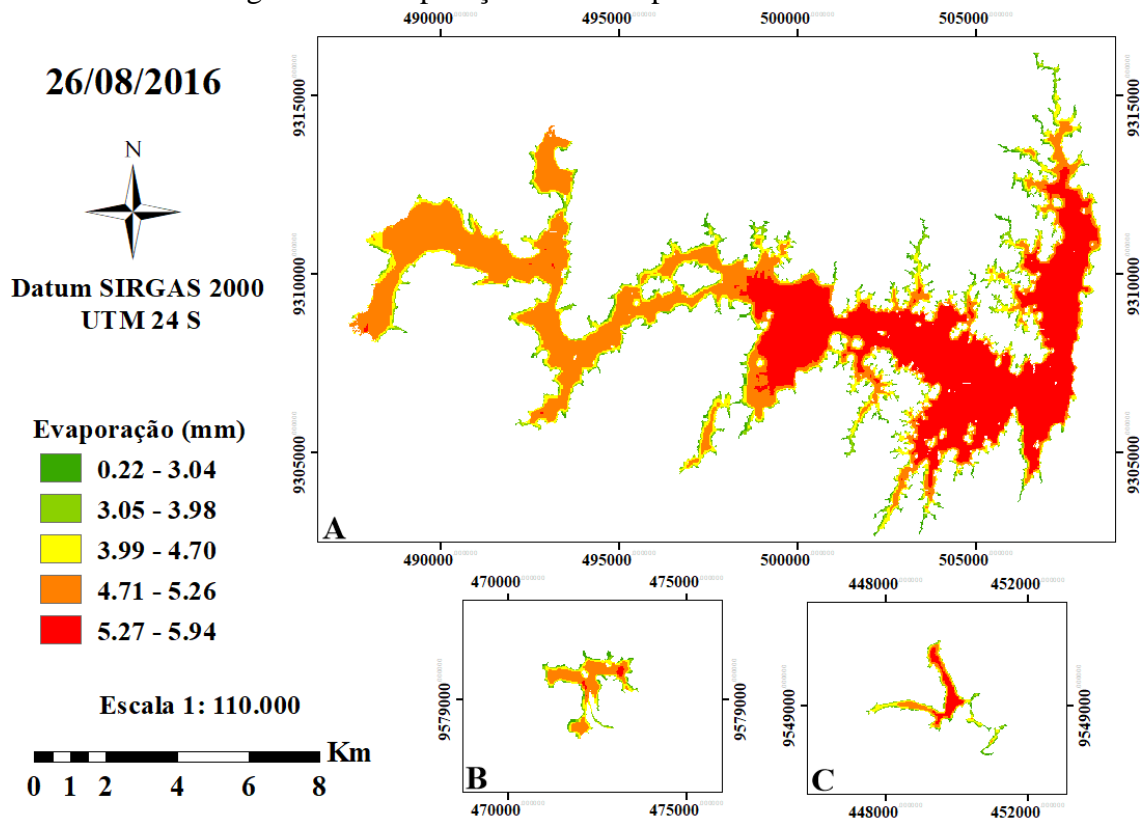
Figura 16 - Evaporação estimada para o dia 25/07/2016



Fonte: elaborada pelo autor. Legenda: A: Orós, B: Pereira de Miranda e C: General Sampaio

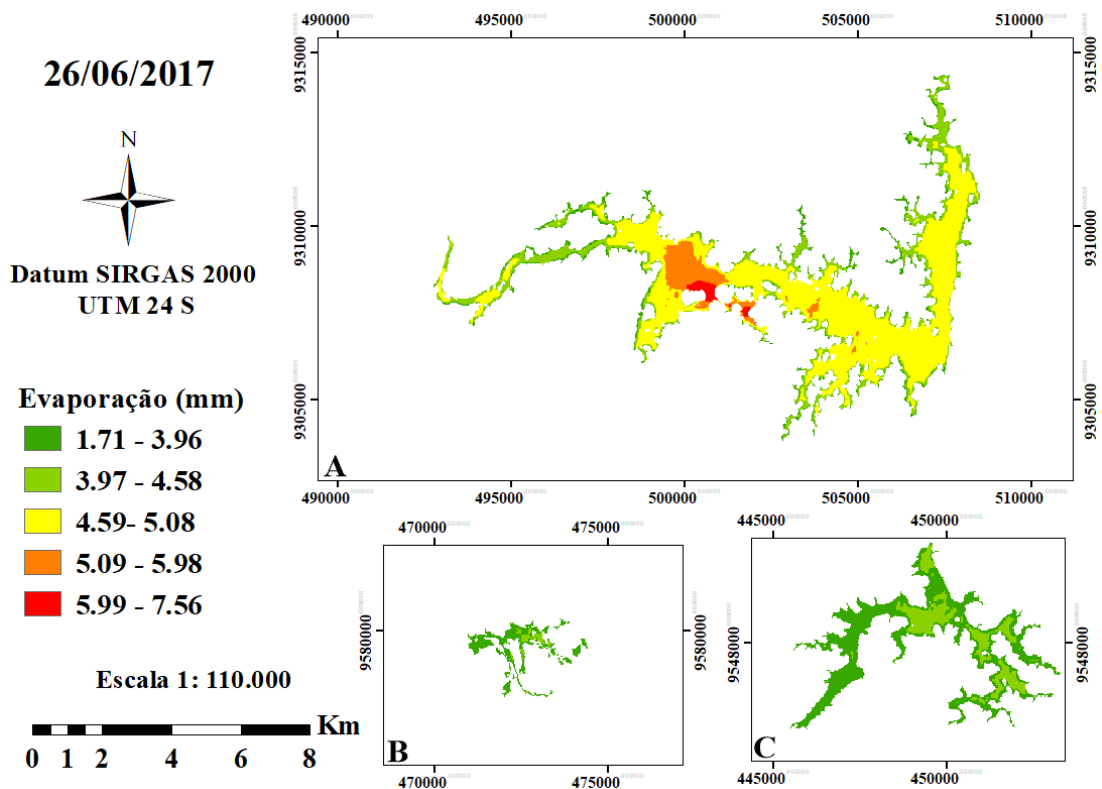


Figura 17 - Evaporação estimada para o dia 26/08/2016



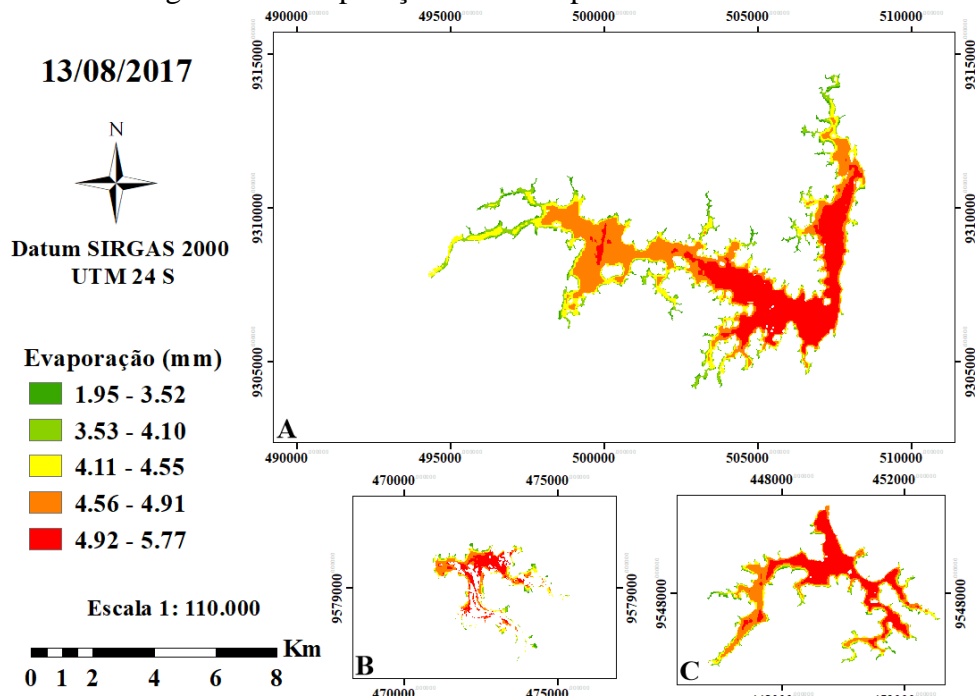
Fonte: elaborada pelo autor. Legenda: A: Orós, B: Pereira de Miranda e C: General Sampaio.

Figura 18 - Evaporação estimada para o dia 26/06/2017



Fonte: elaborada pelo autor. Legenda: A: Orós, B: Pereira de Miranda e C: General Sampaio.

Figura 19 - Evaporação estimada para o dia 13/08/2017



Fonte: elaborada pelo autor. Legenda: A: Orós, B: Pereira de Miranda e C: General Sampaio.

Tabela 10 - Evaporação estimada com o SEBAL em mm dia<sup>-1</sup>

Dia	Pereira de Miranda			General Sampaio			Orós		
	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima
08/08/2015	1,49	4,76	5,70	2,52	4,43	5,05	0,02	5,17	6,53
25/07/2016	1,71	3,67	3,96	2,60	3,83	4,20	1,58	5,31	5,96
26/08/2016	0,22	4,45	5,41	0,69	4,55	5,84	0,38	4,96	5,94
26/06/2017	1,94	3,68	4,05	1,96	3,76	4,17	1,71	4,68	7,56
13/08/2017	2,26	4,67	5,77	2,37	4,72	5,31	1,96	4,62	5,32
<b>Média</b>	<b>1,52</b>	<b>4,25</b>	<b>4,98</b>	<b>2,03</b>	<b>4,26</b>	<b>4,91</b>	<b>1,13</b>	<b>4,95</b>	<b>6,26</b>

Fonte: dados da pesquisa.

### 6.3.4 Validação

Os dados de evaporação dos reservatórios utilizados na validação foram os das máximas diárias de evaporação estimadas dentro dos reservatórios (TABELA 11).

Tabela 11 - Evaporação nos reservatórios em mm dia<sup>-1</sup>

Data	Pereira de Miranda		General Sampaio		Orós	
	Emedida	Eestimada	Emedida	Eestimada	Emedida	Eestimada
08/08/2015	5,40	5,70	5,40	5,05	6,26	6,53
25/07/2016	4,26	3,96	4,26	4,20	6,38	5,96
26/08/2016	5,82	5,41	5,82	5,84	6,22	5,94
26/06/2017	4,12	4,05	4,12	4,17	7,50	7,56
13/08/2017	5,40	5,77	5,40	5,31	5,25	5,32
<b>Média</b>	<b>5,00</b>	<b>4,98</b>	<b>5,00</b>	<b>4,91</b>	<b>6,32</b>	<b>6,26</b>

Fonte: dados da pesquisa.

Analisando o reservatório Pereira de Miranda, observa-se que a maior diferença registrada entre a evaporação estimada pelo SEBAL e a medida em campo foi a do dia 26/08/2016 com uma diferença de 0,41 mm, subestimando o dado medido em campo (TABELA 11). Já a menor diferença foi registrada no dia 26/06/2017, também subestimando o dado medido em campo com uma diferença igual a 0,07 mm. Verificando a evaporação média estimada no período pelo SEBAL, ela se mostrou bem próxima ao dado medido em campo com valor igual a 4,98 mm dia<sup>-1</sup> estimado para 5,0 mm dia<sup>-1</sup> medido.

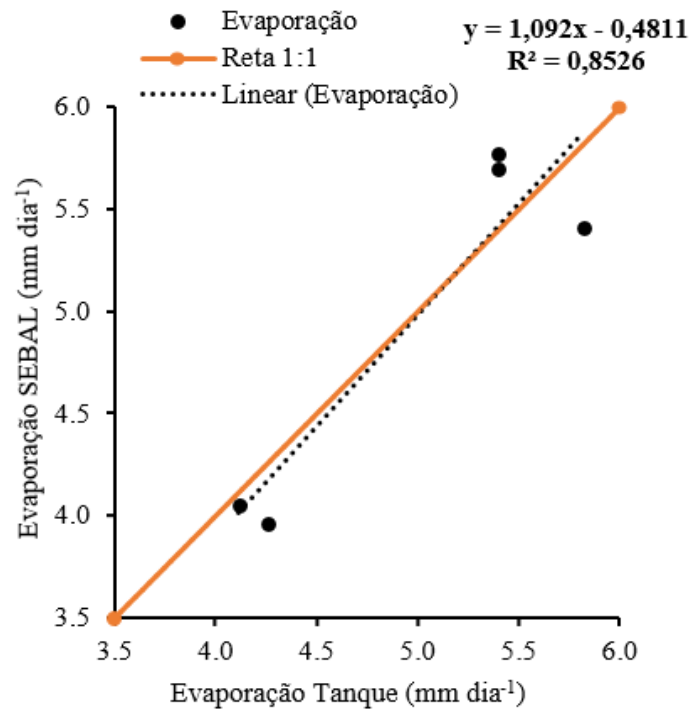
Ao contrário de Pereira de Miranda a melhor estimativa de General Sampaio foi na data 26/08/2016 com uma diferença de evaporação estimada igual a 0,02 mm, superestimando a evaporação medida (TABELA 11). Já a maior diferença foi registrada no dia 08/08/2015, subestimando o dado medido em campo com o tanque Classe “A”. No caso da média do período houve também uma estimativa do SEBAL bem próxima à medida, com valor de 4,91 mm dia<sup>-1</sup> estimado para 5,0 mm dia<sup>-1</sup> medido.

E em relação ao Orós, assim como o Pereira de Miranda, a melhor estimativa foi no dia 26/06/2017, onde Orós apresentou uma diferença entre evaporação estimada e evaporação medida igual a 0,06 mm, sendo a estimativa superestimando o dado medido (TABELA 11). Já a maior diferença entre o dado estimado e medido foi igual 0,42 para a data 25/07/2016, com o dado estimado subestimando o dado medido. Analisando a média do período, as evaporações também apresentaram valores bem próximos, com 6,26 mm dia<sup>-1</sup> para dado estimado e 6,32 mm dia<sup>-1</sup> para dado medido.

Apesar das diferenças terem sido muito pequenas, Pereira de Miranda foi o reservatório que apresentou a melhor estimativa média no período entre os reservatórios deste estudo, seguido de Orós e depois General Sampaio (TABELA 11). Em geral, pode-se afirmar que o SEBAL foi eficiente para estimar a evaporação nos corpos d’água, pois foi altamente preciso para estimar a evaporação dos reservatórios Pereira de Miranda, General Sampaio e Orós.

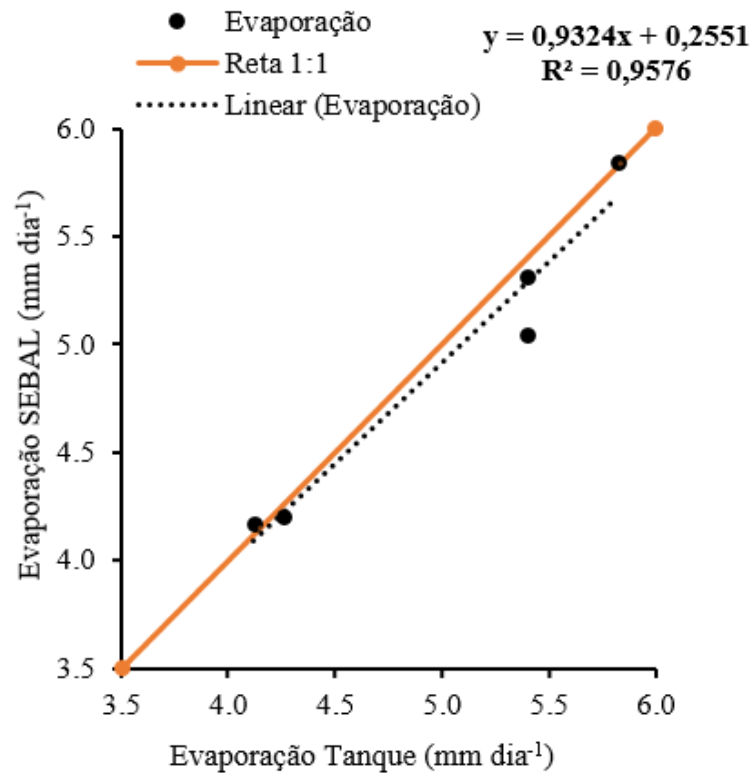
Obtidas as estimativas de evaporação realizadas pelo algoritmo SEBAL, foi realizada a sua validação utilizando dados meteorológicos de um tanque Classe “A” para os reservatórios Pereira de Miranda e General Sampaio, e dados estimados utilizando-se a equação de Penman para o reservatório Orós. A validação do modelo está expressa nas Figuras 20, 21 e 22 para cada reservatório; nelas está representada a relação linear entre a evaporação medida e a estimada pelo SEBAL.

Figura 20 - Validação do modelo de estimativa da evaporação em  $\text{mm dia}^{-1}$  utilizando dados de sensoriamento remoto no reservatório Pereira de Miranda



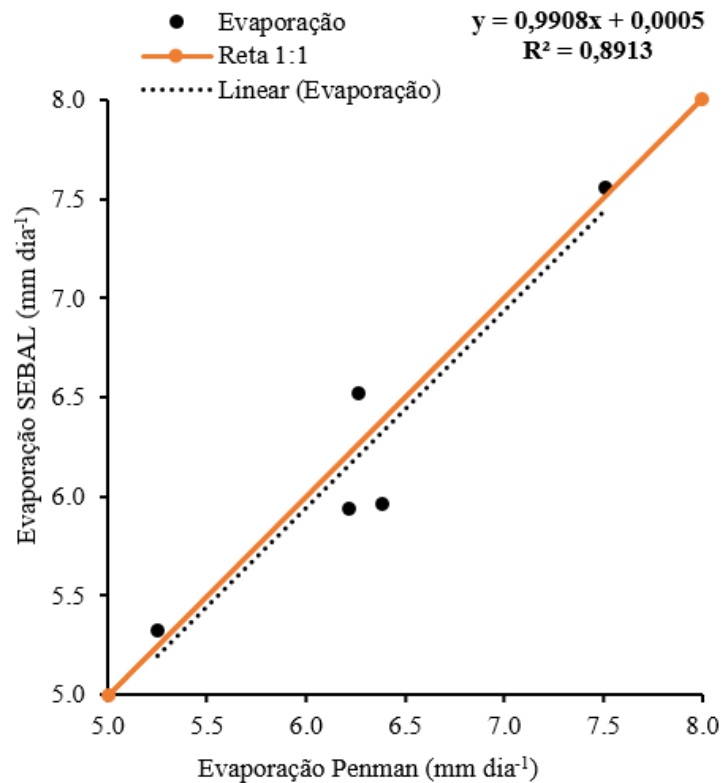
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 21 - Validação do modelo de estimativa da evaporação em  $\text{mm dia}^{-1}$  utilizando dados de sensoriamento remoto no reservatório General Sampaio



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 22 - Validação do modelo de estimativa da evaporação em  $\text{mm dia}^{-1}$  utilizando dados de sensoriamento remoto no reservatório Orós



Fonte: elaborado pelo autor.

Na Tabela 12 estão listadas as métricas de validação utilizadas assim como seus resultados para cada reservatório.

Tabela 12 - Análise de erros das estimativas realizadas para o período estudado

Análise de erros	Pereira de Miranda	General Sampaio	Orós
Desvio padrão da média (mm)	0,01	0,04	0,03
Coefficiente de determinação ( $R^2$ )	0,85	0,96	0,89
Erro médio absoluto (mm)	0,26	0,11	0,22
Erro médio relativo (%)	5,68	2,18	3,47
Erro quadrático médio (EQM) (mm)	0,12	0,03	0,08
Raiz do erro quadrático médio (RMSE) (mm)	0,35	0,18	0,28
Nash e Sutcliffe	0,78	0,94	0,87
Avaliação Nash e Sutcliffe	Muito bom	Muito bom	Muito bom

Fonte: dados da pesquisa.

O reservatório que apresentou o menor desvio padrão da estimativa em relação à média medida foi o reservatório Pereira de Miranda, no entanto, seu resultado não difere significativamente dos outros reservatórios com desvio bem próximos.

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foi alto para todos os reservatórios, principalmente para o reservatório General Sampaio, com valores próximos a 1, indicando que houve uma ótima correlação entre os valores estimados e os medidos de evaporação.

Ótimas correlações também foram identificadas no estudo de Abou El-Magd (2012) no lago Nasser em região árida no Egito. Ele utilizou o SEBAL para estimar a evaporação nesse lago e obteve um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,78 entre a evaporação estimada pelo SEBAL e a medida por Penman.

Kiptala *et al.* (2013) também investigaram a evaporação no reservatório de água Nyumba ya Mungu, localizado em região semiárida na África e obtiveram uma ótima correlação entre os dados estimados pelo SEBAL e os medidos com tanque Classes A. O  $R^2$  foi igual a 0,91 e o erro médio absoluto e a raiz do erro quadrático médio (RMSE) com erros menores que 5%.

Em relação ao erro médio absoluto e o erro médio relativo deste estudo também foram registrados resultados eficientes com o melhor cenário para o reservatório General Sampaio com erro absoluto e relativo iguais a 0,11 mm e 2,18 %, respectivamente. E pior cenário para Pereira de Miranda com erro médio absoluto igual a 0,26 e erro médio relativo igual a 5,12%.

A raiz do erro quadrático médio (RMSE) também forneceu erros baixos, com maior valor de erro registrado para Pereira de Miranda e menor valor de erro registrado para General Sampaio.

E em relação ao modelo de Nash-sutcliffe, a estimativa do SEBAL demonstrou ter tido um desempenho muito bom, principalmente para o reservatório General Sampaio, o que indica que o SEBAL teve um ótimo desempenho na estimativa da evaporação em comparação aos dados de evaporação medidos em campo.

Em geral, pode-se afirmar que o SEBAL foi eficiente para corpos d'água, pois foi altamente correlacionado para avaliar a evaporação dos reservatórios Pereira de Miranda, General Sampaio e Orós.

### **6.3.5 Volume evaporado nos reservatórios**

As áreas dos espelhos de água dos reservatórios foram obtidas com o entendimento de que elas são uma característica importante devido à sua influência no volume de água que evaporou nos reservatórios estudados. Nelas foram extraídos e contabilizados quantos pixels eram ocupados por cada reservatório em cada data.

A área calculada do espelho de água de cada reservatório sofreu um decréscimo no período de estudo, o que coincidiu com a estiagem sofrida pelos reservatórios no período analisado. Na Tabela 13, assim como na Figura 2, essas características podem ser comparadas.

Tabela 13 - Área do espelho de água dos reservatórios em m<sup>2</sup>

Data	Área do espelho (m <sup>2</sup> )		
	Pereira de Miranda	General Sampaio	Orós
08/08/2015	3.947.400	2.259.900	63.369.000
25/07/2016	2.614.500	1.636.200	41.879.700
26/08/2016	2.000.700	1.537.200	56.607.300
26/06/2017	1.349.100	7.714.800	24.656.400
13/08/2017	2.286.000	7.435.800	22.931.100

Fonte: elaborada pelo autor.

Percebeu-se que à medida que o volume de água disponível diminuiu (FIGURA 2) o espelho de água também sofreu um decréscimo (TABELA 13). Assim o inverso também ocorreu, onde no dia 26/06/2017 o reservatório General Sampaio teve um aumento significativo da área do seu espelho de água (TABELA 13). Sendo, nesta data, um período em que houve uma recarga no reservatório (FIGURA 2).

Este evento também ocorreu para Pereira de Miranda (TABELA 13), no dia 13/08/2017, onde a área do seu espelho de água teve um aumento devido a recarga de água que recebeu nos dias anteriores (FIGURA 2).

Já Orós, na definição da área realizada na imagem do dia 26/08/2016 (TABELA 13), não ocorreu o mesmo que nos outros reservatórios. Nesta data, não foi percebido um aumento no volume de água armazenada (FIGURA 2), no entanto, foi calculado um pequeno aumento no tamanho da área do espelho de água (TABELA 13).

Em relação ao volume de água evaporada (TABELA 14), percebeu-se que quanto maior o espelho de água maiores foram os volumes de água evaporada, sendo os maiores volumes registrados para o reservatório Orós devido à sua maior área de espelho de água e consequente disponibilidade de água a ser evaporada em relação aos outros dois reservatórios.

Tabela 14 - Volume diário de água evaporada nos reservatórios em m<sup>3</sup>

Data	Pereira de Miranda		General Sampaio		Orós	
	VE <sub>classe "A"</sub>	VE <sub>sebal</sub>	VE <sub>classe "A"</sub>	VE <sub>sebal</sub>	VE <sub>penman</sub>	VE <sub>sebal</sub>
08/08/2015	21.316	18.807	12.203	10.012	396.690	328.270
25/07/2016	11.138	9.584	6.970	6.274	267.192	222.705
26/08/2016	11.644	8.930	8.947	6.998	352.097	280.636
26/06/2017	5.558	4.969	31.785	28.976	184.923	115.383
13/08/2017	12.344	10.683	40.153	35.099	120.388	106.024
<b>Soma</b>	<b>62.000</b>	<b>52.974</b>	<b>100.058</b>	<b>87.359</b>	<b>1.321.291</b>	<b>1.053.018</b>

Fonte: elaborada pelo autor.

Os reservatórios Pereira de Miranda e General Sampaio são reservatórios que possuem capacidade de armazenamento próximas e área de bacias hidráulicas bastante diferentes (TABELA 1). Enquanto General Sampaio possui maiores profundidades, o reservatório Pereira de Miranda possui maior área de espelho de água, sendo estas características muito relevantes nas evaporações estimadas.

O volume de evaporação acumulada para General Sampaio foi superior ao de Pereira de Miranda, isso ocorreu devido a recarga que General Sampaio recebeu em dias anteriores à data 26/06/2017 o que ocasionou o aumento da área do espelho de água. Com isso, com uma maior disponibilidade de água para ser evaporada, o volume acumulado de água evaporada para General Sampaio foi maior em quase 6 vezes ao volume evaporado no Pereira de Miranda, no dia 26/06/2017.

Mesmo a evaporação acumulada em todo período de General Sampaio ter sido superior à de Pereira de Miranda, os volumes evaporados parciais de cada data de Pereira de Miranda foram predominantemente superiores ao volume evaporado parcial de General Sampaio.

Os valores de volume acumulado de evaporação estimado pelo SEBAL forneceram uma alta proximidade em relação aos dados medidos em campo pelo método do tanque classe “A” e método de Penman. A variação foi pequena e predominantemente menor para a estimativa do SEBAL.

Pereira de Miranda forneceu uma estimativa de volume evaporado pelo SEBAL inferior em 9.026 m<sup>3</sup> ao volume evaporado medido em campo. Essa diferença foi associada às características de Pereira de Miranda e a interferência da vegetação presente de forma abundante nas margens dele. General Sampaio forneceu uma estimativa inferior em 12.699 m<sup>3</sup> de volume evaporado calculado em campo e Orós forneceu 268.271 m<sup>3</sup> também inferior ao volume evaporado e medido em campo.

Estes resultados indicam que com o uso do sensoriamento remoto e o algoritmo SEBAL é possível estimar a lâmina e o volume evaporado nos reservatórios e se ter dados mais representativos da área. Assim, a gestão desses recursos hídricos poderá ser feita com um cenário mais realista, onde se tem mais água disponível do que se acredita, para o atendimento dos diversos usos aos quais os reservatórios se destinam.



## 6.4 Conclusões

1. Nos pixels em que foram calculados os maiores volumes e profundidades de água foram identificados também os maiores saldos de radiação.
2. As evaporações máximas ocorreram predominantemente nas menores profundidades, exceto quando ocorreu a presença de vegetação.
3. A velocidade do vento interferiu nos resultados de evaporação obtidos. Quanto maior foi a velocidade do vento maiores foram as evaporações estimadas.
4. O volume total de água evaporada calculada pelo SEBAL e SR levou ao entendimento de que se tem mais água disponível nos reservatórios de água do que se acredita, o que possibilita a construção de cenários mais realistas para a gestão dos recursos hídricos.
5. O SEBAL forneceu dados precisos e especializados da evaporação, demonstrando que a sua utilização é confiável para estimar evaporação em regiões semiáridas.
6. A evaporação em corpos d'água do semiárido brasileiro pode ser quantificada com uma alta representatividade utilizando imagens de satélite.

## 7 CAPÍTULO 2 - BALANÇO DE NUTRIENTES EM RESERVATÓRIOS SUPERFICIAIS DO SEMIÁRIDO EM PERÍODO DE SECA EXTREMA

**Resumo** - Os reservatórios de água foram construídos no semiárido para mitigar efeitos das secas e escassez hídrica. Eles estão sujeitos a variáveis que impactam a quantidade e qualidade da sua água. Além da elevada evaporação e balanço hídrico negativo, o aporte de nutrientes, Nitrogênio Total (NT) e Fósforo Total (PT), é um dos principais fatores na intensificação do processo de eutrofização. Assim sendo, esse estudo quantificou a entrada e saída de nutrientes, NT e PT, para avaliar a influência desse balanço e efeitos da sazonalidade no processo de eutrofização em dois reservatórios representativos da região semiárida brasileira. O período de análise corresponde ao período de 2015 a 2016 ao longo do qual foram realizadas sete campanhas para quantificar as principais entradas e as saídas de nutrientes. As concentrações médias de nutrientes na entrada (4,28 mg L<sup>-1</sup> NT; 0,40 mg L<sup>-1</sup> PT) e saída (4,11 mg L<sup>-1</sup> NT; 0,27 mg L<sup>-1</sup> PT) no reservatório Pereira de Miranda foram superiores às concentrações médias medidas na entrada (2,12 mg L<sup>-1</sup> NT; 0,25 mg L<sup>-1</sup> PT) e saída (2,22 mg L<sup>-1</sup> NT; 0,24 mg L<sup>-1</sup> PT) no reservatório General Sampaio. No período, o nutriente limitante no reservatório Pereira de Miranda foi o fósforo total (PT), e no reservatório General Sampaio foi o nitrogênio total (NT). Ambos os reservatórios tiveram um maior aporte acumulado de água que saída, significando que houve um aumento no volume de água armazenada no fim de todo o período. As maiores cargas de nutrientes foram associadas aos mesmos períodos em que se teve maiores vazões de entrada de água, ou seja, os fluxos de entrada foram maiores quando as vazões de entrada também foram maiores. Foi verificado que os reservatórios Pereira de Miranda e General Sampaio estão retendo nutrientes, atuando no período estudado como sumidouros dos nutrientes transportados pelo escoamento superficial, com um balanço acumulado de 22,8 toneladas de nitrogênio e 2,8 toneladas de fósforo no reservatório Pereira de Miranda e 13 toneladas de nitrogênio e 1,5 toneladas de fósforo no reservatório General Sampaio. Sendo esses reservatórios considerados, no período de estudo, um local de armazenamento de nutrientes na bacia hidrográfica do rio Curu. O aumento do armazenamento ocorreu principalmente no período chuvoso e a retenção de NT e PT pelos reservatórios resultou no comprometimento da qualidade das águas pela eutrofização, aumentando os custos para disponibilizar água de qualidade para os diferentes usos aos quais se destinam.

**Palavras-chave:** regiões semiáridas; reservatórios de água; aporte e saída de nutrientes; sazonalidade; eutrofização.

## 7.1 Introdução

Tanto a população humana como os recursos hídricos são distribuídos de forma desigual em todo o mundo. Nas regiões com um alto adensamento populacional, na maioria das vezes, não são as mesmas regiões que são ricas em água (KUMMU *et al.*, 2010). No caso do Brasil, a distribuição da água ocorre desproporcionalmente à distribuição da população, com algumas regiões impactadas significativamente com a escassez hídrica e conseqüente problemas socioambientais.

Para mitigar os impactos ocasionados pela falta de água em algumas regiões, muitas políticas públicas foram implementadas, entre elas a construção de reservatórios superficiais para o armazenamento e distribuição de água para a população.

No entanto, o armazenamento de água em reservatórios superficiais está sujeito às variáveis físicas, químicas e biológicas, que degradam e potencializam a eutrofização. Um dos impactos mais comuns é o crescimento excessivo de algas, as quais favorecem a produção de toxinas com efeitos adversos à saúde humana (BROOKS *et al.*, 2016), e que podem interferir também sobre os diversos outros usos da água (LEE, 1982).

Uma das causas da eutrofização está relacionada ao manejo do uso e ocupação do solo ao redor dos corpos hídricos. A eutrofização decorre do enriquecimento excessivo de nutrientes antropogênicos nos corpos de água. Um indicativo disso é a carga excessiva de N e P que ocasionam a proliferação de algas nocivas (DING *et al.*, 2018).

Em regiões com alta variabilidade da precipitação, sujeitas a severas secas, como no semiárido cearense, o processo de eutrofização é ainda mais intensificado. As secas atuam como um fator chave que controla a qualidade da água em ecossistemas de água doce, pois elas podem influenciar o tempo de residência hidráulica, reduzindo a taxa de renovação das águas (LI *et al.*, 2017).

Os reservatórios localizados em região semiárida do Ceará frequentemente apresentam problemas ambientais, de gestão e de monitoramento devido às questões de escassez hídrica e presença de elevadas concentrações de nitrogênio e fósforo nas suas águas. Quanto mais eutrofizada a água estiver, mais oneroso é o seu tratamento e maiores são os conflitos de seu uso na região. Seu monitoramento, tanto no aspecto quantitativo como qualitativo, fundamenta a tomada de decisões e previne esses conflitos entre os usuários (SOUZA FILHO *et al.*, 2006; GORAYEB *et al.*, 2006; MACHADO *et al.*, 2012).

Diante disto, objetivou-se quantificar as principais entradas e saídas de nutrientes (N e P) e calcular o balanço de nutrientes a fim de se verificar a influência da sazonalidade na

importação e exportação desses nutrientes e sua implicação na eutrofização de reservatórios superficiais da região semiárida brasileira.

## 7.2 Material e métodos

### 7.2.1 Monitoramento

O monitoramento dos reservatórios é referente a quatro campanhas realizadas nos meses abril, julho, setembro e dezembro de 2015; e a três realizadas em março, junho e setembro de 2016, totalizando sete campanhas de coleta de dados.

A caracterização dos reservatórios foi realizada considerando o primeiro semestre do ano como período chuvoso e o segundo semestre como período seco. Isso foi feito a fim de se verificar a influência da sazonalidade nos reservatórios.

As amostras de água foram obtidas a uma profundidade de 30 cm da superfície da água, em garrafas plásticas de 1,0 L, previamente esterilizadas e preparadas para a coleta das amostras. Posteriormente, as amostras foram acondicionadas em caixa térmica e encaminhadas para os laboratórios para processamento imediato. O fósforo foi medido utilizando a metodologia espectrofotométrica (ácido ascórbico), e o nitrogênio de acordo com a metodologia de digestão de persulfato (APHA *et al.*, 2005).

As análises das amostras de água foram feitas pelo Laboratório de Química Ambiental (LAQA), vinculado ao Departamento de Química Analítica e Físico-Química da Universidade Federal do Ceará (UFC).

As amostras de água para análise dos parâmetros monitorados foram obtidas em cinco pontos georreferenciados do reservatório Pereira de Miranda e quatro pontos do reservatório General Sampaio. Eles foram distribuídos de acordo com os locais de aporte e saída de água nos açudes e nas coordenadas em UTM (*Universal Transversa de Mercator*), zona 24 S, datum SIRGAS 2000 da Tabela 15.

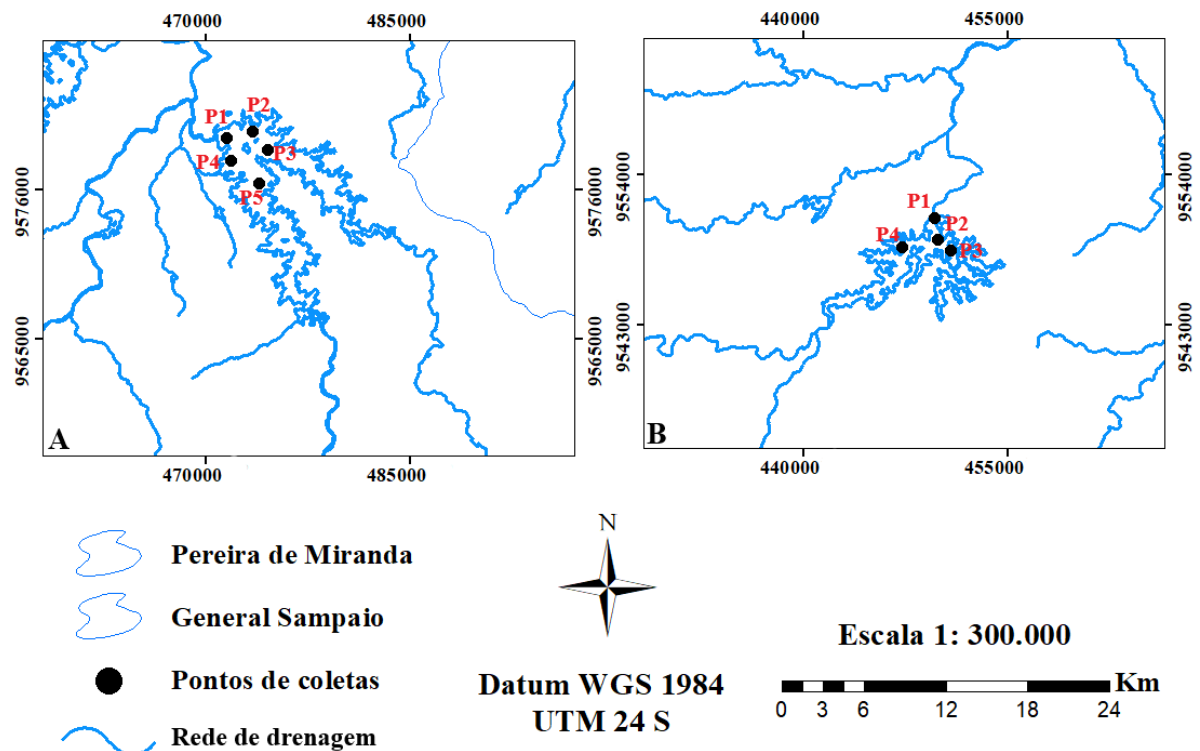
Tabela 15 - Pontos de coletas

Pereira de Miranda		General Sampaio	
Ponto	Coordenada	Ponto	Coordenada
P01 - barragem	471319 mE 9579671 mN	P1 - barragem	449451 mE 9550660 mN
P2 - piscicultura	473007 mE 9579830 mN	P2 - piscicultura	449909 mE 9549158 mN
P3 - rio Capitão-mor	474308 mE 9579211 mN	P3 - riacho da Salvação	450709 mE 95488401 mN
P4 - rio Canindé	472484 mE 9578369 mN	P4 - rio Curu	447334 mE 9548623 mN
P5 - rio Canindé	473672 mE 9576950 mN	-	-

Fonte: Grupo de pesquisa MASSA.

Os pontos considerados como de entrada de nutrientes no reservatório Pereira de Miranda foram os pontos P2, P3, P4 e P5 que se referem à entrada de água pelos rios Capitão-mor e rio Canindé, com piscicultura em gaiolas localizadas no P2 (FIGURA 23). Essas gaiolas foram desativadas no período deste estudo devido ao baixo volume de água que o reservatório armazenava, no entanto, ainda contava com uma alta carga de nutriente presente devido os diversos anos em que estiveram ativas no reservatório. Já no General Sampaio foram amostrados o ponto P2 referente ao local de piscicultura, e os pontos P3 e P4, referentes ao riacho da Salvação e o rio Curu, respectivamente. Em ambos os reservatórios o ponto de saída foi o P1, que se refere à barragem dos reservatórios e tomada d'água.

Figura 23 - Localização dos pontos de coletas das amostras de água



Fonte: elaborada pelo autor. Legenda: A: Pereira de Miranda e B: General Sampaio.

### 7.2.2 Balanço hídrico e fluxos de nutrientes

A metodologia utilizada no cálculo do balanço de nutrientes foi a adaptada por Hijo (2009) e Vidal e Capelo Neto (2014) que a aplicaram no semiárido cearense. Os fluxos de entrada e saída de água nos reservatórios foram determinados com base na equação da continuidade representada pela equação (58), onde o balanço de nutrientes foi determinado com base na vazão de água que entra e sai dos reservatórios.

$$\frac{dS}{dt} = I - Q \quad (58)$$

em que: S = Volume de água em m<sup>3</sup>; t = Tempo (dia); I = Vazão afluyente (m<sup>3</sup>dia<sup>-1</sup>); e Q = Vazão efluyente (m<sup>3</sup>dia<sup>-1</sup>).

Para a determinação da vazão total dos pontos de entrada de água nos reservatórios foi necessária a realização de um balanço hídrico, para o que se considerou como parâmetros que influenciam na disponibilidade da água, a evaporação, a vazão vertida, a vazão liberada para abastecimento das cidades e a diferença de volume armazenado nos reservatórios entre tempos sucessivos. Para isso foi utilizada a equação (59) de determinação do volume atual armazenado nos reservatórios.

$$V_{t+1} = V_t + I - E_t - S_t - R_t \quad (59)$$

em que: V<sub>t+1</sub> = Volume do tempo atual em m<sup>3</sup>; V<sub>t</sub> = Volume do tempo anterior em m<sup>3</sup>; I = Afluência total nos açudes em m<sup>3</sup> dia<sup>-1</sup>; E<sub>t</sub> = Evaporação em m<sup>3</sup> dia<sup>-1</sup>, que foi utilizado os dados diários medidos na fazenda da UFC e também dados de evaporação estimados no capítulo anterior; S<sub>t</sub> = Vertimento em m<sup>3</sup> dia<sup>-1</sup>; e R<sub>t</sub> = Retirada de água em m<sup>3</sup> dia<sup>-1</sup>, que foi obtido de acordo com a rotina de operação dos reservatórios realizada pela COGERH. Reajustando a equação do volume no tempo atual, tem-se a equação (60) da afluência total nos reservatórios.

$$I = \Delta V + E_t + S_t + R_t \quad (60)$$

em que: ΔV = Variação de volume em m<sup>3</sup>T<sup>-1</sup>, que foi determinado utilizando a relação Cota x Volume disponibilizada pela COGERH; e S<sub>t</sub> = Vertimento em m<sup>3</sup>T<sup>-1</sup>, que foi obtido aplicando a relação em que se a cota dos reservatórios for menor que sua cota máxima de vertimento, o vertimento é nulo (S<sub>t</sub> = 0), caso contrário é utilizado a equação (61).

$$S = C * L * (H - H_{\text{vert}})^{1,5} \quad (61)$$

em que: C = Coeficiente de vertimento igual a 2,1; L = Largura do vertedouro (m) igual a 200 m para Pereira de Miranda e 150 para General Sampaio; H = Cota atual (m); e H<sub>vert</sub> = Cota de vertimento (m) de 62 m para Pereira de Miranda e 124,5 para General Sampaio.

Realizado o balanço hídrico dos reservatórios foi feita uma média das vazões afluentes calculadas e das vazões efluentes liberadas no vertedor durante o período da pesquisa. A vazão afluente foi calculada pelo balanço hídrico e a vazão efluente foi obtida através dos dados fornecidos pela rotina de operação da COGERH. A média foi do tipo aritmética entre os dias e campanha de estudo.

Obtida as vazões médias afluentes e efluentes dos reservatórios foi utilizada a equação (62) para calcular o fluxo de entrada e saída de nutrientes nos reservatórios.

$$F_N = \frac{[N] * Q}{1000} \quad (62)$$

em que:  $F_N$  = Fluxo de entrada ou saída de nutriente N ou P ( $\text{kg dia}^{-1}$ );  $[N]$  = Concentração do nutriente N ou P ( $\text{mg L}^{-1}$ );  $Q$  = Vazão afluente ou efluente ( $\text{m}^3 \text{dia}^{-1}$ ); e o denominador 1000 é um fator de conversão de mg para kg.

### 7.2.3 Balanço de nutrientes: entrada e saída

Para a estimativa da entrada de nutrientes em cada ponto primeiro foi realizado a média de concentração de cada nutriente que entrou nos reservatórios entre o período de cada campanha, para isso foi utilizado a equação (63).

A entrada em cada ponto foi determinada aplicando a equação (64), onde foi realizado a multiplicação entre a concentração do que entrou e o volume com que entrou nos reservatórios.

De forma semelhante, a saída de nutrientes foi calculada aplicando-se a equação (65), onde foi utilizado o ponto de saída como sendo o ponto onde é retirada água pela rotina de operação da COGERH.

$$[X_e] = \frac{\sum_{i=1}^n [P_n]}{n} \quad (63)$$

$$AN = \frac{[X_e] * V}{10^6} \quad (64)$$

$$SN = \frac{[P_s] * V}{10^6} \quad (65)$$

em que:  $[X_e]$  = Concentração média na entrada de cada ponto em cada período ( $\text{mgL}^{-1}$ );  $[P_n]$  = Concentração do nutriente de cada ponto em cada período ( $\text{mgL}^{-1}$ );  $n$  = Quantidade de pontos, para Pereira de Miranda são 5 (sendo 4 de aporte e 1 de saída) e para General Sampaio são 4 (3 de aporte e 1 de saída);  $AN$  = Aporte de nutrientes de cada ponto em cada período (ton);  $SN$  = Saída de nutrientes do ponto de saída em cada período (ton);  $[P_s]$  = Concentração de saída de nutrientes do ponto de saída em cada período ( $\text{mg L}^{-1}$ );  $V$  = Volume de entrada do nutriente de cada ponto em cada período ( $\text{m}^3$ ); e o denominador  $10^6$  é um fator de conversão de unidade.

E por fim o aporte total em tonelada foi a soma dos aportes calculados em cada ponto para o período de estudo. E a saída total foi a massa medida no ponto de saída dos reservatórios. O balanço de nutriente entre cada campanha foi dado pela equação (66).

$$B = AN - SN \quad (66)$$

em que:  $B$  = Balanço de nutrientes;  $AN$  = Aporte de nutrientes (ton); e  $SN$  = Saída de nutrientes (ton).

## 7.3 Resultados e discussão

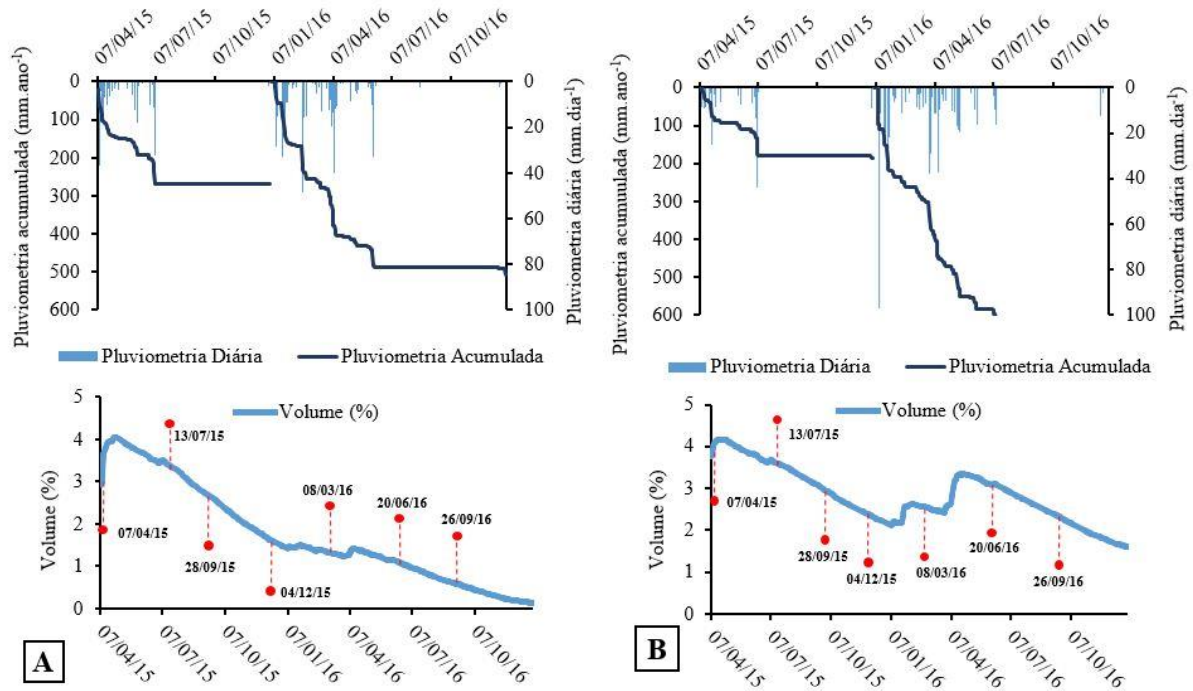
### 7.3.1 Precipitação pluviométrica e volume de água armazenada

A precipitação pluviométrica é uma das variáveis que influencia na eutrofização, haja visto que atua na entrada de água nos reservatórios, fazendo com que as concentrações dos nutrientes sejam aumentadas devido ao escoamento superficial e carreamento de sedimentos para dentro dos reservatórios. Por outro lado, também atuou na diluição dos nutrientes, ocasionando assim uma redução de sua concentração devido ao aumento do volume de água armazenada nos reservatórios.

No período estudado, a precipitação pluviométrica teve um comportamento semelhante em ambos reservatórios; ela ocorreu principalmente no período considerado chuvoso na região e ocasionou um aumento do volume de água armazenada nos reservatórios. No período abr-jul/2015 foi onde ocorreu a maior precipitação acumulada em Pereira de Miranda e em mar-jun/2016 foi em General Sampaio (FIGURA 24).



Figura 24 - Precipitação e volume de água armazenada



Fonte: elaborada pelo autor. Legenda: A: Pereira de Miranda e B: General Sampaio.

### 7.3.2 Concentrações de nutrientes

As concentrações dos nutrientes no reservatório Pereira de Miranda foram, em geral, superiores às medidas no reservatório General Sampaio, exceto no ponto de saída do General Sampaio em que foram registradas as maiores concentrações de PT em quase todo o período.

Em Pereira de Miranda houve variação de entrada de NT entre  $2,28 \text{ mg L}^{-1}$  e  $6,16 \text{ mg L}^{-1}$ , com maior entrada de NT entre mar-jun/2016. Entre março e junho ocorre chuva na região, e neste período foram registradas precipitações pluviométricas que totalizam  $230,9 \text{ mm}$  (FIGURA 24). As chuvas que ocorreram no período contribuíram para o carreamento desse nutriente para o reservatório, além de ter elevado sutilmente o volume de água armazenada (FIGURA 24). A maior concentração no ponto de saída desse nutriente ( $6,87 \text{ mg L}^{-1}$ ) também ocorreu para a mesma data, indicando que ao mesmo tempo que entrou máximas de nutrientes também saiu.

A presença de PT atingiu valor máximo ( $1,02 \text{ mg L}^{-1}$ ) na entrada do reservatório Pereira de Miranda no período de seca entre set-dez/2016 (TABELA 16). Esse período é caracterizado por ser seco na região, com ausência de precipitação pluviométrica ou em quantidade insignificante que não ocasionam escoamento superficial e entrada de água no reservatório. No entanto, ocorreu chuva no fim do mês de dezembro ( $3,4 \text{ mm}$ ) que proporcionou a entrada desse nutriente. Além disso, a sua presença foi associada à piscicultura presente no reservatório, ao

baixo volume de água armazenada e ao revolvimento dos sedimentos ocasionado pela ação do vento em menores profundidades de água (MOURA *et. al.*, 2015). A sua maior concentração de saída também foi registrada para o período set-dez/2016, indicando que ao mesmo tempo que entrou nutriente também saiu.

No reservatório General Sampaio as concentrações de NT na entrada variaram entre 1,66 mg L<sup>-1</sup> e 2,75 mg L<sup>-1</sup> (TABELA 16), com maior entrada entre dez/2015-mar/2016. Assim como em Pereira de Miranda, este período é caracterizado por ser o chuvoso na região. A precipitação acumulada foi igual a 273 mm (FIGURA 24), uma das maiores de todo o período estudado, isso proporcionou o aumento da concentração desse nutriente no reservatório através do escoamento superficial da água ao mesmo tempo que proporcionou uma das maiores saídas desse nutriente.

As concentrações de entrada de PT no reservatório General Sampaio foram predominantemente inferiores às concentrações de entrada no reservatório Pereira de Miranda, (TABELA 16), exceto para o período entre set-dez/2015 e dez/2015-mar/2016 em que as concentrações dos pontos de entrada de General Sampaio superaram aos de Pereira de Miranda, principalmente o do período set-dez/2015 em que não ocorreu precipitação pluviométrica suficiente para ter escoamento superficial e abastecimento do reservatório.

No geral, foram medidas concentrações maiores de NT e PT, tanto na entrada como na saída, de Pereira de Miranda em comparação ao reservatório General Sampaio (TABELA 16), exceto no ponto de saída de General Sampaio que foram identificadas as maiores concentrações de saída de PT.

Ambos os reservatórios estão localizados na mesma bacia hidrográfica e estão sujeitos às mesmas variantes climatológicas que degradam a qualidade da água. Os nutrientes entram nos reservatórios através de fontes de poluição pontuais e difusas. No caso das pontuais, os reservatórios recebem os nutrientes através do lançamento de esgoto das residências às margens dos reservatórios e da piscicultura presente dentro dos reservatórios, e as difusas são oriundas principalmente da agricultura e da pecuária existentes na bacia hidrográfica dos reservatórios (COGERH, 2011).

Pereira de Miranda possui as suas margens mais antropizadas, está localizado em área urbana, possui lançamento direto de esgoto das residências que não possuem saneamento ao seu entorno e há a presença de animais com acesso direto ao reservatório em maior quantidade em relação ao reservatório General Sampaio (COGERH, 2009). A elevada carga dos nutrientes medidos no reservatório Pereira de Miranda em comparação ao reservatório General Sampaio foi associada a essas diferentes características, que combinadas no local dos reservatórios

augmentam o enriquecimento por nutrientes e aumentam a produtividade desses ecossistemas aquáticos, favorecendo a presença do fitoplâncton e surgimento das cianobactérias (ROCHA *et al.*, 2019).

O NT em maior concentração no Pereira de Miranda favoreceu um maior potencial de eutrofização do reservatório através das florações de algas e cianobactérias, já que o crescimento do fitoplâncton foi proporcionado pela disponibilidade alta de nitrogênio presente (COTOVICZ JÚNIOR *et al.*, 2013). A presença dessas algas está relacionada às respostas das águas ao excesso de nutrientes, e por sua vez, a eutrofização do reservatório (SCHINDLER *et al.*, 2016).

A maior concentração de PT identificada dentro de reservatórios de água é oriunda, principalmente, das atividades agrícolas e de pecuária realizadas à montante da bacia hidrográfica (VON SPERLIN, 1996; ARAÚJO *et al.*, 2009; JORDAN *et al.*, 2012;); no caso de Pereira de Miranda isso foi identificado, sendo a presença de PT no reservatório entendida como uma medida do potencial de eutrofização, pois este nutriente atua como o principal agente causador do processo (PAULINO, OLIVEIRA; AVELINO, 2013).

Tabela 16 - Concentrações de nitrogênio total (NT) e fósforo total (PT)

Coleta	Pereira de Miranda				General Sampaio			
	[NT] mg L <sup>-1</sup>		[PT] mg L <sup>-1</sup>		[NT] mg L <sup>-1</sup>		[PT] mg L <sup>-1</sup>	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída
<b>abr-jul/2015</b>	2,28	2,61	0,30	0,33	1,85	1,76	0,15	0,10
<b>jul-set/2015</b>	2,59	2,52	0,19	0,11	1,66	1,48	0,16	0,15
<b>set-dez/2015</b>	3,75	3,47	0,19	0,06	1,90	2,05	0,40	0,21
<b>dez/2015-mar/2016</b>	4,65	3,65	0,38	0,24	2,75	2,76	0,38	0,28
<b>mar-jun/2016</b>	6,16	6,87	0,35	0,23	2,72	2,90	0,29	0,29
<b>jun-set/2016</b>	4,86	4,52	0,39	0,25	1,81	1,75	0,03	0,31
<b>set-dez/2016</b>	5,69	5,14	1,02	0,70	2,18	2,81	0,37	0,34
<b>Média</b>	<b>4,28</b>	<b>4,11</b>	<b>0,40</b>	<b>0,27</b>	<b>2,12</b>	<b>2,22</b>	<b>0,25</b>	<b>0,24</b>

Fonte: dados de pesquisa.

Os reservatórios Pereira de Miranda e General Sampaio não possuem enquadramento. De acordo com a resolução CONAMA 357 de 2005, em seu artigo 42, reservatórios que não possuem enquadramento devem ser considerados de Classe II. Sendo dessa classe, os limites estabelecidos de concentração nesta portaria para os nutrientes NT e PT nos reservatórios foram excedidos em maior parte do período de estudo.

A concentração limite de PT para as características dos reservatórios Pereira de Miranda e General Sampaio é de 0,03 mg L<sup>-1</sup>. Em todo o período foram medidas concentrações superiores a 0,03 mg L<sup>-1</sup>, exceto para o período jun-set/2016, em que o reservatório General Sampaio teve uma concentração medida de 0,03 mg L<sup>-1</sup>. Isto sugere que em maior parte do

período houve um aporte superior ao estabelecido em Resolução e que ocorreu predominantemente uma maior entrada que saída desse nutriente nos reservatórios.

Em relação ao NT, a Resolução CONAMA 357 de 2005 não aborda limites de sua concentração total em águas doces de ambientes lênticos de Classe II, somente as suas frações. O limite para NT é somente quando ocorrer de ele ser o nutriente limitante para o corpo hídrico, que, neste caso, o limite de sua presença é de 1,27 mg L<sup>-1</sup> na vazão de referência do período.

As concentrações elevadas de nitrogênio e fósforo, como no caso dos reservatórios estudados, podem tornar-se nutrientes limitantes para a qualidade de água e eutrofização (ROCHA *et al.*, 2019), já que eles são consumidos pelo fitoplâncton em uma relação média N:P de 10:1 (VIDAL; CAPELO NETO, 2014; GREEN; FINLAY, 2010; CORRELL, 1999). Sendo assim, quando os reservatórios apresentaram uma razão N:P alta, maior que 10, assumiu-se que a limitação do reservatório foi por fósforo, entretanto, quando o inverso ocorreu, uma baixa razão N:P, menor que 10, assumiu-se que a limitação foi por nitrogênio.

Dessa forma, o nutriente limitante que predominou em todo período no reservatório Pereira de Miranda foi o PT (TABELA 17), com maior relação de N:P identificada para o período set-dez/2015, indicando assim que o reservatório teve limitação do fitoplâncton por esse nutriente (WIEGAND; PIEDRA; ARAÚJO, 2016). No General Sampaio o nutriente limitante que predominou foi o NT, também com menor relação de N:P identificada para set-dez/2015.

Tabela 17 - Nutriente limitante de cada período

Coletas	Pereira de Miranda		General Sampaio	
	N/P	Nutriente	N/P	Nutriente
<b>abr-jul/2015</b>	7,8	Nitrogênio	14,58	Fósforo
<b>jul-set/2015</b>	16,6	Fósforo	10,22	Fósforo
<b>set-dez/2015</b>	27,9	Fósforo	6,49	Nitrogênio
<b>dez/2015-mar/2016</b>	13,4	Fósforo	8,35	Nitrogênio
<b>mar-jun/2016</b>	22,5	Fósforo	9,65	Nitrogênio
<b>jun-set/2016</b>	14,7	Fósforo	10,57	Fósforo
<b>set-dez/2016</b>	6,3	Nitrogênio	7,09	Nitrogênio

Fonte: elaborada pelo autor.

### 7.3.3 Vazões e fluxos de nutrientes

Através de dados hidrológicos foram avaliados os fluxos de entrada e saída de água nos reservatórios Pereira de Miranda e General Sampaio. As vazões de entrada de água foram calculadas por meio do balanço hídrico e as vazões de saída obtidas a partir da rotina de operação da COGERH (TABELA 18).

Tabela 18 - Vazões de entrada e saída de água

Período	Nº de dias de cada período	Pereira de Miranda			General Sampaio		
		Vazão de entrada total (m <sup>3</sup> /período)	Vazão de entrada diária (m <sup>3</sup> /d)	Vazão de saída diária (m <sup>3</sup> /d)	Vazão de entrada total (m <sup>3</sup> /período)	Vazão de entrada diária (m <sup>3</sup> /d)	Vazão de saída diária (m <sup>3</sup> /d)
abr-jul/2015	97	7.200.015	74.227	11.232	2.123.452	21.891	5.616
jul-set/2015	77	0	0	11.232	0	0	5.616
set-dez/2015	67	0	0	11.232	0	0	5.616
dez/2015-mar/2016	95	2.518.124	26.507	11.232	2.368.159	24.928	5.616
mar-jun/2016	104	2.751.063	26.453	11.232	3.835.725	36.882	5.616
jun-set/2016	98	1.304.848	13.315	11.232	0	0	5.616
set-dez/2016	92	212.691	2.312	11.232	0	0	5.616

Fonte: dados de pesquisa.

Segundo os fluxos de água avaliados, a vazão de entrada para dois dos períodos de Pereira de Miranda e quatro dos períodos de General Sampaio foi ausente devido ao caráter intermitente dos rios da região (TABELA 18), período de estiagem dos anos dessa pesquisa, ausência de precipitação pluviométrica (FIGURA 24) e não aumento do volume de água armazenada (FIGURA 24), não havendo assim transferência de água para os reservatórios nestes períodos.

No período, a vazão de entrada teve uma grande variação entre o início e fim de todo o período, isso impactou significativamente na quantidade e qualidade da água armazenada. Os períodos em que a vazão de entrada foi zero significa que não houve aporte de água, e sim perda devido à alta evaporação registrada no período e à redução do volume de água armazenada.

Conforme demonstrado no capítulo anterior, a evaporação foi responsável por grandes perdas de água nos reservatórios, sendo assim evaporado volumes muito superiores aos liberados na rotina de operação da COGERH. Isso impactou os resultados obtidos, contribuindo para o agravamento do processo de eutrofização dos reservatórios devido à diminuição do volume de água armazenada e aumento da concentração dos nutrientes presentes.

Nos períodos em que houve fluxo de água, a vazão de entrada foi superior à vazão de saída para os reservatórios Pereira de Miranda e General Sampaio (TABELA 18), exceto para o período set-dez/2016 em que houve a menor recarga no Pereira de Miranda devido ao baixo índice pluviométrico registrado (3,4 mm). Nesse período, não houve recarga de água no reservatório (FIGURA 24), e sim perdas devido à alta evaporação e liberação de água na tomada d'água do reservatório. Isso significa que os nutrientes presentes tiveram um aumento na sua concentração, pois processos como a evaporação continuavam a ocorrer.

No período abr-jul/2015 a vazão de entrada de água no Pereira de Miranda foi máxima (TABELA 18), isso foi associado ao aumento do volume de água armazenada do período

devido às maiores descargas de água das chuvas que ocorreram (267 mm). Em General Sampaio a maior vazão de entrada foi no período mar-jun/2016 ao mesmo tempo em que ocorreu precipitação pluviométrica máxima (319 mm) e um dos maiores volumes de água armazenada no período (FIGURA 24).

Em todo o período, mesmo com a perda de água devido à redução do volume de água armazenada (FIGURA 24), foi liberado água na rotina de operação da COGERH (TABELA 18). No entanto, os reservatórios tiveram um maior aporte de água que saída, significando que o balanço hídrico positivo.

Os fluxos de entrada de nutrientes nos reservatórios Pereira de Miranda e General Sampaio seguiram a mesma tendência da vazão de entrada de água, apresentando picos de fluxo de nutrientes ao mesmo tempo em que houve picos de vazão de água (FIGURA 25). O reservatório Pereira de Miranda apresentou cargas de entrada de NT e PT maiores que o reservatório General Sampaio, além de maior vazão afluyente que foi armazenada no reservatório.

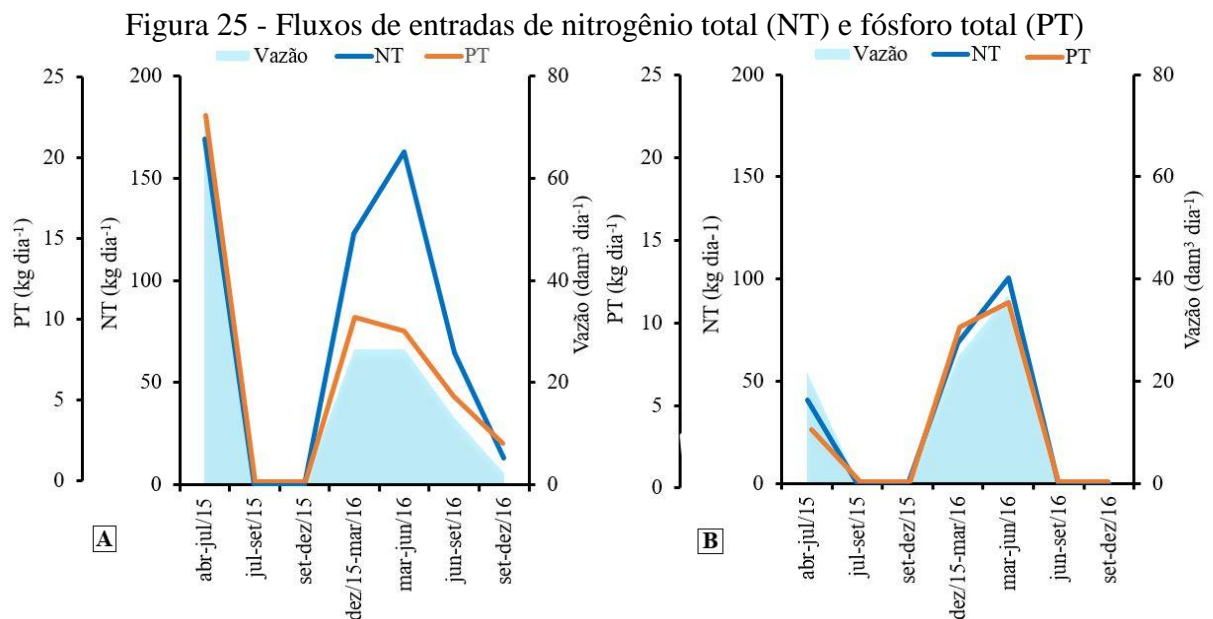
Os fluxos diários de NT do reservatório Pereira de Miranda (FIGURA 25) sofreram aumento significativo no período de abr-jul/2015, ao mesmo tempo em que ocorreu um pico de vazão de entrada diária de água, acompanhado de entrada diária de quase 169 kg de NT. O PT também teve algumas variações, sendo a sua maior concentração de 22,2 kg, ocorrida nos períodos de aumento na vazão de entrada de água (FIGURA 25).

Para o reservatório General Sampaio as cargas de NT e PT seguiram a mesma tendência do reservatório Pereira de Miranda (FIGURA 25), com maiores cargas (100,5 kg dia<sup>-1</sup> NT e 10,9 kg dia<sup>-1</sup> PT) associadas aos mesmos períodos em que se teve maiores vazões de entrada de água. Sendo destacado os períodos dez/2015-mar/2016 e mar-jun/2016 em que os fluxos de PT foram superiores para o reservatório General Sampaio em relação a Pereira de Miranda. Isso foi associado à maior vazão de entrada de água do General Sampaio em um dos períodos (TABELA 18), à maior precipitação registrada e ao aumento do volume de água armazenada (FIGURA 24).

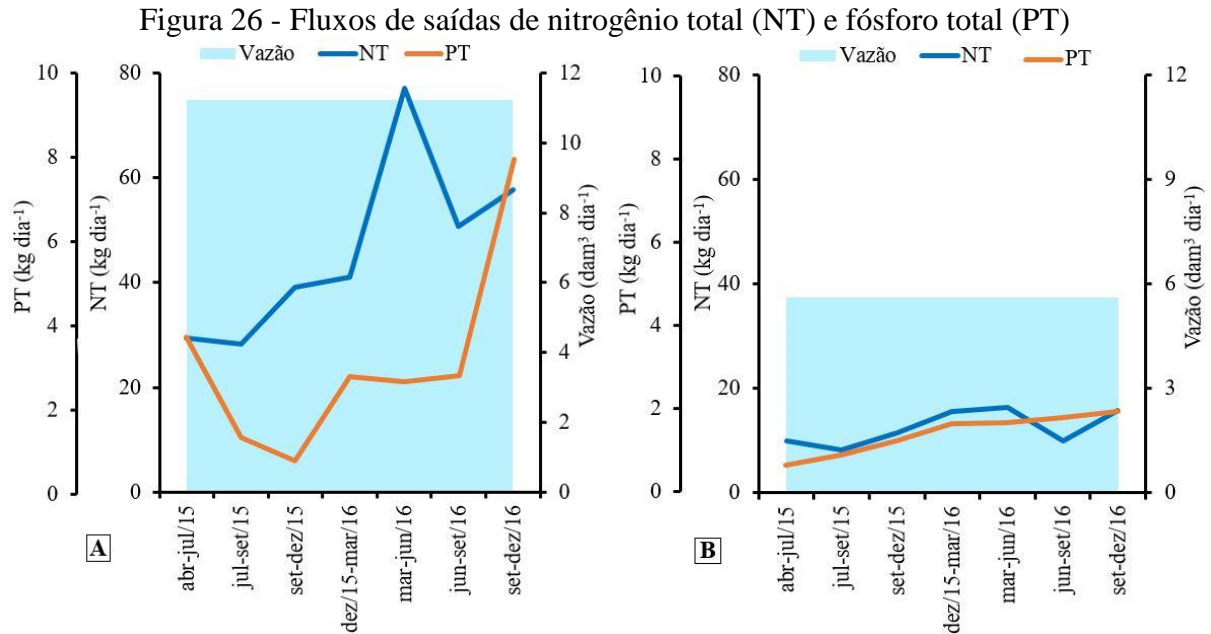
Os fluxos de saída de NT e PT não seguiram a mesma tendência da vazão de saída dos reservatórios, foi percebido que seu comportamento variou conforme a vazão de entrada variou. Os períodos em que houve maior fluxo de saída de nutrientes foi o mesmo em que houve fluxos de entrada nos reservatórios (FIGURA 26), com valores mínimos de fluxo de saída registrados nos mesmos períodos em que não ocorreu fluxo de entrada, levando a inferir que os nutrientes retidos são oriundos predominantemente do uso e ocupação das bacias hidrográficas dos reservatórios.

As maiores concentrações de nutrientes associadas às maiores vazões de água indicam que os nutrientes são oriundos principalmente de atividades agrícolas, uma vez que é comum na agricultura ser adicionado mais fertilizantes que a planta consegue absorver (VON SPERLING, 1996), e de pecuária muito comum na região e que pela não absorção do solo escoam superficialmente para dentro dos reservatórios nos períodos em que há precipitação pluviométrica.

Esses comportamentos indicam que as fontes de presença desses nutrientes nos reservatórios são difusas e associadas a atividades de agricultura e pecuária na bacia hidrográfica dos reservatórios. A região é caracterizada por possuir solos rasos, que combinado com a retirada da vegetação natural para a agricultura, favorece um maior escoamento superficial da água e sua menor retenção pelo processo de infiltração, essa água escoada até os reservatórios estudados nos períodos com precipitação (ANDRADE; MEIRELES; PALÁCIO, 2010) levando junto toda essa carga de nutrientes que não foi absorvida.



Fonte: elaborada pelo autor. Legenda: A: Pereira de Miranda e B: General Sampaio.



Fonte: elaborada pelo autor. Legenda: A: Pereira de Miranda e B: General Sampaio.

Na avaliação do fluxo e balanço de nutrientes nos reservatórios foi percebido que sua presença é altamente variável a depender do uso e ocupação e ações antrópicas nas bacias hidrográficas que abastecem os reservatórios. Ao longo do período foi observado um aumento progressivo do acúmulo dos nutrientes NT e PT e aumento da vazão de água armazenada nos reservatórios (FIGURA 27 e 28), apenas com algumas pequenas variações, de saídas menores que entradas, indicando que no período houve predominantemente enriquecimento por nutrientes.

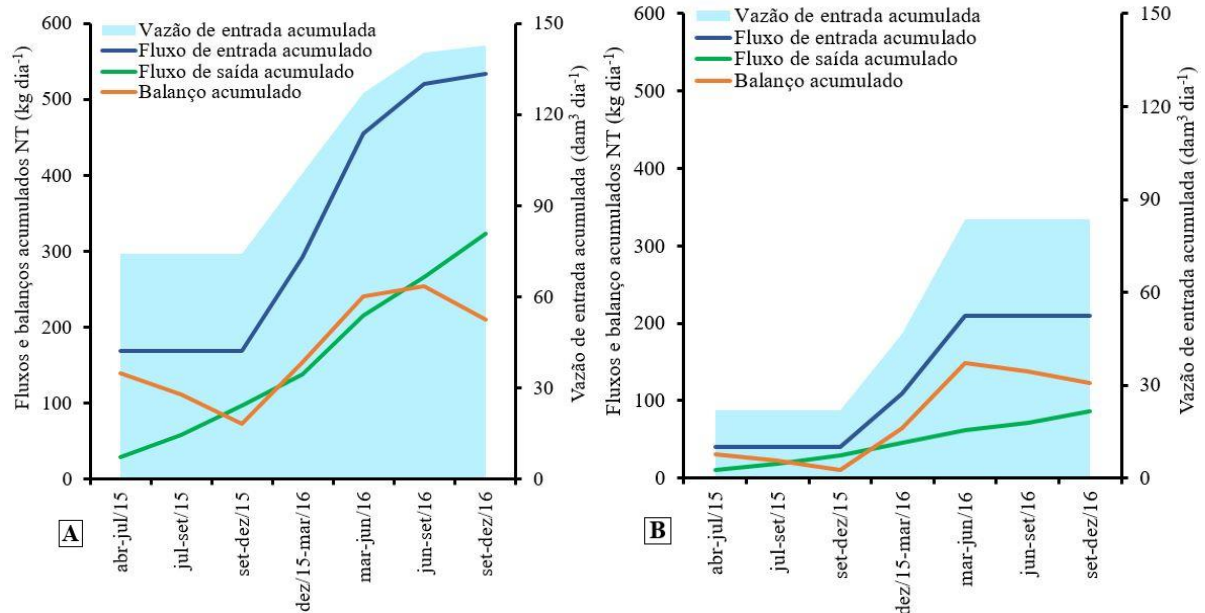
O acúmulo dos nutrientes nos reservatórios foi crescente à medida em que o volume de água acumulada também aumentou. Sendo percebida uma maior tendência desse comportamento para o reservatório General Sampaio. Isso implica dizer que o acúmulo desses nutrientes no reservatório foi oriundo predominantemente de fontes como a agricultura e pecuária, que são a base da economia do município (COGERH, 2011), e que foram carreados pelo escoamento superficial para dentro do reservatório. O acúmulo dos nutrientes em Pereira de Miranda também teve influência da variação de volume de água que entrou no reservatório, mas não de forma tão expressiva quanto General Sampaio. Acredita-se que as maiores contribuições para Pereira de Miranda sejam oriundas de fontes pontuais como a piscicultura dentro do reservatório, esgoto e animais às suas margens.

Nos reservatórios Pereira de Miranda e General Sampaio o fluxo de entrada acumulado de NT e PT no período foi superior ao fluxo de saída, causando assim um balanço acumulado positivo em todo o período, significando que houve mais importação que exportação dos nutrientes nos reservatórios (FIGURA 27 e 28).



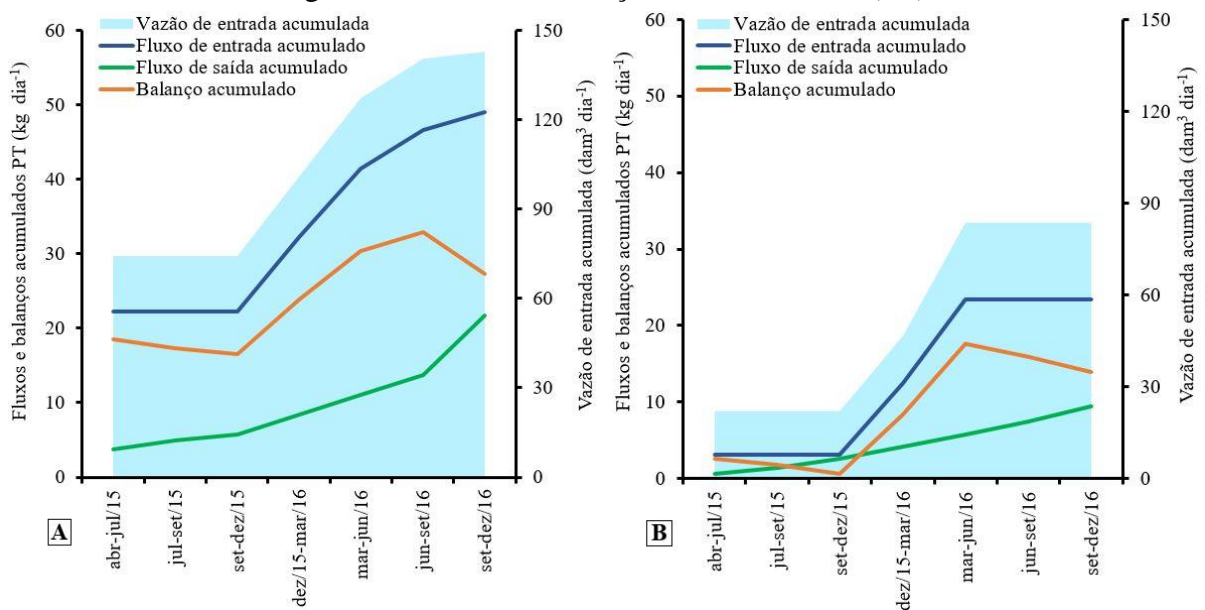
No geral, observou-se que os maiores fluxos de entrada e aumento do acúmulo de nutrientes ocorreram predominantemente no primeiro semestre dos anos, período este considerado neste estudo como sendo o de quadra chuvosa. Isso expressa a disponibilidade de nutrientes nos reservatórios, favorecendo o seu processo de eutrofização (VON SPERLING, 1996).

Figura 27 - Fluxos e balanços de nitrogênio total (NT)



Fonte: elaborada pelo autor. Legenda: A: Pereira de Miranda e B: General Sampaio.

Figura 28 - Fluxos e balanços de fósforo total (PT)



Fonte: elaborada pelo autor. Legenda: A: Pereira de Miranda e B: General Sampaio.

### 7.3.4 Balanço de nutrientes: entrada e saída

As cargas dos nutrientes NT e PT que entraram e saíram dos reservatórios Pereira de Miranda e General Sampaio, assim como as taxas com que entrou e saiu dos reservatórios, tiveram um comportamento muito parecidos ao longo dos períodos analisados (FIGURAS 29 e 30).

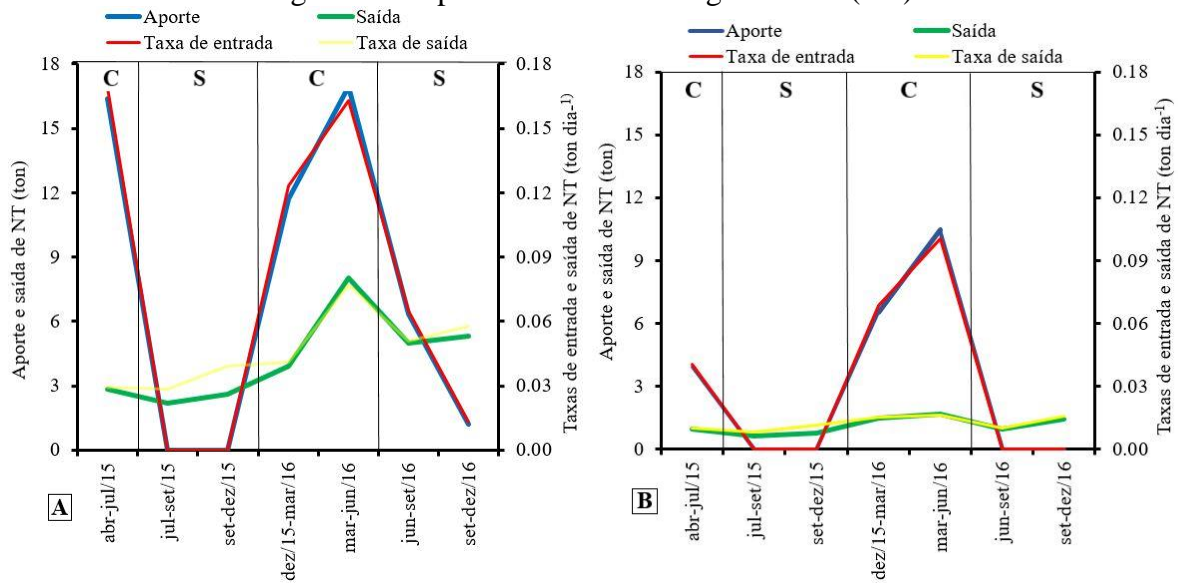
Foi percebido que os maiores aportes ocorreram nas épocas chuvosas da região dos reservatórios, com maior aporte registrado em Pereira de Miranda no período abr-jul/2015, com cerca de 13,56 toneladas de NT e 1,8 toneladas de PT, e General Sampaio no período mar-jun/2016 com cerca de 8,76 toneladas de NT e 0,96 toneladas de PT. Nesses períodos ocorreram as maiores descargas de água nos reservatórios e conseqüentemente maiores aportes de nutrientes (VIDAL; CAPELO NETO, 2014).

Isso implica que a montante dos reservatórios, em seus tributários, há exploração agrícola e de pecuária, que contribui de forma intensa para o enriquecimento de nutrientes carregados pelas chuvas e pelas águas superficiais que escoaram até os reservatórios (ESTEVES; MEIRELLES, 2011; KHAN; ANSARI, 2005).

As entradas dos nutrientes no reservatório Pereira de Miranda foram predominantemente superiores às saídas, sendo o aporte sujeito a maiores variações que a saída, devido ao maior controle e uniformidade das vazões de saída liberadas na rotina de operação da COGERH. No entanto, o reservatório General Sampaio em maior parte do período mais exportou nutriente que armazenou, somente em períodos específicos, devido às precipitações mais intensas, o armazenamento superou a exportação dos nutrientes.

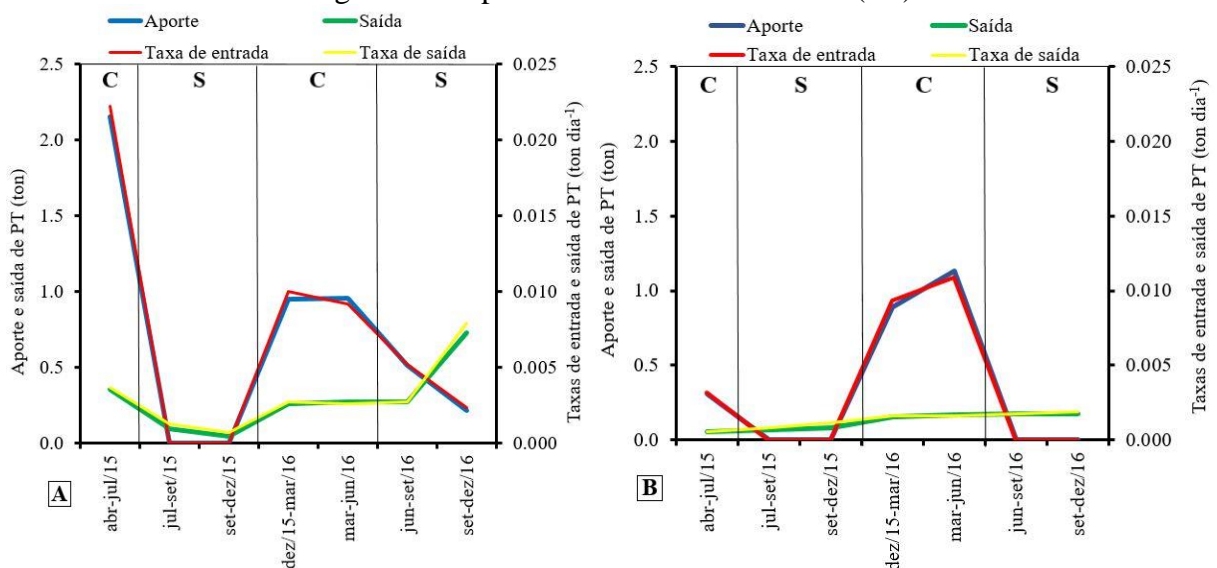
Freitas, Righetto e Attayde (2011) perceberam em seu estudo a mesma dinâmica aqui observada, em que os maiores valores de nutrientes foram medidos no período em que o reservatório recebeu aporte de água, assim como no estudo de Vidal e Capelo Neto (2014) e Andrade *et al.* (2020). Indicando que a eutrofização dos reservatórios sofre grande influência da sazonalidade e ausência de chuvas em alguns períodos da região.

Figura 29 - Aporte e saída de nitrogênio total (NT)



Fonte: elaborada pelo autor. Legenda: A: Pereira de Miranda, B: General Sampaio, C: Período chuvoso e S: Período Seco.

Figura 30 - Aporte e saída de fósforo total (PT)



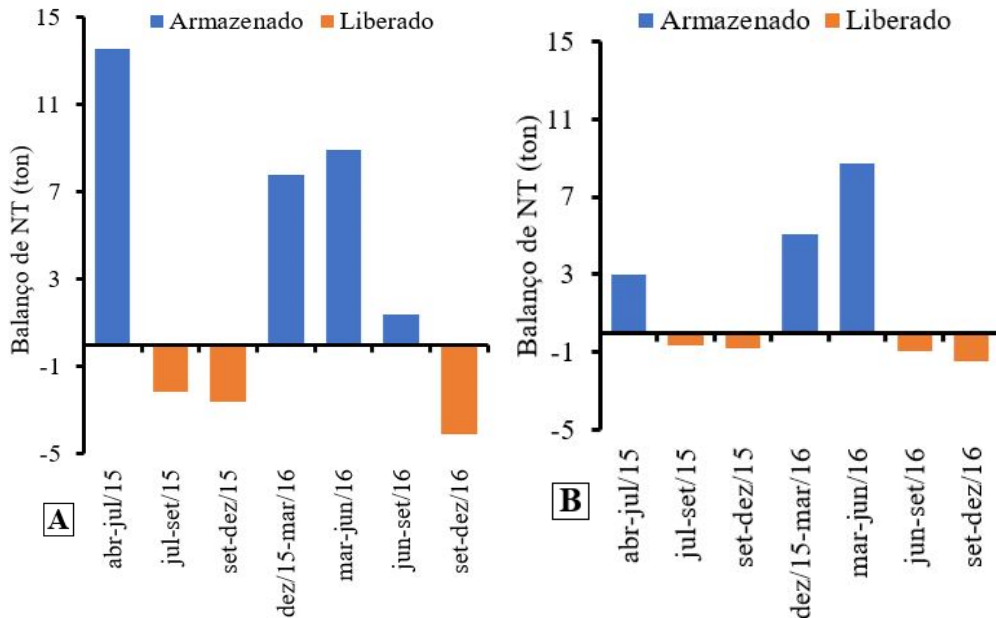
Fonte: elaborada pelo autor. Legenda: A: Pereira de Miranda, B: General Sampaio, C: Período chuvoso e S: Período Seco.

O balanço dos nutrientes NT e PT está demonstrado nas Figuras 31 e 32. Percebe-se que ao longo de todo o período houve um maior armazenamento que liberação desses nutrientes, com as maiores concentrações armazenadas no reservatório Pereira de Miranda.

O maior armazenamento foi calculado para o período abr-jul/2015 em Pereira de Miranda e mar-jun/2016 para General Sampaio, que é justificado, como já citado anteriormente, pelos maiores índices pluviométricos medidos nos períodos para cada reservatório, indicando que

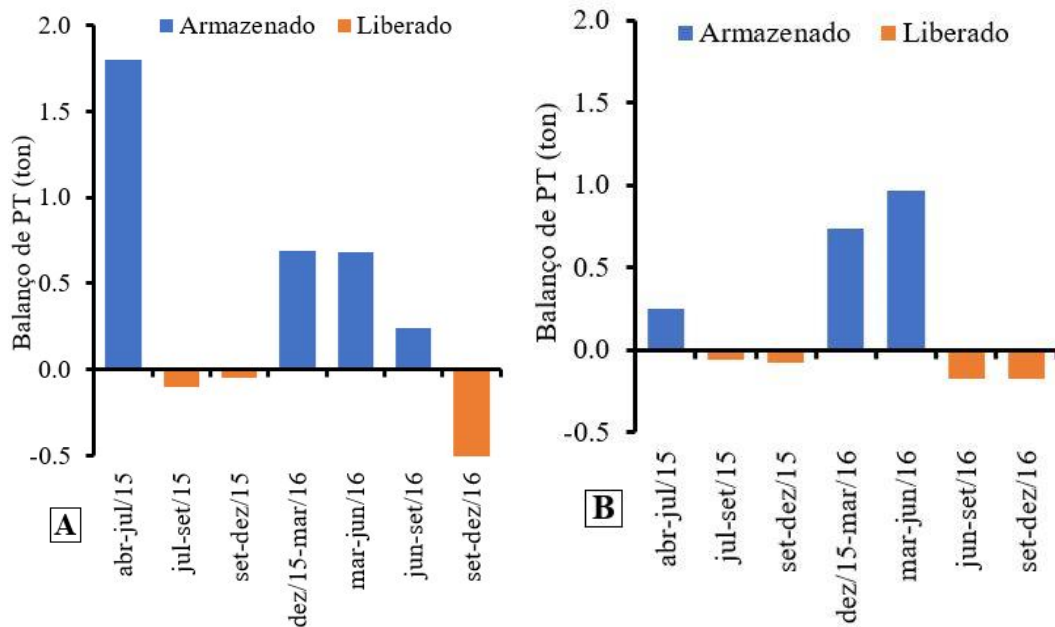
esse balanço foi dependente das chuvas que ocorreram e que houve mais importação que exportaram de nutrientes.

Figura 31 - Balanço de nitrogênio total (NT)



Fonte: elaborada pelo autor. Legenda: A: Pereira de Miranda e B: General Sampaio.

Figura 32 - Balanço de fósforo total (PT)



Fonte: elaborada pelo autor. Legenda: A: Pereira de Miranda e B: General Sampaio.

A Tabela 19 demonstra a carga em tonelada de NT e PT que foram retidos e exportados pelos reservatórios Pereira de Miranda e General Sampaio entre 2015 e 2016. Valores positivos

significam que os reservatórios atuaram como retentores de nutrientes, enquanto valores negativos significam que eles atuaram como exportados de nutrientes.

O reservatório Pereira de Miranda em apenas três períodos atuou como exportador de NT e PT, no entanto, com baixas cargas de saída não compensando a quantidade armazenada. E General Sampaio exportou em quatro períodos, também não compensando a carga armazenada.

Tabela 19 - Aportes e saídas de nitrogênio total (NT) e fósforo total (PT)

Período	Pereira de Miranda		General Sampaio	
	NT (tonelada)	PT (tonelada)	NT (tonelada)	PT (tonelada)
<b>abr-jul/2015</b>	13,56	1,80	2,98	0,25
<b>jul-set/2015</b>	-2,18	-0,10	-0,64	-0,06
<b>set-dez/2015</b>	-2,61	-0,05	-0,77	-0,08
<b>dez/2015-mar/2016</b>	7,81	0,69	5,05	0,74
<b>mar-jun/2016</b>	8,92	0,68	8,76	0,96
<b>jun-set/2016</b>	1,36	0,24	-0,96	-0,17
<b>set-dez/2016</b>	-4,10	-0,51	-1,45	-0,17
<b>Soma</b>	<b>22,8</b>	<b>2,8</b>	<b>13,0</b>	<b>1,5</b>

Fonte: elaborada pelo autor.

Em todo o período analisado os reservatórios Pereira de Miranda e General Sampaio atuaram predominantemente como sumidouros de nutrientes na bacia hidrográfica do rio Curu. Sendo o reservatório Pereira de Miranda o que armazenou uma maior carga de nutrientes, com um total de 22,8 toneladas de NT e 2,8 toneladas de PT. Já General Sampaio apresentou um acúmulo menor desses nutrientes, com uma carga de NT igual a 13,0 toneladas e PT igual a 1,5 toneladas.

Percebeu-se que além do fluxo de água ter aumentado a presença desses nutrientes nos reservatórios, outros fatores como o tempo de residência da água, precipitação e evaporação, além de outros fatores ambientais e climatológicos contribuíram para a presença e distribuição desses nutrientes nos reservatórios. Para Wiegand, Piedra e Araújo (2016), o fenômeno que melhor explica a alta retenção de fósforo e nitrogênio em reservatórios da região semiárida é o tempo de residência da água, pois influencia diretamente o tempo de residência dos nutrientes por não haver renovação da água.

Sendo assim, este estudo evidenciou que são imprescindíveis estudos, planos de gerenciamento, ações corretivas e preventivas a fim de que, futuramente, a qualidade das águas dos reservatórios estudados não seja prejudicada a ponto de culminar na necessidade da modificação da tecnologia de tratamento utilizada nas estações de tratamento, assim como, os processos fiquem mais caros ou inviáveis de serem realizados (VIDAL; CAPELO NETO, 2014).

## 7.4 Conclusões

1. A importação e exportação de nutrientes em reservatórios do semiárido sofrem influência das variações sazonais climáticas.
2. Em regiões semiáridas os fluxos de entrada de nutrientes em reservatórios ocorrem predominantemente nos períodos chuvosos e quando há precipitação pluviométrica.
3. Os nutrientes possuem tendência de aumento de entrada e acúmulo nos reservatórios ao longo do tempo, eles são oriundos das seguintes fontes: agrícola, pecuária, esgotos e piscicultura.
4. Reservatórios de regiões semiáridas atuam como sumidouros de nutrientes, o que implica na redução da qualidade da água armazenada e sua eutrofização.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As evaporações máximas ocorreram predominantemente nas menores profundidades. No entanto, também foram estimados valores mínimos nas margens; associou-se este fato à presença de plantas e cianobactérias muito frequentes e abundantes às margens dos reservatórios e que são intensificadas pelo contexto hídrico e período de estudo da região.

Os resultados da evaporação estimada indicam que com o uso do sensoriamento remoto e o algoritmo SEBAL é possível estimar evaporação e volume evaporado nos reservatórios e se obter dados mais representativos da área. Além disso, a gestão desses recursos hídricos poderá ser feita com um cenário mais realista, onde se tem mais água disponível para os diversos usos.

Em relação aos nutrientes, foi identificado que o nutriente limitante que predominou em todo o período no reservatório Pereira de Miranda foi o Fósforo Total, enquanto no General Sampaio foi o Nitrogênio Total; esses, oriundos de atividades pontuais e difusas dos tipos agrícolas, pecuária, esgotos e piscicultura.

Os reservatórios Pereira de Miranda e General Sampaio atuaram no período como sumidouros dos nutrientes NT e PT, armazenando quantidades significativas de nutrientes, que comprometeram a qualidade da água, o seu tratamento e o atendimento dos usos múltiplos a que se destinam.

## REFERÊNCIAS

- ABOU EL-MAGD, I. H.; ALI, E.M. Estimation of the evaporative losses from Lake Nasser, Egypt using optical satellite imagery. **International Journal of Digital Earth**, v. 5, n. 2, p. 133-146, 2012. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17538947.2011.586442>. Acesso em: 17 jan. 2021.
- ALCÂNTARA, E.H. **Sensoriamento Remoto da Temperatura e dos Fluxos de Calor na Superfície da água do Reservatório de Itumbiara (Go)**. Orientador: Dr. José Luiz Stech. 2010. 164 p. Tese (Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto) - INPE, São José dos Campos, 2010. Disponível em: <http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/07.26.20.24/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2021.
- ALLEN, R. G. *et al.* Evapotranspiration from Landsat (SEBAL) for water rights management and compliance with multi-state water compacts. In: **IGARSS 2001. Scanning the Present and Resolving the Future. Proceedings. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Cat. No. 01CH37217)**. IEEE, 2001. p. 830-833. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/976651>. Acesso em: 02 out. 2019.
- ALLEN, R. G. *et al.* Surface energy balance algorithms for land: advance training and user's manual. Version 1.0. **Waters Consulting-University of Idaho-WaterWatch**, v. 1, p.98, 2002.
- ALTHOFF, D. *et al.* Improving methods for estimating small reservoir evaporation in the Brazilian Savanna. **Agricultural Water Management**, v. 216, p. 105-112, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378377418312836?via%3Dihub>. Acesso em: 02 out. 2020.
- ALVES, L. E. R. *et al.* Balanço de radiação através do satélite Landsat-8 na bacia do Rio Pajeú. **Revista do Departamento de Geografia, [S. l.]**, v. 33, p. 117-127, 2017. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/124577>. Acesso em: 15 fev. 2021.
- AMANCIO, A. L. L.; FARIAS, W. R. L.; SILVA NETO, A. R. Balanço de nutrientes da água do açude Pentecoste (Pentecoste, Ceará, Brasil) no período de março a dezembro de 2002. **Revista Ciência Agronômica**. v. 36, n.1, p. 44 – 52, 2005. Disponível em <http://www.ccarevista.ufc.br/seer/index.php/ccarevista/article/view/6>. Acesso em: 31 jan. 2021.
- ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **PANORAMA DAS ÁGUAS: Balanço hídrico**. 2017. Disponível em: <http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/panorama-das-aguas/balanco-hidrico>. Acesso em: 02 out. 2019.
- ANDRADE, E. M. *et al.* Balanço de nitrogênio e fósforo em um reservatório no semiárido tropical. **Revista Ciência Agronômica**. Fortaleza, v. 51, n. 1, 2020. Disponível em [https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1806-66902020000100420&script=sci\\_abstract&tlng=pt](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1806-66902020000100420&script=sci_abstract&tlng=pt). Acesso em: 15 abr. 2020.
- ANDRADE, E. M.; MEIRELES, A. C. M.; PALÁCIO, H. A. Q. O semiárido cearense e suas águas. In: Andrade, E. M.; Pereira, O. J.; Dantas, F. E. R. (ed). **Semiárido e o manejo dos**



**recursos naturais: Uma proposta de uso adequado do capital natural.** Fortaleza: Graphiti Gráfica e Editora Ltda., 2010, cap. 3, p. 57-80.

APHA *et al.* 2005 - APHA. **Standard methods for the examination of water e wastewater.** 21. ed. Washington, DC, EUA: American Public Health Association (APHA), the American Water Works Association (AWWA), and the Water Environment Federation (WEF), 2005.

ANGELOCCI, L. R. *et al.* Variações da temperatura da água de um pequeno lago artificial ao longo de um ano em Piracicaba, SP. **Scientia Agricola**, v. 52, n. 3, p. 431-438, 1995. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-90161995000300005&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-90161995000300005&script=sci_arttext). Acesso em: 15 fev. 2021.

ARAÚJO, F. O. **Efeitos do enriquecimento com nutrientes (N e P) em diferentes condições de luz sobre o crescimento do fitoplâncton em um reservatório eutrófico no semiárido brasileiro.** 2009. 47 f. Dissertação (Mestrado em Bioecologia Aquática) – Departamento de biologia e zoologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009. Disponível em: [https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/14012/1/EfeitosEnriquecimentoNutrientes\\_Araujo\\_2009.pdf](https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/14012/1/EfeitosEnriquecimentoNutrientes_Araujo_2009.pdf). Acesso em: 15 abr. 2020.

AVDAN, U.; JOVANOVSKA, G. Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data. **Journal of sensors**, v. 2016, 2016. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/js/2016/1480307/>. Acesso em: 05 out. 2019.

AYENEW, T. Evapotranspiration estimation using thematic mapper spectral satellite data in the Ethiopian rift and adjacent highlands. **Journal of hydrology**, v. 279, n. 1-4, p. 83-93, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169403001732>. Acesso em: 20 mar. 2019.

BARROS, L.R. **O Índice do estado trófico e sua adaptação para os sistemas lênticos do semiárido cearense.** Orientador: Prof. Dr. José Capelo Neto. 2013. 85 p. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão de Recursos Hídricos) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/11599>. Acesso em: 20 mar. 2019.

BASTIAANSEN, W. G. *et al.* A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. **Journal of hydrology**, v. 212, p. 198-212, 1998. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169498002534?via%3Dihub>. Acesso em: 20 mar. 2019.

BASTIAANSEN, W. G. M. *et al.* SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. **Journal of irrigation and drainage engineering**, v. 131, n. 1, p. 85-93, 2005. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/%28ASCE%290733-9437%282005%29131%3A1%2885%29>. Acesso em: 20 mar. 2019.

BASTIAANSEN, W. G. M. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. Ph.D. Thesis, **Wageningen Agricultural University, Wageningen, Netherlands**, 273p, 1995. Disponível em: <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/28279>. Acesso em: 06 out. 2019.

BASTIAANSEN, W. G. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of hydrology**, v. 229, n. 1-2, p. 87-100, 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169499002024?via%3Dihub>. Acesso em: 05 out. 2019.

BATISTA, A.A. *et al.* Sazonalidade e variação espacial do índice de estado trófico do açude Orós, Ceará, Brasil. **Revista Agro@ mbiente On-line**, v. 8, n. 1, p. 39-48, 2014. Disponível em: <https://revista.ufrr.br/agroambiente/article/view/1362>. Acesso em: 21 fev. 2021.

BEZERRA, A.F.M. *et al.* Eutrofização e impactos na qualidade da água de abastecimento público em reservatórios na região semiárida do RN. **26º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Porto Alegre, p. 1-12, 2011. Disponível em: <http://abes.locaweb.com.br/XP/XP-EasyArtigos/Site/Uploads/Evento19/TrabalhosCompletoPDF/IV-160.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2021.

BEZERRA, A.F.M. *et al.* Avaliação espaço-temporal do saldo de radiação para área heterogênea em região semiárida. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 38, N.º. 3, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/viewFile/244692/39877>. Acesso em: 31 jan. 2022.

BHAT, S.; MERAJ, G.; PANDIT, A. Assessing the influence of stream flow and precipitation regimes on water quality of the major inflow stream of Wular Lake in Kashmir Himalaya. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 9, n. 1, p. 50, 2015. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12517-015-2083-1>. Acesso em: 20 mar. 2019.

BRASIL, J. *et al.* Drought-induced water-level reduction favors cyanobacteria blooms in tropical shallow lakes. **Hydrobiologia**, v. 770, n. 1, p. 145-164, 2015. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10750-015-2578-5>. Acesso em: 20 mar. 2020.

BRASIL. Resolução n.º 107/2017: **Estabelece critérios técnicos e científicos para delimitação do Semiárido Brasileiro e procedimentos para revisão de sua abrangência**. 2017.

BRASIL, Resolução n.º 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, n.º 053, 18 mar. 2005, p.58-63.

BROOKS, B.W. *et al.* Are harmful algal blooms becoming the greatest inland water quality threat to public health and aquatic ecosystems. **Environmental toxicology and chemistry**. v. 35, n. 1, p. 6-13, 2016. Disponível em: <https://setac.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/etc.3220>. Acesso em: 15 dez. 2019.

BRUTSAERT, W. Evaporation into the atmosphere: Theory, history, and applications. D. Reidel Publ., Boston, MA. **Evaporation into the atmosphere: Theory, history, and applications**. D. Reidel Publ., Boston, MA., p. 299, 1982.

CARVALHO, D.F.; SILVA, L.D.B. **Hidrologia**: Evaporação e Transpiração. Brasil: [s. n.], 2006. Disponível em: <http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/HIDRO-Cap6-ET.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2021.

CHAVES, L.C.G. *et al.* Water quality and anthropogenic impact in the watersheds of service reservoirs in the Brazilian semi-arid region. **Revista Ciência Agronômica**, v. 50, n. 2, p. 223-233, 2019. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1806-66902019000200223&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1806-66902019000200223&script=sci_arttext). Acesso em: 21 fev. 2021.

COGERH, Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Águas Subterrâneas**. 2018. Disponível em: <http://portal.cogerh.com.br/aguas-subterraneas-2/>. Acesso em: 19 abr. 2019.

COGERH, Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Caderno Regional da Bacia do Curu**. Fortaleza: INESP, 2009. 115 p. v. 4. ISBN 978-85-7973-003-0. Disponível em: <https://portal.cogerh.com.br/wp-content/uploads/2018/09/Bacia-do-Curu.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2021.

COGERH, Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Caderno Regional da Sub-Bacia do Alto Jaguaribe**. Fortaleza: INESP, 2009. 119 p. v. 5. ISBN 978-85-7973-004-7. Disponível em: <https://portal.cogerh.com.br/wp-content/uploads/2018/09/Bacia-do-Alto-Jaguaribe.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2021.

COGERH, Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Inventário Ambiental - Açude General Sampaio**. Fortaleza, 2011. Disponível em: [http://cdn.funceme.br/hidro-ce/data/arquivos/inventarios\\_synced\\_201605/Inventario%20Ambiental%20do%20Acude%20General-Sampaio%202011.pdf](http://cdn.funceme.br/hidro-ce/data/arquivos/inventarios_synced_201605/Inventario%20Ambiental%20do%20Acude%20General-Sampaio%202011.pdf). Acesso em: 09 jul. 2020.

COGERH, Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Inventário Ambiental - Açude Orós**. Fortaleza, 2011. Disponível em: [http://f3.funceme.br:9000/hidro-ce/data/arquivos/inventarios\\_synced\\_201605/Inventario%20Ambiental%20do%20Acude%20Oros%202011.pdf](http://f3.funceme.br:9000/hidro-ce/data/arquivos/inventarios_synced_201605/Inventario%20Ambiental%20do%20Acude%20Oros%202011.pdf). Acesso em: 09 jul. 2020.

COGERH, Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. PORTAL HIDROLÓGICO: Documentos diversos. **Matriz de impactos (2020)**. Disponível em: <http://www.hidro.ce.gov.br/data/arquivos/Matriz%20de%20Impactos%20Ambientais%20dos%20A%C3%A7udes.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2020.

COGERH, Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. PORTAL HIDROLÓGICO: Documentos diversos. **Matriz dos usos múltiplos (2020)**. Disponível em: <http://www.hidro.ce.gov.br/data/arquivos/Matriz%20dos%20Usos%20M%C3%BAtiplos%20dos%20A%C3%A7udes.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2020.

COGERH, Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Volume armazenado - Reservatório**. 2021. Disponível em: <http://www.hidro.ce.gov.br/>. Acesso em: 20 fev. 2021.  
COGERH, Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Sistema de Qualidades das Águas: Estado Trófico**. 2022. Disponível em: <http://www.funceme.br/hidro-ce-zend/acude/eutrofizacao>. Acesso em: 29 jan. 2022.

COMPAORÉ, H. *et al.* Evaporation mapping at two scales using optical imagery in the White Volta Basin, Upper East Ghana. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 33, n. 1-2, p. 127-140, 2008. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474706507000782?via%3Dihub>. Acesso em: 24 mar. 2019.

COOK, P. L. *et al.* Retention of nitrogen, phosphorus and silicon in a large semi-arid riverine lake system. **Biogeochemistry**, v. 99, n. 1, p. 49-63, 2009. Disponível em:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10533-009-9389-6>. Acesso em: 15 abr. 2019.

COPPENS, J. *et al.* Impact of alternating wet and dry periods on long-term seasonal phosphorus and nitrogen budgets of two shallow Mediterranean lakes. **Science of the Total Environment**, v. 563, p. 456-467, 2016. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969716307082?via%3Dihub>. Acesso em: 16 abr. 2019.

CORRELL, D. L. Phosphorus: a rate limiting nutrient in surface waters. **Poultry science**, v. 78, n. 5, p. 674-682, 1999. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032579119409917>. Acesso: 10 nov. 2019.

COSTA, I. A. S. da *et al.* Dinâmica de cianobactérias em reservatórios eutróficos do semiárido do Rio Grande do Norte. **Oecologia Australis**, v. 13, p. 382-401, 2009. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/8421>. Acesso em: 15 abr. 2019.

COSTA, M. *et al.* Extreme drought favors potential mixotrophic organisms in tropical semi-arid reservoirs. **Hydrobiologia**, v. 831, n. 1, p. 43-54, 2018. Disponível em:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10750-018-3583-2>. Acesso em: 15 abr. 2019.

COTOVICZ JÚNIOR, L. C. *et al.*, Assessment of the trophic status of four coastal lagoons and one estuarine delta, eastern Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.185, n.4; p.3297-3311, 2013. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-012-2791-x>. Acesso em: 16 abr. 2019.

CPRM, Serviço Geológico do Brasil. **DIAGNÓSTICO DO MUNICÍPIO DE GENERAL SAMPAIO**: Programa de Recenseamento de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea no Estado do Ceará. Fortaleza: Ministério de Minas e Energia Secretaria de Minas e Metalurgia, 1998. 15 p. Disponível em:

[http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/16043/Rel\\_GeneralSampaio.pdf?sequence=1](http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/16043/Rel_GeneralSampaio.pdf?sequence=1). Acesso em: 15 abr. 2019.

CURTARELLI, M. P. *et al.* Avaliação da dinâmica temporal da evaporação no reservatório de Itumbiara, GO, utilizando dados obtidos por sensoriamento remoto. **Revista Ambiente & Água**, v. 8, n. 1, p. 272-289, 2013. Disponível em:

[https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1980-993X2013000100020&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1980-993X2013000100020&script=sci_arttext). Acesso em: 02 fev. 2021.

DING, S. *et al.* Internal phosphorus loading from sediments causes seasonal nitrogen limitation for harmful algal blooms. **Science of the total environment**, v. 625, p. 872-884, 2018. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969717337816?via%3Dihub>. Acesso em: 16 mar. 2019.

DNOCS, Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. **Relatório**: 2005. Fortaleza: [s. n.], 2006. Disponível em: [https://www.dnocs.gov.br/php/CGU/dnocs\\_relatorio\\_anual\\_2005.pdf](https://www.dnocs.gov.br/php/CGU/dnocs_relatorio_anual_2005.pdf). Acesso em: 2 fev. 2021.

ESTEVEVES, F. A.; MEIRELLES, P.F. Eutrofização artificial. In: Fundamentos de Limnologia. 3<sup>o</sup> ed. Rio de Janeiro: **Editora Interciência**, cap. 27, p. 625-655, 2011.

ESTEVEVES, F.A. **Fundamentos de Limnologia**. RJ: Editora Interciência, 1988.

FERNANDES, A. L. T.; NOGUEIRA, M. A. S.; RABELO, P. V. Escassez e qualidade da água no século 21. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 29, n. 246, p. 86-101, 2008. Disponível em: [https://www.feagri.unicamp.br/irrigacao/index.php?option=com\\_attachments&task=download&id=6](https://www.feagri.unicamp.br/irrigacao/index.php?option=com_attachments&task=download&id=6). Acesso em: 10 mar. 2019.

FINCH, J. W.; HALL, R. L. **Estimation of open water evaporation: A review of methods**. Bristol, UK: Environment Agency, 2001. Disponível em: <http://www.opengrey.eu/item/display/10068/617087>. Acesso em: 05 out. 2019.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**: 2005. 3<sup>a</sup>. ed. atual. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. ISBN 978-85-7975-016-8.

FRANÇA, J.M.B. *et al.* Comportamento das variáveis qualitativas do açude Pereira de Miranda-Pentecoste/CE, no período de estiagem. **Geociências (São Paulo)**, v. 32, n. 4, p. 586-599, 2013. Disponível em: <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/GEOSP/article/view/7274>. Acesso em: 06 out. 2019.

FREITAS, F.R.S.; RIGHETTO, A. M.; ATTAYDE, J. L. Cargas de fósforo total e material em suspensão em um reservatório do semiárido brasileiro. **Oecologia Australis**, v. 59072, p. 655-665, 2011. Disponível em: [https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/14012?locale=pt\\_BR](https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/14012?locale=pt_BR). Acesso em: 16 mar. 2020.

FRIEDRICH, K. *et al.* Reservoir evaporation in the Western United States: current science, challenges, and future needs. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 99, n. 1, p. 167-187, 2018. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/99/1/bams-d-15-00224.1.xml>. Acesso em: 02 mar. 2019.

FUNCEME, Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Funceme mapeia espelhos d'água no CE com mais detalhamento e precisão**: Foram identificados 28.195 açudes e lagoas no Estado. Ceará: Assessoria de Comunicação da Funceme, 2016. Disponível em: <http://www.funceme.br/?p=1412>. Acesso em: 2 fev. 2021.

FUNCEME, Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Levantamento Exploratório - Reconhecimento de Solos**. Ceará: [s. n.], 2018. Atlas. Escala 1:1.200.000.

Disponível em: [http://www.funceme.br/wp-content/uploads/2019/02/16-Mapa\\_CE\\_Solos\\_A2.pdf](http://www.funceme.br/wp-content/uploads/2019/02/16-Mapa_CE_Solos_A2.pdf). Acesso em: 18 abr. 2019.

FUNCEME, Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Normal Climatológica (1981 - 2010)**: Dados de precipitação pluviométrica do Estado do Ceará referente ao período de 1981 a 2010. Ceará: [s. n.], 2018. Atlas. Escala 1:1.200.000. Disponível em: [http://www.funceme.br/wp-content/uploads/2019/02/14-Mapa\\_CE\\_Climatologia\\_A2.pdf](http://www.funceme.br/wp-content/uploads/2019/02/14-Mapa_CE_Climatologia_A2.pdf). Acesso em: 18 abr. 2020.

FUNCEME, Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Uso do Solo**. Ceará: [s. n.], 2018. Atlas. Escala 1:1.200.000. Disponível em: [http://www.funceme.br/wp-content/uploads/2019/02/17-Mapa\\_CE\\_USO\\_A2.pdf](http://www.funceme.br/wp-content/uploads/2019/02/17-Mapa_CE_USO_A2.pdf). Acesso em: 18 abr. 2019. /02/17-Mapa\_CE\_USO\_A2.pdf. Acesso em: 18 abr. 2019.

GETIRANA, A. Extreme water deficit in Brazil detected from space. **Journal of Hydrometeorology**, v. 17, n. 2, p. 591-599, 2016. Disponível em: [https://journals.ametsoc.org/view/journals/hydr/17/2/jhm-d-15-0096\\_1.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/hydr/17/2/jhm-d-15-0096_1.xml). Acesso em: 02 mar. 2019.

GIONGO, P. R. *et al.* Uso de sensoriamento remoto para estimar o saldo de radiação em áreas de cana-de-açúcar e cerrado. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, v. 18, n. 1, p. 8-21, 2010. Disponível em: <https://docplayer.com.br/12026819-Uso-de-sensoriamento-remoto-para-estimar-o-saldo-de-radiacao-em-areas-de-cana-de-acucar-e-cerrado.html>. Acesso em: 31 jan. 2022.

GORAYEB, A. *et al.* Saneamento básico e impactos ambientais na bacia hidrográfica do rio Curu—estado do Ceará—NE do Brasil. **Scripta Nova**, v. 10, p. 1-25, 2006. Disponível em: <http://www.ub.edu/geocrit/sn/sn-208.htm>. Acesso em: 02 mar. 2020.

GREEN, M.B.; FINLAY, J.C. Patterns of hydrologic control over stream water total nitrogen to total phosphorus ratios. **Biogeochemistry**, v. 99, n. 1, p. 15-30, 2010. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10533-009-9394-9>. Acesso em: 02 mar. 2020.

HASSAN, M. Evaporation estimation for Lake Nasser based on remote sensing technology. **Ain Shams engineering journal**, v. 4, n. 4, p. 593-604, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447913000117>. Acesso em: 24 mar. 2019.

HAVENS, K. E. *et al.* N:P ratios, light limitation, and cyanobacterial dominance in a subtropical lake impacted by non-point source nutrient pollution. **Environmental Pollution**, v.122, p.379-390, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749102003044>. Acesso em: 15 abr. 2019.

HENDERSON-SELLERS, B. Calculating the surface energy balance for lake and reservoir modeling: A review. **Reviews of Geophysics**, v. 24, n. 3, p. 625-649, 1986. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/RG024i003p00625>. Acesso em: 24 mar. 2019.

HIGO, C.A.G. **Quantificação do Efeito do Açude Castanhão sobre o Fluxo Fluvial de Material Particulado em Suspensão e Nutrientes para o Estuário do Rio Jaguaribe, Ceará – Brasil**. Orientador: Dr. Maurício Mussi Molisani. 2009. 54 f. Dissertação (Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/11428>. Acesso em: 20 jan. 2021.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico**. Ceará, 2010. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9662-censo-demografico-2010.html?=&t=resultados>. Acesso em: 2 fev. 2021.

IPECE, Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Perfil Básico Municipal: Pentecoste**. Ceará, 2009. Disponível em: [https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2018/09/Pentecoste\\_2009.pdf](https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2018/09/Pentecoste_2009.pdf). Acesso em: 15 abr. 2019.

IPIRANGA, F.P.C. **Nutriente em Sedimentos e Qualidade da Água em Açude do Semiárido Brasileiro**. Orientador: Dra. Sandra Tédde Santaella. 2016. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação de Ciências Ambientais) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016. Disponível em: [http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/25344/1/2016\\_tcc\\_fpcpiranga.pdf](http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/25344/1/2016_tcc_fpcpiranga.pdf). Acesso em: 10 mar. 2021

JENSEN, M. E. e ALLEN, R. G. Evaporation, Evapotranspiration, and Irrigation Water Requirements. **American Society of Civil Engineers**, 2ª Ed., 2016, 744 pp.

JORDAN, P. *et al.* The seasonality of phosphorus transfers from land to water: implications for trophic impacts and policy evaluation. **Science of the Total Environment**, v. 434, p. 101-109, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969712002537>.

KALMA, J.D.; MCVICAR, T.R.; MCCABE, M.F. Estimating land surface evaporation: A review of methods using remotely sensed surface temperature data. **Surveys in Geophysics**, v. 29, n. 4-5, p. 421-469, 2008. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10712-008-9037-z>. Acesso em: 17 abr. 2019.

KHAN, F.A.; ANSARI, A.A. Eutrophication: an ecological vision. **The botanical review**, v. 71, n. 4, p. 449-482, 2005. Acesso em: 20 jun. 2020.

KIPTALA, J. K. *et al.* Mapping evapotranspiration trends using MODIS and SEBAL model in a data scarce and heterogeneous landscape in Eastern Africa. **Water Resources Research**, v. 49, n. 12, p. 8495-8510, 2013. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2013WR014240>. Acesso em: 17 abr. 2019.

KOHLER, M.A. *et al.* Evaporation from pans and lakes, U.S. **Weather Bureau Research**, n. 38, p. 1-21, 1955.

KUMMU, M. *et al.* Is physical water scarcity a new phenomenon? Global assessment of water shortage over the last two millennia. **Environmental Research Letters**, v. 5, n. 3, p. 034006, 2010. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/5/3/034006/meta>. Acesso em: 30 jul. 2019.

KUSTAS, W.P. NORMAN, J.M. Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. **Hydrological Sciences Journal**, v. 41, n. 4, p. 495-516, 1996. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02626669609491522>. Acesso em: 17 maio 2020.

LAMPARELLI, M.C. **Graus de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento**. 2004. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/41/41134/tde-20032006-075813/publico/TeseLamparelli2004.pdf>. Acesso em: 17 maio 2020.

LEE, R. A. J.; FRED, G. RECENT ADVANCES IN ASSESSING IMPACT OF PHOSPHORUS LOADS ON EUTROPHICATION-RELATED WATER QUALITY. **Department Of Civil And Environmental Engineering**, Newark, Nj, p.503-515, 1982.

LI, S. *et al.* Extreme drought causes distinct water acidification and eutrophication in the Lower Lakes (Lakes Alexandrina and Albert), Australia. **Journal of Hydrology**, v. 544, p. 133-146, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169416307223?via%3Dihub>. Acesso em: 20 jan. 2021.

LINACRE, E.T. Data-sparse estimation of lake evaporation using a simplified Penman equation. Elsevier Science Publishers B.V. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 64, p. 237-256, 1993. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/016819239390031C>. Acesso em: 20 maio 2019.

LIU, S. *et al.* Based on the Gaussian fitting method to derive daily evapotranspiration from remotely sensed instantaneous evapotranspiration. **Advances in Meteorology**, v. 2019, 2019. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/amete/2019/6253832/>. Acesso em: 20 mar. 2020.

LOPES, F.B. *et al.* Assessment of the water quality in a large reservoir in semiarid region of Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 4, p. 437-445, 2014. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1415-43662014000400012&script=sci\\_abstract&tlng=es](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1415-43662014000400012&script=sci_abstract&tlng=es). Acesso em: 21 fev. 2021.

LOGGEDARAGH, S.; RAHIMZADEGAN, M. Evaluation of SEBS, SEBAL, and METRIC models in estimation of the evaporation from the freshwater lakes (Case study: Amirkabir dam, Iran). **Journal of Hydrology**, v. 561, p. 523-531, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169418302798?via%3Dihub>. Acesso em: 20 mar. 2020.

LOURO, M. Q. **Respostas relacionais entre nitrato, ortofosfato e biomassa fitoplanctônica da Lagoa de Cima (RJ): uma abordagem experimental**. Diss. Tese para a obtenção do título de mestrado. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, RJ, 2011.

MACHADO, E. C. M. N.; GALVAO, C.O.; SOUZA FILHO, F.A. Alocação qualitativa de águas em bacias hidrográficas: metodologia multiobjetivo inserida no contexto da gestão dos recursos hídricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 2, p. 213-



227, 2012. Disponível em:

<http://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=1&ID=62&SUMARIO=1090>.

Acesso em: 17 abr. 2020.

MARINHO, F.J. *et al.* Mecanismo redutor de evapotranspiração em manancial hídrico localizado no semiárido Paraibano. **Enciclopédia Biosfera**, v. 11, n. 20, 2015. Disponível em: <http://www.conhecer.org.br/enciclop/2015a/simposio%20agroecologia/mecanismo%20reducao.pdf>. Acesso em: 08 jul. 2020.

MELESSE, A.M.; ABTEW, W.; DESSALEGNE, T. Evaporation estimation of Rift Valley Lakes: comparison of models. **Sensors**, v. 9, n. 12, p. 9603-9615, 2009. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/9/12/9603>. Acesso em: 08 jul. 2020.

MILTON, J. S. **Statistical methods in the biological and health sciences**. 2.ed. New York: McGraw-Hill, 1992. 526p.

MORIASI, D. N. *et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=23153>. Acesso em: 08 jul. 2020.

MORTON, F.I. Operational estimates of lake evaporation. **Journal of hydrology**, v. 66, p. 77-100, 1983.

MOURA, R. S. T. *et al.* Morphometric parameters of Santa Cruz and Umari Reservoirs, Rio Grande do Norte semiarid, Brazil. **Boletim do Instituto de Pesca**, v. 41, n. 2, p. 355 - 363, 13 jul. 2018. ISSN 1678-2305. Disponível em: [https://www.pesca.sp.gov.br/boletim/index.php/bip/article/view/41\\_2\\_355-363](https://www.pesca.sp.gov.br/boletim/index.php/bip/article/view/41_2_355-363). Acesso em: 28 jan. 2022.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I —A discussion of principles. **Journal of hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0022169470902556?via%3Dihub>. Acesso em: 20 mar. 2020.

OLIVEIRA, V. P. V. **A problemática da degradação dos recursos naturais no domínio dos sertões secos do Estado do Ceará-Brasil**. Fortaleza: UFC, 2006.

OLIVEIRA, R.C. M.; LIMA, P.V.P.S.; SOUSA, R.P. Gestão ambiental e gestão dos recursos hídricos no contexto do uso e ocupação do solo nos municípios. **Gestão & Regionalidade**, v. 33, n. 97, p. 48-64, 2017. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/1334/133450056004.pdf>. Acesso em 21 fev. 2021.

OLIVEIRA, P.A. *et al.* Redução de evaporação de água: estudo de caso no reservatório de São Gonçalo/PB. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 10, n. 5, p. 204-217, 2019. Disponível em: <http://sustenere.co/index.php/rica/article/view/3307>. Acesso em 21 fev. 2021.

OLIVER, S. L.; RIBEIRO, H. Variabilidade climática e qualidade da água do Reservatório Guarapiranga. **Estudos Avançados**, [S.L.], v. 28, n. 82, p. 95-128, dez. 2014. UNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-40142014000300007>.

- ÖZEN, A. *et al.* Drought-induced changes in nutrient concentrations and retention in two shallow Mediterranean lakes subjected to different degrees of management. **Hydrobiologia**, v. 646, n. 1, p. 61-72, 2010. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10750-010-0179-x>. Acesso em: 25 fev. 2020.
- PAULINO, W. D.; OLIVEIRA, R. R. A.; AVELINO, F. F. Classificação do estado trófico para o gerenciamento de reservatórios no semiárido: a experiência da Cogerh no estado Ceará. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, XX**, 2013. Disponível em: [https://abrh.s3.amazonaws.com/Sumarios/155/39ff339763f289fde126e45c8e9a23a4\\_a9a011bb99ed0912a1d4d837e8c2133a.pdf](https://abrh.s3.amazonaws.com/Sumarios/155/39ff339763f289fde126e45c8e9a23a4_a9a011bb99ed0912a1d4d837e8c2133a.pdf). Acesso em: 15 abr. 2020.
- PAULSON, C.A. The Mathematical Representation of Wind Speed and Temperature Profiles in the Unstable Atmospheric Surface Layer. **Journal of Applied Meteorology**, v.9, p.856-861, 1970. Disponível em: [https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/9/6/1520-0450\\_1970\\_009\\_0857\\_tmrows\\_2\\_0\\_co\\_2.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/9/6/1520-0450_1970_009_0857_tmrows_2_0_co_2.xml). Acesso em 21 fev. 2021.
- PEIXOTO, T. D.C. *et al.* Coeficiente do Tanque Classe “A” para a região de Mossoró, RN. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 10, n. 2, p. 515, 2016. Disponível em: <http://www.inovagri.org.br/revista/index.php/rbai/article/view/383>. Acesso em 21 fev. 2021.
- PENMAN, H. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. **Mathematical and Physical Sciences**, v. 193, n. 1032, p. 120-145, 1948. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.1948.0037>. Acesso em: 25 fev. 2020.
- PEREIRA, S.B. *et al.* Evaporação líquida no lago de Sobradinho e impactos no escoamento devido à construção do reservatório. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 346-352, 2009. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1415-43662009000300018&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1415-43662009000300018&script=sci_arttext). Acesso em: 27 fev. 2021.
- PETROPOULOS, G. *et al.* A review of Ts/VI remote sensing based methods for the retrieval of land surface energy fluxes and soil surface moisture. **Progress in Physical Geography**, v. 33, n. 2, p. 224-250, 2009. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0309133309338997>. Acesso em: 15 jan. 2020.
- PFEIFER, M. *et al.* Terrestrial ecosystems from space: a review of earth observation products for macroecology applications. **Global Ecology and Biogeography**, v. 21, n. 6, p. 603-624, 2012. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1466-8238.2011.00712.x>. Acesso em: 15 jan. 2020.
- PINTO, B. H. A. *et al.* Estratégias Inovadoras para Pesquisas de Evaporação de Água em Reservatórios Superficiais no Nordeste Brasileiro. In: **VI ENPI-Encontro Nacional de Propriedade Intelectual**. 2020. Disponível em: <http://api.org.br/conferences/index.php/VIENPI/VIENPI/paper/view/1223>. Acesso em 21 fev. 2021.

PRAXEDES, A. *et al.* Avaliação da Produtividade em Regimes Pluviométricos Distintos no Semiárido Cearense. **Solos e Vegetação no Ambiente Semiárido: usos e potencialidades**, Sobral, n. 5, p. 89 - 108, 2020.

RATTAN, K. J. *et al.* Quantifying seasonal variation in total phosphorus and nitrogen from prairie streams in the Red River Basin, Manitoba Canada. **Science of the Total Environment**, v. 575, p. 649-659, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969716319921?via%3Dihub>. Acesso em: 27 fev. 2020.

REDFIELD, A. C. The biological control of chemical factors in the environment. **American scientist**, v. 46, n. 3, p. 230A-221, 1958.

ROCHA, C.A.N. da *et al.* Water volume reduction increases eutrophication risk in tropical semi-arid reservoirs. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 30, 2018. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S2179-975X2018000100802&script=sci\\_abstract&tlng=pt](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S2179-975X2018000100802&script=sci_abstract&tlng=pt). Acesso em: 27 fev. 2020.

ROCHA, F.C. *et al.* Physical-chemical determinant properties of biological communities in continental semi-arid waters. **Environmental monitoring and assessment**, v. 188, n. 8, p. 1-15, 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-016-5497-7>. Acesso em: 21 fev. 2021.

ROCHA, S. *et al.* ANALYSIS AND MODELING OF THE RELATIONS BETWEEN NUTRIENTS AND PHYTOPLANKTON IN RESERVOIRS OF CEARÁ. **Brazilian Journal of Environmental Sciences (Online)**, n. 54, p. 134-147, 30 dez. 2019. Disponível em: [http://www.rbciamb.com.br/index.php/Publicacoes\\_RBCIAMB/article/view/536](http://www.rbciamb.com.br/index.php/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/536). Acesso em: 21 fev. 2021.

RODRIGUES, I. S. **Evaporação em reservatórios do Nordeste brasileiro: avaliação da distribuição espacial e influência da mata ripária por sensoriamento remoto**. Orientador: Carlos Alexandre Gomes Costa. 2020. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/53463>. Acesso em: 21 fev. 2021.

RONG, Y. *et al.* Effects of climate variability on evaporation in Dongping Lake, China, during 2003–2010. **Advances in Meteorology**, v. 2013, p.1-11, 2013. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/amete/2013/789290/>. Acesso em: 09 fev. 2019.

ROUSE, J. W. *et al.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. **NASA special publication**, v. 351, n. 1974, p. 309, 1974.

SCHINDLER, D.W. *et al.* Reducing phosphorus to curb lake eutrophication is a success. **Environmental Science & Technology**, v. 50, n. 17, p. 8923-8929, 2016. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.6b02204>. Acesso em: 19 maio 2019.

SHUTTLEWORTH, J. **Terrestrial Hydrometeorology**. [S. l.: s. n.], 2012. ISBN 9781119951933.

SILVA, B. B.; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C. Balanço de radiação no perímetro irrigado São Gonçalo/PB mediante imagens orbitais. **Revista Caatinga**, v. 24, n. 3, p. 145-152, 2011. Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/index.php/caatinga/article/view/2282/4764>. Acesso em: 31 jan. 2022.

SILVA, R.M.A. Entre dois paradigmas: combate à seca e convivência com o semiárido. **Sociedade e estado**, v. 18, n. 1-2, p. 361-385, 2003. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/se/v18n1-2/v18n1a16.pdf>. Acesso em: 17 de maio 2019.

SILVA, B. B. *et al.* Evapotranspiração e estimativa da água consumida em perímetro irrigado do Semiárido brasileiro por sensoriamento remoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1218-1226, 2012. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-204X2012000900006&script=sci\\_arttext&tlng=pt](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-204X2012000900006&script=sci_arttext&tlng=pt). Acesso em: 19 de mar. 2019.

SOUZA FILHO, F. A. *et al.*, O processo de mistura em reservatórios do semiárido e sua implicação na qualidade da água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.11, p.109-119, 2006. Disponível em: <https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=1&ID=22&SUMARIO=328>. Acesso: 8 fev. 2020.

SOUZA, E. *et al.* Segurança hídrica do reservatório Castanhão-CE: aplicação da matriz de sistematização institucional. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 5, p. 877-887, 2017. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S1413-41522017000500877&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1413-41522017000500877&lng=pt&nrm=iso). Acesso em: 02 out. 2019.

STEFFEN, C. A. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. [S. l.], 2016. Instituto Nacional de pesquisas Espaciais. Disponível em: <http://www3.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm>. Acesso em: 19 mar. 2021.

STERNER, R. W. *et al.* Scale-dependent carbon: nitrogen: phosphorus seston stoichiometry in marine and freshwaters. **Limnology and Oceanography**, v. 53, n. 3, p. 1169-1180, 2008. Disponível em: <https://aslopubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.4319/lo.2008.53.3.1169>. Acesso em: 02 out. 2019.

STOW, C.A. *et al.* Long-term and seasonal trend decomposition of Maumee River nutrient inputs to western Lake Erie. **Environmental Science & Technology**, v. 49, n. 6, p. 3392-3400, 2015. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es5062648>. Acesso em: 02 out. 2019.

SUN, Z. *et al.* Evapotranspiration estimation based on the SEBAL model in the Nansi Lake Wetland of China. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 54, n. 3-4, p. 1086-1092, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895717710005303>. Acesso em: 04 out. 2019.

TANNY, J. *et al.* Evaporation from a small water reservoir: Direct measurements and estimates. **Journal of Hydrology**, v. 351, n. 1-2, p. 218-229, 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169407007561?via%3Dihub>. Acesso em: 02 out. 2020.

TASUMI, M. *et al.* Satellite-based energy balance to assess within-population variance of crop coefficient curves. **Journal of irrigation and drainage engineering**, v. 131, n. 1, p. 94-109, 2008.

TEIXEIRA, L.M.N. **Evapotranspiração em vegetação natural do bioma Caatinga obtida por balanço hídrico no solo e por sensoriamento remoto**. Orientador: Carlos Alexandre Gomes Costa. 2018. 124 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/36482>. Acesso em: 31 jan. 2019.

USGS, **UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY**. EarthExplorer. 2019. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/> Acesso em: 09 fev. 2019.

VIDAL, T. F.; CAPELO NETO, J. C. Dinâmica de nitrogênio e fósforo em reservatório na região semiárida utilizando balanço de massa. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, Pb, p.1-6, 2014. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v18n4/v18n04a07.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2019.

VIEIRA, N. *et al.* Estimativa da evaporação nos reservatórios de Sobradinho e Três Marias usando diferentes modelos. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 3, p. 433-448, 2016. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-69162016000300433&script=sci\\_arttext&tlng=pt](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-69162016000300433&script=sci_arttext&tlng=pt). Acesso em: 24 mar. 2020.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3<sup>a</sup>. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2005. 452 p. v. 1.

VON SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento de esgotos** – Princípios do tratamento biológico de água residuárias. Belo Horizonte, UFMG. v.2. 1996.

WANG, F. *et al.* An improved mono-window algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat 8 thermal infrared sensor data. **Remote sensing**, v. 7, n. 4, p. 4268-4289, 2015. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/7/4/4268>. Acesso em: 09 fev. 2019.

WEBB, E.K. Profile Relationships: the Log-linear Range and Extension to Strong Stability. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.96, p.67-90, 1970. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.49709640708>. Acesso em: 21 fev. 2021.

WIEGAND, M.C.; PIEDRA, J.I.G.; ARAÚJO, J.C. Vulnerability towards eutrophication of two tropical lakes in both humid (Cuba) and semiarid (Brazil) climates. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, p. 415–424, 2016. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-41522016000200415&script=sci\\_abstract](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-41522016000200415&script=sci_abstract). Acesso em: 14 nov. 2019.

WURBS, R. A.; AYALA, R. A., Reservoir evaporation in Texas, USA. **Journal Of Hydrology**, v. 510, p.1-9, mar. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169413009086?via%3Dihub>. Acesso em: 27 fev. 2020.

YU, Y. *et al.* Climate change, water resources and sustainable development in the arid and semi-arid lands of Central Asia in the past 30 years. **Journal of Arid Land**, v. 11, n. 1, p. 1-14, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s40333-018-0073-3.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2020.