

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**

MICHELE ARAÚJO DE OLIVEIRA

**MODELAGEM DO PROCESSO DE EUTROFIZAÇÃO EM UM RESERVATÓRIO
DE CLIMA TROPICAL**

SÃO CARLOS –SP

2025

MICHELE ARAÚJO DE OLIVEIRA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de doutor em Ecologia e Recursos Naturais.

Orientador: José Galizia Tundisi

Co-orientador: Augusto Cesar Fonseca Saraiva

SÃO CARLOS – SP

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Biológicas e da Saúde
Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais

Folha de Aprovação

Defesa de Tese de Doutorado da candidata Michele Araujo de Oliveira, realizada em 30/10/2025.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. José Galizia Tundisi (IIE)

Profa. Dra. Maria da Graça Gama Melão (UFSCar)

Profa. Dra. Marcela Bianchessi da Cunha Santino (UFSCar)

Prof. Dr. Neyson Martins Mendonça (UFPA)

Prof. Dr. Giovanni Chaves Penner (UFPA)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Marizete e Livaldo por todo incentivo e apoio durante toda minha trajetória acadêmica. Dedico a minha filha Sophia, que de surpresa apareceu em minha vida e tornou-se um dos principais motivos para a conclusão deste trabalho

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus por todas as conquistas realizadas.

Agradeço ao meu orientador José Galizia Tundisi e ao Augusto Cesar Fonseca Saraiva pelas indispensáveis orientações deste trabalho. À minha mãe Marizete Santos Araújo e ao meu pai Livaldo Fonseca de Oliveira pelo incentivo e apoio. Aos meus irmãos Milene, Marília e Diego Araújo de Oliveira pela paciência e apoio que sempre me deram.

A ELETRONORTE pela liberação das informações das análises físico-químico disponibilizados e que serviram como base para a elaboração deste trabalho.

A Universidade Federal do Pará – UFPA e ao laboratório NCA (Núcleo de Ciências Ambientais) pela realização das análises físico-químico que serviram para a validação de dados deste estudo.

A Baia Amaral, o piloto do barco, que teve um papel importante na realização deste trabalho, devido todo o seu conhecimento adquirido aos longos anos em que trabalha na realização do monitoramento hídrico do reservatório da Usina Hidrelétrica de Tucuruí.

Agradeço profundamente ao Programa de Pós Graduação em Ecologia e Recursos Naturais – PPGRN e à Universidade Federal de São Carlos - UFSCar pela oportunidade de realizar e concluir o curso de doutorado. Além de todo o apoio que tive da instituição, agradeço aos professores que contribuíram, das mais diversas formas, para o meu crescimento pessoal, científico e profissional.

Por fim, agradeço a todos, que direta ou indiretamente, possam ter contribuído para a realização e conclusão deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho propõe a criação de um novo modelo de Índice de Estado Trófico (IET) para ambientes de clima tropicais, usando como referência o reservatório da Usina Hidrelétrica de Tucuruí, com base em 14 anos de dados (2003-2016). Para validação analítica desses resultados, foram realizadas 2 coletas em período chuvoso e seco (março/2022 e outubro/2023), aplicando o teste Mann-Whitney em cinco estações de amostragens, com as variáveis P-total, Pig.Total e transparência, bem como o cálculo do IET definido por Lamparelli para demonstrar sua eficiência na determinação trófica no reservatório. As análises estatísticas, foram realizadas em 8 estações de amostragens, distribuídas em todas as áreas do reservatório. As análises ocorreram no período chuvoso e seco e incluíram teste de Shapiro-Wilk para normalidade; teste t de Student para variáveis normais; e Mann-Whitney para variáveis sem normalidade. Relações entre variáveis foram avaliadas por regressão linear simples com transformação logarítmica, verificando a homoscedasticidade e a independência dos resíduos foram realizados pelos testes de Breusch-Pagan e Durbin-Watson. Adotou-se significância de 5%. Também foi aplicada Krigagem Ordinária para interpolação espacial. Os resultados da validação analítica indicaram que as medianas e amplitudes observadas nos dados coletados em 2022 e 2023 estão dentro dos limites históricos para todas as variáveis analisadas. Houve a criação de novo IET' que mais se adequou a realidade do reservatório na utilização das variáveis magnésio e pigmentos totais e a Krigagem ordinária permitiu a interpolação eficiente do novo IET, comprovando, nos diferentes períodos sazonais, uma adequada classificação trófica do reservatório.

Palavras-Chave: magnésio; pigmento reservatório; índice trófico; modelo

ABSTRACT

This study proposes the development of a new Trophic State Index (TSI) model for tropical environments, using the Tucuruí Hydroelectric Power Plant reservoir as a reference point, based on 14 years of data (2003–2016). To provide analytical validation of these results, two sampling campaigns were conducted during the rainy and dry seasons (March 2022 and October 2023). The Mann–Whitney test was applied to five sampling stations using as variables: total phosphorus, total pigments, and water transparency, along with the TSI defined by Lamparelli, to assess its effectiveness in determining the trophic status of the reservoir. Statistical analyses were performed at eight sampling stations distributed across all areas of the reservoir. Analyses covered both rainy and dry seasons and included the Shapiro–Wilk test for normality; Student’s t-test for normally distributed variables; and the Mann–Whitney test for non-normal variables. Relationships between variables were evaluated using simple linear regression with logarithmic transformation, and homoscedasticity and independence of residuals were assessed using the Breusch–Pagan and Durbin–Watson tests. A 5% significance level was adopted. Ordinary Kriging was also employed for spatial interpolation. The results of the analytical validation indicated that the medians and ranges observed in the samples collected in 2022 and 2023 fall within historical limits for all variables analyzed. A new TSI’ was developed, better suited to the reservoir’s conditions through the use of magnesium and total pigments as key variables. Ordinary Kriging enabled effective interpolation of the new index, confirming—across different seasonal periods—an appropriate trophic classification of the reservoir.

Keywords: magnesium; pigment; reservoir; trophic index; model

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Mapa de localização e distribuição das Estações de amostragem no reservatório da UHE Tucuruí.....	28
Figura 2: Mapa de distribuição dos valores de transparência e clorofila no reservatório da UHE Tucuruí durante os 14 anos de análise	37
Figura 3: Gráfico do modelo de normalização (log-log) realizado por Lamparelli nos parâmetros de transparência e pigmentos do reservatório da UHE Tucuruí.....	39
Figura 4. Modelo de normalização (log-log) entre os parâmetros de pigmentos totais e fósforo total.	40
Figura 5: Aplicação de modelo de regressão linear simples com os parâmetros Transparência e Pigmentos Totais na estação C1.....	44
Figura 6: Regressão Linear simples do IET de Lamparelli com o IET proposto para a Estação C1.....	45
Figura 7: Aplicação de modelo de regressão linear simples com os parâmetros Pigmentos Totais e P-Total na estação C1.	46
Figura 8: Modelo de regressão dos parâmetros pigmentos totais e Magnésio	47
Figura 9: Modelo de regressão dos parâmetros transparência e pigmentos totais na Estação C2	48
Figura 10: Relação entre o IET de Lamparelli e o proposto para a Estação C2.....	50
Figura 11: Modelo de regressão dos parâmetros pigmentos totais e P-Total na Estação C2	50
Figura 12: Modelo de regressão dos pigmentos totais e magnésio para a estação C2	52
Figura 13: Modelo de Regressão da transparência e Pigmentos totais na estação M1.	53
Figura 14: Relação entre o IET de Lamparelli e o proposto para a estação M1.....	55
Figura 15: Modelo de Regressão dos pigmentos totais e P-Total na estação de monitoramento M1	55
Figura 16: Modelo de Regressão dos Pigmentos totais e Magnésio na estação M1.	57
Figura 17: Modelo de regressão entre os parâmetros transparência e Pigmento totais na Estação MR	58
Figura 18: Relação do IET de Lamparelli e o IET Proposto para a estação MR.....	59
Figura 19: Modelo de regressão entre os parâmetros Pigmento total e P-Total na Estação MR.....	59

Figura 20: Modelo de regressão entre os parâmetros Pigmento total e Magnésio na Estação MR.....	61
Figura 21: Modelo de Regressão da transparência e pigmentos totais na estação MP	62
Figura 22: Relação entre o IET de Lamparelli e o modelo de IET proposto para estação MP.	63
Figura 23: Modelo de Regressão da pigmentos totais e fósforo total na estação MP ...	64
Figura 24: Modelo de Regressão dos parâmetros pigmentos totais e magnésio na estação MP.....	65
Figura 25: Modelo de regressão da transparência e Pigmentos totais na estação MB.	66
Figura 26: Relação do IET Lamparelli e o proposto na Estação MB.....	67
Figura 27: Modelo de regressão dos pigmentos totais e P-Total na Estação MB	67
Figura 28: Modelo de regressão dos pigmentos totais e magnésio na estação MB.	69
Figura 29: Modelo de regressão dos parâmetros transparência e pigmentos totais na estação MI	70
Figura 30: Modelo IET Lamparelli e o IET proposto para a Estação de amostragem MI.	71
Figura 31: Modelo de regressão dos parâmetros pigmentos totais e P-Total na estação MI.....	72
Figura 32: Modelo de regressão entre os parâmetros pigmentos totais e magnésio na estação de amostragem MI.....	73
Figura 33: Modelo de regressão dos parâmetros transparência e pigmentos totais na estação de amostragem M5	75
Figura 34: Relação entre IET Lamparelli e Proposto na estação M5	76
Figura 35: Modelo de regressão dos parâmetros pigmentos totais e P-Total na estação de amostragem M5.....	76
Figura 36: Modelo de regressão dos parâmetros pigmentos totais e magnésio na estação de amostragem no M5	78
Figura 37: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação C1 para o IET _ P- Total de Lamparelli.....	80
Figura 38: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação C1 para o IET _ CL de Lamparelli.....	81
Figura 39: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação C1 para o IET _ S de Lamparelli.....	81
Figura 40: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação C1 para o IET _ PIG. (IET Proposto).....	82

Figura 41: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação C1 para o IET _ MG. (IET Proposto).....	83
Figura 42: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação C2 para o IET _ P- Total de Lamparelli.....	84
Figura 43: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação C2 para o IET _ CL de Lamparelli.....	85
Figura 44: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação C2 para o IET _ S de Lamparelli.....	86
Figura 45: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação C2 para o IET _ PIG. (Índice proposto).....	86
Figura 46: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação C2 para o IET _ MG. (Índice proposto).....	87
Figura 47: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação M1 para o IET _ FT de Lamparelli.....	88
Figura 48: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação M1 para o IET _ CL de Lamparelli.....	89
Figura 49: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação M1 para o IET _ S de Lamparelli.....	89
Figura 50: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação M1 para o IET _ PIG. (índice proposto).....	90
Figura 51: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação M1 para o IET _ MG. (índice proposto).....	90
Figura 52: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MR para o IET _ P- Total de Lamparelli.....	92
Figura 53: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MR para o IET _ CL de Lamparelli.....	92
Figura 54: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MR para o IET _ S de Lamparelli.....	93
Figura 55: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MR para o IET _ PIG. (índice proposto).....	93
Figura 56: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MR para o IET _ MG. (índice proposto).....	94
Figura 57: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MP para o IET _ P- Total de Lamparelli.....	96
Figura 58: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MP para o IET _ CL de Lamparelli.....	96

Figura 59: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MP para o IET _ S de Lamparelli.....	97
Figura 60: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MP para o IET _ FIG. (índice proposto)	97
Figura 61: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MP para o IET _ MG. (índice proposto)	98
Figura 62: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MB para o IET _ P- Total de Lamparelli.....	99
Figura 63: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MB para o IET _ CL de Lamparelli.....	100
Figura 64: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MB para o IET _ S de Lamparelli.....	100
Figura 65: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MB para o IET _ FIG. (índice proposto)	101
Figura 66: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MB para o IET _ MG. (índice proposto)	101
Figura 67: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MI para o IET _ P- Total de Lamparelli.....	102
Figura 68: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MI para o IET _ CL de Lamparelli.....	103
Figura 69: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MI para o IET _ S de Lamparelli.....	103
Figura 70: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MI para o IET _ FIG (índice proposto)	104
Figura 71: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MI para o IET _ MG. (índice proposto)	104
Figura 72: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação M5 para o IET _ P- Total de Lamparelli.....	106
Figura 73: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação M5 para o IET _ CL de Lamparelli.....	107
Figura 74: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MI para o IET _ S de Lamparelli.....	107
Figura 75: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MI para o IET _ FIG (índice proposto)	108
Figura 76: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MJV para o IET _ MG. (índice proposto)	108

Figura 77: Mapa de predição do IET(CL) de Lamparelli para o período seco (a) e chuvoso (b).....	110
Figura 78: Mapa de predição do IET proposto para pigmentos totais para o período seco (a) e chuvoso (b).....	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estações de amostragem a montante da barragem da UHE Tucuruí.....	27
Tabela 2: Resultados do Teste de Mann-Whitney	34
Tabela 3: IET e equivalência com medidas de fósforo total (P - Total), clorofila a(CL) e transparência(S)	79
Tabela 4: Distinção por cor dos diferentes níveis tróficos	79
Tabela 5: Resultado dos cálculos dos IET de Lamparelli e do IET proposto para a estação de monitoramento C1 e classificação do seu nível trófico	80
Tabela 6: Resultado dos cálculos dos IET de Lamparelli e do IET proposto para a estação de monitoramento C2 e classificação do seu nível trófico	83
Tabela 7: Resultado dos cálculos dos IET de Lamparelli e do IET proposto para a estação de monitoramento M1 e classificação do seu nível trófico	87
Tabela 8: Resultado dos cálculos dos IET de Lamparelli e do IET proposto para a estação de monitoramento MR e classificação do seu nível trófico	91
Tabela 9: Resultado dos cálculos dos IET de Lamparelli e do IET proposto para a estação de monitoramento MP e classificação do seu nível trófico	95
Tabela 10: Resultado dos cálculos dos IET de Lamparelli e do IET proposto para a estação de monitoramento MB e classificação do seu nível trófico	98
Tabela 11: Resultado dos cálculos dos IET de Lamparelli e do IET proposto para a estação de monitoramento MI e classificação do seu nível trófico	102
Tabela 12: Resultado dos cálculos dos IET de Lamparelli e do IET proposto para a estação de monitoramento M5 e classificação do seu nível trófico	105

LISTA DE SIGLAS

$\mu\text{g.L}^{-1}$ - micrograma por litro

β_0, γ_0 e δ_0 : coeficientes lineares

β_1, γ_1 e δ_1 : são coeficientes angulares

ATP - trifosfato de adenosina

BP - Breusch-Pagan

C1 – Caraipé 1

C2 Caraipé 2

C – Carbono

COD – Carbono Orgânico Dissolvido

CO_2 – Gás Carbônico

CL – concentração de clorofila em expresso

DW - Durbin-Watson

EDTA - ácido etilenodiaminotetra-acético

IET – ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO

IET_{Mg}: IET com base na concentração de magnésio

IET_{Pig_totais}: IET com base na concentração total de pigmentos

IET_{PT}: IET com base na concentração de fósforo total

Km – Kilometros

Km^2 - Kilometro quadrado

ln – Logarítimo natural;

m^3 - metro cúbico

M1 - Montante 1

M3 - Montante 3

M5 - Montante 5

Mg^{2+} – íon Magnésio

MI - Montante Ipixuna

MJV - Montante Jacundá Velho

ML - Montante Lontra

MB - Montante Belalto

MBB - Montante Breu Branco

MP - Montante Pucuruí

MR - Montante Repartimento

MW – Mega Whats

N – NITROGÊNIO

NADPH - molécula que transporta energia e elétrons

P – FÓFORO

PGA – fosfoglicerato

Pig-Total – Concentração de Pigmentos Totais

PT – concentração de fósforo total,expresso

RuBisCO - ribulose 1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase

RuBP - ribulose-1,5-bisfosfato

S – Transparência

Si – Sílica

SW - Shapiro-Wilk

UGRHs Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado

UHE – Usina Hidrelétrica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
3. OBJETIVOS	19
3.1 GERAL	19
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
4. REFERENCIAL TEÓRICO	20
4.1 RESERVATÓRIOS	20
4.2 EUTROFIZAÇÃO	21
4.3 MUDANÇAS CLIMÁTICAS	23
4.4 ÍON MAGNÉSIO COMO INDICADOR DE EUTROFIZAÇÃO	25
4.5 MODELAGEM	26
5. METODOLOGIA	27
5.1 ÁREA DE ESTUDO	27
4.1 ANÁLISES LABORATORIAIS	29
4.1.1 Pigmento	29
4.1.2 Fósforo Total	29
4.1.3 Magnésio	29
4.1.4 Transparência	30
4.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA	30
4.3 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA	30
4.4 DESENVOLVIMENTO DO NOVO MODELO DE EUTROFIZAÇÃO COM AS VARIÁVEIS AMBIENTAIS E PERÍODO SAZONAL	31
4.4.1 Índice de Estado Trófico de Lamparelli	31
4.5 COLETA DADOS EM CAMPO PARA A VALIDAÇÃO ANALÍTICA DA AMOSTRAGEM E DOS RESULTADOS ANALÍTICOS	32
5.1 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS COLETADOS E ANALISADOS EM UM PERÍODO DE 14 ANOS	33
5.3.1 Área Lacustre	43
5.3.1.1 Estação C1	43
5.3.1.2 Estação C2	48
5.3.2 Área Intermediária	57
5.3.2.1 Estação MR	57
5.3.2.2 Estação MP	62
5.3.2.3 Estação MB	65
5.3.3 Área Lótica	70

5.3.3.1	Estação M1.....	70
5.3.3.2	Estação M5.....	74
5.4	COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE IET DE LAMPARELLI E OS NOVOS IET'S PROPOSTOS.....	78
5.4.3	Estação MP.....	94
5.4.4	Estação MB.....	98
5.4.6	Estação M5.....	105
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA		114

1. INTRODUÇÃO

A construção de reservatórios na Amazônia, teve início na década de 1960, quando o governo brasileiro, como um mecanismo para melhorar o desenvolvimento regional da infraestrutura e estimular a economia, seguiu a tendência de vários países em desenvolvimento, tendo assim como pioneiro o reservatório de Curuá-Una que tem um pequeno volume de água e uma pequena usina de energia (JUNK et al., 1981).

Nos vinte anos seguintes, várias grandes usinas de energia foram construídas com grandes áreas de inundação, tais como Tucuruí, Balbina e Samuel. A construção desses grandes ecossistemas artificiais na Amazônia afetou os ecossistemas naturais das regiões e produz muitos impactos bem descritos e discutidos por Fearnside (2001,2013).

A eutrofização pode ser entendida como o enriquecimento de ecossistemas aquáticos por nutrientes, notadamente nitrogênio e fósforo, resultando no crescimento excessivo e rápido de algas, especialmente cianobactérias e macrófitas (VOLLENVEIDER, 1968). Em reservatórios, a eutrofização é um dos problemas que vem sendo tratado ao longo dos anos por diversos autores, os quais desenvolveram um sistema métrico para uma avaliação quantitativa Índice de Estado Trófico - IET (Carlson 1977).

As fontes de entrada de nutrientes para os ecossistemas aquáticos de água doce podem ser difusas ou pontuais, como a descarga de águas residuais. No entanto, para os reservatórios amazônicos, a principal fonte de eutrofização é a carga interna, que é a matéria orgânica da vegetação submersa. Como não é possível remover completamente a vegetação da área a ser inundada, o restante da matéria orgânica causará eutrofização e um volume muito grande de água anóxica na profundidade do reservatório. (TUNDISI & MATSUMURA-TUNDISI, 2022).

Carlson, Toledo e Lamparelli elaboraram modelos de Índices de Estados Tróficos (IET's) para reservatórios, que são utilizados no Brasil, como pode ser evidenciado nos trabalhos de Farange et al (2009), Lin et al. (2020), DuKa et al. (2021). Entretanto é perceptível que tais modelos não se adequam para todos os tipos de ambientes.

O ajuste no IET definido por Carlson (1977), realizada por autores como Toledo et al (1990) e Lamparelli (2004) deveu-se a inadequação do modelo às características limnológicas dos corpos hídricos brasileiros que de acordo com Tundisi

e Matsumura-Tundisi (2008) apresentam temperaturas mais elevadas, ciclos biológicos mais intensos e maior produtividade primária.

Korniów (2024) em seu artigo de revisão, identificou que com o tempo, alguns autores como Lindeman (1942), Hutchinson (1969) e Lee (1972) mostraram que o fósforo e nitrogênio não são os únicos elementos com potencial papel no processo de eutrofização, inserindo elementos como carbono (C), ferro (Fe), molibdênio (Mo), magnésio (Mg) e sódio (Na) sendo que a Academia Nacional de Ciências (1969) e Likens (1972) ainda descreveram o papel dos hormônios de crescimento, vitaminas e aminoácidos neste processo.

A diminuição da qualidade hídrica torna-se um desafio crítico à saúde humana, que devem ser agravadas pelas mudanças (DEUS & MATOS, 2024), especialmente em decorrência de diversas ameaças como, por exemplo, as alterações no fluxo de água, a invasão de espécies alóctones, a poluição da água, a superexploração e a destruição de habitats (FORIO & GOETHALS, 2020).

Neste contexto, o presente trabalho propõe a criação de um novo modelo de IET para ambientes de clima tropical, em um reservatório de geração de energia, usando como base o reservatório da Usina Hidrelétrica de Tucuruí (UHE – Tucuruí), através da realização de análises estatísticas buscando uma classificação mais eficaz, realizando uma comparação com o IET elaborado por Lamparelli (2004) e por fim, determinando o presente grau de eutrofização do reservatório.

2. HIPÓTESE

- Os índices publicados até hoje se aplicam, ou não, a reservatórios de clima tropical;
- No reservatório da UHE Tucuruí a concentração de magnésio na água apresenta, ou não, correlação significativa com o estado trófico de corpos d'água.

3. OBJETIVOS

3.1 GERAL

Desenvolver modelo matemático da eutrofização do reservatório de Tucuruí com validação de dados coletados em um período de 14 anos (2003 a 2016).

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Validar resultados coletados e analisados em um período de 14 anos através do uso do teste de Mann-Whitney.
- Desenvolver modelo matemático da eutrofização com as variáveis ambientais e período sazonal;
- Coletar dados em campo para a validação analítica da amostragem e dos resultados analíticos;
- Realizar o cálculo do IET definido por Lamparelli para demonstrar sua eficiência para determinação trófica em um reservatório de clima tropical.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 RESERVATÓRIOS

Considera-se um reservatório um ecossistema artificial definido por sua localização geográfica, por seu espaço multidimensional, por parâmetros relacionados a sua operação e as suas características de construção (TUNDISI E MATSUMURA-TUNDISI, 2022).

Já Fang et al. (2011) consideram reservatório ou represas artificiais alterações de um corpo hídrico, oriundo normalmente por um barramento dando origem a lagos construídos pelo homem e Castro e Fabríz (1995) definem um reservatório como formação artificial de lagos ou uma construção originária de um barramento artificial de um vale natural.

Lehner et al. (2011), a partir da análise do banco de dados Global Reservoir and Dam (GRanD), até o início do ano de 2011, destacaram que existe um armazenamento de 6.197 km³ de água a partir de informações de 6.862 represas e seus reservatórios associados.

No sistema elétrico, os reservatórios de usinas hidrelétricas, podem ter a funcionalidade de reduzir a sazonalidade do fluxo do rio, armazenamento de água, e

a geração de energia elétrica a jusante, além de ser utilizada também para o controle de enchentes, transporte fluvial, para a agricultura e para o lazer (CASTRO et al., 2018).

Ecologicamente reservatórios apresentam mecanismos de funcionamento específicos, são lagos que passaram pela transição de rios (TUNDISI, 1985)

De acordo com Ayrimoraes et al. (2019) no Brasil, a partir de 1950 se intensificou a evolução da reserva hídrica, tendo como maior representatividade o quantitativo de reservatórios para o setor elétrico em relação a capacidade total de armazenamento, apresentando 92,7% em relação a capacidade total de 620,4 bilhões de m³ encontrados no país.

Tundisi & Matsumura -Tundisi (2008), enfatizam que as represas artificiais são de grande importância estratégica, e que esses ecossistemas aquáticos representam a base limnológica teórica, e ecológica sendo utilizados de diversas formas e interferindo na qualidade da água, nos mecanismos de funcionamento e na sucessão das comunidades aquáticas.

As bacias hidrográficas onde se encontram os reservatórios superficiais apresentam uma grande interação de natureza ecológica, econômica e social sendo consideradas sistemas complexos, onde é necessária uma abordagem integrada para a experimentação, observação e mensuração desses ambientes, os quais também se constituem de diversos subsistemas e componentes que se relacionam e variam no espaço e no tempo (TUNDISI & MATSUMURA-TUNDISI, 2008).

Ao longo dos anos, diversos autores salientam que, como consequência das alterações naturais do fluxo de um rio, com o propósito de regular o fluxo e armazenar a água para diversos fins, ocorrem alterações das áreas e alteração gradativa do ecossistema aquático com a mudança do fluxo o qual passa do estado lótico para lântico, o que proporciona uma drástica alteração na oxigenação local e um aumento da concentração de nutrientes, oportunizando assim, o processo de eutrofização nesses reservatórios artificiais (TUNDISI, 2008 ;PEREIRA ET AL., 2013; SOARES ET AL., 2012; SMITTENBERG ET AL., 2004; CUNHA, 2013; MAMUN & AN, 2020; MAMUN ET AL., 2021).

4.2 EUTROFIZAÇÃO

Vinçon-Leite e Casenave (2018) realizaram um levantamento histórico e identificaram que foi apenas no ano de 1960 que ocorreram os primeiros casos de eutrofização principalmente em corpos hídricos situados em países industrializados e em lagos de abastecimento.

A eutrofização pode ser definida em diferentes graus de trofia dos corpos de água, através da análise do enriquecimento de nutrientes, podendo ocorrer de forma natural ou induzida pelo homem (LAMPARELLI, 2004; SCHÄFER, 1985).

A eutrofização, é um fenômeno que comumente causa degradação de ecossistemas aquáticos de água doce, induz o aumento na proliferação de fitoplâncton e a perda da sua função e da integridade do ecossistema do lago (LUND, 1967, HUISMAN ET AL., 2018; ZHANG ET AL., 2023.)

Até os dias atuais, a definição de eutrofização permanece a mesma por diversos autores em seus estudos limnológicos tratando-se da influência direta através do incremento de nutrientes (principalmente fósforo e nitrogênio) em lagos e reservatórios, de forma natural ou antrópica (Carlson, 1977; Toledo, 1990; Lamparelli, 2004; Sorrel et al., 2006; Cunha, 2013 e Zhang et al., 2023) dentre outros.

É importante salientar que enriquecimento do fósforo (P) e do nitrogênio (N) pode ser originário por fatores locais, como as características hidrogeológicas do sistema aquático, da hidrologia e do uso do solo da bacia de drenagem, além da limitação de luz e dos padrões de herbivoria (ESTEVEES & PANOSSO, 2011).

De acordo com a World Health Organization Regional Office for Europe (2002), algumas atividades, apesar da sua especificidade, também devem ser observadas por auxiliarem no processo de eutrofização tais como a aquicultura, devido à introdução ao meio do alimento dos animais e por seus excrementos; o transporte de espécies exóticas que podem ser transferidas de uma área endêmica e contaminar outras áreas; e reservatórios em terras áridas onde o enriquecimento de nutrientes ocorre devido aos processos erosivos.

Tundisi (2008) também afirma que a erosão por chuvas, está diretamente ligada à contribuição continuada e lenta dos nutrientes P e N, além da contribuição derivada da adição de material biológico e dos efeitos do vento.

O fósforo, juntamente com o nitrogênio, na maioria das águas continentais em regiões temperadas, tropicais e subtropicais, podem regular a produtividade primária aquática (ESTEVEES & PANOSSO, 2011) assim como a sílica (Si), que é o principal

nutriente para o desenvolvimento das diatomáceas (WORLD HEALTH ORGANIZATION REGIONAL OFFICE FOR EUROPE, 2002)

Diversos são os indicadores de eutrofização. No mundo inteiro inúmeros limnologistas consideram as manifestações, o direcionamento e o controle dos fatores da eutrofização (MORGANE ET AL., 2019; ZHANG ET AL, 2023).

Carlson (1977) foi o pioneiro a utilizar alguns desses indicadores, sendo eles Clorofila (Chl *a*), profundidade do Disco de Secchi e concentração de fósforo total (PT) e criando o Índice de Estado Trófico (IET). Posteriormente, outros limnologistas como Lamparelli (2004) e Cunha (2013), propuseram melhorias e criaram novos IET's para realizar um melhor enquadramento do estado de eutrofização de reservatórios em diferentes localidades.

Entretanto, até hoje, os IET's criados não atendem reservatórios em diferentes localidades e clima, existindo, desta forma a necessidade na melhoria do algoritmo de inversão para o monitoramento da eutrofização em lagos e reservatórios, conforme salientado por Zhang et al. (2023) e Hu et al. (2021).

Além do aporte de nutrientes para o os reservatórios, diversos autores destacam que uma das principais ameaças para os ecossistemas aquáticos, são as mudanças climáticas, que trazem uma série de consequências, tais como alterações diretas da temperatura da água de superfície, do seu nível e mudanças diretas e indiretas na ecologia dos ecossistemas, que provocam alteração das interações tróficas do meio (BLENCKNER, 2005; HAYHOE ET AL., 2008; SMOL E DOUGLAS, 2007; O'REILLY ET AL., 2015; WINDER E SCHINDLER 2004, HAYES ET AL., 2017).

4.3 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

As mudanças climáticas globais, vêm trazendo diversos efeitos sobre as comunidades de algas e cianobactérias (FONSECA, 2012), em diversos ecossistemas aquáticos, sendo os oceanos os mais sensíveis à mudança do clima (BEARDALL et al., 2009 e FONSECA, 2012).

A maior parte da região amazônica, possui um clima tropical, de acordo com a classificação de Koppen, sendo que 51% da região apresenta um clima sem estação de seca severa ou tropical monçônico e 45% com clima tropical com inverno seco (ALVARES et al., 2013; MARENCO et al., 2014).

Entretanto, devido aos impactos oriundos da mudança no clima, a distribuição de extremos climáticos vem se alterando, tais como inundações e secas e o aumento da temperatura, que de acordo com Lewis et al., 2009 e Marengo et al., 2014, vem aumentando cerca de 0,026°C por ano além do aumento de 1,66 ppm na concentração de CO₂ na região amazônica.

Van de Waal et al. (2010), averiguou os potenciais impactos relacionados à mudança do clima com a disponibilidade de nutrientes e de C em ecossistemas aquáticos, ocasionando implicações no funcionamento das teias alimentares aquática e trazendo consequências para a estequiometria C:N:P.

Em muitos ecossistemas de água doce, estuário e alguns ambientes costeiros, o quantitativo de carbono inserido é oriundo dos ecossistemas terrestres (SOBEK ET AL., 2005; VAN DE WAAL ET AL., 2010), principalmente na forma de carbono orgânico dissolvido (COD). Como resultado tem-se um desequilíbrio de CO₂ com a atmosfera devido à mineralização realizada pelas atividades bacterianas no COD na água (COLE ET AL., 2007; VAN DE WAAL ET AL., 2010).

Além disso, o aumento da temperatura global com o aumento de CO₂ na atmosfera, pode influenciar diretamente no aumento dos níveis de COD nos ecossistemas de água doce apesar da direção e magnitude variar regionalmente (ZIMOV ET AL., 2006; VAN DE WAAL ET AL., 2010), se e preveem o aumento do quantitativo de chuvas mais intensas e tempestades mais frequentes em várias partes do globo (SOLOMON ET AL., 2007; VAN DE WAAL ET AL., 2010). Além disso, altas concentrações de CO₂ atmosférico auxiliam no aumento do fechamento dos estômatos da vegetação, apresentando como consequência a redução da transpiração das plantas (BETTS ET AL., 2007; VAN DE WAAL ET AL., 2010).

Outra consequência da elevação da temperatura, é o aumento do crescimento de cianobactérias, já que com temperaturas acima de 25°C apresentam uma ótima taxa de crescimento (ROBARTS E ZOHARY, 1987; COLES E JONES, 2001).

Consequentemente apresentam maior eficácia na competição com os produtores primários eucarióticos (dinoflagelados, clorofíceas, diatomáceas e criptofíceas) resultando, desta forma, em níveis ótimos de cianobactérias no local (PAERL & HUISMAN, 2009)

Outra consequência oriunda do aumento da temperatura, resultante da mudança climática é a estratificação vertical dos ecossistemas aquáticos mais

prolongada (PAERL & HUISMAN, 2009). De Stasio et al. (1996) e Peeters et al. (2007) identificaram esse fenômeno em lagos que se encontram em regiões temperadas, onde ocorreu a estratificação mais cedo (primavera) se mantendo no verão, ocorrendo a desestratificação no final do outono.

As cianobactérias, devido à estratificação da coluna d'água, se acumulam na camada superficial, podendo liberar altas quantidades de toxinas, o que pode trazer diversos impactos ao ecossistema aquático, além, apresentarem alta competitividade com os grupos fitoplanctônicos eucarióticos não flutuantes em virtude da sombra que projetam sobre os mesmos provocando a sua supressão (Huisman et al., 2004; Jöhnk et al., 2008)

Desta forma, percebe-se através das afirmações de diversos autores, que o aumento de nutrientes nas águas do reservatório advém de diversos fatores, podendo ocorrer de forma pontual e/ou difusa, artificial e/ou natural, além da interação de outras variáveis, como por exemplo as mudanças climáticas, que afetam diretamente este ecossistema.

4.4 ÍON MAGNÉSIO COMO INDICADOR DE EUTROFIZAÇÃO

A RuBisCO (ribulose 1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase) é a principal atividade catalisadora de entrada da molécula de carbono ao açúcar de cinco carbonos, ribulose-1,5-bisfosfato (RuBP) (Knight et al., 1990; Cleland et al. 1998; Oh et al., 2022). Esta, catalisa assim, a primeira etapa do ciclo de Calvin-Benson, sendo a base de quase todas as cadeias alimentares na biosfera.

O Ciclo de Calvin apresenta 3 estágios, sendo eles a carboxilação, a redução e a fase regenerativa. Na primeira fase, ocorre a carboxilação aceitadora da molécula de CO₂, ribulose-1,5bisfosfato (RuBP) pela enzima ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco) tendo como resultado a formação de 3 – fosfoglicerato (PGA). Na segunda fase, ocorre a produção da triose fosfato através do consumo do ATP e NADPH e por fim, as trioses fosfatos são utilizadas para produzir RuBP (Woodrow and Berry 1988; Geiger and Servaites 1994; TAMOI, et al, 2005).

No ambiente aquático, diversas espécies de fitoplâncton desenvolveram mecanismos para aumentar a concentração de CO₂ (BADGER ET AL., 1998; VAN DE WAAL ET AL., 2019), suprimindo a oxigenação e otimizando a carboxilação (VAN

DE WAAL ET AL., 2019), como dinoflagelados e cianobactérias (BERNER, 2006; VAN DE WAAL ET AL., 2019) que desenvolveram tipos de RuBisCO com preferência por CO₂ em vez de O₂ (WATSON E TABITA 1997; BADGER ET AL. 1998; VAN DE WAAL ET AL., 2019).

Segundo Parry *et al.* (2003) e Oliveira (2024) é na fotossíntese que a enzima RuBisCO proporciona a assimilação de carbono fotossintético, entretanto para seu funcionamento, esta enzima deverá ser submetida a um processo de ativação que envolve a ligação de um íon magnésio (Bhat et al., 2017).

O magnésio, atua na ativação de enzimas, na formação de hormônios e clorofilas, sendo desta forma, um elemento estrutural essencial para plantas por estar envolvido em seu metabolismo fisiológico (Carmo-Silva et al., 2015; Tian et al., 2021 e Oliveira, 2024).

A deficiência deste íon, proporciona diversos prejuízos, dentre elas está a alteração em diversos processos fisiológicos, na formação da clorofila e na fixação do carbono (Oliveira, 2024).

Por este motivo, para o reservatório da UHE Tucuruí, consideramos o íon Magnésio (Mg²⁺) como um indicador de eutrofização, pois, a partir dos dados coletados, foi possível identificar aumento da clorofila em locais onde a disponibilidade do nutriente fósforo diminuiu e o magnésio acompanhou seu comportamento.

4.5 MODELAGEM

Foi no ano de 1970 que se iniciou o uso de modelagens numéricas, como uma ferramenta para o controle da eutrofização, sendo de grande importância para a análise das principais variáveis deste processo (IMBODEN, 1974; VOLLENWEIDER, 1975; VOLLENWEIDER AND KEREKES, 1982; VIÇON-LEITE E CASENAVE, 2018).

Os modelos matemáticos auxiliam na realização de experimentos numéricos, para a projeção da funcionalidade e do impacto que a construção do reservatório pode ocasionar nas mudanças climáticas e locais de um lago eutrofizado, prevem a evolução das variáveis de interesse e permite antecipar as tomadas de decisões. (ELLIOTT E DEFEW, 2012; HASSAN ET AL., 1998; SCHWEFEL ET AL., 2016; VIÇON-LEITE E CASENAVE, 2018).

Os modelos normalmente são separados em duas classes, a primeira mecanística e a segunda empírica (FORNARELLI ET AL., 2013; VIÇON-LEITE E CASENAVE, 2018). Os modelos mecanísticos são baseados no processo de condução do ecossistema (VIÇON-LEITE E CASENAVE, 2018) e a sua desvantagem é que não engloba os processos biológicos (SIMONSEN E DAHL-MADSEN, 1978), e os modelos empíricos requerem um pequeno conhecimento sobre o ecossistema e apresentam como vantagem boas previsões para um grupo de lagos, apresentando cálculos simples, sendo assim um modelo genérico. A desvantagem é que em lagos individuais, este modelo apresenta grande incerteza.

Para o reservatório de Tucuruí, por toda sua extensão e características, fez o uso de uma modelagem mecanicista, pela diversidade de variáveis que podem influenciar diretamente nesse ecossistema.

5. METODOLOGIA

5.1 ÁREA DE ESTUDO

A UHE de Tucuruí é localizada a 350 Km, em linha reta, da capital paraense Belém. Seu reservatório encontra-se na região do baixo Tocantins e apresenta aproximadamente 170 Km de comprimento do município onde a barragem foi instalada, até o município de Itupiranga (SILVA et al., 2016).

O reservatório encontra-se inserido na Bacia hidrográfica do Tocantins-Araguaia (AQUINO, 2009), sob as coordenadas aproximadas 03° 45' Sul na latitude e 49° 41' Oeste (COMISSÃO MUNDIAL DE BARRAGENS, 2000).

O reservatório da UHE Tucuruí possui, 12 estações de amostragem, distribuídas em todo o reservatório a montante da Barragem, quais sejam, Caraipé 1 (C1), Caraipé 2 (C2), Montante 1 (M1), Montante 3 (M3), Montante 5 (M5), Montante Belalto (MB), Montante Breu Branco (MBB), Montante Pucuruí (MP), Montante Repartimento (MR), Montante Ipixuna (MI), Montante Jacundá Velho (MJV) e Montante Lontra (ML), a Tabela 1:

Tabela 1: Estações de amostragem a montante da barragem da UHE Tucuruí

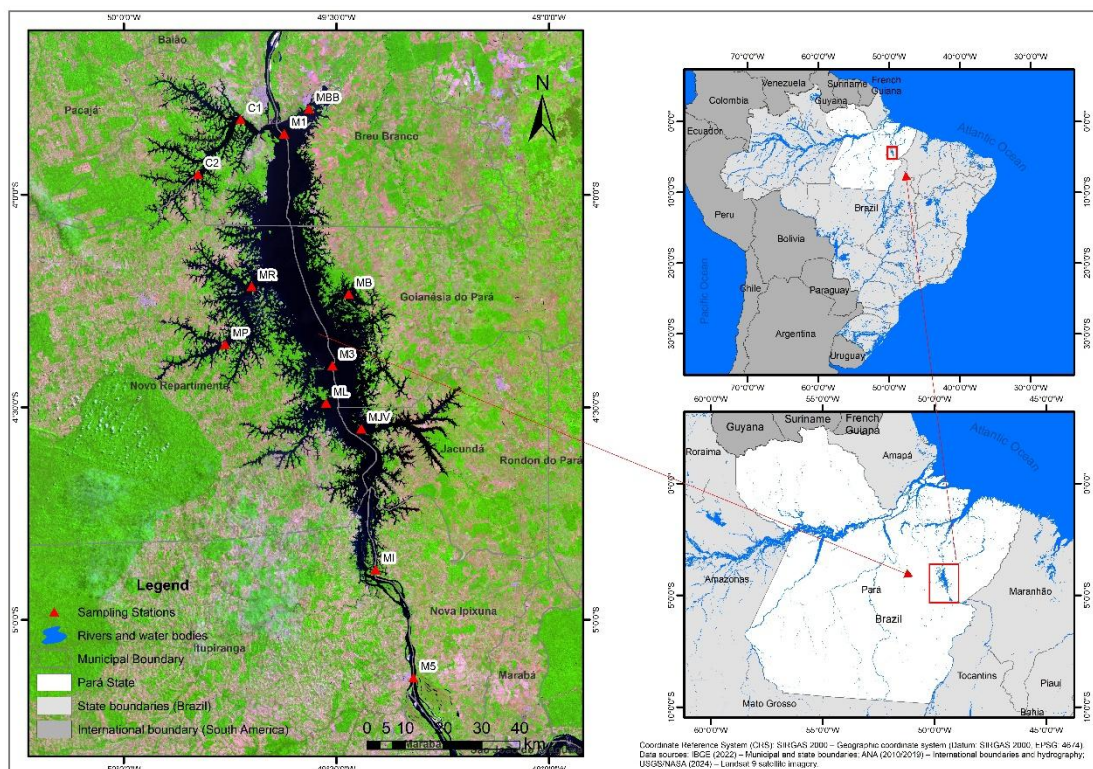
Station Code	Station Name	Coordinates
C1	Caraipé 1	03°50'02.8" e 49°47'57.7"
C2	Caraipé 2	03°57'12.1" e 49°49'31.1"
M1	Montante 1	03°51'38.8" e 49°37'56.6"
M3	Montante 3	04°24'38.5" e 49°30'37.8"

M5	Montante 5 (*)	05°02'44.3" e 49°19'46.8"
MB	Montante Belalto	04°13'57.2" e 49°30'37.8"
MBB	Montante Breu Branco	03°47'17.6" e 49°34'01.4"
MP	Montante Pucuruí	04°13'57.2" e 49°46'08.6"
MR	Montante Repartimento	04°13'16.3" e 49°41'59.6"
MI	Montante Ipixuna	04°52'35.2" e 49°24'31.2"
MJV	Montante Jacundá Velho	04°33'00.5" e 49°26'20.6"
ML	Montante Lontra	04°29'23.9" e 49°31'27.7"

Fonte: Tavares, 2011.

Na Figura 1, encontra-se a localização das estações de amostragem selecionadas para o estudo.

Figura 1: Mapa de localização e distribuição das Estações de amostragem no reservatório da UHE Tucuruí.



Fonte: Oliveira et al, 2025.

O Reservatório da UHE Tucuruí teve início na década de 1970 e, em 22 de novembro de 1984, foi inaugurada a primeira fase de aproveitamento (ELETRONORTE, 2020); apresenta 2430km² de área inundada (Fearnside, 1999), com volume de 50,8 km³, profundidade máxima de 75 m, profundidade média de 17,3 m, tempo de retenção de 50 dias (SANTOS, 2003), número de turbinas com 12 unidades geradoras de 350 MW, 11 unidades

de 390MW e 2 unidades de 22,5 MW (FURTADO, 2013) e energia produzida (MW) de 8370 MW aproximadamente (SANTOS, 2003).

Em cada estação de amostragem, foram levantados os dados de transparência em metros (m), pigmentos totais, fósforo total e magnésio (Mg^{+2}).

A construção da UHE Tucuruí, resultou na criação de ilhas artificiais que com o decorrer dos anos, vem sofrendo mudanças com o uso e ocupação do solo pelas comunidades ribeirinhas (VERAS et al, 2016). Grande partes dessas ilhas são ocupadas e submetidas a ações antrópicas para diferentes funcionalidades, sendo predominante atividades como plantações e pastagens (FERREIRA et al, 2012; ZAMBRANO et al, 2019).

4.1 ANÁLISES LABORATORIAIS

As análises laboratoriais, sedidos pela empresa responsável pela manutenção do reservatório, foram realizadas do ano de 2003 a 2016, totalizando 14 anos de levantamento. Os procedimentos experimentais utilizados pela empresa responsável pela realização das análises laboratoriais dos parâmetros coletados para este estudo foram:

4.1.1 Pigmento

Os pigmentos totais foram analisados conforme a Norma Técnica CETESB L5.306 (CETESB, 2014), com extração em acetona 90% e leitura espectrofotométrica. Foram quantificadas clorofila a e feofitina a, com correção por acidificação. Neste estudo, os pigmentos totais foram estimados pela soma dessas duas frações. Essa abordagem segue autores como Piva-Bertoletti (2001), que a utilizam como indicadora da biomassa algal.

4.1.2 Fósforo Total

O fósforo total foi analisado pelo método do ácido ascórbico (4500-P E). As amostras foram digeridas com ácido sulfúrico e persulfato de potássio para conversão do fósforo em ortofosfato. Após digestão, foi adicionado molibdato de amônio e tartarato de potássio e antimônio em meio ácido. Formou-se ácido fosfomolibdico, que foi reduzido a azul de molibdênio pelo ácido ascórbico. A intensidade da coloração foi usada para quantificação espectrofotométrica (APHA, 2017).

4.1.3 Magnésio

O magnésio foi obtido por cálculo indireto com base na diferença entre a dureza total e a dureza de cálcio, conforme o método 2340 C. A dureza total foi medida por titulação com EDTA, e o cálcio, determinado separadamente, também por titulação. A concentração de magnésio foi obtida subtraindo-se o cálcio da dureza total. O valor resultante, expresso como mg/L de CaCO₃, é então convertido em mg/L de magnésio utilizando o fator de correção 0,243 (APHA, 2017).

4.1.4 Transparência

Utilizou-se o disco de Secchi para determinar a profundidade de penetração da luz na coluna d'água (CETESB, 2023).

4.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R, versão 4.4.3 (R Core Team, 2025), com o auxílio dos pacotes tidyverse e ggplot2. Inicialmente, a normalidade dos dados foi avaliada por meio do teste de Shapiro-Wilk (RIFFENBURGH, 2006). Para as variáveis que apresentaram distribuição normal, utilizaram-se comparações com o teste t de Student; quando a normalidade não foi observada, aplicou-se o teste não paramétrico de Mann-Whitney. Para investigar a relação entre a concentração das variáveis, foi ajustado um modelo de regressão linear simples, considerando a transformação logarítmica das variáveis. As suposições do modelo foram avaliadas por meio dos testes de Breusch-Pagan, para verificação da homocedasticidade dos resíduos, e de Durbin-Watson, para investigar a independência dos resíduos. Em todas as análises, adotou-se um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$).

Tais análises foram essenciais na compreensão da distribuição dos dados, realizar a investigação das relações entre variáveis.

4.3 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

Foi aplicada a técnica de Krigagem Ordinária, amplamente utilizada em análises geoestatística (Hengl, 2009), com abordagem estocástica validada pelo método Leave-One-Out Cross Validation (LOOCV). O modelo foi desenvolvido e executado por meio do ambiente estatístico R. A modelagem geoestatística foi conduzida em três etapas principais. Inicialmente, realizou-se a análise variográfica para caracterizar a dependência espacial dos dados. Em seguida, aplicou-se a análise inferencial para interpolar valores em locais não

amostrados. Posteriormente, efetuou-se a simulação estocástica, que gerou cenários equiprováveis do fenômeno (DEUTSCH; GOOVAERTS, 1997).

A análise geostatística deveu-se ao fato de que a localização das estações de amostragem, influência no valor dos Índices de Estados Tróficos (IET), podendo assim a observação geográfica dos graus de trófia no local.

4.4 DESENVOLVIMENTO DO NOVO MODELO DE EUTROFIZAÇÃO COM AS VARIÁVEIS AMBIENTAIS E PERÍODO SAZONAL

Para a proposição de um novo modelo de Índice de Estado Trófico (IET), foi adotado o raciocínio metodológico de Lamparelli (2004), aplicado individualmente a cada estação de amostragem do reservatório da UHE Tucuruí. Essa adaptação justifica-se pelas particularidades limnológicas do sistema, como o tempo médio de retenção da água, de aproximadamente 51 dias, sendo que algumas regiões, como o braço do Caraipé, apresentam tempos de retenção significativamente mais longos (FEARNSIDE, 2015), alterando a qualidade da água (STRASKTABA E TUNDISI, 2013), favorecendo afloração de algas (BICUDO, 2009).

Inicialmente, adotou-se o modelo de Carlson (1977) com base para a transparência da água, a partir do qual foi desenvolvida uma regressão log-log entre a transparência e os pigmentos totais. Essa relação foi então incorporada à equação original de Carlson (1977), resultando em um Índice de Estado Trófico (IET) fundamentado nos pigmentos totais. O modelo foi calibrado utilizando dados empíricos do banco da Eletronorte, assegurando sua representatividade frente às características limnológicas específicas do reservatório. Em uma etapa subsequente, estabeleceu-se uma relação entre fósforo total e pigmentos totais, a qual foi integrada ao modelo para cálculo do IET com base no fósforo. Por fim, propôs-se o desenvolvimento de um modelo adicional entre magnésio e pigmentos totais, como alternativa ao uso exclusivo da clorofila-*a* na estimativa do IET.

Os modelos propostos neste estudo foram avaliados com base nos pressupostos estatísticos aplicáveis à regressão linear, utilizando o método dos mínimos quadrados ordinários (MMQO).

4.4.1 Índice de Estado Trófico de Lamparelli

Lamparelli (2004), utilizou os parâmetros fósforo total e clorofila para determinar o estado trófico de ambientes aquáticos realizando uma distinção metodológica entre reservatórios e rios.

Lamparelli (2004) fez a diferença entre reservatórios e rios, estabelecendo as seguintes equações para reservatórios:

$$\text{IET(PT)} = 10 \left(6 - \frac{1,77 - 0,42 \ln(P)}{\ln 2} \right) \quad \text{Eq. 1}$$

$$\text{IET (CL)} = 10 \left(6 - \frac{0,92 - 0,34 \ln(CL)}{\ln 2} \right) \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

PT – concentração de fósforo total, expresso em $\mu\text{g.L}^{-1}$ (micrograma por litro)

ln – Logaritmo natural;

CL – concentração de clorofila em expresso em $\mu\text{g.L}^{-1}$ (micrograma por litro), e

S - Transparência

A partir dos resultados obtidos, foi realizado a comparação do cálculo do IET definido por Lamparelli no ano de 2004, com o novo IET criado com o propósito de se verificar a melhor aplicabilidade para um reservatório de clima tropical para a geração de energia.

Foi realizado a aplicação do modelo de Lamparelli nos dados do reservatório da UHE Tucuruí, onde foi perceptível a não consistência da aplicação deste modelo nos dados em cada estação de amostragem.

Com isto, foi desenvolvido, com nova base de dados, novos modelos tróficos por estação de amostragem, utilizando o mesmo método utilizado por Lamparelli, além disto, foi desenvolvido um novo modelo utilizando o magnésio como alternativa ao fósforo em cada estação de amostragem.

Também será comparado as Classificação trófica entre o IET definido por Lamparelli e os novos índices propostos.

Para isto, seguindo o pressuposto por Thorton et al. (1990), as estações de amostragem do reservatório da UHE Tucuruí foram agrupadas em três regiões: lacustre (C1, C2, M1 e MBB), intermediária (MR, MP, MB, M3, ML e MJV) e lótica (MI e M5). Para a validação dos dados, foram utilizadas as estações de amostragem C1, C2 e M1 na região lacustre; MR, MP e MB na região intermediária; e MI e M5 na região lótica devido a quantidade da disponibilidade dos registros necessários para garantir a robustez estatísticas das análises.

4.5 COLETA DADOS EM CAMPO PARA A VALIDAÇÃO ANALÍTICA DA AMOSTRAGEM E DOS RESULTADOS ANALÍTICOS

Para a validação das metodologias analíticas, foram realizadas viagens de campo para avaliar os parâmetros estudados, sendo uma em março de 2022, correspondendo o período chuvoso, e outra outubro de 2023, correspondendo ao período seco.

A comparação entre os dados de validação e a série histórica foi realizada com base em observações da camada superficial, considerando quatro variáveis: Transparência, Pigmentos Totais, Fósforo Total e Magnésio.

A série histórica abrange o período de outubro de 2005 a dezembro de 2016, enquanto os dados de validação correspondem a coletas realizadas nos anos de 2022 e 2023.

A análise estatística foi conduzida por ponto de amostragem, permitindo identificar variações localizadas no tempo em cada estação de amostragem.

O método utilizado para a validação foi o teste de Mann-Whitney, que trata-se de um teste não paramétrico utilizando as estações C1, C2, MBB e M1 e MR.;

5 RESULTADO E DISCUSSÃO

5.1 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS COLETADOS E ANALISADOS EM UM PERÍODO DE 14 ANOS

A comparação entre os dados de validação e a série histórica foi realizada com base em observações da camada superficial, considerando quatro variáveis: Transparência (Transp.), Pigmentos Totais (Pig-Total), Fósforo Total (P-Total) e Magnésio (Mg^{2+}).

A série histórica abrange o período de outubro de 2005 a dezembro de 2016, enquanto os dados de validação correspondem a coletas realizadas nos anos de 2022 e 2023.

Os resultados do teste de Mann-Whitney indicaram que, para os cinco pontos avaliados (C1, C2, MBB, M1 e MR), houve diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$) entre os valores recentes e os registros históricos apenas para C2. Complementarmente, os resultados estatísticos por ponto revelaram que as medianas e amplitudes observadas nos dados atuais estão dentro dos limites históricos para

todas as variáveis analisadas. Esses achados sugerem manutenção da qualidade da água nos pontos analisados, ao menos sob as condições atuais de amostragem.

No entanto, é importante destacar que os dados recentes representam um número reduzido de observações e, portanto, devem ser interpretados com cautela frente à variabilidade de longo prazo. A tabela abaixo mostra o resumo estatístico.

Tabela 2: Resultados do Teste de Mann-Whitney

Grupo	Ponto	Variável	Amplitude	Desvio Padrão	Mediana	Máximo	Média	Mínimo	p-valor	Interpretação
Série histórica	C1	Mg ²⁺	2,04	0,62	1,80	2,79	1,81	0,75	0,1944	Não significativo
Série histórica	C1	P_Total	37,38	8,92	12,83	41,82	15,47	4,44	0,7478	Não significativo
Série histórica	C1	Pig_Total	32,81	7,50	6,66	34,48	8,29	1,67	0,4580	Não significativo
Série histórica	C1	Transp.	1,70	0,51	2,50	3,40	2,54	1,70	0,2627	Não significativo
Série histórica	C2	Mg ²⁺	2,35	0,65	1,48	3,42	1,77	1,07	0,6987	Não significativo
Série histórica	C2	P_Total	57,24	12,16	19,63	66,11	21,19	8,87	0,0361	Significativo
Série histórica	C2	Pig_Total	56,88	11,42	9,52	58,48	11,99	1,60	0,4003	Não significativo
Série histórica	C2	Transp.	3,40	0,82	2,50	4,20	2,35	0,80	0,2189	Não significativo
Série histórica	M1	Mg ²⁺	1,70	0,44	1,58	2,77	1,64	1,07	0,0658	Não significativo
Série histórica	M1	P_Total	38,96	8,47	17,48	44,31	19,48	5,35	0,9380	Não significativo
Série histórica	M1	Pig_Total	10,47	2,84	3,45	12,14	4,70	1,67	0,7052	Não significativo
Série histórica	M1	Transp.	3,40	1,08	2,00	4,60	2,44	1,20	0,9405	Não significativo
Série histórica	MBB	Mg ²⁺	1,51	0,47	1,56	2,53	1,67	1,02	0,7324	Não significativo
Série histórica	MBB	P_Total	33,18	8,10	18,41	37,15	16,97	3,97	0,5617	Não significativo
Série histórica	MBB	Pig_Total	8,78	1,91	3,81	10,42	4,25	1,64	0,9727	Não significativo
Série histórica	MBB	Transp	2,00	0,61	2,50	3,80	2,65	1,80	0,9182	Não significativo
Série histórica	MR	Mg ²⁺	1,49	0,48	1,60	2,53	1,65	1,04	0,1207	Não significativo
Série histórica	MR	P_Total	28,91	7,10	16,41	34,02	15,89	5,11	0,6475	Não significativo
Série histórica	MR	Pig_Total	12,28	3,07	6,66	14,28	7,12	2,00	0,7945	Não significativo
Série histórica	MR	Transp	1,90	0,40	2,50	4,00	2,56	2,10	0,4092	Não significativo
Validação	C1	Mg ²⁺	1,07	0,52	1,22	2,24	1,46	1,17	0,1944	Não significativo
Validação	C1	P_Total	11,40	5,27	16,23	19,94	15,24	8,54	0,7478	Não significativo

Validação	C1	Pig_Total	2,21	1,19	5,00	5,95	4,92	3,74	0,4580	Não significativo
Validação	C1	Transp	1,40	0,64	2,30	2,60	2,10	1,20	0,2627	Não significativo
Validação	C2	Mg ²⁺	0,82	0,40	1,40	2,18	1,58	1,36	0,6987	Não significativo
Validação	C2	P_Total	10,02	4,56	10,34	17,13	11,23	7,11	0,0361	Significativo
Validação	C2	Pig_Total	9,77	5,44	4,05	13,10	6,83	3,33	0,4003	Não significativo
Validação	C2	Transp	0,70	0,33	2,90	3,20	2,88	2,50	0,2189	Não significativo
Validação	M1	Mg ²⁺	0,61	0,28	1,22	1,48	1,20	0,87	0,0658	Não significativo
Validação	M1	P_Total	30,34	14,13	17,51	38,23	20,29	7,89	0,9380	Não significativo
Validação	M1	Pig_Total	2,46	1,15	4,81	5,08	4,33	2,62	0,7052	Não significativo
Validação	M1	Transp.	3,80	2,02	2,00	5,10	2,80	1,30	0,9405	Não significativo
Validação	MBB	Mg ²⁺	0,58	0,26	1,46	1,94	1,56	1,36	0,7324	Não significativo
Validação	MBB	P_Total	9,79	5,40	14,05	19,31	14,23	9,52	0,5617	Não significativo
Validação	MBB	Pig_Total	4,04	1,81	3,73	6,42	4,07	2,38	0,9727	Não significativo
Validação	MBB	Transp.	3,80	1,66	2,75	5,10	2,98	1,30	0,9182	Não significativo
Validação	MR	Mg ²⁺	0,19	0,08	1,17	1,31	1,19	1,12	0,1207	Não significativo
Validação	MR	P_Total	18,79	9,20	17,14	28,31	18,03	9,52	0,6475	Não significativo
Validação	MR	Pig_Total	14,19	7,81	5,95	18,71	9,73	4,52	0,7945	Não significativo
Validação	MR	Transp.	1,80	0,90	2,20	3,20	2,27	1,40	0,4092	Não significativo

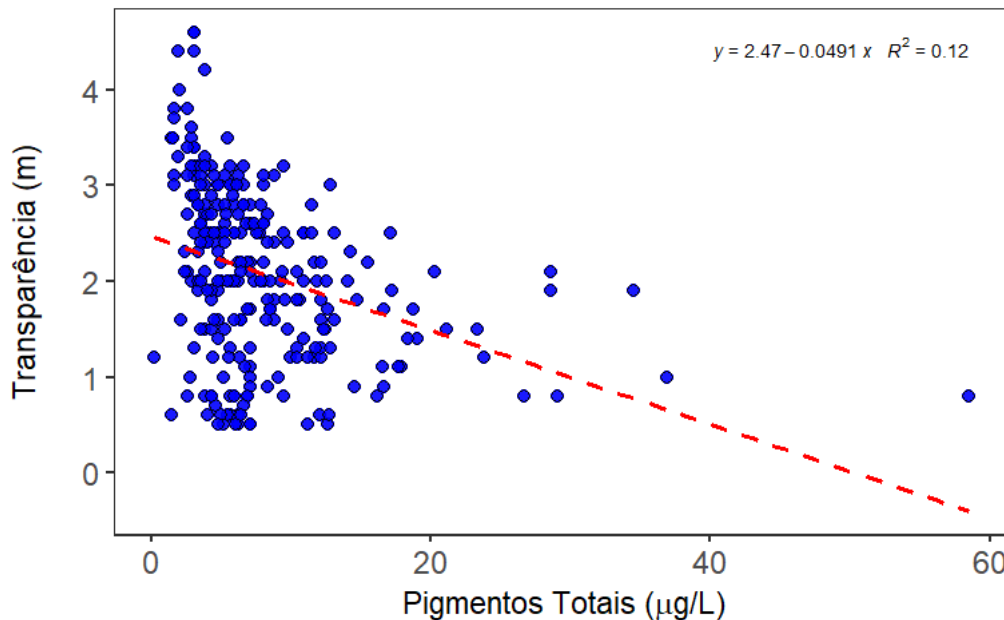
5.2 APLICAÇÃO DO MODELO DE LAMPARELLI COM OS DADOS DO RESERVATÓRIO DA UHE TUCURUÍ

A tese de Lamparelli finalizada no ano de 2004, apresenta como um de seus objetivos principais, “propor alterações metodológicas de medição do Grau de Trofia para a Rede de Monitoramento do Estado de São Paulo”. Para isto a autora, compilou dados do Banco de Dados da Rede de Monitoramento de Qualidade das Águas do Estado de São Paulo, elaborados pela CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo), no qual foram considerados os dados desde o ano de 1996 a 2000, totalizando 69 pontos de amostragem sendo que 35 estão localizados em ambientes lóticos e 34 estão em ambientes lênticos que representaram 22 reservatórios distintos localizados em 10 UGRHs (Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado).

A Autora, para realizar a correlação de seus dados utilizou o software Statgraphics plus v2.1 for Windows, realizando análises estatísticas de regressão, alterando as expressões originais definidas por Carlson (1977) modificado por Toledo et al. (1990) para adequá-las aos ambientes subtropicais.

Lamparelli realizou a correlação entre transparência e clorofila *a* e transparência e fósforo total em seus índices criados. Entretanto, a correlação entre transparência e pigmentos totais realizado em todas as estações de amostragem, dos parâmetros transparência e pigmentos totais do reservatório da UHE Tucuruí não se adequaram no índice proposto pela autora, conforme evidenciado na Figura 2

Figura 2: Mapa de distribuição dos valores de transparência e clorofila no reservatório da UHE Tucuruí durante os 14 anos de análise



Fonte: Oliveira et al, 2025.

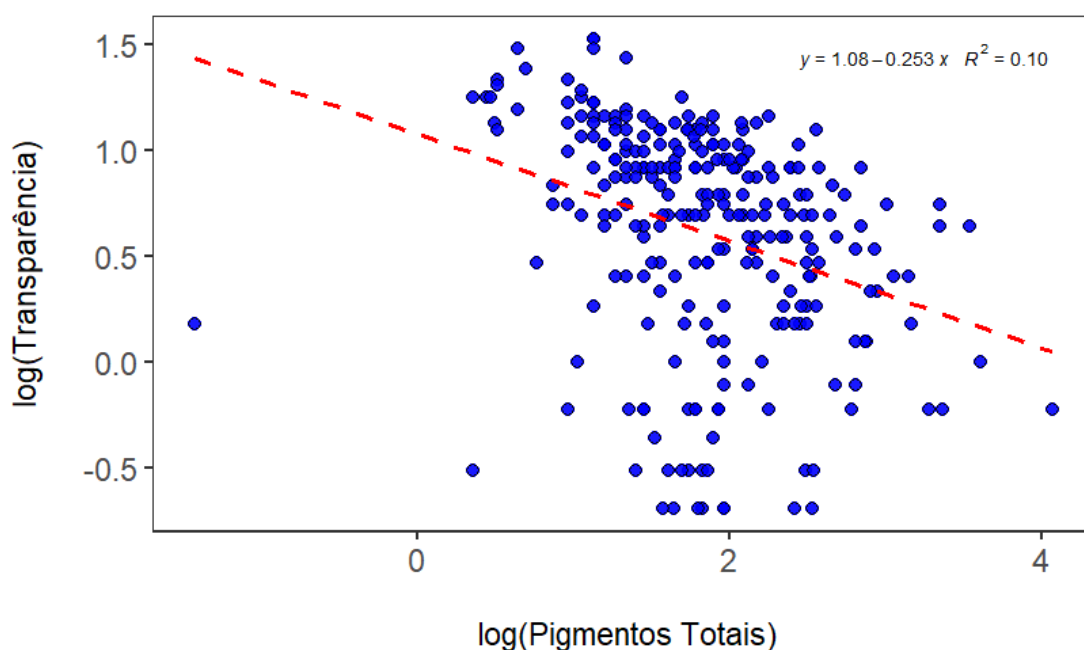
A partir disto, a modelagem entre a variável Transparência (Transp) e os Pigmentos Totais (Pig_Total) revelou uma relação linear negativa estatisticamente significativa. O coeficiente angular foi estimado em $-0,04906$ ($p < 0,001$), indicando que, a cada unidade de aumento em Pig_Total ($\mu\text{g/L}$), há uma redução média de $0,049$ m na transparência. O intercepto ($2,47$) também foi altamente significativo.

O modelo apresentou um coeficiente de determinação $R^2 = 11,86\%$, o que mostra um baixo poder explicativo, embora o efeito estimado seja estatisticamente robusto ($p < 1e-08$). Apesar da significância, os testes de diagnóstico indicam violação de pressupostos importantes: o teste de Shapiro-Wilk ($p = 0,0011$) revelou que os resíduos não seguem distribuição normal; o teste de Breusch-Pagan ($p = 0,0063$) indicou heterocedasticidade, ou seja, variância dos erros não constante; e o teste de Durbin-Watson ($p = 0,00028$) apontou a presença de autocorrelação positiva entre os resíduos. Tais resultados sugerem que, apesar da significância estatística da relação entre as variáveis, o modelo linear simples pode ser inadequado, sendo recomendada a adoção de transformações (como logaritmo) ou modelos mais robustos.

Diferentemente do encontrado por Lamparelli, ao realizar a correlação entre os parâmetros de transparência e clorofila a, nos reservatórios estudados, a autora encontrou uma tendência positiva, onde 88% das concentrações de clorofila a estão coerentes com o aumento dos valores de transparência.

Quando aplicamos o modelo de normalização utilizado por Lamparelli dos parâmetros transparência e pigmentos totais no reservatório da UHE Tucuruí observa-se uma relação negativa entre as variáveis, apresentando um poder explicativo de $R^2 = 0,10$ indicando que apenas 10 % das concentrações de transparência podem ser atribuída aos pigmentos totais (Figura 3).

Figura 3: Gráfico do modelo de normalização (log-log) realizado por Lamparelli nos parâmetros de transparência e pigmentos do reservatório da UHE Tucuruí.



Fonte: Oliveira et al, 2025.

A regressão log-log entre Transparência (Transp) e Pigmentos Totais (Pig_Total), demonstrado na Figura acima, indicou uma associação negativa significativa, com coeficiente angular estimado em $-0,2527$ ($p < 0,001$). Isso sugere que aumentos proporcionais na concentração de pigmentos estão associados à diminuição proporcional da transparência, comportamento compatível com o aumento da turbidez devido à biomassa fitoplanctônica. O intercepto foi de 1,0779 e também altamente significativo ($p < 0,001$).

O modelo apresentou um R^2 de 10,3%, o que, embora modesto, representa leve melhoria em relação à modelagem sem transformação logarítmica. Apesar da significância estatística, os testes de diagnóstico revelaram violação de pressupostos clássicos da regressão linear: o teste de Shapiro-Wilk indicou não normalidade dos resíduos ($p < 0,0001$), o teste de Breusch-Pagan apontou heterocedasticidade ($p = 0,028$), e o teste de Durbin-Watson mostrou autocorrelação positiva ($p < 0,001$). Esses

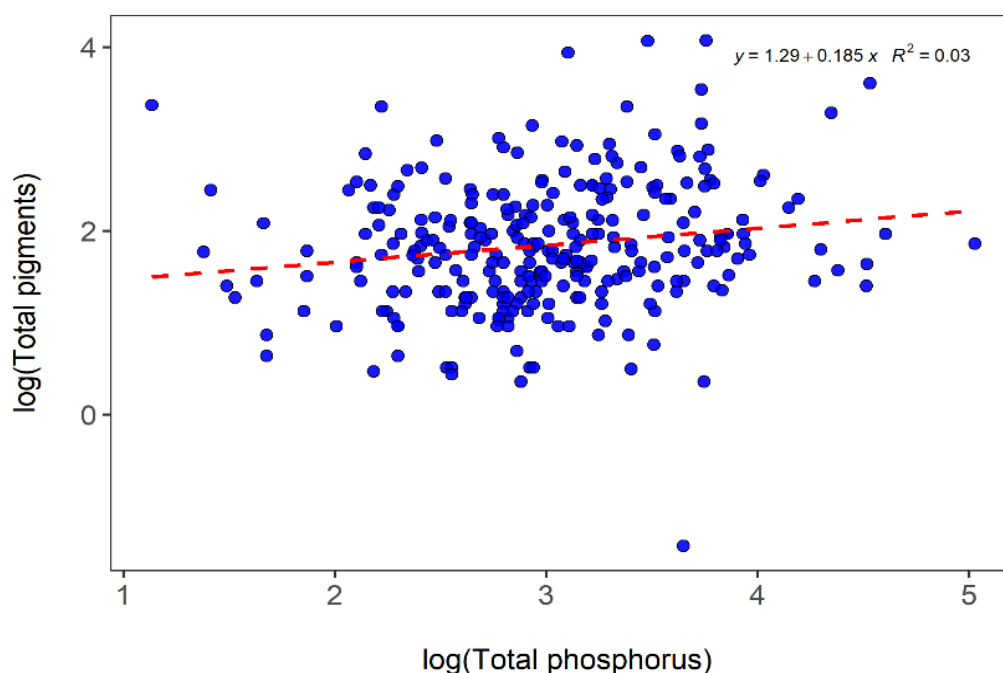
resultados sugerem que, embora a relação entre as variáveis seja clara e estatisticamente significativa, o modelo apresenta limitações estruturais.

Alternativas como modelos robustos ou técnicas de reamostragem podem ser consideradas para validar os resultados com maior confiabilidade.

O comportamento dos teores de transparência e clorofila apresentando-se de forma dispersa no Gráfico acima, sugere a influência de outros fatores que não foram contemplados no modelo como por exemplo material em suspensão, a variabilidade hidrológica, coloração da água por substâncias húmicas e regime operacional.

O modelo de regressão log-log entre fósforo total e pigmentos totais, estruturado com base na abordagem de Lamparelli (2004), apresentou significância estatística ($p < 0,01$), porém baixo poder explicativo ($R^2 = 3\%$). Apesar de os resíduos atenderem ao pressuposto de homocedasticidade, foram observadas violações quanto à normalidade e, principalmente, à independência dos erros, evidenciada pela autocorrelação positiva dos resíduos, o que compromete a confiabilidade do modelo (Figura 4).

Figura 4. Modelo de normalização (log-log) entre os parâmetros de pigmentos totais e fósforo total.



Fonte: Oliveira et al, 2025.

Esses resultados indicam que o fósforo total, de forma isolada, não é um preditor eficaz dos pigmentos totais no reservatório de Tucuruí. A fraca relação observada entre essas variáveis sugere que o modelo de IET(PT) proposto por Lamparelli pode não ser adequado para estimar com precisão o grau de trofia desse sistema aquático.

Ou seja, a partir das análises realizadas, ficou evidente que o método de IET de Lamparelli, não se adequa as concentrações das variáveis medidas no reservatório da UHE Tucuruí que é um reservatório de clima tropical.

Isto pode ser justificado, conforme destaca Tundisi & Matsumura-Tundisi (2022), os reservatórios apresentam características distintas, tanto em sua morfometria e tamanho, tempo de retenção, regime de fluxo e demais características que estão diretamente relacionadas a sua construção e seu propósito.

É importante salientar, diversos autores como Wetzel (2001) e Lamparelli (2004) também destacam a dificuldade na utilização de IET's em reservatórios devido essa heterogeneidade. Thorton et al. (1990) ainda distingue um reservatório, sendo ele lacustre (área próxima ao barramento), a região lótica (área que ainda apresenta grande influência do rio) e pôr fim a área intermediária.

Assim, foi separado as estações de amostragem do reservatório da UHE Tucuruí, como lacustre os pontos C1, C2, M1 e MBB, a área intermediária os pontos MR, MP, MB, M3, ML, e MJV e a região lótica os pontos MI e M5.

Nos tópicos a seguir, serão demonstrados os resultados das modelagens dos IET definido pelo método Lamparelli, nas 12 estações de amostragem, em que são encontrados a partir da correlação das varáveis clorofila, transparência e pigmentos e clorofila e magnésio, novos Índices de Estado Trófico (IET's).

5.3 NOVO MODELO PROPOSTO POR ESTAÇÃO DE AMOSTRAGEM

Enquanto o modelo de Lamparelli (2004) utiliza apenas duas equações para estimar o IET em diversos ambientes aquáticos, o modelo proposto neste estudo utiliza três equações distintas, aplicadas individualmente a cada estação amostral: $IET_{Pig.totais}$, IET_{PT} e IET_{Mg} , equações 3, 4 e 5, respectivamente, onde:

$$IET_{Pig_totalis} = 10 \cdot \left(6 - \frac{\beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(Pig_total)}{\ln(2)} \right) \quad \text{Eq. 3}$$

$$IET_{PT} = 10 \cdot \left(6 - \frac{\beta_0 + \beta_1 \cdot (\gamma_0 + \gamma_1 \cdot \ln(PT))}{\ln(2)} \right) \quad \text{Eq. 4}$$

$$IET_{Mg} = 10 \cdot \left(6 - \frac{\beta_0 + \beta_1 \cdot (\delta_0 + \delta_1 \cdot \ln(Mg))}{\ln(2)} \right) \quad \text{Eq. 5}$$

Onde:

IET_{Pig_totalis}: IET com base na concentração total de pigmentos ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)

IET_{PT}: IET com base na concentração de fósforo total ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$);

IET_{Mg}: IET com base na concentração de magnésio ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$);

β_0, γ_0 e δ_0 : são coeficientes lineares (interceptos) das equações de regressão;

β_1, γ_1 e δ_1 : são coeficientes angulares (inclinações) das equações de regressão.

Os novos índices $IET_{Pig_totalis}$ e IET_{Mg} podem ser aplicados a diferentes ambientes aquáticos, independentemente de suas características limnológicas, desde que sejam atendidos os pressupostos estatísticos dos modelos de regressão utilizados. Com base no IET de Lamparelli e no modelo proposto neste estudo, será possível comparar as estimativas obtidas para as estações de amostragem do reservatório de Tucuruí e avaliar se o modelo de Lamparelli tende a superestimar ou subestimar os valores do índice. Considera-se o modelo proposto como referência, uma vez que foi calibrado com dados específicos do próprio reservatório.

Cunha (2013), também realizou a regressão linear para avaliar a correlação entre clorofila e fósforo, substituindo na equação original de Carlson (1977) e Lima et al., 2022, em um estudo realizado nos dois reservatórios de Santa Maria da Vitória – ES, utilizou a metodologia de Lamparelli (2004) e Cunha (2013), para identificar o grau de trófia, obtendo com resultados altos graus de trofias na maioria dos reservatórios concluindo que existia a necessidade na redução do aporte de nutrientes nos locais.

Entretanto Klippel (2020), também realizou um estudo em seis reservatórios interligados da Ecorregião da Paraíba do Sul do Brasil, que apresentam diferentes cargas de nutrientes, morfometria, tempo de retenção de água além de diferentes altitudes, utilizou o método de Carlson (1977), Toledo (1983), Lamparelli (2004) e

Cunha et al. (2013) e como resultado, identificou que Carlson (criado para lagos com clima temperado), apresentou altos graus de trofia, não sendo, desta forma, considerado um modelo confiável. Já os resultados oriundos do método de Lamparelli e Carlson subestimaram o estado trófico destes reservatórios e apenas o método definido por Toledo (1990) foi o que melhor se adequou ao local por subestimar a transparência da água que pode estar mais bem relacionada a turbidez inorgânica do que na biomassa fitoplanctônica em sistemas aquáticos tropicais.

Para este estudo, foram utilizadas as estações de monitoramento C1, C2 e M1 na região lacustre, as estações de monitoramento MR, MP, E MP na região intermediária e as estações MI e M5 na região lótica.

5.3.1 Área Lacustre

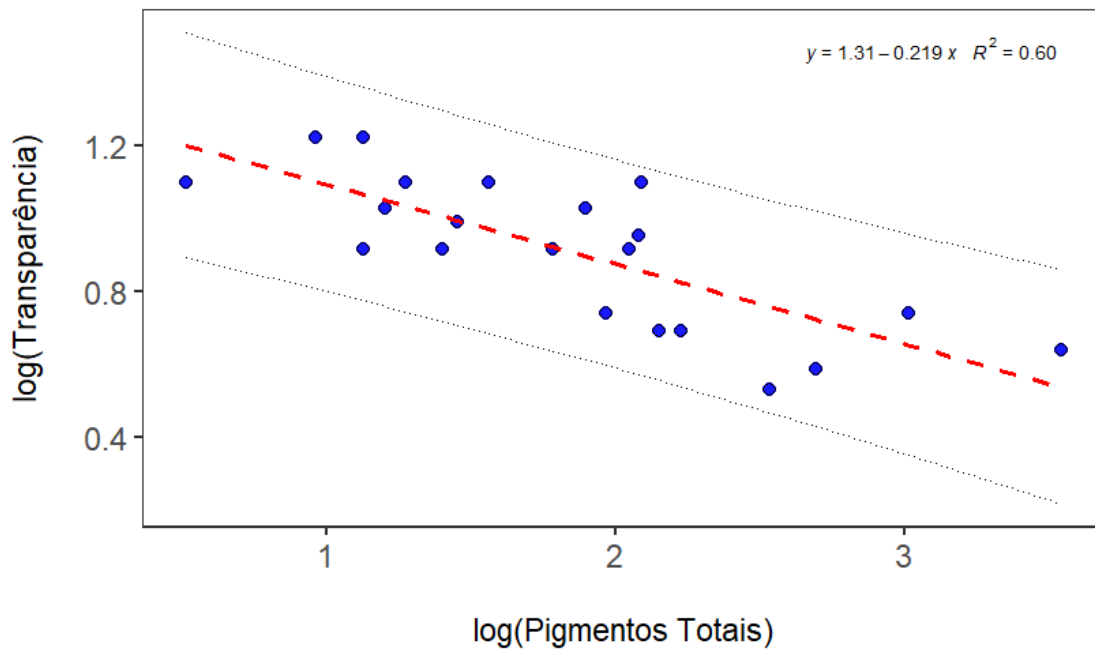
5.3.1.1 Estação C1

A estação Caraipe 1, situado sob as coordenadas 03°50'02." e 49°47'57.7" encontra-se na proximidade do município de Tucuruí que tem uma área territorial de 2.084,287 Km² (IBGE, 2024) e com uma população no último censo (2022) de 91.306 habitantes, com uma densidade demográfica de 43,81 habitantes por m².

Esta estação de monitoramento, apresenta uma característica diferenciada, das demais estações de monitoramento, pois encontra-se em uma área do reservatório com baixa vazão, o que conseqüentemente apresenta um tempo de residência maior (Oliveira, 2019).

Com os dados coletados, inicialmente, ao realizarmos uma regressão linear simples, utilizando a transformação logarítmica em ambas as variáveis (log(Transp) e log(Pig_Total)) nesta estação de monitoramento, o modelo apresentou significância estatística, apresentando um coeficiente de determinação de $R^2 = 0,60$, indicando que aproximadamente 60% da variabilidade observada em log(Transp) pode ser explicada por log(Pig_Total), conforme evidenciado na Figura 5.

Figura 5: Aplicação de modelo de regressão linear simples com os parâmetros Transparência e Pigmentos Totais na estação C1.



Fonte: Oliveira et al, 2025.

A análise dos resíduos confirmou a adequação dos pressupostos do modelo. O teste de Shapiro-Wilk não indicou violação da suposição de normalidade ($W = 0,944$; $p = 0,257$), enquanto o teste de Breusch-Pagan não revelou presença significativa de heterocedasticidade ($BP = 0,784$; $p = 0,376$). A verificação de independência dos erros, por meio do teste de Durbin-Watson, não apresentou evidência conclusiva de autocorrelação ($DW = 1,384$; $p = 0,060$). O erro padrão residual foi estimado em 0,1335, com 19 graus de liberdade.

Como resultante da análise acima, obtivemos a seguinte equação modelada para transparência (Equação 6) e propor um novo Índice de IET nesta estação sendo descrito pela Equação 7.

$$\ln(S) = 1.31 - 0.219 \cdot \ln(\text{Pigmentos Totais}) \quad \text{Eq.6}$$

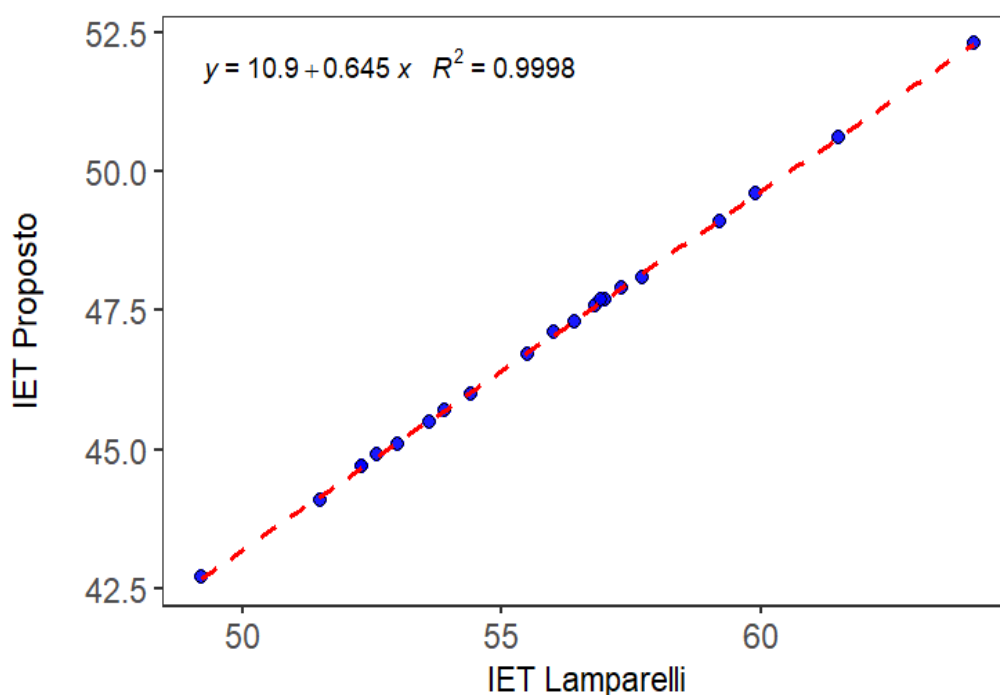
$$IET(\text{Pig_Total}) = 10 \cdot \left(6 - \frac{(1.31 - 0.219 \cdot \ln(\text{PigTotal}))}{\ln 2} \right) \quad \text{Eq. 7}$$

Ao realizar uma comparação entre o IET de clorofila a de Lamparelli e o proposto para a estação C1, pudemos identificar que os resultados obtidos com o

modelo de Lamparelli apresentaram baixa concordância entre os valores de IET estimados a partir da transparência, clorofila a e fósforo total.

Em contrapartida, os IETs propostos, representados nas duas últimas colunas, demonstraram maior consistência entre si, reflexo do fato de terem sido desenvolvidos com base em dados específicos do reservatório em estudo, considerando suas particularidades ambientais e dinâmicas locais (FIGURA 6).

Figura 6: Regressão Linear simples do IET de Lamparelli com o IET proposto para a Estação C1.

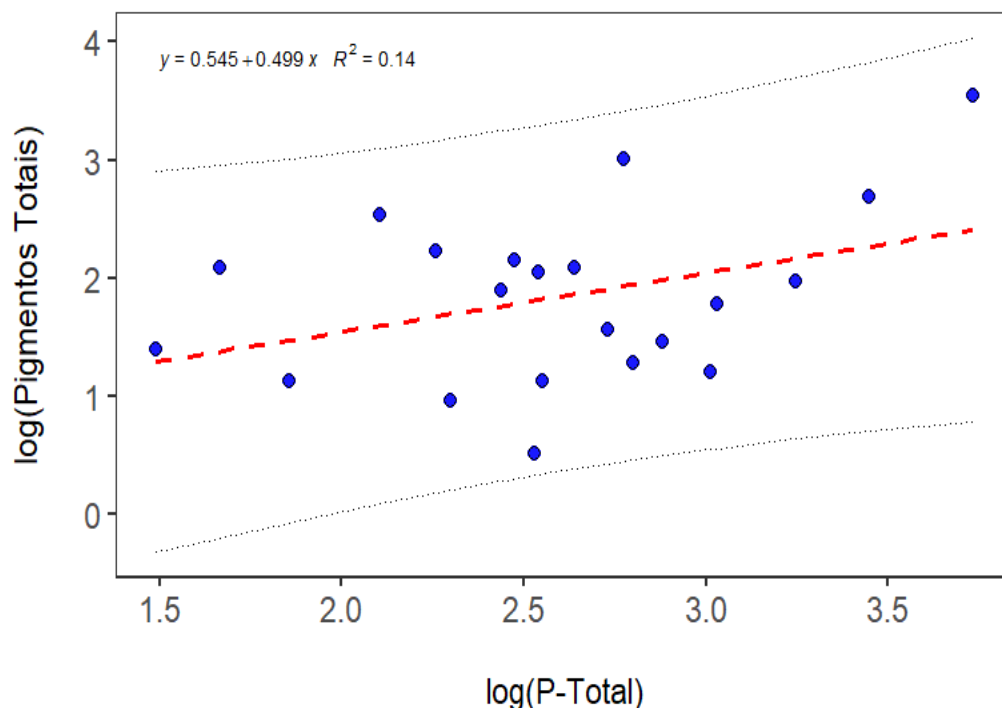


Fonte: Oliveira et al, 2025.

Embora o modelo de Lamparelli (2004) seja amplamente adotado para a avaliação do estado trófico em reservatórios de São Paulo, os resultados obtidos demonstram que sua aplicação ao reservatório de Tucuruí apresenta limitações significativas. A regressão entre o IET de Lamparelli e o índice proposto neste trabalho revelou uma relação linear com alto coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9998$), o que indica consistência matemática entre os dois modelos. No entanto, a inclinação inferior a 1 (0,6451) evidencia que o modelo de Lamparelli tende a superestimar o estado trófico em cenários mais eutrofizados e, inversamente, subestimar em situações mais oligotróficas, não refletindo com precisão o cenário em C1.

Ao inserir, o modelo de regressão definido por Lamparelli entre as variáveis Pigmentos totais e Fósforo Total (PT), obteve-se o seguinte modelo:

Figura 7: Aplicação de modelo de regressão linear simples com os parâmetros Pigmentos Totais e P-Total na estação C1.



Fonte: Oliveira et al, 2025.

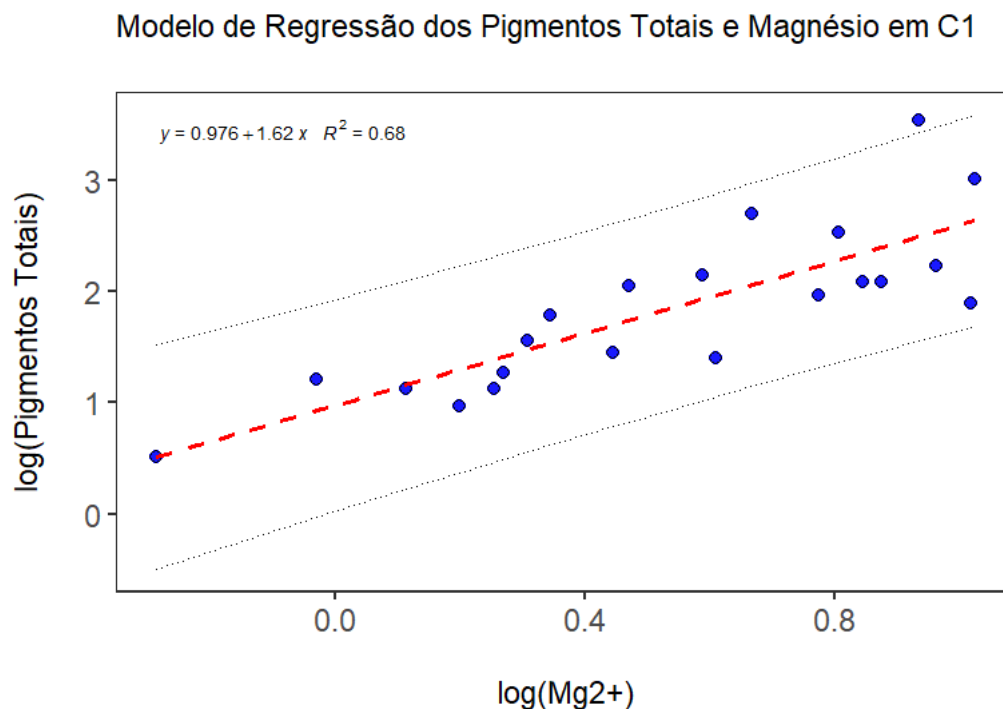
O modelo de regressão log-log entre Pig_Total e P_Total revelou uma associação positiva, com coeficiente de inclinação de 0,4992 e valor de $p = 0,0901$, indicando tendência de significância ao nível de 10%. O R^2 de 14,4% demonstra baixo poder explicativo, sugerindo que o fósforo total, isoladamente, não explica bem a variação na concentração de pigmentos.

O erro padrão residual foi de 0,691. O intercepto (0,5445) não foi estatisticamente significativo. Os resíduos apresentaram distribuição normal (Shapiro-Wilk, $p = 0,7903$) e homocedasticidade (Breusch-Pagan, $p = 0,3996$). No entanto, o teste de Durbin-Watson indicou autocorrelação positiva dos resíduos ($p = 0,02886$), o que pode comprometer a validade dos testes estatísticos do modelo.

Apesar de robusto em termos de normalidade e homocedasticidade, o modelo requer cautela devido à dependência serial nos resíduos e à baixa capacidade preditiva.

Já ao realizar a relação entre pigmentos totais e magnésio na estação de monitoramento C1, o modelo de regressão evidenciou uma forte relação positiva entre as concentrações destes dois parâmetros na água (Figura 8).

Figura 8: Modelo de regressão dos parâmetros pigmentos totais e Magnésio



Fonte: Oliveira et al, 2025.

O coeficiente angular foi de 1,6210 ($p < 0,001$), indicando que um aumento proporcional na concentração de Mg^{2+} está associado a um aumento ainda mais acentuado na biomassa fitoplanctônica.

O modelo apresentou um ajuste expressivo ($R^2 = 67,6\%$), com significativa capacidade explicativa da variável independente. O intercepto (0,9756) também foi estatisticamente significativo.

Os resíduos atenderam aos pressupostos de normalidade (Shapiro-Wilk, $p = 0,4238$) e ausência de autocorrelação (Durbin-Watson, $p = 0,7088$), mas o teste de Breusch-Pagan ($p = 0,037$) indicou presença de heterocedasticidade, o que sugere variação não constante nos erros ao longo dos valores preditos.

Apesar disso, o modelo reforça a hipótese de que o magnésio pode atuar como fator limitante da produtividade primária, justificando sua consideração em índices tróficos alternativos.

Com a resultante da regressão linear acima, pode obter a equação modelada entre pigmento e magnésio (Equação 8). Substituindo a equação modelada de transparência obtivemos a seguinte equação Equação 9:

$$\ln(\text{Pig_Total}) = 0.976 + 1.62 \cdot \ln(\text{Mg2}) \quad \text{Eq.8}$$

$$\text{IET}(\text{Mg}) = 10 \cdot \left(6 - \frac{(1.096 - 0.355 \cdot \ln(\text{Mg2}))}{\ln 2} \right) \quad \text{Eq. 9}$$

É importante destacar que seguindo a distinção sobre as áreas do reservatório definida por Thorton et al. (1990), a estação de monitoramento C1 encontra-se na área lacustre.

5.3.1.2 Estação C2

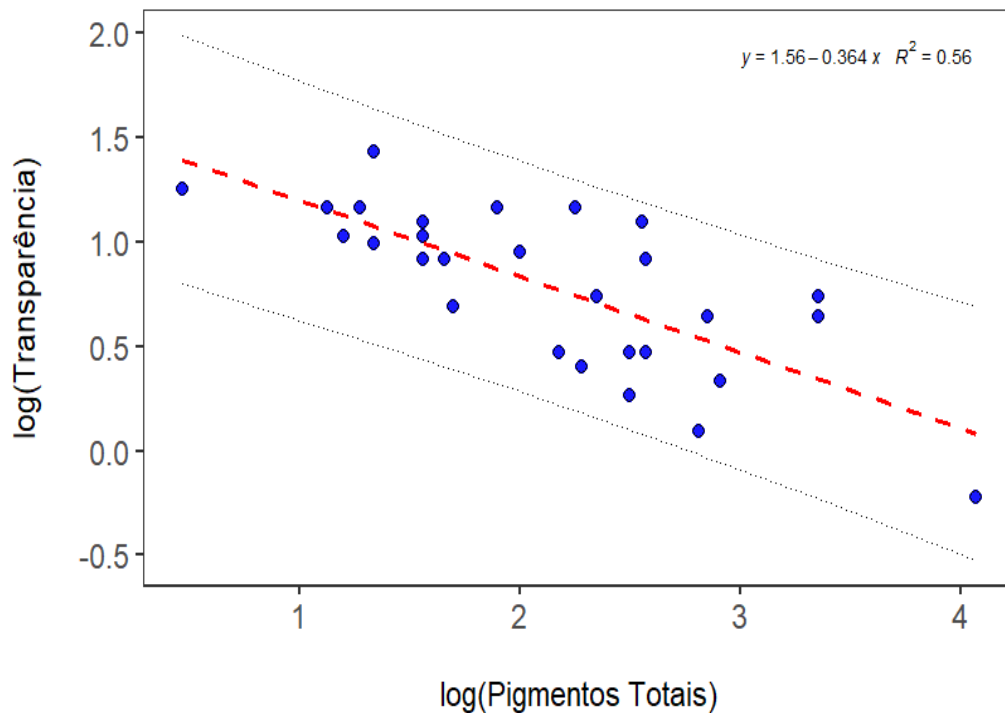
A Estação Caraipé 2 (C2) sob as coordenadas 03°57'12.1" e 49°49'31.1", encontra-se próximo à Estação C1, situando-se nas proximidades do município de Tucuruí entretanto existe uma distância maior da cidade.

Para o ponto C2, foi ajustado um modelo de regressão linear entre $\log(\text{Transparência})$ e $\log(\text{Pigmentos Totais})$, cujo resultado indicou uma relação negativa e estatisticamente significativa (coeficiente = -0,3639; $p < 0,001$), ou seja, à medida que a concentração de pigmentos aumenta, a transparência da água tende a diminuir.

O modelo apresentou um R^2 de 0,5575, o que significa que cerca de 56% da variação observada na transparência pode ser explicada pela variação nos pigmentos totais. O teste F ($p = 5,04 \times 10^{-6}$) confirma a significância global do modelo.

Os resíduos atenderam aos pressupostos de normalidade feito pelo teste Shapiro-Wilk ($p = 0,4156$) e independência (Durbin-Watson = 2,01; $p = 0,5203$), no entanto, o teste de Breusch-Pagan apontou evidência de heterocedasticidade ($p = 0,0133$), sugerindo que a variância dos resíduos varia ao longo da predição (FIGURA 9).

Figura 9: Modelo de regressão dos parâmetros transparência e pigmentos totais na Estação C2



Fonte: Oliveira et al, 2025.

Assim, para a estação C2 a proposta do novo Índice para pigmentos, resultante da análise acima, obtivemos a equação modelada de transparência (Equação 10) e pudemos propor um novo Índice de IET nesta estação sendo descrito pela Equação 11:

$$\ln(S) = 1.56 - 0.364 \cdot \ln(Pig_Total) \quad \text{Eq.10}$$

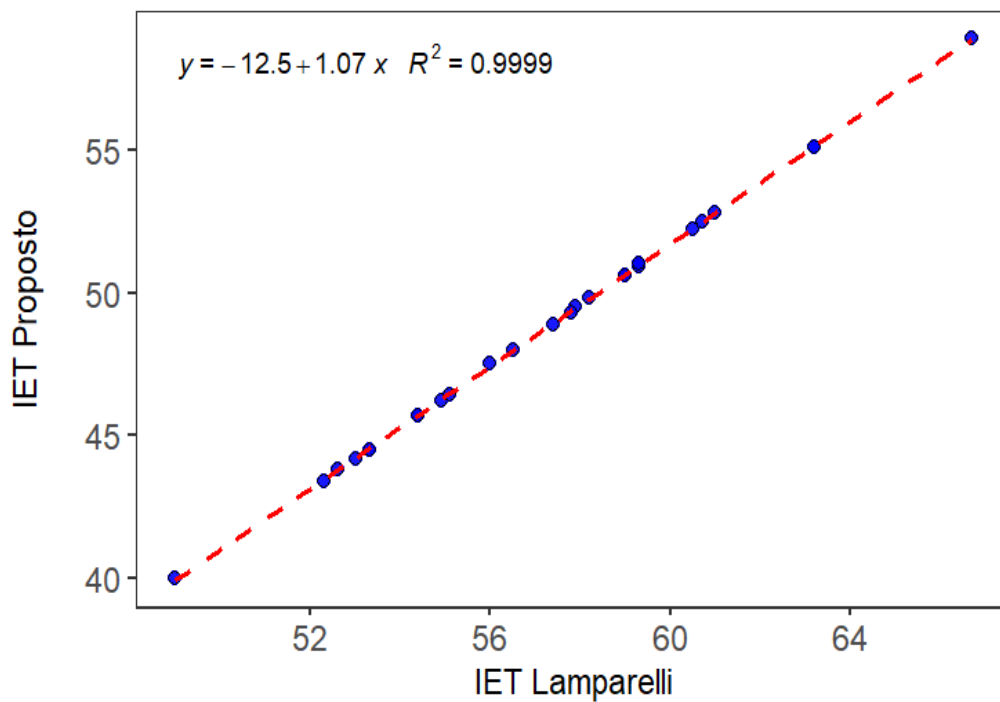
$$IET(Pig_Total) = 10 \cdot \left(6 - \frac{(1.56 - 0.364 \cdot \ln(Pig_Total))}{\ln 2} \right) \quad \text{Eq. 11}$$

Ao realizarmos a relação entre o IET proposto o de Lamparelli, pudemos identificar que apesar da forte correlação entre os dois modelos, o IET proposto se mostra mais sensível às condições locais, ajustando-se melhor às realidades observadas experimentalmente. Enquanto o modelo de Lamparelli tende a superestimar o estado trófico em faixas inferiores e subestimar em faixas mais elevadas, o modelo proposto fornece uma resposta mais proporcional à variação real das variáveis tróficas do sistema analisado.

Essa diferença evidencia a importância de desenvolver modelos calibrados localmente, principalmente em ambientes onde características regionais influenciam significativamente a resposta trófica do ecossistema (Figura 10).

Figura 10: Relação entre o IET de Lamparelli e o proposto para a Estação

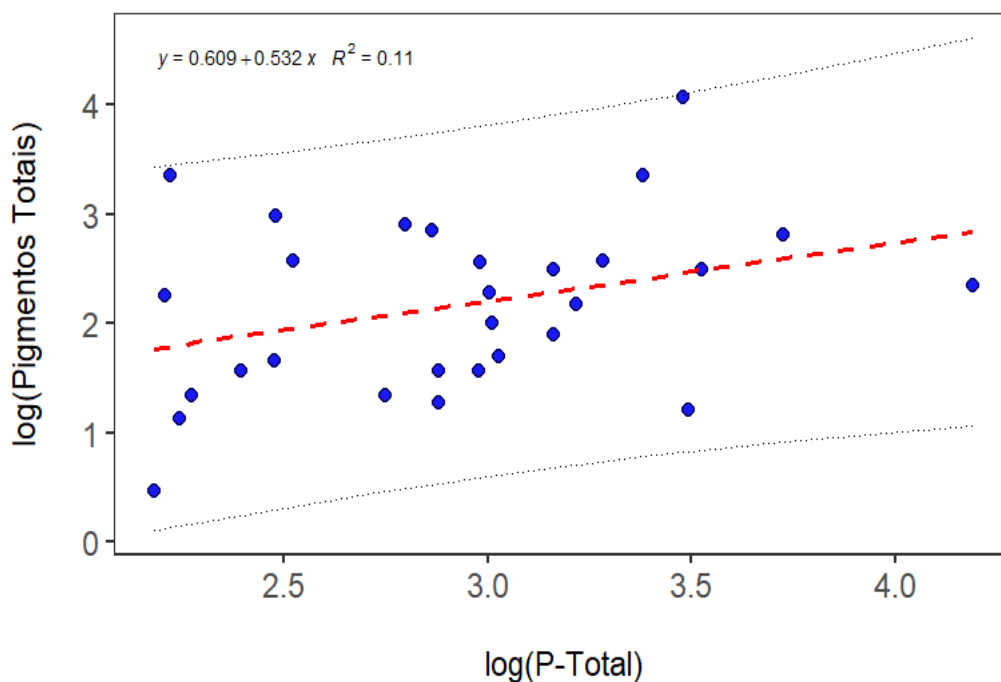
C2



Fonte: Oliveira et al, 2025.

Ao inserir, o modelo de regressão definido por Lamparelli entre as variáveis Pigmentos totais e Fósforo Total (P_Total), obteve-se o seguinte modelo:

Figura 11: Modelo de regressão dos parâmetros pigmentos totais e P-Total na Estação C2



Fonte: Oliveira et al, 2025.

O modelo de regressão log-log entre a concentração de pigmentos totais (Pig_Total) e fósforo total (P_Total) indicou uma relação positiva entre as variáveis, com coeficiente angular de 0,5317. Isso sugere que um aumento proporcional em P_Total está associado a um aumento de aproximadamente 53% em Pig_Total.

Apesar do valor de p associado a essa inclinação ($p = 0,0758$) indicar apenas uma tendência de significância ao nível de 10%, os testes de diagnóstico confirmaram a adequação estatística do modelo.

O teste de Shapiro-Wilk ($p = 0,5397$) indicou normalidade dos resíduos, enquanto os testes de Breusch-Pagan ($p = 0,4632$) e Durbin-Watson ($p = 0,3252$) não evidenciaram heterocedasticidade nem autocorrelação, respectivamente. Contudo, o coeficiente de determinação ($R^2 = 11,2\%$) revela que o modelo explica uma proporção limitada da variabilidade dos dados, sugerindo a influência de outros fatores além do fósforo total na variação dos pigmentos. Assim, embora estatisticamente robusto, o modelo apresenta baixo poder preditivo.

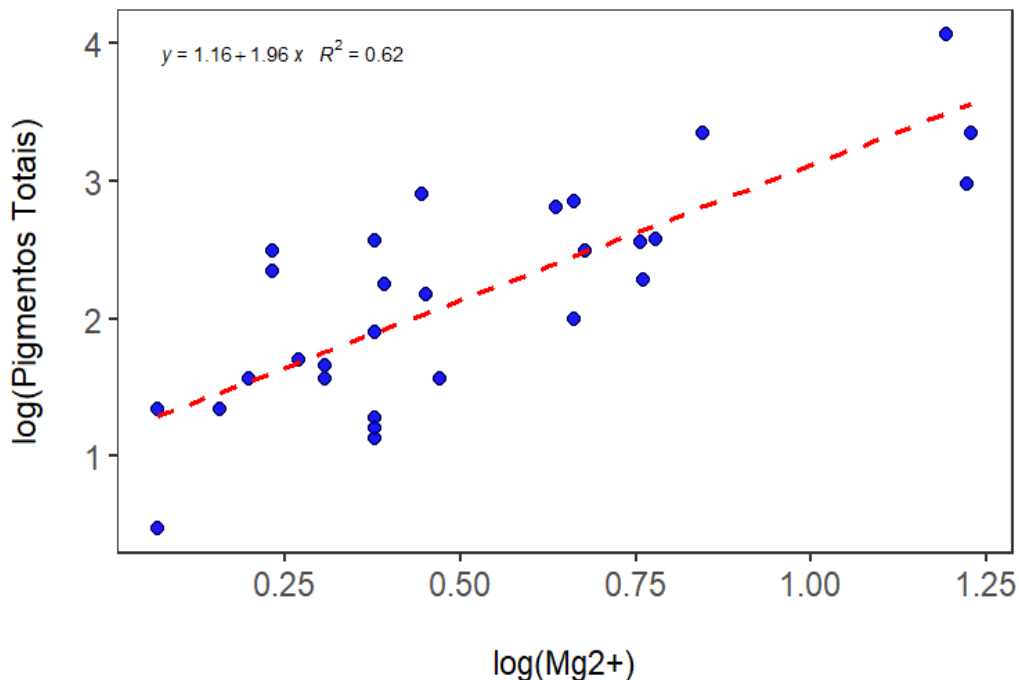
Já o modelo ajustado para o ponto C2, que relaciona o logaritmo dos pigmentos totais ($\log(\text{Pig_Total})$) ao logaritmo do magnésio ($\log(\text{Mg}_2)$), revelou uma associação positiva, forte e estatisticamente significativa. O coeficiente angular estimado foi de 1,9596 ($p < 0,001$), indicando que um aumento na concentração de

magnésio está associado a um aumento exponencial nos pigmentos totais, sob escala logarítmica (Figura 12)..

O modelo apresentou um R^2 de 0,6206, o que demonstra que aproximadamente 62% da variabilidade dos pigmentos totais pode ser explicada pelos níveis de magnésio. Os pressupostos da regressão linear foram atendidos: os resíduos seguem distribuição normal ($p = 0,3682$), não há indícios de heterocedasticidade ($p = 0,4225$) e os resíduos são independentes (Durbin-Watson = 2,66; $p = 0,9647$).

Esses resultados reforçam que o magnésio exerce um papel relevante na dinâmica da produção fitoplanctônica nesse ponto, sendo um preditor mais eficaz do que o fósforo em alguns casos

Figura 12: Modelo de regressão dos pigmentos totais e magnésio para a estação C2



Fonte: Oliveira et al, 2025.

A partir disto, pudemos obter a equação modelada entre pigmento e magnésio (Equação 12). Substituindo a equação modelada de transparência obtivemos a seguinte equação para um novo modelo de IET para a estação C2 (Equação 13).

$$\ln(\text{Pig. total}) = 1.16 + 1.96 \cdot \ln(\text{Mg}2) \quad \text{Eq.12}$$

$$IET(Mg) = 10 \cdot \left(6 - \frac{(1.138 - 0.713 \cdot \ln(Mg^2))}{\ln 2} \right) \quad \text{Eq. 13}$$

É importante destacar, que o braço do Caraipé em que as estações de monitoramento C1 e C2 encontram-se, possui uma estratificação permanente da coluna d'água e uma dinâmica própria liminológica com um elevado tempo de residência, diferente das outras estações de amostragem (CMB, 1999; YOSHINO, 2017).

5.3.1.3 Estação M1

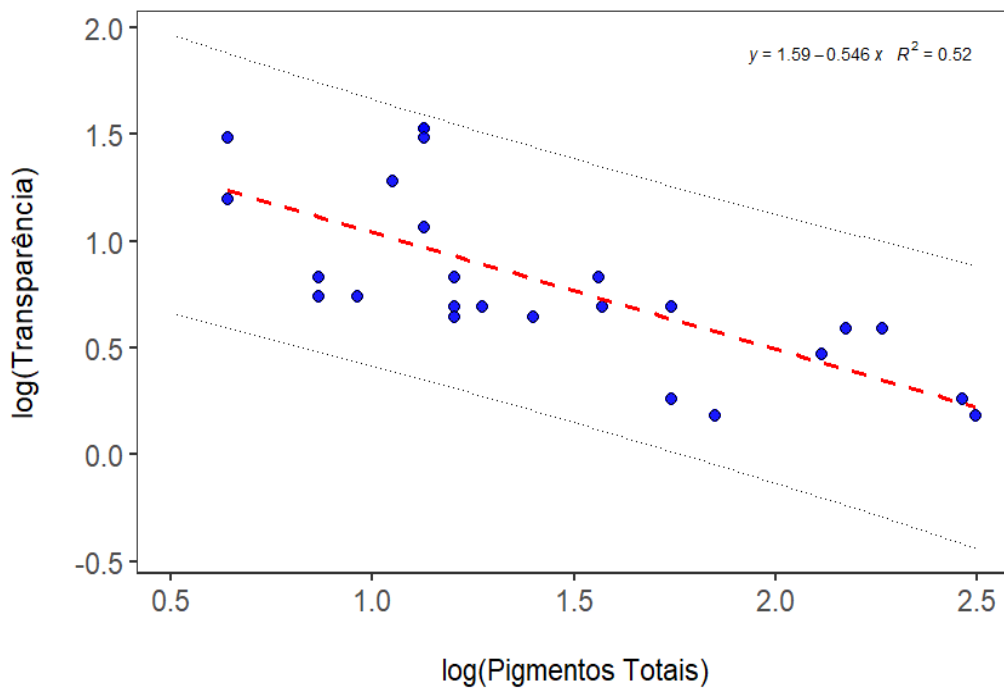
A estação Montante 1 (M1) situada sob as coordenadas 03°51'38.8" e 49°37'56.6", que fica mais próximo ao barramento no município de Tucuruí, na calha central do reservatório.

A análise da relação entre a transparência da água e os pigmentos totais no ponto de amostragem M1, com ambas as variáveis transformadas em logaritmo natural, revelou uma associação negativa estatisticamente significativa.

O modelo de regressão linear apresentou coeficiente angular de $-0,546$ (erro padrão = $0,110$; $p < 0,001$), indicando que aumentos na concentração de pigmentos totais estão associados a reduções na transparência da água. O intercepto foi estimado em $1,587$ ($p < 0,001$). O coeficiente de determinação ($R^2 = 0,519$) demonstrou que aproximadamente 51,9% da variação em $\log(\text{Transparência})$ pode ser explicada pelos níveis de pigmentos totais no ponto M1, e o R^2 ajustado ($0,498$) reforça a consistência do modelo mesmo considerando o número reduzido de observações ($n = 25$).

Os resíduos do modelo atenderam aos pressupostos da regressão linear, conforme indicado pelos testes estatísticos: o teste de Shapiro-Wilk apontou normalidade dos resíduos ($p = 0,148$), o teste de Breusch-Pagan não detectou heterocedasticidade ($p = 0,129$), e o teste de Durbin-Watson revelou ausência de autocorrelação ($p = 0,465$; $DW = 1,99$). Esses resultados garantem a validade das inferências estatísticas do modelo ajustado (Figura 13).

Figura 13: Modelo de Regressão da transparência e Pigmentos totais na estação M1.



Fonte: Autora, 2025.

Para a estação M1 a equação modelada para transparência encontra-se na Equação 14 e a proposta do novo Índice para pigmentos, pode ser observada na Equação 15.

$$\ln(S) = 1.59 - 0.546 \cdot \ln(\text{Pig. totais}) \quad \text{Eq. 14}$$

$$IET(\text{Pig_Total}) = 10 \cdot \left(6 - \frac{(1.59 - 0.546 \cdot \ln(\text{PigTotal}))}{\ln 2} \right) \quad \text{Eq. 15}$$

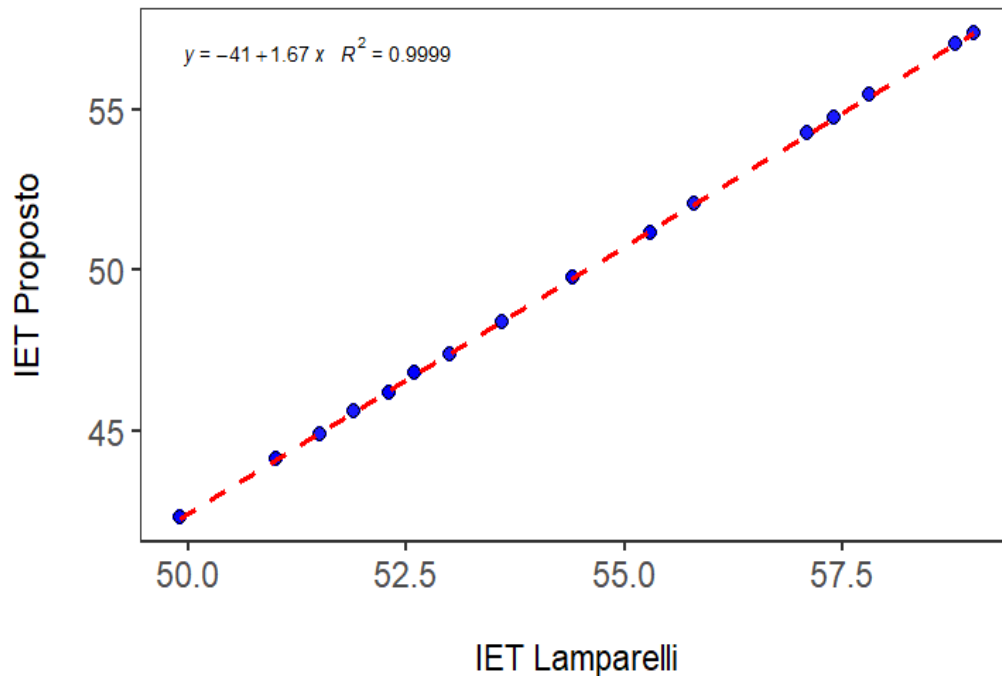
A relação entre o Índice de Estado Trófico (IET) de Lamparelli e o IET Proposto para o ponto M1 demonstra diferenças significativas na interpretação do estado trófico. A regressão linear entre os índices apresentou uma forte correlação ($R^2 = 0,9999$), indicando que o IET proposto responde de forma mais acentuada às variações ambientais locais.

A inclinação superior a 1 revela que, para valores mais baixos de IET, o modelo de Lamparelli tende a subestimar o estado trófico em comparação ao índice ajustado para Tucuruí.

Estima-se que ambos os índices coincidiriam apenas quando o IET de Lamparelli atingisse cerca de 61,2, valor acima da faixa observada em M1 (50 a 58). Portanto, neste intervalo, prevalece a subestimação pelo modelo de Lamparelli.

Esses resultados evidenciam a limitação de aplicar modelos genéricos em ambientes com características ecológicas distintas, como os reservatórios amazônicos, ressaltando a necessidade de índices calibrados localmente para uma avaliação mais precisa e condizente com a realidade ambiental (Figura 14).

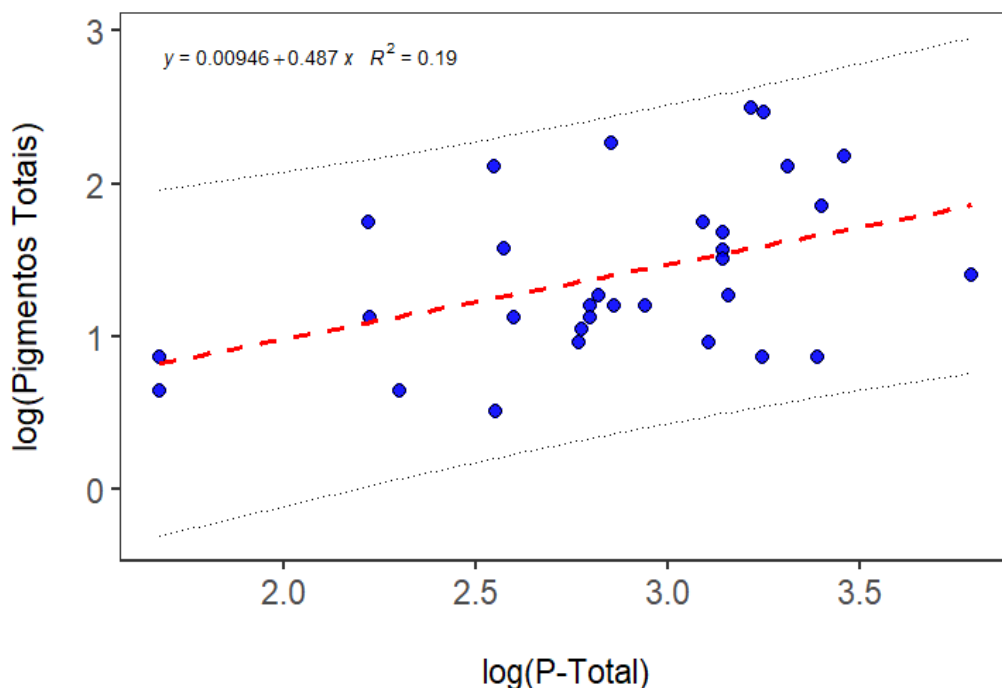
Figura 14: Relação entre o IET de Lamparelli e o proposto para a estação M1.



Fonte: Oliveira et al, 2025.

Ao realizar a correlação entre pigmentos totais e P – Total obteve-se o seguinte modelo:

Figura 15: Modelo de Regressão dos pigmentos totais e P-Total na estação de monitoramento M1



Fonte: Oliveira et al, 2025.

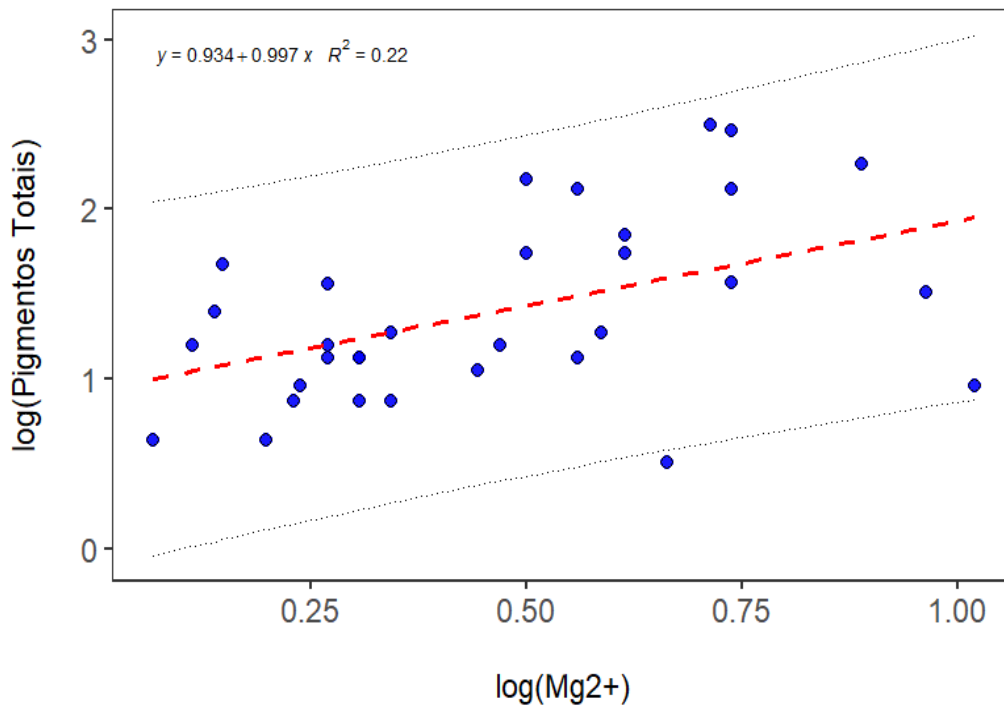
A regressão logarítmica entre os pigmentos totais e o fósforo total revelou uma associação positiva significativa para a variável explicativa $\log(P_Total)$ ($\beta = 0,487$; $p = 0,014$), enquanto o intercepto não foi estatisticamente significativo ($p = 0,4828$). O modelo apresentou baixo poder explicativo ($R^2 = 0,19$), indicando que cerca de 19% da variação nos pigmentos totais pode ser atribuída à variação no fósforo total.

Os resíduos atenderam aos pressupostos de normalidade ($p = 0,1407$) e homocedasticidade ($p = 0,2911$), mas houve detecção de autocorrelação positiva (Durbin-Watson = 1,29; $p = 0,0216$).

Para o modelo de regressão entre $\log(\text{Pigmentos Totais})$ e $\log(\text{Mg}^{2+})$ apresentou associação positiva e significativa ($p = 0,0064$), com coeficiente angular de 0,9972, indicando que um aumento proporcional na concentração de magnésio está associado a um aumento semelhante nos pigmentos totais.

O modelo explicou cerca de 22,3% da variância observada ($R^2 = 0,223$). Os resíduos apresentaram distribuição normal ($p = 0,378$) e ausência de autocorrelação (DW = 1,71; $p = 0,184$), embora o teste de Breusch-Pagan tenha indicado heterocedasticidade ($p = 0,0087$), sugerindo variância não constante dos erros. Ainda assim, o modelo apresenta relevância ecológica ao apontar o magnésio como possível fator associado à variação da biomassa fitoplanctônica (Figura 16).

Figura 16: Modelo de Regressão dos Pigmentos totais e Magnésio na estação M1.



Fonte: Oliveira et al, 2025.

Realizando a relação entre pigmentos totais e magnésio, obteve-se a equação modelada de pigmento:

$$\ln(\text{Pig_Total}) = 0.934 + 0,997 \cdot \ln(\text{Mg2}) \quad \text{Eq. 16}$$

Desta forma, substituindo o IET:

$$\text{IET}(\text{Mg}) = 10 \cdot \left(6 - \frac{(1.08 - 0.544 \cdot \ln(\text{Mg2}))}{\ln 2} \right) \quad \text{Eq. 17}$$

5.3.2 Área Intermediária

5.3.2.1 Estação MR

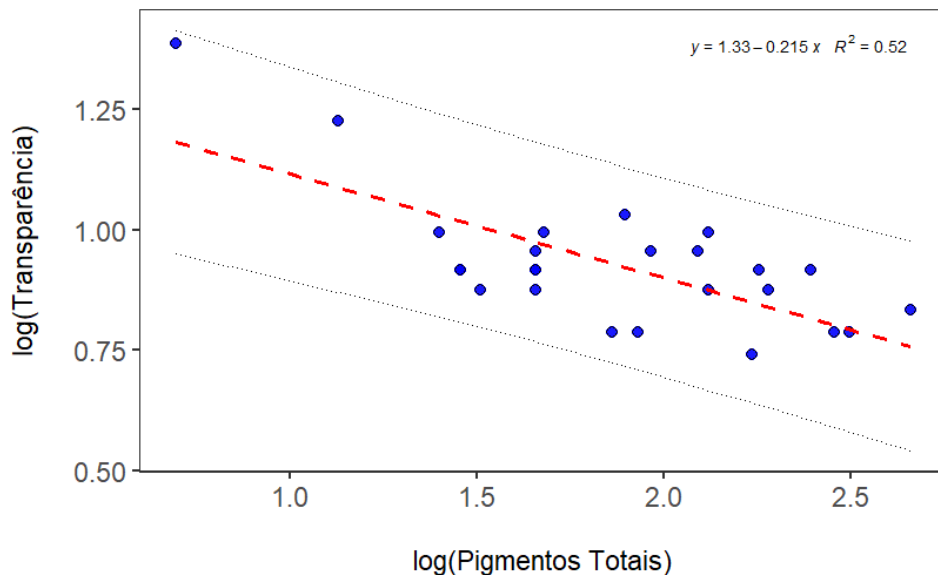
O Montante Repartimento encontra-se na parte central do reservatório, sob as coordenadas 04°13'16.3" e 49°41'59.6", na proximidade do município de Novo Repartimento que apresenta uma área territorial de 15.398.736 km² e 60.732 habitantes pelo censo 2022 (IBGE, 2024).

A regressão entre $\log(\text{Transparência})$ e $\log(\text{Pigmentos Totais})$ indicou uma associação negativa estatisticamente significativa. O coeficiente angular foi estimado em $-0,215$ (erro padrão = $0,043$; $p < 0,001$), sugerindo que o aumento nos níveis de pigmentos totais está associado à redução da transparência da água.

O modelo apresentou um bom ajuste, explicando aproximadamente $51,8\%$ da variação na variável resposta ($R^2 = 0,518$), com R^2 ajustado de $0,497$. O intercepto foi estimado em $1,330$ ($p < 0,001$). A avaliação dos resíduos demonstrou distribuição normal ($p = 0,409$) e ausência de autocorrelação ($p = 0,930$; $DW = 2,57$), satisfazendo parcialmente os pressupostos do modelo.

No entanto, o teste de Breusch-Pagan indicou heterocedasticidade significativa ($p = 0,004$), evidenciando que a variância dos resíduos não é constante. Essa heterogeneidade pode ser explicada pela natureza dos dados, coletados em diferentes anos e meses, abrangendo condições sazonais distintas e possíveis variações interanuais no ambiente aquático (Figura 17).

Figura 17: Modelo de regressão entre os parâmetros transparência e Pigmento totais na Estação MR



Fonte: Oliveira et al, 2025.

Como resultante, se obteve-se a seguinte equação de transparência:

$$\ln(S) = 1.33 - 0.215 \cdot \ln(\text{Pig. totais}) \quad \text{Eq.18}$$

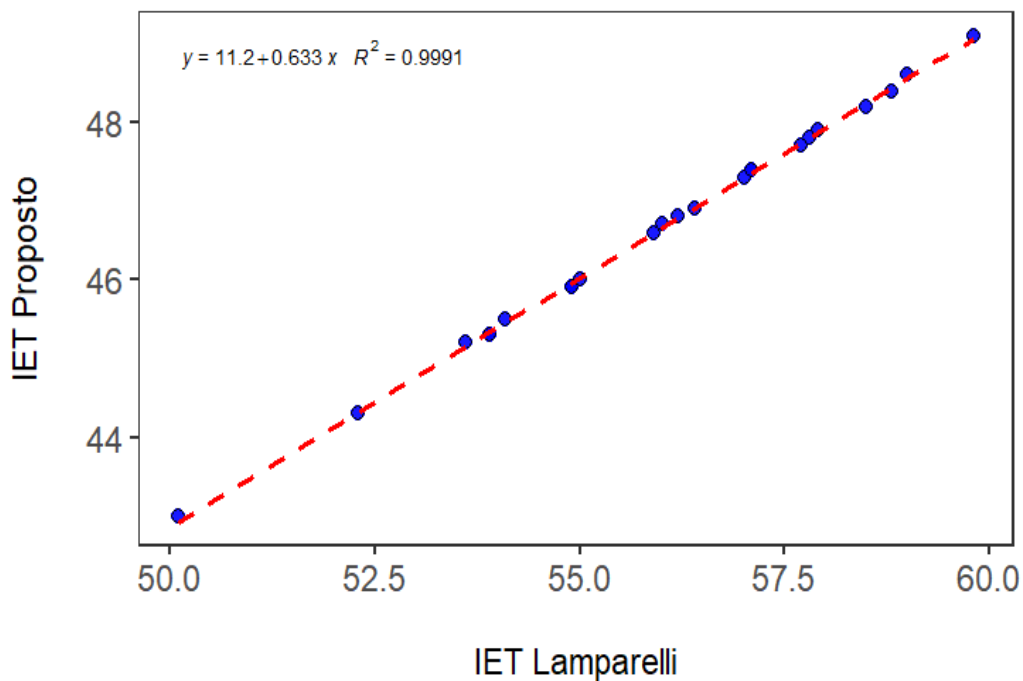
Já o novo Índice trófico proposto para a estação MR encontra-se na Equação

$$IET(Pig_Total) = 10 \cdot \left(6 - \frac{(1.33 - 0.215 \cdot \ln(Pig_Total))}{\ln 2} \right) \quad \text{Eq. 19}$$

A avaliação da relação entre o Índice de Estado Trófico (IET) de Lamparelli e o IET Proposto no ponto MR demonstrou uma elevada correlação linear ($R^2 = 0,9991$). A inclinação inferior a 1 evidencia que o modelo de Lamparelli sistematicamente superestima o estado trófico em relação ao índice ajustado às condições ambientais do reservatório de Tucuruí.

A presença de uma interceptação positiva destaca a diferença entre as abordagens, indicando que o IET proposto fornece uma interpretação mais alinhada às características ecológicas locais (Figura 18).

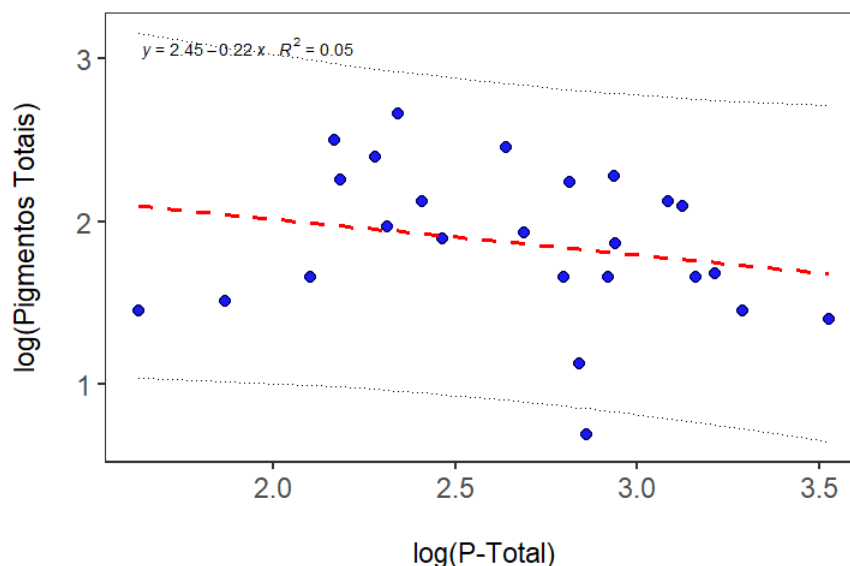
Figura 18: Relação do IET de Lamparelli e o IET Proposto para a estação MR.



Fonte: Oliveira et al, 2025.

Ao realizar a correlação entre a variável pigmentos totais e P-Total, conforme método definido por Lamparelli, obteve-se o seguinte modelo:

Figura 19: Modelo de regressão entre os parâmetros Pigmento total e P-Total na Estação MR



Fonte: Oliveira et al, 2025.

No ponto de amostragem MR, a regressão entre $\log(\text{Pigmentos Totais})$ e $\log(\text{Fósforo Total})$ indicou que não há uma relação estatisticamente significativa entre essas variáveis.

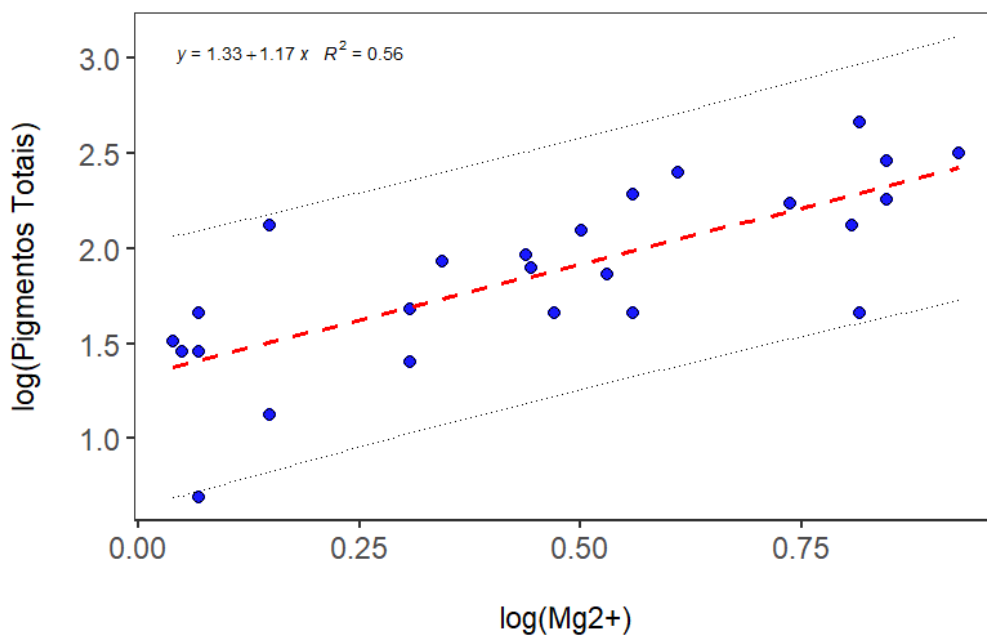
O coeficiente angular foi estimado em $-0,220$ (erro padrão = $0,198$; $p = 0,279$), sugerindo que, embora exista uma tendência negativa entre os níveis de fósforo total e a biomassa fitoplanctônica, essa associação não é estatisticamente robusta. O intercepto do modelo foi significativo ($p = 0,0001$), mas o poder explicativo geral foi bastante baixo, com R^2 de apenas 5% e R^2 ajustado próximo de zero ($0,94\%$), evidenciando que o fósforo total praticamente não explica a variabilidade observada nos pigmentos.

Apesar disso, o modelo atendeu satisfatoriamente aos pressupostos da regressão linear. Os resíduos apresentaram distribuição normal ($p = 0,595$), homocedasticidade ($p = 0,434$) e ausência de autocorrelação ($p = 0,493$; $DW = 2,03$), o que indica que o modelo é estatisticamente válido, mas não apropriado do ponto de vista ecológico ou preditivo para esse local.

Realizando a análise da regressão entre $\log(\text{Pigmentos Totais})$ e $\log(\text{Mg}^{2+})$ revelou uma associação positiva, estatisticamente significativa e com bom ajuste. O coeficiente angular foi estimado em $1,174$, com erro padrão de $0,217$ e valor de p igual a $1,71 \times 10^{-5}$, indicando que o aumento nas concentrações de magnésio está associado ao aumento nos níveis de pigmentos totais (FIGURA 23).

O modelo apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 0,560, o que significa que aproximadamente 56% da variação nos pigmentos totais pode ser explicada pelas variações em magnésio, com R^2 ajustado de 0,541. Os pressupostos da regressão linear foram atendidos: os resíduos apresentaram distribuição normal ($p = 0,503$), homocedasticidade ($p = 0,408$) e ausência de autocorrelação ($p = 0,472$; $DW = 1,98$).

Figura 20: Modelo de regressão entre os parâmetros Pigmento total e Magnésio na Estação MR



Fonte: Oliveira et al, 2025.

A equação modelada da relação entre pigmento total e magnésio se deu pela seguinte Equação:

$$\ln(\text{Pig_Total}) = 1.33 + 1.17 \cdot \ln(\text{Mg}2) \quad \text{Eq. 20}$$

Por fim, obtivemos a seguinte equação:

$$IET(\text{Mg}) = 10 \cdot \left(6 - \frac{(1.044 - 0.252 \cdot \ln(\text{Mg}2))}{\ln 2} \right) \quad \text{Eq. 21}$$

De acordo com Thorton et al. (1990), esta estação de amostragem se enquadraria em uma área intermediária.

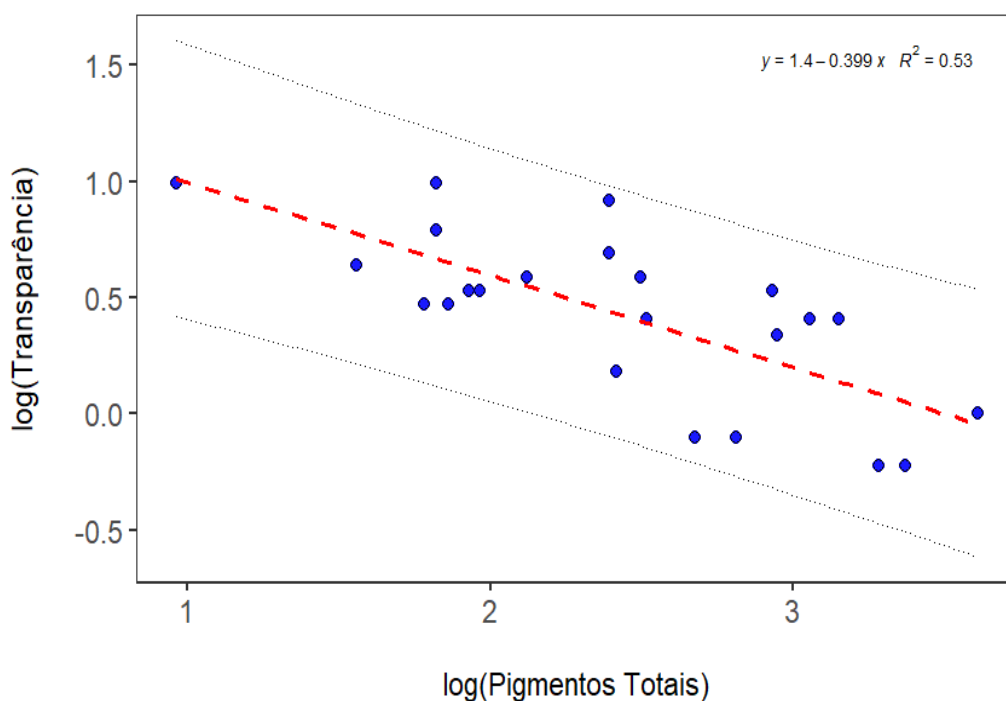
5.3.2.2 Estação MP

A estação Montante Pucuruí é situada sob as coordenadas 04°13'57.2" e 49°46'08.6" na proximidade do município de Novo Repartimento, na calha central a margem esquerda do reservatório.

No ponto de amostragem MP, observou-se uma relação negativa e estatisticamente significativa entre $\log(\text{Transparência})$ e $\log(\text{Pigmentos Totais})$, com coeficiente angular de $-0,399$ (erro padrão = $0,082$; $p < 0,001$), indicando que o aumento na concentração de pigmentos totais está associado à redução da transparência da água.

O modelo apresentou intercepto de $1,396$ ($p < 0,001$) e bom ajuste estatístico, com coeficiente de determinação (R^2) de $0,530$ e R^2 ajustado de $0,507$, explicando cerca de 53% da variabilidade observada. Os resíduos atenderam aos pressupostos da regressão linear, apresentando distribuição normal ($p = 0,854$), homocedasticidade ($p = 0,198$) e ausência de autocorrelação ($p = 0,358$; $DW = 1,82$), conforme evidenciado na Figura 21.

Figura 21: Modelo de Regressão da transparência e pigmentos totais na estação MP



Assim, a equação modelada para transparência:

$$\ln(S) = 1.4 - 0.399 \cdot \ln(\text{Pigmentos Totais}) \quad \text{Eq. 22}$$

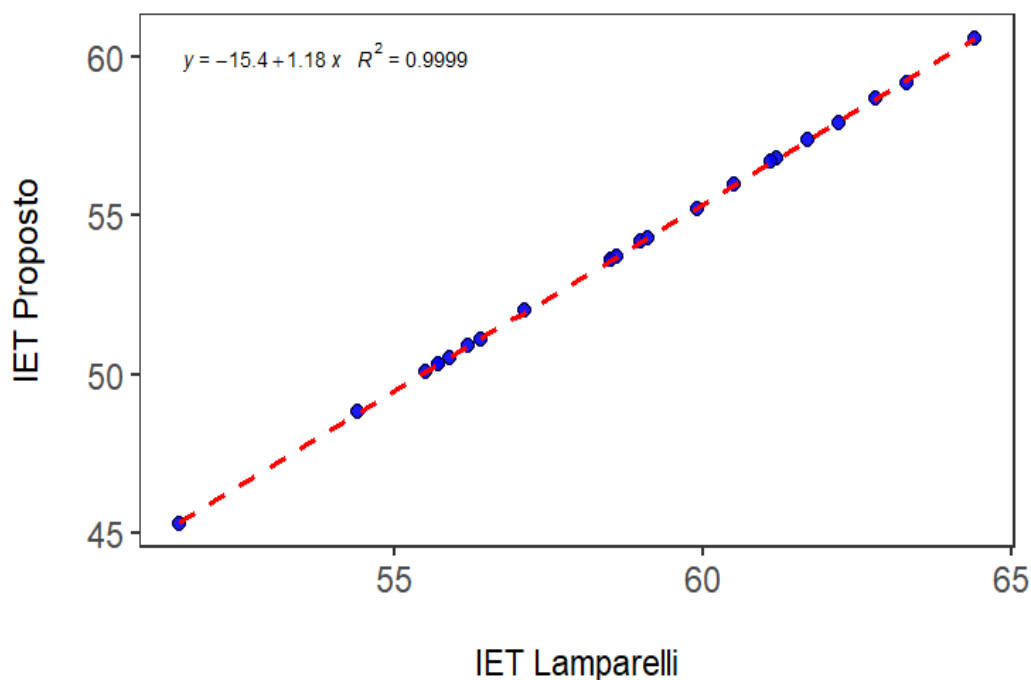
E o novo modelo de IET para a estação MP se deu pela Equação:

$$IET(\text{Pig_Total}) = 10 \cdot \left(6 - \frac{(1.4 - 0.399 \cdot \ln(\text{Pigmentos Totais}))}{\ln 2} \right) \quad \text{Eq. 23}$$

A relação entre o Índice de Estado Trófico (IET) de Lamparelli e o IET Proposto no ponto MP apresentou uma forte correlação linear ($R^2 = 0,9999$). A inclinação superior a 1 indica que o IET Proposto tende a amplificar as variações do estado trófico em relação ao modelo de Lamparelli, especialmente em condições de maior eutrofização.

Esse comportamento sugere que, em valores mais baixos de IET, o modelo de Lamparelli tende a subestimar o estado trófico, enquanto em valores mais elevados essa diferença é corrigida ou até superada pelo índice proposto (Figura 22).

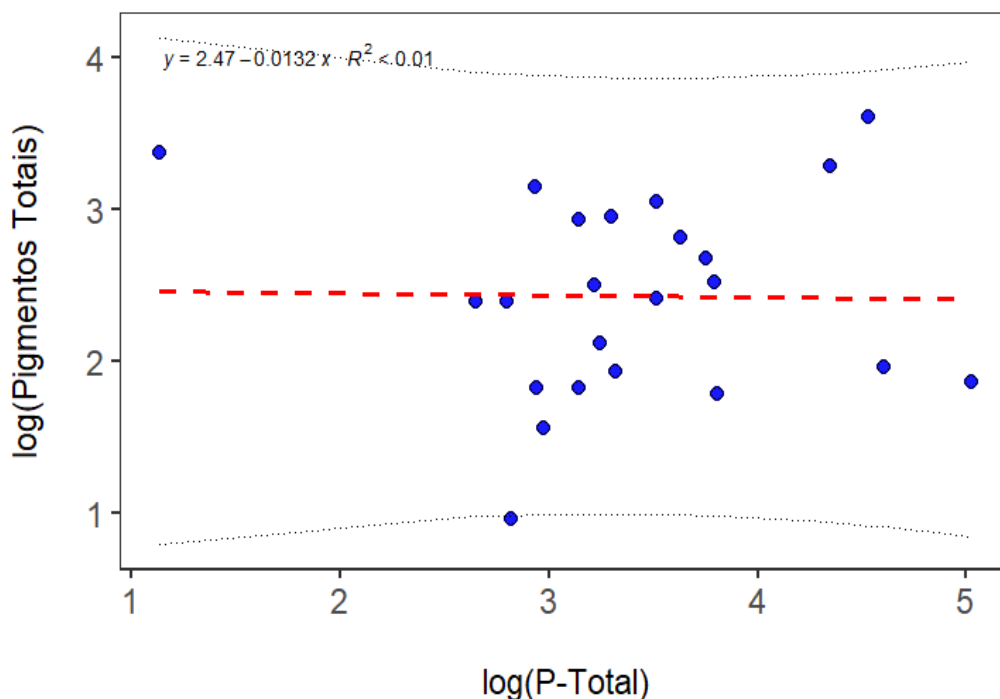
Figura 22: Relação entre o IET de Lamparelli e o modelo de IET proposto para estação MP.



Fonte: Oliveira et al, 2025.

Ao realizar a correlação entre o pigmento total e P-Total encontrados no reservatório da UHE Tucuruí, fazendo o uso do método definido por Lamparelli, obteve-se o seguinte modelo:

Figura 23: Modelo de Regressão da pigmentos totais e fósforo total na estação MP



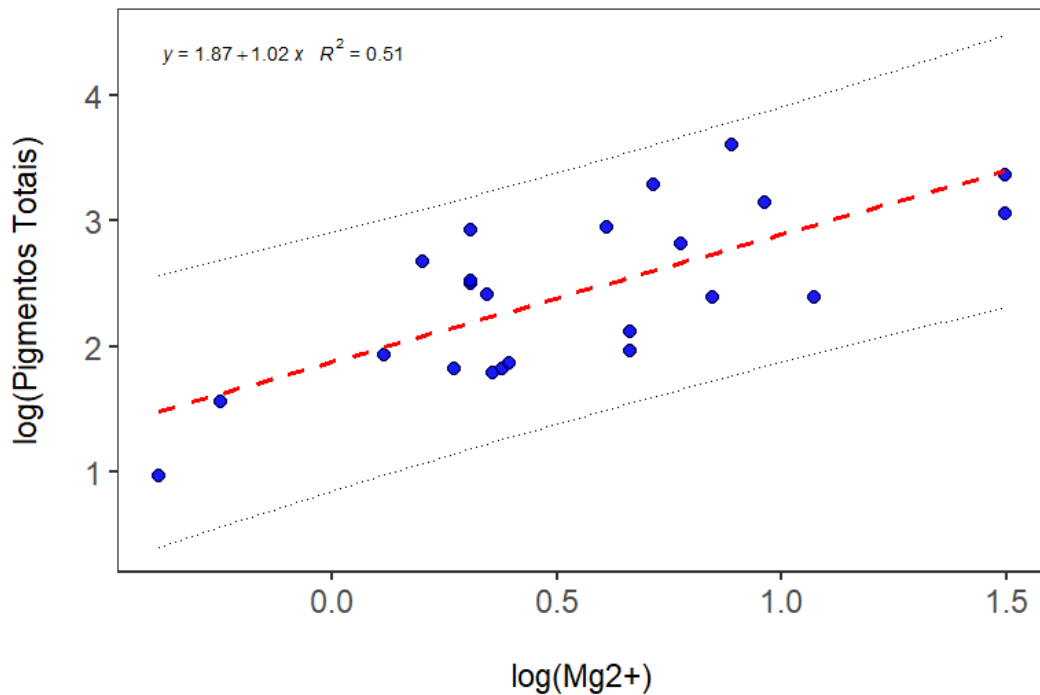
Fonte: Oliveira et al, 2025.

No modelo ajustado entre $\log(\text{Pigmentos Totais})$ e $\log(\text{Mg}^{2+})$, observou-se uma relação positiva e estatisticamente significativa, com coeficiente angular de 1,018 (erro padrão = 0,216; $p < 0,001$), indicando que o aumento na concentração de magnésio está associado ao incremento nos níveis de pigmentos totais.

O intercepto foi estimado em 1,875 ($p < 0,001$), e o modelo apresentou bom ajuste, com R^2 de 0,514 e R^2 ajustado de 0,491, explicando aproximadamente 51% da variação nos pigmentos totais. Os resíduos atenderam aos pressupostos de homocedasticidade ($p = 0,872$) e independência ($p = 0,591$; DW = 2,08). Embora o teste de Shapiro-Wilk tenha apresentado valor de p limítrofe ($p = 0,050$), o padrão geral dos resíduos sugere distribuição próxima da normalidade.

Assim, o modelo é estatisticamente robusto e sugere que o magnésio pode atuar como variável preditora relevante da biomassa fitoplanctônica (FIGURA 24).

Figura 24: Modelo de Regressão dos parâmetros pigmentos totais e magnésio na estação MP



Fonte: Oliveira et al, 2025.

Assim obtivemos o modelo para pigmento total:

$$\ln(\text{Pig}_{\text{Total}}) = 1.87 + 1.02 \cdot \ln(\text{Mg}^{2+}) \quad \text{Eq. 24}$$

Por fim, a equação modelada para o IET na estação MP se deu:

$$\text{IET}(\text{Mg}) = 10 \cdot \left(6 - \frac{(0.654 - 0.407 \cdot \ln(\text{Mg}^{2+}))}{\ln 2} \right) \quad \text{Eq. 25}$$

A estação MP, seguindo a ideia de Wentzel (2001), estaria na área intermediária do reservatório.

5.3.2.3 Estação MB

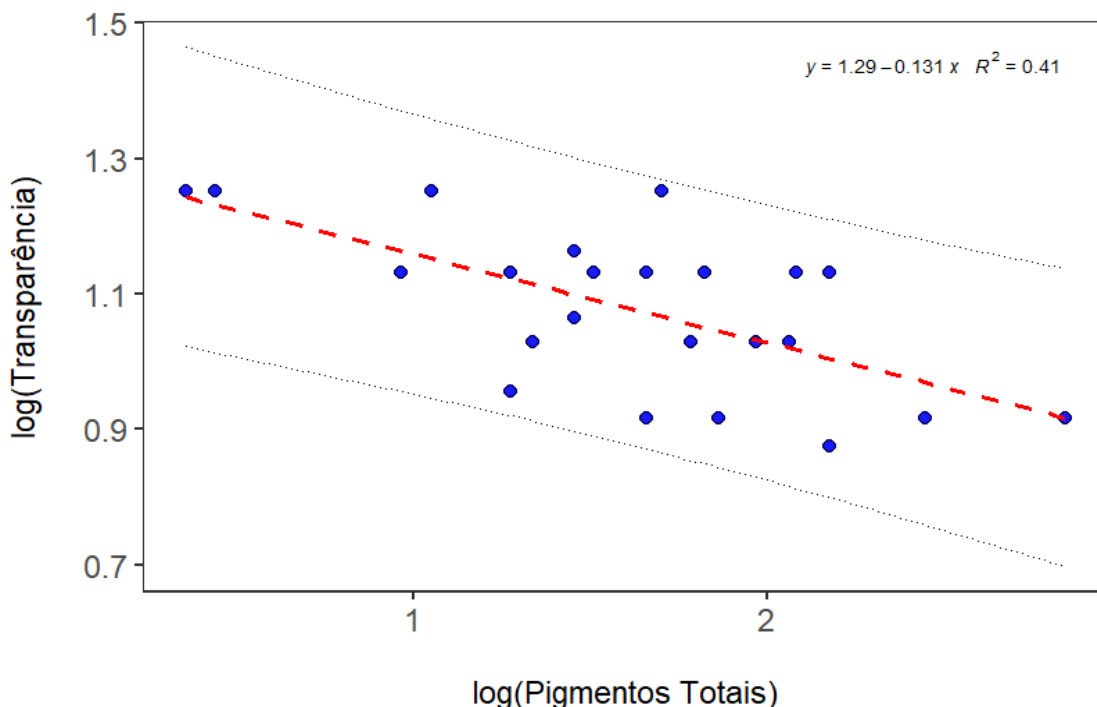
A Estação Montante Belauto, encontra-se mais ao meio do reservatório, sob as coordenadas $04^{\circ}13'57.2''$ e $49^{\circ}30'37.8''$ na proximidade do município de Goianésia

do Pará, que apresenta uma área territorial de 8.509.379.576 Km² e 203.080.756 Habitantes de acordo com o Censo 2022 (IBGE, 2024)

O modelo de regressão entre log(Transparência) e log(Pigmentos Totais) indicou uma associação negativa e estatisticamente significativa. O coeficiente angular foi estimado em $-0,131$ (erro padrão = 0,034; $p = 0,001$), o que indica que valores mais elevados de pigmentos totais estão associados a menores níveis de transparência da água.

O modelo explicou aproximadamente 40,9% da variação observada ($R^2 = 0,409$), com R^2 ajustado de 0,380. Os resíduos atenderam a todos os pressupostos da regressão linear: apresentaram distribuição normal ($p = 0,835$), homocedasticidade ($p = 0,573$) e ausência de autocorrelação ($p = 0,514$; DW = 2,04) (Figura 25).

Figura 25: Modelo de regressão da transparência e Pigmentos totais na estação MB



Fonte: Oliveira et al, 2025.

Como resultante obteve-se a seguinte equação para o parâmetro transparência:

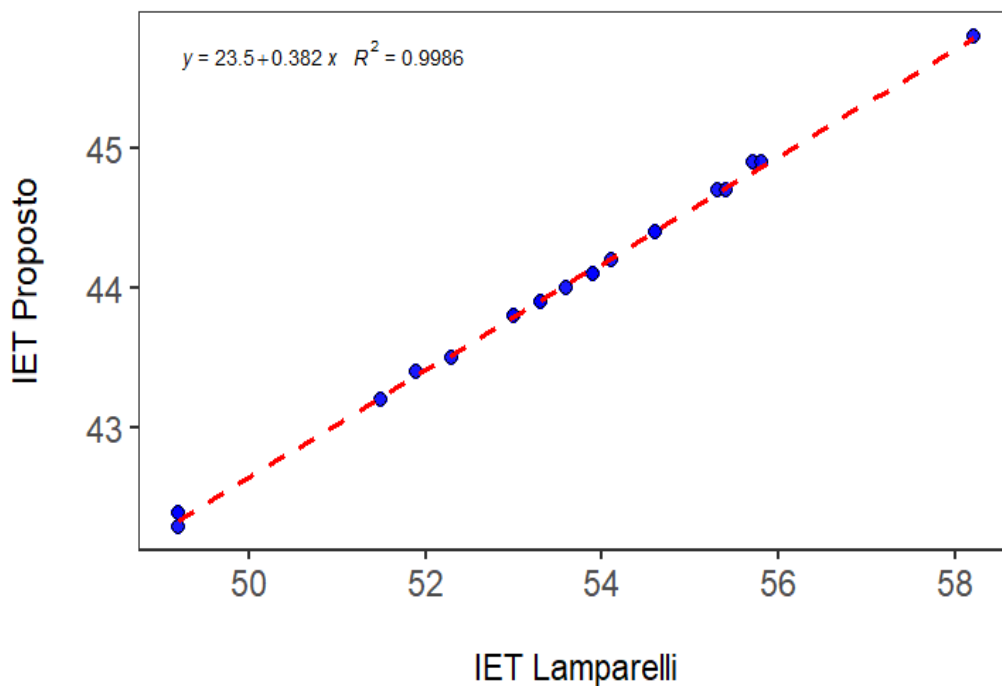
$$\ln(S) = 1.29 - 0.131 \cdot \ln(Pig_Total) \quad \text{Eq. 26}$$

Substituindo na Equação de Carlson, obtivemos o seguinte modelo de IET para pigmentos totais, na estação MB.

$$IET(Pig_Total) = 10 \cdot \left(6 - \frac{(1.29 - 0.131 \cdot \ln(Pig_Total))}{\ln 2} \right) \quad \text{Eq. 27}$$

A análise da relação entre o Índice de Estado Trófico (IET) de Lamparelli e o IET Proposto no ponto MB evidenciou uma forte correlação linear ($R^2 = 0,9986$). A inclinação reduzida revela uma tendência consistente de superestimação do estado trófico pelo modelo de Lamparelli quando comparado ao índice desenvolvido especificamente para o reservatório de Tucuruí (FIGURA 26).

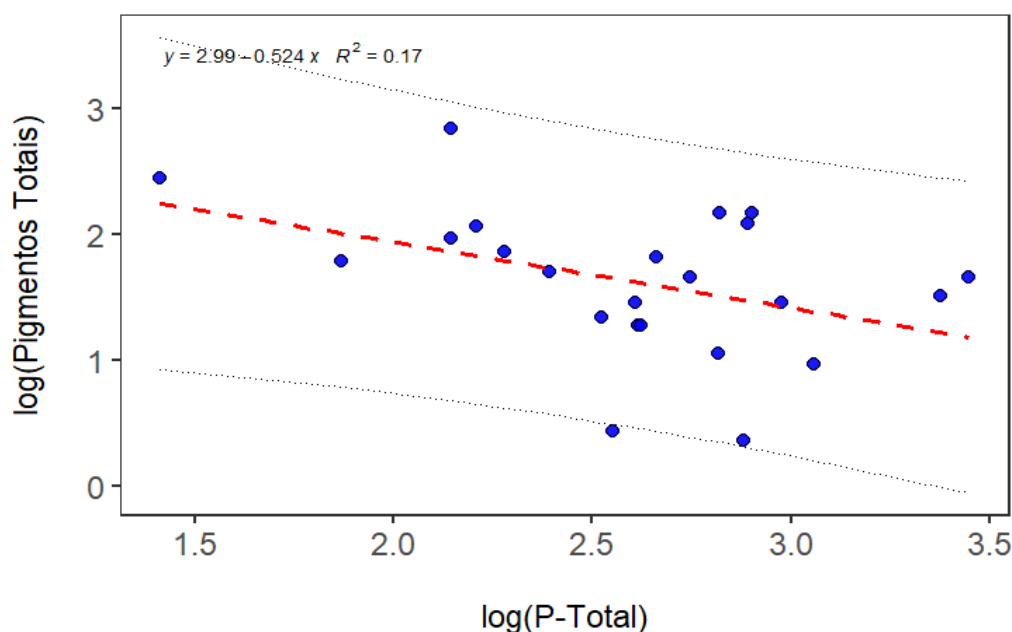
Figura 26: Relação do IET Lamparelli e o proposto na Estação MB.



Fonte: Oliveira et al, 2025.

Ao realizar a correlação entre pigmentos totais e P-Total, conforme definido por Lamparelli, na estação de monitoramento MB, obteve-se o seguinte modelo:

Figura 27: Modelo de regressão dos pigmentos totais e P-Total na Estação MB



Fonte: Oliveira et al, 2025.

No ponto MB, foi ajustado um modelo de regressão logarítmica entre os pigmentos totais e o fósforo total, resultando em uma relação estatisticamente significativa ($p = 0,04999$), embora com baixo poder explicativo ($R^2 = 0,17$). O coeficiente negativo estimado ($\beta = -0,5240$) indica uma tendência inversa entre as variáveis, ou seja, com o aumento do fósforo total, observa-se uma redução nos pigmentos totais.

Essa direção da relação contraria a expectativa ecológica clássica, em que se supõe que o aumento da disponibilidade de fósforo favoreça a proliferação fitoplanctônica. No entanto, essa inversão pode ser reflexo de particularidades locais no ponto MB, como a limitação por outro nutriente, influência de fatores físicos ou processos de sedimentação diferenciados.

Os testes diagnósticos não indicaram problemas nos resíduos: a normalidade foi confirmada ($p = 0,501$), a homocedasticidade foi atendida ($p = 0,6127$) e não houve autocorrelação significativa (Durbin-Watson = 1,91; $p = 0,3887$). Embora o modelo atenda aos pressupostos estatísticos, sua baixa capacidade preditiva e a direção oposta do efeito sugerem que o uso isolado do fósforo total como preditor pode não ser adequado para representar a dinâmica trófica nesse ponto específico.

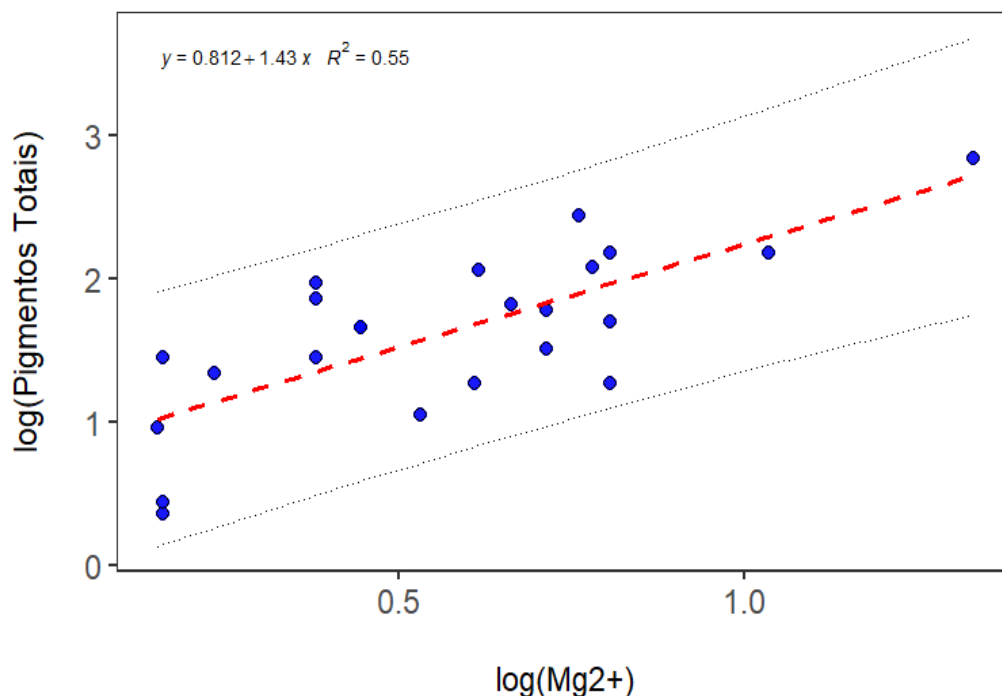
Na regressão entre $\log(\text{Pigmentos Totais})$ e $\log(\text{Mg}^{2+})$ indicou uma associação positiva estatisticamente significativa, com coeficiente angular estimado em 1,4303

(erro padrão = 0,2810; $p < 0,001$). Isso sugere que o aumento na concentração de magnésio está fortemente associado ao aumento nos níveis de pigmentos totais.

O modelo apresentou $R^2 = 0,552$, explicando 55,2% da variação em $\log(\text{Pig_Total})$, o que representa um bom poder explicativo. O intercepto foi estimado em 0,8117 ($p < 0,001$). Todos os pressupostos da regressão linear foram atendidos: os resíduos apresentaram distribuição normal ($p = 0,262$), homocedasticidade ($p = 0,155$) e independência ($p = 0,461$; $DW = 1,99$).

Esses resultados indicam que o magnésio pode ser um importante fator ecológico relacionado à biomassa fitoplanctônica na área estudada, provavelmente devido ao seu papel na síntese de clorofila e no metabolismo celular do fitoplâncton (FIGURA 28).

Figura 28: Modelo de regressão dos pigmentos totais e magnésio na estação MB.



Fonte: Oliveira et al, 2025.

A partir disto obteve-se as seguintes equações:

$$\ln(\text{Pig_Total}) = 0.812 + 1.43 \cdot \ln(\text{Mg2}) \quad \text{Eq. 28}$$

$$\text{IET}(\text{Mg}) = 10 \cdot \left(6 - \frac{(1.184 - 0.188 \cdot \ln(\text{Mg2}))}{\ln 2} \right) \quad \text{Eq. 29}$$

Por fim, seguindo a ideia de Thorton (1990), a estação de monitoramento MB encontra-se na área intermediária.

5.3.3 Área Lótica

5.3.3.1

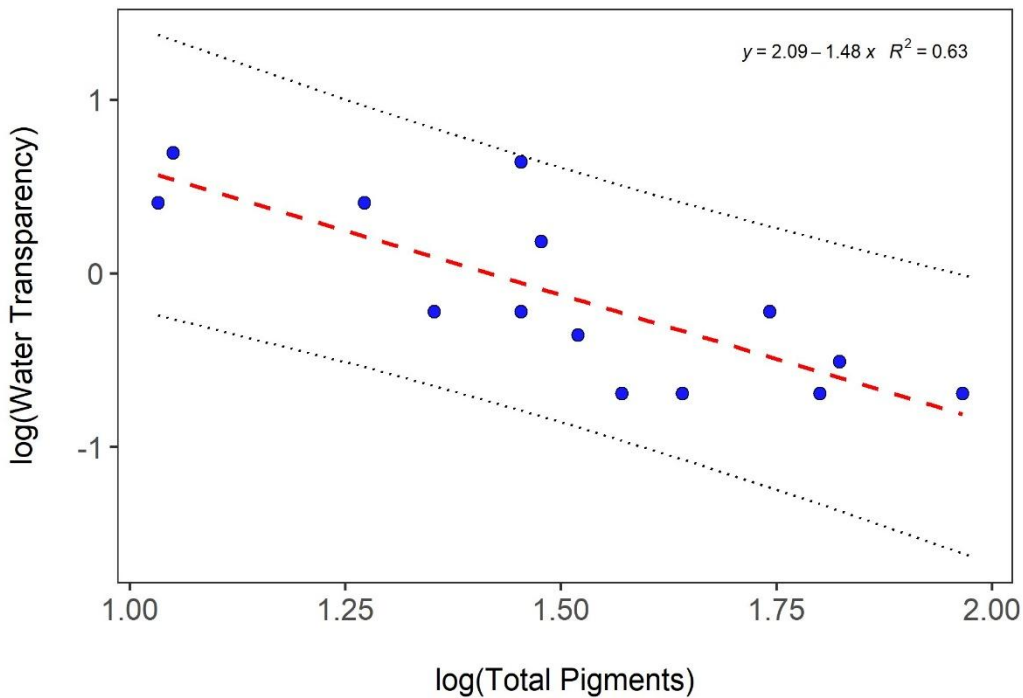
Estação MI

A estação Montante Ipixuna encontra-se sob as coordenadas 04°52'35.2" e 49°24'31.2", é a penúltima estação de amostragem e apresenta característica maior de rio ao invés de reservatório, se enquadrando na região lótica conforme já informado por Wetzel (2001)..

Neste ponto, a regressão entre $\log(\text{Transparência})$ e $\log(\text{Pigmentos Totais})$ revelou uma associação negativa, forte e estatisticamente significativa. O coeficiente angular foi estimado em $-1,48$ (erro padrão $< 0,001$), indicando que o aumento da concentração de pigmentos totais está fortemente associado à redução da transparência da água. O intercepto foi estimado em $2,092$ ($p = 0,001$), e o modelo apresentou excelente desempenho estatístico, com $R^2 = 0,63$ e R^2 , explicando cerca de 63% da variação na transparência observada.

Os resíduos atenderam a todos os pressupostos da regressão linear: apresentaram distribuição normal ($p = 0,642$), homocedasticidade ($p = 0,866$) e ausência de autocorrelação ($p = 0,633$; DW = 2,097). Esses resultados reforçam a validade do modelo ajustado.

Figura 29: Modelo de regressão dos parâmetros transparência e pigmentos totais na estação MI



Fonte: Oliveira et al, 2025.

A partir do modelo acima, foi possível propor duas equações:

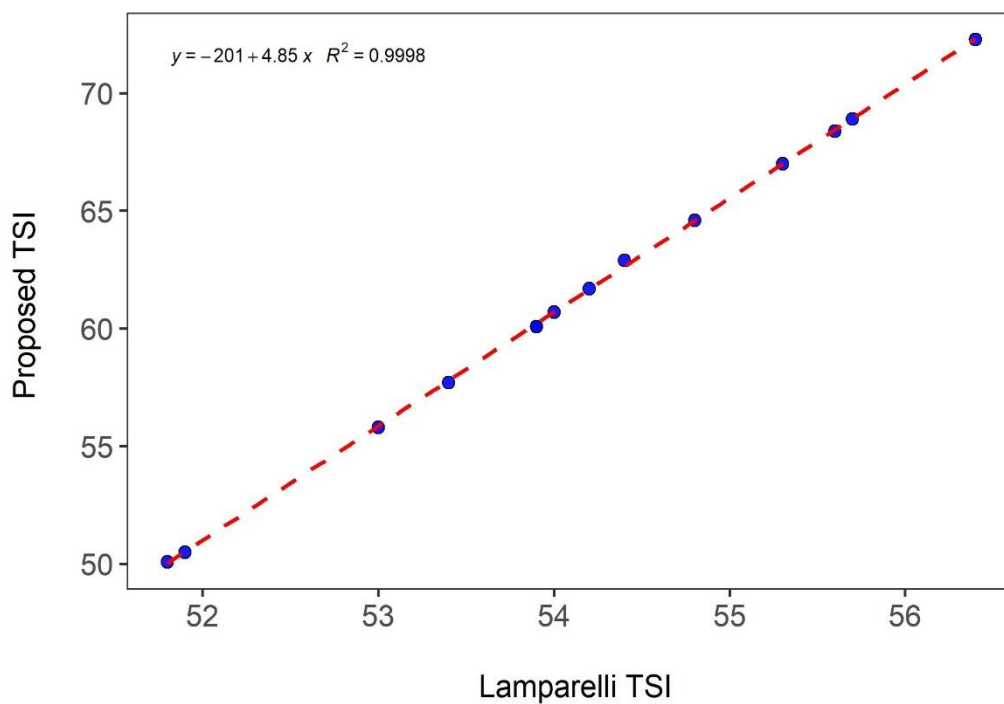
$$\ln(S) = 1.29 - 0.131 \cdot \ln(Pig_Total) \quad \text{Eq. 30}$$

$$IET(Pig_Total) = 10 \cdot \left(6 - \frac{(1.29 - 0.131 \cdot \ln(Pigmentos\ Totais))}{\ln 2} \right) \quad \text{Eq. 31}$$

A análise da relação entre o Índice de Estado Trófico (IET) de Lamparelli e o IET Proposto no ponto MI revelou uma forte correlação linear ($R^2 = 0,9998$). A inclinação elevada demonstra que o IET Proposto apresenta uma sensibilidade muito maior às variações do estado trófico em comparação ao modelo de Lamparelli.

Esse padrão indica uma tendência clara de subestimação do estado trófico pelo modelo de Lamparelli, especialmente em condições de maior eutrofização. A interceptação negativa reforça a diferença estrutural entre os modelos, evidenciando que o IET Proposto corrige de forma significativa as limitações do índice genérico ao considerar as especificidades ambientais do reservatório de Tucuruí (FIGURA 30).

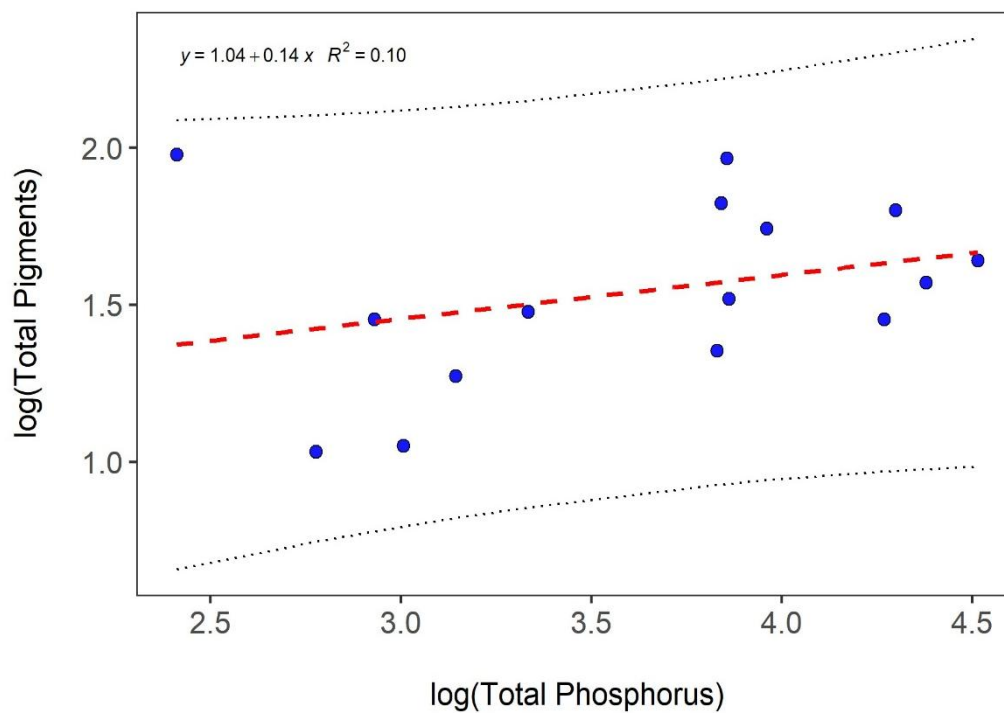
Figura 30: Modelo IET Lamparelli e o IET proposto para a Estação de amostragem MI.



Fonte: Oliveira et al, 2025.

No modelo de regressão dos pigmentos totais e P-Total na estação MI, obteve-se o seguinte modelo:

Figura 31: Modelo de regressão dos parâmetros pigmentos totais e P-Total na estação MI



Fonte: Autores, 2025.

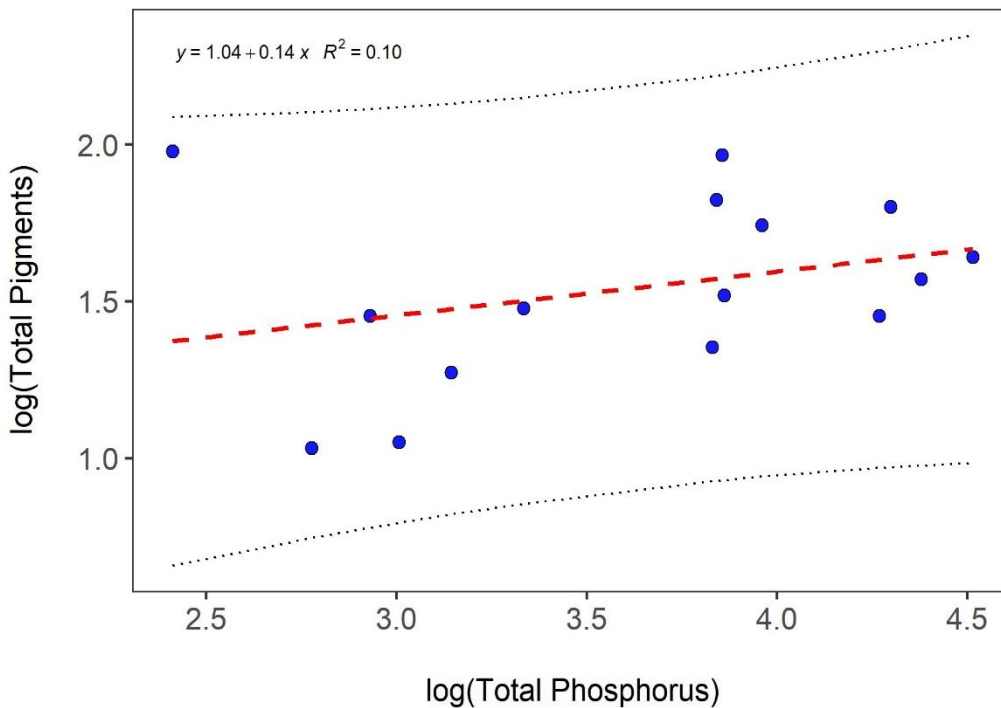
No ponto de amostragem MI, a regressão entre $\log(\text{Pigmentos Totais})$ e $\log(\text{Fósforo Total})$ não revelou uma relação estatisticamente significativa entre as variáveis. O coeficiente angular foi estimado em 0,14, com erro padrão de 0,119 e valor de p igual a 0,260, indicando que o fósforo total não explicou de forma consistente a variação na concentração de pigmentos fitoplanctônicos nesse ponto. O intercepto foi estimado em 1,036, com significância estatística ($p = 0,260$).

No entanto, o modelo apresentou um desempenho fraco, com R^2 de apenas 10% e R^2 , caracterizando um baixo poder explicativo. Em relação aos pressupostos da regressão linear, os resíduos apresentaram distribuição normal ($p = 0,699$) e ausência de autocorrelação ($p = 0,8605$; $DW = 2,437$), mas foi observada heterocedasticidade significativa, conforme indicado pelo teste de Breusch-Pagan ($p = 0,013$). Isso sugere que a variância dos resíduos não é constante, o que pode comprometer a confiabilidade das estimativas associadas ao modelo. Dessa forma, os resultados indicam que, no ponto MI, o fósforo total não se comporta como um bom preditor da biomassa fitoplanctônica e, portanto, seu uso isolado como indicador do estado trófico pode levar a interpretações equivocadas.

Essa evidência reforça a limitação de modelos genéricos como o IET de Lamparelli e destaca a importância de modelos ajustados às condições locais e às variáveis ecologicamente relevantes para o sistema estudado.

Na regressão entre $\log(\text{Pigmentos Totais})$ e $\log(\text{Mg}^{2+})$ indicou uma associação negativa estatisticamente significativa. O coeficiente angular foi estimado em $-0,707$ (erro padrão = 0,197; $p = 0,003$), sugerindo que o aumento na concentração de magnésio está associado à redução dos níveis de pigmentos totais. O intercepto foi estimado em 1,898 ($p = 0,001$). O modelo apresentou $R^2 = 0,498$, explicando aproximadamente 49% da variação nos pigmentos totais, o que representa um ajuste moderado, mas consistente com os dados disponíveis. Os resíduos atenderam plenamente aos pressupostos da regressão linear: apresentaram distribuição normal ($p = 0,991$), homocedasticidade ($p = 0,795$) e ausência de autocorrelação ($p = 0,728$; $DW = 2,336$) evidenciado na Figura 32.

Figura 32: Modelo de regressão entre os parâmetros pigmentos totais e magnésio na estação de amostragem MI.



Fonte: Oliveira et al, 2025.

Assim, obteve as seguintes equações modelada de Pigmento total e do IET de Magnésio:

$$\ln(\text{Pig}_{\text{Total}}) = 1.9 - 0.707 \cdot \ln(\text{Mg}2) \quad \text{Eq. 32}$$

$$\text{IET}(\text{Mg}) = 10 \cdot \left(6 - \frac{1.0411 + 0.09617 \cdot \ln(\text{Mg}2)}{\ln 2} \right) \quad \text{Eq. 33}$$

5.3.3.2 Estação M5

A estação Montante 5 e o último ponto e encontra-se sob as coordenadas 05°02'44.3" e 49°19'46.8" na proximidade do município de Nova Ipixuna e seguindo a ideia de Thorton et al (1990) esse ponto encontra-se na região lótica, é o ponto que mais tem a característica de rio.

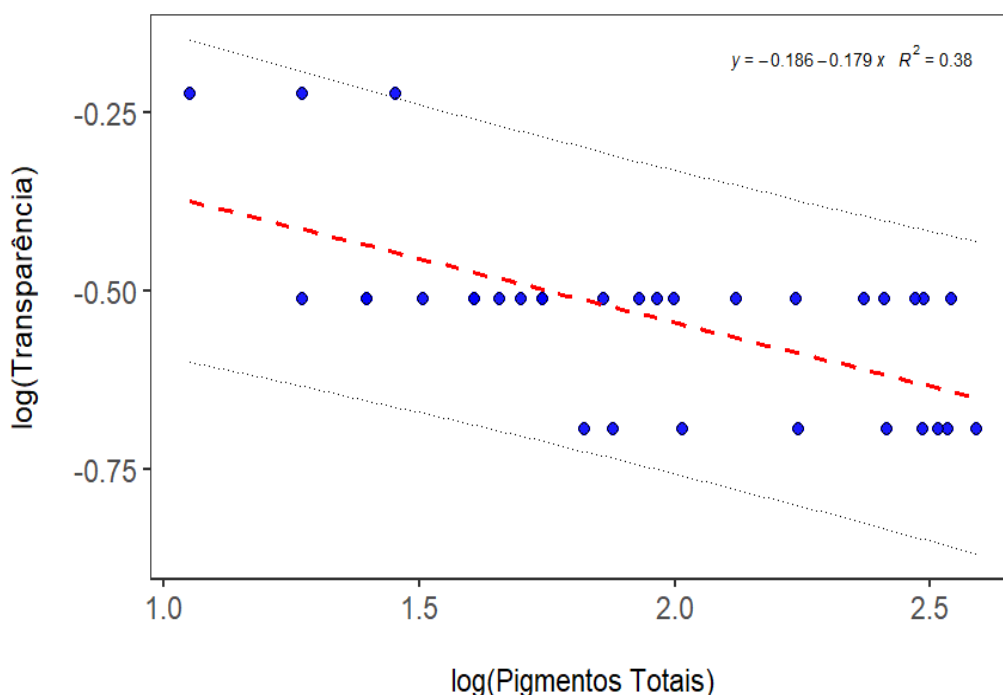
No ponto de amostragem M5, a análise da relação entre log(Transparência) e log(Pigmentos Totais) indicou uma associação negativa e estatisticamente significativa.

O modelo apresentou coeficiente angular de $-0,179$ (erro padrão = $0,041$; $p < 0,001$), sugerindo que o aumento da concentração de pigmentos totais está relacionado à redução da transparência da água. O intercepto foi de $-0,186$ ($p =$

0,029), e o modelo explicou 38,3% da variância em $\log(\text{Transparência})$ ($R^2 = 0,383$). Os resíduos apresentaram distribuição normal ($p = 0,482$) e homocedasticidade ($p = 0,185$), mas o teste de Durbin-Watson indicou autocorrelação positiva significativa ($p < 0,001$; $DW = 0,66$).

Embora a regressão seja significativa e bem ajustada, a presença de autocorrelação nos resíduos indica que há dependência temporal ou estrutural entre as observações, o que pode comprometer a validade das inferências e exige atenção em análises futuras, especialmente quanto à estrutura dos dados (Figura 33).

Figura 33: Modelo de regressão dos parâmetros transparência e pigmentos totais na estação de amostragem M5



Fonte: Oliveira et al, 2025.

A equação encontrada para transparência e o IET proposto foi:

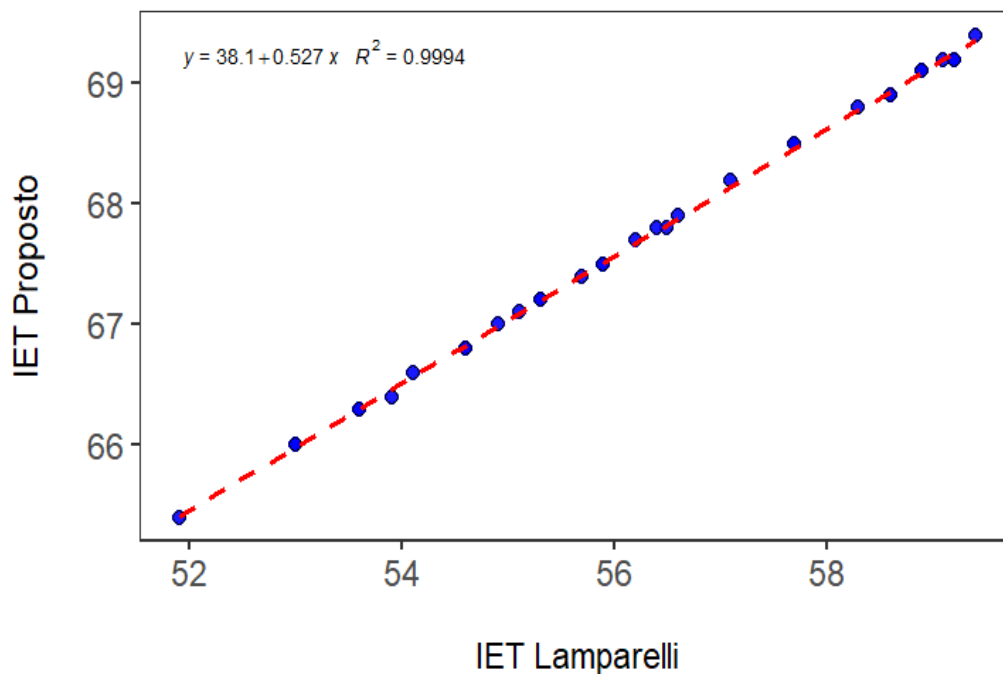
$$\ln(S) = 0.186 - 0.179 \cdot \ln(\text{Pigmentos Totais}) \quad \text{Eq. 34}$$

$$IET(\text{Pig_Total}) = 10 \cdot \left(6 - \frac{(-0,186 - 0,179 \cdot \ln(\text{Pigmentos Totais}))}{\ln 2} \right) \quad \text{Eq. 35}$$

A análise da relação entre o Índice de Estado Trófico (IET) de Lamparelli e o IET Proposto para o ponto M5 revelou uma forte correlação linear ($R^2 = 0,9994$). A

inclinação inferior a 1 indica uma tendência sistemática de superestimação do estado tráfego pelo modelo de Lamparelli quando comparado ao índice calibrado para as condições ambientais específicas do reservatório de Tucuruí (Figura 34).

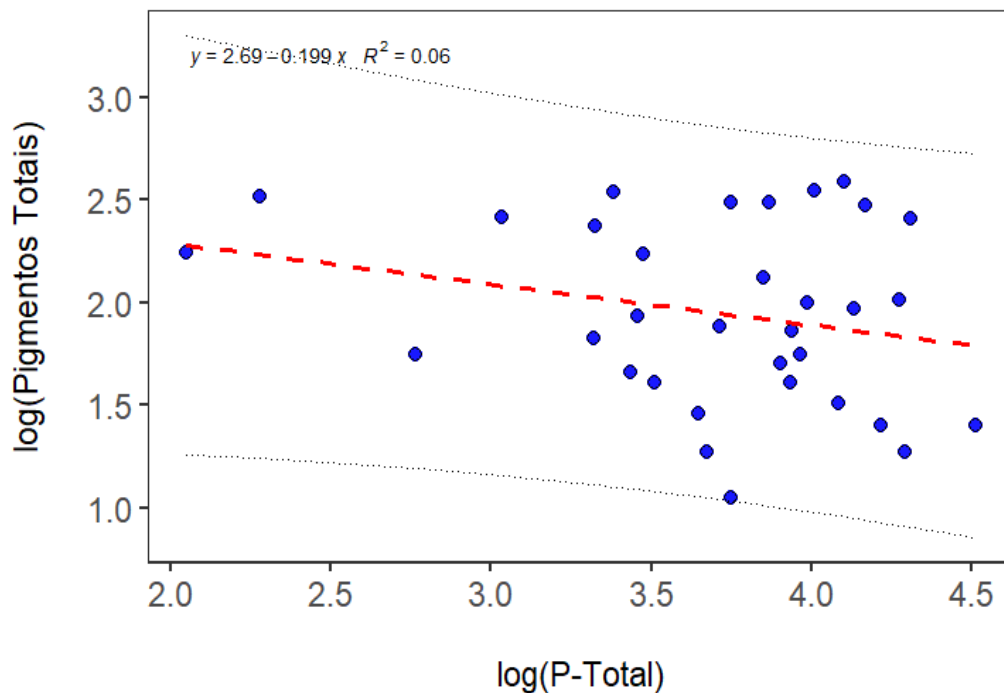
Figura 34: Relação entre IET Lamparelli e Proposto na estação M5



Fonte: Oliveira et al, 2025.

Na regressão entre pigmentos totais e P-Total, obteve-se o seguinte modelo:

Figura 35: Modelo de regressão dos parâmetros pigmentos totais e P-Total na estação de amostragem M5



Fonte: Oliveira et al, 2025.

No ponto M5, foi ajustado um modelo de regressão logarítmica para investigar a relação entre os pigmentos totais e o fósforo total. O modelo estimou um intercepto significativo ($\beta_0 = 2,6852$; $p < 0,001$), porém o coeficiente angular associado ao log do fósforo total não foi estatisticamente significativo ($\beta = -0,1990$; $p = 0,164$), indicando ausência de evidência de uma relação linear entre as variáveis neste local.

O coeficiente de determinação ($R^2 = 0,061$) também foi bastante baixo, reforçando a fraca capacidade explicativa do modelo. Apesar da fraca relação entre as variáveis, os resíduos do modelo atenderam aos principais pressupostos estatísticos: apresentaram distribuição normal (Shapiro-Wilk: $p = 0,3588$) e homocedasticidade (Breusch-Pagan: $p = 0,1718$). Contudo, o teste de Durbin-Watson indicou presença de autocorrelação positiva nos resíduos ($DW = 0,83$; $p = 7,33 \times 10^{-5}$), o que pode comprometer a validade das inferências estatísticas, sugerindo que há uma estrutura temporal ou sequencial nos dados que não foi capturada pelo modelo.

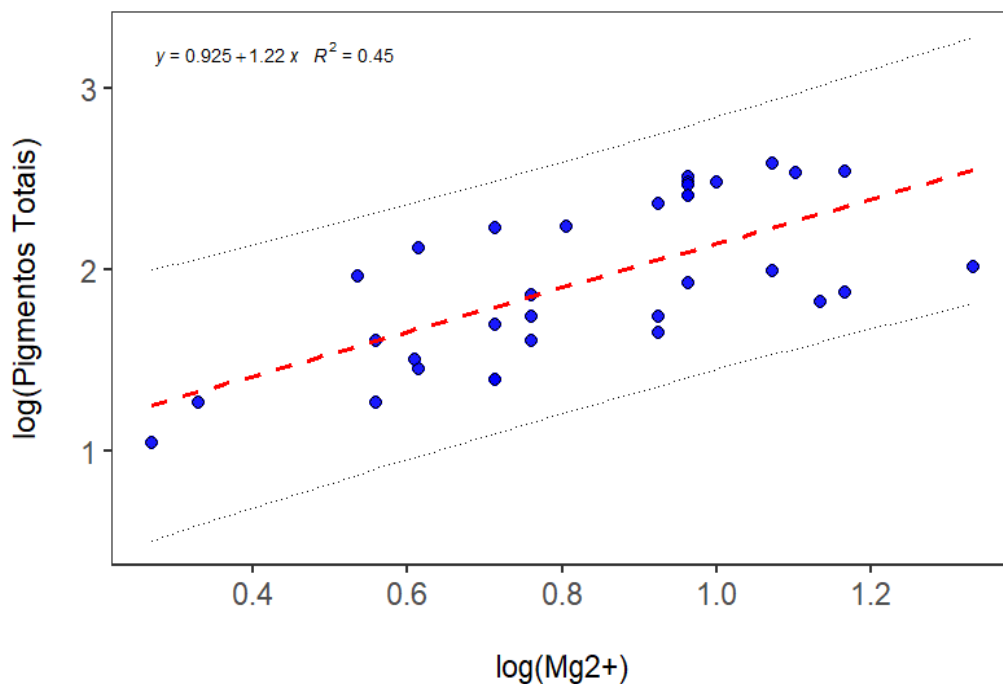
Na regressão entre $\log(\text{Pigmentos Totais})$ e $\log(\text{Mg}^{2+})$ indicou uma relação positiva e altamente significativa, com coeficiente angular de 1,222 (erro padrão = 0,241; $p < 0,001$), sugerindo que aumentos na concentração de magnésio estão associados a elevações expressivas nos níveis de pigmentos totais.

O modelo apresentou bom ajuste estatístico ($R^2 = 0,454$), explicando cerca de 45,4% da variação observada nos pigmentos, e contou com 33 observações válidas.

No entanto, a análise dos resíduos apontou violação da normalidade ($p = 0,004$) e heterocedasticidade significativa ($p = 0,011$), além de autocorrelação positiva nos resíduos ($p < 0,001$; $DW = 0,83$), indicando que o modelo viola pressupostos importantes da regressão linear.

Apesar da força estatística da associação, esses desvios sugerem cautela na interpretação dos coeficientes e indicam que o modelo pode estar omitindo variáveis relevantes ou sofrendo influência de padrões temporais ou estruturais nos dados (Figura 36).

Figura 36: Modelo de regressão dos parâmetros pigmentos totais e magnésio na estação de amostragem no M5



Fonte: Oliveira et al, 2025.

A equação modelada para pigmento total e IET de Magnésio proposto foram:

$$\ln(\text{Pig_Total}) = 0.925 + 1.22 \cdot \ln(\text{Mg}2) \quad \text{Eq. 36}$$

$$\text{IET}(\text{Mg}) = 10 \cdot \left(6 - \frac{(-0.352 - 0.218 \cdot \ln(\text{Mg}2))}{\ln 2} \right) \quad \text{Eq. 37}$$

5.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE IET DE LAMPARELLI E OS NOVOS IET'S PROPOSTOS

Foram comparados os resultados das propostas de Novo Índice para cada estação de amostragem no reservatório da UHE Tucuruí com a metodologia de IET de Lamparelli, comparando seus valores e classificações.

Para a classificação dos IET's foi utilizado os critérios de classificação definido por Lamparelli, conforme evidenciado na Tabela 03:

Tabela 3: IET e equivalência com medidas de fósforo total (P - Total), clorofila a(CL) e transparência(S)



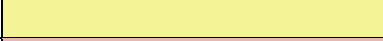



Nível Trófico	Fósforo Total (mg.L ⁻¹)	Clorofila a (mg.L ⁻¹)	S (m)	IET
Ultraoligotrófico	≤0.008	≤1.17	≥2.2	≤47
Oligotrófico	0.008<PT≤0.019	1.17<CL≤3.24	2.4>S≥1.7	47<IET≤52
Mesotrófico	0.019<PT≤0.052	3.24<CL≤11.03	1.7>S≥1.1	52<IET≤ 59
Eutrófico	0.052<PT≤0.120	11.03<CL≤30.55	1.1>S≥0.8	59<IET≤ 63
Supereutrófico	0.120<PT≤0.233	30.55<CL≤69.05	0.8>S≥0.6	63<IET≤ 67
Hipereutrófico	>0,223	>69.05	<0.6	>67

Fonte: Lamparelli, (2004).

No Total foram utilizados 284 resultados de IET entre os anos de 2003 a 2014, das 12 estações de amostragem, sendo que os modelos propostos só puderam ser utilizados a primeira camada de análise de água, posteriormente a isso os modelos matemáticos não se ajustam.

Na Tabela 4, foram colocados o nível trófico por cor para uma melhor visualização da classificação encontrada nas estações de amostragem.

Tabela 4: Distinção por cor dos diferentes níveis tróficos

Nível Trófico	Cor
Ultraoligotrófico	
Oligotrófico	
Mesotrófico	
Eutrófico	
Supereutrófico	
Hipereutrófico	

Fonte: Lamparelli, 2004.

3.2.4 Estação C1

Para a Estação de monitoramento C1, teve 21 resultados que puderam ser utilizados, entre os anos de 2006 a 2016, para calcular os IET de Lamparelli e o proposto, fazendo o uso dos parâmetros fósforo total (P-Total), clorofila a (CL) ou pigmento, transparência(S) e magnésio, evidenciado na Tabela 4:

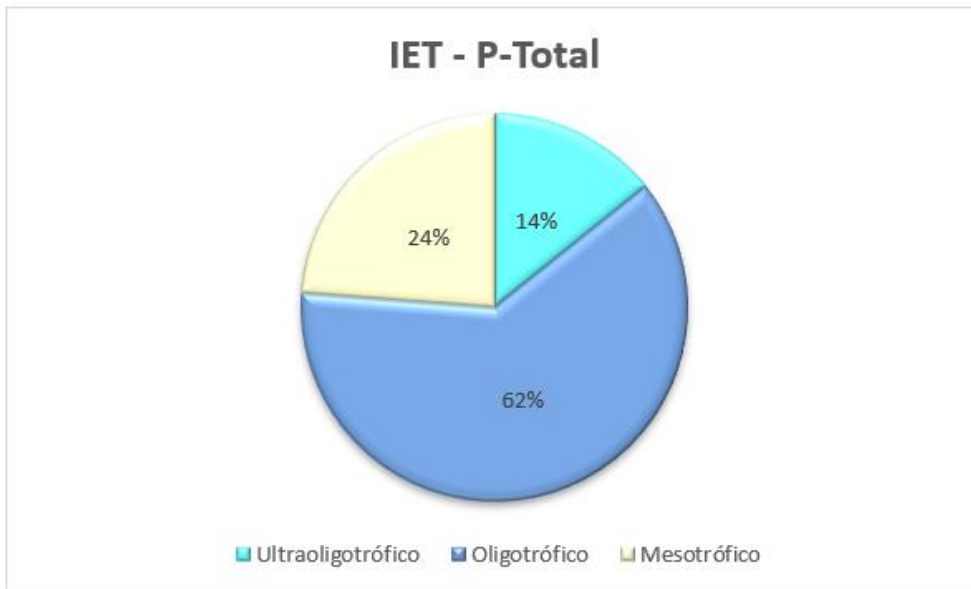
Tabela 5: Resultado dos cálculos dos IET de Lamparelli e do IET proposto para a estação de monitoramento C1 e classificação do seu nível trófico

Ano/mês	Período	Índice de Lamparelli			Novo Índice	
		IET_P-Total	IET_CL	IET_S	IET_CL	IET_MG
2005/12	Chuvoso	47,2	59,2	52,3	49,1	48,3
2006/06	Seco	50,5	57	44,2	47,7	48,7
2006/03	Chuvoso	49,9	56,8	46,8	47,6	46,5
2006/09	Seco	48,1	57,7	50	48,1	49,2
2007/09	Seco	45,7	52,3	46,8	44,7	44,5
2008/09	Seco	43,5	53,6	46,8	45,5	47,3
2009/03	Chuvoso	55,3	59,9	51,5	49,6	47,6
2009/09	Seco	49,8	49,2	44,2	42,7	42,4
2010/12	Chuvoso	49,5	57,3	50	47,9	47,1
2011/12	Chuvoso	49,2	56	45,1	47,1	49,5
2012/04	Chuvoso	51	54,4	44,2	46	45,6
2012/07	Seco	51,4	53	44,2	45,1	45,4
2012/10	Seco	54,1	56,4	49,3	47,3	48,2
2013/10	Seco	52,7	52,6	45,1	44,9	43,8
2014/04	Chuvoso	52,8	55,5	46,8	46,7	45,8
2014/01	Chuvoso	51,9	53,9	45,7	45,7	46,4
2014/07	Seco	49,9	52,3	42,3	44,7	45,3
2015/07	Seco	48,4	51,5	42,3	44,1	45
2015/10	Seco	44,5	56,9	46,2	47,7	48,5
2016/04	Chuvoso	57,1	64,1	50,7	52,3	49
2016/01	Chuvoso	51,3	61,5	49,3	50,6	49,5

Fonte: Oliveira et al, 2025..

Assim, pode-se perceber que com o IET_P-Total calculado pelo método de Lamparelli, a estação de amostragem C1 apresentou valores que variaram de 43,5 mg.L⁻¹, à 57,1 mg.L⁻¹ apresentando 62% como oligotrófica, 24% como mesotrófico e 14% como ultraoligotrófico, conforme demonstra a Figura 37:

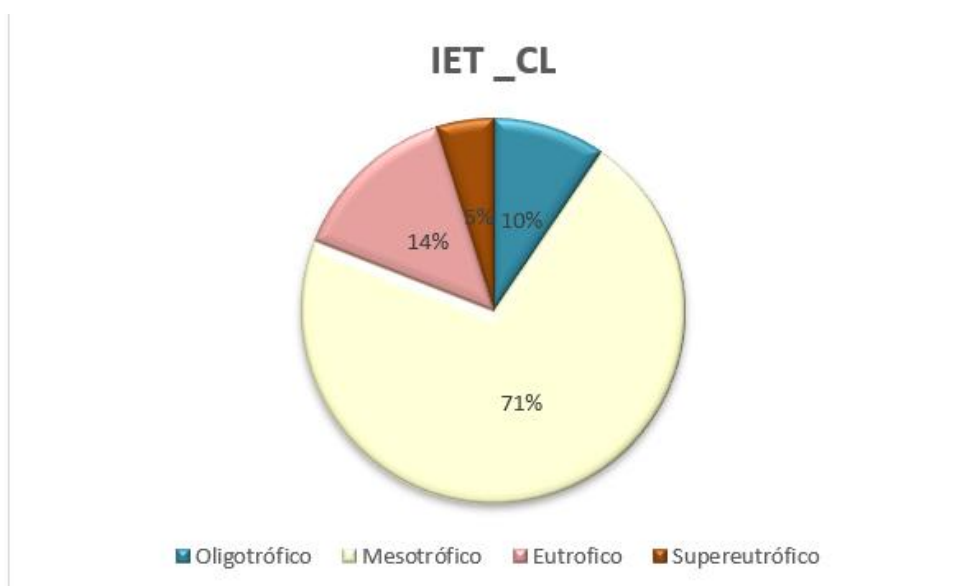
Figura 37: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação C1 para o IET _ P-Total de Lamparelli



Fonte: Autora, 2025.

Para o IET_CL os valores variaram de $49,2 \text{ mg.L}^{-1}$ a $64,1 \text{ mg.L}^{-1}$, sendo que em maioria os resultados apresentaram nível trófico como mesotrófico com 63% dos resultados, 24% apresentou a classificação mesotrófico e 14% ultraoligotrófico (FIGURA 38).

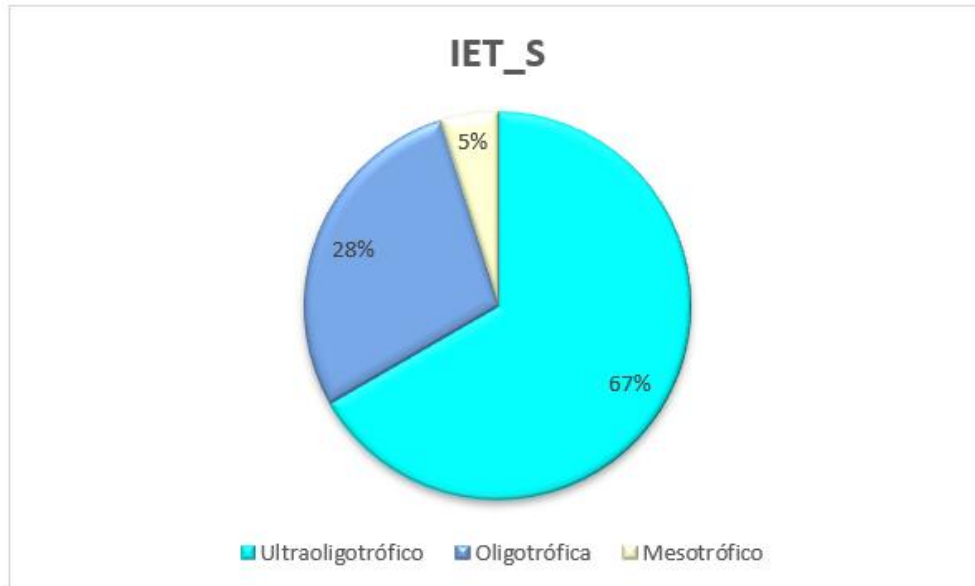
Figura 38: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação C1 para o IET _CL de Lamparelli



Fonte: Autora, 2025.

Para IET_S de Lamparelli os valores variaram de $42,3 \text{ mg.L}^{-1}$ a $52,3 \text{ mg.L}^{-1}$, sendo que 67% dos resultados apresentaram o nível trófico como mesotrofico, 28% oligotrófico e 5% mesotrófico (Figura 39)

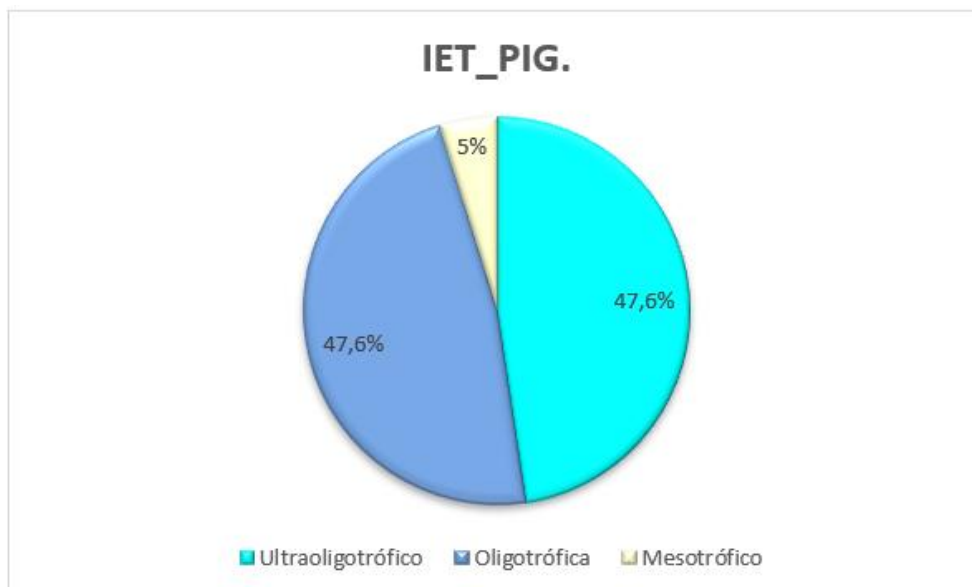
Figura 39: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação C1 para o IET _S de Lamparelli



Fonte: Autora, 2025.

Já para o IET_PIG, que o IET proposto fazendo o uso do parâmetro pimento total para a estação de monitoramento C1, os valores variaram de $42,7 \text{ mg.L}^{-1}$ a $52,3 \text{ mg.L}^{-1}$ e aproximadamente 47,7% dos resultados apresentou em sua maioria a classificação mesotrófico e oligotrófico cada e 5% apresentaram a classificação mesotrófico, conforme Figura 40.

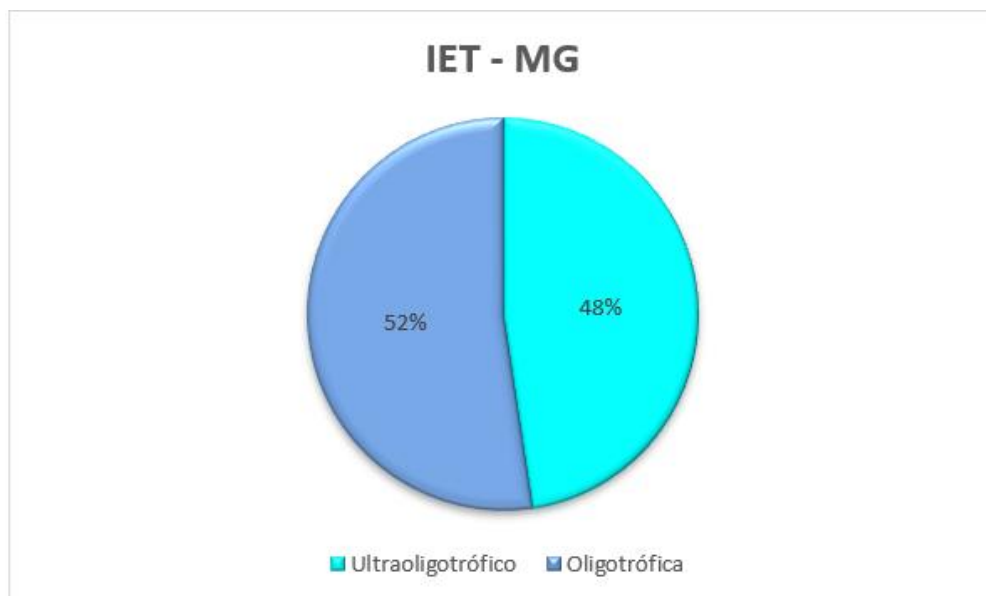
Figura 40: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação C1 para o IET _PIG. (IET Proposto).



Fonte: Autora, 2025.

Para o IET_MG (IET proposto) os valores variaram de $49,5 \text{ mg.L}^{-1}$ a $42,4 \text{ mg.L}^{-1}$ para e em sua maioria apresentou a classificação oligotrófica (52%) como nível trófico e 48% apresentaram a classificação ultraoligotrófico (FIGURA 41).

Figura 41: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação C1 para o IET _ MG. (IET Proposto).



Fonte: Autores, 2025.

3.2.5 Estação C2

Para a estação C2, foram utilizadas 28 leituras válidas entre o período chuvoso e seco, entre os anos de 2006 a 2016. Anteriormente a isso, por falta de informações quantitativa dos parâmetros de Fósforo Total, Pigmentos, transparência e magnésio, o cálculo de IET não pode ser realizado.

Na Tabela 6, são encontrados os valores do IET's definido por Lamparelli e o IET proposto.

Tabela 6: Resultado dos cálculos dos IET de Lamparelli e do IET proposto para a estação de monitoramento C2 e classificação do seu nível trófico

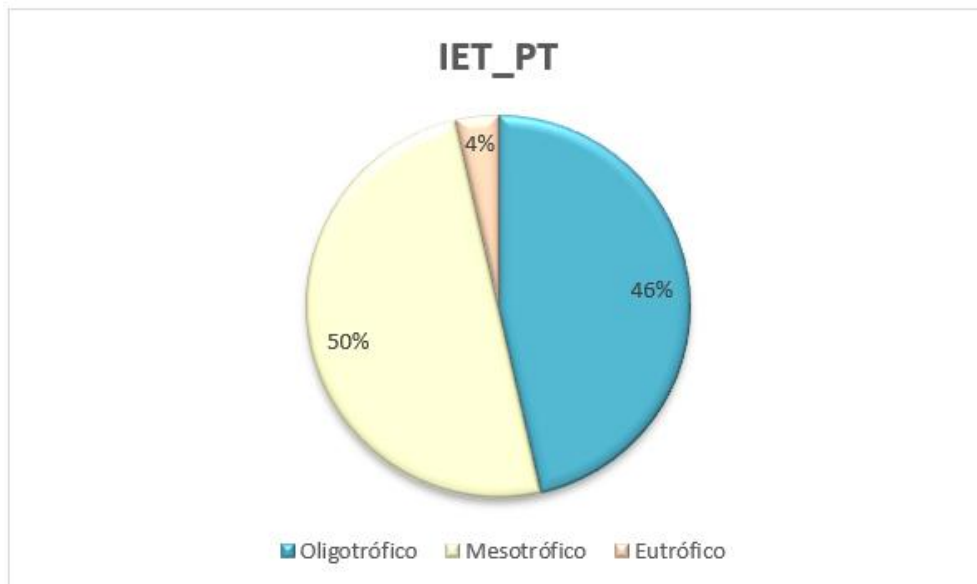
Ano/mês	Período	Índice de Lamparelli			Novo Índice	
		IET_P-Total	IET_CL	IET_S	IET_PIG.	IET_MG
2006-08	Seco	53,6	56	43,2	47,5	47,5
2006-12	Chuvoso	52,7	57,9	54,2	49,5	51,4
2006-02	Chuvoso	47,9	63,2	49,3	55,1	52,3
2007-04	Chuvoso	47,8	57,8	43,2	49,3	47,6
2007-08	Seco	48,1	52,3	43,2	43,4	47,5
2007-10	Seco	59,9	58,2	49,3	49,8	46
2008-02	Chuvoso	54,4	59,3	53,2	51	47,5
2009-08	Seco	48,2	53,3	45,7	44,5	45,2

2009-06	Seco	51,9	53	43,2	44,2	47,5
2010-08	Seco	49,5	54,9	46,8	46,2	46,7
2010-12	Chuvoso	55,6	66,7	63,2	58,9	55,9
2010-02	Chuvoso	52,7	56,5	46,2	48	50,4
2010-06	Seco	51,1	53,3	39,3	44,5	44,3
2010-10	Seco	54	57,4	53,2	48,9	48,2
2011-04	Chuvoso	49	54,4	45,1	45,7	46,7
2011-08	Seco	52,5	59,3	44,2	50,9	51,4
2011-02	Chuvoso	51,8	60,7	50,7	52,5	50,4
2011-10	Seco	53,6	59	53,2	50,6	50,6
2012-04	Chuvoso	52,5	54,4	44,2	45,7	45,6
2012-10	Seco	55,8	59	56,2	50,6	46
2013-04	Chuvoso	51,9	54,4	46,8	45,7	48,4
2015-04	Chuvoso	52,8	55,1	50	46,4	46,4
2015-01	Chuvoso	51,4	61	55,1	52,8	48,2
2015-07	Seco	55,6	52,6	45,1	43,8	47,5
2015-10	Seco	55	63,2	50,7	55,1	56,2
2016-04	Chuvoso	49,7	59,3	46,8	51	51,6
2016-01	Chuvoso	57	60,5	58,6	52,2	50,1
2016-09	Seco	47,7	49	41,9	40	44,3

Fonte: Oliveira et al, 2025.

Assim, o IET_P-Total calculado pelo método de Lamparelli, a estação de amostragem C2, apresentou valores que variaram de 59,9 mg.L^{-1} a 47,7 mg.L^{-1} e em sua maioria apresentou o nível trófico mesotrófico (50%) enquanto que 46% dos resultados apresentara a classificação oligotrófico e 4% classificação eutrófico (FIGURA 42).

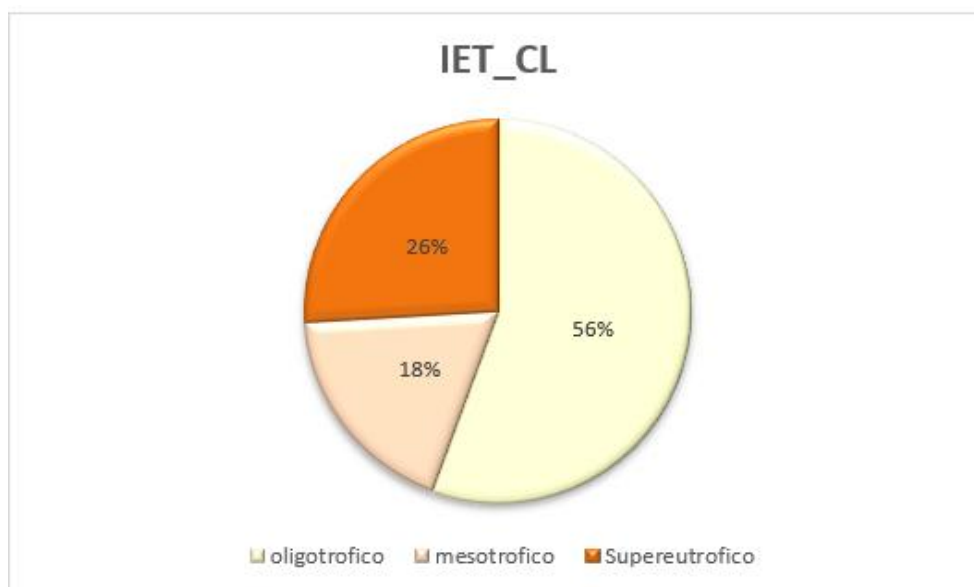
Figura 42: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação C2 para o IET _ P-Total de Lamparelli



Fonte: Autores, 2025.

Para a mesma estação de amostragem, o IET_CL de Lamparelli teve resultados que variaram de $66,7 \text{ mg.L}^{-1}$ a $59,00 \text{ mg.L}^{-1}$ e predominou a classificação mesotrófico com 65% dos resultados, 23% apresentou a classificação eutrófico e 12% apresentou a classificação supereutrófico (FIGURA 43).

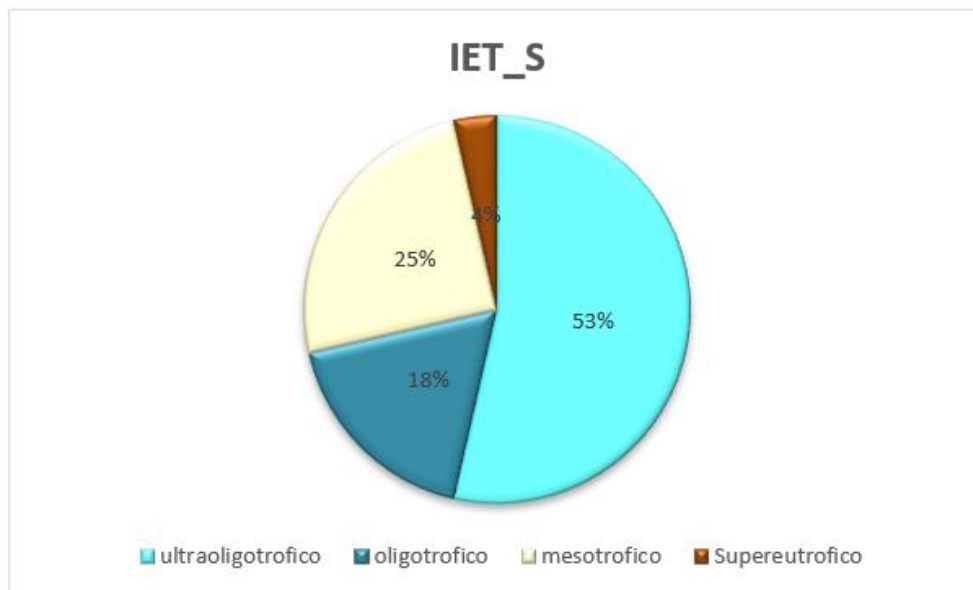
Figura 43: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação C2 para o IET _CL de Lamparelli



Fonte: Autores, 2025.

Já o IET_S, resultou em valores que variaram de $63,2 \text{ mg.L}^{-1}$ a $39,3 \text{ mg.L}^{-1}$ seu nível trófico em sua maioria ultraoligotrófico com 53%, 25% apresentaram a classificação mesotrófico, 18% apresentaram a classificação supereutrófico (FIGURA .44).

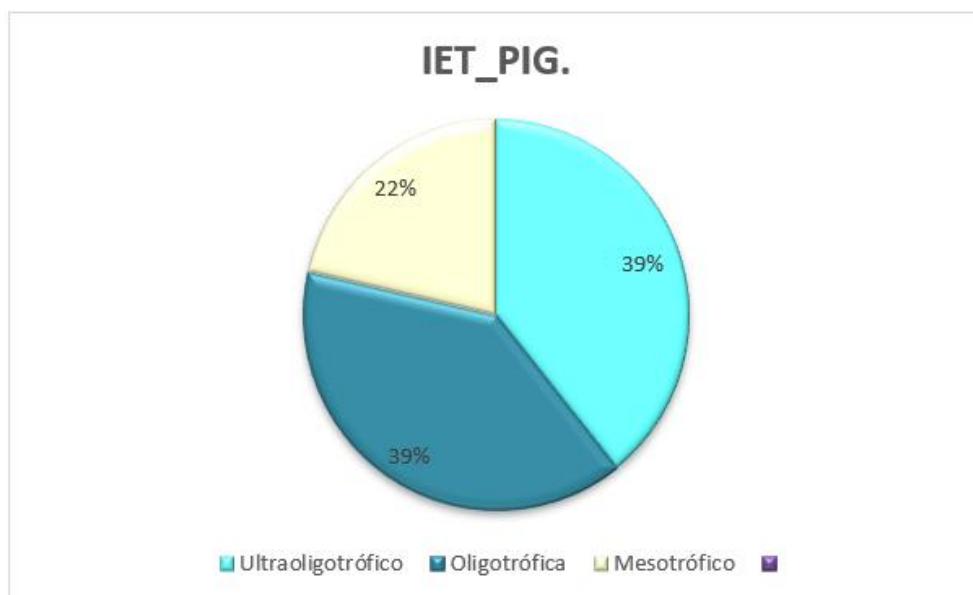
Figura 44: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação C2 para o IET _ S de Lamparelli



Fonte: Autores, 2025.

O IET_PIG (Índice proposto), apresentou resultados que variaram de 40 mg.L^{-1} a $58,98 \text{ mg.L}^{-1}$ e em sua maioria apresentou a classificação ultraoligotrófica e oligotrófica com aproximadamente 39% e 22% apresentaram a classificação mesotrófica (FIGURA 45).

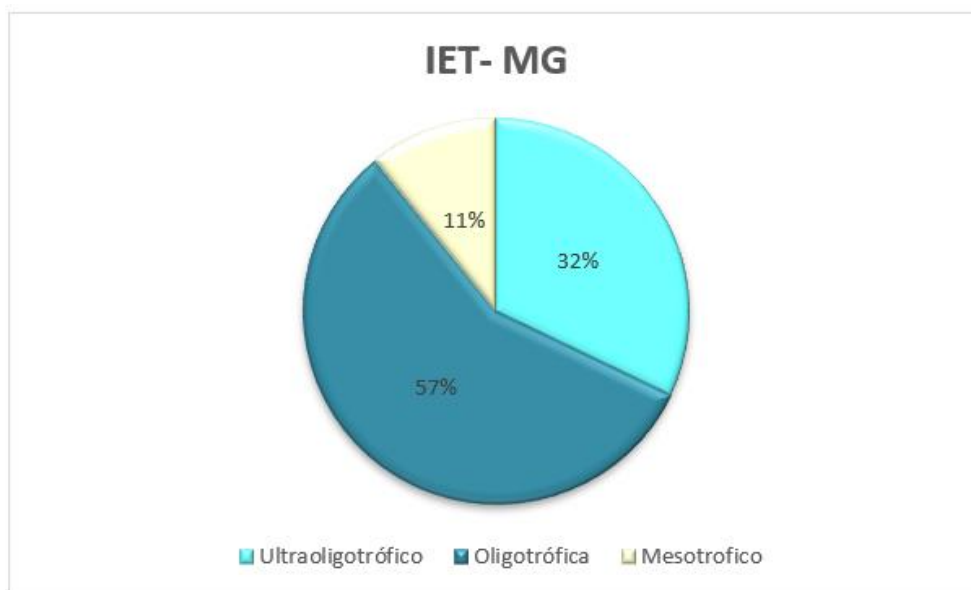
Figura 45: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação C2 para o IET _ PIG. (Índice proposto)



Fonte: Autores, 2025.

Para o IET_MG (Índice proposto), os valores variaram de $44,3 \text{ mg.L}^{-1}$ a $56,2 \text{ mg.L}^{-1}$ e em sua maioria com 57% dos resultados apresentaram a classificação oligotrófica, 32% ultraoligotrófica e 11% mesotrófica (FIGURA 46).

Figura 46: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação C2 para o IET _ MG. (Índice proposto)



Fonte: Autores, 2025.

5.4.1 Estação M1

Para a estação M1, foram utilizados dados da camada superficial entre o período chuvoso e seco, entre os anos de 2006 à 2016. Anteriormente a isso, por falta de informações dos parâmetros de Fósforo Total, Pigmentos, transparência e magnésio, o cálculo de IET não pode ser realizado.

Na Tabela 7, são encontrados os valores do IET's definido por Lamparelli e o IET proposto par a estação M1.

Tabela 7:Resultado dos cálculos dos IET de Lamparelli e do IET proposto para a estação de monitoramento M1 e classificação do seu nível trófico

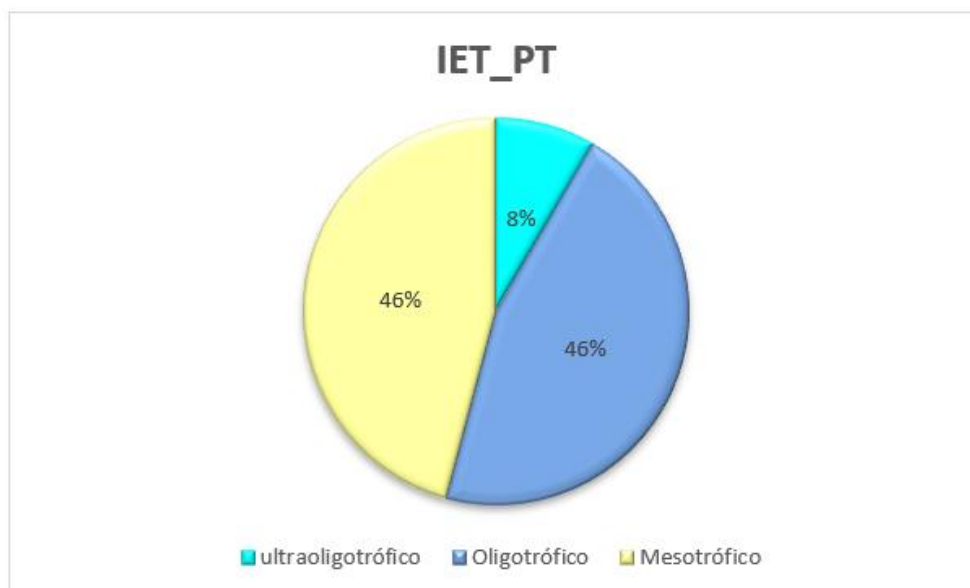
Ano/mês	Período	Índice de Lamparelli			Novo Índice	
		IET_P- Total	IET_CL	IET_S	IET_PIG.	IET_MG
2006-02	Chuvoso	47,9	55,3	50,0	50,8	49,2
2006-05	Chuvoso	55,4	57,4	51,5	54,2	48,3
2008-02	Chuvoso	53,2	55,3	56,2	50,8	48,3
2009-05	Chuvoso	55,1	55,8	57,4	51,6	49,2
2009-11	Seco	50,2	52,3	38,0	45,9	46,8
2010-02	Chuvoso	54,0	59,0	57,4	56,7	50,0
2011-12	Chuvoso	44,6	51,0	48,0	43,9	46,2

2011-05	Chuvoso	53,3	51,5	49,3	44,6	46,3
2011-11	Seco	44,6	49,9	42,8	42,1	46,0
2012-04	Chuvoso	51,4	52,6	50,0	46,5	45,3
2012-02	Chuvoso	51,8	52,6	50,7	46,5	46,5
2012-01	Chuvoso	53,5	54,4	48,0	49,4	46,5
2012-06	Seco	48,4	49,9	38,6	42,1	44,9
2013-02	Chuvoso	57,4	53,6	50,7	48,1	45,5
2013-06	Seco	52,3	52,6	48,0	46,5	48,1
2013-03	Chuvoso	54,1	51,0	49,3	43,9	47,1
2013-10	Seco	48,0	52,3	38,6	45,9	48,8
2014-04	Chuvoso	51,5	53,0	50,0	47,1	47,1
2014-12	Chuvoso	51,4	52,3	44,6	45,9	46,5
2014-06	Seco	51,3	51,9	41,5	45,3	47,9
2016-12	Chuvoso	51,8	57,8	51,5	54,9	51,4
2016-02	Chuvoso	54,2	58,8	56,2	56,5	50,2
2016-01	Chuvoso	50,1	54,4	50,0	49,4	50,2
2016-03	Chuvoso	54,5	57,1	53,2	53,7	48,8

Fonte: Oliveira et al, 2025.

Os valores do IET_P-Total apresentou valores que variaram de 44,6 mg.L⁻¹ a 57,4 mg.L⁻¹ e predominou-se a classificação oligotrófico (46%) e mesotrófico (46%) e 8% sendo ultraoligotrófico evidenciado na Figura 47.

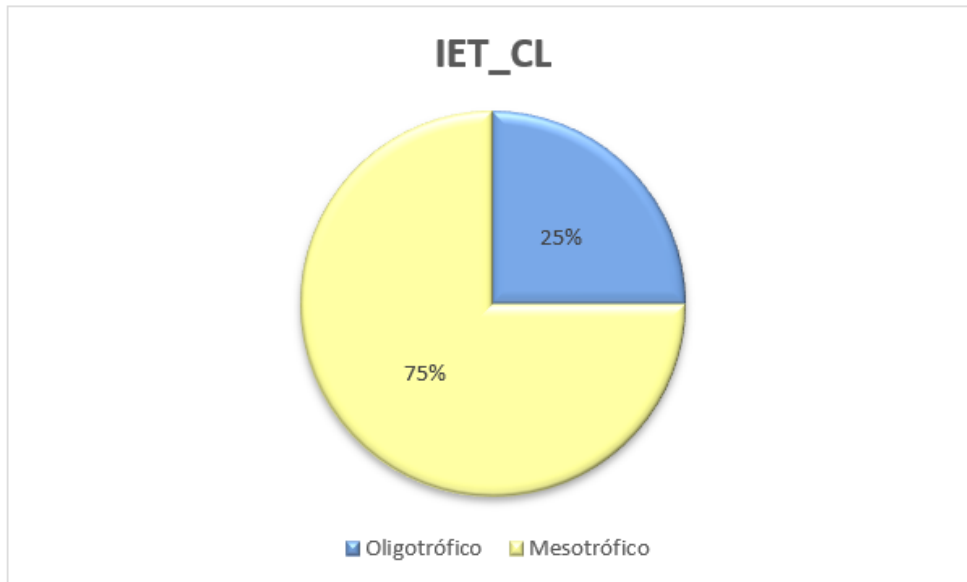
Figura 47: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação M1 para o IET _FT de Lamparelli



Fonte: Autora, 2025.

Para o IET_CL apresentaram valores que variaram de $49,9 \text{ mg.L}^{-1}$ a $59,0 \text{ mg.L}^{-1}$ e 75% destes resultados apresentou a classificação mesotrófico e 25% apresentou a classificação oligotrófico (FIGURA 48).

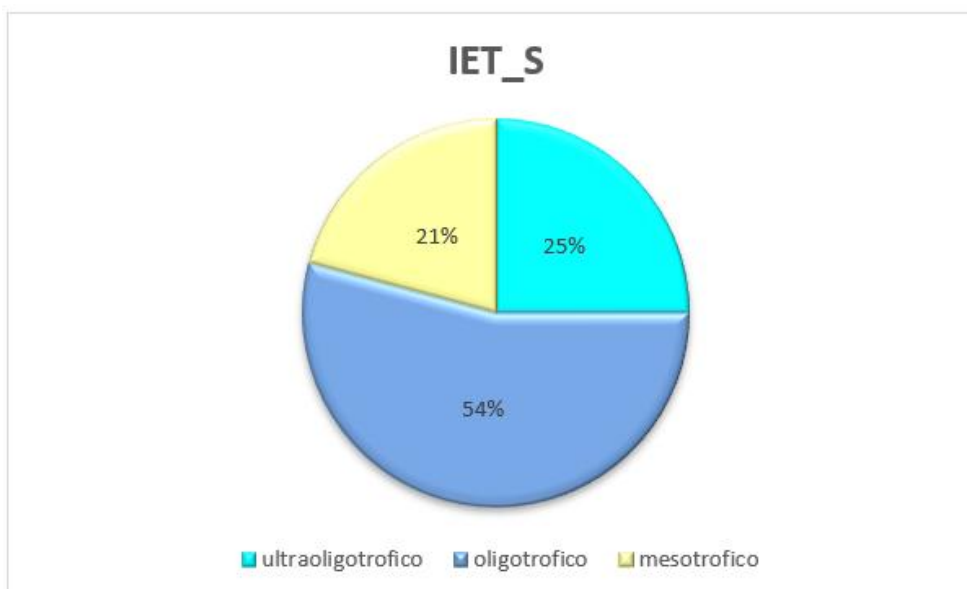
Figura 48: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação M1 para o IET _CL de Lamparelli



Fonte: Autores, 2025.

Para o IET_S os valores variaram de $38,0 \text{ mg.L}^{-1}$ a $56,7 \text{ mg.L}^{-1}$ com 54% apresentando a classificação oligotrófica, 25% a classificação ultraoligotrófico e 21% mesotrófico (FIGURA 49).

Figura 49: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação M1 para o IET _S de Lamparelli



Fonte: Autora, 2025.

Para valores IET_PIG (Índice proposto), os valores variaram de 42,1 mg.L⁻¹ a 56,7 mg.L⁻¹ e 50% dos resultados apresentaram a classificação ultraoligotrófico, 29% a classificação oligotrófico e 21% a classificação mesotrófico (FIGURA 50).

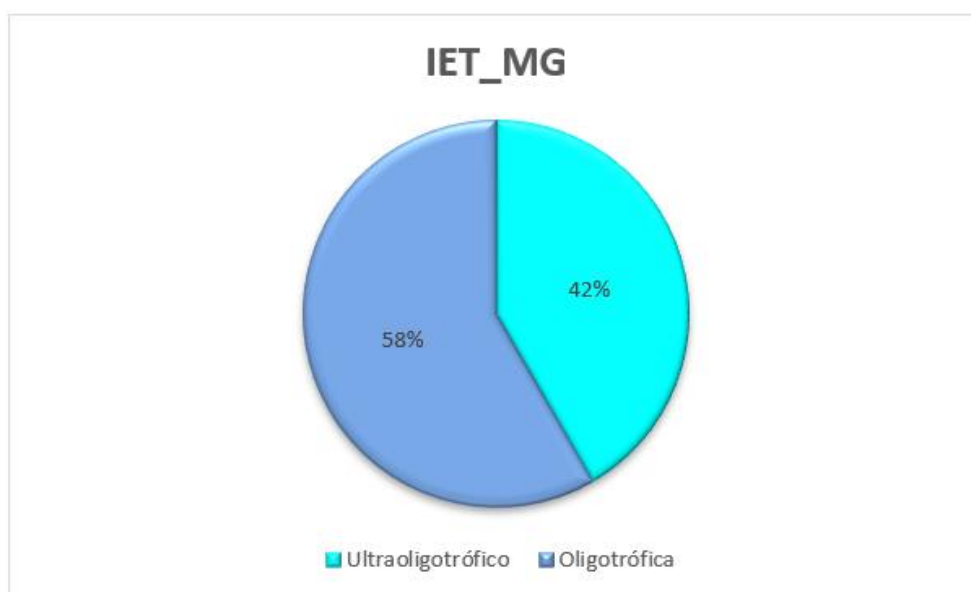
Figura 50: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação M1 para o IET_PIG. (índice proposto)



Fonte: Autora, 2025.

Para o IET_MG os valores variaram de 44,9 mg.L⁻¹ a 51,4 mg.L⁻¹ com 58% apresentaram classificação oligotrófico e 42% a classificação ultraoligotrófico (FIGURA 51).

Figura 51: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação M1 para o IET_MG. (índice proposto)



Fonte: Autora, 2025.

5.4.2 Estação MR

Na estação MR, foram utilizados dados da camada superficial entre o período chuvoso e seco, entre os anos de 2005 à 2016. Anteriormente a isso, por falta de informações dos parâmetros de Fósforo Total, Pigmentos, transparência e magnésio, o cálculo de IET definido por Lamparelli e do IET proposto não pode ser realizado.

Na Tabela 8, são encontrados os valores do IET's definido por Lamparelli e o IET proposto para a estação MR.

Tabela 8: Resultado dos cálculos dos IET de Lamparelli e do IET proposto para a estação de monitoramento MR e classificação do seu nível tráfico

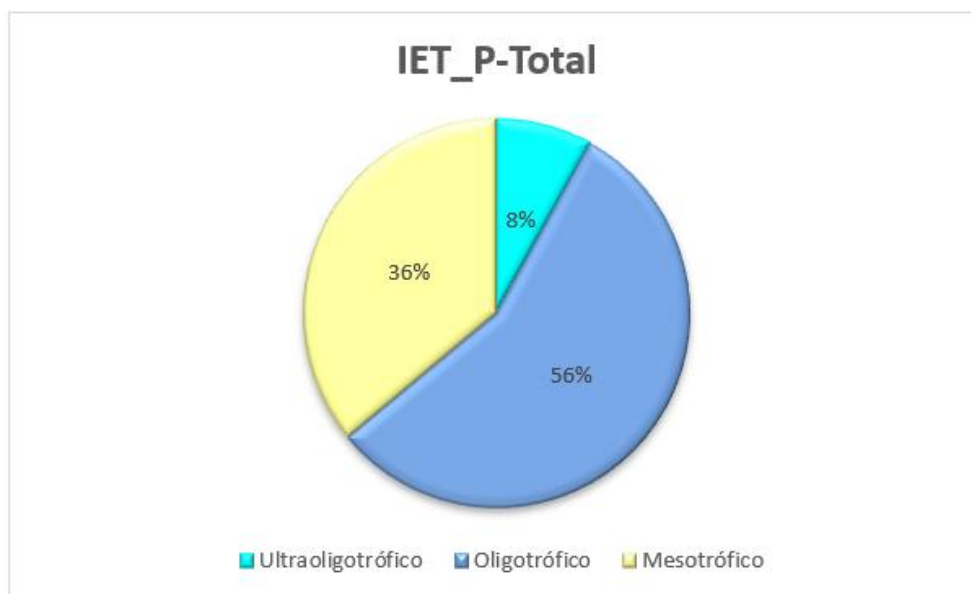
Ano/mês	Período	Índice de Lamparelli			Novo Índice	
		IET_P- Total	IET_CL	IET_S	IET_PIG.	IET_MG
2005-10	Seco	50,5	58,8	48,6	48,4	48,0
2006-08	Seco	47,2	54,9	46,2	45,9	47,0
2006-12	Chuvoso	45,8	54,1	47,4	45,5	45,1
2006-02	Chuvoso	47,7	57,8	46,8	47,8	48,0
2007-04	Chuvoso	49,1	57,1	47,4	47,4	47,9
2007-08	Seco	48,5	56,4	46,2	46,9	46,5
2007-12	Chuvoso	48,3	58,5	46,8	48,2	47,2
2007-02	Chuvoso	54,4	53,9	46,8	45,3	45,1
2007-10	Seco	52,3	57,9	47,4	47,9	47,0
2008-02	Chuvoso	48,7	59,8	48,0	49,1	47,9
2008-06	Seco	47,6	59,0	48,6	48,6	48,3
2008-10	Seco	44,3	53,9	46,8	45,3	45,2
2009-04	Chuvoso	53,4	57,0	46,2	47,3	46,8
2009-06	Seco	55,8	53,6	45,7	45,2	46,1
2010-04	Chuvoso	53,2	57,1	45,7	47,4	45,5
2011-02	Chuvoso	50,8	56,2	48,6	46,8	46,2
2012-04	Chuvoso	52,2	54,9	46,8	45,9	46,6
2013-07	Seco	51,8	50,1	40,0	43,0	45,2
2013-10	Seco	52,3	55,9	48,6	46,6	46,9
2014-04	Chuvoso	53,6	54,9	46,8	45,9	45,2
2014-01	Chuvoso	51,7	52,3	42,3	44,3	45,5
2014-10	Seco	49,4	56,0	45,1	46,7	46,6
2015-01	Chuvoso	51,4	54,9	47,4	45,9	47,9
2016-01	Chuvoso	51,5	57,7	49,3	47,7	47,6

2016-09	Seco	53,9	55,0	45,7	46,0	46,1
---------	------	------	------	------	------	------

Fonte: Oliveira et al, 2025.

Para o IET_P-Total apresentou valores que variaram de 50,1 mg.L^{-1} a 59,8 mg.L^{-1} com 56% dos resultados se enquadraram na classificação oligotrófico, 36% na classificação mesotrófico e 8% na classificação ultraoligotrófico (FIGURA 52).

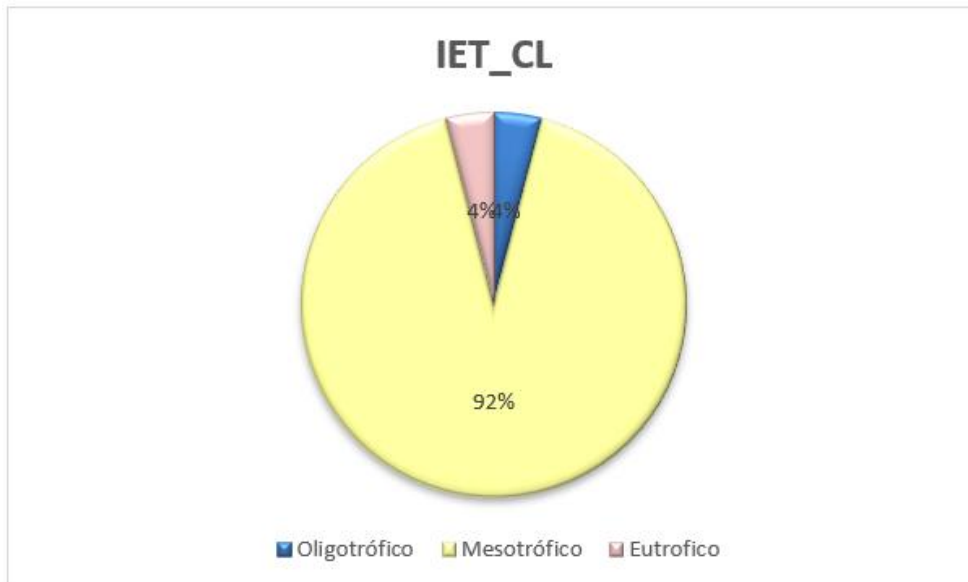
Figura 52: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MR para o IET_P-Total de Lamparelli



Fonte: Autora, 2025.

Para os valores de IET_CL os valores variaram de 50,1 mg.L^{-1} a 59,8 mg.L^{-1} com 92% dos resultados teve a classificação mesotrófico enquanto que 4% apresentaram a classificação eutrófico e 4% a classificação oligotrófico (FIGURA 53).

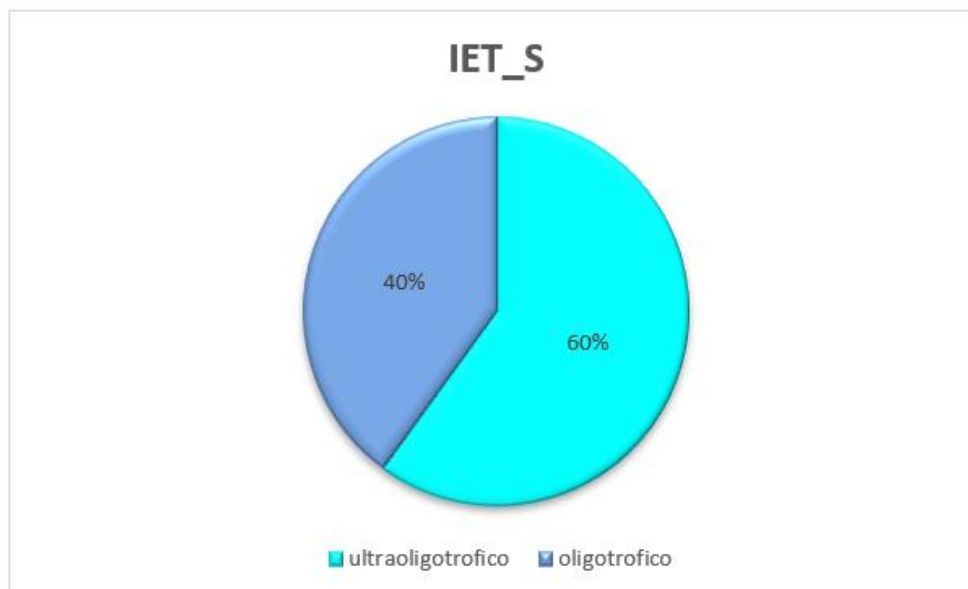
Figura 53: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MR para o IET_CL de Lamparelli



Fonte: Autora, 2025.

Para o IET_S de Lamparelli calculado, os valores variaram de $40,0 \text{ mg.L}^{-1}$ a $49,3 \text{ mg.L}^{-1}$, 60% apresentaram a classificação ultraoligotrófico.e 40% a classificação oligotrófico (FIGURA 54).

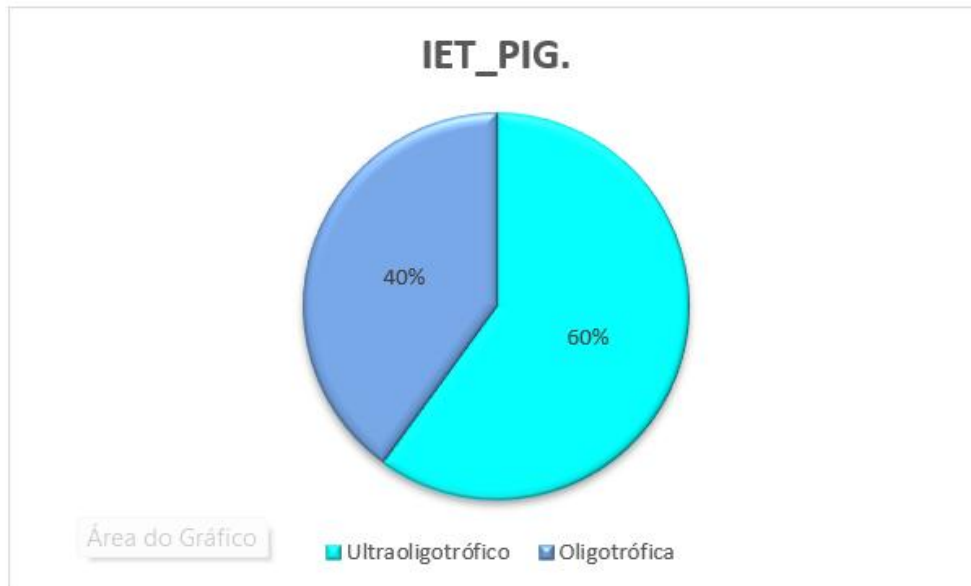
Figura 54: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MR para o IET _S de Lamparelli



Fonte: Autora, 2025.

Para o IET_PIG (índice proposto) os valores variaram de $43,0 \text{ mg.L}^{-1}$ a $49,1 \text{ mg.L}^{-1}$ com 60% dos resultados apresentaram a classificação ultraoligotrófico e 40% apresentaram classificação oligotrófico, evidenciado na Figura 55.

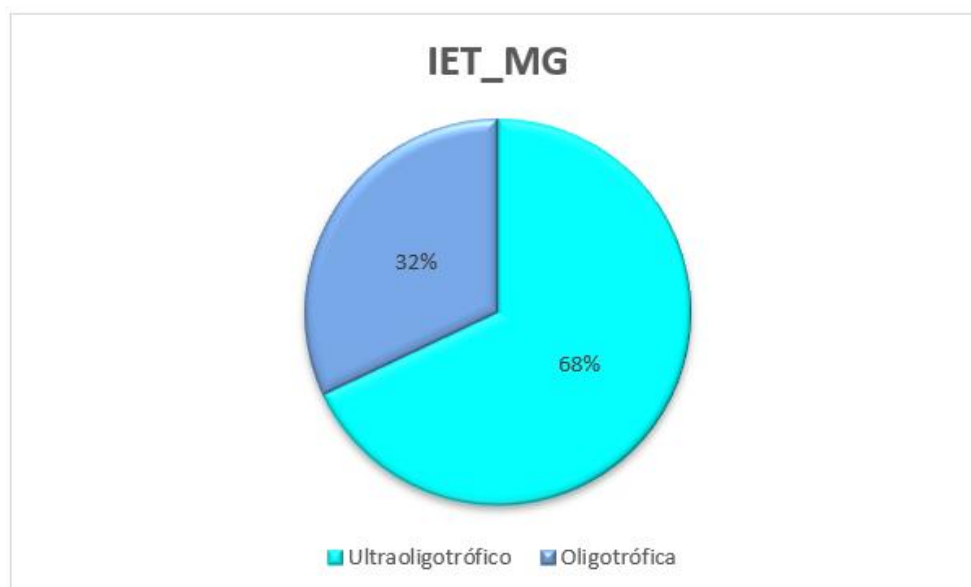
Figura 55: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MR para o IET _PIG. (índice proposto)



Fonte: Autores, 2025.

Para o IET_MG (índice proposto) os valores variaram de 45,1 mg.L⁻¹ a 48,3 mg.L⁻¹ apresentando em sua maioria a classificação ultraoligotrófico em 68% dos resultados e 32% apresentaram a classificação oligotrófica (Figura 56).

Figura 56: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MR para o IET_MG. (índice proposto)



Fonte: Autores, 2025.

5.4.3 Estação MP

Na estação de monitoramento MP, foram utilizados os dados da camada superficial entre os anos de 2005 a 2016. Anteriormente a esse período não teve dados suficientes para a realização dos cálculos de IET.

Na Tabela 9 encontram-se os valores de IET definido por Lamparelli e o proposto pelo estudo para a estação MP.

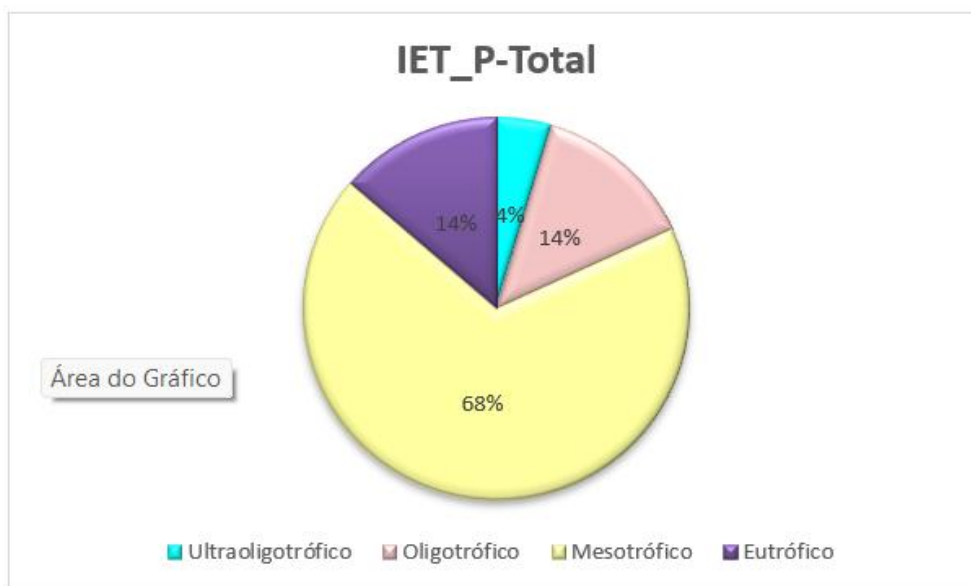
Tabela 9: Resultado dos cálculos dos IET de Lamparelli e do IET proposto para a estação de monitoramento MP e classificação do seu nível tráfico

Ano/mês	Período	Índice Lamparelli			Novo Índice	
		IET_P- Total	IET_CL	IET_S	IET_PIG	IET_MG
2005-10	Seco	52,2	62,2	54,2	57,9	56,2
2006-06	Seco	51,4	58,5	46,8	53,6	56,9
2006-10	Seco	55,8	61,7	54,2	57,4	59,4
2007-04	Chuvoso	54,1	57,1	51,5	52,0	54,5
2007-08	Seco	50,5	58,5	50,0	53,6	55,5
2007-12	Chuvoso	60,8	62,8	63,2	58,7	54,8
2007-10	Seco	52,5	54,4	50,7	48,8	49,1
2008-12	Chuvoso	41,3	63,3	63,2	59,2	59,4
2008-06	Seco	51,5	51,5	45,7	45,3	48,3
2008-10	Seco	54,4	61,2	55,1	56,8	54,1
2009-04	Chuvoso	53,5	55,7	48,6	50,3	52,8
2010-02	Chuvoso	54,0	59,0	51,5	54,2	52,4
2010-10	Seco	56,5	60,5	61,5	56,0	55,1
2011-04	Chuvoso	52,3	55,7	45,7	50,3	52,2
2011-12	Chuvoso	57,2	59,9	61,5	55,2	51,7
2011-02	Chuvoso	62,4	56,4	52,3	51,1	54,5
2013-01	Chuvoso	64,9	55,9	53,2	50,5	52,9
2013-10	Seco	55,8	58,6	57,4	53,7	52,6
2014-01	Chuvoso	57,5	55,5	53,2	50,1	52,7
2014-10	Seco	57,4	59,1	54,2	54,3	52,4
2015-04	Chuvoso	54,6	56,2	52,3	50,9	51,2
2016-04	Chuvoso	53,5	61,1	52,3	56,7	52,4
2016-01	Chuvoso	61,9	64,4	60,0	60,6	55,8

Fonte: Oliveira et al, 2025.

Para o IET_P-Total, os valores variaram de 41,3 mg.L⁻¹ a 64,9 mg.L⁻¹ e a maioria dos resultados apresentou a classificação mesotráfico (FIGURA 57).

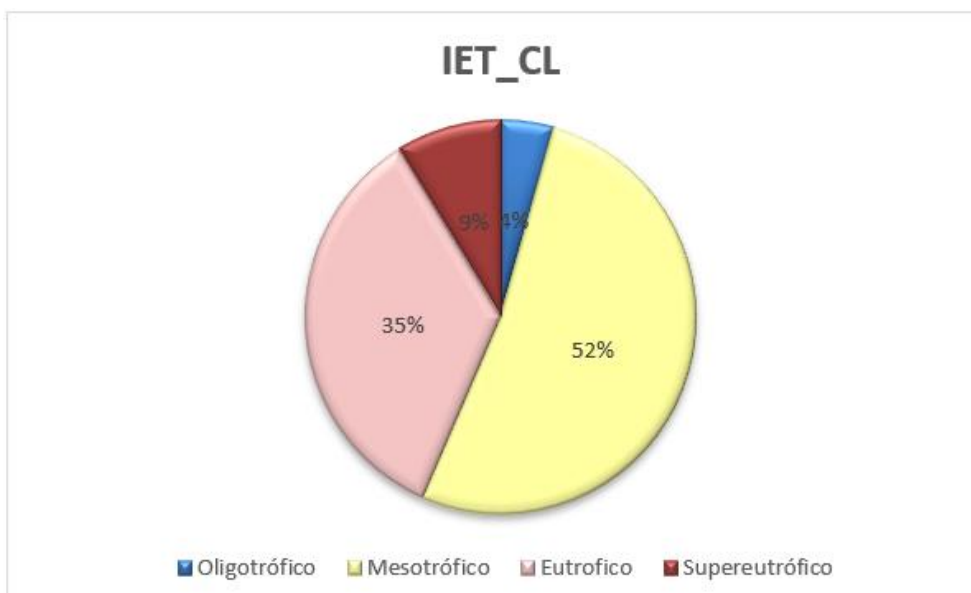
Figura 57: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MP para o IET _P-Total de Lamparelli



Fonte: Autores, 2025.

Para o IET_CL os valores variaram de $51,5 \text{ mg.L}^{-1}$ a $64,4 \text{ mg.L}^{-1}$ apresentando em sua maioria a classificação mesotrófico com 52% dos resultados, 35% com a classificação eutrófico, 9% supereutrófico e 4% como oligotrófico (FIGURA 58).

Figura 58: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MP para o IET _CL de Lamparelli

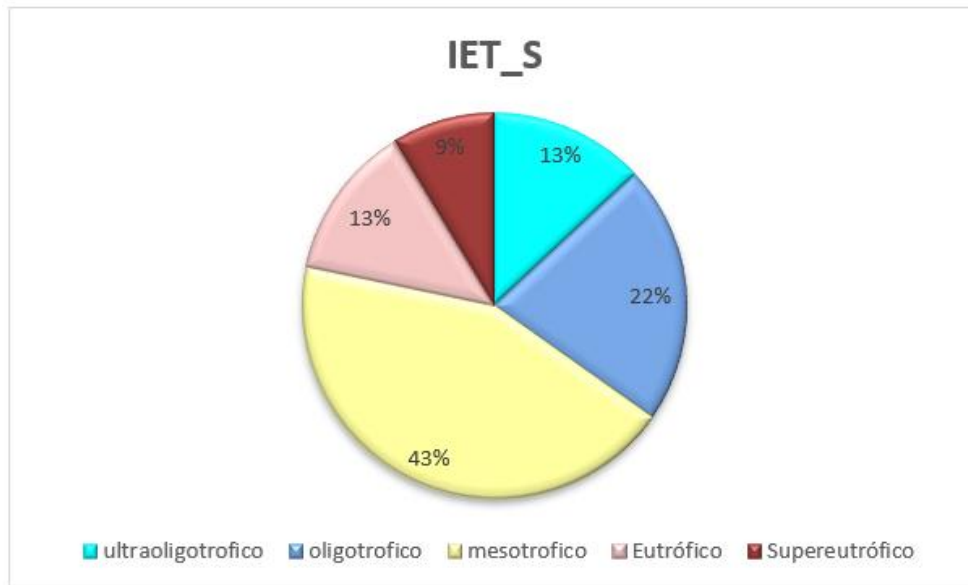


Fonte: Autores, 2025.

Para o IET_S os valores variaram $45,7 \text{ mg.L}^{-1}$ a $63,2 \text{ mg.L}^{-1}$ com a classificação mesotrófico predominante, com 43% dos resultados, 22% apresentaram a classificação

oligotrófico, aproximadamente 13 % com a classificação eutrófico, aproximadamente 13% com classificação hipereutrófico e 9% supereutrófico (FIGURA 59).

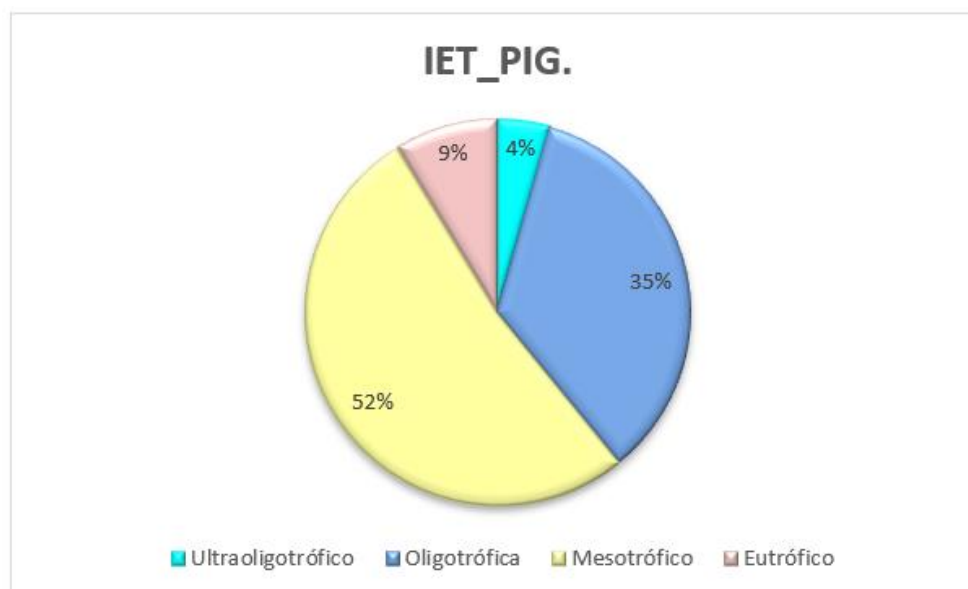
Figura 59: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MP para o IET _S de Lamparelli



Fonte: Autores, 2025.

Os IET_PIG (índice proposto) apresentou valores que variaram entre 45,3 mg.L⁻¹ a 60,6 mg.L⁻¹ predominando a classificação mesotrófica com 52% no nível trófico, posteriormente 35% dos resultados apresentaram a classificação oligotrófico, 9% eutrófico e 4% hipereutrófico evidenciado na Figura 60.

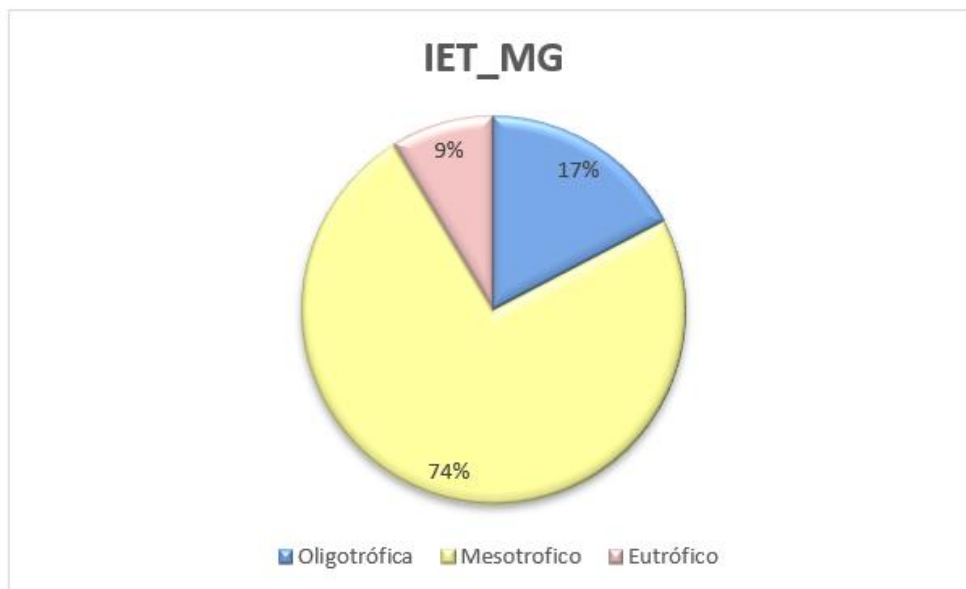
Figura 60: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MP para o IET _PIG. (índice proposto)



Fonte: Autores, 2025.

Para o IET_MG (índice proposto) os valores variaram de 48,3 mg.L⁻¹ a 59,4 mg.L⁻¹ com 74% dos resultados enquadrando-se como mesotrófico, 17% apresentaram a classificação oligotrófico e 9% a classificação eutrófico (FIGURA 61).

Figura 61: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MP para o IET _ MG. (índice proposto)



Fonte: Autores, 2025.

5.4.4 Estação MB

Na estação MB, foram utilizados os dados da camada superficial do ano de 2006 a 2016. Os dados anteriores ao ano de 2006, não foram apresentados para a realização dos cálculos de IET's.

Na Tabela 10 encontram-se os valores de IET de Lamparelli e o proposto no estudo para a estação MB.

Tabela 10: Resultado dos cálculos dos IET de Lamparelli e do IET proposto para a estação de monitoramento MB e classificação do seu nível trófico

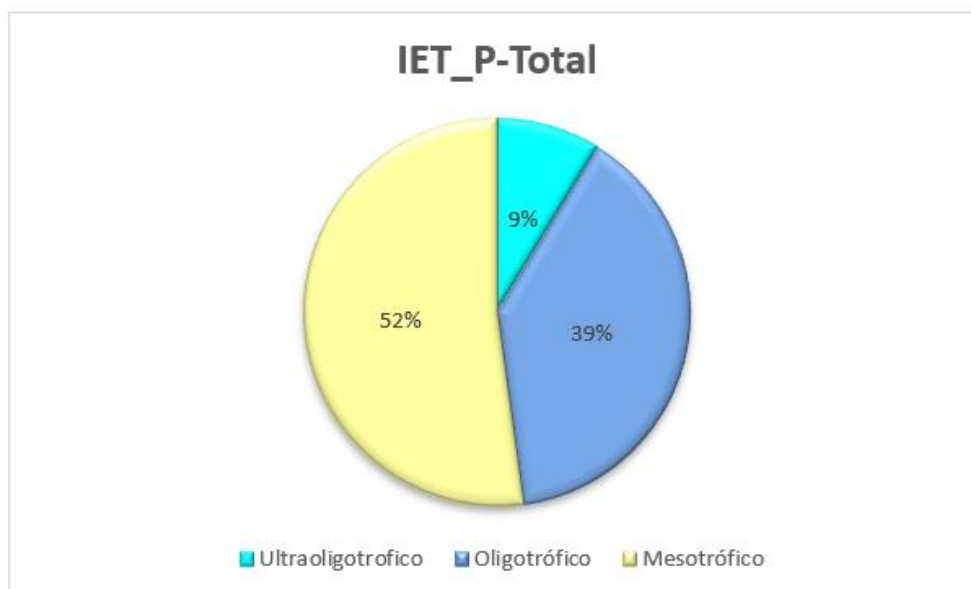
Ano/mês	Período	Índice de Lamparelli			Novo Índice	
		IET_FT	IET_CL	IET_S	IET_PIG	IET_MG
2006-02	Chuvoso	47,2	54,6	50,0	44,4	45,4
2006-05	Chuvoso	51,4	53,3	47,4	43,9	44,7
2007-02	Chuvoso	47,3	53,9	46,8	44,1	44,7
2008-02	Chuvoso	49,0	55,7	50,0	44,9	44,1
2008-11	Seco	52,1	52,3	43,7	43,5	43,7
2009-02	Chuvoso	55,1	49,2	43,7	42,3	44,8

2009-05	Chuvoso	52,3	53,3	46,8	43,9	43,1
2010-02	Chuvoso	53,7	53,9	51,5	44,1	44,3
2010-11	Seco	50,5	53,0	46,2	43,8	45,4
2012-01	Chuvoso	52,2	49,2	40,7	42,4	43,5
2012-10	Seco	50,7	51,9	44,6	43,4	43,6
2013-04	Chuvoso	53,8	54,6	48,6	44,4	44,1
2013-01	Chuvoso	56,4	53,3	49,3	43,9	44,4
2013-10	Seco	49,8	55,3	43,2	44,7	43,8
2014-04	Chuvoso	53,1	53,6	47,4	44,0	44,1
2014-01	Chuvoso	43,7	53,0	47,4	43,8	43,7
2014-07	Seco	48,4	51,5	40,7	43,2	44,0
2014-10	Seco	48,6	53,3	43,2	43,9	43,1
2015-04	Chuvoso	52,1	54,1	46,8	44,2	44,7
2015-01	Chuvoso	52,3	49,2	41,1	42,4	45,3
2015-10	Seco	42,8	55,4	44,6	44,7	43,0
2016-04	Chuvoso	52,4	55,8	49,3	44,9	43,9
2016-01	Chuvoso	54,2	58,2	51,5	45,8	45,4

Fonte: Oliveira et al, 2025.

Para o cálculo do IET_P-Total os valores variaram entre 42,8 mg.L⁻¹ a 56,4 mg.L⁻¹ e com 52% dos resultados a classificação mesotrófico ocorreu em 52% dos resultados, 39% apresentaram a classificação oligotrófico e 9% apresentou a classificação ultraoligotrófico (FIGURA 62).

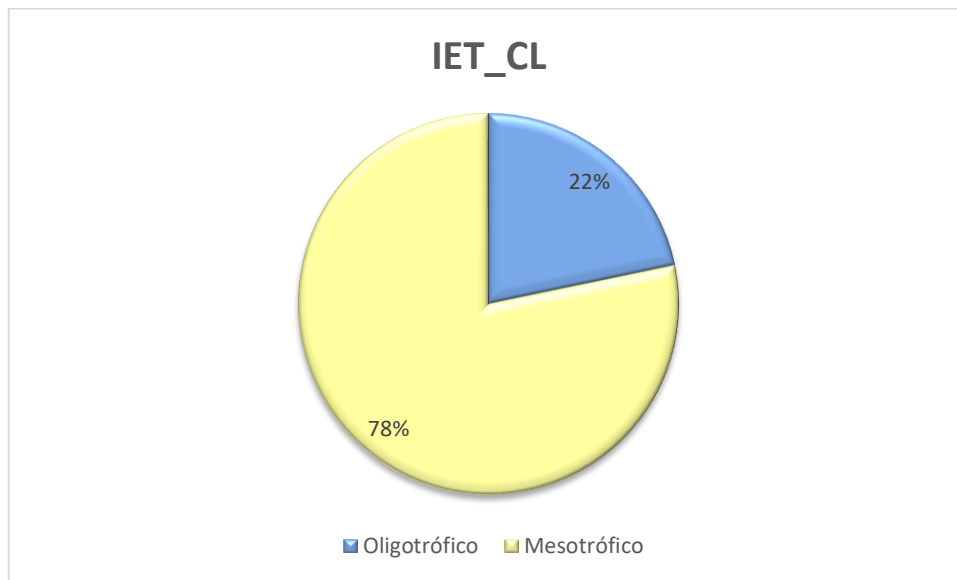
Figura 62: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MB para o IET_P-Total de Lamparelli



Fonte: Autora, 2025.

Para o IET_CL os valores variaram de $49,2 \text{ mg.L}^{-1}$ a $58,2 \text{ mg.L}^{-1}$ predominando a classificação mesotrófico com 78% dos resultados e 22% apresentou a classificação oligotrófico (FIGURA 63).

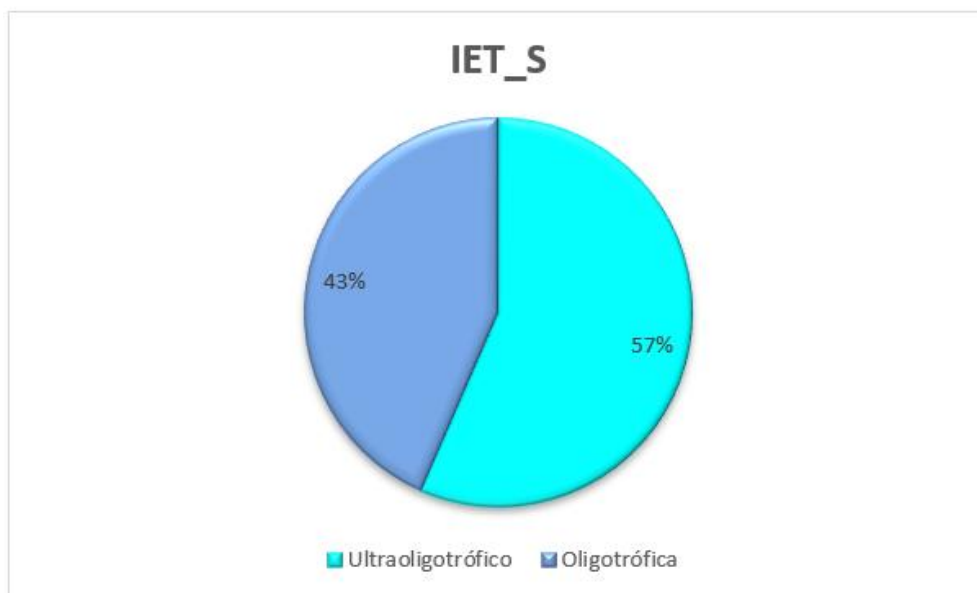
Figura 63: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MB para o IET _CL de Lamparelli



Fonte: Autora, 2025.

Para o IET_S os valores variaram entre $40,7 \text{ mg.L}^{-1}$ a $51,5 \text{ mg.L}^{-1}$ e em sua maioria (57%) apresentou a classificação oligotrófica e 43% apresentaram a classificação oligotrófica (FIGURA 64).

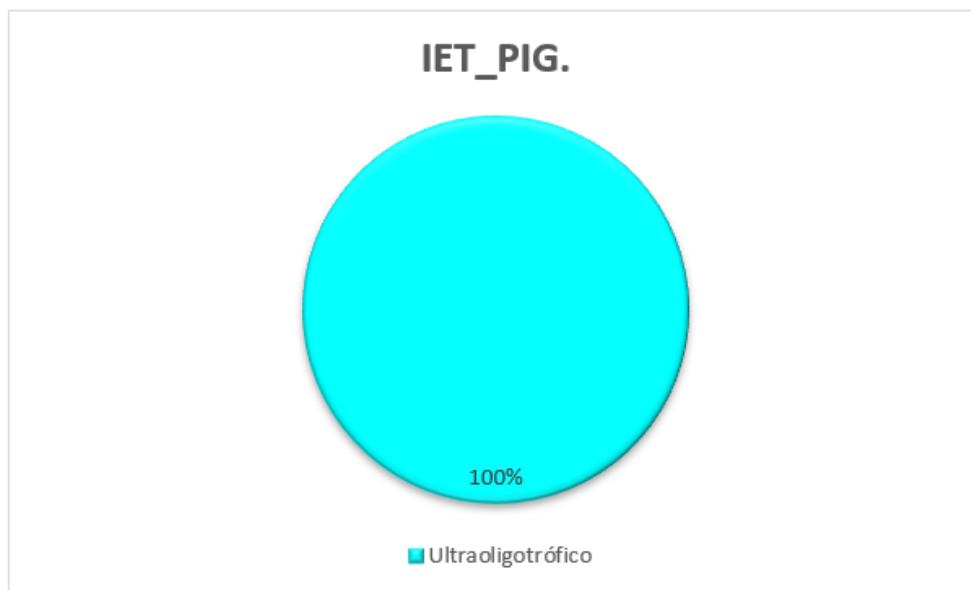
Figura 64: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MB para o IET _S de Lamparelli



Fonte: Autora, 2025.

Para IET_PIG (índice proposto) os valores variaram entre $42,3 \text{ mg.L}^{-1}$ a $45,8 \text{ mg.L}^{-1}$ e todos os dados apresentaram a classificação ultraoligotrófico (FIGURA 65).

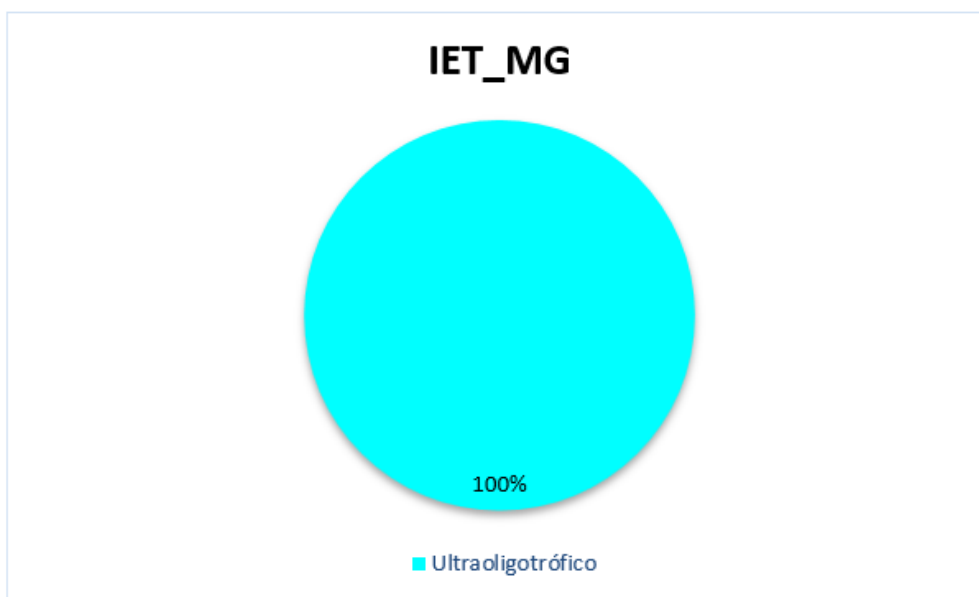
Figura 65: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MB para o IET_PIG. (índice proposto)



Fonte: Autora, 2025.

Para IET_MG (índice proposto), os valores variaram de $43,0 \text{ mg.L}^{-1}$ a $45,4 \text{ mg.L}^{-1}$ e predominou a classificação ultraoligotrófico em 100% dos resultados (FIGURA 66).

Figura 66: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MB para o IET_MG. (índice proposto)



Fonte: Autora, 2025.

5.4.5 Estação MI

Na estação MI, foram utilizados os dados da camada superficial, do ano de 2006 a 2016. Na Tabela 11, segue os resultados dos cálculos de IET definido por Lamparelli e os IET's definidos pelo estudo para a estação MI.

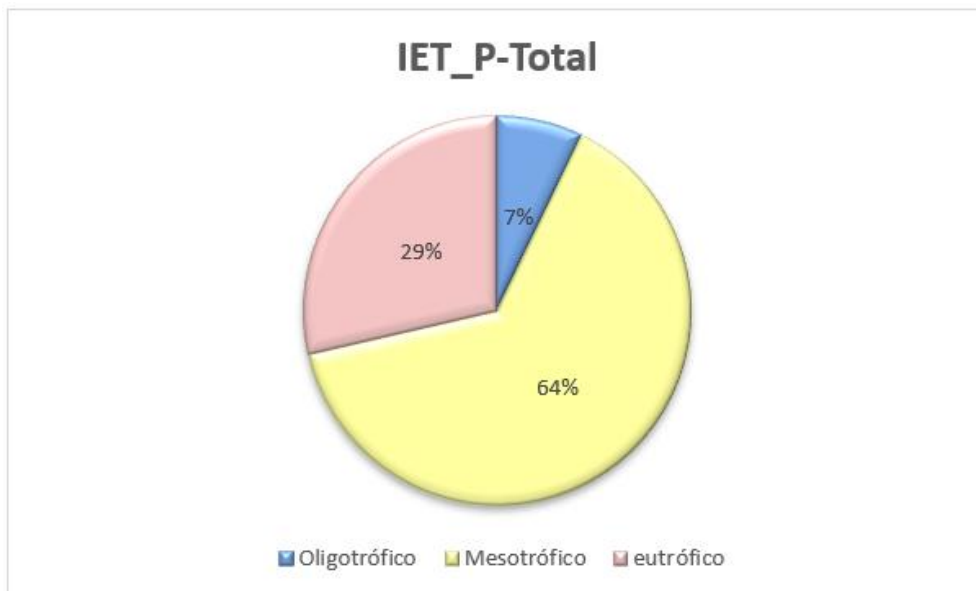
Tabela 11: Resultado dos cálculos dos IET de Lamparelli e do IET proposto para a estação de monitoramento MI e classificação do seu nível trófico

Ano/mês	Período	Índice de Lamparelli			Novo Índice	
		IET_P- Total	IET_CL	IET_S	IET_PIG.	IET_MG
2006-06	Seco	54,7	54,0	57,4	44,2	44,0
2006-03	Chuvoso	57,7	55,7	67,4	44,8	44,1
2006-09	Seco	51,3	53,3	54,2	43,9	43,4
2007-03	Chuvoso	57,9	54,2	65,1	44,3	43,9
2007-09	Seco	52,7	51,9	50,0	43,4	44,1
2008-03	Chuvoso	57,8	56,4	70,0	45,1	44,6
2009-12	Chuvoso	61,8	54,8	70,0	44,5	44,4
2010-06	Seco	52,2	53,9	50,7	44,1	44,0
2011-12	Chuvoso	58,5	55,3	63,2	44,7	44,8
2012-03	Chuvoso	57,7	53,4	63,2	43,9	44,2
2013-12	Chuvoso	60,5	55,6	70,0	44,8	44,8
2013-03	Chuvoso	60,3	53,9	63,2	44,1	44,5
2014-12	Chuvoso	61,0	54,4	70,0	44,4	44,6
2014-06	Seco	53,5	53,0	54,2	43,8	44,2

Fonte: Oliveira et al, 2025.

Para o IET_P-Total os valores variaram de 51,3 mg.L⁻¹ a 61,8 mg.L⁻¹ apresentando a classificação mesotrófico em 64% dos resultados, em 29% apresentou a classificação eutrófico e 7% a classificação oligotrófico (FIGURA 67).

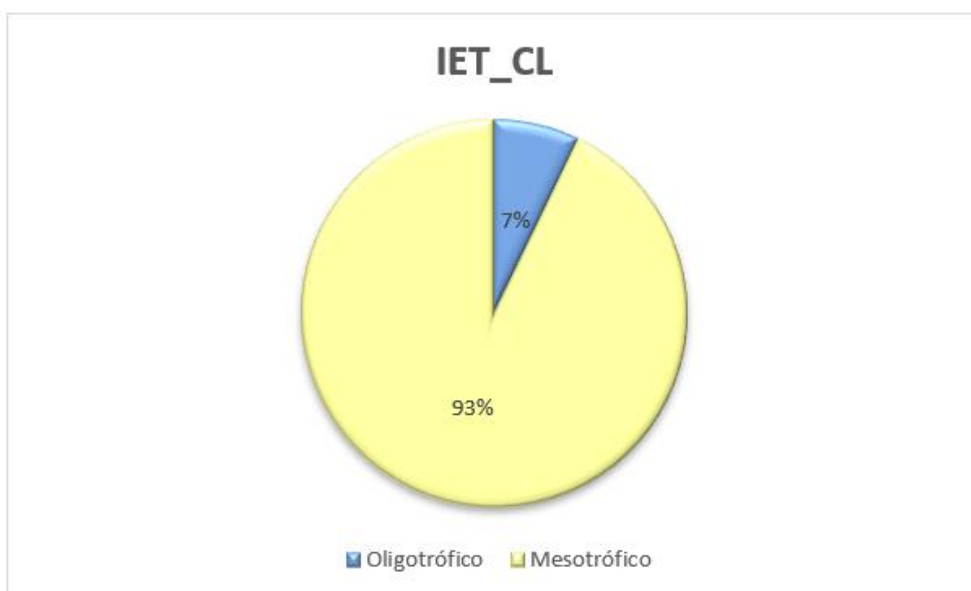
Figura 67: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MI para o IET _ P-Total de Lamparelli



Fonte: Autora, 2025.

Para o IET_CL os valores variaram de $51,9 \text{ mg.L}^{-1}$ a $56,4 \text{ mg.L}^{-1}$ e em 93% dos resultados apresentou a classificação mesotrófico (FIGURA 68).

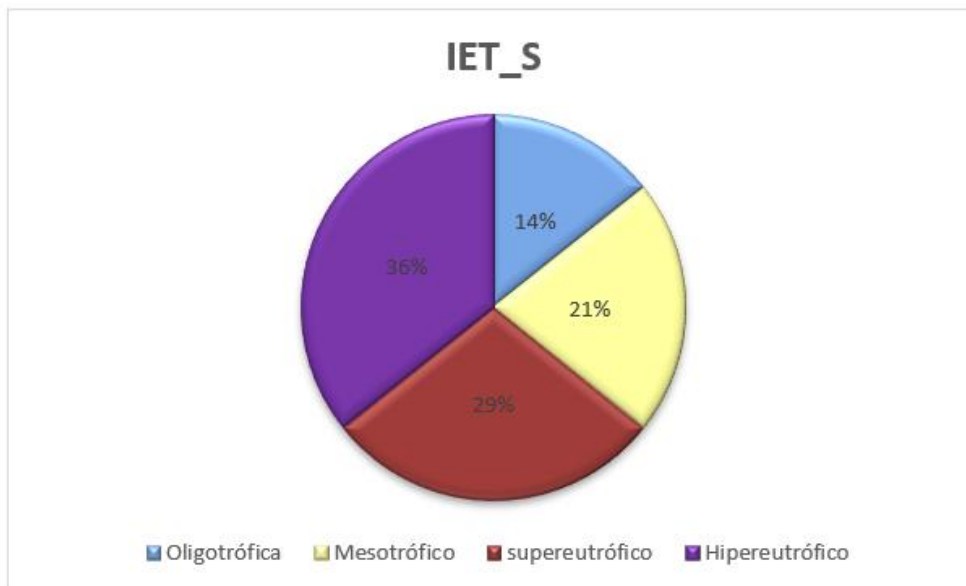
Figura 68: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MI para o IET _ CL de Lamparelli



Fonte: Oliveira et al, 2025.

Para o IET_S os valores variaram de $50,0 \text{ mg.L}^{-1}$ a 70 mg.L^{-1} e em 36% dos resultados apresentou a classificação hipereutrófico, 29% supereutrófico, 21% mesotrófico e 14% hipereutrófico (FIGURA 69).

Figura 69: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MI para o IET _ S de Lamparelli



Fonte: Autora, 2025.

Para o IET_PIG os valores variaram de $43,4 \text{ mg.L}^{-1}$ a $45,1 \text{ mg.L}^{-1}$ e em 100% dos resultados apresentou a classificação ultraoligotrófico (FIGURA 70).

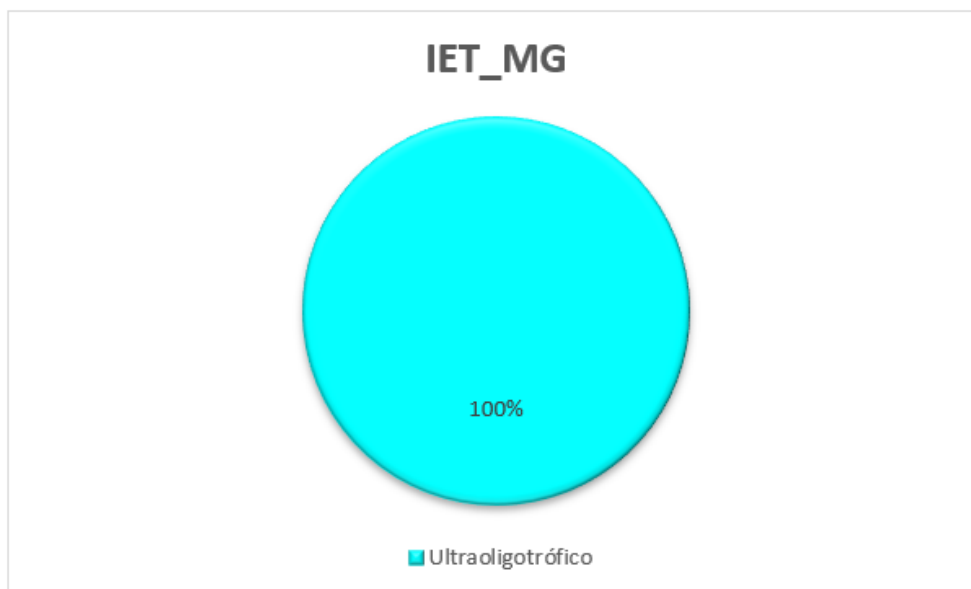
Figura 70: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MI para o IET _ PIG (índice proposto)



Fonte: Autora, 2025.

Para IET_MG os valores variaram de $43,4 \text{ mg.L}^{-1}$ a $44,8 \text{ mg.L}^{-1}$ em relação ao nível trófico 100% apresentaram a classificação ultraoligotrófico (FIGURA 71).

Figura 71: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MI para o IET _ MG. (índice proposto)



Fonte: Autora, 2025.

5.4.6 Estação M5

Na estação M5 foram utilizados os dados da camada superficial de água, do ano de 2005 a 2016 para a realização dos cálculos dos índices definido por Lamparelli e os definidos pelo estudo para a estação M5.

Na Tabela 12 encontram-se os resultados calculados dos IET's de e a classificação do seu nível trófico.

Tabela 12: Resultado dos cálculos dos IET de Lamparelli e do IET proposto para a estação de monitoramento M5 e classificação do seu nível trófico

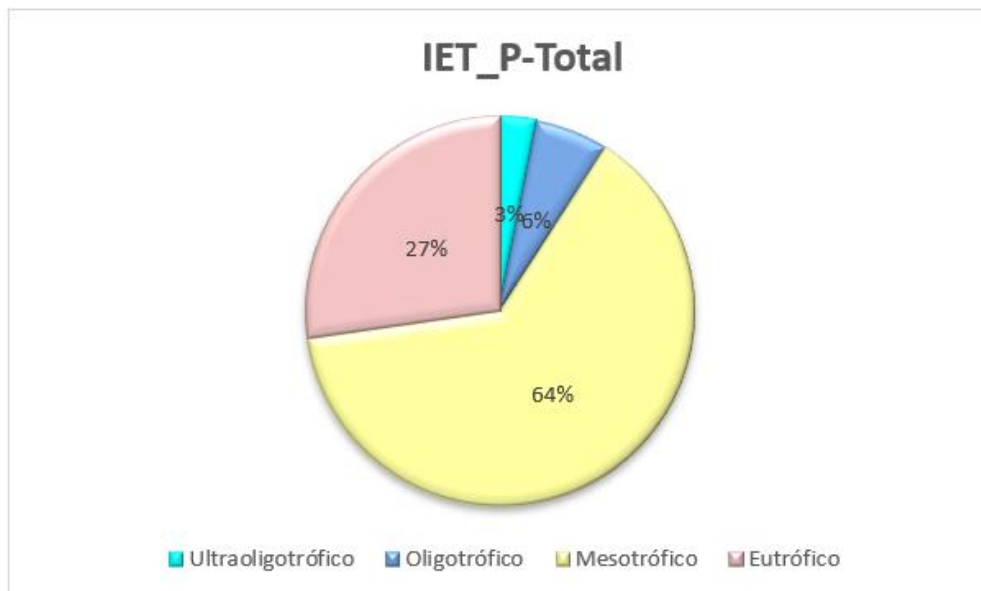
Ano/mês	Período	Índice de Lamparelli			Novo Índice	
		IET_FT	IET_CL	IET_S	IET_PIG.	IET_MG
2005-12	Chuvoso	55,0	59,2	70,0	69,2	68,5
2005-12	Chuvoso	59,3	59,4	70,0	69,4	68,4
2005-12	Chuvoso	57,9	58,9	70,0	69,1	68,2
2006-12	Chuvoso	54,6	55,7	70,0	67,4	68,6
2006-12	Chuvoso	60,4	56,6	70,0	67,9	69,3
2006-12	Chuvoso	57,0	55,9	70,0	67,5	68,7
2007-12	Chuvoso	51,2	55,3	67,4	67,2	68,0
2007-12	Chuvoso	55,4	56,2	67,4	67,7	68,1
2007-12	Chuvoso	55,3	54,9	67,4	67,0	68,0
2007-03	Chuvoso	56,6	53,9	63,2	66,4	67,0
2007-03	Chuvoso	56,7	53,0	63,2	66,0	66,8

2007-03	Chuvoso	57,2	51,9	63,2	65,4	65,9
2008-12	Chuvoso	52,8	58,6	70,0	68,9	68,1
2008-12	Chuvoso	46,9	57,7	70,0	68,5	67,6
2008-12	Chuvoso	48,3	59,1	70,0	69,2	68,1
2009-03	Chuvoso	61,8	53,6	67,4	66,3	67,3
2009-03	Chuvoso	60,0	53,6	67,4	66,3	67,3
2009-03	Chuvoso	58,5	55,3	67,4	67,2	67,5
2010-03	Chuvoso	58,1	55,1	67,4	67,1	67,3
2010-03	Chuvoso	58,3	54,6	67,4	66,8	66,8
2010-03	Chuvoso	59,2	54,1	67,4	66,6	67,0
2011-12	Chuvoso	55,7	54,6	67,4	66,8	67,5
2011-12	Chuvoso	58,6	56,5	67,4	67,8	68,4
2011-12	Chuvoso	57,8	57,1	67,4	68,2	67,0
2013-12	Chuvoso	58,3	55,9	67,4	67,5	67,5
2013-12	Chuvoso	60,5	53,0	67,4	66,0	66,1
2013-12	Chuvoso	59,5	56,4	67,4	67,8	66,8
2015-12	Chuvoso	57,2	58,9	67,4	69,1	68,1
2015-12	Chuvoso	54,6	58,3	67,4	68,8	68,0
2015-12	Chuvoso	55,5	57,7	67,4	68,5	67,3
2016-03	Chuvoso	58,8	59,2	67,4	69,2	68,7
2016-03	Chuvoso	59,7	58,9	67,4	69,1	68,1
2016-03	Chuvoso	60,6	58,6	67,4	68,9	68,1

Fonte: Oliveira et al, 2025.

Para o IET_P-Total os valores variaram de 46,9 mg.L⁻¹ a 61,8 mg.L⁻¹ e em 64% apresentou a classificação mesotrófico, 27% apresentaram a classificação eutrófico, 6% apresentaram a classificação oligotrófico (FIGURA 72).

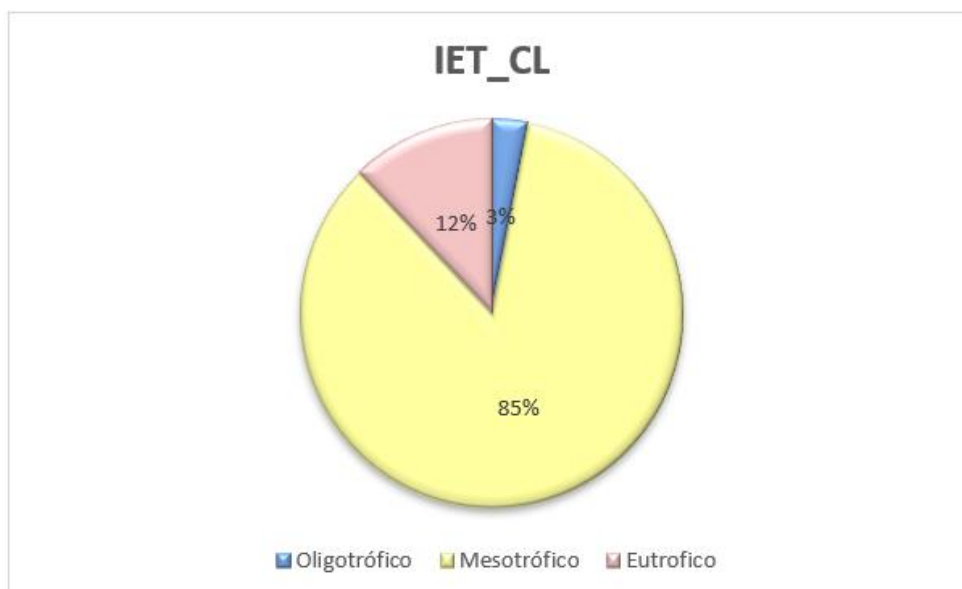
Figura 72: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação M5 para o IET _ P-Total de Lamparelli



Fonte: Autora, 2025.

Para IET_CL os valores variaram de 51,9 mg.L⁻¹ a 59,4 mg.L⁻¹ e 85% dos resultados apresentou a classificação mesotrófico, 12% apresentou a classificação eutrófico e 3% a classificação oligotrófico (Figura 73).

Figura 73: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação M5 para o IET _ CL de Lamparelli



Fonte: Autora, 2025.

Para o IET_S os valores variaram de 63,2 mg.L⁻¹ a 70,0 mg.L⁻¹ e em 91% dos resultados apresentou a classificação hipereutrófico e 9% apresentou a classificação supeutrófico (FIGURA 74).

Figura 74: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MI para o IET _ S de Lamparelli



Fonte: Autora, 2025.

Para o IET_PIG (índice proposto) os valores variaram de $65,4 \text{ mg.L}^{-1}$ a $69,4 \text{ mg.L}^{-1}$ e em 76% dos resultados apresentaram a classificação hipereutrófico e 24% apresentaram a classificação supereutrófico (FIGURA 75).

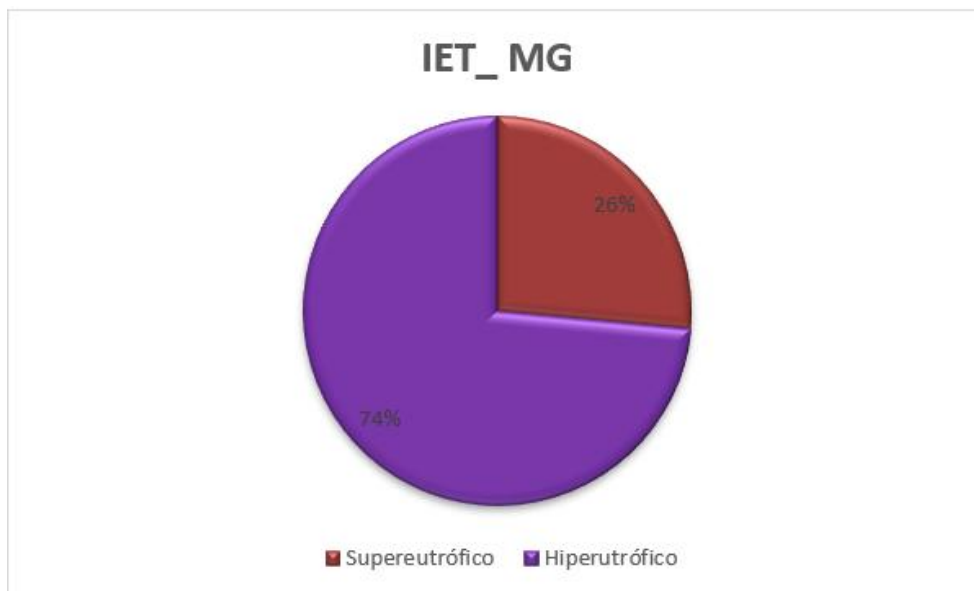
Figura 75: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MI para o IET _ PIG (índice proposto)



Fonte: Autora, 2025.

Para IET_MG os valores variaram de $65,9 \text{ mg.L}^{-1}$ a $69,3 \text{ mg.L}^{-1}$ e em 74% dos resultados apresentou a classificação hipereutrófico e 26% apresentaram a classificação supereutrófico (FIGURA 76).

Figura 76: Porcentagem do nível trófico encontrado na Estação MJV para o IET _ MG. (índice proposto)



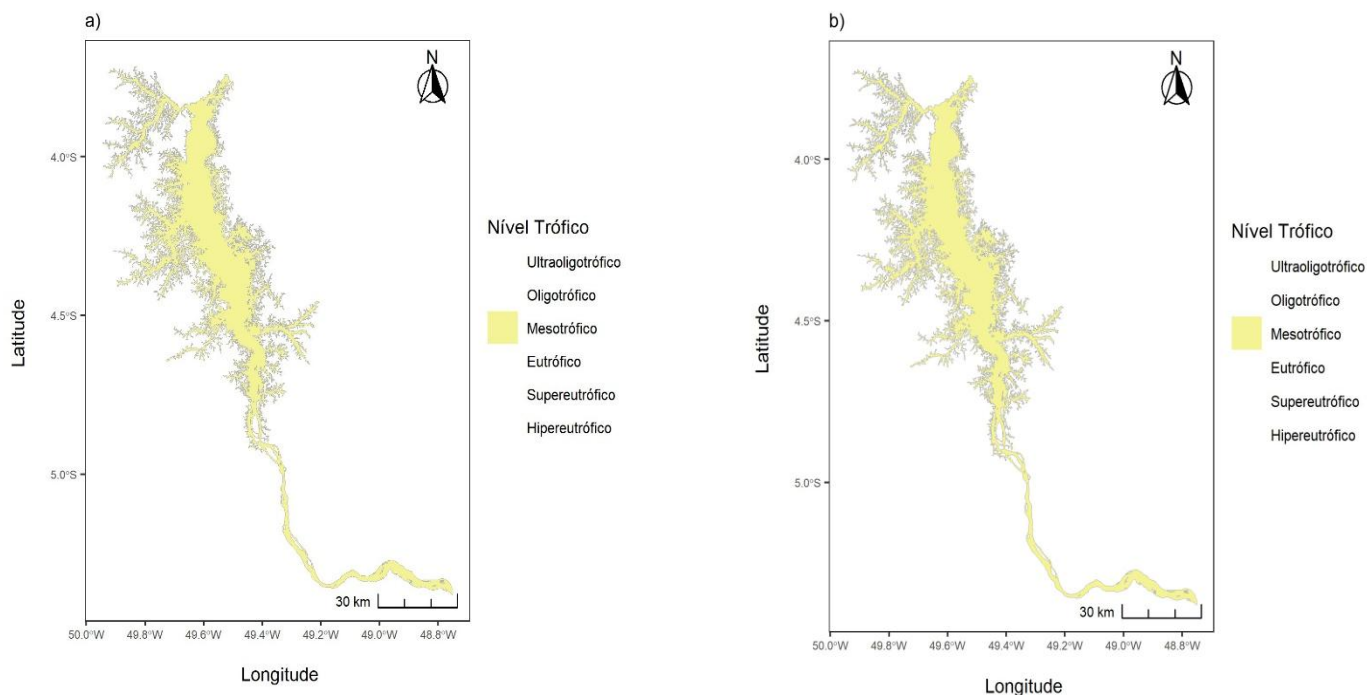
Fonte: Autora, 2025.

5.5 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO ÍNDICE DO ESTADO TRÓFICO.

Para a análise espacial, utilizou-se a média geométrica de cada ponto amostrado, separada entre os períodos seco e chuvoso, como base para a elaboração dos mapas de interpolação por krigagem. A Figura 77 mostra a distribuição espacial do IET de Lamparelli em função da clorofila-a, para os períodos seco e chuvoso. Durante o período seco, os modelos exponencial e esférico apresentaram melhor desempenho, com erros absolutos médios (MAE) de aproximadamente 1,68 a 1,70 e RMSE em torno de 2,12, além de viés médio leve (entre $-0,16$ e $-0,21$). O modelo gaussiano, embora ainda estatisticamente válido ($p > 0,05$), mostrou maior erro (MAE = 2,04; RMSE = 2,74) e maior viés ($-0,46$), o que indica desempenho inferior no ajuste aos dados observados.

No período chuvoso, os três modelos mantiveram desempenho consistente, com erros ainda menores: MAE entre 1,87 e 1,92, e RMSE entre 1,95 e 2,00. O modelo exponencial novamente apresentou os melhores indicadores gerais, com o menor RMSE (1,95) e erro absoluto médio (1,87). Todos os modelos apresentaram alta concordância estatística com os dados observados ($p > 0,85$), e viés médio muito pequeno (entre $-0,05$ e $-0,15$). Portanto, o modelo exponencial foi adotado para a interpolação espacial do IET nos períodos seco e chuvoso, por apresentar o melhor desempenho estatístico entre os modelos avaliados.

Figura 77: Mapa de predição do IET(CL) de Lamparelli para o período seco (a) e chuvoso (b).



Fonte: Oliveira et al, 2025.

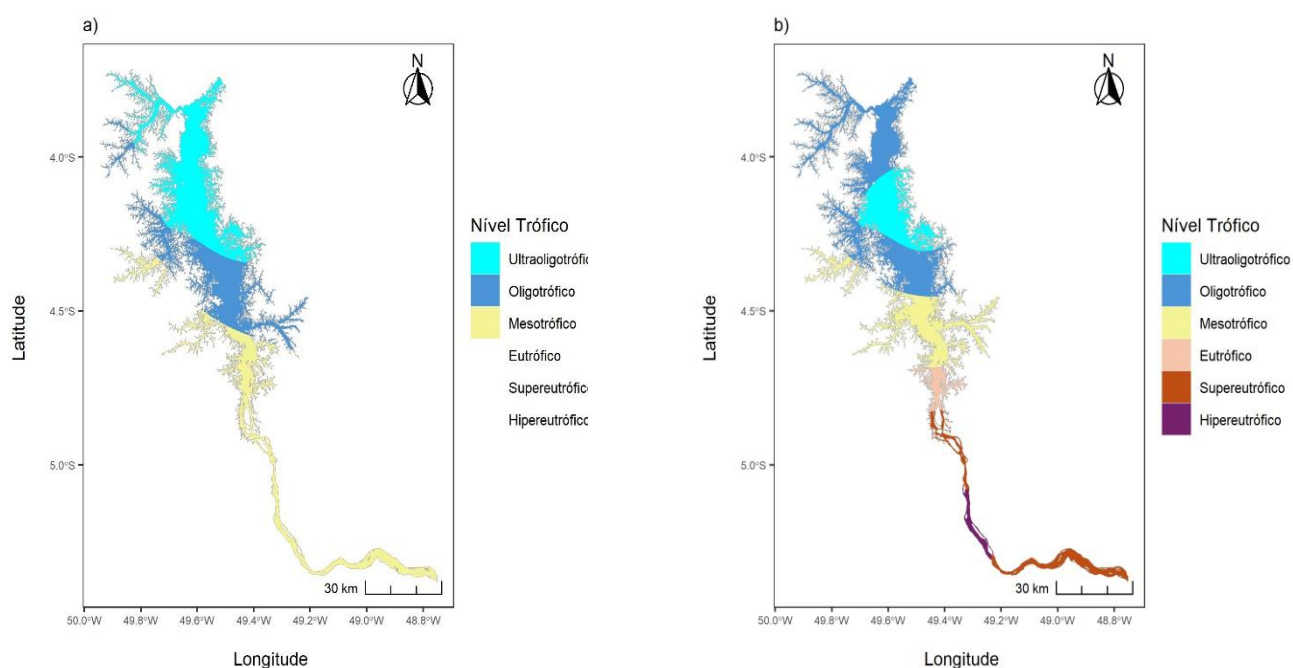
As representações espaciais obtidas com base no modelo de Lamparelli para os períodos hidrológicos (a) seco e (b) chuvoso revelam uma classificação trófica homogênea predominantemente mesotrófica ao longo de todo o reservatório. A ausência de variação espacial entre os compartimentos lótico, de transição e lacustre, bem como a estabilidade entre os dois períodos analisados, evidencia uma baixa capacidade do modelo em captar gradientes tróficos decorrentes da dinâmica hidrológica e do aporte sazonal de nutrientes.

Considerando que o modelo foi originalmente calibrado com dados de reservatórios do sudeste brasileiro, sua aplicação em um sistema de maior porte e complexidade pode resultar em subestimações significativas do estado trófico real, especialmente em regiões sujeitas à intensificação da produtividade primária no período chuvoso. Tais limitações reforçam a necessidade de modelos calibrados com dados locais ou da integração de múltiplos indicadores limnológicos, a fim de garantir uma avaliação mais representativa da qualidade ambiental do ecossistema.

A Figura 78 apresenta a distribuição espacial do IET proposto, calculado a partir dos valores preditos por krigagem ordinária com base nos pigmentos totais. A comparação dos modelos de krigagem (gaussiano, exponencial e esférico) nos períodos seco e chuvoso indicou que todos apresentaram valores preditos estatisticamente compatíveis com os observados ($p > 0,05$ nos testes t pareado e de Wilcoxon). O modelo exponencial se destacou, com os menores erros (MAE e RMSE) e maior correlação com os dados reais. No período

seco, apresentou MAE de 2,79 e RMSE de 3,79, com viés de apenas 0,78. No chuvoso, obteve MAE de 3,42, RMSE de 3,75 e correlação de 0,90. O modelo esférico teve desempenho intermediário, próximo ao exponencial. Já o modelo gaussiano apresentou maior dispersão dos resíduos e tendência de superestimação. Assim, o modelo exponencial foi o que mostrou melhor ajuste espacial em ambos os períodos.

Figura 78: Mapa de predição do IET proposto para pigmentos totais para o período seco (a) e chuvoso (b).



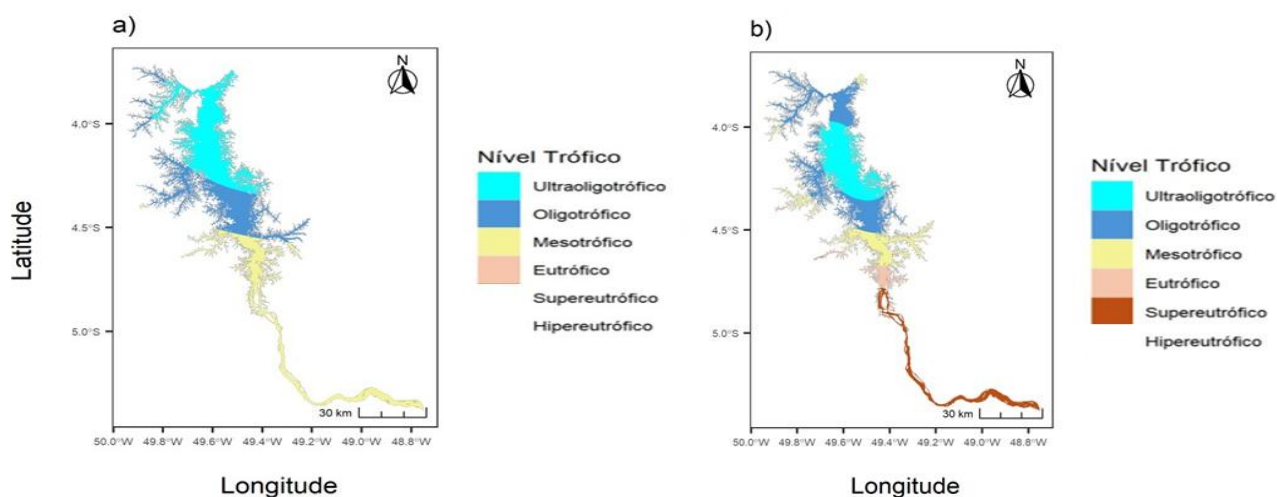
Fonte: Oliveira et al, 2025..

Os mapas representam a distribuição do nível trófico no reservatório, estimada por interpolação espacial (krigagem) com base no modelo proposto, para os períodos (a) seco e (b) chuvoso. No período seco, observa-se predominância de condições oligotróficas a ultraoligotróficas no ambiente lacustre (norte), e níveis mesotróficos no trecho lótico (sul). Já no período chuvoso, há intensificação da eutrofização na porção sul, com ocorrência de áreas eutróficas, supereutróficas e hipereutróficas, associadas ao maior aporte de nutrientes por escoamento superficial. A zona de transição revela um avanço no nível trófico entre os períodos, refletindo a sensibilidade hidrológica do sistema. O modelo proposto, baseado em dados observacionais e krigagem, permite identificar zonas críticas e orientar o monitoramento ambiental de forma mais eficiente.

Na Figura 79, encontra-se o mapa de distribuição para o parâmetro magnésio para o período seco e chuvoso, no qual também é possível perceber, que no período seco, a

distribuição do nível trófico no reservatório em grande parte do reservatório a classificação ultraoligotrófico, no centro apresentou a classificação oligotrófico e na zona de transição apresentou a classificação mesotrófico. No período chuvoso, também se identificou maiores variações tróficas na região sul do reservatório com a ocorrência da classificação supereutrófico.

Figura 79: Mapa de predição do IET proposto para magnésio para o período seco (a) e chuvoso (b)



Fonte: Autora, 2025.

Observou-se que o modelo proposto foi mais responsivo às variações sazonais, refletindo com maior precisão o aumento do aporte de nutrientes durante o período chuvoso e a consequente elevação do estado trófico em determinadas regiões. Em contrapartida, o modelo de Lamparelli (2004) apresentou limitação na distinção entre classes tróficas, classificando grande parte do reservatório como mesotrófico, o que reduz sua capacidade de representar a complexidade trófica local. Os baixos valores de erro e a alta correlação com os dados observados corroboram a validade do modelo para aplicações ambientais, reforçando sua confiabilidade para fins de monitoramento da qualidade da água.

6 CONCLUSÃO

A comparação entre os dados recentes (2022–2023) e a série histórica (2005–2016) evidenciou que, para os cinco pontos avaliados, apenas C2 apresentou diferença estatisticamente significativa, na aplicação do teste de Mann-Whitney ($p < 0,05$). De modo geral, as medianas e amplitudes das variáveis Transparência, Pigmentos Totais, Fósforo Total

e Magnésio permaneceram dentro dos limites históricos, indicando estabilidade das condições superficiais da água.

A aplicação da krigagem ordinária permitiu uma interpolação eficiente dos dados, promovendo a suavização de variações locais sem perda da tendência central, o que favoreceu a visualização contínua da distribuição trófica no reservatório da UHE Tucuruí.

Observou-se que o modelo proposto foi mais responsivo às variações sazonais, refletindo com maior precisão o aumento do aporte de nutrientes durante o período chuvoso e a consequente elevação do estado trófico em determinadas regiões. Em contrapartida, o modelo de Lamparelli apresentou limitação na distinção entre classes tróficas, classificando grande parte do reservatório como mesotrófico, o que reduz sua capacidade de representar a complexidade trófica local.

Além disso, a alta correlação entre os índices baseados em pigmentos totais e magnésio reforça a viabilidade do uso do magnésio como parâmetro alternativo ou complementar na avaliação trófica, o que representa uma contribuição relevante, sobretudo em contextos com restrições analíticas ou orçamentárias.

Entretanto, a pesquisa apresenta algumas limitações.

Os modelos foram aplicados apenas à superfície da coluna d'água, não considerando variações verticais importantes em sistemas estratificados.

A série histórica apresenta lacunas que podem comprometer a robustez em determinadas regiões. Além disso, a generalização dos modelos propostos para outros ecossistemas tropicais ainda requer validação adicional

Apesar dessas limitações, os resultados indicam que o modelo proposto é uma alternativa promissora e coerente para a avaliação da qualidade da água em ambientes tropicais complexos. Recomenda-se sua aplicação em outros sistemas e a ampliação da base de dados para validação futura.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; DE MORAES, G.; LEONARDO J & SPAROVEK G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, **Meteorologische Zeitschrift**, v.22,n. 6 p711-728. Dec. 2013.

APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 2017. 23rd ed. Washington DC: American Public Health Association. ISBN 9780875532875.

AQUINO, S; LATRUBESSE, E. M; FILHO, E. E. S. Caracterização hidrológica e geomorfológica dos afluentes da bacia do rio Araguaia. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 10, n. 1, p. 1-12, 2009.

AYRIMORAES, S.; FONTENELLE, T. CRUZ, M. **Reservatórios Artificiais e seus Efeitos no Balanço Hídrico Nacional. 2019.** Disponível em: https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/coluna_opinioao_maio_-_reservatorios_artificiais.pdf. Acesso em: 08/02/2025.

BADGER, M. R., T. J. ANDREWS, S. M. WHITNEY, M. LUDWIG, D. C. YELLOWLEES, W. LEGGAT, AND G. D. PRICE. The diversity and coevolution of Rubisco, plastids, pyrenoids, and chloroplast-based CO₂-concentrating mechanisms in algae. **Canadian Journal of Botany**. Jun 1998.

BEARDALL, J.; ALLEM, D.; BRAGG, J.; FINKEL, Z.V; FLYNN, K.J.; QUIGG, A.; REES, T.A.V.; RICHARDSON, A.; RAVEN, J.A. Living in a high CO₂ world: impacts of global climate change on marine phytoplankton. **Plant Ecology & Diversity**, v. 2, p. 191-205, Aug. 2009.

BICUDO, CEM. Limnologia by J G Tundisi and Matsumura Tundisi. **Brazilian Journal of Biology**, v. 69, n. 1, pp. 227–227. 2009.

BHAT, J. Y.; THIEULIN-PARDO, G.; HARTL, F. U.; & HAYER-HARTL, M. Rubisco activases: AAA+ chaperones adapted to enzyme repair. *Frontiers in Molecular Biosciences*, v.4, n. 20, p. 10. Apr. 2017.

BERNER, R. A. GEOCARBSULF: A combined model for Phanerozoic atmospheric O₂ and CO₂. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 70 issue 23, Dec. 2006.

BETTS RA, BOUCHER O, COLLINS M, ET AL. Projected increase in continental runoff due to plant responses to increasing carbon dioxide, *Nature*, v. 448, p. 1037-1041, Aug. 2007.

BLENCKNER, T. A conceptual model of climate-related effects on lake ecosystems. *Springer Nature Link*, v. 533, p.1-14. Jan. 2005

CARLSON, R. E. **A trophic state index for lakes**. s. *Limnology and Oceanography* v. 22, n. 2, p. 361- 369. Março 1977.

CARMO-SILVA, E.; SCALES, J.C.; MADGWICK, P.J.; PARRY, M.A.J. Optimizing Rubisco and its regulation for greater resource use efficiency. *Plant, Cell & Environment*, v. 38, p. 1817–1832. Aug. 2015.

CASTRO, N.; BRANDÃO, R; HUNT, JULIAN, D.; CATÓLICO, A. C. “Características e Funcionalidades das Usinas Hidrelétricas Reversíveis”. **Agência Canal Energia**. Rio de Janeiro. Jul.2018.

CASTRO, C., H. e FABRIZY, N. L. P. Impactos Ambientais de Reservatórios e Perspectivas de Uso Múltiplo. *Revista Brasileira de Energia*, v. 4, n. 1.p. 1- 7, 1995.

CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo and ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2023. *Guia Nacional De Coleta E Preservação De Amostras Água, Sedimento, Comunidades Aquáticas E Efluentes Líquidos*. 2nd ed. 456 p. Brasília. ISBN 978-65-88101-48-3.

CLELAND, W.W; ANDREWS, T. J.; GUTTERIDGE, S.; HARTMAN, F.C.; LORIMER, G. H. Mechanism of Rubisco: the carbamate as general base. **Chemical Reviews**. v. 98. p.549 –562. Mar.1998.

COLES, J.F., AND JONES, R.C. (2000) Effect of temperature on photosynthesis-light response and growth of four phytoplankton species isolated from a tidal freshwater river, *J Phycol*, v. 36, p. 7–16. 2001.

COLE J.J.; PRAIRIE, Y.T.; CARACO, N.F.; ET AL. Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget, **Ecosystems** v. 10, issue 1, 13 Feb. 2007.

CMB - COMISSÃO MUNDIAL DE BARRAGENS (CMB). **Estudo de caso da usina hidrelétrica de Tucuruí (Brasil): Relatório final da fase de escopo**.p. 80, Rio de Janeiro: CMB 1999.

CUNHA, A.C. Revisão descritiva sobre qualidade da água, parâmetros e modelagem de ecossistemas aquáticos tropicais. **Biota Amazônica**, v.13, n.1. p.124-143. Jun. 2013.

CUNHA, D. G. F.; CALIJURI, M. do C.; LAMPARELLI, M. C. **Um índice de estado trófico para reservatórios tropicais / subtropicais (TSI tsr)**. Engenharia Ecológica. v. 60 p.126–134. São Paulo, 2013.

DE STASIO, B.T.; HILL, D.K.; JR, KLEINHANS, J.M.; NIBBELINK, N.P.; AND MAGNUSON, J.J. Potential effects of global climate change on small north-temperate lakes: physics, fish, and plankton. **Limnol Oceanogr**, v.41, p. 1136–1149. Jul. 1996.

DEUS, A.C.C.R; MATOS, D.M.S. Monitoring subtropical aquatic ecosystems: evaluating the use of Trophic State Indices (TSI) and Aquatic Life Protection (API) as baseline indices by monitoring an urban reservoir in southeastern. **Brazil. Braz.J.Biol**, v. 84, p. 1-13. May. 2024.

DEUTSCH, C V and JOURNEL, A G. **GSLIB: Geostatistical Software Library and User's**. 1997. 2 nd ed. Oxford University Press. 375 p.

DUKA, S; VALLJA, L.; VASJARI, M.; SHEHU, A.; Seasonal Variation of Lamparelli Trophic State Index (TSI) In Kune-Vaini Lagoon System, Fresenius Environmental Bull, v.30,n.7,p. 8690-8695, jul. 2021.

ELETRONORTE. Usina Hidrelétrica de Tucuruí. Programa de Comunicação social. 2020. Disponível em: <http://famacom.com.br/wp-content/uploads/2020/05/UHE-Tucuru%C3%AD.pdf>. Acesso 15/01/2024

ELLIOTT, J.A.; DEFEW, L. **Modelling the response of phytoplankton in a shallow lake (Loch Leven, UK) to changes in lake retention time and water temperature**. Springer Nature Link, v. 681. P. 105-116, Nov. 2012

ESTEVEES, F. DE A; PANOSSO, R. "Fósforo". In: **ESTEVEES, F. de A (Org.)** Fundamento da Limnologia. 2011

FANG, Y.P.; DENG, W. **The critical scale and section management of cascade hydropower exploitation in Southwestern China**. Energy, v. 36, n. 10, p. 5944-5953, Oct. 2011.

FARAGE, J. A. P.; MATOS, A. T; SILVA, D. D.; BORGES, A. C. Determinação do Índice de Estado Trófico para Fósforo em Pontos do rio Pomba. Engenharia na Agricultura Viçosa – MG, v.18, n. 4.p. 322-329, Julho/Agosto 2010

FERNSE, P., M. **Barragens na Amazônia 2: Hidrelétricas Planejadas em Longo Prazo na Amazônia Brasileira**. Amazônia Real, 2013. Disponível em: <http://amazoniareal.com.br/barragens-na-amazonia-1-resumo-da-serie/>. Acessado em: 15/10/2023.

FEARNSIDE, P. M. **Environmental impacts of Brazil's Tucuruí Dam: Unlearned lessons for hydroelectric development in Amazonia.** Environmental Management, v27, n.3, p.96-377. 2001a. Disponível em: http://philip.inpa.gov.br/publ_livres/mss%20and%20in%20press/tucambientais.pdf. Acessado em 08/10/2020.

FEARNSIDE, P. M. **Impactos ambientais da barragem de Tucuruí: lições ainda não aprendidas para o desenvolvimento hidrelétrico na Amazônia,** p. 53-74, 2015. In: _____. Hidrelétricas na Amazônia: impactos ambientais e sociais na tomada de decisões sobre grandes obras. Manaus: Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, 2015. v. 1, p. 53–74.

FERREIRA, A. O. et. al. Carbon balance and crop residue management in dynamic equilibrium under a no-till system in Campos Gerais. **Rev. Bras. Ciênc. Solo,** Viçosa , v. 36, n. 5, p. 1583-1590, Nov. 2012 .

FONSECA, B. M. Impactos de mudanças climáticas globais sobre algas e cianobactérias. **Heringeriana Brasilia,** v.6, n.1, p. 49-51 Nov. 2012.

FORNARELLI, R., GALELLI, S., CASTELLETTI, A., ANTENUCCI, J.P., MARTI, C.L. AN empirical modeling approach to predict and understand phytoplankton dynamics in a reservoir affected by interbasin water transfers. **Water Resources Research,** v. 49, issue 6, May 2013.

FORIO, MAE e GOETHALS, PLM, Uma abordagem integrada de monitoramento e avaliação multicomunitária de ecossistemas aquáticos para apoiar o desenvolvimento sustentável. **Sustentabilidade ,** v. 12, n. 14, p. 5603. 2020.

FURTADO, G. C. A. Avaliação Do Despacho De Energia Elétrica No Curto Prazo, Na Uhe Tucuruí, Por Meio Das Perdas No Processo De Geração. 2013. Pará. Universidade Federal do Pará. 57p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.

GEIGER D.R.; SERVAITES, J.C. Diurnal regulation of photosynthetic carbon metabolism in C3 plants. Annu. **Rev Plant Physiol Plant Mol Biol**, v.. 45. p. 235–256. 1994

GOOVAERTS, P. Geostatistics for natural resources evaluation. 1997. New York: Oxford University Press. P. 489.(Applied Geostatistics Series). ISBN0.19.511538-4.

HASSAN, H.; HANAOKI, K.; MATSUO, T. A modeling approach to simulate impact of climate change in lake water quality: phytoplankton growth rate assessment, *Water Science and Technology*, v. 37, issue 2, p. 177-185, 1998.

HAYES, N. M; DEEMER,B.R; CORMAN, J. R; RAZAVI, N. R; STROCK, K. E. Key differences between lakes and reservoirs modify climate signals: A case for a new conceptual model. **Lymnology and Oceanography**, v. 2, issue 2, Mar.2017.

HAYHOE, K.; AND OTHERS. Regional climate change projections for the Northeast USA. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**. Jan. 2008.

HENGL, T. **A practical guide to geostatistical mapping of environmental variables**. 2007. Publications Office. 165 p. JRC Scientific and Technical Reports. ISBN 9789279069048.

HUISMAN, J.; CODD, GA.; PAERL, HW; IBELINGS, BW; VERSPAGEN JM. , VISSER, PM. Cyanobacterial blooms. **Nat. Rev. Microbiol.**, v. 16, n. 8, p. 471. Jun. 2018.

HUISMAN, J., SHARPLES, J., STROOM, J., VISSER, P.M., KARDINAAL, W.E.A., VERSPAGEN, J.M.H., AND SOMMEIJER, B. Changes in turbulent mixing shift competition for light between phytoplankton species. *Ecology*, v.85, p. 2960–2970. Nov.2004.

HUTCHINSON, G. E. Eutrophication, past and present. In: Proceedings of Symposium on Eutrophication: Causes, Consequences, Correctives. 1969. **National Academy of Sciences**, Washington DC, p. 17–26. ISBN: 0309017009, 9780309017008

HU, M; MA, R; CAO, Z; XIONG, J; XUE, K. Remote Estimation of Trophic State Index for Inland Waters Using Landsat-8 OLI Imagery. **Remote Sens.** v. 13, n. 10, May. 2021.

IMBODEN, D. M. Phosphorus model of lake eutrophication: P model of lake eutrophication. **Limnology and Oceanography**, v. 19, issue 2, Mar.1974.

JÖHNK, K.D., HUISMAN, J. SHARPLES, J., SOMMEIJER, B., VISSER, P.M., AND STROOM, J.M. Summer heatwaves promote blooms of harmful cyanobacteria. **Glob Change Biol**, v.14, p. 495–512. Nov.2008.

JUNK, W. J., ROBERTSON, B. A., DARWICH, A. J. & VIEIRA, I. Investigações limnológicas e ictiológicas em Curua-Una, a primeira represa hidrelétrica na Amazônia Central. **Acta Amazonica**, v. 11 n. 4, p.689-716, 1981.

KORNIJÓW, R. Eutrophication and derivative concepts. Origins, compatibility and unresolved issues. **Ecohydrology&hidrobiologia**, v. 24, n.2, pp. 289-298. April 2024.

KLIPPEL, G.; MACÊDO, R. L.;BRANCO, R. M. C. WC. Comparison of different trophic state indices applied to tropical reservoirs, **Lakes \$ Reservoir**v. 25, issue 2, p. 214-229. 2020.

KNIGHT, S; ANDERSSON, I; BRÄNDÉN, C.I. Crystallographic analysis of ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase from spinach at 2.4 Å resolution. Subunit interactions and active. **Journal of Molecular Biology**. v. 215. p. 113 – 160. Sep. 1990.

LAMPARELLI, M. C. Graus de trofia em corpos de água do Estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento. 2004. 253 f. **Tese (Doutorado em Ciências)** – Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

LEE, G. F. Eutrophication. In: **Transactions of the Northeast Fish and Wildlife Conference**, p. 39-60. Ellenville, NY. .. May 1972.

LEHNER, B; LIERMANN, C. R; REVENGA, C; VÖRÖSMARTY, C.; FEKETE, B; CROUZET, P; DÖLL, P; ENDEJAN, M.; FRENKEN, K.; MAGOME, J.; NILSSON, C.; ROBERTSON, J. C.; RÖDEL, R.; SINDORF, N.; WISSE, D. High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management. **Frontiers in Ecology and the Environment**. v 9, Issue 9, p. 494-502. May. 2011.

LEWIS, S.L.; LLOYD, J.; SITCH, S.; MITCHARD, E.T. & LAURANCE, W.F. Changing ecology of tropical forests: evidence and drivers. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, v.40, p.529-549. Dec. 2009.

LINDEMAN, R.L. The trophic-dynamic aspect of ecology. **Ecology**, v. 23, n.4, pp. 399–417. Oct. 1942.

LIN, S. S; SHEN, S. L.; ZHOU, A.; LYU, H. M. Sustainable development and environmental restoration in Lake Erhai, China. **Jounal os Cleaner Production**, v. 258, p. 13, fev. 2020.

LIKENS, G.E. (Ed.). Nutrients and eutrophication. **American Society of Limnology and Oceanography Spec. Symp**, v. 17, p. 328. Nov. 1972.

LIMA, G. B.; HENKE, G.; PINTO, W. DE P.; BADOTTO, J. B.; MONTEBELLER, C. A. **Grau de Eutrofização na Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria da Vitória, ES, Brasil**. 2022. Collection: Applied ENviromental and Sanitary Enginnerin. Editora Atena. p 42-55.

LUND, J. Eutrophication. **Nature**, v. 214.pp. 557-558. May 1967.

MAMUN, M.; AN, K.G. Stream health assessment using chemical and biological multi-metric models and their relationships with fish trophic and tolerance indicators. **Ecol. Indic**, v. 11,p.14. Apr.2020.

MAMUN, MD; KIM, J.Y.; NA, K.G. Multivariate Statistical Analysis of Water Quality and Trophic State in na Artificial Dam Reservoir. **Water** , v.13, issue 2, p. 186. Jun.2021.

MARENCO, R. A.; ANTEZANA-VERA, S. A.; GOUVÊA, P. R. DOS S. Fisiologia de espécies florestais da Amazônia: fotossíntese, respiração e relações hídricas. Fisiologia e Morfologia Vegetal. **Rev.Ver. Ceres**, v.61, p. 786-799. Dez. 2014.

MORGANE, ML , GASCUEL-ODOUX, C. , MÉNESGUEN, A. , SOUCHON, Y. , ÉTRILLARD, C. , LEVAIN, A. , MOATAR, F. , PANNARD, F. , SOUCHU, P. , LEFEBVRE, A. , PINAY, G. Eutrofização: um vinho novo em uma garrafa velha?. **Ciência Total Ambi.** , 651, p. 1 – 11. 2019.

OH, Z.G; ASKEY, B; GUNN, L. H. Red Rubiscos and opportunities for engineering green plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 74, Issue 2. p 520–542, Sep.2023

OLIVEIRA, L. C. A.. Papel fisiológico do magnésio na fotossíntese, atividade da Rubisco e Fixação Biológica de Nitrogênio em genótipos de soja. Orientador: Prof. Dr. André Rodrigues dos Reis. 2024. 145 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP), São Paulo, 2024.

OLIVEIRA, M. A. . Influência operacional de um reservatório na dinâmica de nutrientes no processo de eutrofização – Estudo de caso UHE Tucuruí. Orientador: Junior Hiroyuki Ishihara. 2019. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental) – Universidade Federal do Pará, Pará, 2019.

OLIVEIRA, M.; BRANDÃO, I. W.S; SARAIVA, A.C.F; TUNDISI, J.G. A. Modeling the eutrophication process in Tucuruí, a tropical amazonian reservoir, **Brazilian Journal os Biology**, v. 85. Aug. 2025.

O'REILLY, C. M ;SAPNA S.; DEREK, K. G.; STEPHANIE, E. H.; JORDAN, S. R., REX J. R.; PHILIPP, S.; JOHN D. L.; PETER B. M.; BENJAMIN M. K.; GESA A. W., DIETMAR S. , BO D.;, RITA A.; MATHEW G. A., ORLANE A., LAURI A.; JAY A.; JOHN L. B.; JILL S. B.; JUSTIN D. B.; ELVIRA D. E.; MARTIN T. D.; DAVID P. H.; KARL H.; AMY L. H., SCOTT N. H.; SIMON H. , LYUBOV R. I. , KLAUS D. J., KULLI K.; PETER K.; MICHIO K., ESKO K., GEORGE L.; DAVID M. L.; SALLY M.; LINDA M.; JOHN M. M. DOERTHE C. MUELLER-NAVARRA, MIKHAIL N.; PEETER N.; TIINA N.; RYAN P. N.; PIERRE-DENIS P., ANNA R.; ALON R., MICHELA R.; LARS G. R.; JAMES A. R., NICO S.; NIHAR R. S., DANIEL E. S.; S. GEOFFREY S., MARTIN S., SILKE R. S.; EUGENE S. M. EVREN S., KATRIN T., PIET V., ARI V., ANDREW W., CRAIG E. W., GUOQING Z.. Rapid and highly variable **warming of lake surface waters around the globe**, v. 42, issue 24. 10, pp. 10,773- 10,781. Dec. 2015.

PARRY, M.A.J.; ANDRALOJC, P.J.; MITCHELL, R.A; MADGWICK, P.J.; KEYS, A.J. Manipulation of Rubisco: the amount, activity, function and regulation. *J. Exp. Bot.* v.54, n.386, p. 1321-1333, 2003.

PAERL, H.; HUISMAN, J. Climate Change: A Catalyst for Global Expansion os Harmful Cyanobacterial Blooms. **Enviromental Microbiology Reports**, v.1, p 27-37. Feb. 2009.

PEETERS, F.; STRAILE, D.; LORKE, A.; AND LIVINGSTONE, D.M. Earlier onset of the spring phytoplankton bloom in lakes of the temperate zone in a warmer climate. **Glob. Change Biol.**, v.13, p. 1898–1909. Jul. 2007.

PEREIRA, P. S.; VEIGA, B.V.; DZIEDZIC, M. Avaliação da influência do fósforo e do nitrogênio no processo de eutrofização de grandes reservatórios. Estudo de caso: Usina hidrelétrica Foz do Areia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n.1.p.43-52, Mar.2013.

PIVA-BERTOLETTI, S. A. E. Zooplâncton dos lagos do Parque Estadual das Fontes do Ipiranga (SP) e relações entre espécies zooplanctônicas e estado trófico em corpos d'água do Estado de São Paulo. 2001. 253 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

REVISTA BRASILEIRA DE GEOGRAFIA. Rio de Janeiro: IBGE. Cidades E Estados. 2024. Acessado 03/05/2025. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pa/pacaja.html>.

R DEVELOPMENT Core Team. . R: **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. 2025. Version 4.4.3 Available from : <https://www.R-project.org/>

RIFFENBURGH, R. H. Chapter 20 - Tests on the distribution shape of continuous data. In: _____. Statistics in medicine. 2. ed. San Diego: Academic Press, 2006. p. 369–386. ISBN 9780120887705. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-012088770-5/50060-5>. Acesso em: 03/12/2024.

ROBARTS, R.D., AND ZOHARY, T. Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloom-forming cyanobacteria. **NZ J Mar Freshwater Res**, v. 21, p. 391–399. 19 Feb. 1987.

SANTOS, M.J.M.. **Aspectos limnoquímicos do reservatório da Usina Hidrelétrica de Tucuruí (PA): uma avaliação temporal entre 1986 e 2001**. 2003. Pará. 121 p. Universidade Federal do Pará. De mestrado em Geologia e geoquímica.

SCHAFER, A. Fundamentos de Ecologia e Biogeografia das Águas Continentais. 1985. Porto Alegre : Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 532. ISBN: 85-7025-111-4.

SCHWEFEL, R., GAUDARD, A., WUEST, A., BOUFFARD, D. Effects of climate change on deepwater oxygen and winter mixing in a deep lake (Lake Geneva): comparing observational findings and modeling. **Water Resources Research**, v. 52, issue 11, Nov. 2016.

SILVA, S.; OLIVEIRA, M.; VOLCANO, J.; MENEZES, M.; SARAIVA, A. Influence of precipitation and operation of a reservoir on water quality: a case study for the Tucuruí Hydroelectric Plant – PA, In 56º Congresso Brasileiro de Química, november 07-11 Belém, Pará. 2016.

SIMONSEN, J.F., DAHL-MADSEN, K.I. Eutrophication models for lakes. **Water Research**, v. 12, issue7, 1978

SMITTENBERG, R. H.; HOPMANS, E. C.; SCHOUTEN, S.; HAYES, J. M.; EGLINTON, T. I.; DAMSTE J. S. S. Compound-specific radiocarbon dating of the varved Holocene sedimentary record of Saanich Inlet, **Paleoceanography, Canada**, v. 19, issue 2. May 2004.

SMOL, J. P.; DOUGLAS, M. S. V. Crossing the final ecological threshold in high Arctic ponds. **Environmental Science**, v. 104, n. 30. p. 12395-12397. 24 jul. 2007.

SOARES, M. C. S.; MARINHO, M. M.; AZEVEDO, S. M. O. F.; BRANCO, C.W.C.; HUSZAR, V.L.M. Eutrophication and retention time affecting spatial heterogeneity in a tropical reservoir, **Limnologica**, v.42, issue 3, pp. 197- 203. Sep. 2012.

SOBEK S, TRANVIK L, AND COLE JJ. Temperature independence of carbon dioxide supersaturation in global lakes, **Global Biogeochemical Cycles** v. 19, n. 2. Jun. 2005.

SOLOMON S, QIN D, MANNING M, et al. **Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. 2007. Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change, ISBN: 978-0-521-70596-7

SORRELL, B., M. UNWIN, K. DEY, AND H. HURREN. A snapshot of Lake Water Quality. **NIWA Client Report** CHC2006–145. 2006.

STRASKRABA, M. and TUNDISI, J. G. 3rd ed Diretrizes para o gerenciamento de lagos: gerenciamento da qualidade da água de represas. 2013. 258p. São Carlos: ILEC/IIE. ISBN 978-85-7975-82-3.

TAMOI, M.; NAGAOKA, M.; YABUTA, Y.; SHIGEOKA, S. Carnon metabolismo in the Carvin Cycle. **Plant Biotechnology**. v. 22, p. 355-360. 2005.

TAVAREZ, M. D. R. M. *Estrutura Da Comunidade Microfitoplanctônica Da Área De Influência Da Uhe De Tucuruí-Pará. Pará*. 2011. Universidade Federal do Pará. 55p. Dissertação de mestrado em Ecologia Aquática e Pesca. Available from : https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFPA_aa644f2f31795725d65379786868e948

THORNTON, K.W.; KIMMEL, B.L.; PAYNE, F.E. (Eds.). Reservoir limnology: ecological perspectives..p. 246. New York. 1990

TIAN, X.Y., HE, D.D., BAI, S., ZENG, W.Z., WANG, Z., WANG, M., CHEN, Z.C. **Physiological and molecular advances in magnesium nutrition of plants**. Plant Soil. v.468, n.1, p. 1-17. Sep.2021.

TOLEDO, A. P. **Informe preliminar sobre os estudos para a obtenção de um índice para a avaliação simplificada do estado trófica de reservatórios de regiões quentes tropicais**. 1990. Disponível em : <http://repositorio.cetesb.sp.gov.br/server/api/core/bitstreams/d17b4925-0461-4644-b6e5-9db2f67265eb/content>. Acessado em 01/02/2025.

TUNDISI, J. G. Represas artificiais: Perspectivas para o controle e manejo da qualidade da água para usos múltiplos. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE**

HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. FORTALEZA. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, p. 36-59, 1985.

TUNDISI, J. G. Recursos Hídricos no Futuro: problemas e soluções. **Estudos Avançados**, v. 22, n.63. p. 7-16. 10 jul. 2008.

TUNDISI, J. G. e MATSUMURA-TUNDISI, T., **Represas Artificiais: ecologia, limnologia, usos múltiplos, gerenciamento**. 2022. São Carlos, p. 430. ISBN: 978-65-5668-079-8.

VAN DE WAAL, D. B.; BRANDENBURG, K. M; KEUSKAMP, J; TRIMBORN, S; ROKITTA, S.; KRANZ, S. A. Highest plasticity of carbon-concentrating mechanisms in earliest evolved phytoplankton, **Limnology and Oceanography Letters**, v. 4, issue 2 2019.

VAN de WAAL, D. B; VERSCHOOR, A. M; VERSPAGEN, J. M. H.; VAN DONK, E. HUISMAN, J. Climate-driven changes in the ecological stoichiometry of aquatic ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, v. 8, issue 3, Jun. 2010.

VERAS, C. L. G.; SILVA, S. A. S. da.; CAMPOS, Y. O. Determinação dos atributos químicos do solo de ilhas do lago da Usina Hidrelétrica de Tucuruí-PA. 2016. **Enciclopédia Biosfera**, v. 13, n. 23, p. 458 – 469, maio 2016.

VINÇON-LEITE, B.; CASENAVE, C. Modelling eutrophication in lake ecosystems: A review. **Science of the Total Environment**, v. 651, part 2, pp. 2985-3001. Feb.2018.

VOLLENWEIDER, R.A. **Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication**. Organization for Economic Cooperation and Development. v. 15, p. 159. 1968.

VOLLENWEIDER, R. A. **Input-output models. With special reference to the phosphorus loading concept in limnology**, Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie, v. 34, p. 53-84. Mar.1975.

VOLLENWEIDER, R. A., KERÉKES, J. **Eutrophication of Waters. Monitoring, Assessment and Control**. OECD Publication Office, , Paris 1982.

WETZEL, R.G.Limnology – Lake and River Ecosystems. 3rd. Edition. Academic Press. San Diego. 2001.1006p. eBook ISBN: 9780080574394

WATSON, G. M. F., AND F. R. TABITA. Microbial ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase: A molecule for phylogenetic and enzymological investigation. **FEMS Microbiol Lett**. V. 1, n. 146, p. 13-22, Jan.1997

WINDER, M.; D. E. SCHINDLER. **Climate change uncouples trophic interactions in an aquatic ecosystem**. Ecology, v. 85, issue 8, p. 2100-2106, Aug. 2004.

WOODROW, I.E.; BERRY, J.A. Enzymic regulation of photosynthetic CO₂ fixation in C₃ plants. Annu. **Rev. Plant Physiol. Plant Mol Biol**. v. 39. p.533–594. 1998.

WORLD HEALTH ORGANIZATION REGIONAL OFFICE FOR EUROPE. **Eutrophication and health**. P.32 2002. Disponível em: <https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/legacy/Files/Ydatikoi%20Poroi/Nitrorypansi/eutrophication%20and%20Health.pdf>. Acessado em: 05/03/2025.

YOSHINO, Gabriel Hiromite. Estudo da vulnerabilidade hídrica das populações que moram na região do lago da usina hidrelétrica de Tucuruí no Estado do Pará. Orientadora: Dra. Nívia Ravena.2017. 219 f. Tese (Programa de Pós graduação em desenvolvimento Sustentável do Trópico úmido Núcleo de Altos Estudos Amazônicos) - Universidade Federal do Pará, Pará, 2017.

ZAMBRANO, G. C; CARDOSO, F.J.B; VILHENA, K.S.S. Determinação de Atributos Físicos e Químicos do Solo Sob Diferentes Usos na Região da UHE Tucuruí. 2019, 59º Congresso Brasileiro de Química. Disponível em: <https://www.abq.org.br/cbq/2019/trabalhos/5/575-27500.html>. Acessado em 30/11/2025.

ZIMOV SA, SCHUUR EAG, AND CHAPIN III FS. Permafrost and the global carbon budget. **Science**, v. 312. N. 5780, 16 Jun. 2006.

ZHANG, FZ; XUE, B; CAI,Y; XU, H; ZOU, W. Utility of Trophic State Index in lakes and reservoirs in the Chinese Eastern Plains ecoregion: The key role of water depth. **Ecological Indicators**, v.148, p.1-9. Apr. 2023.