Encontro Técnico AESABESP
37º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente

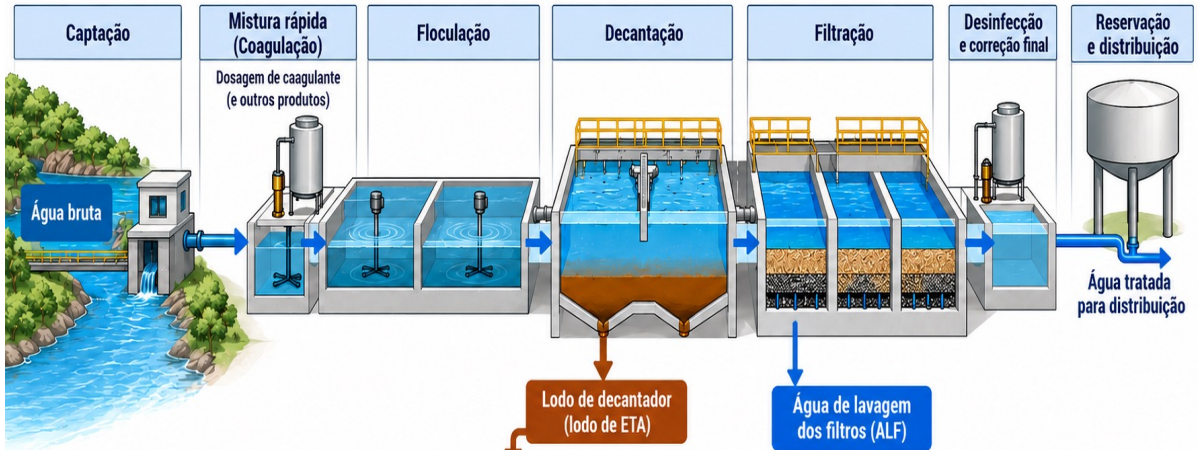
AESABESP 40 Anos
Associação dos Engenheiros da Sabesp

37ETC-07499
Previsão do volume de lodo produzido em estação de tratamento de água com predominância de cor

Mariângela Dutra de Oliveira
Gabriel Peruzzo Vianna
Instituto Federal do Espírito Santo – Ifes – Campus Vitória

Introdução

TRATAMENTO DE ÁGUA DE CICLO COMPLETO



- Segundo o IBGE (2017)

52% - lançados em corpos d'água

21% - aterro sanitário

- No Espírito Santo

76% lançado em corpos d'água

9% lançado em lixões ou terrenos baldios

5% lançado em aterro sanitário

IMPACTO AMBIENTAL

Sem medição do volume gerado

EQUAÇÕES EMPÍRICAS

baixa precisão dos modelos empíricos - baseados na SST e turbidez

Objetivos

OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma formulação matemática que permita prever com maior precisão o volume de lodo gerado em Estações de Tratamento de Água com predominância de cor, utilizando dados operacionais reais como base para validação.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ **Aplicar os dados fornecidos** pela concessionária responsável nas principais equações empíricas disponíveis na literatura.
- ✓ **Comparar os resultados obtidos por meio das equações empíricas** com os volumes reais monitorados na estação.
- ✓ **Desenvolver uma nova formulação matemática,** com base em análise estatística multivariada, adequada às características específicas da ETA em estudo.

Referencial teórico

OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS)



Referencial teórico

PRODUÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E DISPOSIÇÃO DO LODO

disposição final do lodo - desaguamento, que pode ser natural ou mecanizado

minimizar custos de transporte e armazenamento (Urban, Isaac, Morita, 2019).

Os fatores que afetam a geração:

- Características físicas, químicas e biológicas dos corpos d'água,
- Tipo de coagulante utilizado,
- Tecnologia de tratamento,
- Operação de limpeza,
- Automação do sistema
- Recirculação / reuso da água recuperada (Di Bernardo Dantas e Voltan, 2012).



Referencial teórico

ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE LODO

- **American Water Work Association – AWWA (1978):** $P = 3{,}5.10^{-3}.Tu^{0{,}66}$
- **Association Francaise Pour L'etude Des Eaux - AFEE (1983):** $P = (1{,}2.Tu + 0{,}07.C + 0{,}17.D + A).10^{-3}$
- **Cornwell (1987):** $W = 86{,}4.Q.(2.Ca.Mg + 0{,}44.DSAI + 2{,}9.De + SST + A).10^{-3}$
- **Kawamura (1991):** $P = (D.Fc_1) + (Tu.Fc_2)$
- **Water Research Centre - Dillon (1996):** $P = (SS + 0{,}07.C + H + A).10^{-3}$
- **American Water Work Association - AWWA (1999):** $W = 86{,}4.Q(D + SST + DP + Dcap + 0{,}1.Dcal).10^{-3}$
- **Richter (2001):** $S = \frac{(0{,}2.C + K_1.T + K_2.D)}{1000}$

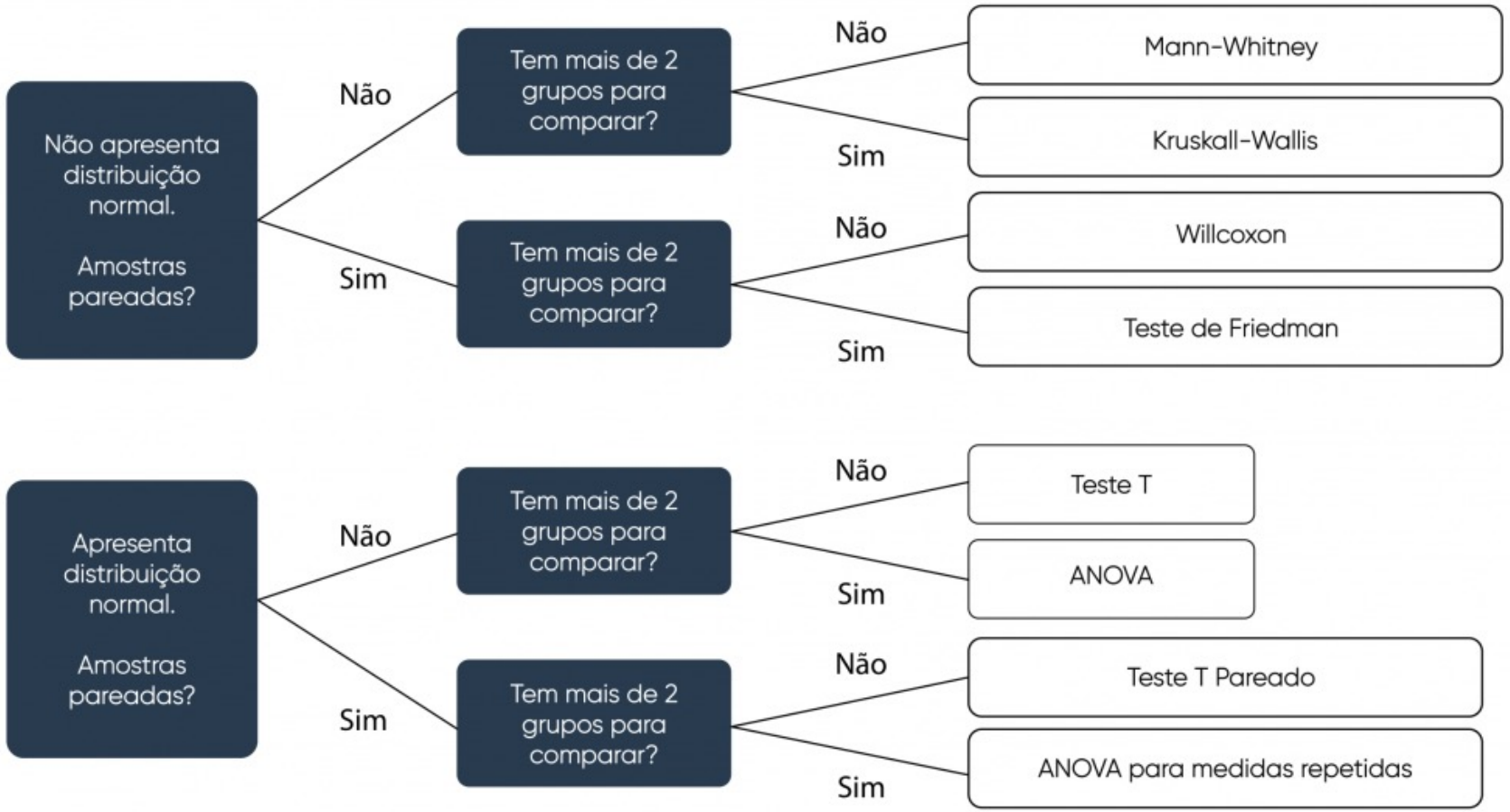
Referencial teórico

TESTE DE HIPÓTESE

Avaliação do desempenho das formulações empíricas

↓

Estatístico estruturado, capaz de comparar de forma objetiva os valores previstos com os dados operacionais observados.



Fonte: State Place (2020).

Referencial teórico

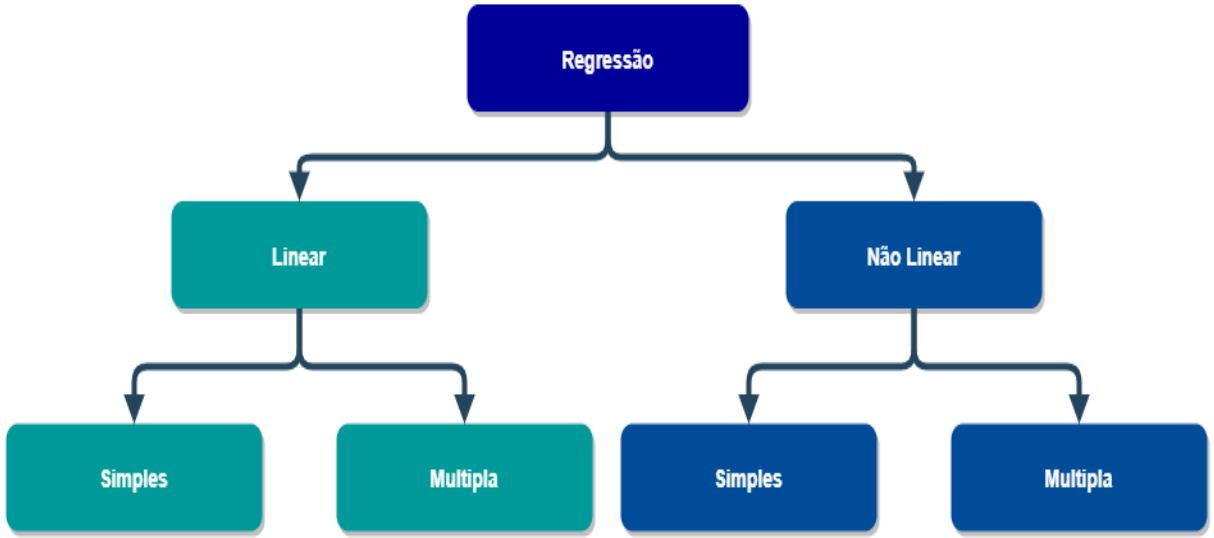
REGRESSÃO

regressão linear e regressão não linear, cada uma delas podendo ser simples (uma variável independente) ou múltipla (duas ou mais variáveis independentes).

$$Y = c + b1 \cdot x1 + b2 \cdot x2 + b3 \cdot x3 \ldots\ldots Bn \cdot xn + \varepsilon$$

Onde:
y- representa a estimativa da variável dependente.
c- corresponde ao intercepto do modelo.
b- refere-se ao coeficiente de regressão associado à variável preditora.
x- representa o valor da variável independente.
E = componente de erro aleatório (com base em resíduos).

(HAIR et al,2025).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Referencial teórico

REGRESSÃO

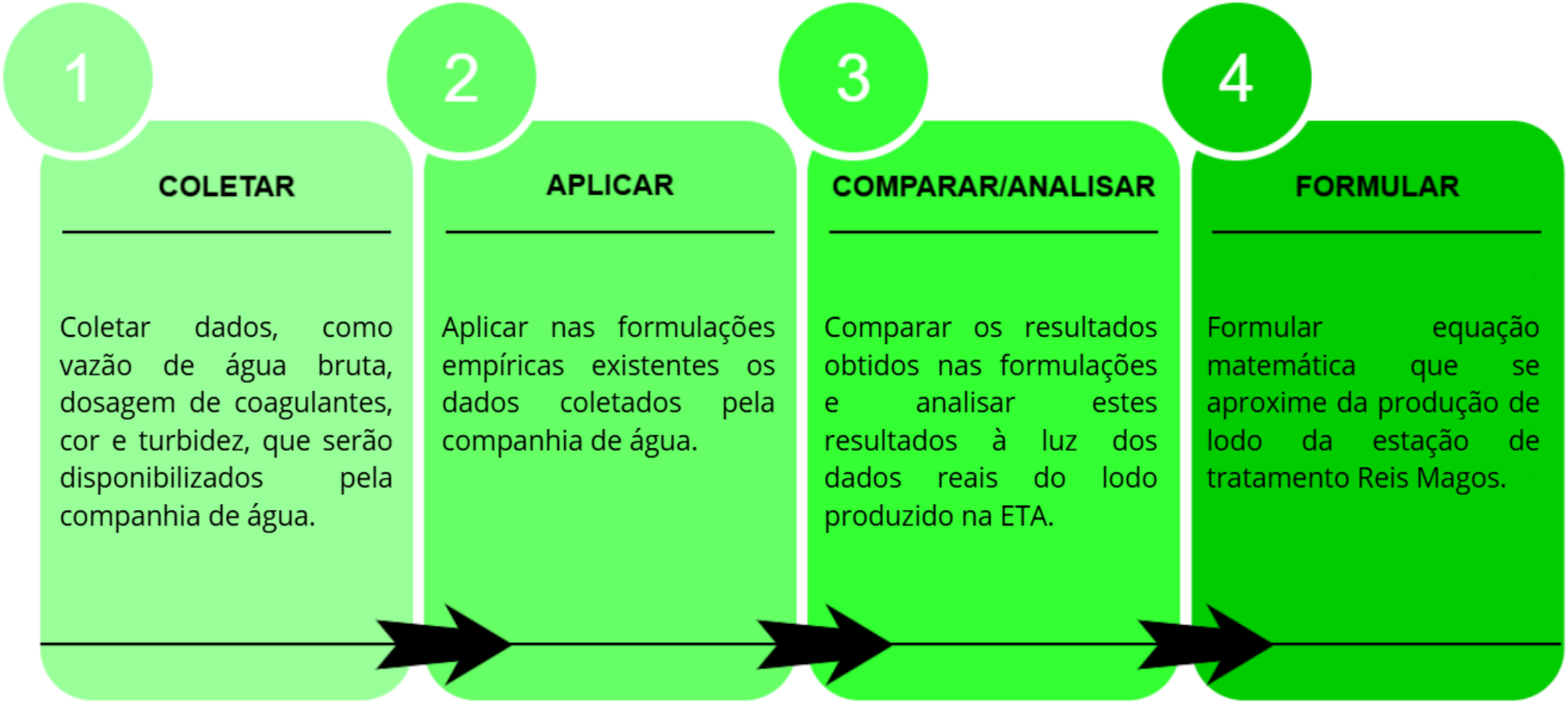
$$Gl_{residual} = n - p - 1$$

n = número de observações da variável dependente
p = número de variáveis independentes

Número de variáveis (p)	GL residual	Situação da formulação
1	2	possível (frágil)
2	1	possível (muito frágil)
3	0	modelo saturado
4	-1	Impossível desenvolver um modelo

Fonte: Jasp (2003).

Materiais e Métodos

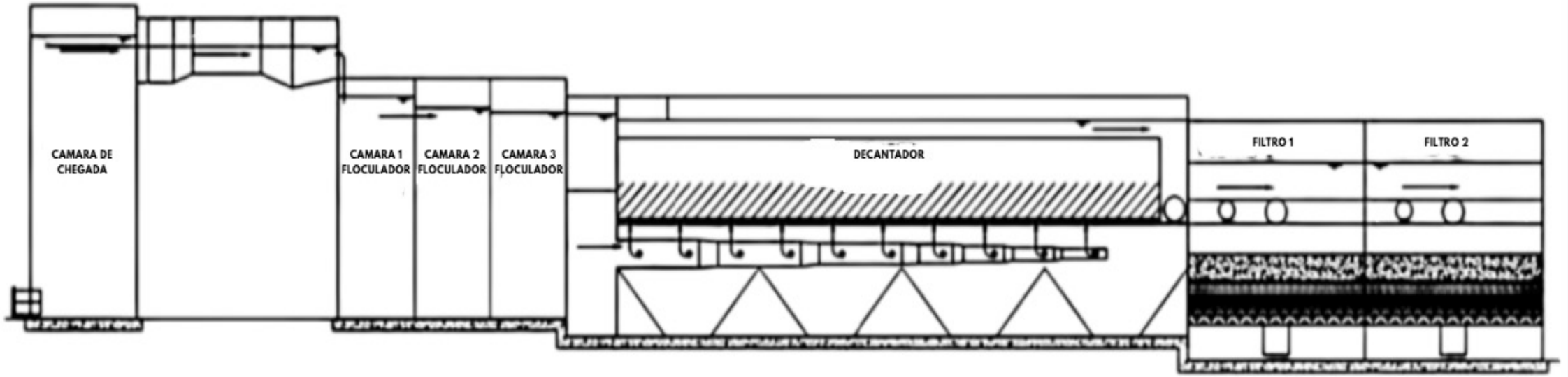


Fonte: Elaborado pelo autor.

Materiais e Métodos

ÁREA DO ESTUDO DE CASO

ETA apresenta vazão de projeto de 500 L/s, com possibilidade de ampliação para 1.000 L/s. Trata-se de uma ETA de tratamento convencional completo, composta por dois módulos de 250L/s composto pelas unidades de coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, correção de pH e fluoretação (CESAN, 2016).



Materiais e Métodos

APLICAÇÃO DAS FORMULAÇÕES EMPÍRICAS

Com base nos dados fornecidos pela Concessionária para a ETA Reis Magos foram aplicadas as formulações empíricas

Fórmula/ Parâmetro	Tu= Turbidez da água bruta (NTU)	C= Cor na água bruta (uH)	D = dosagem de coagulante (mg/L)	Q = vazão média de água bruta a ser tratada (L/s)
AWWA (1978)	X			
AFEE (1983)	X	X	X	
Cornwell (1987)			X	X
Kawamura (1991)	X		X	
Dillon (1996)		X		
AWWA (1999)			X	X
Richter (2001)	X	X	X	

Resultados

Dados de volume do lodo encaminhado para aterro e o período de acumulo

Período de armazenamento de lodo	Volume de Lodo encaminhado para aterro (t)
1º período – 02/06/2023 a 21/12/2023	275,34
2º período – 22/12/2023 a 28/02/2024	205,43
3º período – 04/03/2024 a 17/07/2024	194,2
4º período – 09/08/2024 a 24/01/2025	108,24

Fonte: Cesan (2025)

Resultados

Estatística dos dados utilizados no trabalho

Estatística dos dados	Volume Real de Lodo (T)	Turbidez (NTU)	Cor (uH)	Dosagem de coagulante (mg/L)	Vazão (L/s)
Válidos	4	4	4	4	4
Moda	200,30	29,61	90,73	14,24	299,50
Mediana	199,82	30,30	79,53	16,20	298,03
Média	195,80	32,21	79,33	16,21	294,64
Desv. Padrão	68,53	6,33	14,87	2,61	15,00
Coeficiente de variação	0,35	0,20	0,19	0,16	0,05
Assimetria	-0,35	1,58	-0,01	0,01	-1,24
Curtose	1,44	2,91	-5,85	-5,55	2,19
Teste de Shapiro-Wilk	0,97	0,85	0,79	0,83	0,91
P-value do Shapiro-Wilk	0,82	0,23	0,08	0,17	0,50
Mínimo	108,20	26,87	65,39	13,70	273,60
Máximo	275,30	41,37	92,86	18,75	308,90

Fonte: Elaborado pelo autor.

Resultados

Teste de hipótese não paramétrico - Wilcoxon para amostras pareadas

Volume real e estimados com base nas equações	Teste de normalidade – Shapiro Wilk (p)	Estatística do teste Wilcoxon			
		W	Z	p	Correlação Bisserial por postos
AWWA (1978)	0,19	9	1,46	0,25	0,80
AFEE (1983)	0,15	6	0,37	0,88	0,20
CORNWELL (1987)	0,49	0	-1,83	0,13	-1,00
KAWAMURA (1991)	0,18	6	0,37	0,88	0,20
DILLON (1996)	0,18	6	0,37	0,88	0,20
AWWA (1999)	0,48	0	-1,83	0,13	-1,00
RICHTER (2001)	0,24	3	-0,73	0,63	-0,40

Correlação bisserial por postos - subestimação (-) /superestimação (+)

$r_{r\beta} > 0,70$, para as equações AWWA (1978), CORNWELL (1987), AWWA (1999).

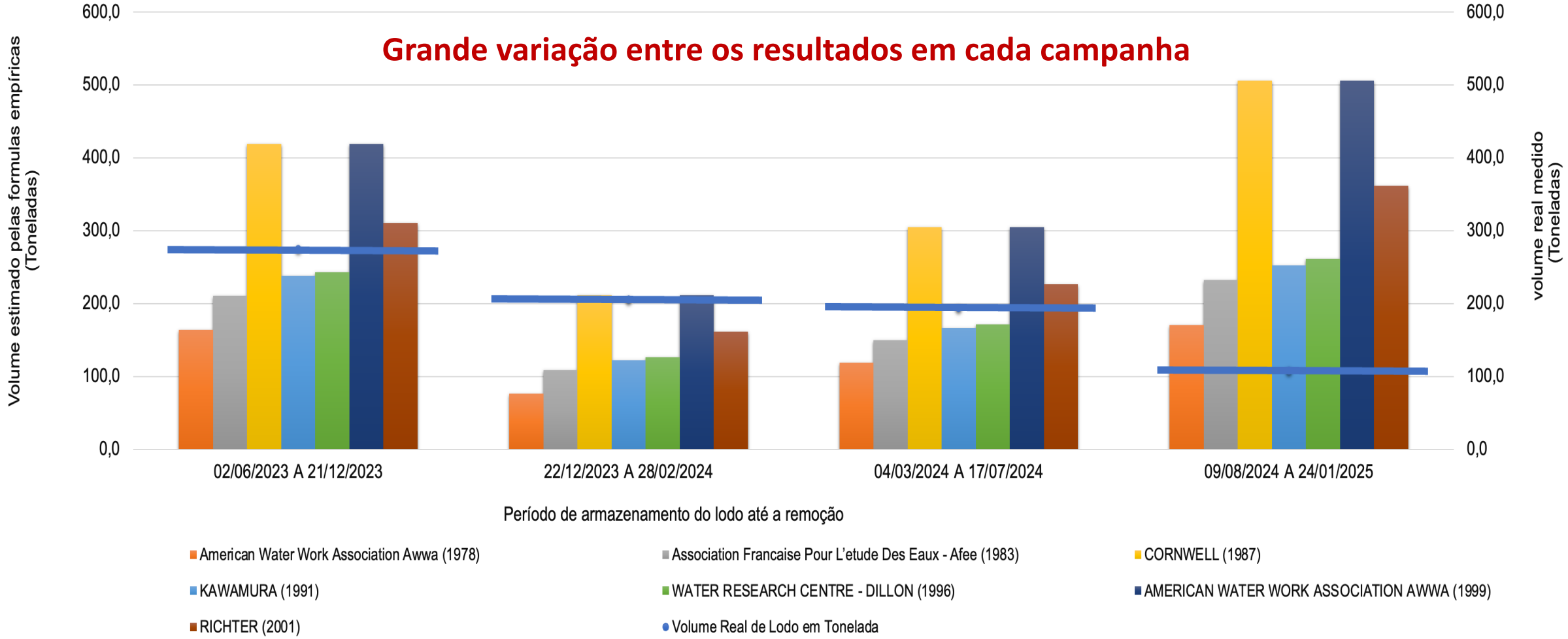
$0,30 < r_{r\beta} < 0,50$ para a equação de RICHTER (2001)

$0,10 < r_{r\beta} < 0,30$ para as equações de AFEE (1983), KAWAMURA (1991), DILLON (1996)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Resultados

Volume medido e valores médios determinados pelas fórmulas empíricas



Resultados

Modelos propostos – sem significância estatística

Variáveis	Função de Regressão Linear	R^2	D-W	FIV	ANOVA (F)	ANOVA (p)	RMSE (t)
Turbidez x Cor	VL = 340,52 + 8,93 x Tu - 5,45 x C	0,95	1,87	1,5	9,65	0,22	26,35
Turbidez x Vazão	VL = 1247,27 + 6,59 x Tu - 4,301x Q	0,69	2,1	1,32	1,13	0,55	65,79
Turbidez x Dosagem	VL = 396,58 + 8,34 x Tu – 28,96x D	0,84	1,63	1,48	2,67	0,40	47,12
Cor x Vazão	VL = 714,37 - 2,39 x C – 1,12 x Q	0,52	1,22	2,45	0,55	0,70	82,01
Cor x Dosagem	VL = 363,77 – 9,67 x C + 36,98 x D	0,54	1,28	43,11	0,6	0,68	80,13
Dosagem x Vazão	VL = 861,93 - 11,16 x D - 1,65 x Q	0,51	1,21	1,79	0,53	0,70	82,68
Cor	VL = 453,84 -3,25 x C	0,50	1,15	1,00	1,99	0,29	59,56

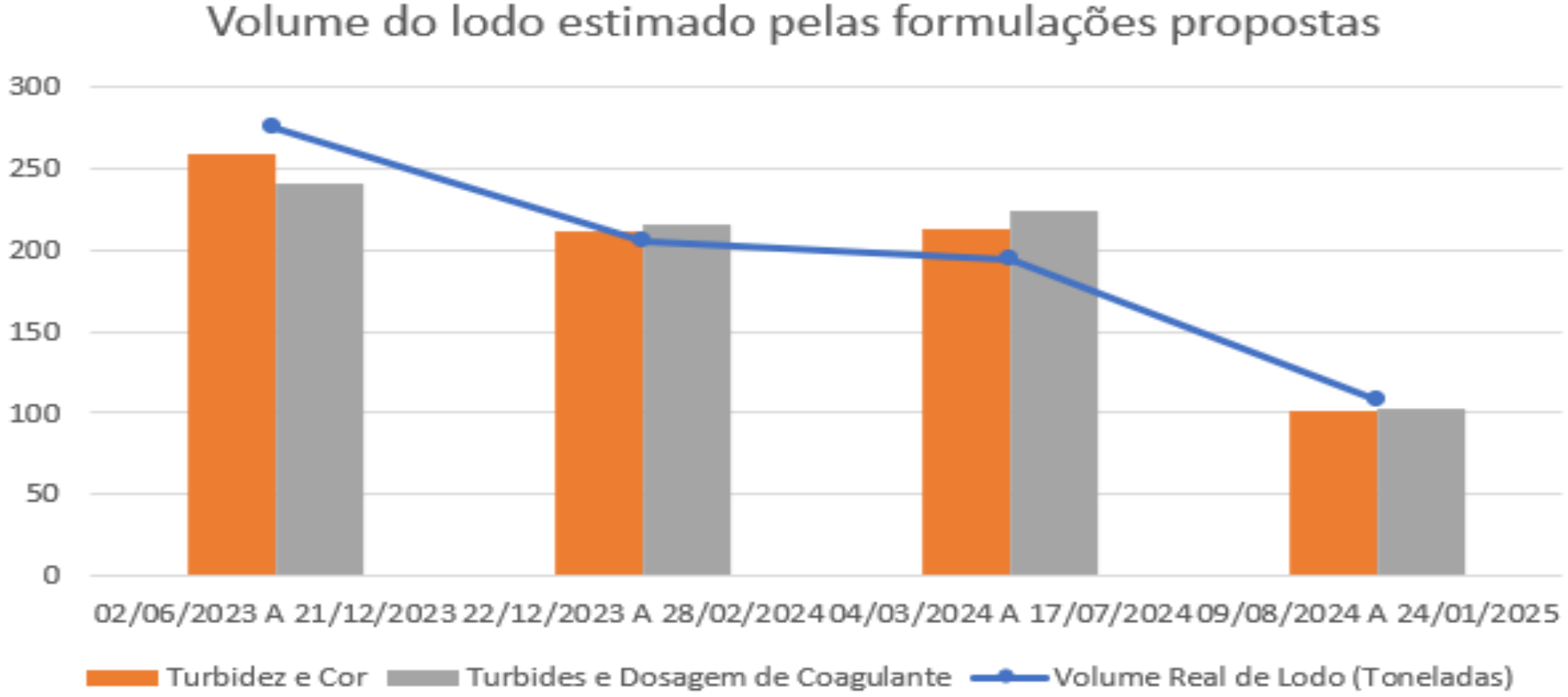
0<R2<0,3 indica que o modelo não explica a variável dependente, 0,3<R2<0,6 o modelo explica de forma moderada 0,6<R2<1 o modelo tem boa explicação

menor RMSE (t)

teste Durbin-Watson entre 1 e 3, idealmente, em torno de 2

Fonte: Elaborado pelo autor

Resultados



Fonte: Elaborado pelo autor

Resultados

Fórmulas propostas

Estatística dos dados	Volume Real de Lodo (T)	Turbidez x Cor (T) VL = 340,52 + 8,93 x Tu - 5,45 x C	Turbidez x Dos. Coag (T) VL = 396,58 + 8,34 x Tu – 28,96x D
Válidos	4	4	4
Moda	200,30	213,90	226,10
Mediana	199,80	211,80	219,70
Média	195,80	195,80	195,70
Desv. Padrão	68,53	66,82	62,92
Coeficiente de variação	0,35	0,34	0,32
Assimetria	-0,35	-1,33	-1,83
Curtose	1,44	2,52	3,49
Teste de Shapiro-Wilk	0,97	0,88	0,78
P-value do Shapiro-Wilk	0,82	0,32	0,072
Mínimo	108,2	101,2	102,7
Máximo	275,3	258,5	240,8

Fonte: Elaborado pelo autor

Conclusão

- Confirmou-se, **por meio dos testes de normalidade**, que os dados utilizados para **estimativa do volume de lodo não seguem distribuição normal**

- **As formulações empíricas avaliadas não se mostraram representativas para a realidade operacional da ETA com predominância de cor,** apresentando alternância entre subestimação e superestimação e ausência de significância estatística ao nível de 95% de confiança.

- **O reduzido número de observações** compromete os graus de liberdade do modelo. Mesmo com valores estimados próximos aos reais, não houve significância estatística para $p \leq 0,05$.

- Continuidade do estudo com **ampliação do banco de dados**, **adoção de transformações estatísticas e avaliação de métodos alternativos à regressão linear tradicional.**

REFERÊNCIAS

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA). *Water quality and treatment: a handbook of community water supplies*. New York: McGraw-Hill, 1978.

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA). *Water quality and treatment: a handbook of community water supplies*. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1999.

ASSOCIATION FRANÇAISE POUR L'ÉTUDE DES EAUX (AFEE). *Traitement des boues*. Paris, 1993.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2020.

CESAN – COMPANHIA ESPÍRITO-SANTENSE DE SANEAMENTO. *Memorial descritivo, cálculo e especificações técnicas da ETA Reis Magos*. Vitória, 2016.

CORNWELL, D. A. *Water treatment plant sludge management*. Denver: AWWA Research Foundation, 1987.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. *Tratamento de água para abastecimento por ciclo completo*. São Carlos: Rima, 2012.

DILLON, P. *Sludge production in water treatment*. Water Research Centre, 1996.

REFERÊNCIAS

HAIR, J. F. et al. *Análise multivariada de dados*. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2025.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2017*. Rio de Janeiro: IBGE, 2017.

JASP TEAM. *JASP (Version 0.17) [Computer software]*. 2023. Disponível em: https://jasp-stats.org

KAWAMURA, S. *Integrated design and operation of water treatment facilities*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1991.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – Agenda 2030. 2025. Disponível em: https://sdgs.un.org

REALI, M. A. P. Noções gerais de tratamento de resíduos gerados em estações de tratamento de água. São Carlos: EESC/USP, 1999.

STATE PLACE. Hypothesis testing flowchart. 2020.

URBAN, R.; ISAAC, R.; MORITA, D. Gestão e valorização do lodo de ETA. 2019.

Obrigado!

Encontro Técnico AESABESP
37º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente

AESABESP 40 Anos
Associação dos Engenheiros da Sabesp

Mariangela Dutra de Oliveira
mariangeladutra@ifes.edu.br
(27) 99969-2509

Coautores

Gabriel Peruzzo Vianna
gabriel.v.peruzzo@gmail.com