

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA

ANA LIA WARCHESKI

EFICIÊNCIA DE RETENÇÃO DE SEDIMENTOS NO RESERVATÓRIO DA UHE BELO
MONTE (PA)

CURITIBA

2024

ANA LIA WARCHESKI

EFICIÊNCIA DE RETENÇÃO DE SEDIMENTOS NO RESERVATÓRIO DA UHE BELO
MONTE (PA)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Ambiental, Setor de
Tecnologia, Universidade Federal do Paraná,
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Professor Dr. Michael Mannich

CURITIBA

2024



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

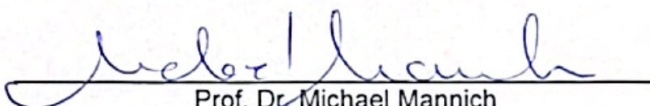
TERMO DE APROVAÇÃO DE PROJETO FINAL

ANA LIA WARCHESKI

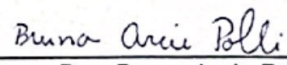
EFICIÊNCIA DE RETENÇÃO DE SEDIMENTOS NO RESERVATÓRIO DA UHE BELO MONTE (PA)

Projeto Final de Curso, aprovado como requisito parcial para a obtenção do Diploma de Bacharel em Engenharia Ambiental no Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, com nota 75, pela seguinte banca examinadora:

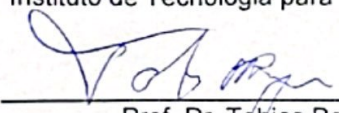
Orientador(a):


Prof. Dr. Michael Mannich
Departamento de Engenharia Ambiental / UFPR

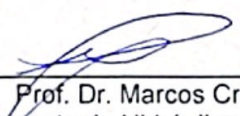
Co-orientador(a):


Dra. Bruna Arcie Polli
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC

Membro(a) 1:


Prof. Dr. Tobias Bernward Bleninger
Departamento de Engenharia Ambiental / UFPR

Membro(a) 2:


Prof. Dr. Marcos Cristiano Palú
Departamento de Hidráulica e Saneamento / UFPR

Curitiba, 17 de dezembro de 2024

RESUMO

O assoreamento em reservatórios é um desafio significativo para a operação e sustentabilidade de usinas hidrelétricas, especialmente em sistemas complexos como o da UHE Belo Monte, localizada no rio Xingu, Pará. A Resolução Conjunta ANA/ANEEL nº 127/2022 atua como uma ferramenta para direcionar o monitoramento hidrossedimentométrico e de assoreamento nos reservatórios do SIN (Sistema Interligado Nacional). Dessa forma, no âmbito do projeto “Sistema de tomada de decisão para atualização de curva cota-área-volume em reservatórios”, desenvolvido pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - Lactec, no Programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PROPDI) da Norte Energia S.A., regulado pela ANEEL, este estudo visa estimar a eficiência de retenção de sedimentos através do método de Brune (1953) no reservatório da usina para diferentes métodos de estimativa de assoreamento. A eficiência de retenção foi estimada para o período posterior ao enchimento do reservatório, de 2016 a 2022. Os resultados indicaram um acúmulo de 70,92% de sedimentos para a comparação entre as estações 1 e 2. Entre as estações 1 e 3, o valor estimado foi de 31,82%. Considerando a razão capacidade/fluxo (C/I), os resultados para cada ano se mostraram coerentes com a literatura e com maior representatividade em relação aos resultados obtidos através da razão C/W , conforme indica o autor. A comparação entre a estação 1 e os resultados obtidos a partir das seções transversais revelou uma eficiência de retenção de 101,35% para sedimentos com peso específico de 852 kg/m^3 , 125,23% para 1053 kg/m^3 e 140,48% para 1181 kg/m^3 , indicando a baixa representatividade do método para a estimativa do assoreamento.

Palavras-chaves: Eficiência de retenção de sedimentos, transporte de sólidos, descarga sólida total, reservatório UHE Belo Monte.

ABSTRACT

Sedimentation in reservoirs is a significant challenge for the operation and sustainability of hydroelectric plants, especially in complex systems such as the Belo Monte Hydroelectric Plant (UHE Belo Monte), located on the Xingu River in Pará, Brazil. The Joint Resolution ANA/ANEEL No. 127/2022 serves as a tool to guide hydrosedimentometric and sedimentation monitoring in the reservoirs of the National Interconnected System (SIN). In this context, under the project "Decision-making system for updating elevation-area-volume curves in reservoirs," developed by the Institute of Technology for Development - Lactec, within the Research, Development, and Innovation Program (PROPDI) of Norte Energia S.A., regulated by ANEEL, this study aims to estimate the sediment retention efficiency using the method proposed by Brune (1953) in the plant's reservoir for different sedimentation estimation methods. The retention efficiency was estimated for the period after the reservoir's filling, from 2016 to 2022. The results indicated an accumulation of 70.92% of sediments for the comparison between stations 1 and 2. For the comparison between stations 1 and 3, the estimated value was 31.82%. Considering the capacity/inflow ratio (C/I), the annual results were consistent with the literature and showed greater representativeness compared to results obtained using the C/W ratio, as suggested by the author. The comparison between station 1 and the results obtained from cross-sectional surveys revealed sediment retention efficiencies of 101.35% for sediments with a specific weight of 852 kg/m^3 , 125.23% for 1053 kg/m^3 , and 140.48% for 1181 kg/m^3 , indicating the low representativeness of the method for sedimentation estimation.

Key-words: Sediment trap efficiency, solid transport, total solid discharge, UHE Belo Monte reservoir.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Ábacos para o cálculo da descarga sólida total pelo método simplificado de Colby (1957).	23
FIGURA 2 – Eficiência da armadilha de sedimentação do reservatório de acordo com Churchill (1948). Fonte: (VAN RIJN, 2013).	25
FIGURA 3 – Eficiência de retenção de sedimentos em relação à razão capacidade-área de drenagem. Fonte: (BRUNE, 1953).	25
FIGURA 4 – Eficiência de retenção de sedimentos em relação à razão capacidade-fluxo. Fonte: (BRUNE, 1953).	27
FIGURA 5 – Localização da bacia do rio Xingu.	31
FIGURA 6 – Localização da área de estudo.	31
FIGURA 7 – Diagrama esquemático da UHE Belo Monte e das estações de estudo.	34
FIGURA 8 – Curva de descarga sólida total da estação 18821000.	37
FIGURA 9 – Curva de descarga sólida total da estação 18865003.	38
FIGURA 10 – Curva de descarga sólida total da estação 18935000.	38
FIGURA 11 – Resultados da eficiência de retenção através da razão C/W. . . .	40
FIGURA 12 – Resultados da eficiência de retenção através da razão C/l. . . .	41
FIGURA 13 – Cotagrama da estação 18821000.	50
FIGURA 14 – Cotagrama da estação 18865003.	50
FIGURA 15 – Cotagrama da estação 18935000.	51
FIGURA 16 – Comparativo dos cotagramas das estações 18821000, 18865003 e 18935000.	51
FIGURA 17 – Fluviograma da estação 18821000.	52
FIGURA 18 – Fluviograma da estação 18865003.	52
FIGURA 19 – Fluviograma da estação 18935000.	53
FIGURA 20 – Comparativo dos fluviogramas das estações 18821000, 18865003 e 18935000.	53
FIGURA 21 – Concentração de sedimentos da estação 18821000.	54
FIGURA 22 – Concentração de sedimentos da estação 18865003.	54
FIGURA 23 – Concentração de sedimentos da estação 18935000.	55
FIGURA 24 – Comparativo da concentração de sedimentos das estações 18821000, 18865003 e 18935000.	55
FIGURA 25 – Curva-chave da estação 18821000.	56
FIGURA 26 – Curva-chave da estação 18865003.	56

FIGURA 27 – Curva-chave da estação 18935000.	57
FIGURA 28 – Curva de descarga sólida suspensa da estação 18821000.	57
FIGURA 29 – Curva de descarga sólida suspensa da estação 18865003.	58
FIGURA 30 – Curva de descarga sólida suspensa da estação 18935000.	58
FIGURA 31 – Série histórica de descarga sólida total da estação 18821000.	59
FIGURA 32 – Série histórica de descarga sólida total da estação 18865003.	59
FIGURA 33 – Série histórica de descarga sólida total da estação 18935000.	60
FIGURA 34 – Comparativo das séries históricas de descarga sólida total das estações 18821000, 18865003 e 18935000.	60
FIGURA 35 – Série histórica de descarga sólida suspensa da estação 18821000.	61
FIGURA 36 – Série histórica de descarga sólida suspensa da estação 18865003.	61
FIGURA 37 – Série histórica de descarga sólida suspensa da estação 18935000.	62
FIGURA 38 – Comparativo das séries históricas de descarga sólida suspensa das estações 18821000, 18865003 e 18935000.	62
FIGURA 39 – Comparativo dos acumulados de descarga sólida por ano das estações 18821000, 18865003 e 18935000.	63

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Classificação do reservatório para cálculo de E. Fonte: (CARVALHO, 2008).	24
TABELA 2 – Área de drenagem das estações de análise (HIDROWEB, 2024).	34
TABELA 3 – Critérios de seleção e filtragem de dados hidrossedimentométricos.	35

LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS

ADCP Acoustic Doppler Current Profiler

ANA Agência Nacional de Águas

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica

IID Igual Incremento de Descarga

IIL Igual Incremento de Largura

LISST Laser In-Situ Scattering and Transmissometry

MW Megawatts

NHSS NH Sediment and Statistic

NTU Nephelometric Turbidity Unit

PROPDI Programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação

SIN Sistema Interligado Nacional

UHE Usina Hidrelétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal (m^2)
L	Comprimento do reservatório (m)
B	Largura da seção transversal (m)
h	Profundidade média da seção transversal (m)
R_h	Raio hidráulico (m)
U	Velocidade do escoamento (m/s)
V	Volume total do reservatório (hm^3)
Q_{liq}	Descarga líquida (m^3/s)
Q_{st}	Descarga sólida total (t/d)
Q_{ss}	Descarga de sedimentos em suspensão (t/d)
C_{ss}	Concentração de sedimentos em suspensão (mg/L)
E	Eficiência de retenção de sedimentos (%)
IS	Índice de sedimentação (s^2/m)
TR	Tempo de retenção hidráulico (s)
C/W	Razão capacidade-área de drenagem
C/I	Razão capacidade-fluxo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVOS	11
1.1.1	Objetivo geral	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1	MONITORAMENTO DE TRANSPORTE DE SÓLIDOS SUSPENSOS	15
2.2	MONITORAMENTO DE TRANSPORTE DE SÓLIDOS DE FUNDO	18
2.3	CÁLCULO DA DESCARGA SÓLIDA	20
2.3.1	Cálculo da descarga sólida suspensa	20
2.3.2	Cálculo da descarga sólida de fundo	21
2.3.3	Cálculo da descarga sólida total	22
2.3.4	Eficiência de Retenção	24
2.4	ESTIMATIVA DO ASSOREAMENTO	27
3	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	30
3.2	DADOS	33
4	RESULTADOS	36
5	CONCLUSÃO	43
	REFERÊNCIAS	45
	APÊNDICES	49
APÊNDICE A	GRÁFICOS	50

1 INTRODUÇÃO

A sedimentação em reservatórios é um dos principais desafios enfrentados pelas usinas hidrelétricas, devido aos impactos diretos na capacidade de armazenamento e na operação dos empreendimentos. Na UHE Belo Monte, situada no rio Xingu, no estado do Pará, a dinâmica hidrossedimentológica é particularmente complexa, dada a grande extensão da bacia hidrográfica e a variabilidade nas características físicas e climáticas da região. Esse cenário exige estudos aprofundados para compreender e mitigar os processos de assoreamento, garantindo a eficiência e a sustentabilidade do reservatório ao longo do tempo.

O presente trabalho insere-se no âmbito do projeto “Sistema de tomada de decisão para atualização de curva cota-área-volume em reservatórios”, desenvolvido pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - Lactec, no Programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PROPGDI) da Norte Energia S.A., sob a regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). O objetivo do estudo é estimar a eficiência de retenção de sedimentos no reservatório da UHE Belo Monte através de diferentes métodos de cálculo do assoreamento. Os resultados estimados do assoreamento foram obtidos por meio dos Relatórios Técnicos desenvolvidos pelo Lactec.

O reservatório da UHE Belo Monte possui características hidrossedimentológicas peculiares, pois é formado em uma região de planalto, com grande variação na descarga sólida anual ao longo do rio Xingu. O regime hidrológico é marcado por uma forte sazonalidade, com períodos de cheia e seca bem definidos, o que influencia significativamente o transporte e a deposição de sedimentos no reservatório.

Um dos métodos amplamente utilizados para a estimativa da eficiência de retenção de sedimentos em reservatórios é o modelo proposto por Brune (1953). Este método é baseado na relação entre o índice de capacidade do reservatório (razão entre o volume útil do reservatório e a vazão média anual) e a eficiência de retenção de sedimentos. A curva proposta por Brune permite prever a fração de sedimentos que permanece retida no reservatório em função de suas características físicas e operacionais. Embora o método seja simplificado, ele fornece uma base prática e amplamente aceita para estudos de sedimentação em reservatórios.

A avaliação da eficiência de retenção é fundamental para subsidiar a gestão integrada do reservatório, permitindo estimar a vida útil do empreendimento e planejar ações mitigatórias para o controle do assoreamento. Além disso, os resultados deste estudo têm o potencial de contribuir para a atualização da curva cota-área-volume, ferramenta essencial para a operação e planejamento do reservatório.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é a estimativa da eficiência de retenção de sedimentos através das curvas do método de Brune (1953) a partir dos resultados para diferentes métodos de cálculo de assoreamento.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A sedimentação envolve várias etapas e mecanismos que determinam o transporte, deposição e acúmulo de partículas sólidas em um reservatório (MAC ARTHUR, 2008). Compreender esses processos é essencial para a gestão eficaz dos sedimentos e para mitigar os impactos negativos associados.

O processo de sedimentação nos reservatórios tem origem na erosão, que é o desprendimento e remoção de partículas do solo ou rocha pela ação de agentes naturais como água, vento, gelo ou atividade humana (MORRIS; FAN, 1998). É causada pelo movimento da água, incluindo chuva e rios, e ondas eólicas, provocadas pelo vento que transporta partículas de solo para novas áreas (MAC ARTHUR, 2008).

As partículas erodidas são transportadas pelos agentes erosivos até chegarem ao reservatório. Esse transporte pode ocorrer de várias formas: em suspensão, onde partículas finas como argila e silte são mantidas em suspensão pela turbulência da água; carga de leito, onde partículas mais grosseiras como areia e cascalho rolam, deslizam ou saltam ao longo do leito do rio; e por solução, onde minerais dissolvidos na água são transportados e podem precipitar sob certas condições (CARVALHO, 2008).

Quando a energia mecânica do agente transportador diminui, as partículas começam a se depositar. Esse processo é influenciado pela velocidade da água, em que uma diminuição na corrente permite que partículas mais pesadas e grossas se depositem primeiro, seguidas por partículas mais finas (VANONI, 1975). A geometria do reservatório também interfere no processo, com áreas mais profundas ou de fluxo lento tendendo a acumular mais sedimentos. Barreiras físicas, como vegetação, rochas ou construções humanas, podem obstruir o fluxo e promover a deposição de sedimentos (CARVALHO, 2008).

Os principais tipos de sedimentos encontrados em rios e reservatórios podem ser grossos, finos ou orgânicos. Areia e cascalho são considerados sedimentos de granulometria grossa. Segundo Tucci (2008), sedimentos arenosos e cascalhentos possuem baixa coesão e tendem a se depositar nas proximidades da entrada dos reservatórios, onde a velocidade da corrente diminui rapidamente. Esse tipo de sedimento requer uma energia maior para ser transportado e, por isso, se deposita em zonas de fluxo mais intenso. Guerra (1994) ressalta que esses sedimentos são os primeiros a se depositar em ambientes de baixa energia, como os braços e deltas de entrada de reservatórios, devido ao seu peso e baixa capacidade de suspensão em águas calmas.

Já os sedimentos finos, como silte e argila, possuem granulometria fina e alta coesão. Segundo Mertes, Dunne e Martinelli (1996), eles permanecem suspensos

por mais tempo e tendem a se depositar em zonas mais afastadas da entrada do reservatório. Siltes e argilas são transportados em suspensão pela água e, muitas vezes, alcançam as partes mais profundas do reservatório (TUCCI, 2008). Para Guerra (1994), esses sedimentos são importantes na dinâmica sedimentar dos reservatórios, pois podem afetar significativamente a qualidade da água ao carregarem nutrientes e contaminantes.

O material orgânico suspenso inclui fragmentos de vegetação, algas e matéria orgânica dissolvida. Segundo Esteves (1998), o material orgânico em suspensão tem uma dinâmica de transporte complexa, pois depende tanto da velocidade da água quanto dos processos biológicos, como decomposição e sedimentação bacteriana.

A hidrodinâmica de um reservatório é fortemente influenciada pelos padrões de fluxo, pela turbulência e pela estratificação térmica, que são fundamentais para a dinâmica de sedimentação.

Tundisi e Matsumura-Tundisi (2008) apontam que o padrão de fluxo em um reservatório varia dependendo de sua morfologia, profundidade e taxa de entrada de água. Nos trechos mais próximos à entrada, a corrente tende a ser mais rápida e turbulenta, o que mantém as partículas de sedimento em suspensão e facilita seu transporte para áreas mais profundas. À medida que a água avança, a velocidade reduz, permitindo a deposição de sedimentos, especialmente os mais grossos.

A estratificação térmica é um fenômeno comum em reservatórios profundos e tropicais. Segundo Henry (2007), a estratificação térmica cria camadas com temperaturas distintas (epilímnio, metalímnio e hipolímnio), o que afeta a circulação e o transporte de sedimentos. Durante períodos de estratificação, o transporte vertical de sedimentos é limitado, pois a densidade impede a mistura das camadas. Em contrapartida, durante o período de mistura, geralmente no inverno ou em condições de vento intenso, o acúmulo de sedimentos pode ser redistribuído pela coluna de água.

Tundisi e Matsumura-Tundisi (2008) discutem que a estratificação impede que partículas finas desçam para camadas mais profundas, forçando-as a se depositar ao longo do metalímnio. Esse processo afeta não apenas a distribuição dos sedimentos, mas também a qualidade da água, pois sedimentos finos suspensos podem carregar nutrientes ou contaminantes.

O tempo de retenção, ou tempo de residência, é o período que a água permanece dentro do reservatório. Esse fator é fundamental para a sedimentação, pois controla o tempo disponível para que as partículas se depositem. Segundo Tucci (2008), quanto maior o tempo de retenção, maior a probabilidade de que partículas suspensas de menor tamanho (silte e argila) se depositem no fundo. Reservatórios com tempo de retenção curto tendem a ter menor deposição de sedimentos, pois a velocidade do

fluxo e a curta duração não permitem que as partículas se acomodem.

Tundisi e Matsumura-Tundisi (2008) ressaltam que o tempo de retenção afeta também a qualidade da água, pois sedimentos finos frequentemente transportam matéria orgânica e nutrientes que podem enriquecer a coluna d'água. Esse acúmulo de matéria orgânica pode levar a processos de eutrofização, o que compromete a qualidade da água e pode prejudicar a vida aquática.

Em reservatórios projetados para controle de inundações, o tempo de retenção é frequentemente mais curto, o que limita a sedimentação mas aumenta a turbidez na saída. Em reservatórios de usinas hidrelétricas, onde o tempo de retenção pode ser ajustado, é possível controlar parcialmente a deposição para otimizar a operação e a eficiência energética.

Segundo Tucci (2008) e Tundisi e Matsumura-Tundisi (2008), a eficiência de retenção de sedimentos refere-se à capacidade de um reservatório em reter sedimentos, comparando a quantidade de sedimentos que entra com a quantidade que sai, sendo frequentemente expressa em percentual. Reservatórios que retêm uma alta proporção de sedimentos possuem alta eficiência de retenção.

Vários fatores influenciam a eficiência de retenção de sedimentos, incluindo características físicas do reservatório e aspectos hidrológicos da bacia de drenagem. Autores, como Tucci (2008), discutem alguns dos principais fatores que determinam essa eficiência. Para ele, a forma e a profundidade do reservatório são determinantes. Reservatórios profundos e de forma irregular tendem a ter maior eficiência de retenção, pois permitem que a velocidade do fluxo diminua, favorecendo a deposição de partículas finas. Em reservatórios longos e estreitos, a sedimentação ocorre em maior parte na zona de entrada, enquanto em reservatórios largos, os sedimentos podem se espalhar mais amplamente.

Reservatórios mais profundos tendem a ter camadas de estratificação, o que afeta a retenção de partículas em diferentes profundidades, especialmente nas camadas de transição entre o epilímnio e o metalímnio. A profundidade reduzida, por outro lado, facilita a resuspensão de sedimentos e pode diminuir a eficiência. Uma área de superfície maior oferece mais espaço para a deposição de sedimentos. No entanto, uma área extensa também pode facilitar a ação do vento e aumentar a resuspensão de partículas, especialmente as mais finas.

A quantidade e a granulometria dos sedimentos que chegam ao reservatório dependem das condições da bacia de drenagem. Chuvas intensas, desmatamento e atividades agrícolas contribuem para uma maior carga de sedimentos. Quanto mais alta a taxa de entrada de sedimentos, maior é o desafio para a retenção efetiva, uma vez que partículas finas são mais facilmente transportadas para as zonas de saída.

O regime de fluxo e as características climáticas da bacia influenciam o transporte de sedimentos. Segundo Tundisi e Matsumura-Tundisi (2008), bacias com grande variabilidade de fluxo, como aquelas afetadas por cheias sazonais, apresentam maior variabilidade na carga de sedimentos e, portanto, na eficiência de retenção ao longo do ano.

Existem modelos teóricos amplamente utilizados para estimar a eficiência de retenção de sedimentos em reservatórios com base em características físicas, como a capacidade de armazenamento e a taxa de vazão. No Brasil, autores como Tucci (2008) descrevem e aplicam os modelos de Brune e de Churchill.

O modelo desenvolvido por Brune (1953) é baseado na relação entre a capacidade do reservatório e a vazão média anual. Brune criou um gráfico empírico que relaciona a eficiência de retenção de sedimentos à razão entre a capacidade do reservatório e a vazão anual. Esse modelo é amplamente utilizado porque é relativamente simples e fornece uma estimativa razoável de retenção com base em características fáceis de medir. No entanto, ele não leva em consideração a estratificação ou a variação sazonal dos sedimentos.

Churchill (1948) propôs um modelo que relaciona a eficiência de retenção com o tempo de residência hidráulico, que é o tempo médio que a água permanece no reservatório. Esse modelo considera que a eficiência de retenção aumenta com o tempo de residência, pois partículas mais finas têm mais tempo para se depositar. Churchill identificou uma curva para diferentes tamanhos de partículas, proporcionando uma estimativa mais detalhada, embora menos prática para grandes reservatórios com grande variação sazonal.

Embora menos citado, o modelo de Heinemarm (1981) é uma variante que considera a profundidade do reservatório e a granulometria dos sedimentos, sendo especialmente aplicável a reservatórios de pequeno porte. Esse modelo é usado quando há uma boa caracterização do perfil sedimentar, permitindo estimativas de retenção mais específicas.

Esses modelos fornecem uma base importante para a gestão de reservatórios. Em grandes empreendimentos, como o da UHE Belo Monte, estimativas precisas da eficiência de retenção são essenciais para o planejamento da vida útil e para estratégias de manejo, especialmente em contextos com altas taxas de assoreamento.

2.1 MONITORAMENTO DE TRANSPORTE DE SÓLIDOS SUSPENSOS

A medição da carga sedimentar é realizada por métodos diretos e indiretos, cada um com vantagens, limitações e aplicações específicas. Os métodos diretos consistem na coleta física de amostras de sedimentos em suspensão ou depositados.

A amostragem manual é amplamente utilizada, especialmente em estudos detalhados de curto prazo. Este método envolve o uso de garrafas amostradoras ou equipamentos específicos para coleta em diferentes profundidades e pontos do reservatório. A análise das amostras permite determinar a granulometria, a concentração de partículas e a composição química dos sedimentos. Apesar de fornecer dados precisos, a técnica é limitada por ser trabalhosa, exigindo tempo e recursos, além de representar apenas condições momentâneas do ambiente.

Carvalho (2008) descreve o uso de amostragem pontual, que envolve a coleta direta de amostras de água e sedimentos em suspensão em diferentes profundidades e pontos do reservatório. Pode ser efetuada instantaneamente ou por integração, sendo o segundo mais utilizado por fornecer amostras mais representativas, permitindo a análise da carga de sedimentos transportada pela corrente.

Os métodos convencionais, empregados na determinação da concentração média de sólidos em suspensão em uma seção de monitoramento em rios ou reservatórios, envolvem diversas etapas. Entre esses métodos, a amostragem por integração na vertical é considerada a mais precisa, pois permite obter a concentração média de sólidos ao longo da vertical ou em toda a seção transversal, dependendo da análise realizada (CARVALHO, 2008).

Os equipamentos de amostragem por integração na vertical podem ser do tipo de garrafas, sacas compressíveis ou dispositivos de bombeamento. Esses amostradores utilizam bicos calibrados, que podem se desgastar com o uso contínuo, necessitando de calibração periódica. Cada tipo de equipamento exige um bico específico, com requisitos particulares em relação à velocidade de trânsito.

O Método de Igual Incremento de Largura (IIL) utiliza amostradores apropriados, como o de Braga e Bleninger (2017), que percorrem um trajeto vertical entre a superfície da água e o leito, garantindo uma amostragem isocinética e evitando a recirculação da mistura. Antes de iniciar, define-se a velocidade de trânsito, calculada com base em parâmetros como o tamanho do bico, volume da amostra, velocidade do fluxo de água e profundidade. A velocidade de trânsito não deve exceder 40% da velocidade do fluxo.

O tempo de amostragem é determinado pela velocidade de trânsito e profundidade da vertical de amostragem. As amostras de diferentes verticais, com volumes variados devido à velocidade de trânsito, são combinadas para formar uma amostra composta, que é levada ao laboratório para análise. Um balde fracionador pode ser usado para reduzir o volume transportado. Esse método é essencial para obter amostras representativas da concentração de sedimentos em um rio, considerando variações transversais, e é importante para monitorar a qualidade da água, estudar a erosão do solo e entender o transporte de sedimentos (TUCCI, 2008).

O Método de Igual Incremento de Descarga (IID) mede a concentração de sedimentos em suspensão por meio da divisão da seção transversal em parcelas com vazão uniforme. Em cada parcela, é coletada uma amostra vertical no centro, recomendando-se um mínimo de quatro e um máximo de nove verticais. Essa amostra, que integra o perfil vertical de forma isocinética, representa a concentração média de sedimentos na parcela (TUCCI, 2008).

Carvalho (2008) explica que uma diferença importante do método IID em relação ao IIL é a possibilidade de utilizar diferentes velocidades de trânsito para cada vertical amostrada, enquanto o IIL exige uma velocidade de trânsito constante. Similarmente ao IIL, as amostras de cada vertical podem ser compostas usando um balde fracionador para reduzir o volume a ser transportado ao laboratório.

O LISST (Laser In-Situ Scattering and Transmissometry) é uma tecnologia avançada para medir a concentração e a granulometria de sedimentos em suspensão na água. Felix, Albayrak e Boes (2018) explicam que o equipamento mede a distribuição de tamanho de partículas e a concentração de sedimentos em suspensão usando difração a laser. Ele emite um feixe de luz através da água e analisa o espalhamento e a atenuação causados pelas partículas em suspensão. Os dados gerados permitem calcular a distribuição de tamanho de partículas detalhada e a concentração de sedimentos em suspensão, ajustando os resultados para partículas esféricas ou de formas irregulares, comuns em ambientes naturais.

Entre suas vantagens, destaca-se a capacidade de realizar medições in-situ, evitando o transporte de amostras para laboratórios. O LISST oferece alta resolução e dados em tempo real, sendo adequado para ambientes aquáticos variados, de águas superficiais a profundas (FELIX; ALBAYRAK; BOES, 2018). Essa tecnologia é essencial para análises detalhadas e respostas rápidas às mudanças ambientais.

O ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) é um equipamento avançado que mede a velocidade e a direção do fluxo de água em corpos hídricos (TERABE et al., s.d.). Ele utiliza pulsos sonoros que, ao serem refletidos por partículas em movimento na água, sofrem mudanças de frequência devido ao efeito Doppler, permitindo o cálculo preciso das correntes em diferentes profundidades. Sua versatilidade permite aplicações em barcos, estruturas ancoradas ou plataformas fixas, adaptando-se a variados ambientes aquáticos.

Amplamente utilizado em estudos científicos e monitoramento ambiental, o ADCP fornece dados em tempo real sobre velocidade das correntes, padrões de circulação e transporte de sedimentos, com alta precisão e sem impacto no ambiente (TUCCI, 2008). Essas características tornam o equipamento essencial para a gestão sustentável e o planejamento de atividades relacionadas aos recursos hídricos.

O turbidímetro mede a turbidez da água emitindo luz através de uma amostra e registrando a quantidade dispersa ou absorvida por partículas em suspensão, geralmente expressa em NTU (Nephelometric Turbidity Unit) (TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI, 2008). Suas vantagens incluem medições rápidas e sensíveis, com possibilidade de monitoramento contínuo e em tempo real, facilitando a detecção de mudanças na qualidade da água. Além disso, é fácil de operar e manter, sendo uma ferramenta prática e acessível para o acompanhamento da qualidade dos recursos hídricos.

Câmeras subaquáticas e drones são ferramentas inovadoras para monitoramento de sólidos suspensos, proporcionando imagens de alta qualidade e ampla cobertura em tempo real. As câmeras, instaladas em pontos estratégicos como margens de rios e pontes, registram o transporte de sedimentos, a dinâmica de cheias e processos erosivos (VILAS BOAS, 2014). Já os drones, equipados com câmeras de alta resolução e sensores, permitem o monitoramento de áreas remotas e a análise detalhada da morfologia de rios e sedimentos em suspensão, mesmo em locais de difícil acesso. Entre as vantagens dessas tecnologias estão a mobilidade, flexibilidade e custo relativamente baixo, aliados à alta resolução das imagens.

O sensoriamento remoto utiliza sensores instalados em satélites, aeronaves e drones para coletar dados sobre a reflectância da luz na superfície da água, permitindo o monitoramento de grandes áreas (COSTA, 2016). Esses sensores capturam imagens em diversos comprimentos de onda, analisando a assinatura espectral única dos materiais presentes, como sedimentos suspensos, para identificar suas propriedades.

Os dados capturados são processados por algoritmos que convertem a reflectância em informações quantitativas, como a concentração de sólidos suspensos e a granulometria dos sedimentos. Essa técnica é especialmente vantajosa para monitorar regiões remotas ou de difícil acesso, oferecendo um método eficiente para avaliar parâmetros hidrossedimentológicos em larga escala.

2.2 MONITORAMENTO DE TRANSPORTE DE SÓLIDOS DE FUNDO

Para avaliação do material de fundo através de métodos diretos, a técnica mais utilizada é a implementação de armadilhas para capturar sedimentos transportados (EINSTEIN, 1944). Esses métodos são eficazes para avaliar a deposição sedimentar ao longo do tempo, mas têm limitações em ambientes de grande escala devido à sua baixa frequência e cobertura espacial restrita.

Entre os tipos predominantes, as armadilhas coletoras são as mais utilizadas e são classificadas em formato de cesta com abertura frontal e saca coletora; por diferença de pressão com abertura frontal e saca coletora; em formato de caixa transversal à seção de coleta; e em formato de rampa, conduzindo o sedimento para dentro do

recipiente de armazenamento. O volume do material coletado em um determinado período de tempo é analisado para todos os amostradores citados acima (RATTON, 2020).

Entre os métodos alternativos está o ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), que utiliza ondas sonoras para medir a velocidade da água e a concentração de sedimentos em suspensão e de fundo. Terabe (2003) explica que o ADCP emite pulsos sonoros que se refletem nas partículas em movimento na água, permitindo a medição da velocidade das correntes em diferentes profundidades. No entanto, o ADCP pode ser caro e requer calibração cuidadosa para garantir a precisão dos dados.

As tecnologias de imagem, como câmeras subaquáticas e LiDAR (Light Detection and Ranging), também são utilizadas para monitorar sedimentos de fundo. Câmeras subaquáticas registram imagens ou vídeos do leito do rio, permitindo a análise visual detalhada da movimentação de sedimentos (VILAS BOAS, 2014). Embora ofereçam dados ricos em detalhes visuais, seu uso pode ser limitado pela turbidez da água, que pode obscurecer a visibilidade.

O LiDAR, por outro lado, utiliza pulsos de laser para mapear o leito do rio em alta resolução. Este método é particularmente eficaz para cobrir grandes áreas e fornece dados topográficos precisos. No entanto, como Zhang (2007) explica, o LiDAR produz um grande volume de medições tridimensionais escaneadas pelo laser sob a aeronave, o que exige um processamento de dados complexo. Além disso, o elevado custo pode comprometer a viabilidade de sua aplicação.

O sensoriamento remoto é outra técnica moderna, utilizando drones e satélites. Drones equipados com câmeras de alta resolução são capazes de mapear áreas extensas e de difícil acesso, sendo úteis para o monitoramento em larga escala. No entanto, seu uso depende de condições meteorológicas favoráveis para operar eficientemente. Satélites, por sua vez, oferecem uma visão ampla e podem monitorar mudanças ao longo do tempo, embora a resolução espacial dos dados possa ser uma limitação para estudos que requerem detalhes mais finos (BARBOSA; MORAES NOVO; MARTINS, 2019).

Sensores ópticos e turbidímetros medem a turbidez da água para estimar a concentração de sedimentos em suspensão e de fundo. Esses sensores são relativamente baratos e fáceis de usar, fornecendo dados contínuos sobre a quantidade de sedimentos transportados pela corrente. No entanto, podem ser afetados por condições de luz e outros fatores ambientais, que podem influenciar a precisão das medições.

A batimetria por dunas envolve a utilização de técnicas de levantamento hidrográfico para mapear as características do leito de um corpo d'água, especialmente em áreas onde o fundo é composto por formações de dunas subaquáticas. Este mé-

todo utiliza equipamentos como ecossondas e sistemas de sonar que emitem pulsos acústicos para medir a profundidade e a morfologia do leito. Esses pulsos refletem as variações topográficas causadas pelas dunas, e os dados coletados são processados para gerar mapas detalhados do fundo. Esses mapas permitem a análise da dinâmica sedimentar, das correntes e da erosão, sendo essenciais para o monitoramento e a gestão de ambientes aquáticos, bem como para garantir a navegação segura.

A escolha do método adequado para a medição de transporte de sólidos de fundo depende de diversos fatores, incluindo a precisão necessária, o orçamento disponível e as condições específicas do ambiente aquático. Enquanto os métodos convencionais são amplamente utilizados e bem estabelecidos, os métodos alternativos oferecem novas possibilidades de medição mais detalhada e em larga escala, embora possam ser mais caros e tecnologicamente complexos.

2.3 CÁLCULO DA DESCARGA SÓLIDA

A descarga sólida refere-se à quantidade de sedimentos transportados por um rio em uma determinada seção transversal ao longo de um determinado período Vanoni (1975). Essa descarga é composta por duas frações principais: a descarga de sedimentos em suspensão e a descarga de sedimentos de leito. Para sua determinação, utiliza-se uma combinação de métodos de amostragem de sedimentos, medições de vazão e análises granulométricas, que permitem identificar tanto a quantidade quanto a distribuição dos sedimentos ao longo da coluna d'água e no fundo do rio.

Na prática, a descarga em suspensão, que geralmente representa a maior parcela, é estimada a partir de medições de concentração em suspensão em diferentes profundidades, integradas ao fluxo total. Já a descarga do leito, que inclui os sedimentos que deslizam na base do rio, é calculada por métodos empíricos ou teóricos. A soma dessas duas componentes fornece a descarga sólida total.

2.3.1 Cálculo da descarga sólida suspensa

A fração de descarga sólida suspensa é mais fácil de ser medida, analisada e calculada e, tipicamente, corresponde de 70% a 95% da descarga total (CARVALHO, 2008). A variação desse valor depende do curso d'água e posição da seção, das características geológicas da região, da granulometria dos sedimentos, entre outros fatores. Por essas razões, a maior parte das medições só contemplam o sedimento em suspensão.

Em geral, a descarga sólida suspensa deve ser determinada integrando-se a área da seção transversal, considerando a velocidade das partículas e a concentração de sedimentos em uma área elementar, conforme a equação 2.1.

$$Q_{ss} = \int_A C.U.dA \quad (2.1)$$

Segundo Carvalho (2008), a descarga sólida em suspensão pode ser quantificada pela equação 2.2. Essa fórmula é utilizada nos métodos de amostragem IIL e IID descritos anteriormente e que, inclusive, são recomendados pela ANA para realizar o monitoramento hidrossedimentológico.

$$Q_{ss} = 0,0864.Q_{liq}.C_{ss} \quad (2.2)$$

2.3.2 Cálculo da descarga sólida de fundo

Stevens e Yang (1989) descrevem, em um estudo comparativo, diversas fórmulas para o cálculo da descarga sólida de fundo. Elas podem ser baseadas no movimento da carga sólida do leito, como as de Schoklitsch (1934), Meyer-Peter e Muller (1948), ou nas características do material, como as de Yang (1973) para areias, e de Ackers e White (1973), Engelund e Hansen (1967), e Yang (1984) desenvolvidas para material grosso, como pedregulho.

Schoklitsch (1934) desenvolveu uma fórmula baseada na descarga de arrasto, com dados obtidos a partir do uso da calha de Gilbert e para granulometria média de 0,3 a 0,5 mm, correspondente a areia média a grossa. A fórmula parte do princípio que o material do leito se move com a descarga crítica, sendo que a descarga do leito é proporcional ao trabalho realizado. Já a fórmula de Meyer-Peter e Muller (1948) foi desenvolvida para areias e pedregulhos, com variação de diâmetro entre 0,4 e 30 mm, e leva em consideração variáveis como peso específico do sedimento, coeficiente de rugosidade do leito e as características do escoamento.

Engelund e Hansen (1967) utilizam o conceito de potência da corrente e o princípio da similaridade. A fórmula desenvolvida pelos autores é restrita para sedimentos com diâmetro médio maior que 0,15 mm.

Ackers e White (1973) se basearam na granulometria do material, na mobilidade e na descarga sólida para desenvolver a formulação. Os autores consideram que sedimentos grossos são transportados como carga de leito, enquanto que os sedimentos finos são transportados como carga suspensa devido à tensão de cisalhamento.

Yang (1973) desenvolveu uma equação baseada no conceito da potência unitária do escoamento, que é a energia potencial dissipada por unidade de peso d'água e é utilizada para areias com granulometria variando de 0,015 a 1,71 mm. Já para pedregulhos, a mesma definição foi usada para granulometrias na faixa de 2,46 a 7,01 mm ou para granulometrias maiores que 10 mm.

2.3.3 Cálculo da descarga sólida total

Ackers e White (1973) desenvolveram uma função para o cálculo da descarga sólida do material de leito, considerando diferentes comportamentos de transporte de sedimentos. De acordo com Carvalho (2008), o método reconhece que os sedimentos mais grosseiros são predominantemente transportados como carga de leito, já que apenas uma parte da tensão de cisalhamento no leito do canal é capaz de mobilizar essas partículas. Em contrapartida, os sedimentos mais finos são transportados principalmente como carga em suspensão, devido à ação da tensão de cisalhamento total que atua no fluxo.

Para aplicar o método de Ackers e White, são necessários diversos parâmetros de entrada, incluindo a vazão, o diâmetro e o peso específico do sedimento, a velocidade média e a profundidade do escoamento, a declividade da linha d'água, a viscosidade cinemática da água e a aceleração da gravidade.

Segundo Paiva (2007), Chen (2002) propôs um método para calcular taxas de transporte de sedimentos no leito que considera condições variáveis, desde baixas até altas tensões de cisalhamento. Para valores moderados de tensão de cisalhamento, a fórmula apresenta resultados muito próximos aos obtidos pelas equações de Einstein (1950) e Meyer-Peter e Müller (1948). Em situações onde o transporte é mais fraco, a fórmula de Chen mostra maior aderência às relações propostas por Einstein (1942) e Paintal (1971), demonstrando sua flexibilidade em diferentes regimes de transporte.

Para a aplicação do método de Chen, é necessário dispor de alguns parâmetros hidráulicos e sedimentológicos fundamentais. Entre eles estão a profundidade hidráulica, a declividade da linha d'água, o diâmetro médio das partículas, que corresponde ao tamanho para o qual 50% do material do leito é mais fino, e a largura da superfície do canal. Esses dados são essenciais para estimar com precisão as taxas de transporte de sedimentos no leito.

O método desenvolvido por Colby (1957), é amplamente utilizado para o cálculo da descarga total de sedimentos em cursos d'água. Esse método baseia-se, essencialmente, na utilização de três ábacos, indicados na figura ??, além de dados como descarga líquida, velocidade média, profundidade média, largura da seção e concentração de sedimentos em suspensão. Os ábacos foram elaborados a partir de um desenvolvimento semiempírico, fundamentado em experimentos relacionados a diferentes processos de cálculo de descarga sólida.

Uma das principais vantagens do método de Colby é sua simplicidade de aplicação, aliada à exigência de um número reduzido de dados. De acordo com Carvalho (2008), o método é amplamente utilizado em estudos realizados no Brasil, especialmente por requerer apenas dados de medição de descarga líquida e concentração de

determinar a descarga total de sedimentos. Entre as principais diferenças para o método de Einstein (1950), destacam-se a utilização da distribuição de velocidade ao longo da vertical, a unificação de diversos fatores de correção e a relação dos parâmetros do rio em camadas superiores à camada de fundo. O método também divide a profundidade em quatro zonas, realizando cálculos específicos em cada uma para determinar a concentração de sedimentos.

2.3.4 Eficiência de Retenção

Van Rijn (2013) apresenta alguns métodos empíricos para estimativa da eficiência de retenção. Dentre eles, os métodos de Churchill (1948) e Brune (1953), que serão descritos a seguir.

Segundo Carvalho (2008), o tamanho do reservatório é um fator importante para o cálculo da eficiência de retenção. Na tabela 1 é possível observar a classificação dos reservatórios e o método indicado para realizar o cálculo de E .

Porte do reservatório	Classificação em volume (m ³)	Cálculo de E
Pequeno	$< 10 \cdot 10^6$	Churchill
Médio	$10 - 100 \cdot 10^6$	Brune
Grande	$> 100 \cdot 10^6$	Brune

TABELA 1 – Classificação do reservatório para cálculo de E. Fonte: (CARVALHO, 2008).

Churchill (1948) apresentou uma curva de eficiência de captura baseada em dados de reservatórios nos Estados Unidos. O autor utiliza o valor do índice de sedimentação (IS), que relaciona dados hídricos e geométricos do reservatório, para a construção da curva

$$IS = \frac{V^2}{Q^2 L} \quad (2.3)$$

sendo V o volume total do reservatório, Q a vazão média afluente e L o comprimento do reservatório. Para $IS > 6 \cdot 10^4$ e com imprecisão de cerca de 5%, a eficiência de retenção pode ser calculada por

$$E = \frac{-20 + 0.95(IS)^{0.63}}{7500 + (IS)^{0.63}} \quad (2.4)$$

já para imprecisão de cerca de 10%, a eficiência de retenção é

$$E = -1.1 + 0.25 \log(IS) \quad (2.5)$$

com $E = 0$ para $IS \leq 2,6 \cdot 10^4$ e $E = 1$ para $IS \geq 2,5 \cdot 10^8$

Os resultados obtidos através das formulações de Churchill (1948) podem ser vistos na figura 2.

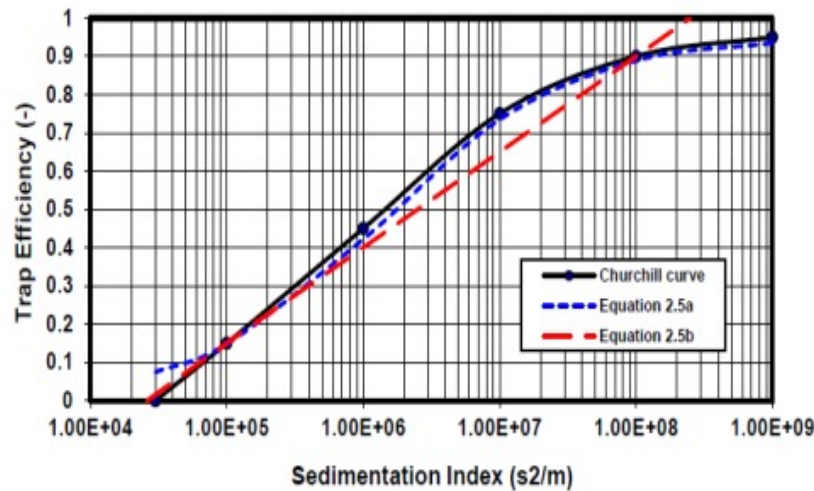


FIGURA 2 – Eficiência da armadilha de sedimentação do reservatório de acordo com Churchill (1948). Fonte: (VAN RIJN, 2013).

Um dos primeiros estudos sobre eficiência de retenção foi realizado por Brune e Allen (1941), que desenvolveram uma curva que relaciona a porcentagem de solo erodido retido no reservatório com a área de drenagem. Essa curva, ilustrada na figura 3, foi elaborada a partir de estimativas da taxa de erosão do solo em diferentes bacias, obtidas por meio de levantamentos, e comparada com as taxas de sedimentação observadas nos reservatórios.

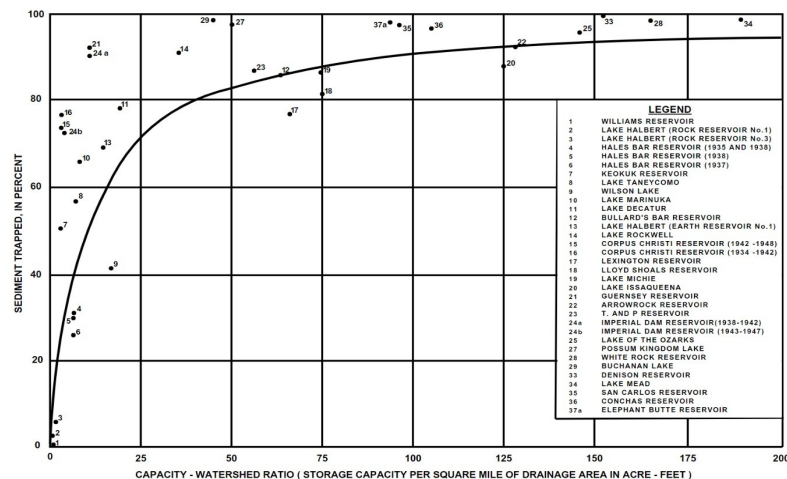


FIGURA 3 – Eficiência de retenção de sedimentos em relação à razão capacidade-área de drenagem. Fonte: (BRUNE, 1953).

A eficiência de retenção é, então, calculada dividindo-se a massa de sedimentos retida pela descarga sólida total que entra no reservatório, conforme equação 2.6.

$$E = \frac{M_{\text{retida}}}{Q_{\text{st,entra}}} \quad (2.6)$$

No entanto, os valores de eficiência de retenção apresentados na curva tendem a ser baixos, uma vez que se baseiam exclusivamente nas taxas de erosão do solo, desconsiderando as taxas de produção de sedimentos efetivamente transportados até os reservatórios. Essa limitação destaca a necessidade de abordagens complementares para uma avaliação mais precisa da eficiência de retenção.

Brune (1953) introduziu um método empírico para estimar a eficiência de retenção de sedimentos com base em dados de reservatórios nos Estados Unidos, oferecendo uma abordagem simples e eficaz, especialmente útil em situações onde dados detalhados sobre fluxos e sedimentos não estão disponíveis. A eficiência de retenção é definida como a proporção de sedimentos que permanecem retidos em um reservatório em relação ao total de sedimentos que nele entra, variando de 0% (nenhuma retenção) a 100% (retenção total).

Brune (1953) identificou que a eficiência de retenção está intimamente ligada ao tempo de retenção hidráulico, que é calculado como a razão entre o volume do reservatório e a vazão média de entrada de água. Este parâmetro reflete o tempo médio que a água permanece no reservatório, permitindo a deposição dos sedimentos. A partir de uma análise empírica, Brune desenvolveu três curvas principais (alta, média e baixa eficiência), que correlacionam o tempo de retenção hidráulico com a eficiência de retenção, considerando características específicas do reservatório e do sedimento transportado.

Para determinar a eficiência de retenção de um reservatório por esse método, o processo começa com a coleta de dados básicos, como o volume do reservatório e a vazão afluente. Com essas informações, calcula-se o tempo de retenção hidráulico (TR) usando a fórmula:

$$TR = \frac{V}{Q_{liq, entrada}} \quad (2.7)$$

O valor de TR é então localizado no eixo horizontal das curvas de Brune, selecionando-se a curva de eficiência mais adequada (alta, média ou baixa) com base nas características do reservatório, conforme indica a figura 4. A partir daí, a eficiência de retenção correspondente é identificada no eixo vertical, fornecendo uma estimativa prática da capacidade do reservatório em reter sedimentos.

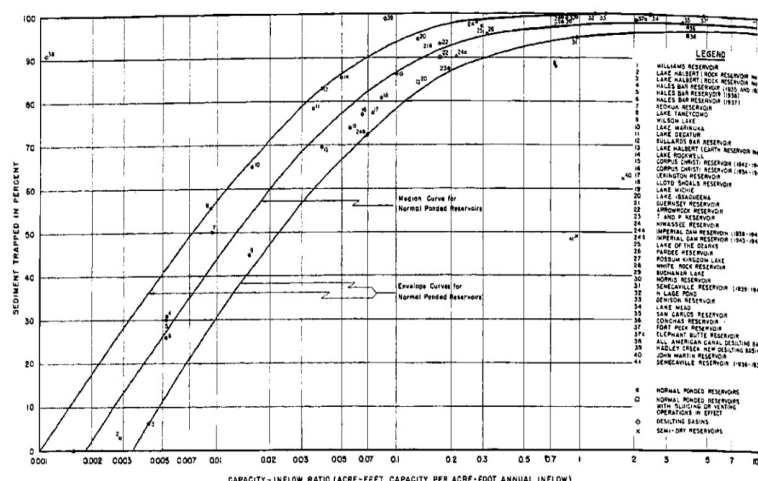


FIGURA 4 – Eficiência de retenção de sedimentos em relação à razão capacidade-fluxo. Fonte: (BRUNE, 1953).

Brune (1953) cita que a razão capacidade-fluxo (C/I) oferece uma correlação muito mais próxima com a eficiência de retenção do reservatório do que a razão capacidade-área de drenagem (C/W), pois fornece uma medida não apenas da capacidade relativa, mas também do escoamento da bacia hidrográfica.

Além disso, a razão capacidade-fluxo permite distinguir "reservatórios de armazenamento perene" e "reservatórios de armazenamento sazonal". Reservatórios com C/I igual ou inferior a 1,0 são classificados como sazonais, enquanto os com valores superiores a 1,0 são considerados perenes. Essa razão é calculada ao dividir a relação C/W pelo escoamento anual. Apesar de reservatórios poderem ter razões C/W e escoamentos anuais distintos, a mesma razão C/I implica eficiência de retenção similar, desde que outras condições sejam iguais.

Embora amplamente utilizado, o método de Brune (1953) apresenta algumas limitações. Como é baseado em dados empíricos de um conjunto específico de reservatórios, suas estimativas podem não refletir com precisão as condições locais de todos os reservatórios. Além disso, fatores como granulometria dos sedimentos, variações sazonais de vazão e eventos extremos não são considerados diretamente no modelo.

2.4 ESTIMATIVA DO ASSOREAMENTO

O cálculo da descarga sólida total através de levantamentos topobatimétricos, especialmente com o uso de ecobatímetros, é uma técnica avançada que proporciona uma avaliação precisa da sedimentação e erosão em corpos d'água. A análise envolve várias etapas detalhadas, com a coleta de dados batimétricos para estabelecer uma linha de base da morfologia do leito. Segundo Carvalho (2008), para realizar uma estimativa de assoreamento, o levantamento acústico é repetido periodicamente, comparando os dados de diferentes levantamentos. Em reservatórios de grande porte esse

tipo de levantamento pode ser feito a cada dez anos, conforme diretrizes da Resolução Conjunta nº127 ANA/ANEEL (2022).

Os equipamentos utilizados são chamados de ecobatímetros monofeixe ou multifeixe, que são sistemas de sonar projetados para medir a profundidade da água e a topografia do fundo. O ecobatímetro monofeixe emite um único feixe de ondas sonoras que se propaga através da coluna de água até atingir o leito. Quando as ondas sonoras encontram o fundo, elas são refletidas de volta ao transdutor do ecobatímetro, que registra o tempo decorrido entre a emissão e a recepção do sinal. Com base na velocidade conhecida do som na água, o equipamento calcula a profundidade do leito em diferentes pontos do reservatório (CARVALHO, 2008).

O ecobatímetro multifeixe, por outro lado, emite múltiplos feixes de ondas sonoras em diferentes direções, permitindo uma cobertura mais ampla e detalhada do leito do corpo d'água. Esse sistema é capaz de gerar mapas tridimensionais altamente precisos da topografia do fundo, capturando variações e irregularidades com maior resolução. Além disso, para melhorar a precisão das estimativas, os dados acústicos podem ser complementados com informações obtidas de amostras físicas de sedimentos coletadas em diferentes pontos do reservatório.

A estimativa de assoreamento através de métodos sísmicos envolve a emissão de ondas sísmicas que penetram no sedimento e refletem de volta a diferentes camadas do fundo. Os sinais refletidos são capturados por receptores sísmicos, permitindo a construção de perfis que mostram a profundidade e a composição das camadas sedimentares. Os métodos sísmicos são altamente precisos e podem penetrar profundamente no substrato, oferecendo uma visão detalhada da estratigrafia sedimentar, embora sejam técnicas caras e que requerem equipamentos especializados e profissionais qualificados para a aquisição e interpretação dos dados.

O uso de armadilhas de sedimentos envolve a utilização de dispositivos projetados para capturar e quantificar a quantidade de sedimentos transportados pela corrente em um corpo d'água. Essas armadilhas, que podem ser instaladas no leito de rios ou reservatórios, acumulam partículas sólidas ao longo do tempo, permitindo a medição direta da taxa de sedimentação. Os dados obtidos fornecem informações sobre a quantidade, tipo e taxa de deposição de sedimentos, ajudando a entender os padrões de assoreamento. No entanto, a eficácia das armadilhas de sedimentos pode ser influenciada por fatores como a localização da instalação e a dinâmica das correntes.

Modelos matemáticos e computacionais para simular os processos de transporte e deposição de sedimentos em corpos d'água consideram diversos fatores para realizar a estimativa de assoreamento, como a hidrodinâmica do fluxo, a granulometria dos sedimentos e a batimetria da região. A modelagem oferece uma abordagem

detalhada e flexível para entender o assoreamento, permitindo a análise de cenários futuros, embora dependa de dados precisos e calibração, além da correta interpretação dos resultados.

Imagens de satélite utilizam tecnologias de sensoriamento remoto para monitorar a deposição de sedimentos em corpos d'água ao longo do tempo. Satélites equipados com sensores ópticos e radar capturam imagens de alta resolução que permitem a observação das mudanças na superfície da água e das áreas adjacentes. Analisando estas imagens, é possível identificar variações na cor da água e na refletância, indicativas da presença e concentração de sedimentos suspensos. Além disso, o mapeamento de alterações na morfologia costeira e no uso do solo ao longo das margens pode fornecer informações sobre as fontes de sedimentação e os padrões de deposição.

A estimativa de assoreamento por varredura LiDAR (Light Detection and Ranging) emprega tecnologia de sensoriamento remoto que utiliza pulsos de laser para mapear a batimetria com alta resolução e precisão. O LiDAR Green é especialmente projetado para penetrar na água, capturando dados detalhados sobre a profundidade e a morfologia do fundo do corpo d'água. Ao emitir pulsos de laser que atravessam a coluna d'água e refletem do leito, o LiDAR Green fornece informações sobre a distribuição e a quantidade de sedimentos depositados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Usina Hidrelétrica de Belo Monte está localizada na Volta Grande do rio Xingu (CARDINOT et al., 2007), um dos principais afluentes do rio Amazonas no estado do Pará, região Norte do Brasil. Abrangendo uma área de drenagem total de aproximadamente 483.000 km² (HIDROWEB, 2024), Belo Monte teve início de operação em 01/01/2016, sendo a maior usina 100% brasileira. Projetada para atender a crescente demanda de energia elétrica no país, o complexo hidrelétrico conta com duas casas de força: a casa de força complementar, no sítio Pimental, possui 6 unidades geradoras com capacidade de geração de 233,1 MW, abrangendo cerca de 449.000 km² de área de drenagem e um volume total de 2271,53 km³; enquanto que a casa de força principal, no sítio Belo Monte conta com 18 unidades geradoras capazes de gerar 11.000 MW (NORTE ENERGIA S. A., 2024).

O projeto utiliza um sistema de derivação que desvia parte do fluxo do rio Xingu por meio de um canal de derivação, indicado na figura 6, o que permitiu a redução da área inundada pelo reservatório (NORTE ENERGIA S. A., 2024). Ao operar de forma integrada com ambas as usinas, o reservatório intermediário no sítio Pimental minimiza flutuações abruptas no rio Xingu, contribuindo para uma operação mais estável e eficiente do complexo hidrelétrico.

A vazão turbinada pela casa de força complementar, no sítio Pimental, corresponde à vazão mínima necessária para assegurar a preservação da vida biótica e a subsistência das comunidades indígenas da região. O segmento do rio Xingu que recebe essa vazão mínima, como pode ser visto na figura 6, é denominado trecho de vazão reduzida.

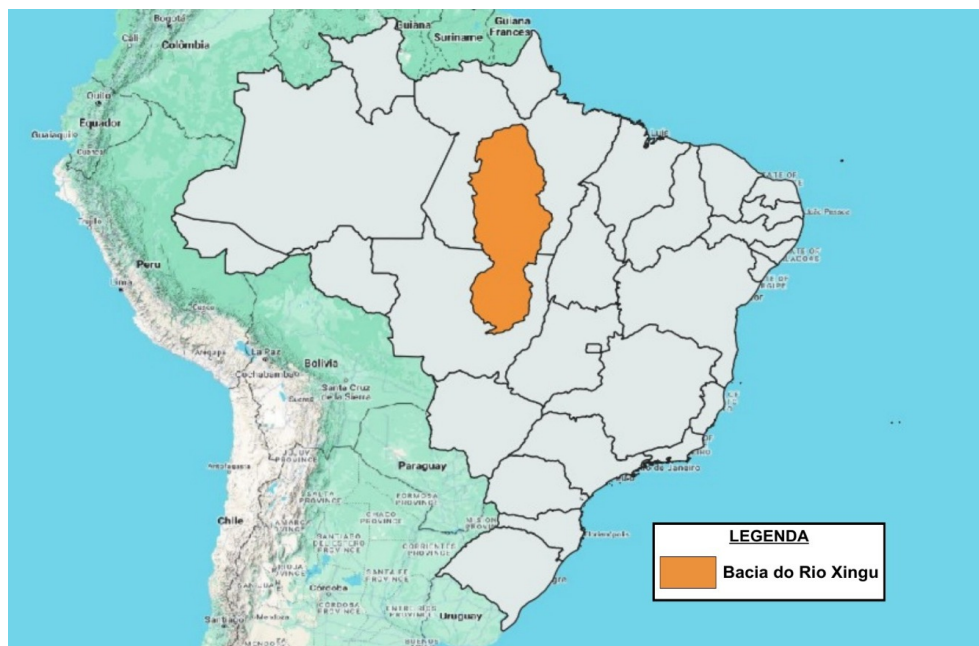


FIGURA 5 – Localização da bacia do rio Xingu.

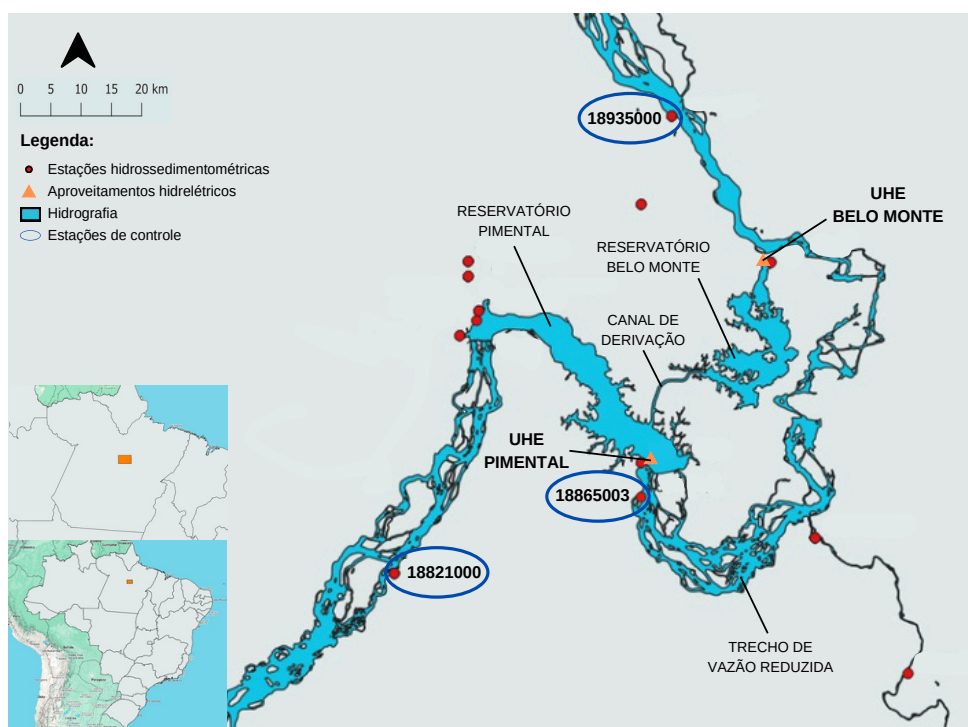


FIGURA 6 – Localização da área de estudo.

O rio Xingu é o quarto maior contribuinte do Amazonas, com quase 2500 km de extensão, contribuindo com cerca de 4% da descarga anual do rio Amazonas, cujo valor é de 131.947 m³/s, segundo dados da Agência Nacional de Águas (ANA, 2007). A confluência do Xingu com o Amazonas está situada a aproximadamente 420 km do Oceano Atlântico. No entanto, a influência das marés oceânicas pode ser observada até 100 km rio adentro no Xingu. A maior parte da bacia do Xingu localiza-se dentro da

região da floresta amazônica, enquanto suas cabeceiras estão em áreas dominadas por savanas arbustivas (MELO; PINTO, 2022).

Nascendo na confluência das Serras Formosa e do Roncador, o rio Xingu está dividido em três compartimentos: Alto Xingu, Médio Xingu e Baixo Xingu. No Alto Xingu, seus formadores incluem o rio Ferro, o rio Culuene e o rio Sete de Setembro. Ao entrar no Parque Indígena do Xingu, recebe outros importantes afluentes, como o Suiá-Miçu, Manissaua-Miçu e Arraias. No Médio Xingu, recebe contribuições do rio Fresco, no município de São Félix do Xingu, e, mais a jusante, do rio Iriri, o afluente mais importante do Xingu. No Baixo Xingu, o rio recebe a contribuição de outro grande afluente, o rio Bacajá, e após um trecho com muitas corredeiras, se abre em um lago, até sua foz na margem direita do rio Amazonas, na cidade de Porto de Moz (MELO; PINTO, 2022).

Os solos predominantes são latossolos e argissolos, típicos de regiões tropicais, caracterizados por baixa fertilidade natural, acidez e limitada capacidade de retenção de nutrientes. O crescimento populacional e o uso intensivo da terra, associados a atividades como queimadas e desmatamento, contribuem significativamente para o aumento da erosão do solo e da produção de sedimentos nos rios (CARVALHO et al., 2004).

A usina, que começou a ser construída em 2011, se trata de um aproveitamento a fio d'água, ou seja, não possui reservatório de acumulação, operando apenas com a vazão natural do rio. Essa abordagem está associada à formação de reservatórios com grandes áreas de inundação e profundidade média menor em comparação com reservatórios de acumulação, limitando a capacidade de armazenamento de água em períodos de estiagem, afetando, conseqüentemente, o potencial de geração de energia elétrica.

A usina foi planejada para gerar energia limpa e atender à demanda crescente do Sistema Interligado Nacional (SIN), especialmente na região Norte, e desempenha um papel estratégico para a matriz energética brasileira. No entanto, sua construção envolveu desafios sociais e ambientais significativos. Foi necessário o deslocamento de comunidades ribeirinhas e indígenas, além de mudanças nos ecossistemas aquáticos e terrestres da região. Medidas compensatórias foram implementadas, incluindo a criação de áreas protegidas e programas de manejo sustentável.

Mesmo sendo considerada uma usina eficiente para as condições hidrológicas da região, a barragem do canal do rio Xingu tem baixa altura e as soleiras de tomada d'água da casa de força complementar estão situadas em cota muito baixa, sendo indicativos de redução de sua vida útil (CARVALHO et al., 2004). O canal de derivação, com cerca de 20 km de extensão, 210 metros de largura e 25 metros de profundidade (NORTE ENERGIA S. A., 2024), conecta as estruturas principais, otimizando a geração

de energia. Apesar das controvérsias em relação aos impactos sociais e ambientais, a UHE Belo Monte representa um marco na capacidade de geração energética do Brasil, integrando a matriz de energia renovável e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis.

Devido ao fato de a Barragem do Canal do Rio Xingu ser de baixa altura, quando comparada com a vazão através das turbinas, bem como as soleiras de tomada d'água da casa de força complementar estarem em cota muito baixa, tal reservatório apresenta redução de sua vida útil.

3.2 DADOS

Os dados hidrossedimentológicos foram obtidos no âmbito do projeto “Sistema de tomada de decisão para atualização de curva cota-área-volume em reservatórios”, no Programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PROPGDI) da Norte Energia S. A., desenvolvido pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - Lactec e regulado pela ANEEL, compreendendo o período de novembro de 2011 a outubro de 2023.

As principais variáveis monitoradas identificadas, sendo elas vazão, cota, perfil transversal, curva de descarga, concentração de material em suspensão e granulometria dos sedimentos, são fundamentais para a compreensão de diversos aspectos do ambiente aquático, abrangendo desde o movimento da água até a composição dos sedimentos.

As estações hidrossedimentológicas definidas para este estudo foram selecionadas com base em critérios que garantem uma amostragem representativa das condições hidrodinâmicas e sedimentológicas da bacia hidrográfica em análise. Localizadas estrategicamente ao longo do curso d'água, estas estações contam com a coleta de dados de cota, vazão e concentração de sedimentos em suspensão, além de outras variáveis identificadas.

A estação 1 (18821000) está localizada a montante da UHE Pimental, antes da cidade de Altamira. Esta estação foi selecionada por disponibilizar dados de vazão anteriores à influência do reservatório. A estação 2 (18865003), por sua vez, encontra-se imediatamente a jusante da barragem da UHE Pimental. Devido ao desvio de uma parcela significativa da vazão pelo canal de derivação para a UHE Belo Monte, os dados desta estação refletem a vazão ecológica remanescente que passa pela UHE Pimental. Por fim, a estação 3 (18935000) está situada a jusante da UHE Belo Monte, em um ponto onde as vazões provenientes das UHEs Pimental e Belo Monte se unem, permitindo a análise conjunta dos fluxos. A tabela 2 apresenta a localização das estações, assim como suas respectivas áreas de drenagem (HIDROWEB, 2024).

	Estação	Latitude	Longitude	Área de Drenagem (km ²)	Área Incremental (km ²)
1	18821000	-3,5850	-52,3347	446500	-
2	18865003	-3,4506	-51,9667	449100	2600
3	18935000	-2,9167	-51,9206	483910	37410

TABELA 2 – Área de drenagem das estações de análise (HIDROWEB, 2024).

A área de drenagem do reservatório utilizada para o cálculo das razões C/W e C/I foi obtida a partir das estações 18862000 e 18925000, situadas na barragem da UHE Pimental. O valor, encontrado no Portal Hidroweb (2024), é de 449000 km². Já o volume total do reservatório, encontrado no banco de dados enviado pela Norte Energia S. A. (2024), é de 2271,53 hm³.

A figura 7 mostra o diagrama esquemático da UHE Belo Monte, evidenciando as áreas de drenagem de cada estação e apresentando os gráficos de descarga sólida total acumuladas ao longo de cada ano no período de 2012 a 2023, calculadas a partir dos dados de vazão líquida (m³/s) e concentração de sólidos suspensos (mg/L) medidos em cada estação.

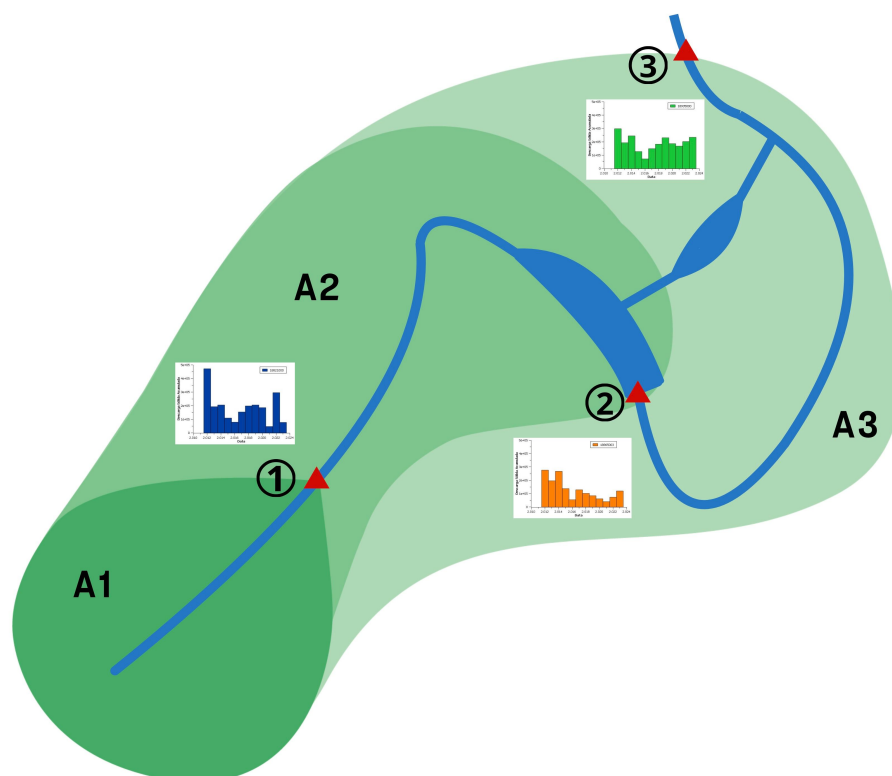


FIGURA 7 – Diagrama esquemático da UHE Belo Monte e das estações de estudo.

Durante a análise dos dados sedimentométricos, foram identificadas diversas ocorrências de valores duplicados. Para lidar com essa questão, critérios de seleção e filtragem dos dados foram adotados e estão descritos na tabela 3, de forma a garantir que apenas os registros mais consistentes e representativos fossem considerados. Os

critérios adotados foram os mesmos do Relatório Técnico da Etapa 3 desenvolvido pelo LACTEC (2024), a fim de gerar resultados comparáveis. Vale ressaltar que, até a conclusão deste estudo, não foram obtidos os dados de granulometria e peso aparente dos sedimentos.

Ocorrências	Critério adotado
Possuem mesmo valor	Mantém apenas 1 ocorrência
Possuem nível de consistência diferente	Mantém dado com nível de consistência = 2
Possuem mesmo nível de consistência e pequena diferença de valor	Mantém apenas 1 ocorrência por entender como truncamento no método de armazenagem do dado
Possuem mesmo nível de consistência e grande diferença de valor	Não mantém nenhuma ocorrência
Possuem três valores (2 iguais e 1 distinto)	Mantém apenas 1 ocorrência igual
Possuem todos os valores diferentes	Não mantém nenhuma ocorrência

TABELA 3 – Critérios de seleção e filtragem de dados hidrossedimentométricos.

Para a determinação da descarga sólida total, foi aplicado o método simplificado de Colby (1957), que utiliza informações como vazão, velocidade média, profundidade média e concentração de sólidos suspensos como dados de entrada. Além disso, são empregados os ábacos ilustrados na figura 1, que auxiliam na estimativa de valores como a descarga sólida não medida aproximada (q'_{nm}), a concentração relativa (C_r) e o fator de correção (K) a partir da linha média.

O cálculo da descarga sólida total foi realizado por meio do modelo NH Sediment and Statistic (NHSS), uma ferramenta que utiliza o Visual Basic para executar operações hidrossedimentológicas e análises estatísticas (SANTOS et al., 2021). Esse modelo permite integrar os dados de entrada e os resultados dos ábacos, facilitando a obtenção de estimativas para o transporte de sedimentos em rios.

As séries históricas de vazão líquida, descarga sólida suspensa e descarga sólida total foram obtidas através da série histórica de cotas, que compreende o período de outubro de 2010 a dezembro de 2022, exceto para a estação 3 que vai de dezembro de 2011 a dezembro de 2022.

Vale ressaltar que a estação 3 contém falha nos dados de cota, limitando o cálculo das séries históricas em determinados períodos. As maiores falhas estão nos anos de 2013, 2016, 2019 e 2022.

4 RESULTADOS

Em análises preliminares, foram plotados alguns gráficos para analisar os dados hidrossedimentológicos e compreender melhor a dinâmica dos sedimentos no reservatório. As figuras citadas a seguir estão dispostas no Apêndice 1. Primeiramente, os cotagramas das estações foram gerados mostrando a variação do nível d'água ao longo do tempo. Este gráfico é fundamental para visualizar os períodos de cheia e estiagem, permitindo a identificação de padrões sazonais e eventos extremos que influenciam a sedimentação.

As figuras 13, 14 e 15 apresentam os cotagramas individuais de cada estação, sendo possível observar as variações sazonais anuais do nível d'água. Além disso, o ano de 2014 apresentou os maiores valores de cota, enquanto que o ano de 2016 apresentou os menores valores durante o período de análise. A figura 16 apresenta o comparativo dos cotagramas das três estações, onde é possível observar que o comportamento citado acima acontece de forma similar nas três estações.

As figuras 17, 18 e 19 apresentam os fluviogramas individuais de cada estação, onde também é possível observar as variações sazonais anuais, desta vez de vazão líquida. O ano de 2014 apresentou os maiores valores de vazão, enquanto que o ano de 2016 apresentou os menores valores. O comparativo dos fluviogramas das três estações é apresentado na figura 20, onde é possível observar que o comportamento citado acima é equivalente nas três estações.

Na figura 18, percebe-se uma diminuição na magnitude das vazões após o ano de 2016 para a estação imediatamente a jusante da barragem da UHE Pimental, o que não acontece nas estações a montante da UHE Pimental e a jusante da UHE Belo Monte, indicadas pelas figuras 17 e 19, respectivamente. Esse comportamento pode ser explicado devido ao início de operação das UHE Pimental e UHE Belo Monte, que aconteceu em 01/01/2016. Por essa estação, passa somente a vazão ecológica remanescente que é turbinada pela UHE Pimental.

As figuras 21, 22 e 23 apresentam as concentrações de sólidos suspensos ao longo do tempo para cada estação, ilustrando as variações na quantidade de sedimentos suspensos na água em diferentes períodos e também as variações sazonais no reservatório. A figura 24 apresenta, de forma comparativa, todas as séries históricas. De maneira geral, a estação a montante da UHE Pimental (18821000) apresentou valores superiores às demais estações, comportamento esperado por se tratar de uma região onde os sedimentos com maior granulometria passam e começam a se depositar na entrada do reservatório.

A curva-chave de cada estação foi gerada a partir dos dados de cota e de vazão líquida, que foi calculada a partir da equação:

$$Q_{liq} = a.(h - h_o)^n \quad (4.1)$$

onde a , n e h_o são coeficientes da equação encontrados no banco de dados enviados pela Norte Energia S. A. (2024). Os resultados obtidos e a validade de cada-curva chave pode ser vista nas figuras 25, 26 e 27.

Conforme citado anteriormente, descarga sólida total foi calculada a partir do método de Colby (1957), conforme descrito no Relatório Técnico da Etapa 3 desenvolvido pelo LACTEC (2024). As curvas de descarga sólida foram geradas para cada estação, relacionando a carga de sedimentos transportada com a vazão do rio. Os resultados são observados nas figuras 8, 9 e 10.

Foi realizada a regressão potencial, definindo, assim, as curvas de descarga sólida através da equação:

$$Q_{st} = a.Q_{liq}^b \quad (4.2)$$

onde Q_{st} é a descarga sólida total, Q_{liq} é a vazão líquida e a e b são os coeficientes da equação dados pela regressão potencial.

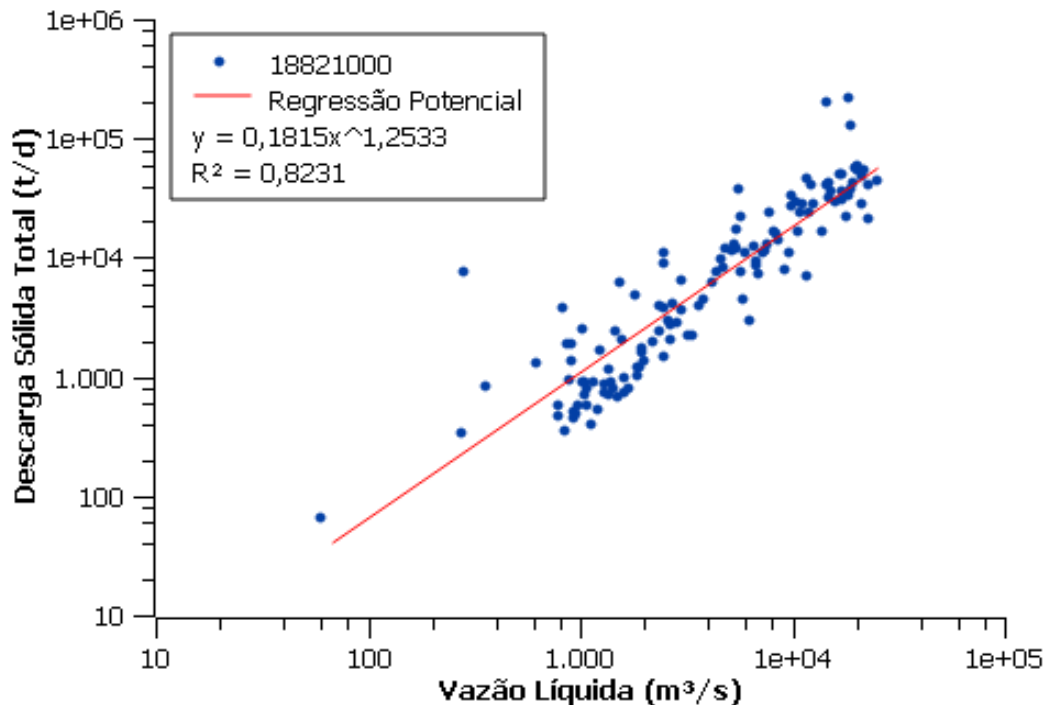


FIGURA 8 – Curva de descarga sólida total da estação 18821000.

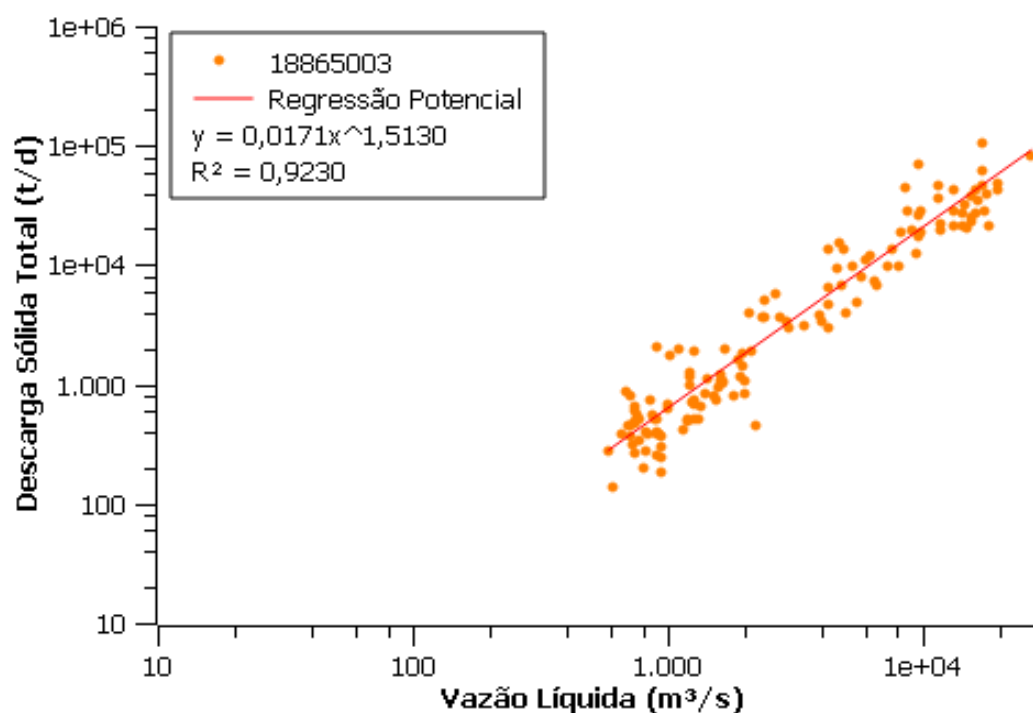


FIGURA 9 – Curva de descarga sólida total da estação 18865003.

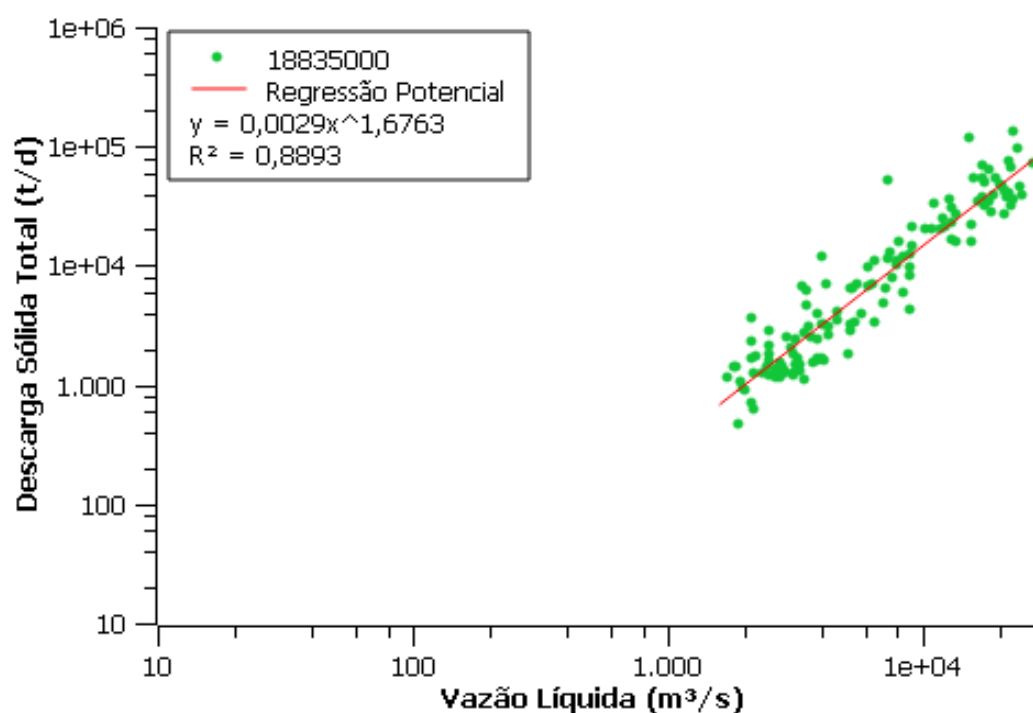


FIGURA 10 – Curva de descarga sólida total da estação 18935000.

Também foram geradas as curvas de descarga sólida suspensa, cujas curvas de regressão potencial estão apresentadas nas figuras 28, 29 e 30.

A partir da série diária de cotas e da curva-chave foi possível obter a série histórica de vazão líquida e, utilizando a curva de descarga sólida total de cada estação,

foram obtidas as séries históricas de descarga sólida total, como mostram as figuras 31, 32 e 33. O comparativo das séries históricas pode ser observado na figura 34.

Da mesma forma, a série histórica de descarga sólida suspensa foi obtida a partir da curva de descarga sólida suspensa de cada estação. Os resultados podem ser vistos nas figuras 35, 36 e 37. O comparativo das séries históricas pode ser observado na figura 38.

O comparativo dos acumulados de descarga sólida anuais para cada uma das estações podem ser observado na figura 39. Os gráficos foram gerados a partir de 2011, pois é o primeiro ano que todas as estações tem dados, mas ressalta-se que a estação 3 passa a ter dados apenas no final deste ano. Nota-se que há um aumento na descarga sólida na estação 3, a jusante da UHE Belo Monte, o que pode ser um indicativo de que haja erosão no canal de derivação e no reservatório de Belo Monte. Para confirmar esse pressuposto, seria necessária a obtenção de dados de uma estação hidrossedimentométrica instalada a jusante da UHE Belo Monte.

Também é possível observar que o ano de 2016 apresenta os menores valores de descarga sólida acumulada nas três estações e que, enquanto a estação 1 apresenta maiores acumulados, a estação 2 passa a ter um decaimento, sendo este um possível indicativo de assoreamento no reservatório.

A partir da descarga sólida total calculada, a eficiência de retenção do reservatório foi estimada de três maneiras diferentes: através do balanço de massa entre as estações 1 e 2; através do balanço de massa entre as estações 1 e 3; e através da comparação entre a estação 1 e a estimativa de assoreamento pelo método de comparação de seções transversais obtida pelo LACTEC (2024), descrito no Relatório Técnico da Etapa 3.

Ademais, a estimativa da eficiência de retenção foi realizada para dois períodos distintos. O método de comparação entre a estação 1 e as seções transversais contempla o período de 2011 a 2018, enquanto que, para as duas outras maneiras, foi realizada a partir de 2016 até 2022.

Os cálculos baseados na descarga sólida total apresentaram eficiências de retenção negativas, sugerindo a ocorrência de erosão no reservatório, o que diverge dos resultados relatados na literatura. Diante disso, foi adotada uma abordagem alternativa para o cálculo da eficiência de retenção, partindo da premissa de que o volume de água que atravessa as turbinas da UHE Pimental e da UHE Belo Monte é predominantemente composto por sólidos suspensos. Isso se deve ao fato de que os sólidos de fundo que entram no reservatório tendem a sedimentar e podem ressuspender antes de eventualmente passar pelas turbinas. Com base nos cálculos realizados considerando a descarga sólida suspensa, os resultados indicaram eficiências de retenção positivas,

sugerindo a ocorrência de assoreamento no reservatório.

Os resultados obtidos através do balanço de massa entre as estações 1 e 2 indicam um acúmulo de 70,92% de sedimentos para o período de 2016 a 2022. Entre as estações 1 e 3, os resultados obtidos foram de 31,82% para o mesmo período.

Os resultados anuais foram comparados com a curva de Brune e Allen (1941), que estabelece a relação entre a eficiência de retenção e a razão entre o volume total do reservatório e a área de drenagem (C/W). Esses resultados estão apresentados na figura 11.

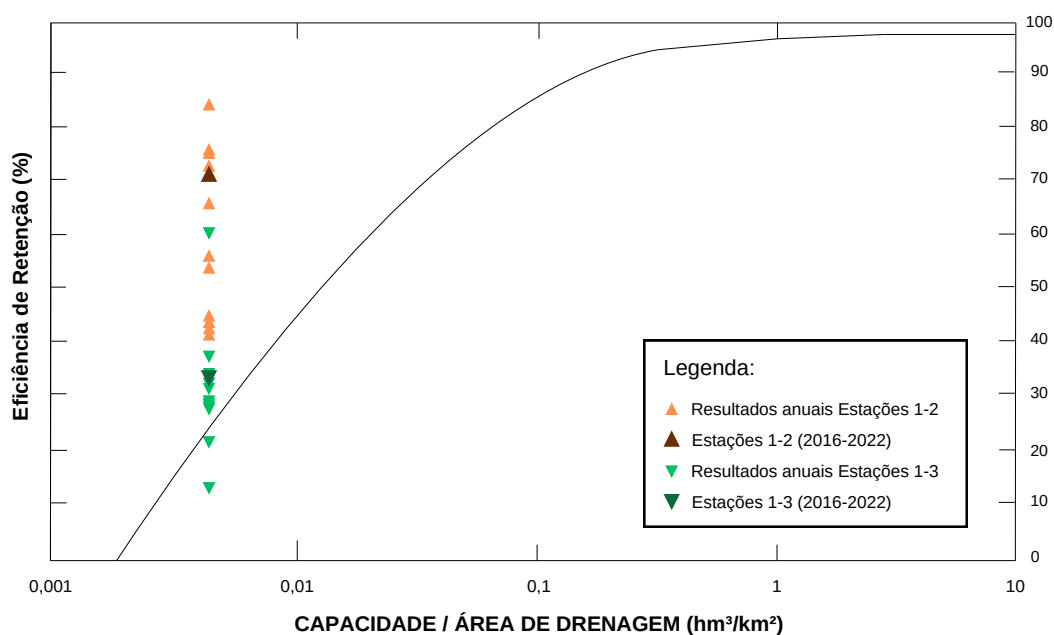


FIGURA 11 – Resultados da eficiência de retenção através da razão C/W.

No método de Brune (1953), que relaciona a eficiência de retenção com a razão entre o volume total do reservatório e a vazão afluente anual (C/I), a vazão volumétrica foi calculada com base na vazão média anual. Os resultados obtidos para cada ano estão apresentados na Figura 12.

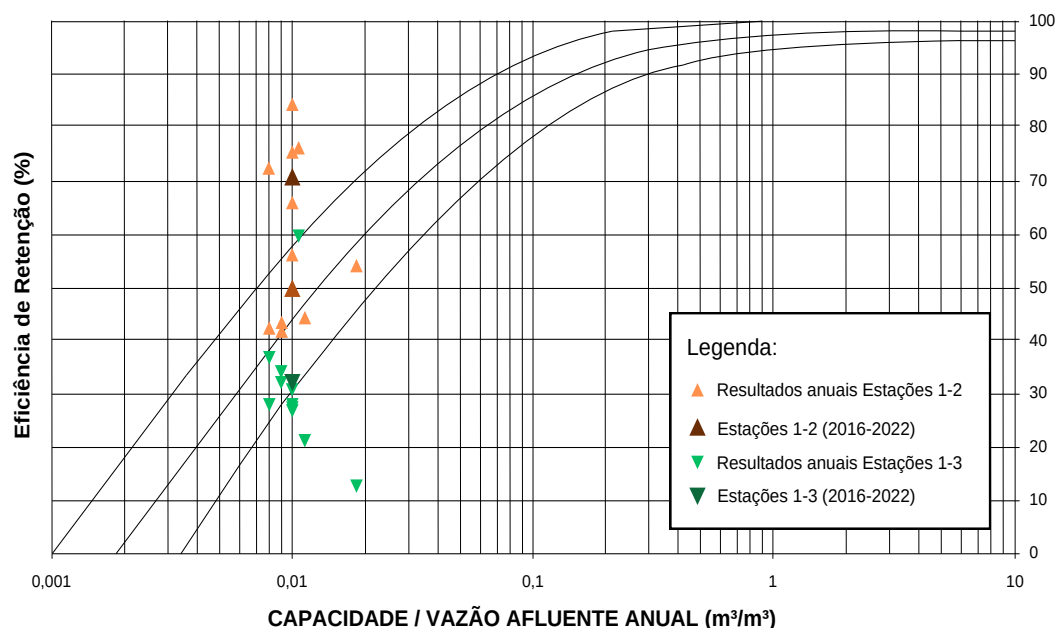


FIGURA 12 – Resultados da eficiência de retenção através da razão C/I.

Embora os dados sejam referentes ao armazenamento ao longo de 7 e 11 anos, foi calculado um valor para cada ano, seguido pelo cálculo de uma média para cada um dos períodos. Os valores obtidos mostram-se consistentes com as eficiências de retenção reportadas por Carvalho et al. (2004).

A estimativa da perda de volume total, realizada com base na comparação das seções transversais descritas por LACTEC (2024), seguiu o seguinte procedimento: inicialmente, as cotas superiores à cota do remanso, obtidas no estudo de Intertechne, Engevix e PCE (2011), foram desconsideradas dos cálculos. Em seguida, foi calculada a diferença entre as cotas medidas em 2011 e 2018.

A partir da mediana dessas diferenças, foi possível identificar indícios de assoreamento, quando os valores eram positivos, ou de erosão, quando negativos. Das 13 seções analisadas, 12 apontaram para a ocorrência de assoreamento. Apenas a seção localizada próxima à barragem de Pimental indicou erosão. No entanto, esse resultado pode não refletir a realidade, dado que essa área foi amplamente impactada por intervenções humanas relacionadas à movimentação de solo durante a construção da usina.

A partir da mediana das cotas em cada seção, foi possível encontrar a área associada com base na curva cota-área-volume de 2011 do reservatório. O volume foi calculado a partir da multiplicação da área com a diferença entre as cotas. O volume total de perda obtido foi de -49,28 hm³.

Para estimar a eficiência de retenção para o método das seções, foi necessário buscar valores de peso específico dos sedimentos na literatura para a realização dos cálculos, já que esses dados não foram encontrados na base de dados enviada no

início do projeto.

A Nota Técnica nº 129 (NT ANA, 2009) destaca que a bacia do rio Xingu tem baixa produção de sedimentos quando comparada com outras bacias amazônicas, como os rios Solimões e Madeira. Foram adotados dois valores de peso específico, 852 kg/m³, para o início da operação, e 1053 kg/m³, após 50 anos de operação, ambos considerados conservadores.

No estudo desenvolvido pelo LACTEC (2024), foram utilizados dois modelos computacionais simplificados para a estimativa de assoreamento, o Sediment e o Deposit. Foram utilizados dados do Projeto Básico de Consolidação realizado pela Intertechne, Engevix e PCE (2011), que cita que os sedimentos se dividem em parcelas de 24% de argila, 32% de silte e 44% de areia. O modelo fez o cálculo com base nesses dados de entrada e estimou o peso específico como sendo igual a 1181 kg/m³, mas sem levar em consideração a matéria orgânica presente no material de fundo e a porosidade do mesmo, parâmetros que interferem no resultado final.

Dessa forma, a comparação entre a estação 1 e o resultado obtido através das seções transversais foi de uma eficiência de retenção de 101,35% para o peso específico de 852 kg/m³, 125,26% para 1053 kg/m³ e de 140,48% para 1181 kg/m³. Esses valores são impraticáveis, visto que uma eficiência de retenção de 100% indica o assoreamento total do reservatório, o que não é o caso da UHE Belo Monte.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos pela razão C/I mostraram-se mais consistentes com os dados disponíveis na literatura e apresentaram maior representatividade em comparação aos obtidos pela razão C/W, conforme destacado por Brune (1953). Além disso, nota-se uma redução na eficiência de retenção de sedimentos no período de 2012 a 2022 em relação ao período de 2012 a 2018. Esse decréscimo pode ser explicado pelo fato da usina estar em fase de construção até 2015, com suas operações iniciando somente em 2016.

A comparação das seções transversais se mostra uma alternativa pouco representativa para estimar o assoreamento, devido ao número limitado de seções analisadas em relação à vasta extensão do reservatório. Esse método pode tanto subestimar como superestimar a sedimentação de fato ocorrida. Além disso, o enchimento do reservatório da Usina de Belo Monte foi iniciado em dezembro de 2015, enquanto que a operação começou em janeiro de 2016. Assim, a comparação das seções abrange fases distintas do processo de construção, o que compromete a consistência e a comparação dos resultados obtidos.

As principais incertezas deste estudo estão relacionadas à quantidade limitada de dados medidos que interfere na precisão das curvas de regressão obtidas, à aplicação do método simplificado de Colby (1957) para o cálculo da descarga sólida total e aos valores de peso específico adotados que podem, os quais foram estimados devido à ausência de coletas específicas em campo, entre outros fatores. Além disso, o empreendimento possui uma grande complexidade, compreendendo dois aproveitamentos hidrelétricos, dois reservatórios a fio d'água, canal de derivação e trecho de vazão reduzida, o que dificulta a comparação com estudos encontrados na literatura, cujas características dos empreendimentos são mais simplificadas.

É importante destacar que não existem dados disponíveis sobre a vazão e a carga de sedimentos que passam pelo canal de derivação e são turbinados pela UHE Belo Monte, o que impossibilita a estimativa precisa do volume de sedimentos retido ou erodido no reservatório complementar. Da mesma forma, também não é possível determinar com exatidão a quantidade de sedimentos retida ao longo do trecho do rio Xingu por onde passa a vazão ecológica remanescente, entre as estações 2 e 3, devido à interferência da vazão do canal de derivação nas medições realizadas na estação 3.

Para que estudos futuros sejam feitos com maior representatividade, é fundamental realizar medições com maior frequência temporal, possibilitando a construção de curvas de ajuste mais precisas, que influenciam diretamente os resultados finais.

Além disso, a ampliação da rede de monitoramento hidrossedimentométrico na região, especialmente com a instalação de uma estação imediatamente a jusante da UHE Belo Monte, é essencial para obter dados mais detalhados sobre a descarga sólida que passa pelo canal de derivação e, dessa forma, chegar em resultados mais confiáveis.

Ainda assim, a definição da eficiência de retenção de sedimentos para diferentes métodos de estimativa de assoreamento é fundamental para compreender o impacto do transporte de sedimentos na capacidade de armazenamento e na vida útil do reservatório. Esse tipo de análise permite avaliar a eficácia do reservatório em reter sedimentos, identificar padrões de deposição e erosão, e comparar a precisão de diferentes abordagens metodológicas. Além disso, tais estudos fornecem subsídios essenciais para o planejamento de ações de manejo e mitigação, como o controle da erosão na bacia hidrográfica, a otimização da operação do reservatório e a definição de estratégias para prolongar sua sustentabilidade e eficiência na geração de energia, abastecimento ou controle de cheias.

REFERÊNCIAS

- ANA. Diagnóstico da outorga de direito de uso de recursos hídricos no Brasil: fiscalização dos usos de recursos hídricos no Brasil. **Brasília: Agência Nacional das Águas. Cadernos de recursos hídricos, 4. 1 CD-ROM**, 2007. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2007/DiagnosticoDaOutorgaDeDireitoDeUso.pdf>>.
- ANA/ANEEL. Resolução Conjunta n° 127, de 26 de julho de 2022. Estabelecer as condições e os procedimentos a serem observados pelos titulares de empreendimentos hidrelétricos com potência instalada superior a 1.000 kW para a instalação e operação de estações hidrológicas, visando ao monitoramento pluviométrico [...], 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/monitoramento-e-eventos-criticos/monitoramento-hidrologico/monitoramento-hidrologico-do-setor-eletrico/resolucao-conjunta-ana-aneel-127-2022#:~:text=A%20Resolu%C3%A7%C3%A3o%20Conjunta%20ANA%20ANEEL,hidrol%C3%B3gicas%2C%20visando%20ao%20monitoramento%20pluviom%C3%A9trico%2C>>.
- BARBOSA, Claudio Clemente Faria; MORAES NOVO, Evlyn Marcia Leão de; MARTINS, Vitor Souza. **Introdução ao sensoriamento remoto de sistemas aquáticos: princípios e aplicações**. [S.l.]: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019. v. 1.
- BRAGA, A. S.; BLENINGER, T. Desenvolvimento de um amostrador de água pontual para avaliar perfis de sedimentos em suspensão de rios. **XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, v. 1, p. 1**, 2017.
- BRUNE, G. M. Trap efficiency of reservoirs. **Eos, Transactions American Geophysical Union, v. 34, n. 3, p. 407-418**, 1953.
- BRUNE, G. M.; ALLEN, R. E. A consideration of factors influencing reservoir-sedimentation in the Ohio Valley region. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, Wiley Online Library, v. 22, n. 3, p. 649–655, 1941.
- CARDINOT, F. C. et al. O aproveitamento hidrelétrico Belo Monte. **XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2007.
- CARVALHO, N. O. Hidrossedimentologia Prática. **2 ed. Interciência. 600p**, 2008.
- CARVALHO, N. O. et al. Assessment of the sedimentation in the reservoirs of the Belo Monte Hydroelectric complex, Xingu river, Brazil. **Proceedings of the Ninth International Symposium on River Sedimentation**, 2004.

- CHURCHILL, M. A. Discussion of analysis and use of reservoir sedimentation data. In: PROCEEDINGS of the federal interagency sedimentation conference. bureau of reclamation, US Department of the Interior, Washington, DC. [S.l.: s.n.], 1948. P. 139–140.
- COLBY, B. R. Relationship of unmeasured sediment discharge to mean velocity. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, Wiley Online Library, v. 38, n. 5, p. 708–717, 1957.
- COSTA, A. M. et al. Estimativa da concentração de sólidos suspensos em águas opticamente complexas a partir de sensores remotos. Universidade Federal de Alagoas, 2016.
- EINSTEIN, H. A. Bed-load transportation in Mountain Creek. **Greenville sediment load laboratory**, 1944.
- ESTEVES, F. de A. **Fundamentos de limnologia**. [S.l.]: Interciência, 1998.
- FELIX, D.; ALBAYRAK, I.; BOES, R. M. In-situ investigation on real-time suspended sediment measurement techniques: Turbidimetry, acoustic attenuation, laser diffraction (LISST) and vibrating tube densimetry. **International journal of sediment research**, Elsevier, v. 33, n. 1, p. 3–17, 2018.
- GUERRA, A. J. T. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. [S.l.]: Bertrand Brasil, 1994.
- HEINEMARM, H. G. A new sediment trap efficiency curve for small reservoirs 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, Wiley Online Library, v. 17, n. 5, p. 825–830, 1981.
- HENRY, R. **Ecologia de reservatórios: estrutura, função e aspectos sociais**. [S.l.]: FUNDIBIO, 2007.
- HIDROWEB. **Agência Nacional de Águas – ANA. Portal Hidroweb: Sistemas de informações hidrológicas**. [S.l.], 2024. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>>.
- INTERTECHNE; ENGEVIX; PCE. **Projeto e Consultorias de Engenharia. (2011). Projeto Básico Consolidado da UHE Belo Monte. Relatório Técnico Estudos Sedimentológicos, Anexo F. Norte Energia S.A.** [S.l.], 2011.
- LACTEC. **Sistema de tomada de decisão para atualização de curva cotaárea-volume em reservatórios - Relatório Técnico Etapa 3**. [S.l.], 2024.
- MAC ARTHUR, R. C. et al. Overview of sedimentation engineering. **Sedimentation Engineering: Processes, Measurement, Modeling, and Practice, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice**, v. 110, p. 1-20, 2008.

MELO, D. C. de R.; PINTO, E. J. de A. Análise de frequência de cotas e vazões dos sistemas de alerta: sistema de alerta bacia do Xingu, rio Xingu, estação fluviométrica Altamira, código 18850000, municípios atendidos Altamira, PA, Senador José Porfírio, PA e Vitória do Xingu, PA. **SGB-CPRM**, 2022.

MERTES, L. A. K.; DUNNE, T.; MARTINELLI, L. A. Channel-floodplain geomorphology along the Solimões-Amazon river, Brazil. **Geological Society of America Bulletin**, Geological Society of America, v. 108, n. 9, p. 1089–1107, 1996.

MORRIS, G. L.; FAN, J. Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use. **Eletronic Ver. 1.04. McGraw-Hill. New York**, 1998.

NORTE ENERGIA S. A., N. Belo Monte: Gigante por Natureza. **Agência Nacional de Energia Elétrica. Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas**, 2024. Disponível em: <<https://www.norteenergiasa.com.br/uhe-belo-monte/>>.

NT ANA. Nota Técnica n.º 129/2009/GEREG/SOF-ANA - Agência Nacional de Águas - Declaração de Reserva de Disponibilidade Hídrica para o aproveitamento hidrelétrico Belo Monte, 2009.

PAIVA, L. E. D. **A influência do diâmetro representativo do material do leito nas fórmulas de cálculo do transporte de sedimentos em escoamentos com superfície livre**. 2007. Tese (Doutorado) – [sn].

RATTON, P. Mapeamento e modelagem 3D do transporte de sedimentos do leito em rios com dunas. **Tese para obtenção do título de Doutor. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental**, 2020.

SANTOS, B. B. dos et al. A computational tool for hydrosedimentological and statistical calculations. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 26, p. 545–555, 2021.

STEVENS, H. H.; YANG, C. T. Summary and use of selected fluvial sediment discharge formulas. **US Geological Survey: Open-File Services Section, Western Distribution Branch**, 1989.

TERABE, F. R. Estudo sobre o uso do perfilador acústico de corrente por efeito Doppler (ADCP) para medição do transporte de sólido em suspensão. **Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba**, 2003.

TERABE, F. R. et al. Uso do Perfilador Acústico (ADCP) para Medição do Transporte Sólido em Suspensão.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre, Brasil: Porto Alegre: ABRH., 2008.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. Limnologia. São Paulo: Oficina de Textos. 631 p. **Soils and Sediments**, v. 2, n. 4, p. 216–222, 2008.

VAN RIJN, L. C. Sedimentation of sand and mud in reservoirs in rivers. **Website**, 2013. Disponível em: <www.leovanrijn-sediment.com>.

VANONI, V. A. Sedimentation Engineering. **ASCE, American Society of Civil Engineers. New York**, 1975.

VILAS BOAS, A. H. Uso experimental de câmeras digitais para o estudo da concentração de sólidos em suspensão em sistemas aquáticos continentais. IRN-Instituto de Recursos Naturais, 2014.

ZHANG, K. Airborne LiDAR data processing and analysis tools. In: AGU Fall Meeting Abstracts. [S.l.: s.n.], 2007. v. 2007, h52e–01.

APÊNDICES

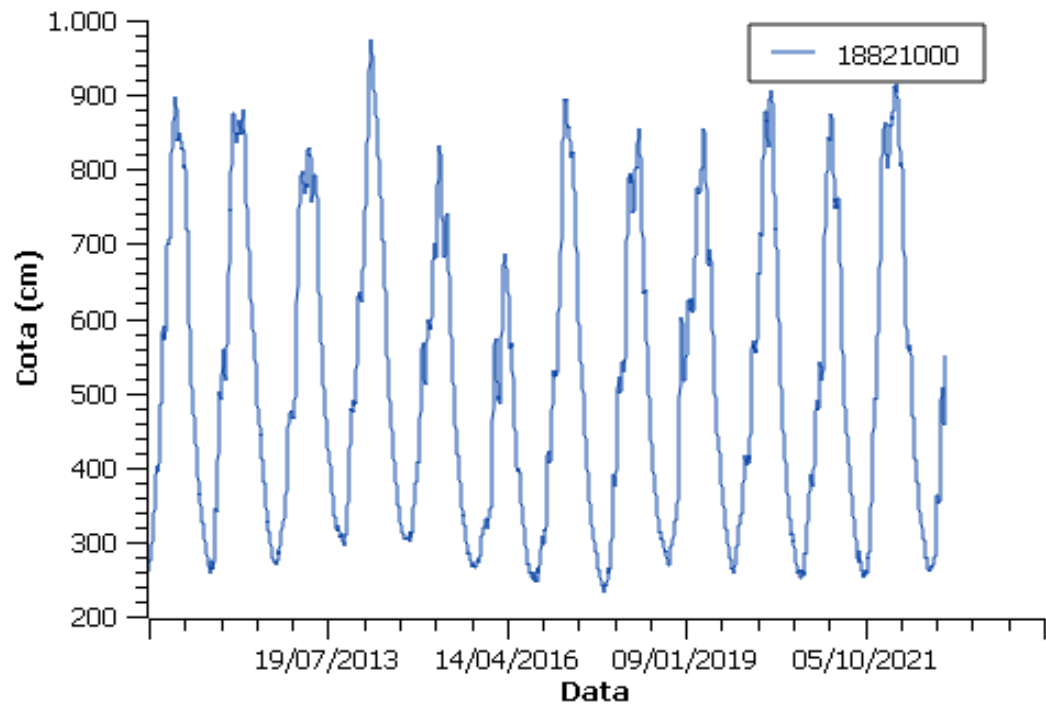
APÊNDICE A – GRÁFICOS

FIGURA 13 – Cotagrama da estação 18821000.

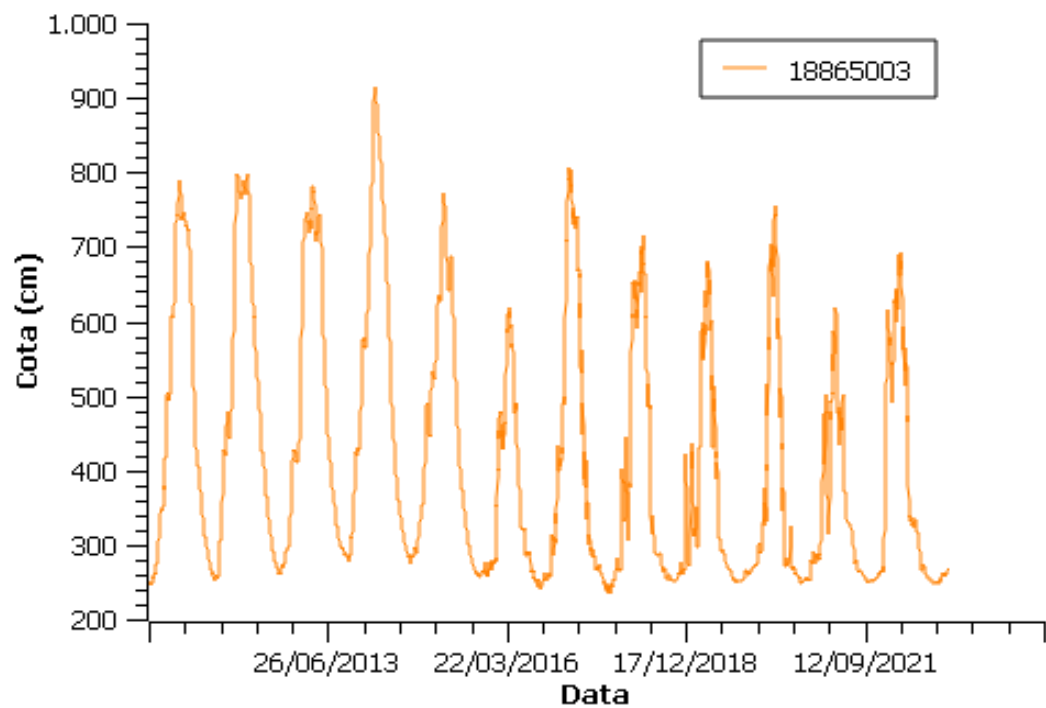


FIGURA 14 – Cotagrama da estação 18865003.

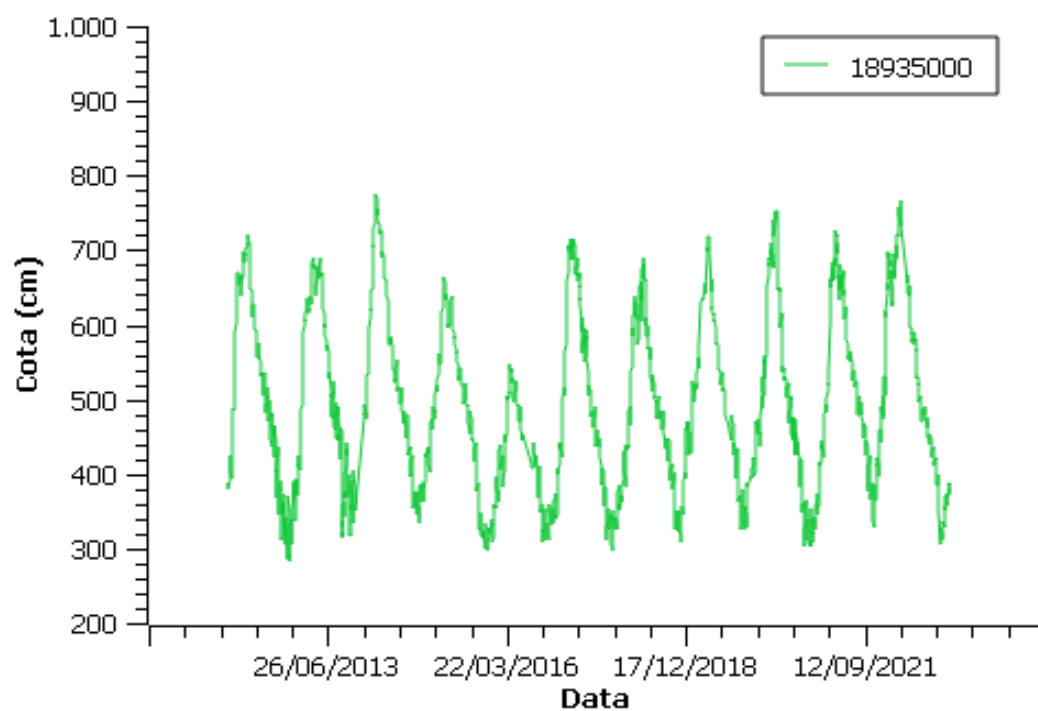


FIGURA 15 – Cotagrama da estação 18935000.

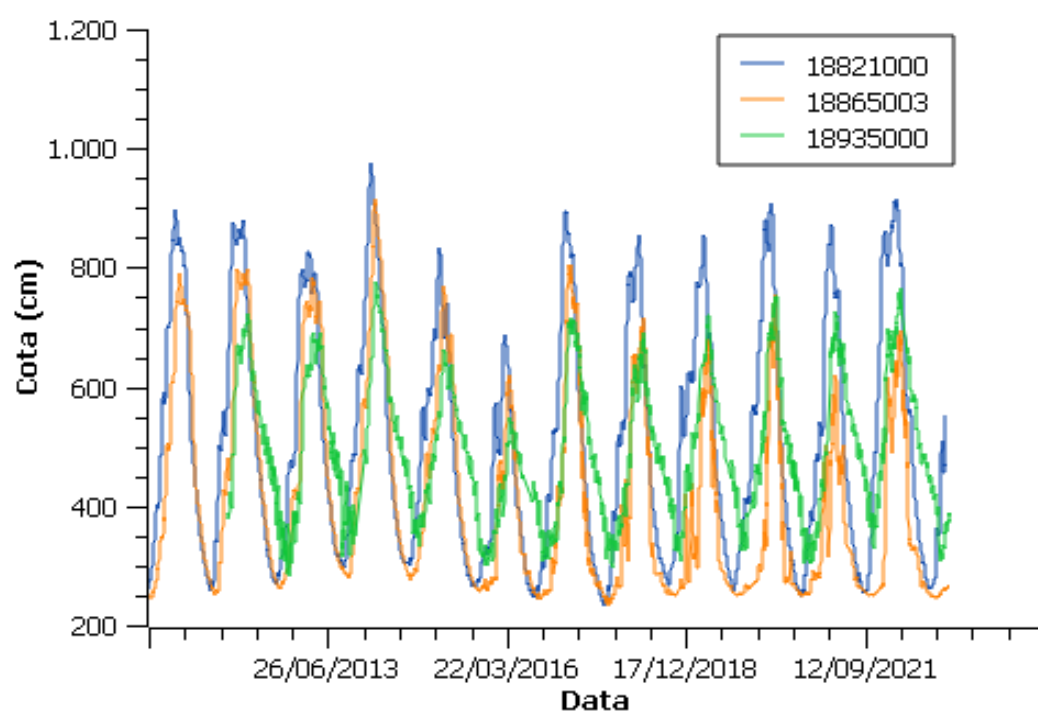


FIGURA 16 – Comparativo dos cotagramas das estações 18821000, 18865003 e 18935000.

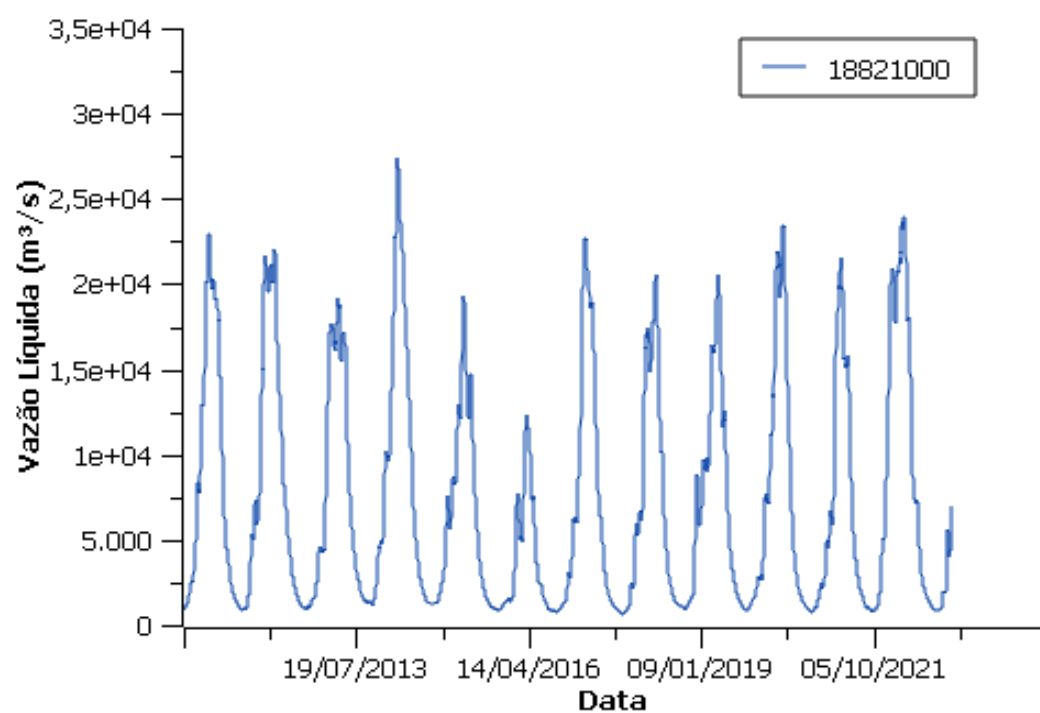


FIGURA 17 – Fluviograma da estação 18821000.

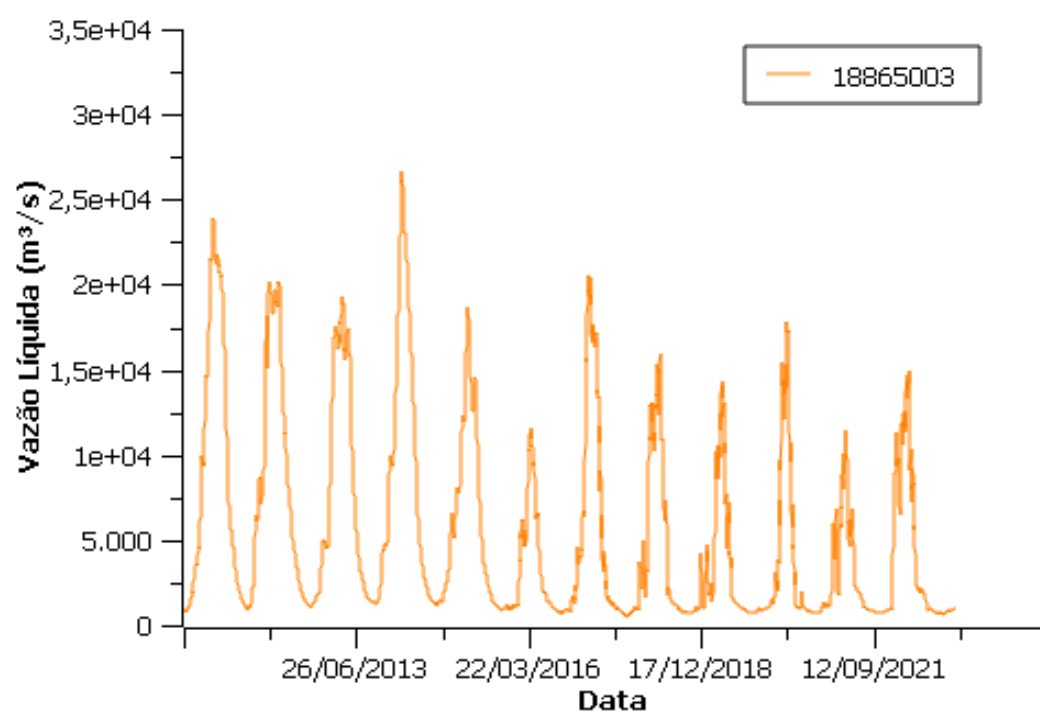


FIGURA 18 – Fluviograma da estação 18865003.

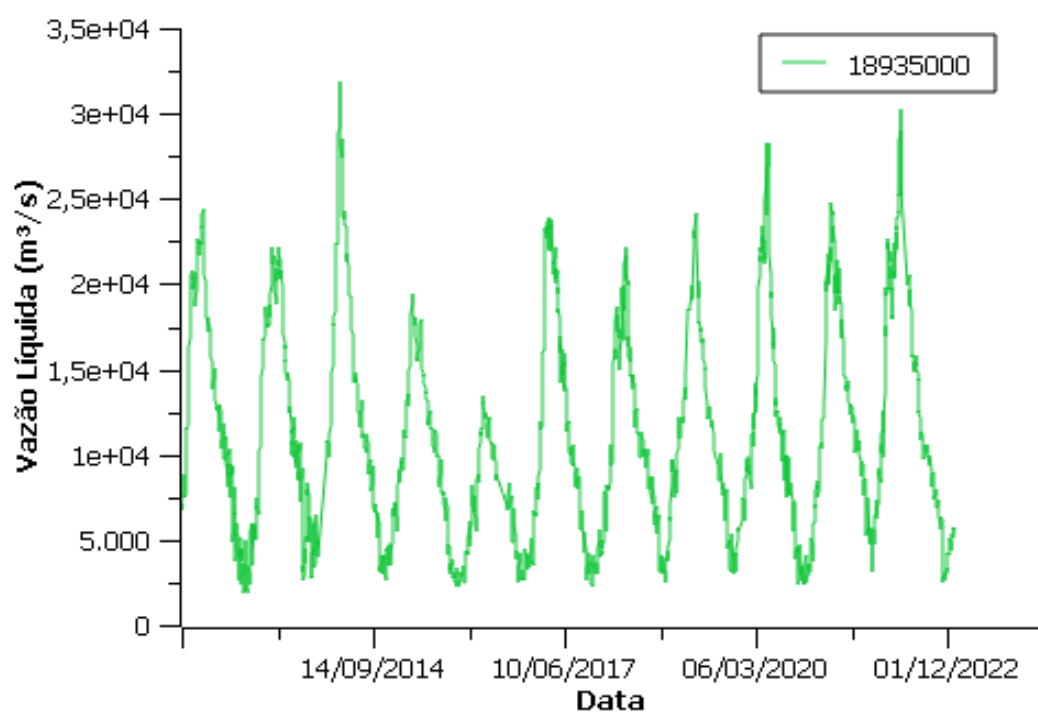


FIGURA 19 – Fluviograma da estação 18935000.

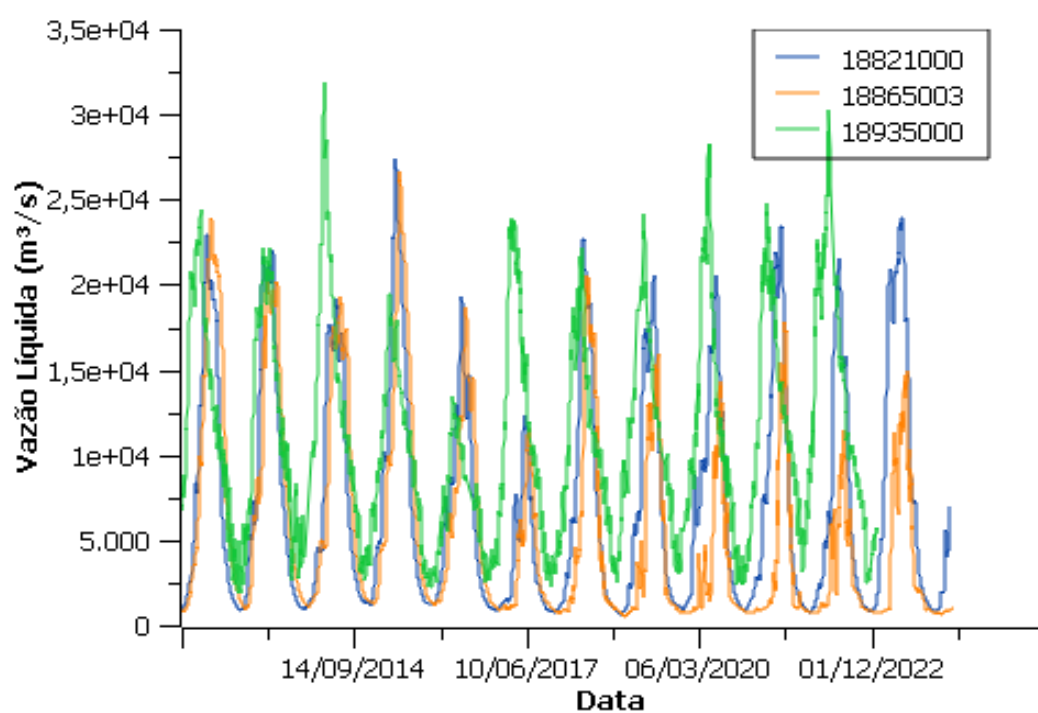


FIGURA 20 – Comparativo dos fluviogramas das estações 18821000, 18865003 e 18935000.

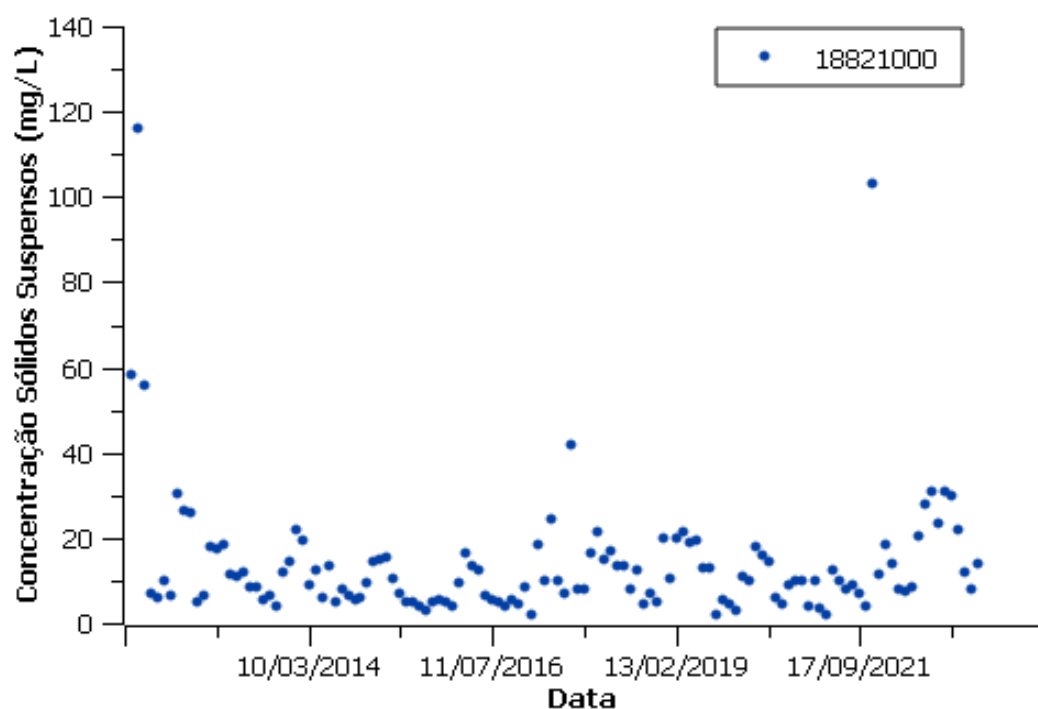


FIGURA 21 – Concentração de sedimentos da estação 18821000.

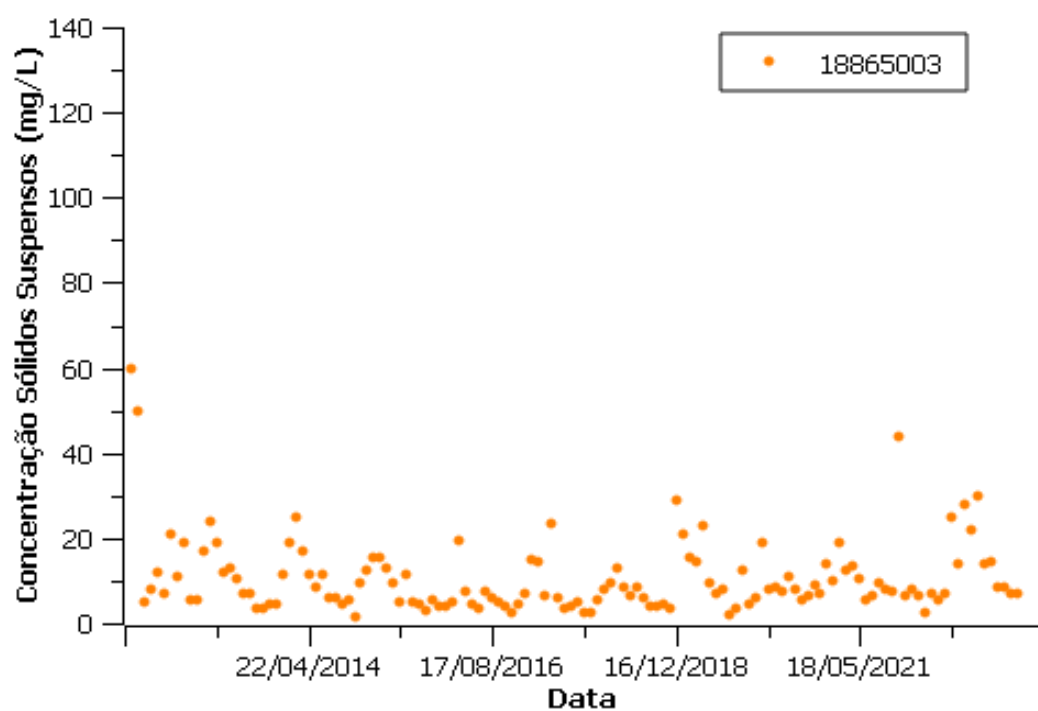


FIGURA 22 – Concentração de sedimentos da estação 18865003.

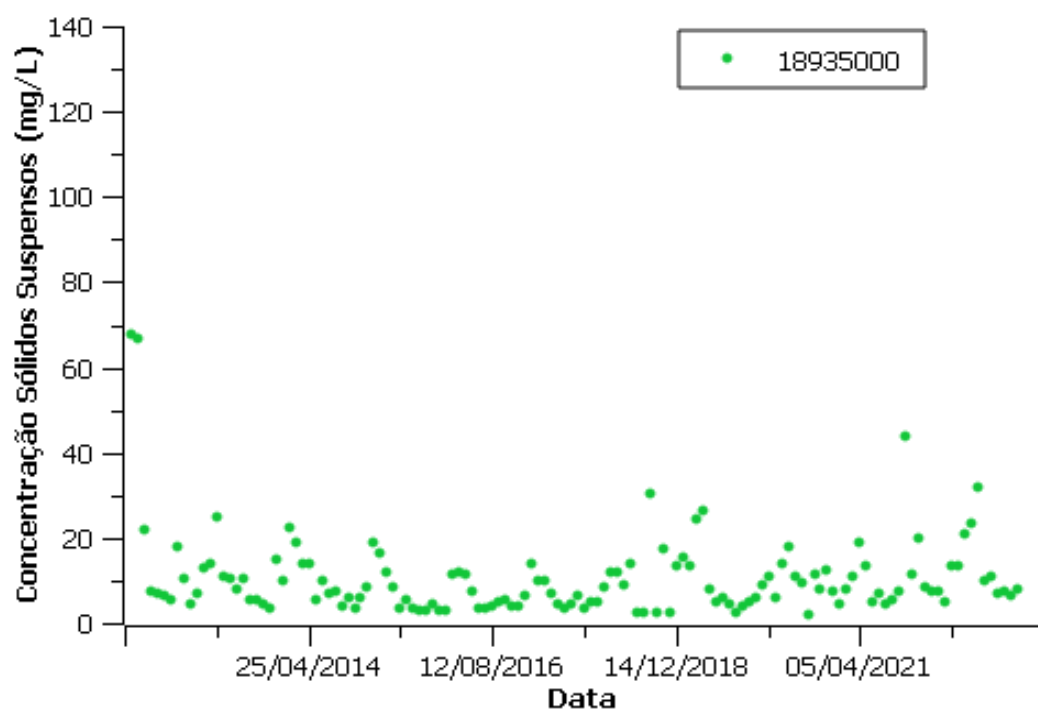


FIGURA 23 – Concentração de sedimentos da estação 18935000.

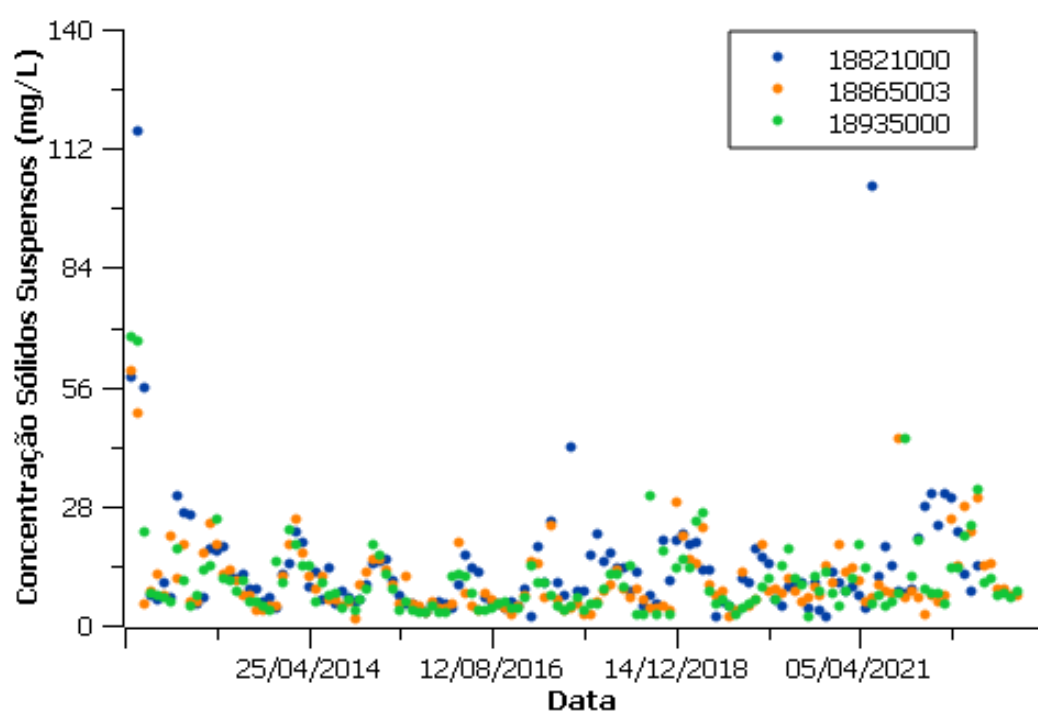


FIGURA 24 – Comparativo da concentração de sedimentos das estações 18821000, 18865003 e 18935000.

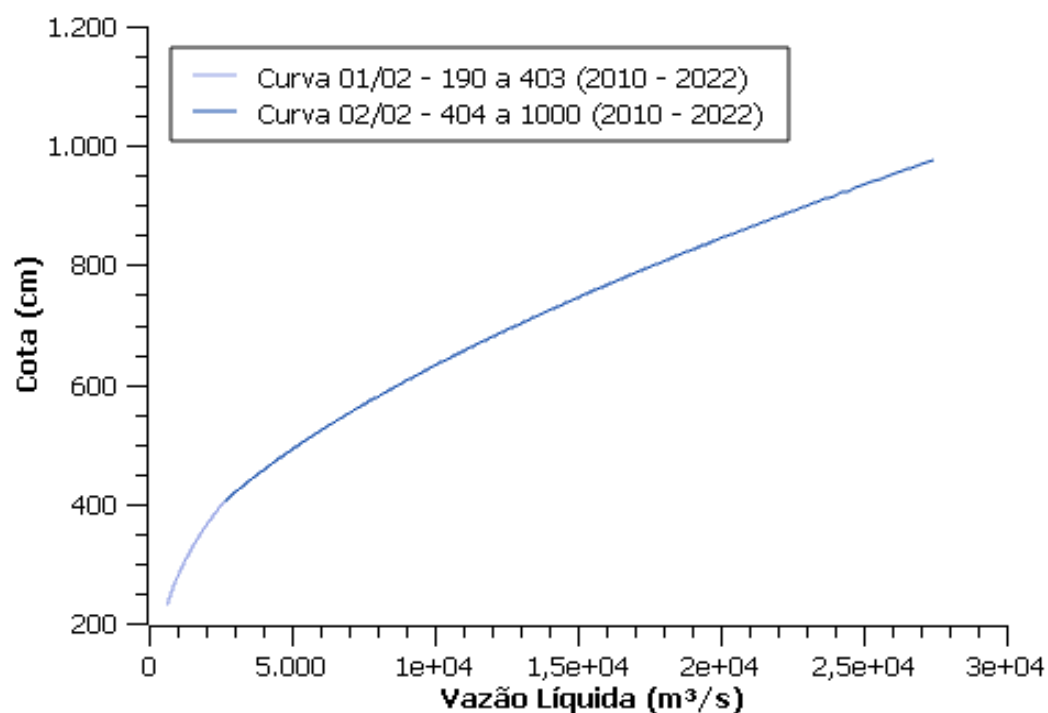


FIGURA 25 – Curva-chave da estação 18821000.

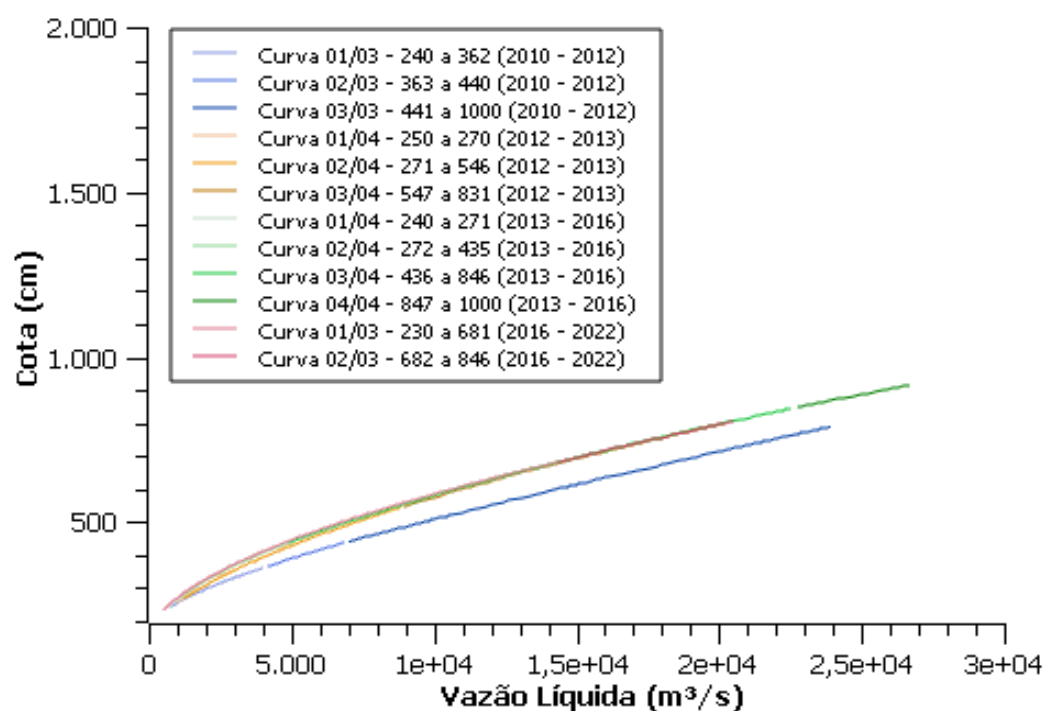


FIGURA 26 – Curva-chave da estação 18865003.

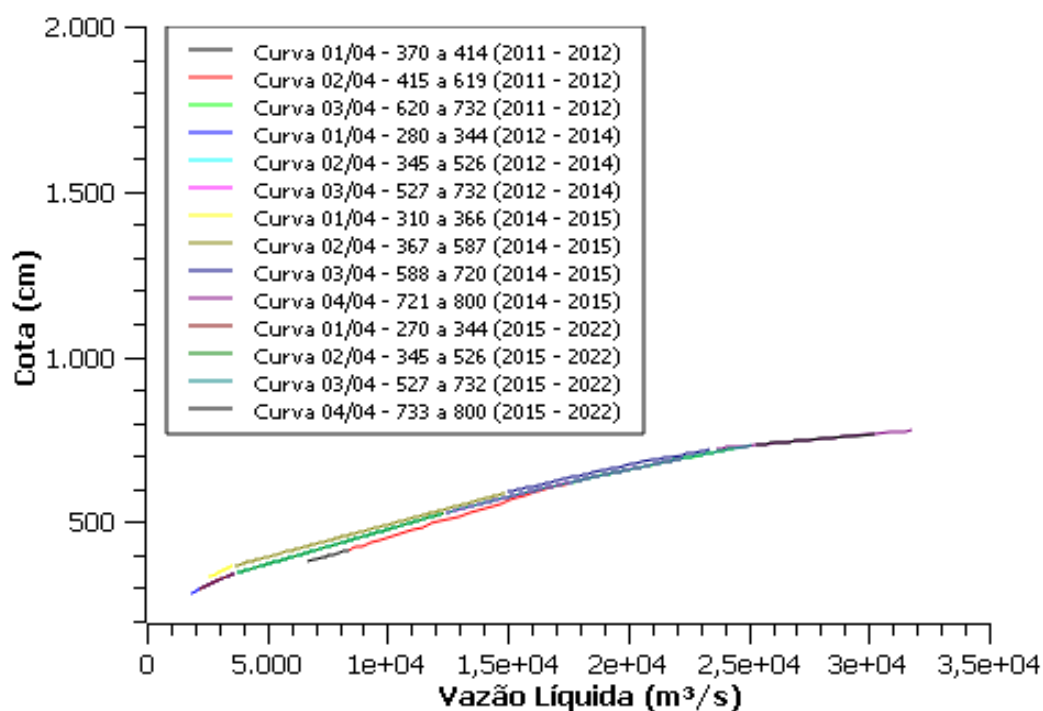


FIGURA 27 – Curva-chave da estação 18935000.

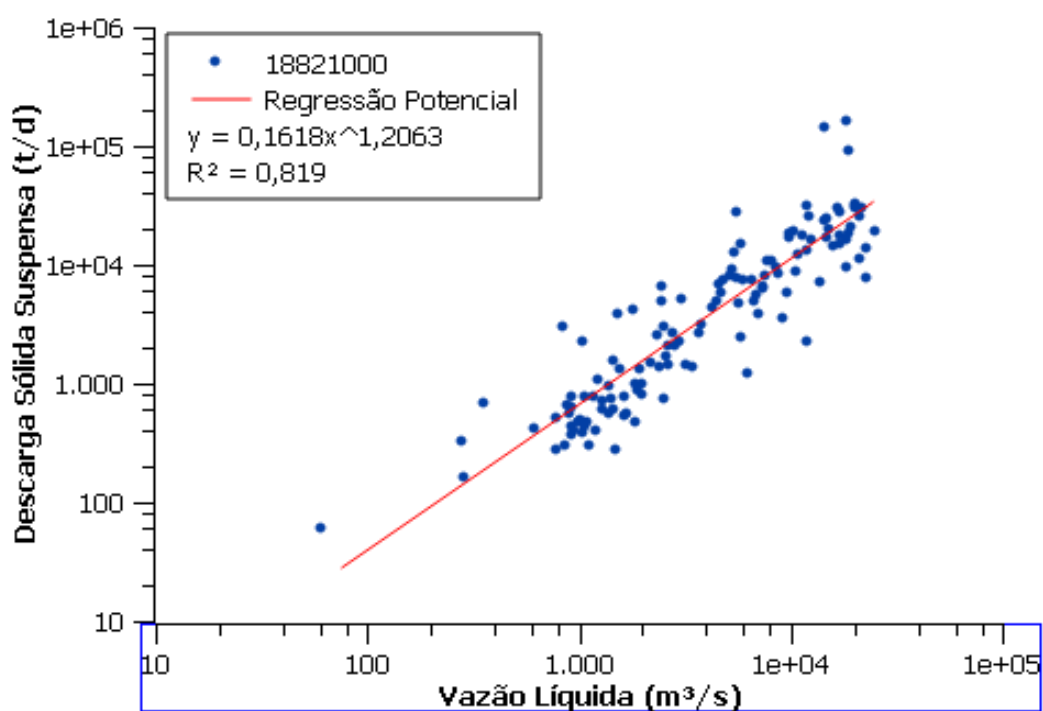


FIGURA 28 – Curva de descarga sólida suspensa da estação 18821000.

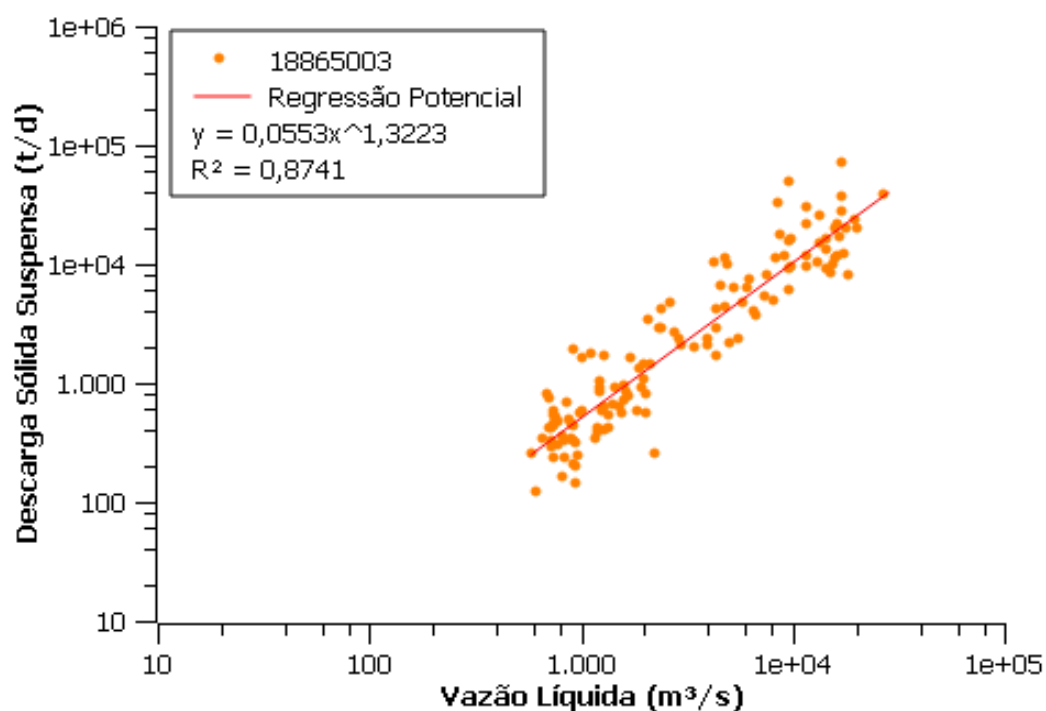


FIGURA 29 – Curva de descarga sólida suspensa da estação 18865003.

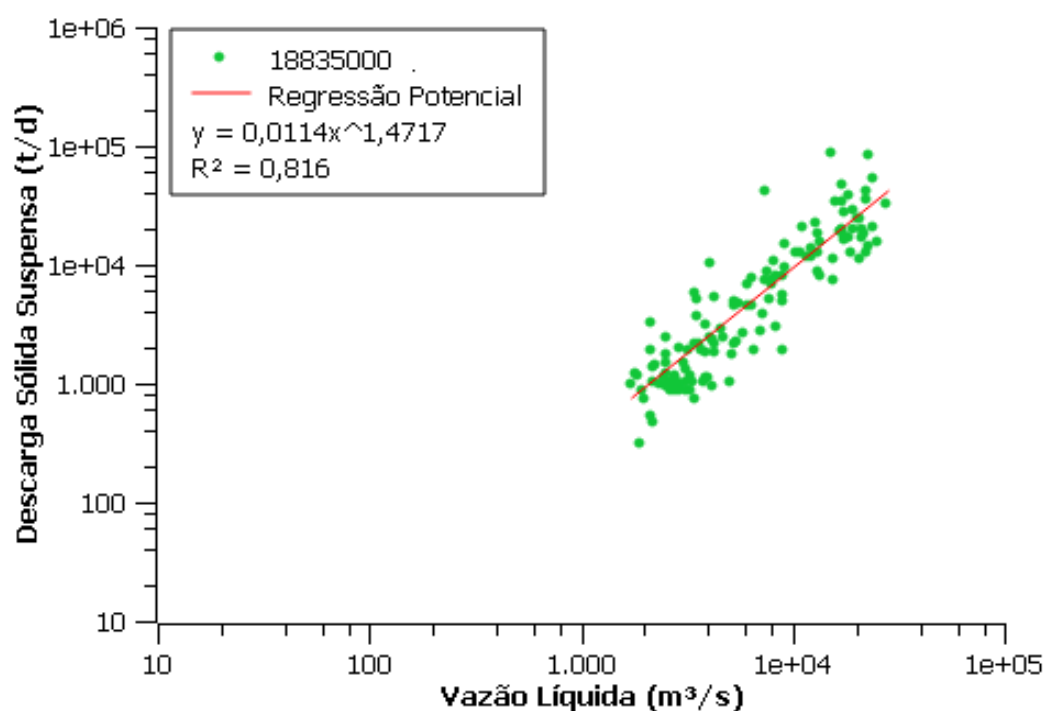


FIGURA 30 – Curva de descarga sólida suspensa da estação 18935000.

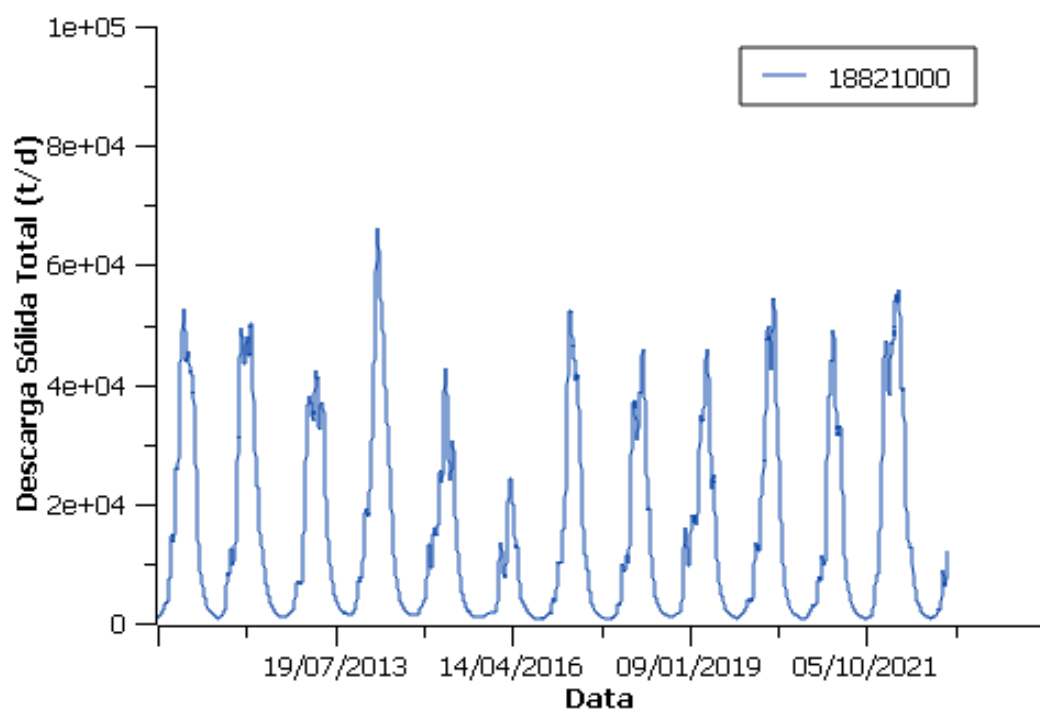


FIGURA 31 – Série histórica de descarga sólida total da estação 18821000.

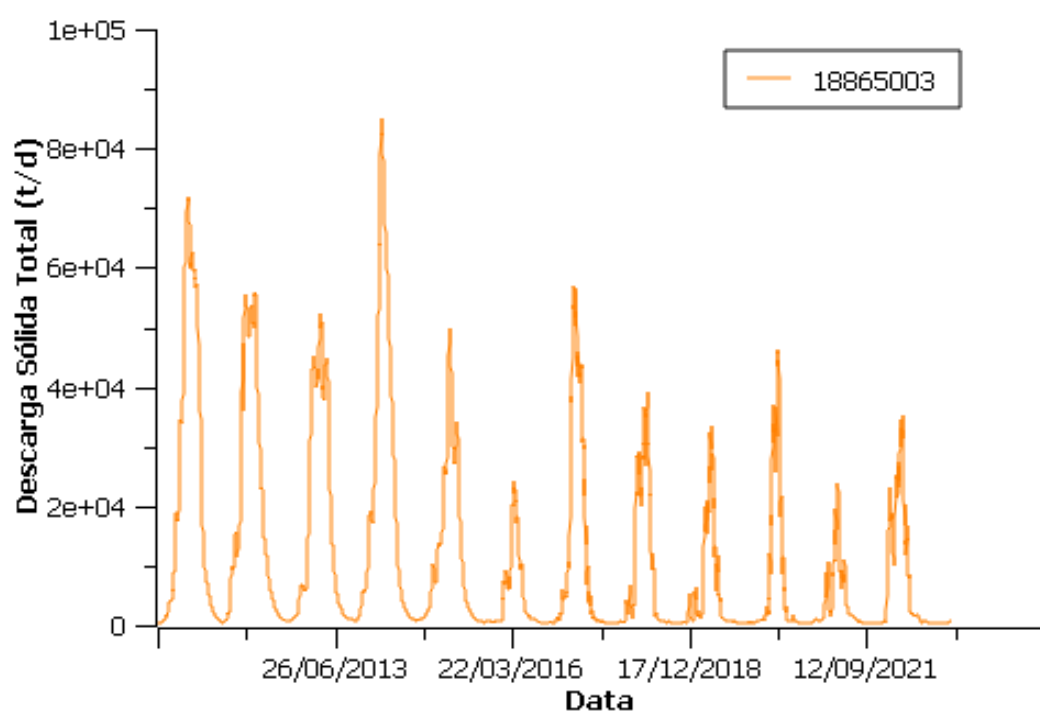


FIGURA 32 – Série histórica de descarga sólida total da estação 18865003.

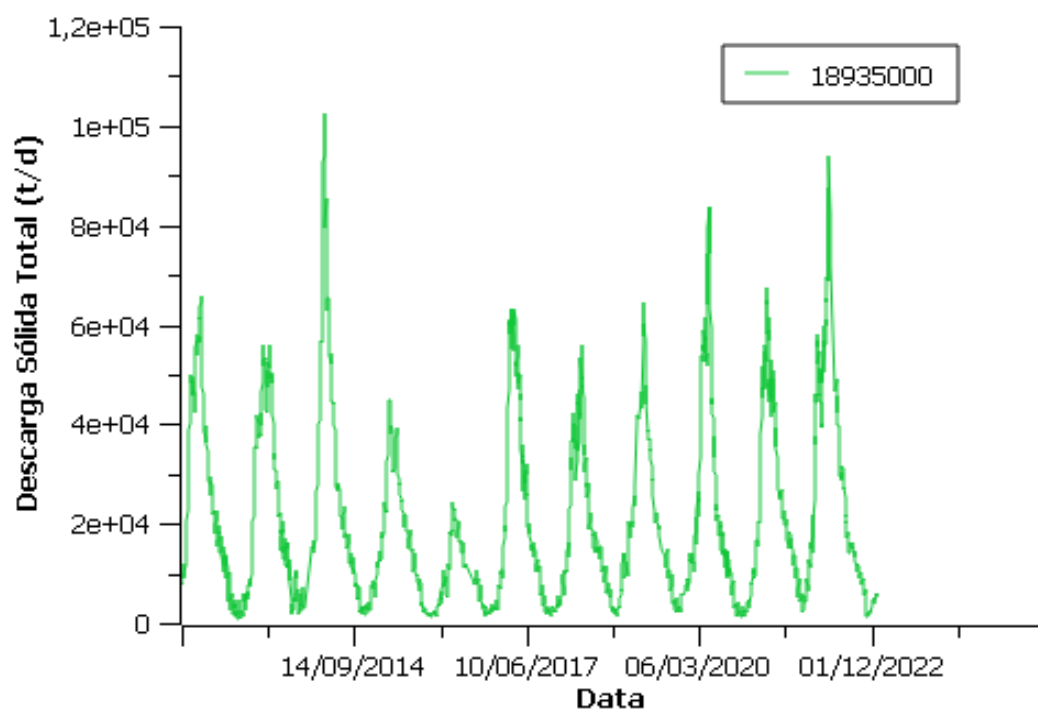


FIGURA 33 – Série histórica de descarga sólida total da estação 18935000.

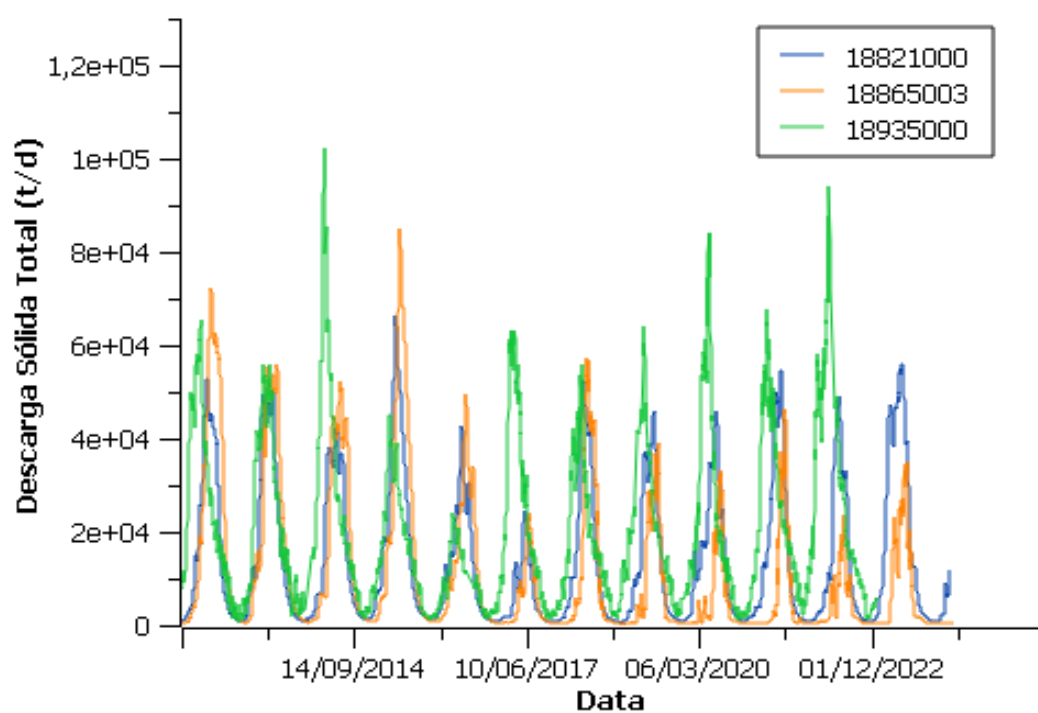


FIGURA 34 – Comparativo das séries históricas de descarga sólida total das estações 18821000, 18865003 e 18935000.

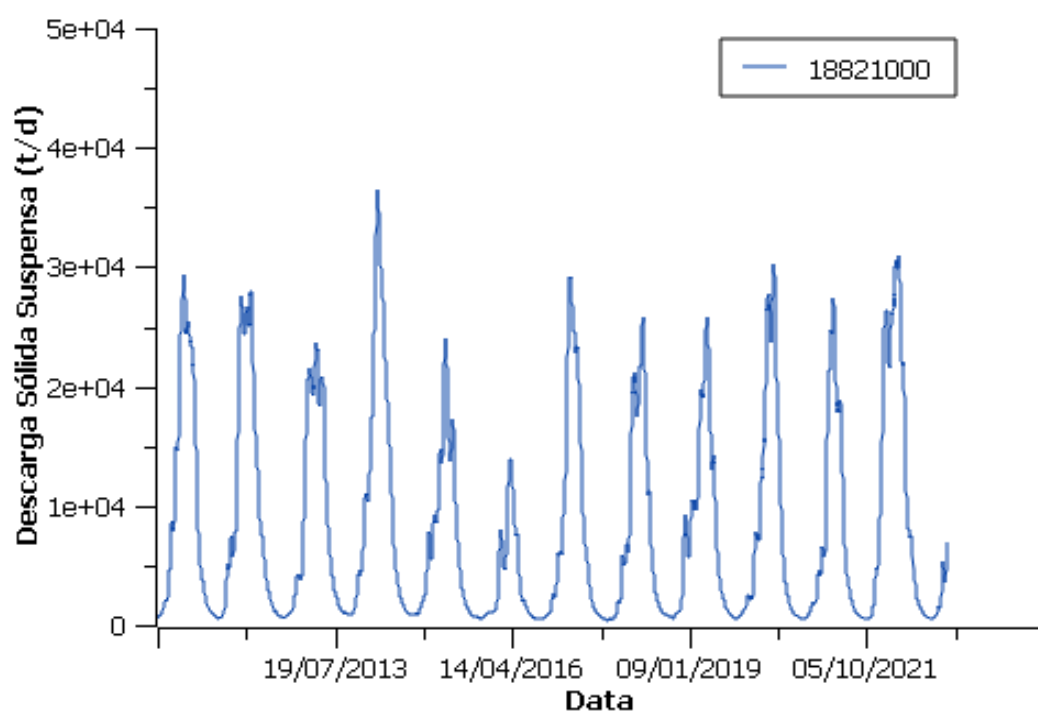


FIGURA 35 – Série histórica de descarga sólida suspensa da estação 18821000.

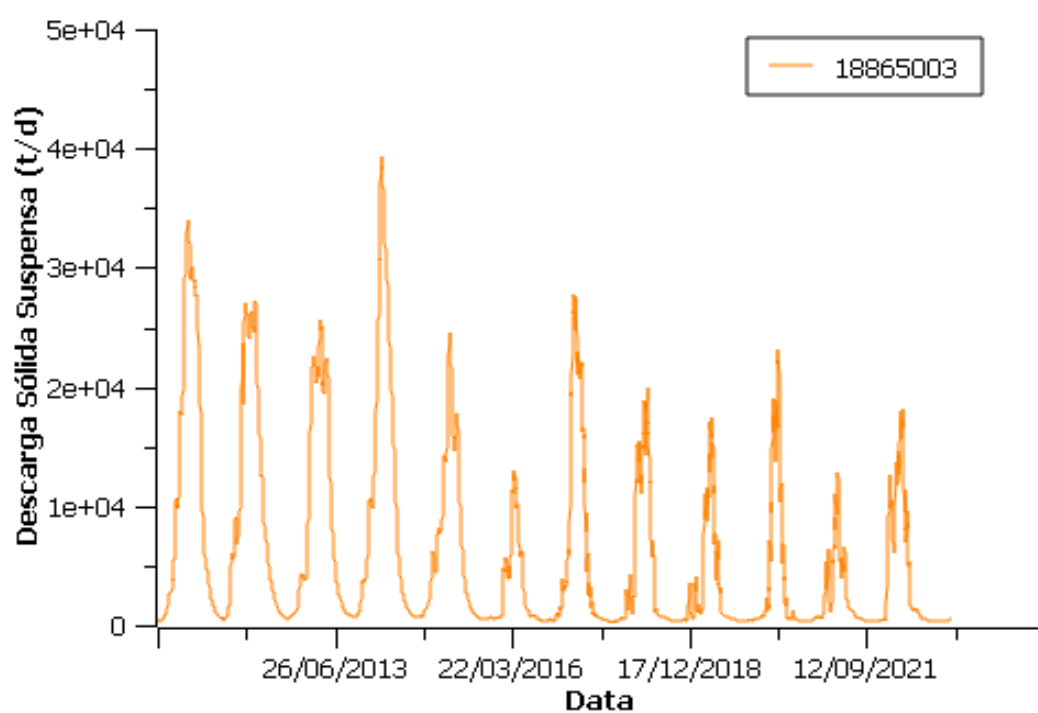


FIGURA 36 – Série histórica de descarga sólida suspensa da estação 18865003.

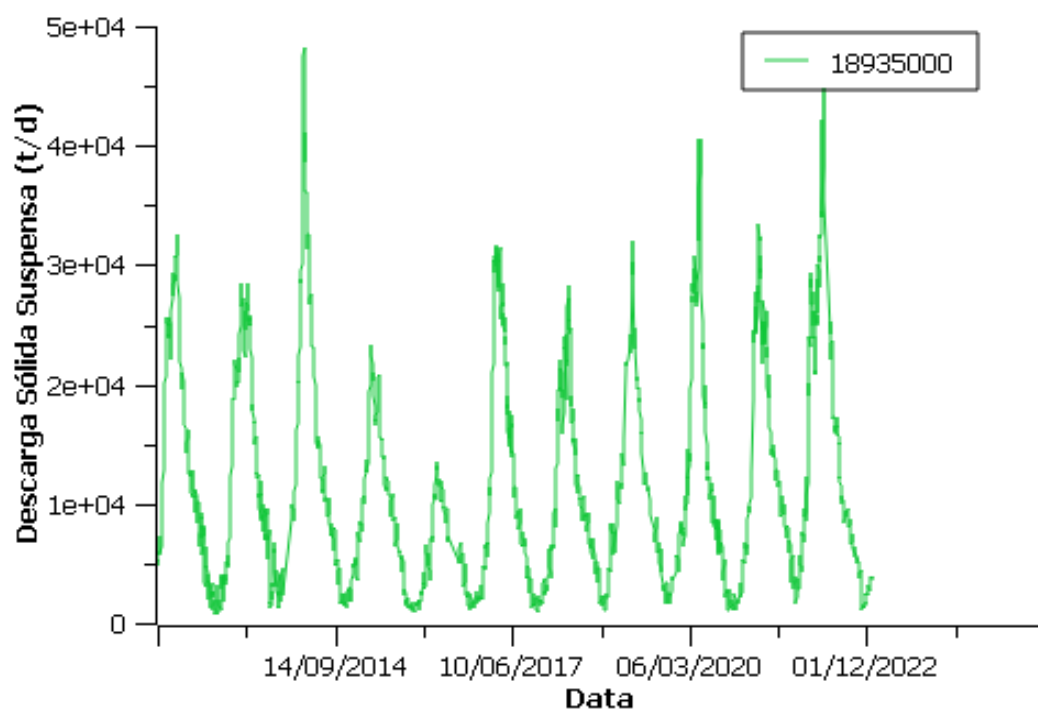


FIGURA 37 – Série histórica de descarga sólida suspensa da estação 18935000.

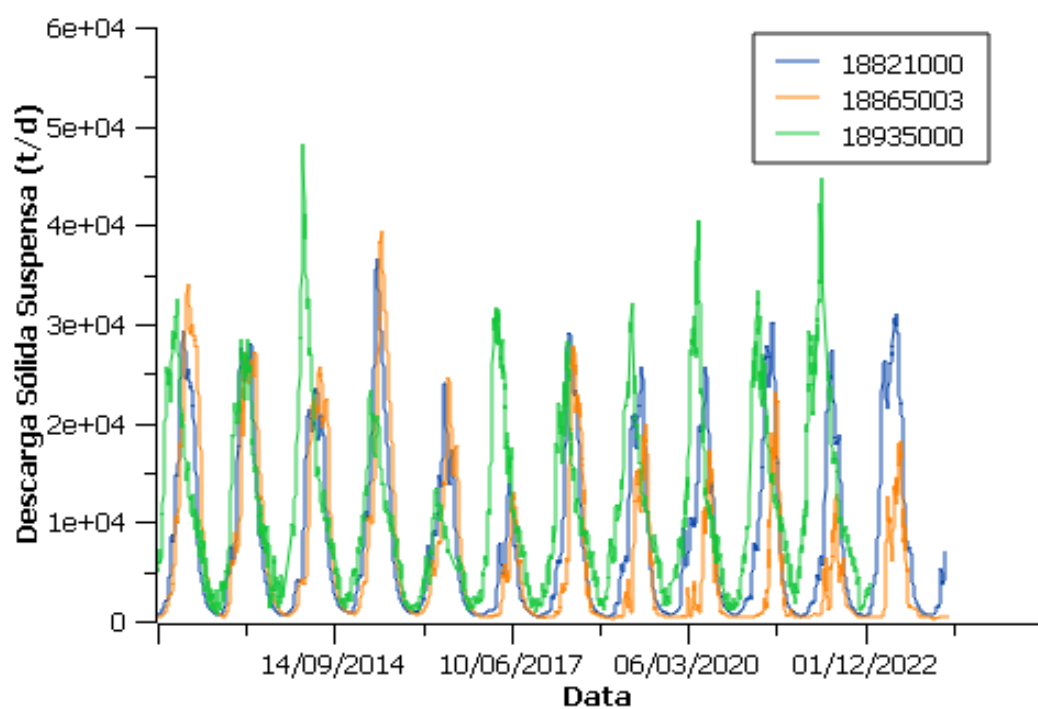


FIGURA 38 – Comparativo das séries históricas de descarga sólida suspensa das estações 18821000, 18865003 e 18935000.

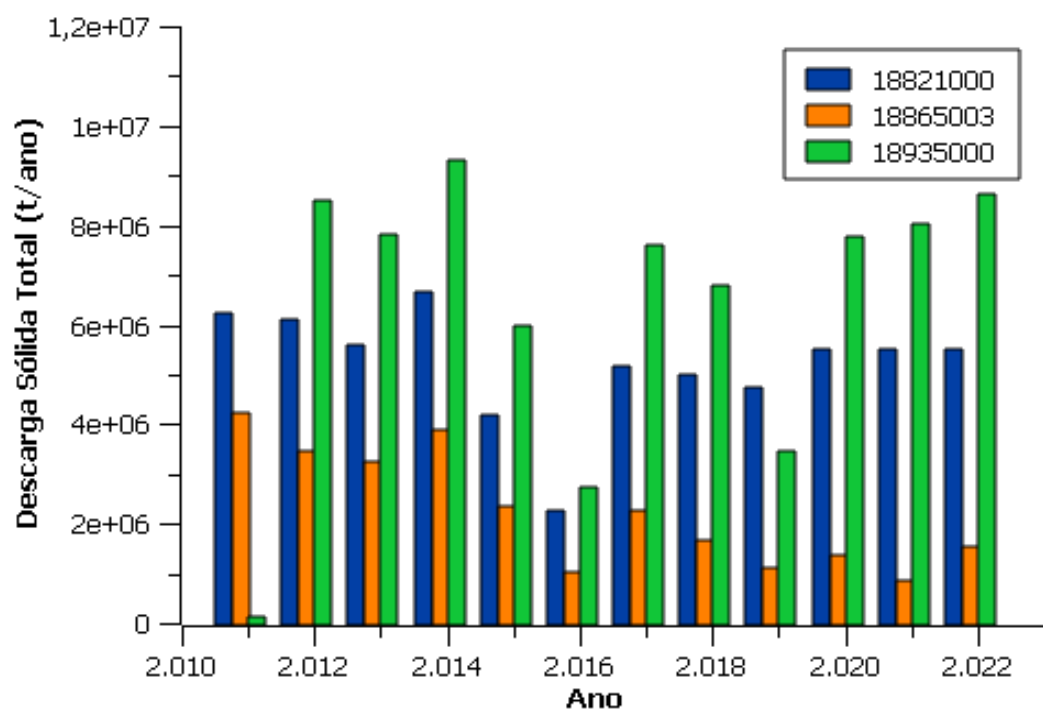


FIGURA 39 – Comparativo dos acumulados de descarga sólida por ano das estações 18821000, 18865003 e 18935000.