UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

AVALIAÇÃO HIDROSSEDIMENTOLÓGICA NO COMPLEXO HIDRELÉTRICO DO RIO MADEIRA

MAURÍCIO MELO LIBÓRIO

ORIENTADOR: LEONARDO ZANDONADI MOURA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL II EM ENGENHARIA AMBIENTAL

BRASÍLIA/DF: JULHO/2025

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

AVALIAÇÃO HIDROSSEDIMENTOLÓGICA NO COMPLEXO HIDRELÉTRICO DO RIO MADEIRA

MAURÍCIO MELO LIBÓRIO

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.

APROVADA POR:

Leonardo Zandonadi Moura (ENC/FT/UNB)
(ORIENTADOR)

Dirceu Silveira Reis Jr (ENC/FT/UNB)
(EXAMINADOR INTERNO)

Marcus Suassuna Santos (SGB)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 28 DE JULHO DE 2025.

FICHA CATALOGRÁFICA

LIBÓRIO, MAURÍCIO MELO
AVALIAÇÃO HIDROSSEDIMENTOLÓGICA NO COMPLEXO HIDRELÉTRICO DO RIO MADEIRA.

ix, 65p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2025)
Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. HIDROSSEDIMENTOLOGIA	2. UHE SANTO ANTÔNIO
3. CURVA-CHAVE ESTÁTICA	4.CURVA-CHAVE DINÂMICA
I. ENC/FT/UnB	II. BACHAREL (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LIBORIO, M.M. (2025). *Avaliação Hidrossedimentológica no Complexo Hidrelétrico do Rio Madeira.* Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 66 p.

CESSÃO DE DIREITOS

MAURÍCIO MELO LIBÓRIO:
TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Avaliação Hidrossedimentológica no Complexo Hidrelétrico do Rio Madeira
GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2025

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

_____

MAURÍCIO MELO LIBÓRIO
liboriomauricio00@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, gostaria de agradecer aos meus pais, Marta e Sérgio, por me apoiarem ao longo desses anos dentro da UnB, e me darem suporte quando mais precisei. Agradeço à Dê, por ser um pilar fundamental em casa e sempre estar presente e minha família como um todo.

Ao professor Leonardo, orientador dedicado, que desde o início se mostrou disposto a esclarecer dúvidas, guiar nos momentos em que conceitos complicados não estavam óbvios e por disponibilizar seu tempo para ajudar na orientação da IC e do Projeto Final..

Ao Guilherme Mesquita, que me convenceu a entrar na área de sedimentos, ainda na época de iniciação científica, e que me acompanhou, também, durante o desenvolvimento do projeto final na mesma temática. Um agradecimento aos colegas que participaram do Grupo do Rio Madeira, Guilherme Moraes e Lucas Vinícius, que também decidiram se aventurar no tema de sedimentos.

Aos meus amigos de semestre, especialmente Carol, Clarissa e Danilo, que me acompanharam desde o primeiro período na UnB. Embora tenhamos passado apuros em Cálculo III, trabalhos em grupo e pandemia juntos, valeu a pena. Desejo todo sucesso a vocês como futuras(os) Engenheiras(os) Ambientais.

E ao pessoal da EPRC, Alan, Ester, Eduardo, e Georgenis, gerência da CAESB em que estagiei por mais de dois anos, e local onde permitiu que eu desenvolvesse projetos, habilidades profissionais e diferentes maneiras de avaliar as situações.

RESUMO

O Rio Madeira é um dos rios que mais transporta sedimentos no mundo, e abriga duas usinas hidrelétricas, UHE Santo Antônio e UHE Jirau, que se distanciam em aproximadamente 115 km. Para compreender a dinâmica de sedimentos na bacia do Rio Madeira após a instalação dessas usinas, para um trecho com início na UHE Jirau até aproximadamente 5 km após UHE Santo Antônio, este estudo teve como objetivo realizar balanços em escalas semanais e mensais para areias e sedimentos totais a partir de três metodologias: escala mensal usando os dados medidos em campo; escala semanal usando curva-chave dinâmica a partir de modelos lineares dinâmicos; e escala semanal por meio de curvas-chave estáticas, avaliando o comportamento dos sedimentos por período hidrológico. Como resultados, em comparação às séries do modelo estático, as séries geradas pelo modelo dinâmico visualmente melhor acompanharam os dados observados dos sedimentos totais e das areias, somente para as estações a montante, enquanto o modelo das areias a jusante da UHE Santo Antônio deve ser ajustado. As incertezas do modelo de acúmulo e perda de sedimentos são maiores durante as cheias, enquanto no período de vazante, de enchente e de secas, os modelos se mostraram menos incertos. Em relação aos modelos estáticos e dinâmicos, os balanços conseguiram acompanhar a dinâmica de acúmulo quando comparada aos dados observados, com destaque para os modelos dinâmicos, que mais se aproximaram aos dados coletados em campo. Os balanços demonstraram acúmulo de sedimentos totais e perda de areias no período analisado, indicando - reforçado pelos dados demonstrados do EIA sobre areias - que uma análise integrada do Complexo Hidrelétrico seja um caminho para análises futuras.

Palavras-chave: Rio Madeira, Hidrossedimentologia, Curva-Chave Estática, Curva-Chave Dinâmica, UHE Santo Antônio

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO..... 1
2. OBJETIVOS..... 3
2.1. OBJETIVO GERAL..... 3
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... 3
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... 4
3.1. BACIA AMAZÔNICA E O RIO MADEIRA..... 4
3.2. EIA/RIMA E A USINA DE SANTO ANTÔNIO..... 6
3.3. DINÂMICA HIDROSSEDIMENTOLÓGICA..... 7
3.4. CLASSIFICAÇÃO DOS SEDIMENTOS..... 8
3.5. CURVAS-CHAVE ESTÁTICAS..... 10
3.6. MODELO DINÂMICO - CURVAS-CHAVE DINÂMICA..... 12
4. METODOLOGIA..... 16
4.1. ÁREA DE ESTUDO..... 16
4.2. DADOS SEDIMENTOLÓGICOS E HIDROLÓGICOS..... 18
4.3. BALANÇOS DE SEDIMENTOS..... 22
4.3.1. REGRESSÃO LINEAR E CURVA-CHAVE ESTÁTICA..... 22
4.3.2. MODELOS DINÂMICOS LINEARES E CURVA-CHAVE DINÂMICA..... 23
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... 25
5.1. BALANÇO COM DADOS OBSERVADOS..... 25
5.2. BALANÇO COM CURVAS-CHAVE ESTÁTICAS..... 29
5.3. BALANÇO CURVAS-CHAVE DINÂMICA..... 35
5.4. COMPARAÇÃO ENTRE OS BALANÇOS..... 44
5.5. COMPARAÇÃO ENTRE AS SÉRIES GERADAS..... 46
5.6. EIA/RIMA E DADOS OBTIDOS..... 51
6. CONCLUSÃO..... 52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Descarga Sólida em Suspensão na Bacia Amazônica. Adaptado do Estudo Sedimentológico do EIA das hidrelétricas, presente no Tomo B, Volume 7.....1

Figura 3.1. Caminho dos rios amazônicos e a proporção de vazões. Fonte: Goulding (2003)..... 4

Figura 3.2. Bacia do Rio Madeira e seus tributários.....5

Figura 3.2. Forças em uma partícula de sedimento. Fonte: Adaptado de Chanson, 2004..... 7

Figura 4.1. Localização das estações de monitoramento. O Rio Madeira corre na direção da UHE Jirau para a UHE de Santo Antônio..... 17

Figura 4.2. Vazão combinada observada (PR4 +JCI) em pontos vermelhos com a linha preta interligando os pontos..... 19

Figura 4.3. Vazão observada em pontos pretos com a linha azul interligando os pontos.....19

Figura 4.4. Descarga Sólida para sedimentos totais (t/dia) em pontos vermelhos com a linha preta interligando os pontos..... 20

Figura 4.5. Descarga sólida de areias (t/dia) em pontos vermelhos com a linha preta interligando os pontos..... 20

Figura 4.6. Descarga sólida de sedimentos totais (t/dia) em pontos pretos com a linha azul interligando os pontos..... 21

Figura 4.7. Descarga sólida de areias (t/dia) em Porto Velho em pontos pretos com a linha azul interligando os pontos..... 21

Figura 4.8. Etapas da Criação do Modelo.....23

Figura 5.1. Balanço estimado para sedimentos totais com dados observados.....26

Figura 5.2. Balanço estimado para as areias com dados observados..... 27

Figura 5.3. Curvas-Chave Estáticas com seus intervalos de previsão em sombreado cinza, seus coeficientes de determinação R^2, e suas equações.....29

Figura 5.4. Comparação entre as descargas de sedimentos totais estimadas via curva-chave e os dados observados. Os círculos abertos são os pontos da série dos dados coletados..... 30

Figura 5.5. Comparação entre as descargas de areia estimadas por meio de curva-chave estática e os dados observados. Em sombreado, está o intervalo de previsão.....31

Figura 5.6. Estimativa de acumulação/perda de sedimentos totais entre JCI/PR4 e PTV..... 32

Figura 5.7. Estimativa de acumulação/perda semanal por período hidrológico..... 33

Figura 5.8. Estimativa de acumulação/perda de areias entre JCI/PR4 e PTV..... 34

Figura 5.9. Gráficos de colunas indicando se está perdendo ou retendo sedimentos em determinado período hidrológico para areias via curva-chave estática.....34

Figura 5.10. Séries temporais dos coeficientes lineares.....36

Figura 5.11. Séries temporais dos coeficientes angulares..... 37

Figura 5.12. Comparação entre sedimentos totais observados mensais e sedimentos

totais gerados via coeficientes das curvas-chave dinâmica para as estações a montante JCI e PR4..... 38
Figura 5.13. Comparação entre sedimentos totais observados mensalmente e sedimentos totais gerados a partir das curvas-chave dinâmica para a estação a jusante de PTV..... 39
Figura 5.14. Descarga de areias estimadas via curva-chave dinâmica e dados observados a montante da UHE Santo Antônio..... 40
Figura 5.15. Descarga de areias estimadas via curva-chave dinâmica e dados observados a jusante da UHE Santo Antônio..... 41
Figura 5.16. Balanço dos sedimentos totais a partir do resultados dos sedimentos via curvas-chave dinâmicas.Figura 5.17. Gráficos de colunas indicando se está perdendo ou retendo sedimentos em determinado período hidrológico para sedimentos totais no balanço via curva-chave dinâmica..... 42
Figura 5.18. Balanço das areias a partir do resultados dos sedimentos via curvas-chave dinâmicas..... 43
Figura 5.19. Comparação entre todos os balanços produzidos para sedimentos totais... 44
Figura 5.20. Comparação entre os balanços dos dados observados e a curva-chave dinâmica..... 45
Figura 5.21. Comparação entre o balanço cumulativo dos dados observados e das curva-chave estáticas..... 46
Figura 5.22. Comparação entre as séries geradas pelos modelos e série de descarga observada para sedimentos totais a montante..... 47
Figura 5.23. Comparação entre as séries geradas pelos modelos e série de descarga observada para sedimentos totais a jusante..... 48
Figura 5.24. Comparação entre as séries geradas pelos modelos e série de descarga observada para areias a montante..... 49
Figura 5.25. Comparação entre as séries geradas pelos modelos e série de descarga observada para areias a jusante..... 50

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Capacidade de Retenção de Areias com a Implementação das duas Barragens (Jirau + Santo Antônio) para diferentes condições em um período de 50 anos de simulação. Fonte: Adaptado de Furnas et al (2005c)..... 6

Tabela 3.2. Classificação dos sedimentos de acordo com diâmetro. Fonte: Adaptado de (Baptista e Lara, 2014).....8

Tabela 3.3. Classificação pela Escala Ψ Adaptada do Manual do HEC-RAS (2025).....9

Tabela 4.1. Tabela Resumo das Estações de Monitoramento..... 18

Tabela 4.2. Parâmetros Iniciais Inseridos na Função Verossimilhança.....24

Tabela 5.1. Número de Falhas no balanço acumulativo de sedimentos totais entre 2014 e 2019..... 26

Tabela 5.2. Número de Falhas no balanço acumulativo de areias entre 2014 e 2019... 28

Tabela 5.3. Hiperparâmetros estimados pela função log-verossimilhança..... 35

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 3.1: **8**
Equação 3.2 ..... **10**
Equação 3.3 ..... **10**
Equação 3.4 ..... **11**
Equação 3.5 ..... **11**
Equação 3.6 ..... **12**
Equação 3.7 ..... **13**
Equação 3.8 ..... **13**
Equação 3.9: **13**
Equação 3.10 ..... **14**
Equação 3.11 ..... **14**
Equação 3.12 ..... **14**
Equação 3.13 ..... **14**
Equação 3.14 ..... **14**
Equação 3.15 ..... **14**
Equação 3.16 ..... **14**
Equação 3.17 ..... **14**
Equação 3.18 ..... **14**
Equação 3.19 ..... **15**
Equação 3.20 ..... **15**
Equação 3.21 ..... **15**

LISTA DE ABREVIAÇÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

CC - Curva-Chave

CHM - Complexo Hidrelétrico do Rio Madeira

EIA - Estudo de Impacto Ambiental

FK - Filtro de Kalman

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais

JCI - Jusante Caldeirão do Inferno

MDL - Modelos Dinâmicos Lineares

PR4 - Porto R4

PTV - Porto Velho

RIMA - Relatório de Impacto Ambiental

UHE - Usina Hidrelétrica

1. INTRODUÇÃO

O Rio Madeira é um dos principais tributários do Rio Amazonas e abriga as usinas hidrelétricas de Jirau e Santo Antônio. A implantação dessas usinas tem motivado o desenvolvimento de diversos estudos para compreender o comportamento dos sedimentos neste rio, como pode ser visto em Espinoza Villar *et al*. (2013), Ayes Rivera *et al* (2019), Moura *et al* (2023).

Para ilustrar a questão sedimentológica nesta bacia, a figura 1.1 apresenta um simplificado panorama do transporte de sedimentos na bacia amazônica e a posição de destaque do Madeira neste sistema (Furnas *et al*, 2005a).

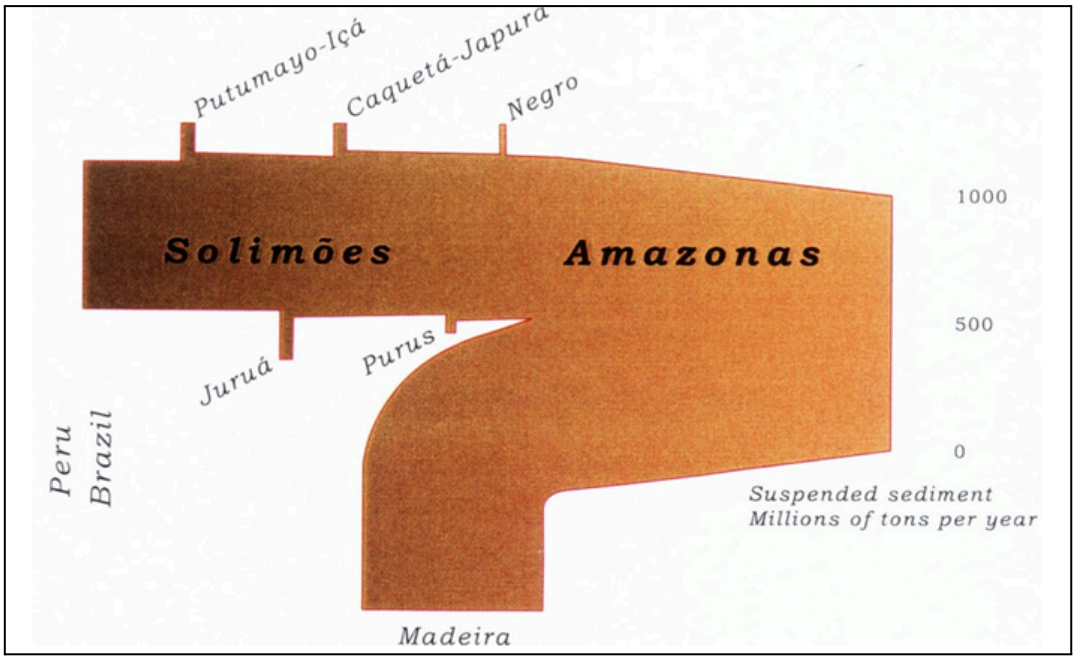


Figura 1.1. Descarga Sólida em Suspensão na Bacia Amazônica. Adaptado do Estudo Sedimentológico do EIA das hidrelétricas, presente no Tomo B, Volume 7.

Pela figura 1.1, destaca-se o Rio Madeira como principal tributário do Rio Amazonas no quesito sedimentos, apresentando aproximadamente uma carga de sedimentos de 5 x 10^8 ton/ano, praticamente metade da carga de toda bacia amazônica, embora a área do Madeira represente aproximadamente cerca de 25% de toda a bacia (Espinoza Villar *et al*., 2013).

O transporte de sedimentos é caracterizado por diversos fatores, como é o caso da geomorfologia, geologia e o clima da bacia. Há outros fatores que podem alterar o transporte de sedimentos em diferentes intensidades, como eventos climáticos extremos (secas e cheias) e alterações antropogênicas.

No caso do Rio Madeira, é possível pontuar três eventos de relevante interesse: o primeiro é a construção das usinas hidrelétricas de Jirau e Santo Antônio. Estudos realizados mostram possível relação entre a alteração da concentração de sedimentos em suspensão (Ayes Rivera et al., 2019) e a instalação das usinas, assim como alteração na distribuição granulométrica do leito do trecho do Rio Madeira (Moura *et al*., 2024). Diante disso, o impacto dessas usinas no ecossistema da região ainda é um tema que necessita de pesquisas para ser melhor compreendido.

Os outros dois eventos de relevante interesse para a questão dos sedimentos, que ocorreram nos últimos anos, foram a cheia histórica de 2014 e a seca histórica de 2024, cujos impactos ambientais ainda são desconhecidos. Eventos extremos como esses podem alterar a curto ou longo-prazo o transporte de sedimentos em uma bacia hidrográfica, como foi verificado em estudo recente realizado sobre o sistema de abastecimento de água de Nova Iorque, na Cordilheira de Catskill nos Estados Unidos (Ahn *et al*, 2017).

Um importante método amplamente usado para estimar sedimentos em um sistema são as curvas-chave de sedimentos. Elas relacionam as medidas observadas de concentração de sedimentos com as medições da vazão do rio, que podem ser, ao serem transformadas para escala logarítmica a partir de uma lei de potência, usadas para obter uma regressão linear, estimar a carga de sedimentos e fazer um balanço de sedimentos do sistema.

As curvas-chave podem ser divididas em estáticas ou dinâmicas, sendo que as primeiras consideram que os coeficientes da regressão são constantes e o sistema, representado por esses coeficientes, se mantém inalterado ao longo do tempo, enquanto as segundas os coeficientes variam, buscando representar alterações diversas na bacia no tempo por meio desses coeficientes, gerando estimativas mais representativas do comportamento do sistema.. Isso resulta em metodologias com modelos lineares dinâmicos, atualização Bayesiana recursiva e outros processos estatísticos (*Ahn et* al, 2017).

Diante disso, no escopo deste estudo do Rio Madeira e na modelagem de transporte de sedimento é relevante compilar dados de monitoramento, para procurar estimar o balanço de sedimentos com diferentes classes granulométricas, nos trechos a montante das usinas de Jirau e Santo Antônio. Além disso, a escala temporal e espacial do monitoramento *in situ* pode ser insuficiente para descrever a dinâmica do sistema, que sofre com diferentes modificações ao longo do tempo. Como alternativa a esse problema, o uso de curvas-chave estática ou dinâmica produzirá informação de entrada e calibração de

modelos, que permitirão a realização de prognósticos e auxiliar no entendimento da mudança do ecossistema em virtude da instalação das usinas hidrelétricas.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar os efeitos do Complexo Hidrelétrico do Rio Madeira no transporte de sedimentos no trecho sob influência das usinas hidrelétricas, com foco no trecho a montante e imediatamente a jusante da Usina Hidrelétrica de Santo Antônio.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar resultados do ajuste de curvas-chave estática e dinâmica aos dados de descarga de sedimentos disponíveis no complexo hidrelétrico, avaliando sua variabilidade temporal;
- Estimar um balanço de sedimentos usando as curvas-chave estática e dinâmica para as areias e para os sedimentos totais;
- Comparar os impactos sedimentológicos esperados segundo o EIA/RIMA do empreendimento com o estimado por diferentes metodologias.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. BACIA AMAZÔNICA E O RIO MADEIRA

A bacia Amazônica possui uma área de aproximadamente 6.100.000 km^2, está presente em diversos países da América do Sul (Bolívia, Peru, Colômbia, etc) e possui a maior e mais complexa rede de rios do mundo, que pode ser visualizada na Figura 3.1 (Latrubesse *et al*., 2017).

Na parte brasileira da bacia, três hidrelétricas de grande porte (>1000 MW) na região merecem destaque, uma vez que as construções e operações são sempre muito questionadas do ponto de vista ambiental, que são: as UHEs de Belo Monte (Rio Xingu), Jirau (Rio Madeira) e Santo Antônio (Rio Madeira).

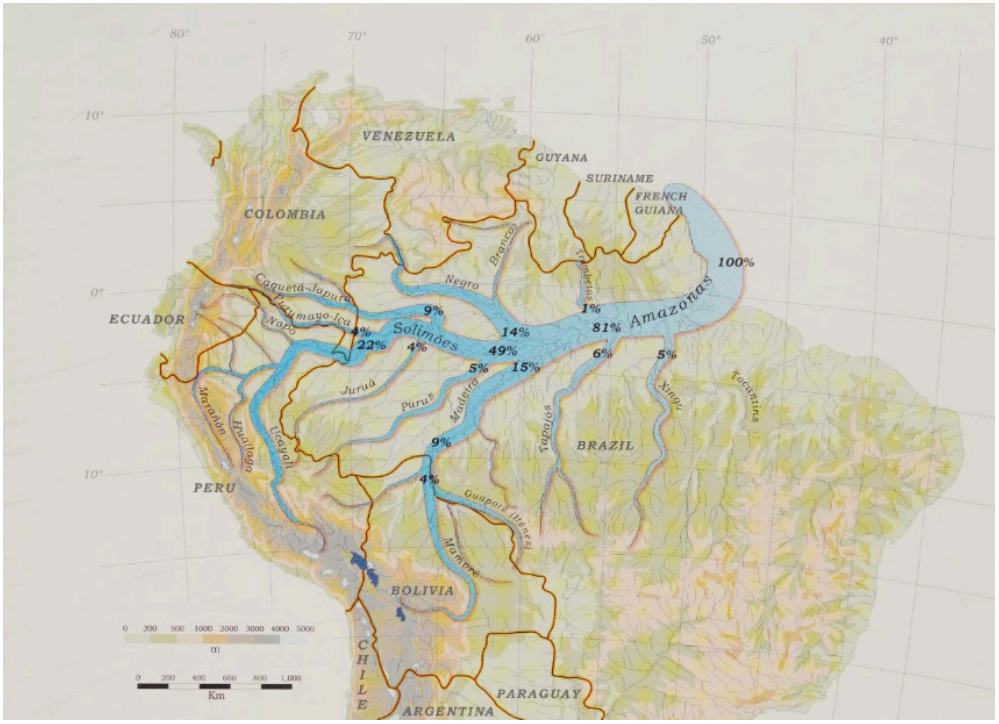


Figura 3.1. Caminho dos rios amazônicos e a proporção de vazões. Fonte: Goulding (2003).

O Madeira foi escolhido para abrigar um Complexo Hidrelétrico de grande importância para a geração de energia elétrica brasileira. Todavia, o Rio Madeira é um dos rios que mais transporta sedimentos no mundo, o que elevou a preocupação a respeito desta temática à época dos estudos de implantação. Na simulação matemática do EIA-RIMA, avaliou-se que apenas 12% dos sedimentos ficariam retidos nos reservatórios, sendo compostos majoritariamente pela parcela grosseira, como areias (Furnas *et al*, 2005b).

No entanto, estudos têm apontado uma retenção distinta da prevista pelo estudo no EIA-RIMA, além de demonstrar alterações no leito do Madeira que não se via antes da implantação e operação das usinas (Latrubesse *et al*., 2017; Moura *et al*., 2024), o que torna a análise do balanço de sedimentos um objeto de estudo relevante.

O Rio Madeira tem uma vazão média anual de 32.000 m^3/s na confluência com o Rio Amazonas, uma área de drenagem de aproximadamente de 1,4 x 10^6 km^2 e possui quatro importantes tributários, o Rio Beni, Mamoré, Guaporé e o Madre de Díos, como pode ser visto na Figura 3.2 abaixo.

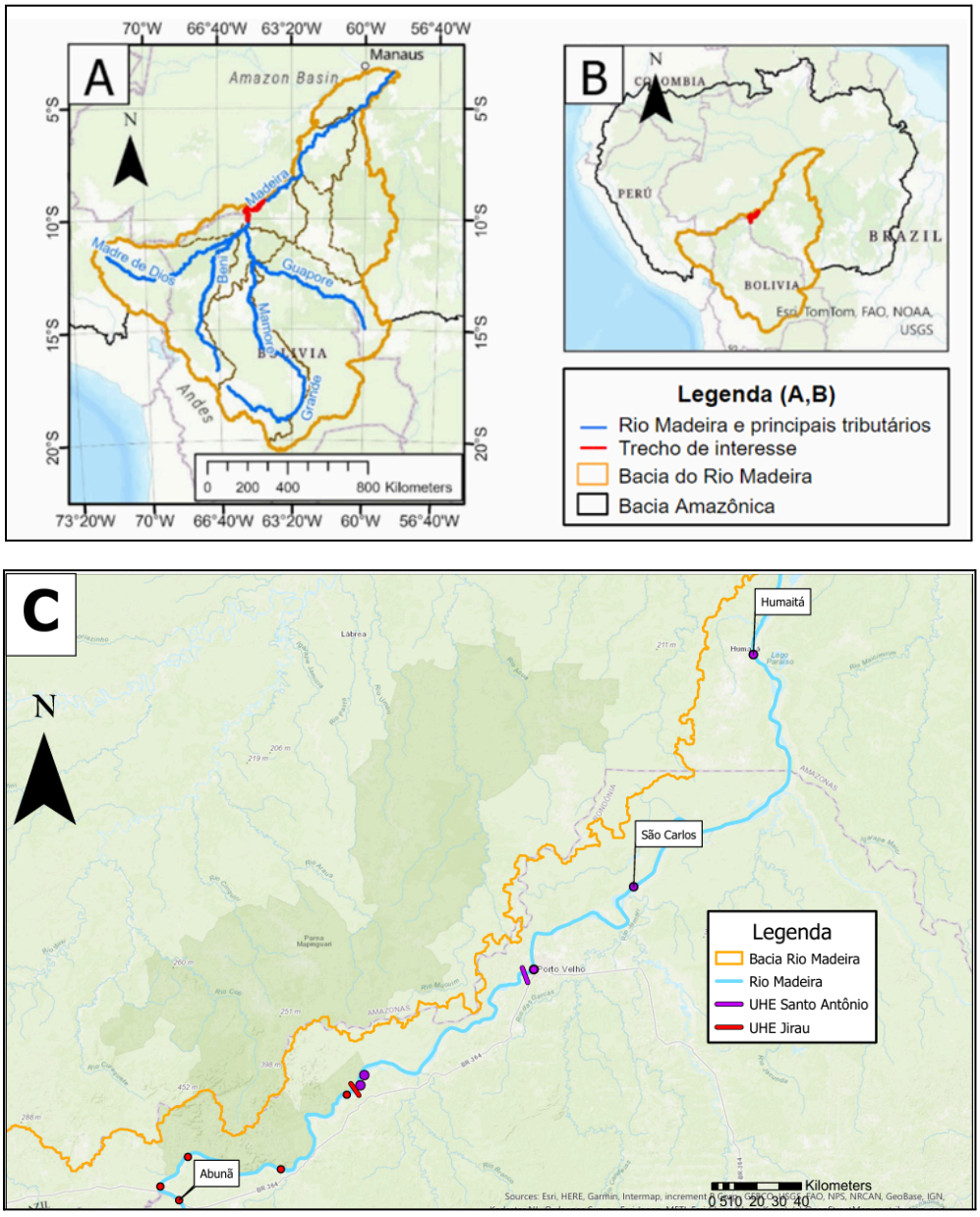


Figura 3.2. Bacia do Rio Madeira e seus tributários.

Desses tributários mencionados, os que merecem maior destaque em questões sedimentológicas são o Beni e o Mamoré, sendo o principal em termos de contribuição de sedimentos o rio Beni.

Embora esses dois rios tenham origem na Cordilheira dos Andes, a declividade do Rio Mamoré, saindo do Piemonte Amazônico e entrando na planície Amazônica, diminui ao ponto de não haver energia suficiente no canal para o transporte de sedimentos, influenciando a sedimentação no Piemonte Amazônico. (Ayes Rivera *et al*., 2019)

A jusante da confluência desses dois tributários, o aporte de sedimentos pelos tributários que drenam as sub-bacias é baixo em virtude das características topográficas, geológicas e hidroclimáticas da região. (Espinoza Villar *et al*., 2013)

3.2. EIA/RIMA E A USINA DE SANTO ANTÔNIO

A usina hidrelétrica de Santo Antônio teve suas obras iniciadas em setembro do ano de 2008, e após quatro anos de construção, em 2012, deu início a operação de poucas turbinas. Em 2014, 32 turbinas já estavam em operação, e em 2016 a UHE Santo Antônio já estava em plena operação com 50 turbinas em funcionamento. (Santo Antônio Energia, 2025).

O anexo 1, Volume 7 do Tomo B do EIA das usinas é sobre o Estudo Sedimentológico. Neste anexo, é feito um balanço sedimentológico com auxílio do software HEC-6, um balanço estimado em que o resultado é dado em capacidade de retenção de sedimentos, somente para as areias, que pode ser visto na tabela 3.1. Vale ressaltar que as areias, na época do estudo, correspondiam a 12% dos sedimentos transportados pelo rio Madeira, o que significa que praticamente a totalidade das areias (>90 %) eram esperadas de ficar retidas nos trechos considerados no estudo.

Tabela 3.1. Capacidade de Retenção de Areias com a Implementação das duas Barragens (Jirau + Santo Antônio) para diferentes condições em um período de 50 anos de simulação. Fonte: Adaptado de Furnas *et al* (2005c).

Trechos	**Condição 1: R = 0%**	**Condição 2: R = 2%**
I,II,III e IV	**93%**	**97%**

O trecho I inicia a montante de Abunã e vai até 80 km após localização da UHE Santo Antônio - Estação de monitoramento de São Carlos (Figura 3.2) - totalizando, os quatro trechos, cerca de 450 km de extensão. A condição 1 é aquela em que foi suposta a estabilidade da produção de sedimentos do período analisado no EIA/RIMA, enquanto a

condição 2 pressupõe uma situação crítica com crescimento de 2% da produção de sedimentos ao ano na bacia.

3.3. DINÂMICA HIDROSSEDIMENTOLÓGICA

O estudo do ciclo hidrossedimentológico é complexo por agregar diversas áreas do conhecimento como a geologia, hidráulica, hidrologia e outras. Dentro desse tema, é preciso esclarecer dois fenômenos fundamentais, associados a praticamente ao início da geração dos sedimentos, que são a desagregação e a erosão.

O primeiro conceito está associado ao desprendimento da partícula sólida do meio que ela faz parte, seja por alterações na bacia hidrográfica ou no leito do rio. Já a erosão ocorre quando as forças hidrodinâmicas, exercidas pelo escoamento sobre essas partículas desagregadas, superam as forças inerciais que mantêm os sedimentos estáveis. A Figura 3.2 fornece uma representação esquemática das forças que o fluido exerce sobre uma partícula. (Baptista e Lara, 2014)

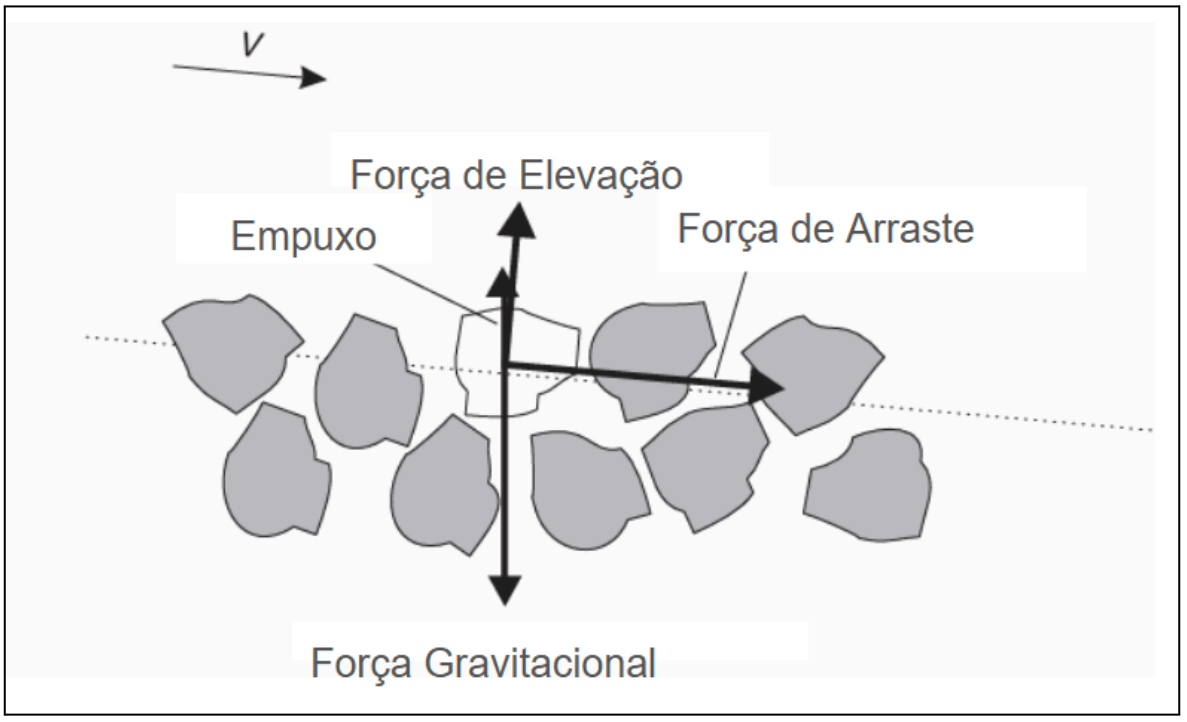


Figura 3.2. Forças em uma partícula de sedimento. Fonte: Adaptado de Chanson, 2004.

O empuxo e a força gravitacional atuam verticalmente, enquanto as forças de arraste e de elevação são exercidas, respectivamente, paralela e perpendicular à direção do escoamento, que no caso da figura 3.2 ocorre da esquerda para a direita. Essas forças são todas calculadas a partir dos parâmetros tensão de cisalhamento/arraste (**τ**), a densidade do

fluido (ρ), a densidade dos sedimentos (ρ_s), a viscosidade do fluido (μ), a gravidade (g) e o diâmetro da partícula (d_s), que estão relacionadas ao transporte de material nos rios.

3.4. CLASSIFICAÇÃO DOS SEDIMENTOS

A principal característica dos sedimentos é o seu diâmetro (Chanson, 2004) e, por meio dele, é possível classificar os grãos de diferentes formas, a depender da necessidade da análise a ser feita. Na tabela 3.2 é apresentada uma maneira - que foi adaptado dos autores Baptista, Lara (2014) e Chanson (2004) - de classificar os sedimentos a partir do tamanho do diâmetro.

Tabela 3.2. Classificação dos sedimentos de acordo com diâmetro. Fonte: Adaptado de (Baptista e Lara, 2014)

Classificação	**Faixa de diâmetro (mm)**
Argila	D < 0,002 mm
Silte	0,002 < D < 0,060 mm
Areia	0,060 < D < 2 mm
Cascalho	2 mm < D < 64 mm [1]
Seixos	64 mm < D < 256 mm [2]
Pedras e Matacões	D > 256 mm [3]

[1,2,3] Chanson, 2004.

A depender do objeto de estudo, seja utilizando softwares ou modelos, é necessário destrinchar em mais classes do que essas apresentadas na tabela acima, especialmente para as classes de areia. Um modo de separar em mais classes é apresentado na Tabela 3.3 pelos autores Parker e Andrews (1985). Essa maneira de classificação é chamada de escala Ψ (psi), em que o limites das classes granulométricas são definidas com base na equação 3.1 e pode ser encontrada no manual HEC-RAS (2025)

$$D = 2^{\Psi}$$ Equação 3.1:

Em que:

D = o limite da classe granulométrica [L] ou (mm);

Ψ = um número inteiro que varia de -8 até 11.

Tabela 3.3. Classificação pela Escala Ψ Adaptada do Manual do HEC-RAS (2025).

Classe dos Grãos	Sigla/Nome	Intervalo (mm)	Intervalo (μm)
Argila	Argila	0,002 a 0,004	2 a 4
Silte Muito Fino	VFM	0,004 a 0,008	4 a 8
Silte Fino	FM	0,008 a 0,016	8 a 16
Silte Médio	MM	0,016 a 0,032	16 a 32
Silte Grosso	CM	0,032 a 0,0625	32 a 62,5
Areia Muito Fina	VFS	0,0625 a 0,125	62,5 a 125
Areia Fina	FS	0,125 a 0,25	125 a 250
Areia Média	MS	0,25 a 0,5	250 a 500
Areia Grossa	CS	0,5 a 1	500 a 1000
Areia Muito Grossa	VCS	1 a 2	1000 a 2000

Por simplicidade, não foram apresentadas as demais classes relacionadas ao seixos, pedras e matacões, mas elas podem ser encontradas no manual do HEC-RAS (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2025). Muitas vezes em modelos de transporte ou em fichas de medições de empresas que operam barragens, essa classificação é bastante comum de ser encontrada por apresentar um panorama mais completo dos sedimentos que estão sendo medidos.

No que concerne aos modelos de transporte, recentes estudos desenvolvidos, que buscam avaliar a quantidade de sedimentos transportados por diferentes fórmulas de transporte, mostraram que em leitos de rios com predominância areias muito finas e finas (VFS e FS) produzem transportes de sedimentos distintos daqueles leitos compostos principalmente por areias mais grossas, reforçando a importância de analisar, neste caso, os sedimentos a partir de uma classificação mais subdividida (Ma *et al*., 2020; Moura *et al*., 2024)

Acrescenta-se a classificação de sedimentos a distinção entre materiais coesivos, compostos pelas argilas e siltes, e materiais não coesivos, que incluem as areias e os cascalhos.

3.5. CURVAS-CHAVE ESTÁTICAS

Uma metodologia frequentemente utilizada para a estimativa da descarga de sedimentos em suspensão são as curvas-chave estáticas, cuja produção é feita a partir de dados monitorados, a saber, a vazão do rio e a concentração de sedimentos em suspensão. Pelo produto da vazão e da concentração medidas, obtém-se a estimativa da carga (ou descarga) de sedimentos e, a partir disso, cria-se um gráfico de vazão medida versus descarga de sedimentos em suspensão (Baptista e Lara, 2014).

As curvas-chave mais simples são descritas por um função de potência, conforme a Equação 3.2, que ao serem linearizadas a partir de uma operação logarítmica, permitem criar um modelo a partir de uma regressão linear para estimar a descarga de sedimentos em função da vazão líquida. A transformação logarítmica também ameniza dificuldades decorrentes da dispersão dos dados que variam nessa função.

$$\widehat{Qsed} = \hat{a}Q^{\hat{b}}\varepsilon \qquad \text{Equação 3.2}$$

$$\log\widehat{Qsed} = \log \widehat{a} + \widehat{b} \log Q + \log \varepsilon \qquad \text{Equação 3.3}$$

Em que,

$\widehat{Qsed}$ = estimativa amostral da descarga dos sedimentos em suspensão [MT^{-1}] ou (t/dia);

Q = vazão do rio [L^3T^{-1}] ou (m^3/s);

$\widehat{a}, \widehat{b}$= estimativa amostral do intercepto (t/dia) e do coeficiente angular ((t x s)/ (dia x m^3)), respectivamente;

ε = erro do modelo.

A linha de regressão desejada é aquela que produz o menor resíduo possível, que é a diferença vertical entre a linha e o dado observado. Dentre os métodos disponíveis, aquele que é comumente utilizado para estimar os coeficientes da reta de regressão é o método dos mínimos quadrados. A partir da derivação parcial da equação de resíduos em

relação aos coeficientes da reta, obtém-se a equação 3.4 e equação 3.5, para estimar o coeficiente angular e o intercepto, na devida ordem (Wilks, 2005).

$$\widehat{b} = \frac{n\sum QiQsedi - \sum Qi \sum Qsedi}{n\sum Qi^2 - (\sum Qi)^2} \qquad \text{Equação 3.4}$$

Em que,

$\widehat{b}$ = valor estimado do coeficiente angular;

n = número de dados disponíveis;

$Qsed_i$ = valor de descarga de sedimentos observadas (t/dia);

Q_i = Vazão observada (m^3/s).

$$\log \widehat{a} = \log Qsed_{média} - \widehat{b} \log Q_{média} \qquad \text{Equação 3.5}$$

Em que,

$\widehat{a}$ = estimativa amostral do intercepto;

$Qsed_{média}$ = Média dos valores de descarga de sedimentos observados (t/dia);

$Q_{média}$ = Média dos valores de vazão observados (m^3/s);

$\widehat{b}$ = estimativa amostral do coeficiente angular pela equação 3.4 [(t x s)/ (dia x m^3)].

Na linguagem de programação R, que foi a utilizada neste estudo, a biblioteca "stats" permite facilmente o manejo de regressões lineares, verificação do ajuste e estimativa dos coeficientes da regressão.

A análise de regressão é uma coleção de ferramentas muito utilizada na estatística e engenharia para modelar e explorar relações lineares entre variáveis, estimando a incerteza nessa relação e sua significância estatística. Essa incerteza pode se dever aos erros observacionais, à ação de fatores aleatórios e ao desconhecimento da equação mais representativa da relação entre variáveis, dentre outras causas.

Um ponto importante é avaliar se o ajuste da regressão aos dados é aceitável. Uma métrica usualmente empregada é o coeficiente de determinação, também chamado de R^2, que mede o quanto a variável independente é descrita pela linha de regressão. Esse

coeficiente varia de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo ao 1, melhor é o ajuste. (Wilks, 2005).

Segundo Asselman (2000), esse tipo de abordagem de curva-chave subestima o transporte de sedimentos em 10 a 50% do valor medido. Essa subestimativa pode estar relacionada à escala na qual a regressão foi feita, mas também à limitação que o modelo tem por não considerar os diferentes processos sazonais como chuvas ou estiagens, mudanças no uso e ocupação do solo, dentre outras alterações as quais a bacia hidrográfica está sujeita. Diante disso, diferentes procedimentos para aperfeiçoar a estimativa por curvas-chave se tornaram significativos objetos de estudos recentes.

Em pesquisas recentes, Moura *et al* (2023), por exemplo, buscou estimar a descarga de sedimentos no Rio Madeira considerando as vazões de seus tributários, adicionando mais termos às equações 3.2 e 3.3. Os resultados obtidos mostraram uma melhora na estimativa de carga de sedimentos em escala temporal diária, especialmente para descargas menores em torno de 10^1 a 10^6 t/dia.

Para o estudo em tela, não há tributários relevantes em termos de vazão e sedimentos que justifiquem a aplicação da metodologia do estudo citado no parágrafo anterior. No entanto, Ahn *et al* (2017), utilizaram modelos dinâmicos lineares (curva-chave dinâmica) para modelar e estudar a dinâmica dos sedimentos, o que demonstrou ser uma abordagem que pode ajudar na compreensão do comportamento dos sedimentos no sistema.

3.6. MODELO DINÂMICO - CURVAS-CHAVE DINÂMICA

As curvas-chave com coeficientes variando no tempo ou curvas-chave dinâmica seguem uma abordagem distinta da curva-chave estática, pois as dinâmicas consideram que o intercepto e o coeficiente angular variam no tempo. Isso significa que essas curvas-chave buscam capturar a variação da relação entre a vazão líquida e a descarga de sedimentos, permitindo uma melhor compreensão da dinâmica hidrossedimentológica da região analisada.

O modelo que permite gerar os coeficientes variando temporalmente da curva-chave dinâmica é o Modelo Linear Dinâmico (MDL) e no uso deste modelo estão incluídos algoritmos recursivos, como Filtro de Kalman e algoritmo de suavização, para estimativa dos coeficientes e da variável dependente.

Criados inicialmente pela Engenharia de Controle, modelos desse tipo são uma classe de modelos de espaço de estado, os quais se estruturam em duas equações, sendo

uma equação associada aos valores observados e outra referente aos coeficientes da regressão, conforme Equação 3.6 e 3.7 (Franco *et al*, 2009).

$$Y_t = F_t \widehat{\theta}_t + v_t \, , \, v_t \sim N(0, V) \qquad \text{Equação 3.6 (Observação)}$$

$$\widehat{\theta}_t = G_t \, \theta_{t-1} + w_t \, , \, w_t \sim N(0, W) \qquad \text{Equação 3.7 (Estado)}$$

Y_t: vetor de observação (1 x 1);

$\widehat{\theta}_t$: vetor dos coeficientes da regressão, no formato $\left[log \, \widehat{a}_t \, ; \; log \, \widehat{b}_t \right]$ (2 x 1);

F_t: matriz das variáveis observacionais x_t (1 x 2);

G_t: matriz dos coeficientes das variáveis de estado (2 x 2);

v_t: ruído associado à variável independente no tempo t (1 x 1);

w_t: ruído associado à variável de estado no tempo t (2 x 1);

V: variância associada ao ruído da observação (escalar) (1 x 1);

W: matriz diagonal de covariância associada ao ruído do estado (2 x 2).

É importante ressaltar que a razão entre as variâncias dos erros das equações de estado e observação, r = W/V, conhecido como razão *noise-variance* influenciam o comportamento da variável dependente. Em geral, quanto maior for essa relação, mais os coeficientes da regressão se alteram a cada passo de tempo, buscando reproduzir a média da variável dependente analisada (Petris *et al*, 2007). Isso pode levar a uma melhor assertividade do modelo no que diz respeito à média, porém pode estar associado a maior incerteza.

A estrutura do modelo é completa ao se definir a distribuição inicial do vetor de estado θ_0, conforme equação 3.8. Um dos problemas associados a esses modelos é o desconhecimento de alguns fatores nessas equações. Como, por exemplo, os hiperparâmetros, constantes no tempo, que são a variância do ruído da equação de observação (V) e os elementos da matriz diagonal associadas ao ruído da equação de estado, equação 3.9, enquanto os parâmetros de estado são os valores do vetor de estado (θ_t) que variam ao longo do tempo (Franco *et al*, 2009).

$$\theta_0 \sim N(m_0, C_0) \qquad \text{Equação 3.8}$$

$$W = \begin{bmatrix} W1 & 0 \\ 0 & W4 \end{bmatrix}$$

Equação 3.9: matriz diagonal de covariância associado ao ruído do estado

Em que:
W_1: hiperparâmetro associado ao intercepto
W_4: hiperparâmetro associado ao coeficiente angular

O Filtro de Kalman (FK) e o algoritmo de suavização, como mencionado anteriormente, são ferramentas recursivas, mas com objetivos distintos. O FK pode ser dividido em três etapas, que estão divididas nas equações 3.10 a 3.18.

Essas etapas consistem em utilizar os valores disponíveis até determinado instante "t-1" e retorna estimativa do vetor de estado ($\widehat{\theta}_t$) com base nos valores presentes até o momento anterior, isto é "t-1". Com esse valores, ele estima a variável dependente (Y_t) - descarga de sedimentos, por exemplo - e, posteriormente o vetor de estado ($\widehat{\theta}_t$) agora com todas as observações da variável dependente disponíveis (instante "t"), etapa conhecida como atualização do FK. (Petris *et al*, 2007; Franco *et al*, 2009). "D_t" e "D_{t-1}" representam todos os valores disponíveis da observação até o instante "t" e "t-1", respectivamente, isto é, $D_t = \{Y_1,...,Y_t\}$ e $D_{t-1} = \{Y_1,...,Y_{t-1}\}$.

$$\text{Dado que } \widehat{\theta}_t \mid D_{t-1} \sim N(a_t, R_t) \qquad \text{Equação 3.10}$$

$$a_t = G_t\, m_{t-1} \qquad \text{Equação 3.11}$$

$$R_t = G_t\, C_{t-1}\, G_t' + W \qquad \text{Equação 3.12}$$

$$\text{Dado que } Y_t \mid D_{t-1} \sim N(f_t, Q_t) \qquad \text{Equação 3.13}$$

$$f_t = F_t\, a_t \qquad \text{Equação 3.14}$$

$$Q_t = F_t\, R_t\, F_t' + V \qquad \text{Equação 3.15}$$

$$\widehat{\theta}_t \mid D_t \sim N(m_t, C_t) \qquad \text{Equação 3.16}$$

$$m_t = a_t + R_t\, F_t'\, Q_t^{-1}\, e_t \qquad \text{Equação 3.17}$$

$$C_t = R_t - R_t F_t' Q_t^{-1} F_t R_t \qquad \text{Equação 3.18}$$

Em que:

e_t: Y_t - f_t (resíduo).

A etapa de suavização, segundo Petris *et al* (2007), é uma forma de reconstruir o comportamento do sistema de trás para frente, e o seu funcionamento se baseia em utilizar todos os dados disponíveis até determinado instante de tempo e estimar de modo recursivo reverso os coeficientes do vetor de estados, a partir das equações 3.19 a 3.21

$$\widehat{\theta_t} | D_t \sim N(s_t, S_t) \qquad \text{Equação 3.19}$$

$$s_t = m_t + C_t G_{t+1}' R_{t+1}^{-1} (s_{t+1} - a_{t+1}) \qquad \text{Equação 3.20}$$

$$S_t = C_t - s_t = C_t + C_t G_{t+1}' R_{t+1}^{-1} (S_{t+1} - R_{t+1}) R_{t+1} G_{t+1} C_t \qquad \text{Equação 3.21}$$

Embora os hiperparâmetros - W_1, W_4, V - possam ser inseridos manualmente nas equações, há abordagens para obtê-los. As maneiras para estimar hiperparâmetros desconhecidos são por meio da abordagem Bayesiana ou uma abordagem clássica, sendo a primeira através da Cadeias de Markov Monte Carlo e a segunda máxima verossimilhança (Petris *et al*, 2009). A função log-verossimilhança, associada à abordagem clássica, é apresentada na equação 3.22.

$$l(\psi) = -\frac{1}{2}\sum_{t=1}^{n} log\left|Qt\right| - \frac{1}{2}\sum_{t=1}^{n}(y_t - f_t)' Q^{-1}(y_t - f_t) \qquad \text{Equação 3.22}$$

Em outros estudos, na área hidrológica, Ahn *et al* (2017) abordou a comparação da estimativa de alguns parâmetros da água com diferentes modelos, sendo o MDL um deles e concluiu que tal abordagem é uma ferramenta relevante para captar a dinâmica do sistema e é um bom candidato para prever a curto prazo estimativa de turbidez, concentração etc. Em outras áreas do conhecimento, como na área de transporte, modelos dinâmicos foram usados para melhorar a acurácia da estimativa de viagem em avenidas congestionadas (Kwak *et al*, 2020).

Em matéria de sedimentologia, estudos associam que o intercepto (a) está associado à erodibilidade do solo, ou seja, a capacidade de fornecer sedimentos da região em análise. Valores elevados do intercepto, geralmente estão associados a solos desagregados por diferentes motivos na região, como chuvas intensas, secas, queimadas e mudanças de uso e ocupação do solo. O coeficiente angular (b), por sua vez, refere-se a capacidade erosiva do rio e valores altos deste parâmetro representam grande transporte de sedimentos e poder de erosão do rio quando a vazão aumenta. (Ahn e Steinschneider, 2017; Asselman, 2000).

4. METODOLOGIA

A metodologia do estudo consistiu em escolher as estações na região da UHE Santo Antônio que haviam dados suficientes para estimar balanços em diferentes escalas temporais, isto é, diário, semanal e mensal. Apesar de haver dados de 2009 até 2022, optou-se por escolher o período de 2014 à 2019 para realizar os balanços, como será detalhado ao longo do texto. Para cada balanço, utilizou-se de uma abordagem distinta (balanço com dados observados, com dados da curva-chave estática ou com as curvas-chave dinâmica).

4.1. ÁREA DE ESTUDO

Na área de estudo, foram analisadas as estações em dois trechos: um deles partindo da UHE Jirau até a UHE Santo Antônio, com cerca 115 km de extensão e outro trecho com início no barramento de Santo Antônio e ponto final na estação de monitoramento de Humaitá (Humaitá pode ser visualizada na figura 3.2 da fundamentação teórica) com uma extensão de aproximadamente 250 km, trechos estes que somados resultam em 365 km.

Na figura 4.1, são apresentadas apenas as estações que foram escolhidas para serem utilizadas no estudo. As estações a montante da UHE Santo Antônio são Jusante Caldeirão do Inferno (JCI) e Porto R4 (PR4), ambas localizadas a menos de 10 km de Jirau, e a estação a jusante de Porto Velho (PTV), a uma distância de menos de 5 km da UHE Santo Antônio e nas proximidades de Rondônia. As siglas associadas aos nomes das estações foram as mesmas utilizadas no trabalho de Moura et al. (2024).

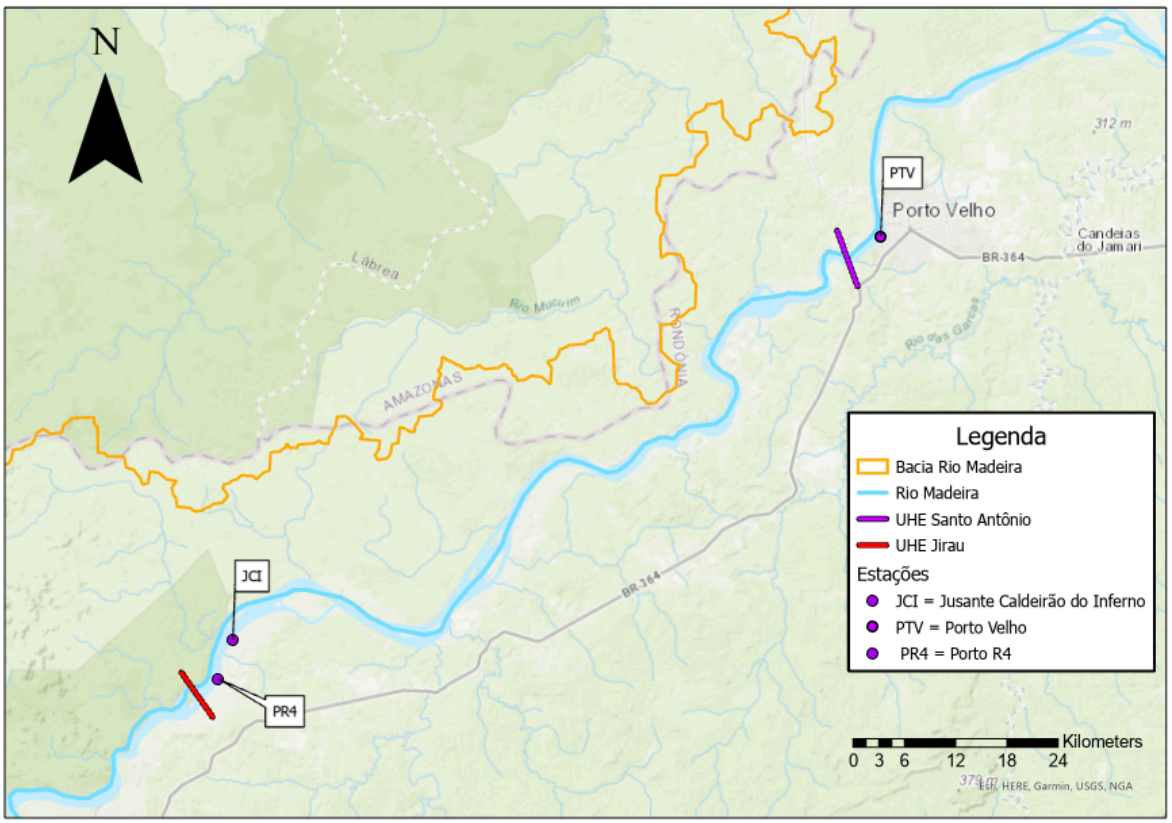


Figura 4.1. Localização das estações de monitoramento. O Rio Madeira corre na direção da UHE Jirau para a UHE de Santo Antônio.

Mais informações das estações utilizadas ou de outras disponíveis que não foram escolhidas podem ser encontradas na tabela 4.1, como período em que os dados foram obtidos, coordenadas geográficas das estações e a distância em relação ao barramento de Santo Antônio. As estações utilizadas no estudo foram JCI, PR4 e PTV.

As estações no início do trecho que foram escolhidas, JCI e PR4, foram feitas por conta da proximidade entre elas, a frequência de medição, e por não haver outras estações intermediárias entre Jirau e Santo Antônio com a mesma quantidade de informação. Dessa forma, para quantificar o quanto de sedimento sai de Jirau, essas são as estações certas para isso.

Em relação a estação a jusante da UHE Santo Antônio, PTV, ela foi a única a ser escolhida por ser a mais próxima após o barramento de Santo Antônio, ter uma série histórica com vazões mensais no período de 2009 a 2019, e uma grande série de sedimentos (2009 a 2022 para sedimentos totais e de 2009 a 2019 para areias).

Tabela 4.1. Tabela Resumo das Estações de Monitoramento.

SEÇÃO TRANSVERSAL	DISTÂNCIA	REFERÊNCIA[2]	COORDENADAS GEOGRÁFICAS	FREQUÊNCIA	Nº OBS. SEDIMENTOS	PERÍODO[3]
Humaitá	-252,5 km	Jusante	63,021Wº, 7,505ºS	Bimestral	121	2009 a 2020
São Carlos	-87,83 km	Jusante	63,508ºW, 8,444ºS	Bimestral	121	2009 a 2020
Porto Velho (PTV)	-4,6 km	Jusante	63,915ºW, 8,778ºS	Mensal	179	2009 a 2021
Montante Jaciparaná e Vila Jaciparaná[1]	78,76 km	Montante	64,381ºW, 9,501ºS	Bimestral	72	2011 a 2020
Jusante Caldeirão do Inferno (JCI)	107,46 km	Montante	64,607°W 9,203°S	Mensal	183	2009 a 2021
Porto R4 (PR4)	112,32 km	Montante	64,623°W 9,244°S	Mensal	92	2015 a 2022

[1] União de dados das estações de montante Jaciparaná e Vila Jaciparaná.
[2] A UHE de Santo Antônio é o ponto de referência, portanto as estações com distância negativa estão a jusante da UHE de Santo Antônio, enquanto as positivas estão a montante.
[3] O período de dados disponíveis nesta tabela é referente aos dados de sedimentos.

4.2. DADOS SEDIMENTOLÓGICOS E HIDROLÓGICOS

Para as estações a jusante e montante de Santo Antônio, foram obtidos diferentes tipos de dados hidrológicos e de sedimentos, que foram coletados a partir de fichas, relatórios e tabelas excel provenientes da Agência Nacional de Águas (ANA) e do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA).

A partir delas, foram montados bancos de dados contendo a granulometria de suspensão para cada estação de monitoramento, com as vazões do Rio Madeira e o dia que foram feitas as coletas dos dados de sedimentos.

Os dados de sedimentos totais, areia e vazão das estações de montante, Jusante Caldeirão do Inferno e Porto R4, foram reunidas em séries temporais únicas por conta da proximidade entre elas ser de menos de 5 km, e para aumentar o número de pontos ao criar as curvas-chave estática.

Nas figuras 4.2 e 4.3, são apresentados as séries temporais de vazão disponíveis e que foram utilizadas no estudo. As séries temporais disponíveis em preto e azul claro fazem referência às estações de montante e jusante, respectivamente, que são os dados disponibilizados em fichas de medição em campo.

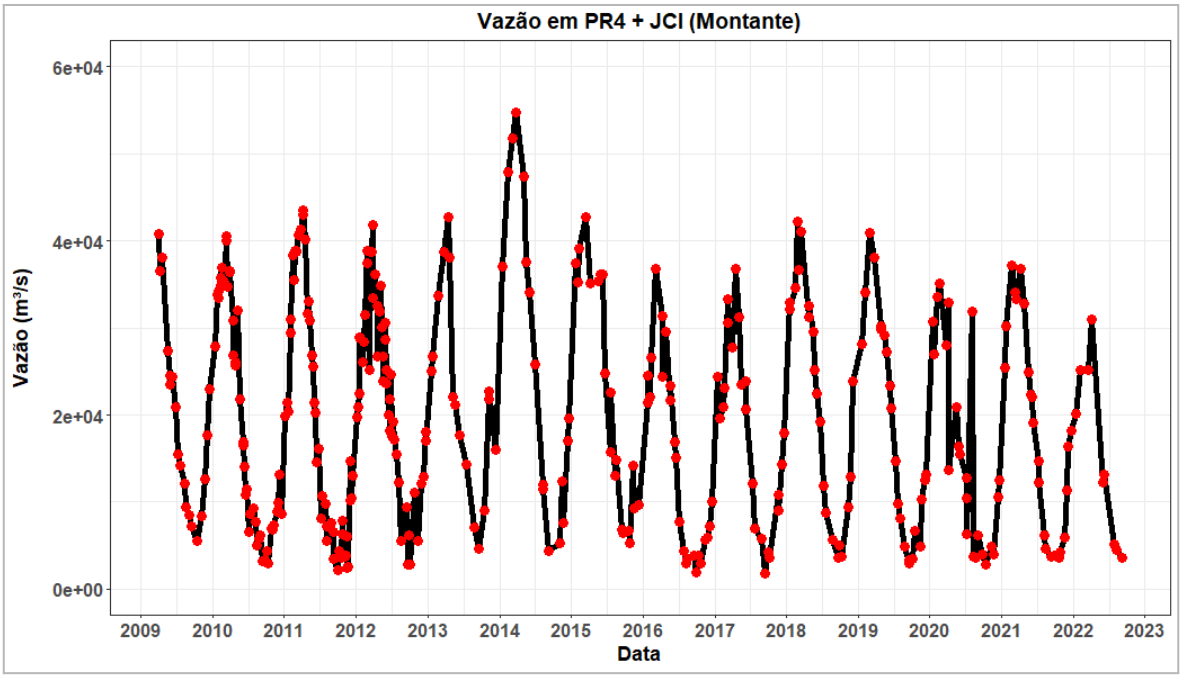


Figura 4.2. Vazão combinada observada (PR4 +JCI) em pontos vermelhos com a linha preta interligando os pontos.

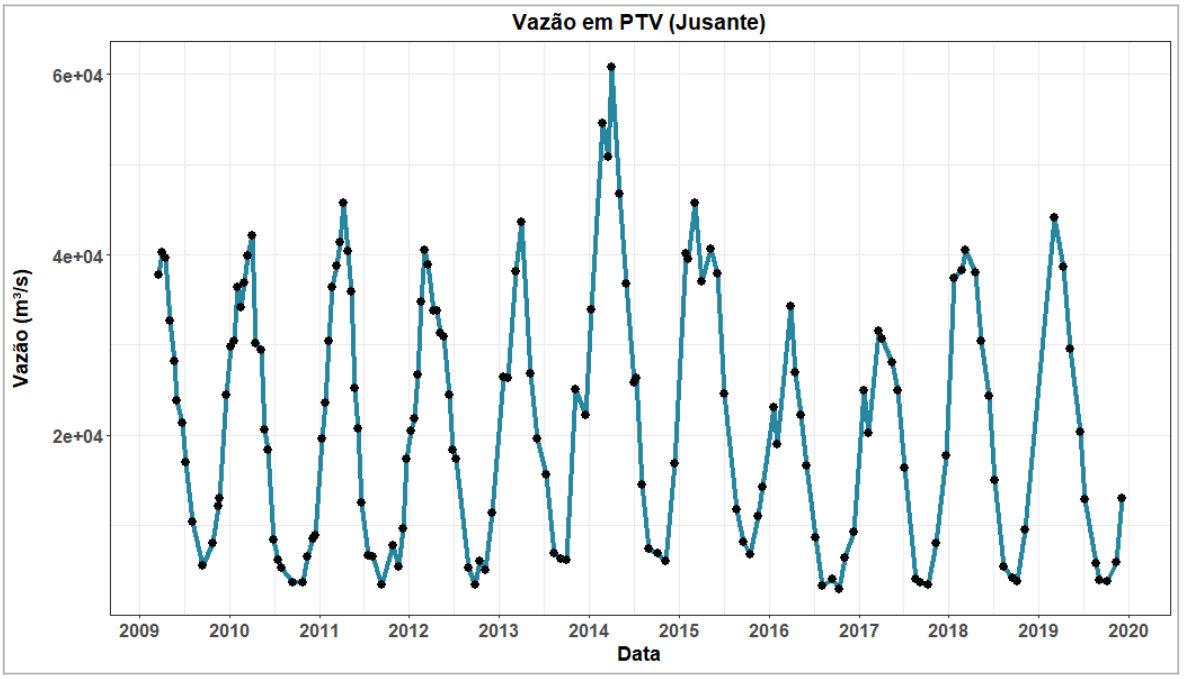


Figura 4.3. Vazão observada em pontos pretos com a linha azul interligando os pontos.

Os dados de montante vão desde de 2009 até meados de 2022, e os dados de jusante de 2009 até o final de 2019, implicando um balanço de sedimentos que deve ir somente até o final de 2019.

Nas figuras 4.4 e 4.5 são apresentados os dados de sedimentos totais e areias para as estações de montante. É notável uma variação dos sedimentos em virtude dos períodos hidrológicos em ambos os gráficos. Para as areias, há uma maior descarga no intervalo de

2009 até 2014 em comparação ao resto da série, o que provavelmente está associado à obra da UHE Jirau e a cheia histórica que ocorreu no ano de 2014.

Em relação às figuras 4.6 e 4.7, referentes à estação de Porto Velho, destaca-se a variação de sedimentos ao longo dos períodos hidrológicos, e assim como nas areias de JCI, uma descarga elevada entre 2009 e 2014, comparado ao restante da série.

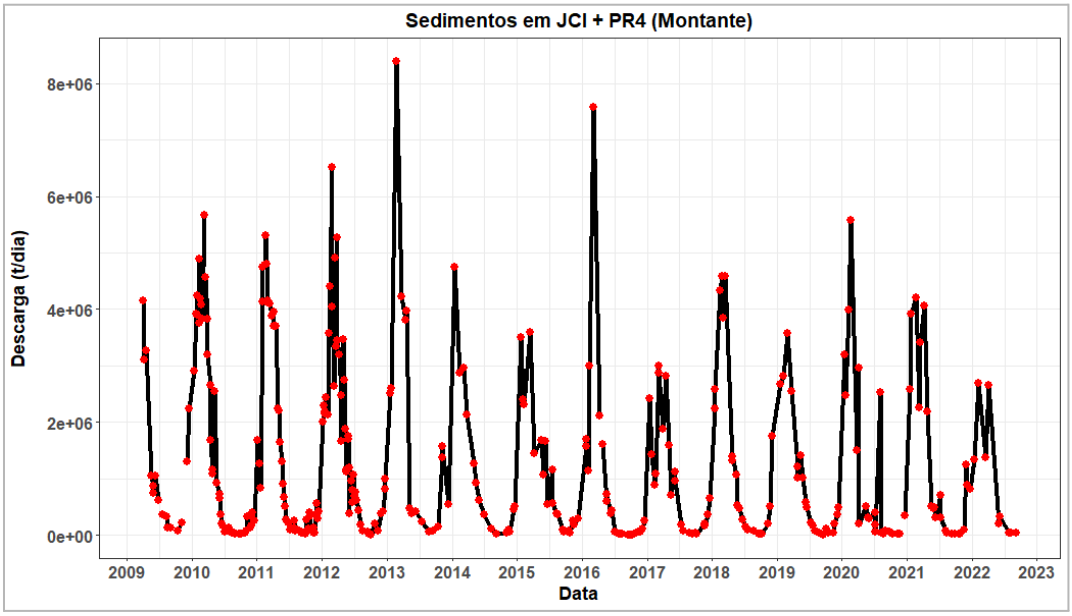


Figura 4.4. Descarga Sólida para sedimentos totais (t/dia) em pontos vermelhos com a linha preta interligando os pontos

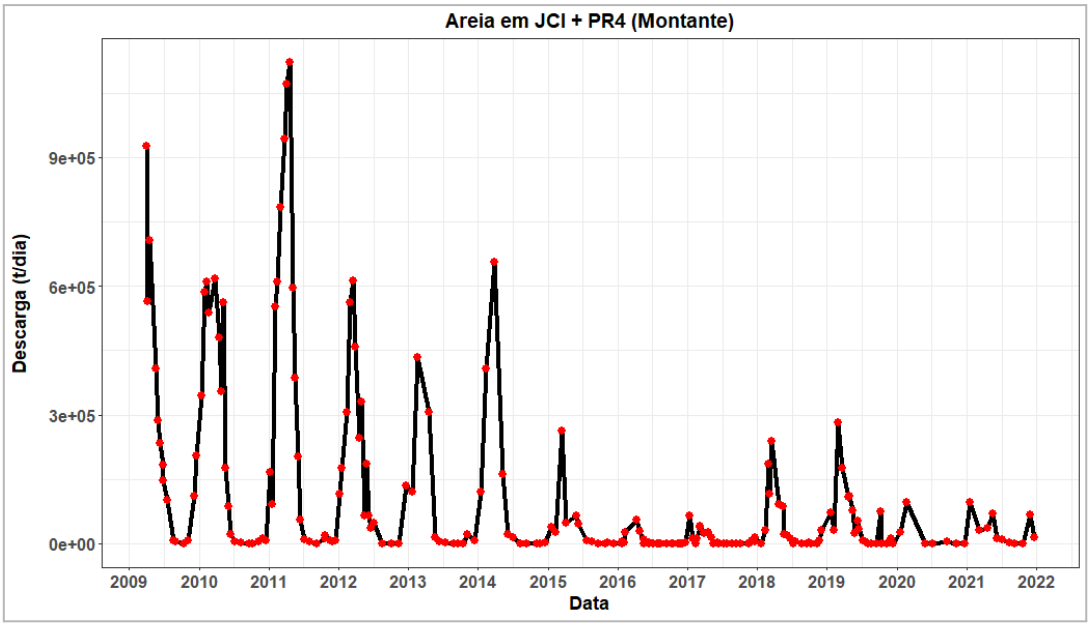


Figura 4.5. Descarga sólida de areias (t/dia) em pontos vermelhos com a linha preta interligando os pontos

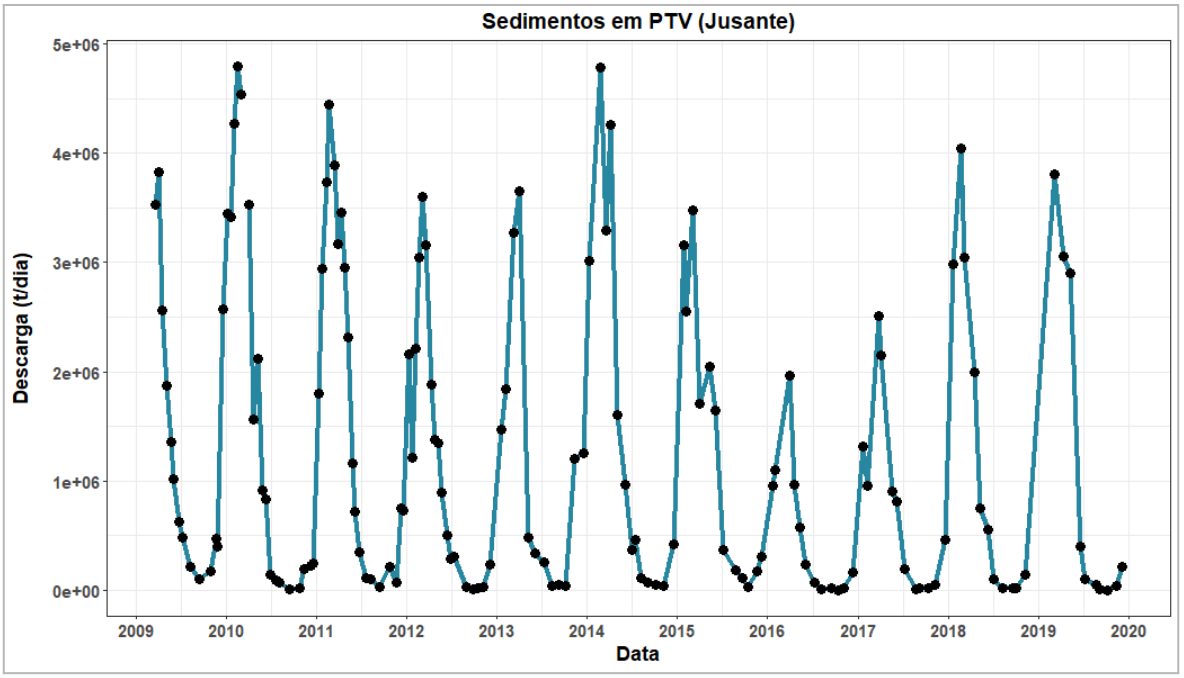


Figura 4.6. Descarga sólida de sedimentos totais (t/dia) em pontos pretos com a linha azul interligando os pontos

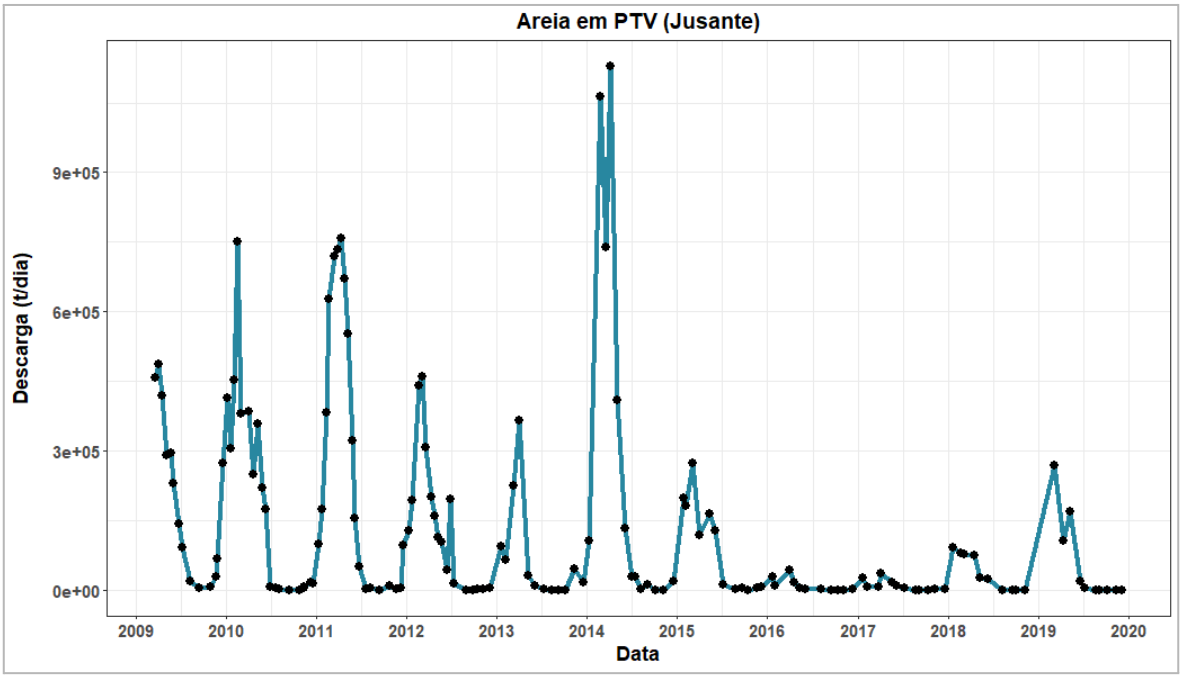


Figura 4.7. Descarga sólida de areias (t/dia) em Porto Velho em pontos pretos com a linha azul interligando os pontos

4.3. BALANÇOS DE SEDIMENTOS

A maneira como as estações de monitoramento estão dispostas permite que seja feito um balanço de sedimentos das areias e do total de sedimentos ao longo do trecho, a partir da subtração entre as descargas sólidas das estações a montante e as descargas sólidas das estações a jusante, que foram obtidas por diferentes metodologias.

A primeira abordagem consistiu em utilizar os valores observados das descargas sólidas das fichas e relatórios do IBAMA e da ANA (Figura 4.4 a Figura 4.7), fazer médias mensais para aqueles meses que tiverem mais de uma coleta, ou utilizar a única medição mensal como representativa da média do mês. Posteriormente, foram gerados gráficos para demonstrar visualmente a retenção ou perda de sedimentos totais e de areia no trecho em análise e no período determinado.

A segunda metodologia proposta utilizou os dados sedimentológicos para gerar quatro regressões lineares, duas para as estações a montante (JCI + PR4) e outras duas para a estação de jusante (PTV), sendo que para cada estação há regressão para sedimentos totais e outra específica para areia. Após a criação das regressões lineares, utilizou-se de dados semanais de vazão para gerar valores semanais de descarga sólida para cada estação e fazer o balanço de sedimentos.

A terceira maneira de gerar um balanço, com o uso de curvas-chave dinâmicas a partir do FK e o algoritmo de suavização, foi feita por meio da interpolação das coeficientes mensais (linear e angular) gerados pelo modelo dinâmico para obter coeficientes semanais. A partir deles, foram geradas séries de descargas sólidas semanais para as estações de montante e jusante e realizado o balanço.

Os balanços foram feitos para o período de 2014 a 2019, por haver vazões diárias disponíveis somente entre 2014 a 2019 para as estações de PTV e PR4. Com essas vazões diárias, foram estimadas as vazões semanais.

4.3.1. REGRESSÃO LINEAR E CURVA-CHAVE ESTÁTICA

Para a criação das curvas-chave estáticas, foi utilizada a biblioteca “stats” no R. A avaliação do quanto o modelo se ajusta aos dados foi feita pelo R^2. Foram criadas quatro regressões lineares: duas para as estações a montante (areia e sedimentos totais), e duas para as estações a jusante (areia e sedimentos totais).

Posteriormente, após a criação e avaliação das regressões, foram gerados gráficos de descarga de sedimentos diários para areia e sedimentos totais, e comparado com os valores observados.

As fórmulas utilizadas para encontrar os coeficientes da regressão, o intercepto e o coeficiente angular por meio dos métodos de mínimo quadrado foram apresentadas anteriormente na fundamentação teórica (Equação 3.4 e Equação 3.5).

4.3.2. MODELOS DINÂMICOS LINEARES E CURVA-CHAVE DINÂMICA

Essa etapa pode ser dividida em partes: a primeira corresponde à definição do modelo dinâmico; em sequência com dados mensais de descarga, foram gerados os resultados do Filtro de Kalman e os coeficientes da regressão variando mensalmente; e na outra, os coeficientes foram interpolados para uma escala semanal e criado estimativas de descarga de sedimentos totais e de areia semanais.

A construção do modelo linear dinâmico foi feita por meio da biblioteca "dlm" no R, que foi implementada por Petris et al (2007). A figura 4.8 apresenta as etapas envolvidas no uso do modelo linear dinâmico, a estimativa dos hiperparâmetros, o FK e a obtenção dos coeficientes suavizados mensais.

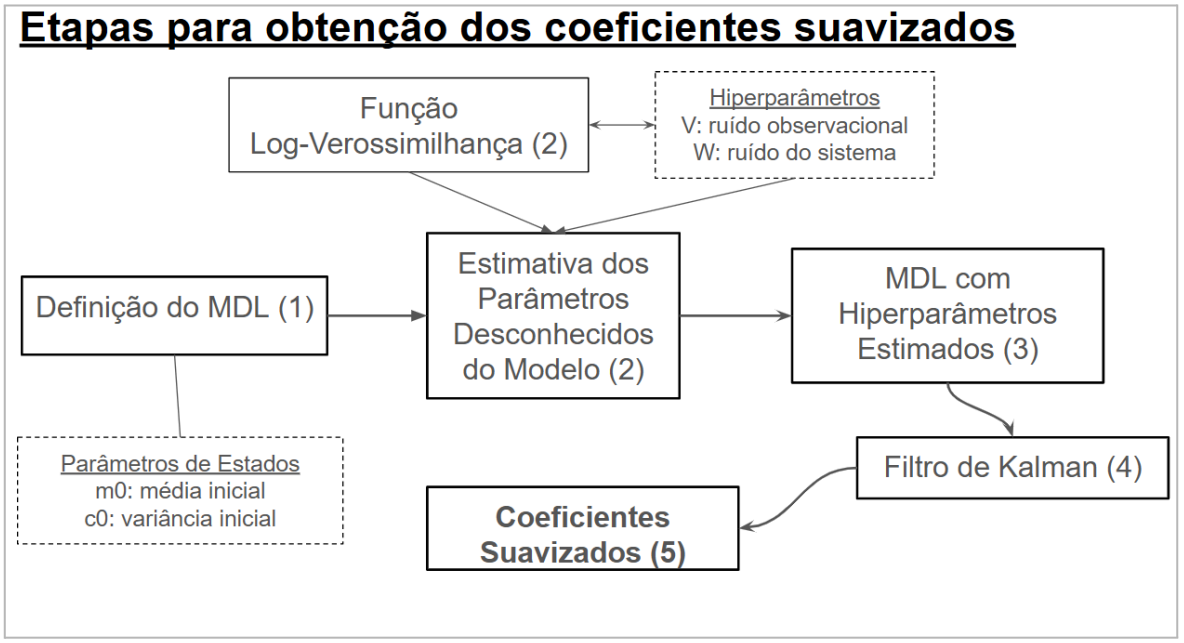


Figura 4.8. Etapas da Criação do Modelo

Inicialmente, foi criado um modelo dinâmico, a partir da função "dlmReg" da biblioteca dlm. Essa função tem como argumentos os hiperparâmetros. Eles podem ser

impostos pelo usuário ou estimados por meio de uma biblioteca de otimização, tendo como função objetivo o negativo da log-verossimilhança. A otimização está implementada na função “dlmMLE”, retornando os hiperparâmetros.

É necessário, para que o otimizador estime seus valores, que sejam definidos valores iniciais, que foram iguais a 0,01 para todos os hiperparâmetros. Não foram feitas alterações nesses valores, embora Petris et al (2007) afirmem da possibilidade de haver distintos locais de valores máximo na função verossimilhança.

Os parâmetros de estados inicial (m_0 e c_0), associados aos valores iniciais do vetor de estado, podem ser escolhidos ou deixar os valores padronizados pela biblioteca, que foi o utilizado neste estudo. A tabela 4.2 apresenta os valores inseridos para os hiperparâmetros para que a função log-verossimilhança obtenha seus resultados, e os valores escolhidos dos parâmetros de estado.

Tabela 4.2. Parâmetros Iniciais Inseridos na Função Verossimilhança

Parâmetros Desconhecidos	**Valor de Entrada**
dV	0,01 (log-verossimilhança)
dW_1	0,01 (log-verossimilhança)
dW_4	0,01 (log-verossimilhança)
m_0	0 (Padrão)
c_0	1×10^7 (Padrão)

Com os hiperparâmetros estimados em mãos, esses valores são inseridos no modelo, que corresponde à etapa 3 da figura 4.8.

Depois disso, foi utilizada a função “dlmFilter”, associada ao Filtro de Kalman para obter os dados necessários, descarga sólida estimada e coeficientes da regressão, para alcançar os valores dos coeficientes da regressão suavizados variando mensalmente, por meio da função “dlmSmooth”.

A partir deles, foram realizadas interpolações entre as semanas para obter coeficientes de semana a semana, que foram utilizados para estimar descargas de areia e sedimentos totais.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados estão divididos em cinco seções, das quais as três primeiras apresentam os balanços gerados pelas três abordagens descritas na metodologia. As duas últimas seções tratam de comparações entre os balanços obtidos e as séries temporais de descarga geradas pelas diferentes metodologias.

5.1. BALANÇO COM DADOS OBSERVADOS

Como primeira estimativa, considerou-se que para os meses em houve apenas uma observação, ela seria representativa da média mensal, já nos meses em que houve mais de uma medição foram feitas médias. Em geral, constaram mais de uma observação por mês nas estações de montante. Assim, realizando a subtração entre as estações, obtém-se balanços na escala temporal mensal. Posteriormente, escalas temporais mais detalhadas foram avaliadas por outros métodos, haja vista que observações hidrológicas estão disponíveis diariamente, e as vazões variam significativamente ao longo de um mês. Na figura 5.1, é apresentado o balanço para os sedimentos totais. Nela é possível observar que houve uma diminuição de sedimentos no período de 2014 até perto do final de 2016, momento em que se visualiza uma retenção na casa de 7 milhões de toneladas.

A partir do final da estação de cheia de 2016 até o início de 2019, percebe-se uma tendência de maior estabilidade de sedimentos totais no trecho em análise. Todavia, no período de maior vazão de 2019 ocorre uma queda, seguida por um ligeiro aumento no resto desse ano.

O balanço a partir da média de descarga sólida para sedimentos totais (Figura 5.1) observados dão indícios de um acúmulo de sedimentos, no período de 2014 à 2019, no trecho entre Jirau e Santo Antônio, com destaque para os períodos hidrológicos de cheia (fevereiro à abril), momentos em que a variação de descarga foi mais significativa.

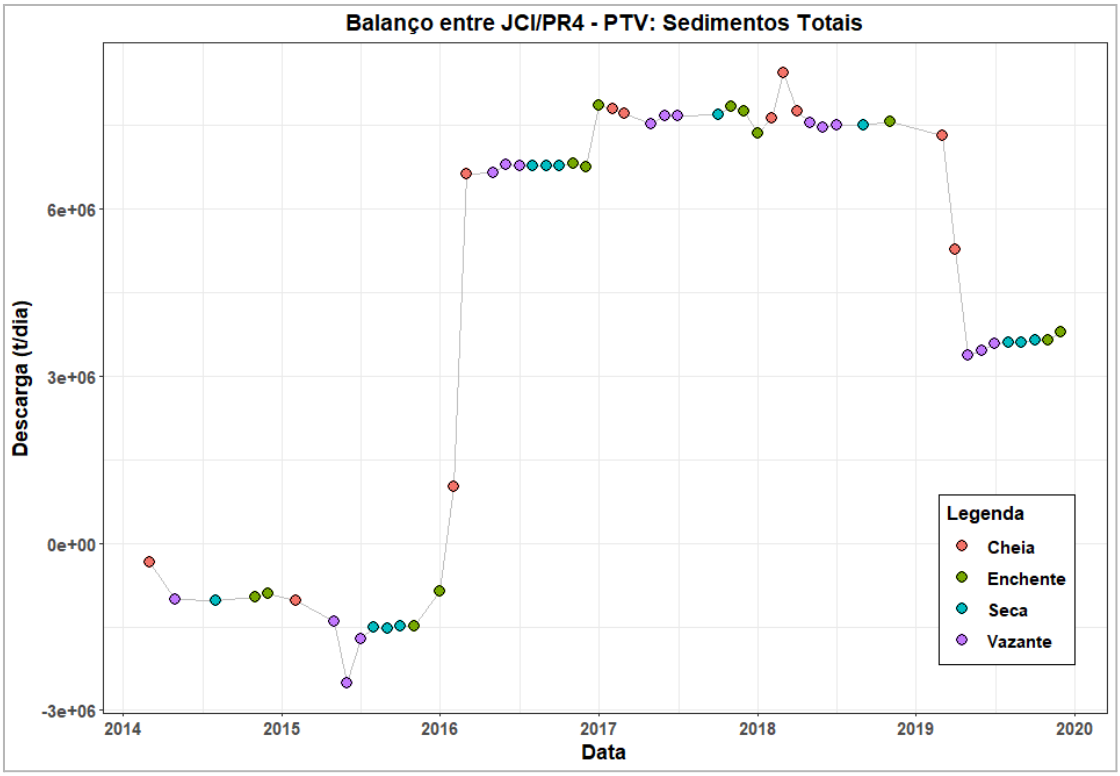


Figura 5.1. Balanço estimado para sedimentos totais com dados observados

Outra questão importante do balanço é a quantidade de meses em que não há dados mensais, que totalizam 20, conforme tabela 5.1. Nas secas, não apresentaram variações substanciais em comparação aos outros períodos, logo sua ausência terá menos impacto como é possível ver na figura 5.1. Todavia, outros períodos que mais tiveram falhas foram na época da cheia (7) e enchente (5), o que afetará o resultado do balanço.

Tabela 5.1. Número de Falhas no balanço acumulativo de sedimentos totais entre 2014 e 2019

Período Hidrológico	**Total**	**Faltante**
Cheia	18	7
Vazante	18	2
Enchente	18	5
Seca	18	6
TOTAL	**72**	**20**

Quanto às areias, o balanço da figura 5.2 demonstrou que de 2014 até quase meados de 2015 houve uma diminuição de 2 milhões de toneladas de areias, que se

manteve nesse patamar até 2018, quando teve um incremento de forma suave durante a cheia de 2018.

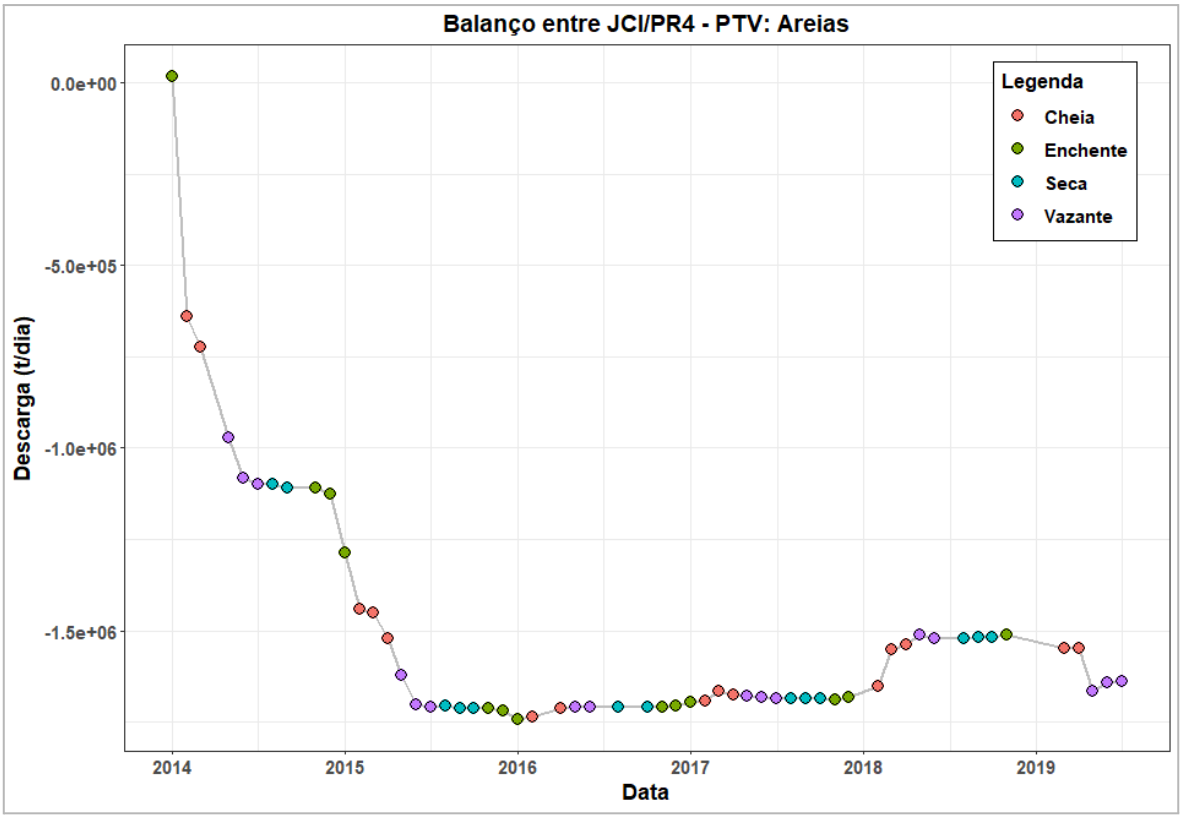


Figura 5.2. Balanço estimado para as areias com dados observados

Como pode ser visto, para as areias, o cenário é diferente dos sedimentos totais, sugerindo que no intervalo analisado mais saiu areia que entrou no trecho. Essa estimativa de perda de sedimentos pode estar associada à geração de energia das usinas - o entendimento entre o pico de geração de energia das usinas e o impacto nas medições é um assunto ainda a ser melhor compreendido - que podem afetar as medições - em Jirau e Santo Antônio - e gerar resultados não esperados (Bipa et al, 2024). Além disso, pode ser o caso das areias estarem ficando retidas no trecho anterior à UHE Jirau, indicando que Jirau, no período analisado (2014 a 2019), pode estar impedindo a passagem das areias.

É importante ressaltar, que em cinco meses não foram feitas medições para ambas ou alguma estação, conforme tabela 5.2, e não foi feita a contabilização de sedimentos nesses meses, portanto é provável que o quadro real desses balanços seja diferente.

Tabela 5.2. Número de Falhas no balanço acumulativo de areias entre 2014 e 2019

Período Hidrológico	**Total**	**Faltante**
Cheia	15	3
Vazante	18	0
Enchente	16	2
Seca	18	0
TOTAL	**67**	**5**

Em geral, os períodos de cheia (fevereiro a abril), vazante (maio a julho) e enchente (novembro a janeiro) são os mais relevantes para a variação de areia, assim como nos sedimentos totais. Diante disso, o uso dos 2 registros de enchentes e os 3 de cheia ausentes provavelmente alterariam o resultado final do balanço para as areias.

5.2. BALANÇO COM CURVAS-CHAVE ESTÁTICAS

5.2.1. CURVAS-CHAVE

As curvas-chave criadas a partir do modelo de regressão linear estão apresentadas na figura 5.3, em quatro quadros, sendo A e B associados às estações a montante e os quadros C e D à estação de Porto Velho.

As regressões de log-descarga sólida versus log-vazão líquida para sedimentos totais, quadros A e C, apresentaram valores de R^2 acima de 0,90, sendo que a curva-chave de PTV atingiu o maior coeficiente de determinação, igual a 0,9422. Isso significa que os dados que melhor se ajustaram ao modelo foram os da estação de Porto Velho. Em contrapartida, aqueles dados que menos se ajustaram ao modelo foram os de areia das estações de montante, com R^2 igual a 0,7797.

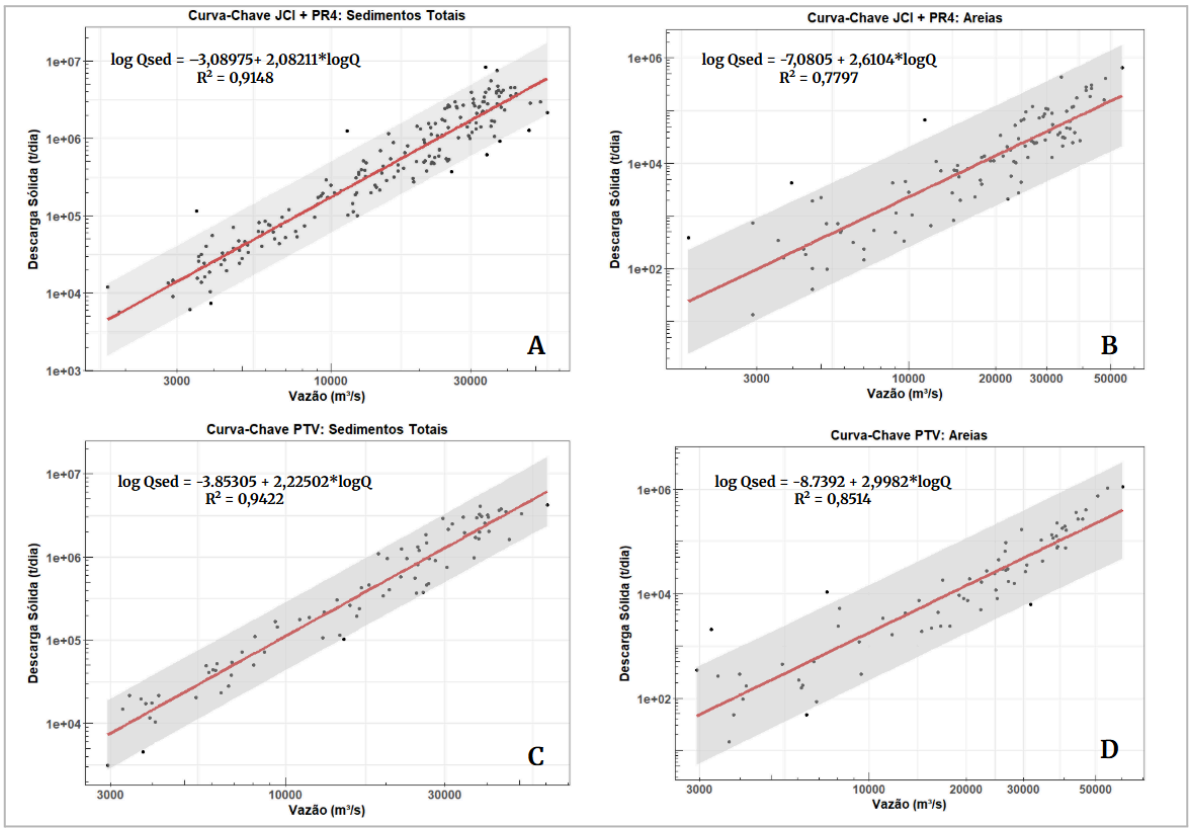


Figura 5.3. Curvas-Chave Estáticas com seus intervalos de previsão em sombreado cinza, seus coeficientes de determinação R^2, e suas equações.

Com exceção da regressão para sedimentos totais de Porto Velho, todas as outras constaram, no mínimo, dois pontos fora do intervalo de previsão. Esses pontos indicam vazões de 3000 a 10000 m³/s , em sua maioria, com descargas sólidas acima do esperado para o nível de vazão. Isso pode acontecer por erro na coleta dos sedimentos em campo, ou

por influência das operações das usinas. De todo modo, esses pontos fora da região sombreada não invalidam os modelos.

5.2.2. SÉRIES TEMPORAIS GERADAS VIA CURVAS-CHAVE

Com o uso dos dados de vazão semanais obtidos de PR4 e PTV, foram geradas as séries temporais de descarga de sedimentos na figura 5.4, em que as linhas em vermelho representam as séries geradas, e as em azuis representam as descargas observadas.

Tanto no quadro da esquerda quanto no da direita, as descargas foram subestimadas na maior parte do período analisado, tendo como principal exceção a descarga sólida de 2014, ano da cheia histórica no Rio Madeira, em que os valores pelas curvas-chave estáticas foram superiores aos valores observados.

Os maiores valores de descarga obtidos foram de aproximadamente 6 milhões de toneladas para ambas as estações. Além disso, os valores baixos de descarga foram melhores simulados pelo modelo.

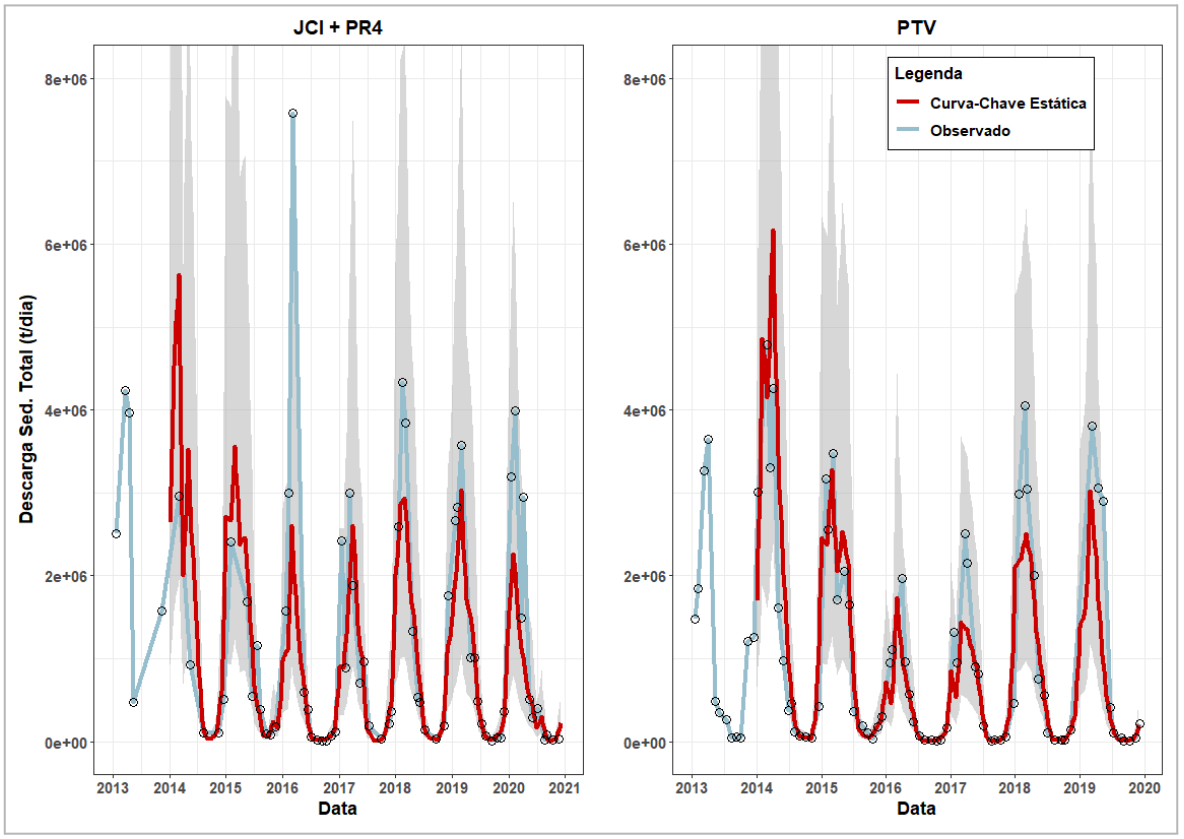


Figura 5.4. Comparação entre as descargas de sedimentos totais estimadas via curva-chave e os dados observados. Os círculos abertos são os pontos da série dos dados coletados. Em sombreado cinza, o intervalo de previsão.

As séries das areias são apresentadas na figura 5.5. Percebe-se que o modelo teve uma tendência a subestimar os valores de descarga nos momentos de cheia dos valores

observados, que para o ano de 2014, no pico da cheia a diferença foi de aproximadamente 500 mil toneladas de areias nas estações a montante da UHE de Santo Antônio, e por volta de 750 mil toneladas para a estação a jusante.

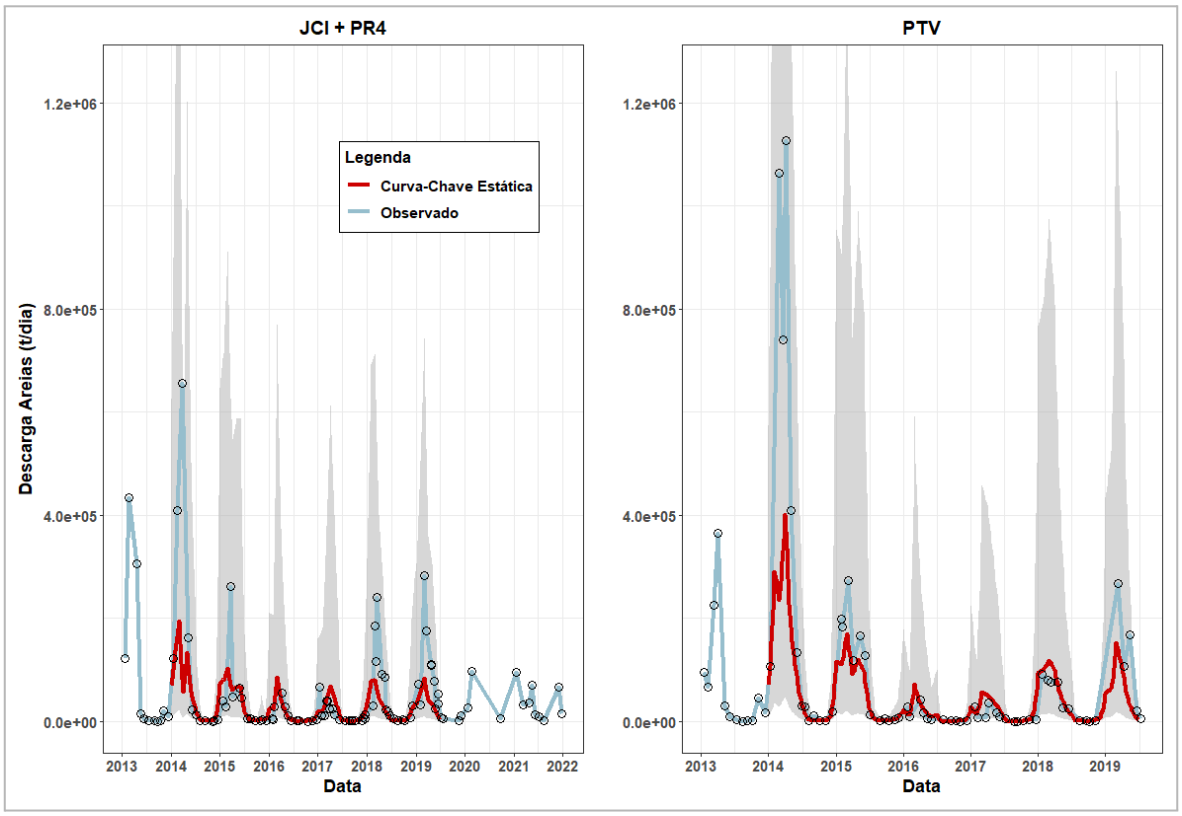


Figura 5.5. Comparação entre as descargas de areia estimadas por meio de curva-chave estática e os dados observados. Em sombreado cinza, está o intervalo de previsão.

Embora em diversos momentos o modelo não tenha representado momentos de picos extremos fielmente aos dados observados, é possível perceber no período de 2016 à 2018, principalmente para PTV, que as séries temporais estão próximas, indicando que o modelo se ajusta melhor para descargas mais baixas.

Como alternativa para tentar tornar as descargas estimadas pela curvas-chave estáticas mais próximas dos valores observados em campo, a segmentação da regressão pode ser uma opção, principalmente para as areias. Com essa abordagem, possivelmente os valores subestimados, geralmente nos períodos de cheia, ficariam mais próximos do observado.

A partir de 35.000 m³/s, os pontos começam a se localizar somente acima da reta (quadros “B” e “C” da figura 5.3), e esse valor de vazão pode ser um possível local para fazer a segmentação da regressão.

5.2.3. BALANÇO

Nas figuras 5.6 e 5.7 são apresentados o balanço cumulativo ao longo do período de análise e o balanço semanal, respectivamente. O balanço cumulativo favorece a compreensão de tendências interanuais, visualizando se o processo está se atenuando ao longo do tempo, retornando a um equilíbrio dinâmico ou não. O balanço semanal favorece a avaliação por período hidrológico e a avaliação do efeito da variabilidade da vazão.

Conforme figura 5.6, a abordagem utilizando curvas-chave estática estima um acúmulo de 30 milhões de toneladas de sedimentos no trecho entre Jirau e Santo Antônio. Destaque deve ser feito à cheia de 2014, momento em que houve acúmulo seguida de uma perda de 10 milhões de toneladas somente no mesmo período hidrológico.Isso ocorreu por conta do modelo de PTV rapidamente superar a geração de sedimentos de JCI+PR4 no início do período da cheia (Figura 5.4).

Os períodos hidrológicos mais relevantes na dinâmica dos sedimentos foram os da cheia, enchente e vazante, com destaque para as cheias, por ser o período no qual as maiores variações ocorrem, como é o caso dos pontos em vermelho de 2014 a 2017. As secas demonstraram pouca relevância em comparação aos outros períodos, uma vez que nesses períodos houve estabilidade, de acordo com a figura 5.6 e 5.7.

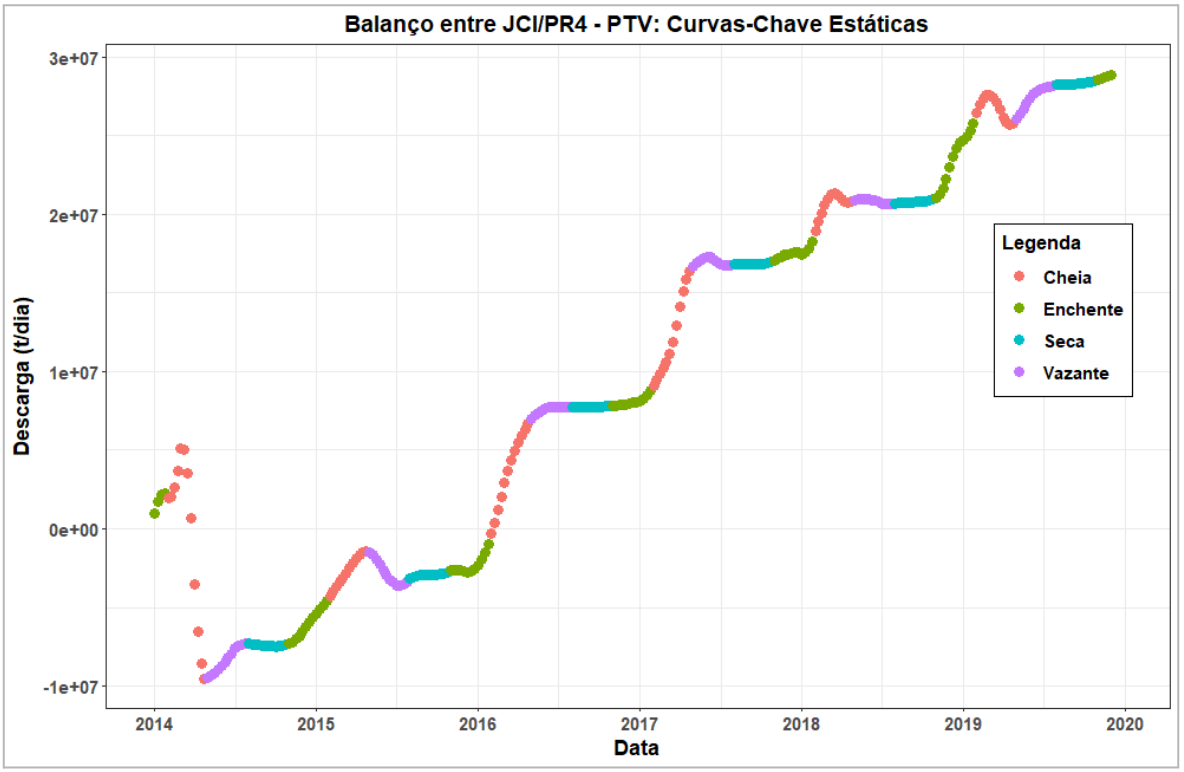


Figura 5.6. Estimativa de acumulação/perda de sedimentos totais entre JCI/PR4 e PTV.

Um detalhe interessante é que as enchentes aparentemente representam momentos de inflexão, em que a dinâmica dos sedimentos sai de um estado estabilizado para uma situação de retenção. A vazante, por outro lado, em geral, mostrou-se como momentos fim de acúmulo e início de períodos de estabilização.

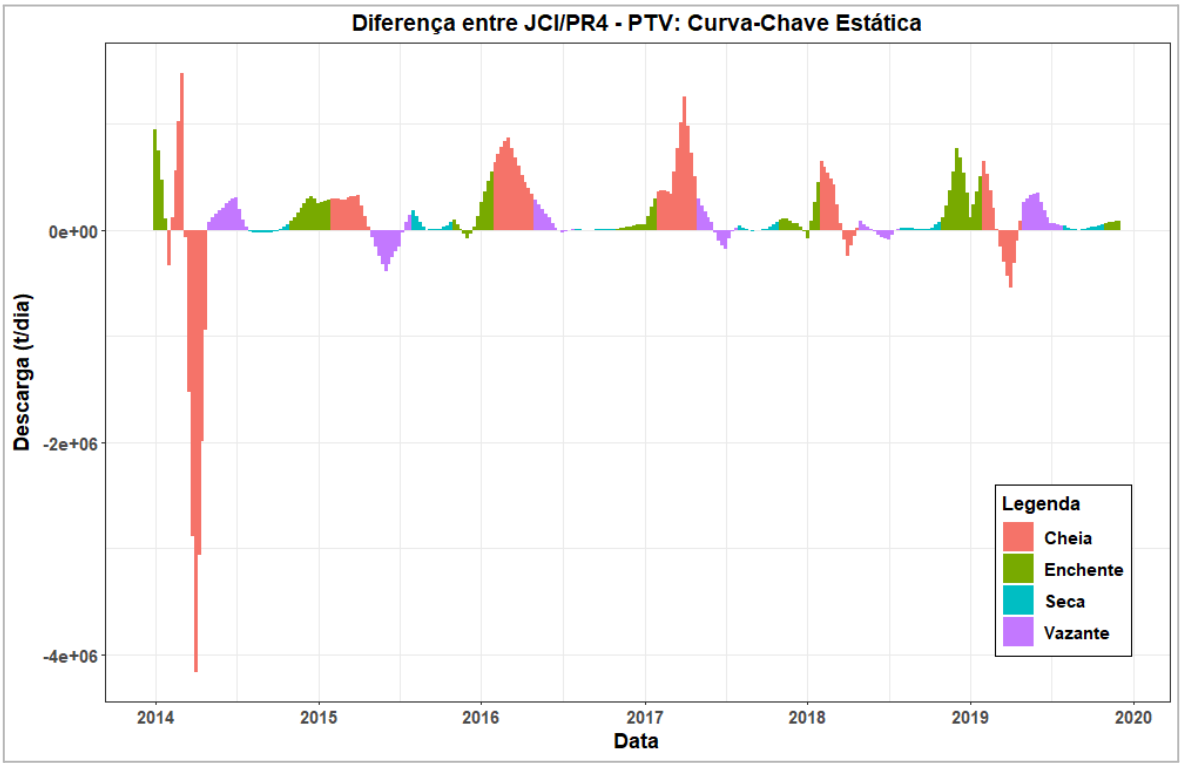


Figura 5.7. Estimativa de acumulação/perda semanal por período hidrológico.

O balanço das areias contabilizou, por meio da metodologia de curva-chave estática, uma perda de cerca de 4,75 milhões de toneladas de areia nos anos de 2014 a 2019. Somente no ano de 2014, 2,5 milhões de toneladas de areia foram perdidas, principalmente na cheia histórica de fevereiro a abril, conforme pode ser visto nas figuras 5.8 e 5.9.

Comparando com a série temporal da figura 5.5, que mostra as séries geradas, fica evidente o motivo de o balanço chegar a valores negativos dessa magnitude, pois as areias para as estações a montante foram mais subestimadas que as de Porto Velho. Esta subestimativa da entrada de areias, principalmente na época das cheias, resulta no panorama da figura 5.9.

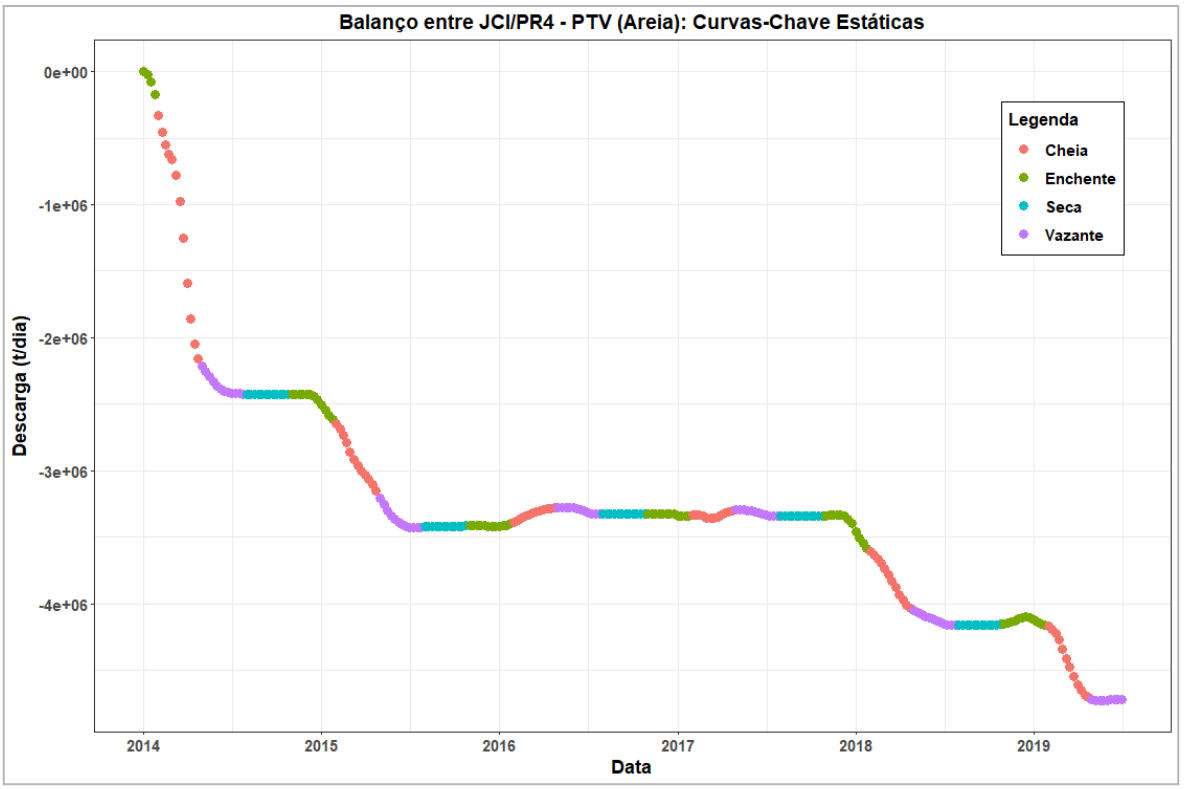


Figura 5.8. Estimativa de acumulação/perda de areias entre JCI/PR4 e PTV.

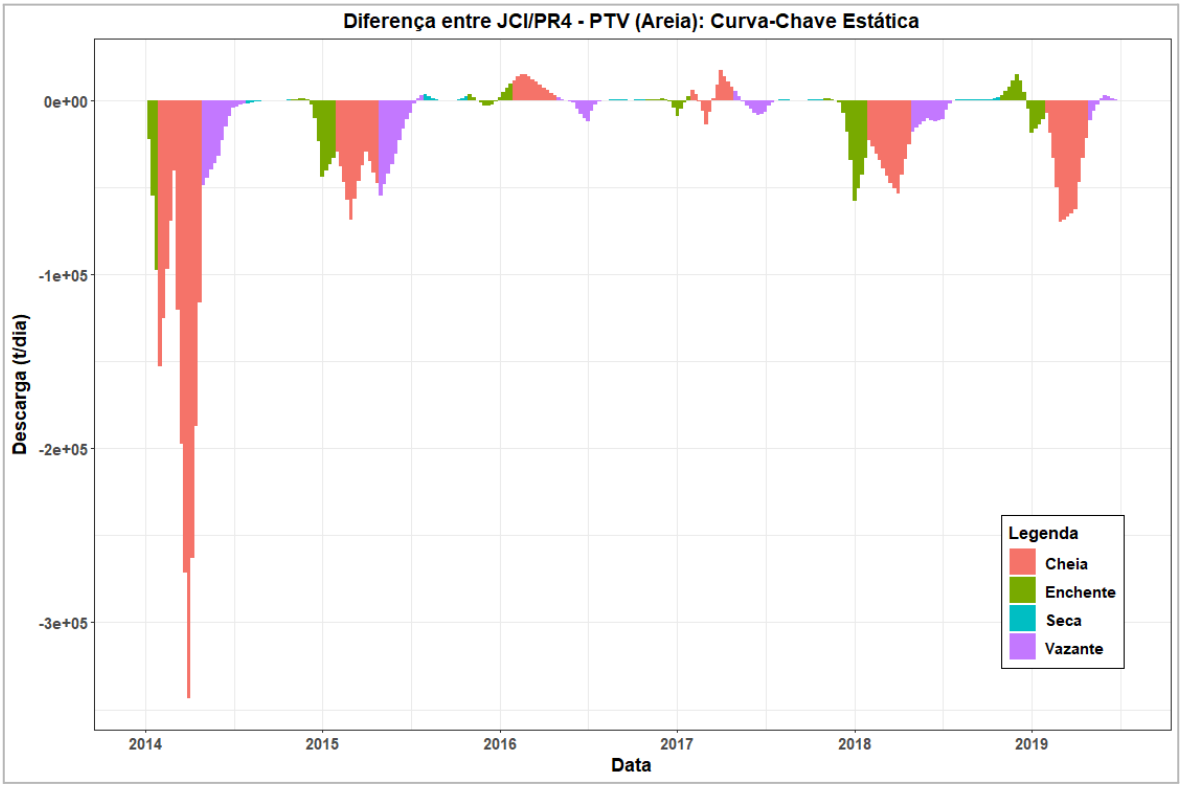


Figura 5.9. Gráficos de colunas indicando se está perdendo ou retendo sedimentos em determinado período hidrológico para areias via curva-chave estática.

5.3. BALANÇO CURVAS-CHAVE DINÂMICA

A seguir, são apresentados os coeficientes da regressão variando mensalmente ao longo dos anos, as séries temporais de descarga de sólidos totais e de areia geradas com os coeficientes de regressão obtidos semanalmente, e o balanço a partir desses resultados.

5.3.1. COEFICIENTES E HIPERPARÂMETROS ESTIMADOS

Na tabela 5.3 estão tabelados os hiperparâmetros estimados pela função de verossimilhança, que são a variância associada à equação de observação, V, e as variâncias relacionadas aos coeficientes da equação de estado W1 e W4.

Tabela 5.3. Hiperparâmetros estimados pela função log-verossimilhança.

Local	Hiperparâmetros Estimados		
	V	W1: Associado ao Intercepto	W4: Associado ao Coef. Angular
Montante Sed Totais	2.521×10^{-2}	1.185×10^{-8}	6.566×10^{-4}
Montante Areias	0.1002	0.0348	$7{,}294 \times 10^{-4}$
Jusante Sed Totais	1.779×10^{-2}	1.440×10^{-2}	2.197×10^{-10}
Jusante Areias	1.891×10^{-1}	1.451×10^{-10}	6.271×10^{-5}

Os coeficientes que tiveram valores dos hiperparâmetros na ordem de grandeza entre 10^{-5} a 10^{-10} tiveram pouca ou nenhuma variação, como pode ser visto nas figuras 5.10 e 5.11. Isso significa que a função verossimilhança retornou valores de hiperparâmetros muito baixos, ou seja, os coeficientes lineares para os modelos de sedimentos totais a montante e de areia a jusante ficaram praticamente estáveis, e o coeficiente angular do modelo de sedimentos totais a jusante ficou estável. Os outros coeficientes desses modelos tiveram variação, mesmo que suave.

Na figura 5.10, os coeficientes lineares mensais são apresentados em quatro linhas, com duas fazendo referência às descargas de sedimentos totais (linha vermelha) e de areia (linha preta) das estações de montante, e as outras duas associadas à estação de jusante, linha azul para sedimentos totais e linha verde para as areias.

Os únicos coeficientes lineares que apresentaram variação significativa foram os de montante para areias (linha preta), e de jusante para os sedimentos totais. Os outros coeficientes tiveram variações muito baixas (na quinta casa decimal ou acima).

É possível identificar que o intercepto dos sedimentos totais de jusante tendem a ter uma variação ao longo do tempo sempre ao redor de um intervalo de -3,8 a -4,1, enquanto o intercepto das areias a montante aparenta ter uma tendência de crescimento ao longo dos anos. Além disso, parece que os valores dos interceptos quando se trata de areia são ao menos duas vezes menores que os interceptos dos sedimentos totais.

Em relação aos coeficientes angulares, a figura 5.11 apresenta os resultados obtidos. O coeficiente angular dos sedimentos totais a jusante se manteve estável ao longo do período analisado. A linha verde variou suavemente ao longo de 2014 a 2019, enquanto as linhas associadas aos sedimentos totais e de areia das estações a montante tiveram oscilações.

O coeficiente angular de areia da estação a montante teve uma tendência a diminuir seu valor a partir de 2014, com suaves aumentos e diminuições nos diferentes períodos hidrológicos. O coeficiente dos sedimentos totais, por sua vez, teve seu menor valor após a cheia histórica de 2014, mas seus valores ficaram oscilando de 2,00 a 2,25 de forma estável.

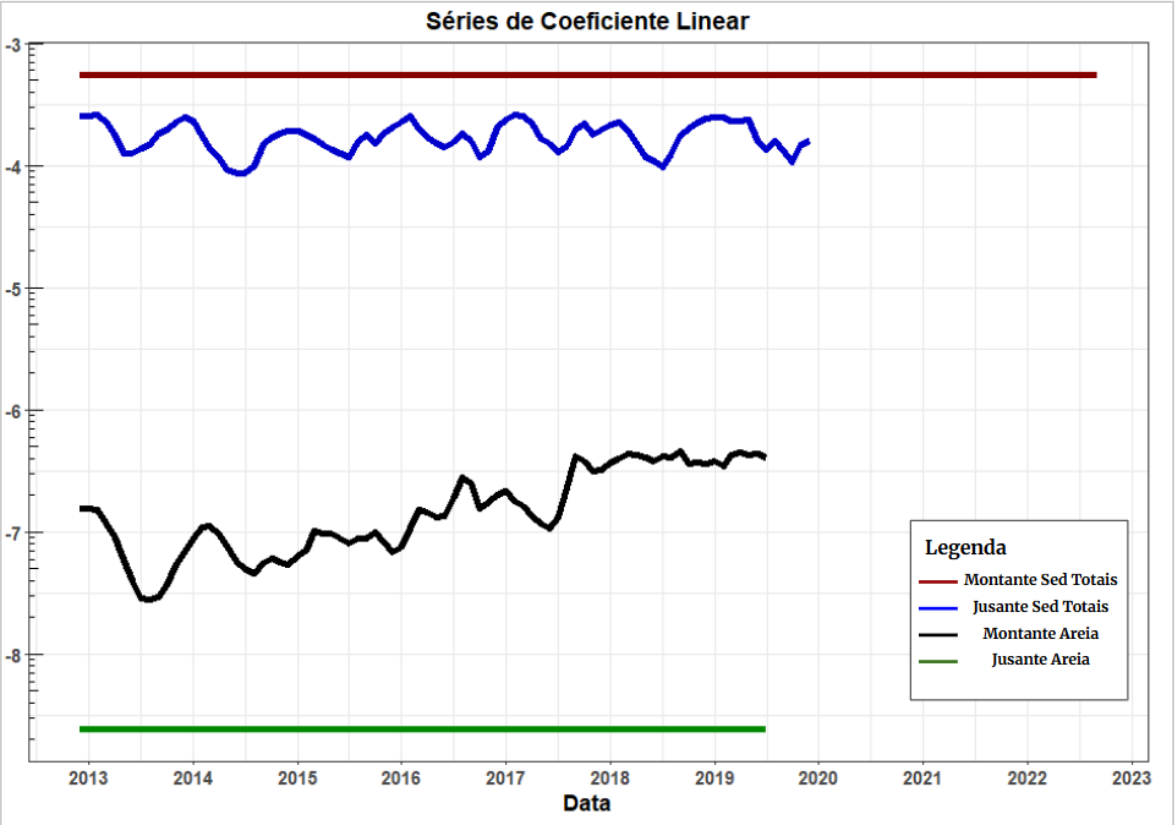


Figura 5.10. Séries temporais dos coeficientes lineares.

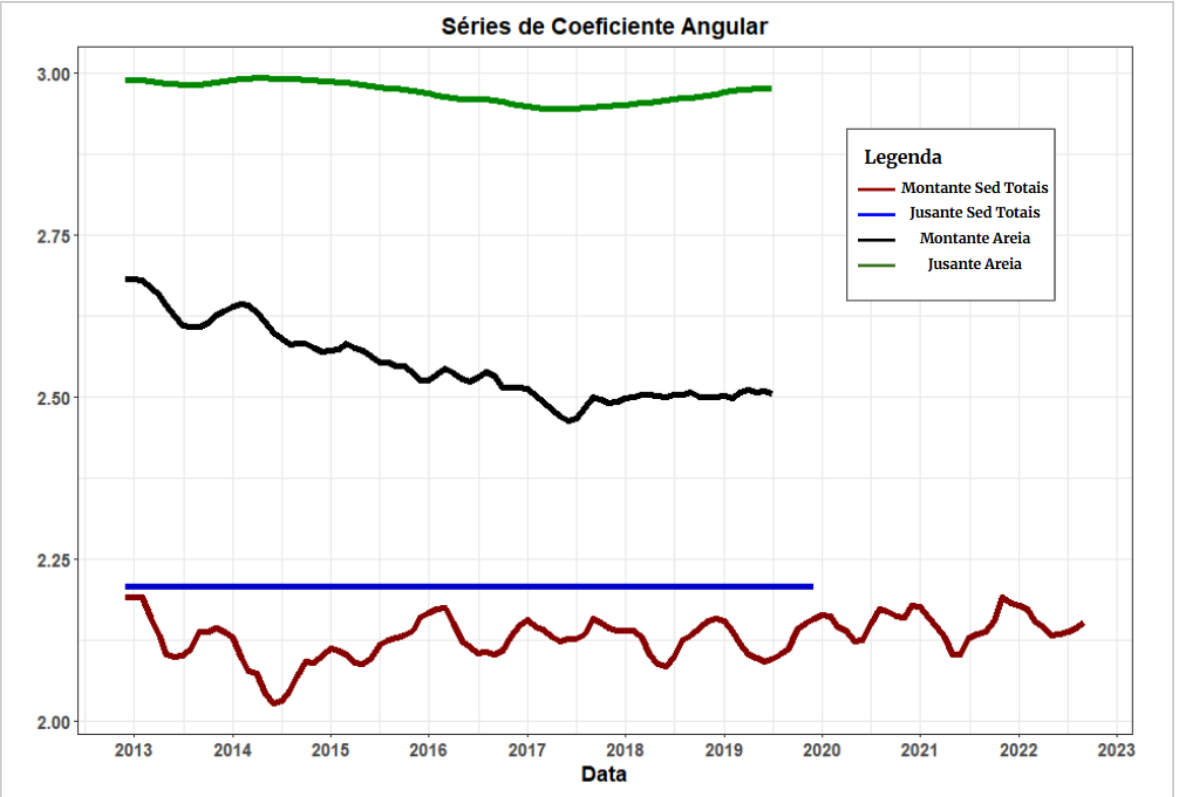


Figura 5.11. Séries temporais dos coeficientes angulares

Somente os coeficientes de areia a montante tiveram variações no intercepto e no coeficiente angular, e ambos tiveram alguma tendência, de aumento, no caso do intercepto, e de diminuição, no caso do angular, o que pode indicar que o sistema estava sofrendo efeitos de uma ou várias alterações que impactaram o comportamento das areias, e que a partir do segundo semestre de 2017 o efeito dessa(s) ação(ões) não era mais tão significativo.

Nos outros casos, apenas um dos coeficientes variou, seja o angular ou intercepto. Segundo Asselman (2000), a variação do intercepto está associada aos eventos que ocorrem na bacia (chuvas, terremotos, urbanização), e a variação do coeficiente angular a variação da vazão do rio. No entanto, para associar para o caso deste estudo alguma relação entre essas ideias e os dados dos coeficientes apresentados, é necessário ter mais informações envolvidas em outras questões, como outros estudos de simulação, uso de outros dados de monitoramento como a batimetria, desmatamento, operação das usinas e tentar cruzar essas informações para obter uma avaliação mais detalhada dos processos de assoreamento e ressuspensão.

5.3.2. SÉRIES DOS SEDIMENTOS VIA CURVA-CHAVE DINÂMICA

A partir dos coeficientes mensais obtidos pela metodologia descrita na seção 5.3.1, foi feita uma interpolação entre os valores mensais e obtidos valores de coeficientes semanais, que foram utilizados para encontrar as descargas sólidas de sedimentos totais e de areia.

Na figura 5.12, a abordagem de curva-chave dinâmica, gerou a linha em roxo, que é a descarga sólida de sedimentos totais para as estações a montante da UHE Santo Antônio, enquanto em verde está a série para a descarga observada em campo.

Embora o modelo não tenha representado os picos de descarga de forma adequada - a maior diferença foi para 2016, com um valor de aproximadamente 2 milhões de toneladas - ele acompanhou o comportamento nos distintos períodos hidrológicos das observações coletadas em campo.

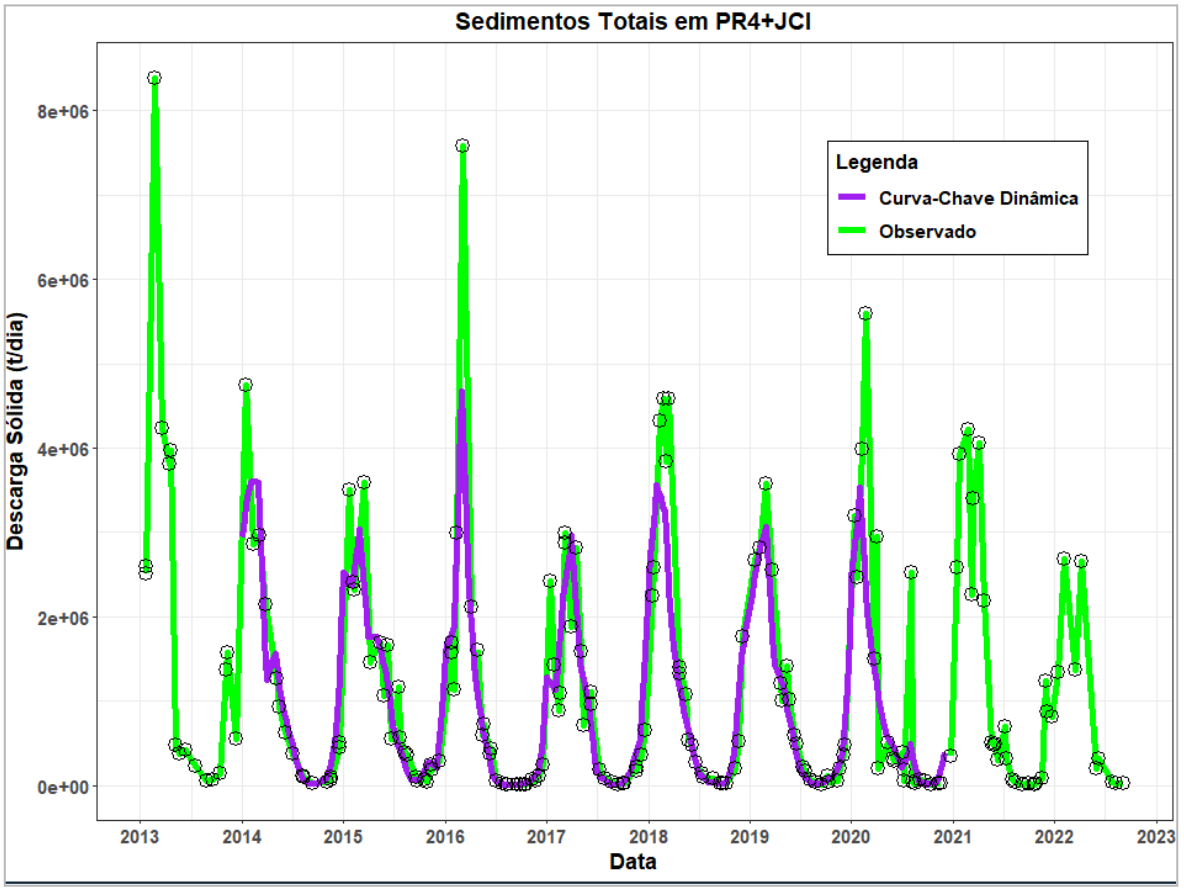


Figura 5.12. Comparação entre sedimentos totais observados mensais e sedimentos totais gerados via coeficientes das curvas-chave dinâmica para as estações a montante JCI e PR4.

Os sedimentos totais estimados para Porto Velho, que também está em roxo na figura 5.13, apresentou um comportamento visualmente melhor que a série temporal gerada da figura anterior, uma vez que os picos de descarga foram bem representados pelo modelo, com exceção do ano de 2018, que o modelo estimou 1 milhão de toneladas a menos que o valor observado.

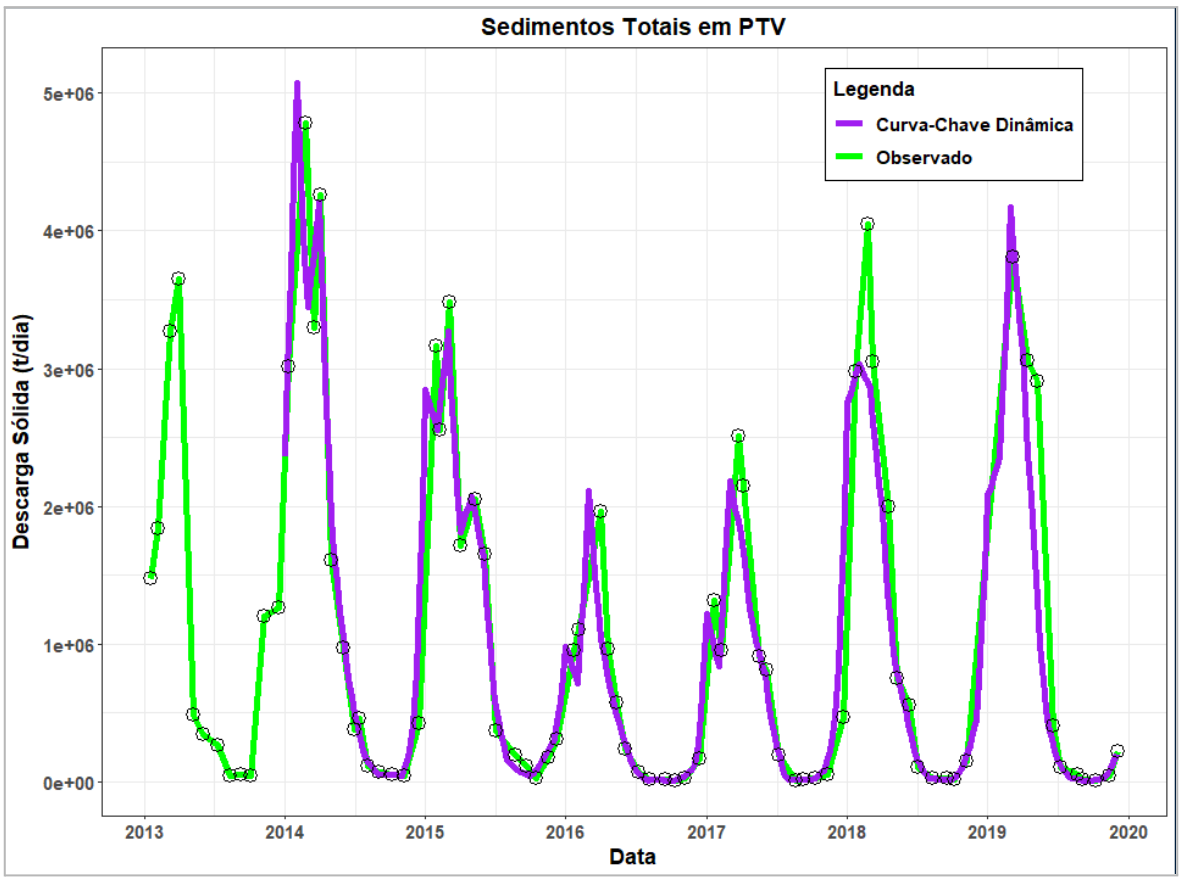


Figura 5.13. Comparação entre sedimentos totais observados mensalmente e sedimentos totais gerados a partir das curvas-chave dinâmica para a estação a jusante de PTV.

Em relação às areias, as figuras 5.14 e 5.15 apresentam as descargas para montante e jusante, respectivamente. As descargas de areia para PR4+JCI foram subestimadas nos momentos de maior descarga, enquanto a série de descarga de areia usando os coeficientes semanais gerou uma série com valores de descarga de areia em pelo menos 5 vezes maior do que a série temporal dos dados observados.

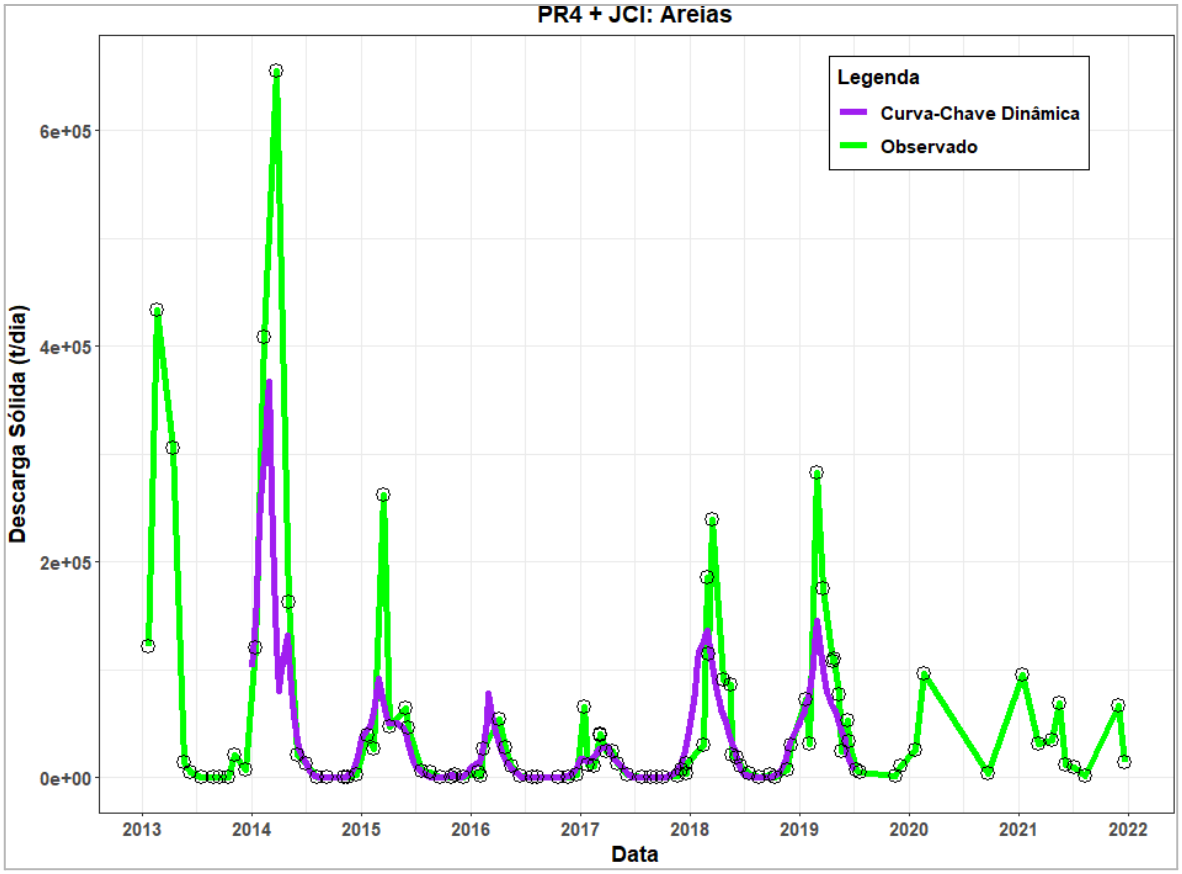


Figura 5.14. Descarga de areias estimadas via curva-chave dinâmica e dados observados a montante da UHE Santo Antônio.

Esses valores superestimados na série das areias a jusante podem estar relacionados ao preenchimento de falhas na série com valores médios mensais, que podem ter gerado coeficientes não representativos do sistema. Todavia, é pouco provável que esse seja o problema, devido aos intervalos coeficientes pelo modelo dinâmico (angular: 2,87 a 3,00; intercepto: aproximadamente -8,8) para areia a jusante serem semelhantes aos coeficientes gerados pela curva-chave estática: coeficiente angular igual a 2,99 e intercepto igual a -8,73.

Embora os coeficientes da curva estática estejam próximos ao do modelo dinâmico, é possível que o problema esteja nos dados de entrada do modelo. Com base nisso, o motivo para esses valores superestimados podem estar nos valores iniciais pré-definidos para a média (m_0) e variância (c_0) do vetor de estado, que foram, respectivamente, iguais a 0 e 1 x 10^7, que são valores padrão na função dlmReg.

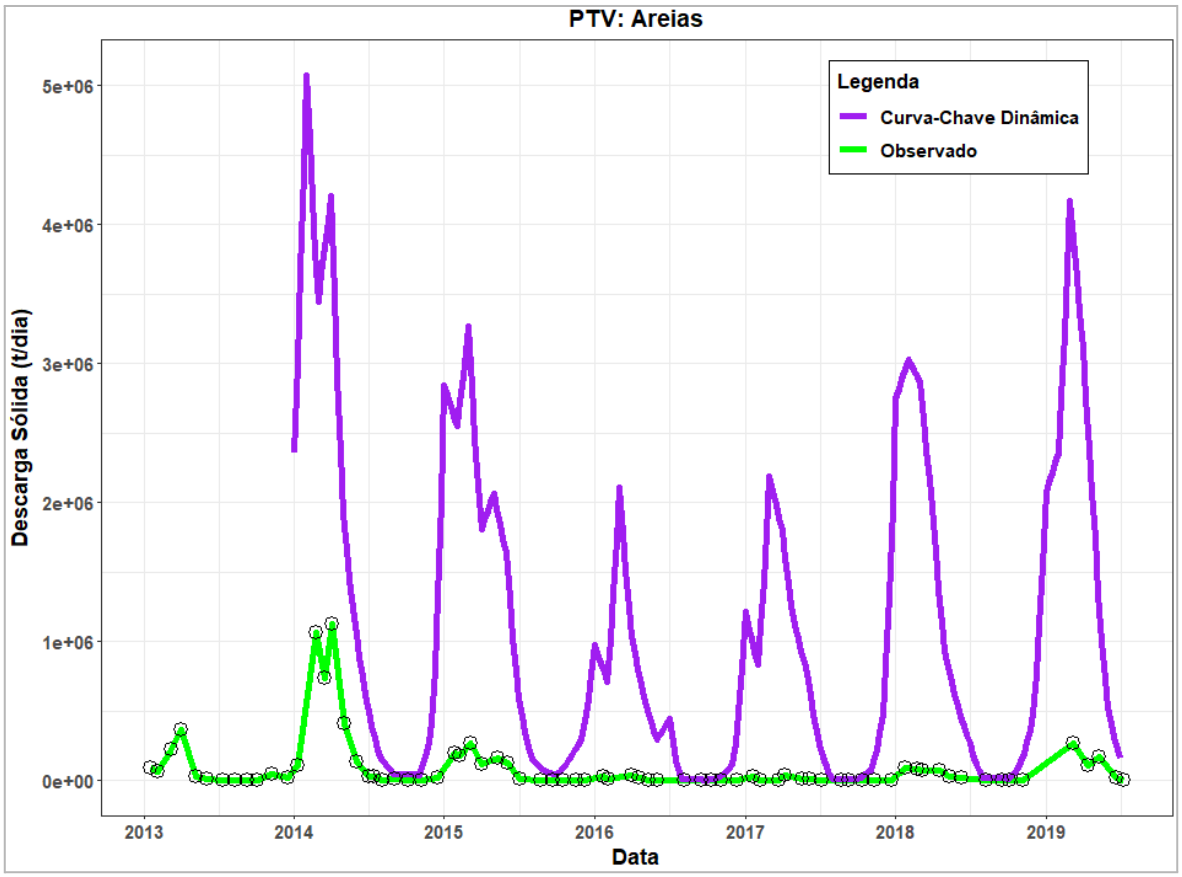


Figura 5.15. Descarga de areias estimadas via curva-chave dinâmica e dados observados a jusante da UHE Santo Antônio.

5.3.3. BALANÇO

Em se tratando dos balanços realizados para esta metodologia de utilizar os coeficientes da curva-chave variando semanalmente para estimar os sedimentos, a figura 5.16 demonstra que durante a cheia de 2014 houve um perda de 20 milhões de toneladas de sedimentos, que posteriormente foi restaurada pela cheia de 2016.

De 2016 a 2018 um incremento gradual de sedimentos foi acontecendo até chegar na cheia de 2019, quando houve novamente uma perda, dessa vez de 10 milhões de toneladas, resultando ao final de 2019 num saldo de retenção de aproximadamente de 10 milhões de toneladas.

Na figura 5.17, fica mais evidente o papel das cheias nas variações de sedimentos, uma vez que nos 6 períodos de cheia, ou ela foi o principal momento de aumento ou diminuição de sedimentos ou foi uma das principais, como é o caso de 2015, que não é possível distinguir qual período contribuiu mais. Além disso, os anos de 2014 e 2016 foram os anos que mais relevantes em termos de contribuição/perda de sedimentos.

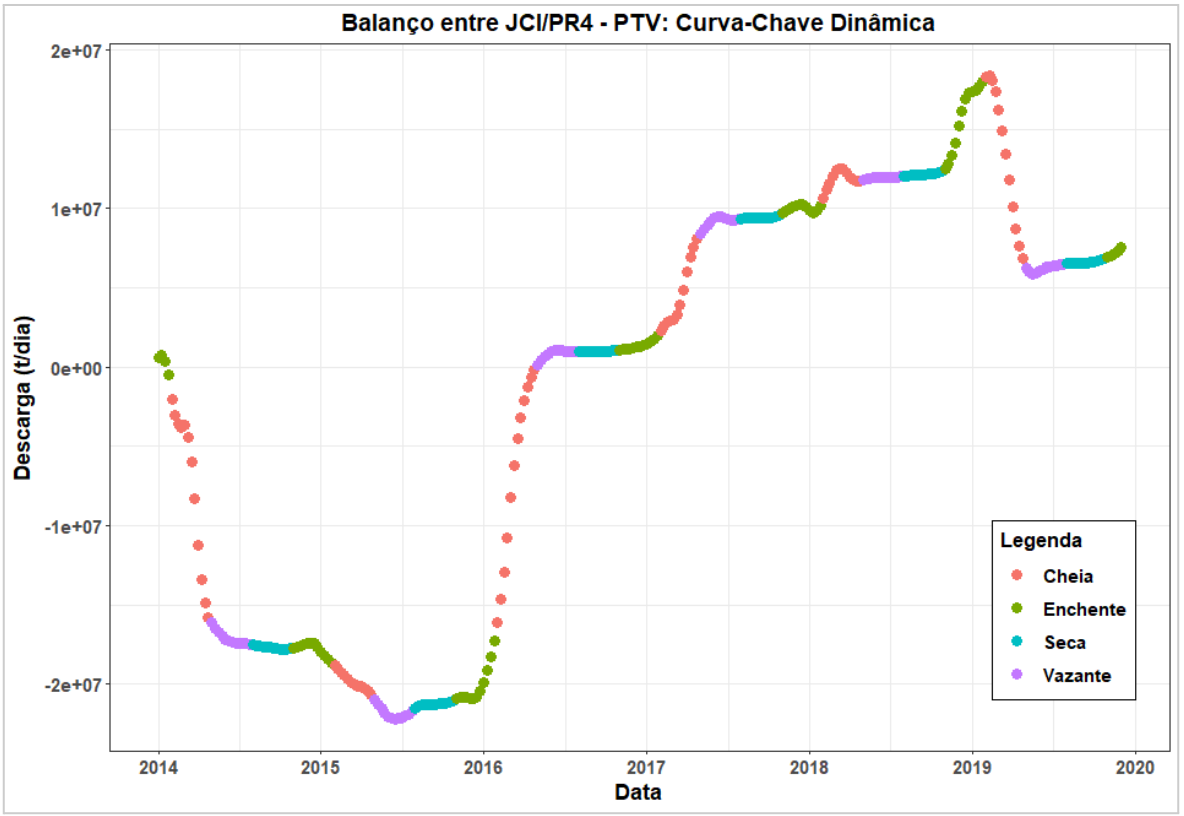


Figura 5.16. Balanço dos sedimentos totais a partir do resultados dos sedimentos via curvas-chave dinâmicas.

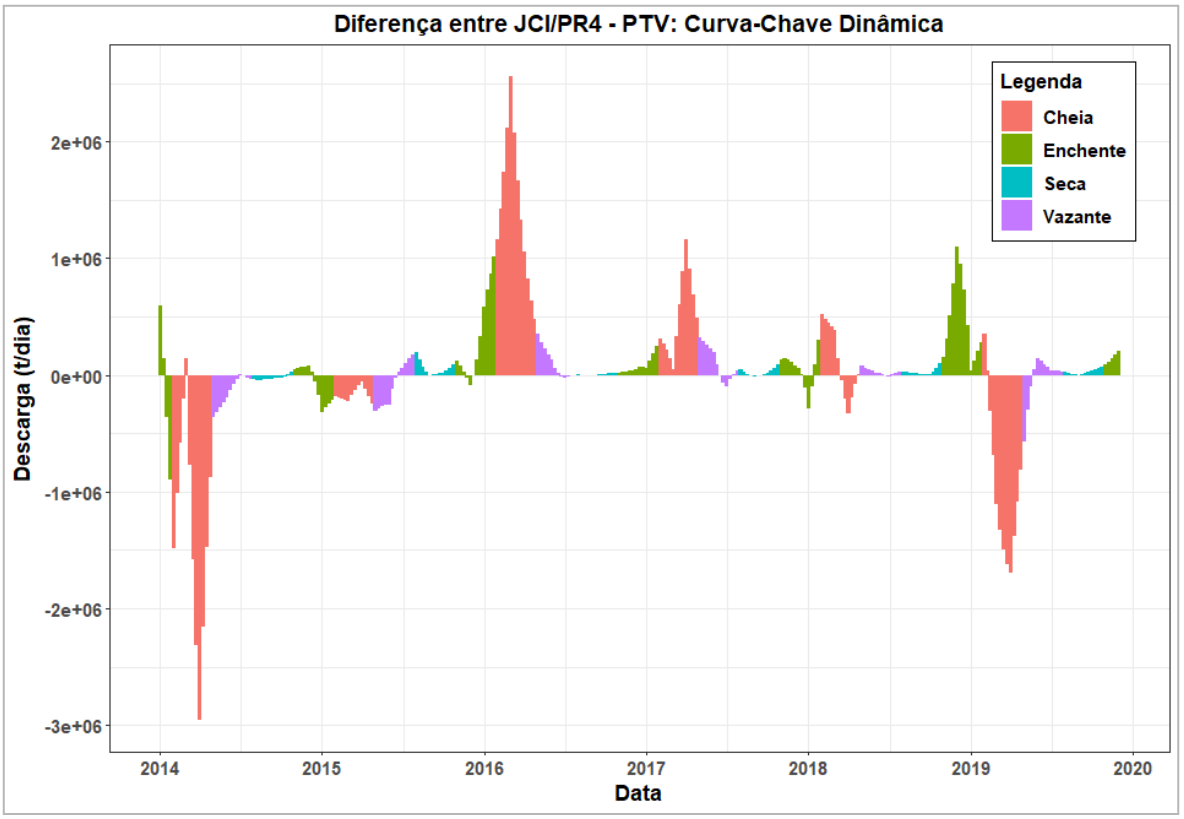


Figura 5.17. Gráficos de colunas indicando se está perdendo ou retendo sedimentos em determinado período hidrológico para sedimentos totais no balanço via curva-chave dinâmica.

Diferentemente dos sedimentos totais, o balanço das areias gerado na Figura 5.18 resultou em somente perdas de areias nos anos de 2014 a 2019. Fortemente influenciado pelo resultado superestimado de areias de Porto Velho, a perda estimada no balanço foi de 300 milhões de toneladas de areia.

Esse resultado não tem coerência ao se avaliar o acúmulo e/ou perda máxima nos balanços para sedimentos totais desta metodologia, que gira em torno de 20 milhões de toneladas, o que evidencia que o modelo utilizado não descreveu bem o fenômeno.

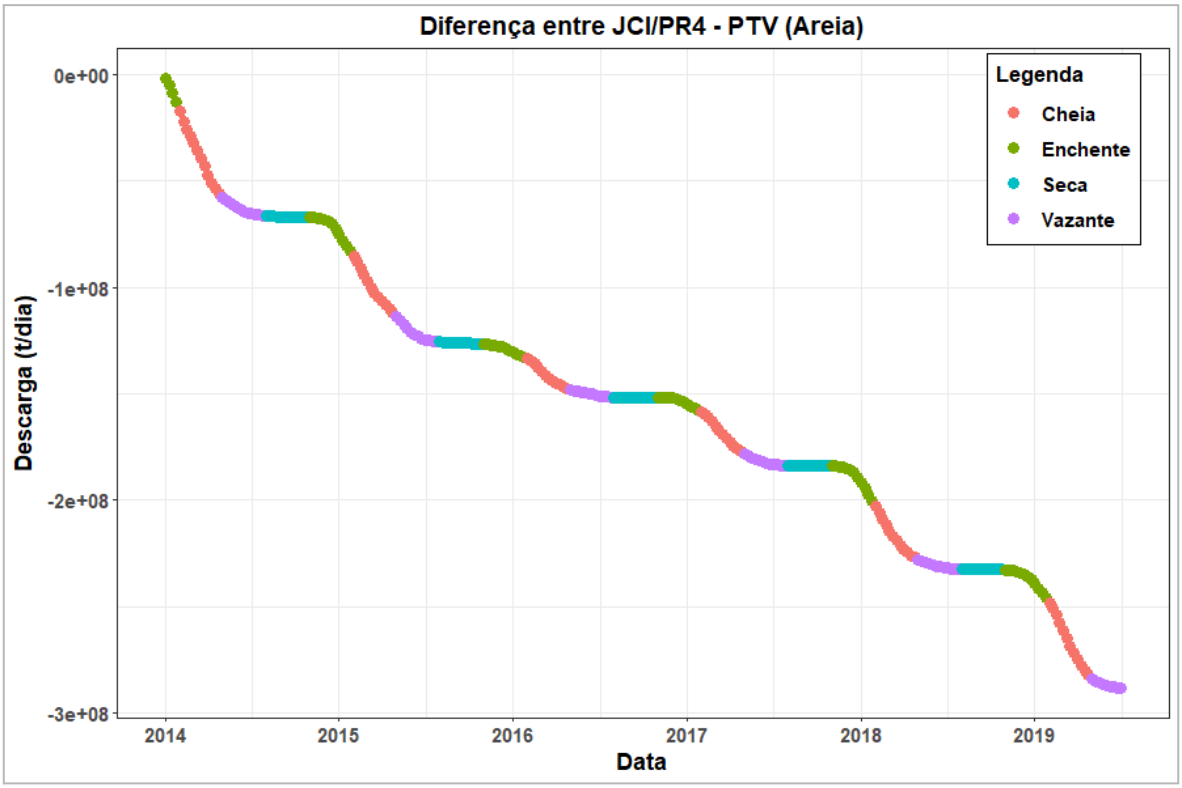


Figura 5.18. Balanço das areias a partir do resultados dos sedimentos via curvas-chave dinâmicas.

5.4. COMPARAÇÃO ENTRE OS BALANÇOS

A figura 5.19 apresenta uma comparação visual entre os três balanços para sedimentos totais realizados: a partir dos dados observados mensais (linha verde), sedimentos gerados a partir de curva-chave estática em escala diária e curva-chave dinâmica com sedimentos estimados em escala semanal.

Visualmente, o balanço de sedimentos por ambas curva-chave conseguiu captar as várias alterações de acúmulo/retenção do balanço de sedimentos da escala mensal, e conseguiram demonstrar que ocorreu acúmulo de sedimentos nos seis anos que foram analisados.

Em termos numéricos, o balanço pelas curva-chave estática estimou um acúmulo de 30 milhões de toneladas de sedimentos, enquanto o da curva-chave dinâmica por volta de 10 milhões de toneladas, uma diferença de cerca de 3 vezes. O balanço com os dados observados estima um acúmulo de 4 milhões, com a ressalva de que nem todos os meses do intervalo de tempo analisado tinham dados disponíveis, o que pode alterar o resultado final.

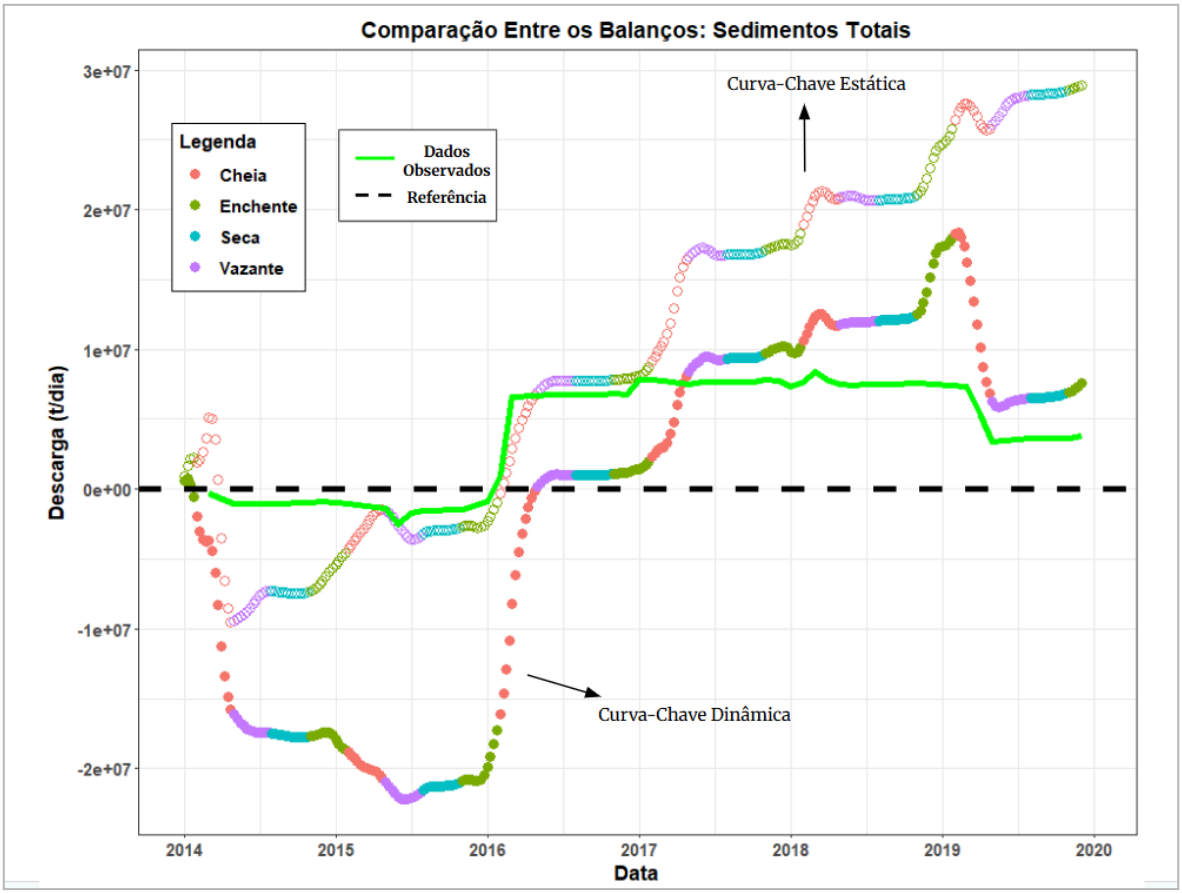


Figura 5.19. Comparação entre todos os balanços produzidos para sedimentos totais.

Os dois modelos de curva-chave apresentam um comportamento similar nos períodos hidrológicos, com secas estáveis, enchentes que iniciam acúmulos de sedimentos e vazantes que o acúmulo diminui. Com relação às cheias, o resultado se torna mais incerto, como é possível ver na figura 5.19, em que alguns anos ocorre um aumento de sedimentos no trecho, mas em outros há perdas consideráveis, principalmente no modelo dinâmico. No entanto, o modelo dinâmico obteve-se um resultado mais próximo ao observado em campo.

Em uma análise com somente o balanço mensal e o balanço com os dados da curva-chave dinâmica, identifica-se que o comportamento dos dados observados foi perseguido pelo modelo, embora haja uma diferença de 6 milhões de sedimentos no período analisado entre balanços (Figura 5.20). Outro detalhe é que o comportamento sedimentológico por período hidrológico foi melhor compreendido a partir do uso dos balanços interanuais dos modelos dinâmicos e estáticos, algo que é mais difícil usando dados mensais.

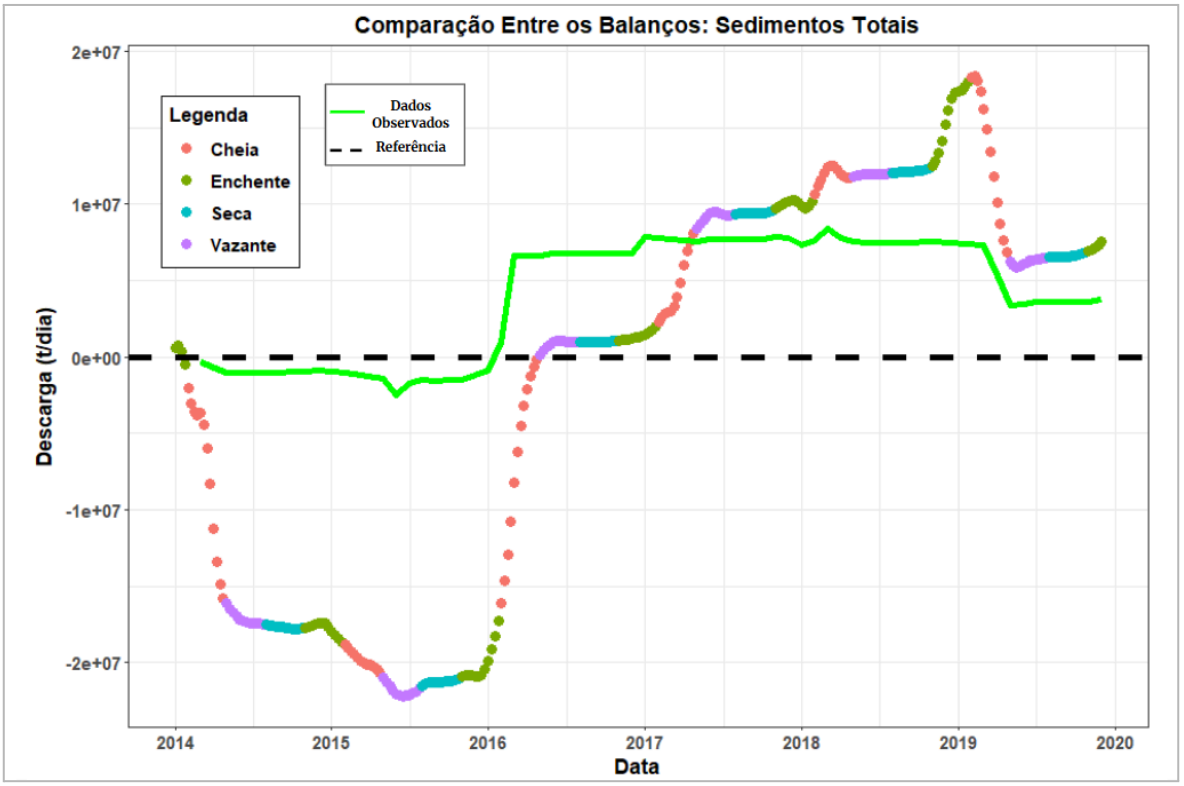


Figura 5.20. Comparação entre os balanços dos dados observados e a curva-chave dinâmica.

Quanto à comparação entre o balanço das areias (figura 5.21), o estático apresentou uma perda de 4 milhões de areias, enquanto o balanço dos dados observados estimou uma perda 1,5 milhão de toneladas de areia, demonstrando que os modelos apresentaram uma diferença de 2,5 milhões de toneladas.

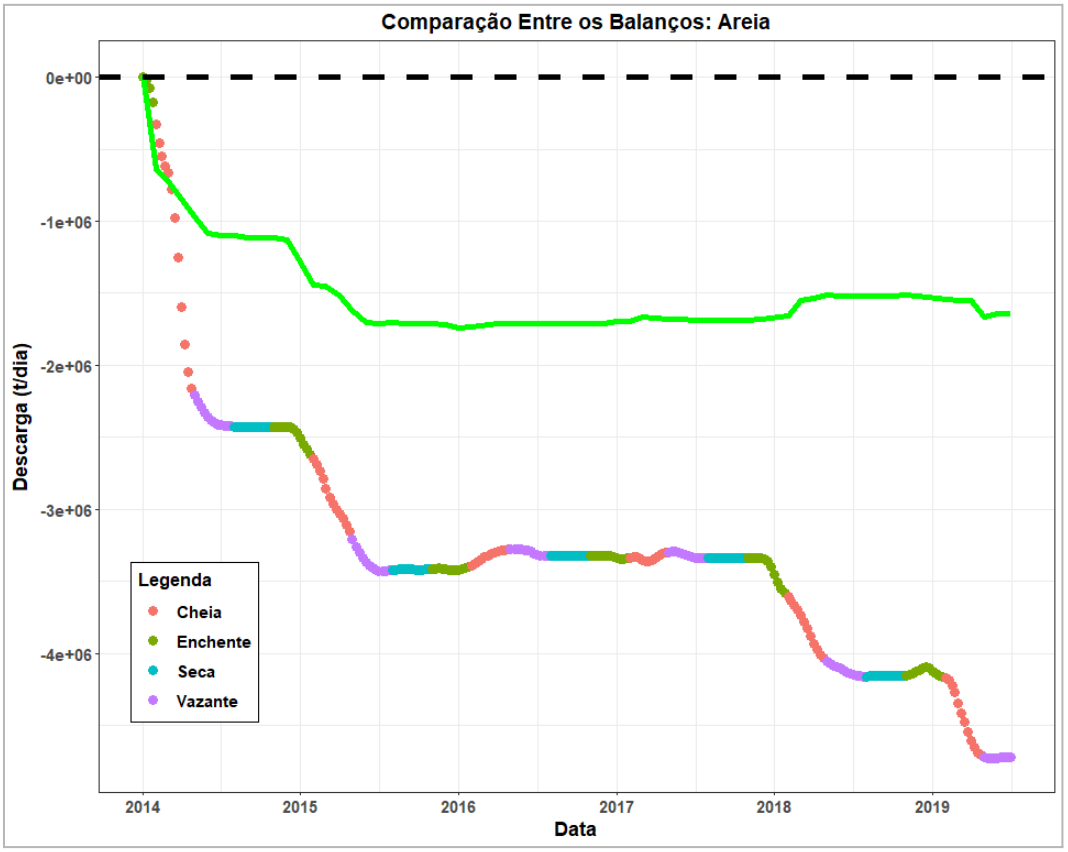


Figura 5.21. Comparação entre o balanço cumulativo dos dados observados e das curva-chave estáticas.

5.5. COMPARAÇÃO ENTRE AS SÉRIES GERADAS

As séries estimadas de sedimentos totais para as estações de montante combinado são apresentadas na figura 5.22, onde é possível compará-las. Visualiza-se que a série gerada pela curva dinâmica apresentou uma aderência melhor que a série pela curva estática na maior parte dos períodos hidrológicos nos anos de 2014 a 2019, dado que ela teve uma distância menor da série de dados observados.

A curva-chave estática se mostrou suscetível aos valores de vazão, superestimando os sedimentos em vazões muito altas, como na cheia histórica de 2014 e subestimou em outros momentos, em que a vazão não era tão elevada quanto em 2014, mesmo havendo uma presença elevada de sedimentos, como é o caso de 2016.

Em geral, a curva-chave estática, tirando os anos de 2014 e 2016, conseguiu criar uma série capaz de acompanhar o comportamento da série observada com certos valores de saída discrepantes, mas se considerando o nível de incerteza que envolve a questão sedimentológica, obteve um bom desempenho.

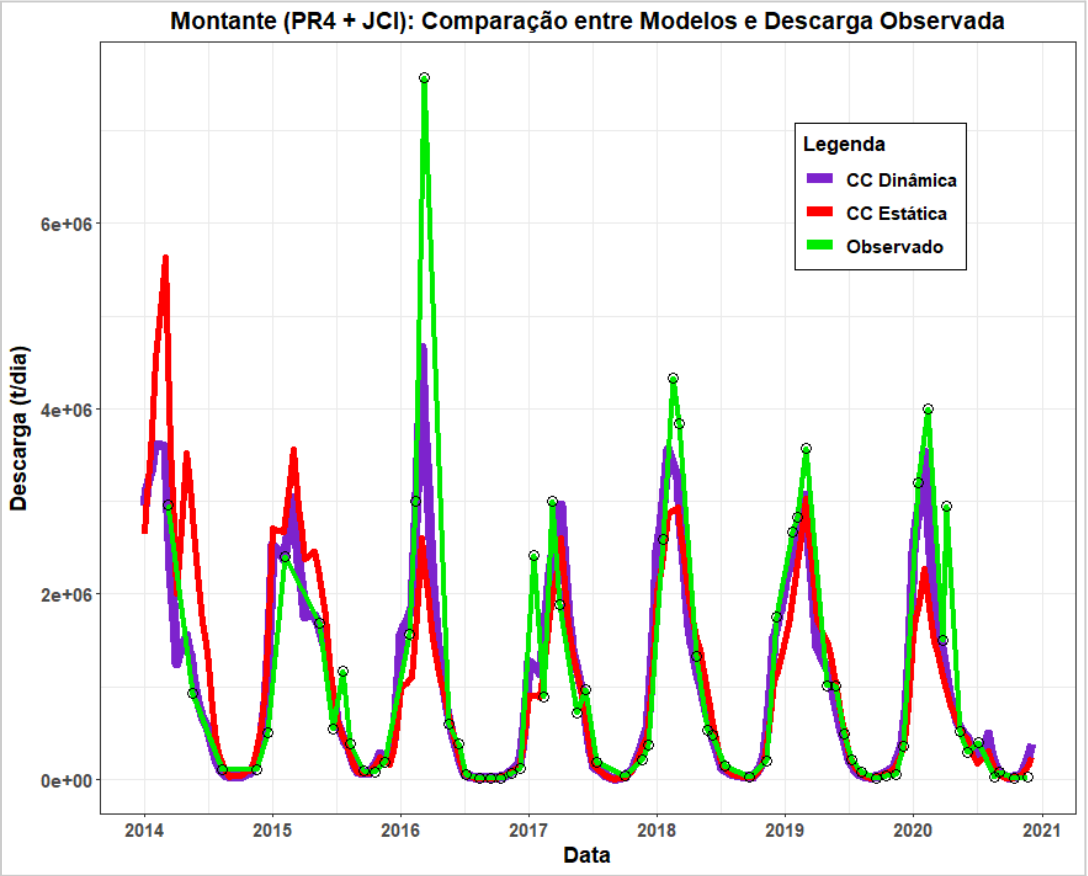


Figura 5.22. Comparação entre as séries geradas pelos modelos e série de descarga observada para sedimentos totais a montante.

As séries geradas para os sedimentos totais de jusante foram aquelas que visualmente melhor conseguiram acompanhar os dados observados em campo, tanto para as curvas-chave estáticas quanto para o modelo dinâmico, como pode ser visto na figura 5.23.

Entre os dois modelos, o dinâmico mostrou um desempenho mais afinado com os dados observados e foi superior aos dados gerados pela curva-estática.

Em termos de quantidade de sedimentos, no ano de 2014, momento que houve maior quantidade de sedimentos no intervalo de tempo analisado, foi estimado 6 milhões de toneladas de sedimentos via curva-chave estática, aproximadamente 5 milhões de toneladas pelo modelo dinâmico, e os dados obtidos em campo indicam cerca de 4,8

milhões de toneladas de sedimentos totais, demonstrando que os modelos conseguiram, de modo razoável, captar o comportamento dos sedimentos no período.

Há de se reforçar, além disso, que o ano de 2018 foi aquele em que a estimativa foi a mais discrepante, com 4 milhões de toneladas para o observado e 3 milhões para o modelo dinâmico e para o modelo estático.

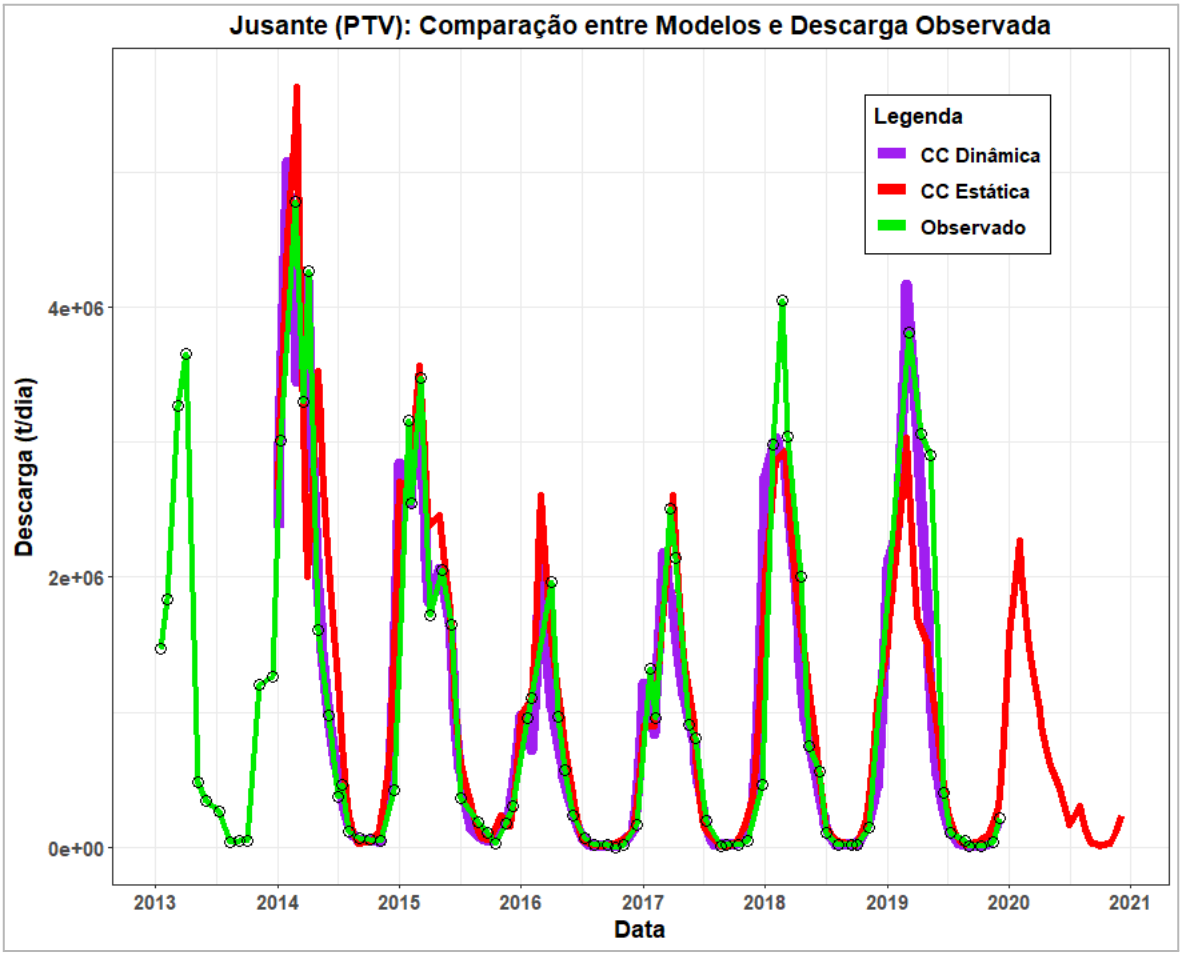


Figura 5.23. Comparação entre as séries geradas pelos modelos e série de descarga observada para sedimentos totais a jusante.

Na figura 5.24, os valores de descarga de areias, observados em campo nas estações de montante (linha verde clara), tiveram variação máxima de 0 a 600 mil toneladas, que não foram aderidas pelos modelos estático e dinâmico, mas eles entenderam o comportamento dos valores medidos em campo e o seguiram.

Em geral, o modelo dinâmico foi superior em representar os valores observados, principalmente em picos de descarga de areia, como é o caso dos anos de 2014, 2018 e 2019. Nos vales os modelos tiveram comportamentos semelhantes.

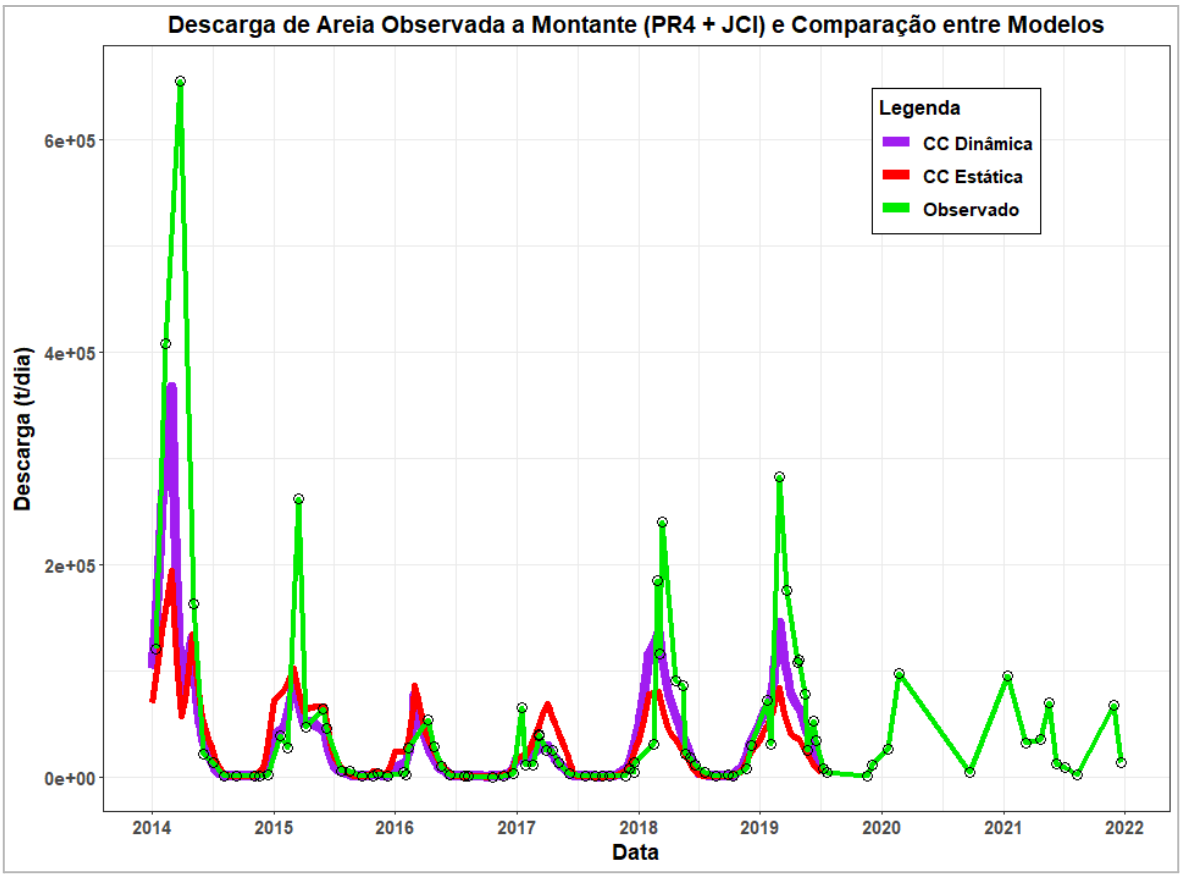


Figura 5.24. Comparação entre as séries geradas pelos modelos e série de descarga observada para areias a montante.

A série de descarga de areia a jusante da UHE Santo Antônio (figura 5.25) pelo modelo dinâmico variou de 0 a 5 milhões de toneladas, enquanto o observado teve seu maior valor na casa de 1 milhão de toneladas de areias e o observado menos de 1 milhão de toneladas. O modelo dinâmico não conseguiu representar a magnitude dos valores observados de forma adequada, superestimando os dados em mais de 5 vezes nos picos, que estão associados às cheias.

O modelo estático, por outro lado, subestimou os valores de descarga de areias, mas conseguiu aderir ao comportamento delas, mesmo com valores discrepantes, o que é um ponto relevante. Portanto, conforme apresentado na figura 5.5 da seção 5.2.2, o modelo estático foi superior na estimativa de areias a jusante.

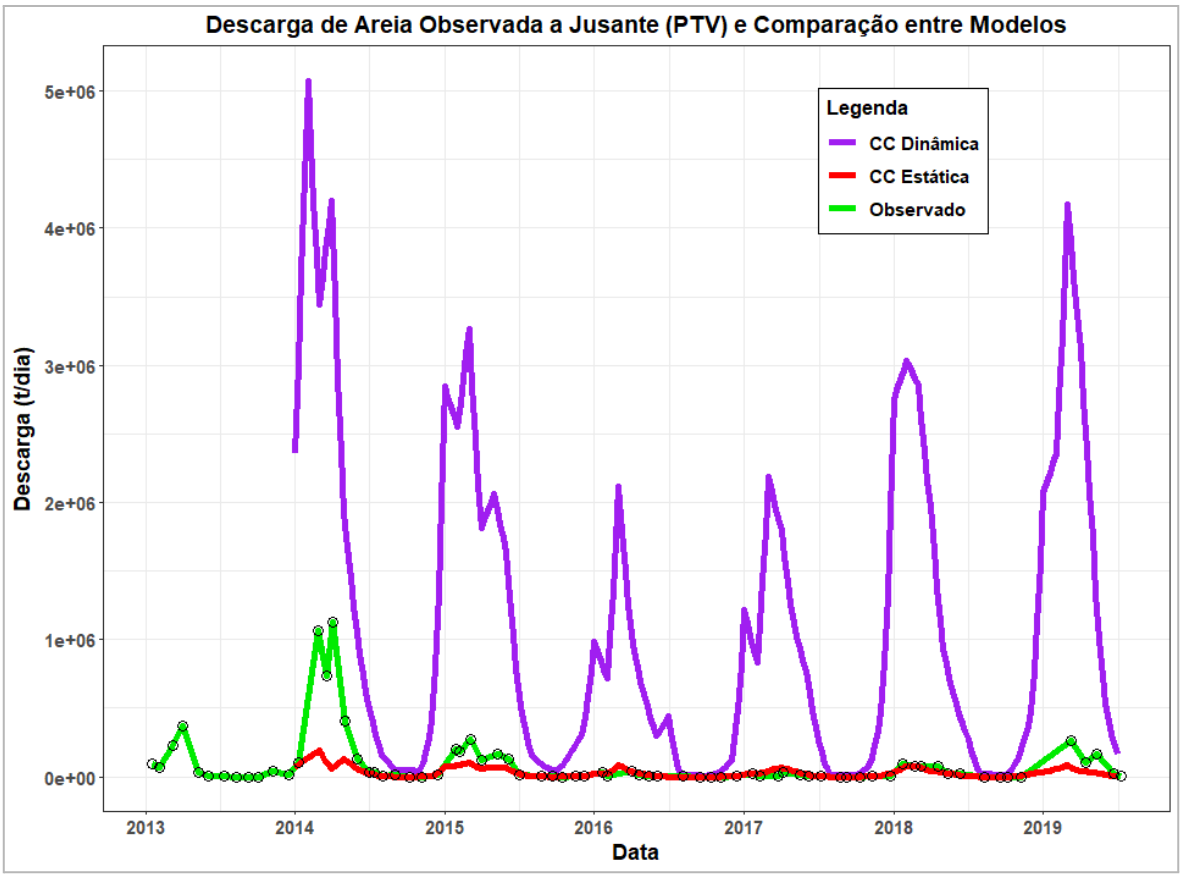


Figura 5.25. Comparação entre as séries geradas pelos modelos e série de descarga observada para areias a jusante

5.6. EIA/RIMA E DADOS OBTIDOS

Os balanços realizados para areias pelo modelo estático e pelos dados observados em campo são os únicos que são comparáveis ao que é esperado no EIA/RIMA. No estudo sedimentológico, espera-se que haja uma retenção de 97% das areias do sistema, no entanto o resultado obtido é de que areia mais sai do que entra no trecho de Jirau a Santo Antônio.

É importante notar, que o trecho analisado do EIA/RIMA possui em torno de 450 km, indo desde a montante de Abunã até após Santo Antônio, englobando o trecho de UHE Jirau, que pode ser um local retendo areias. O trecho analisado neste estudo possui somente 115 km aproximadamente.

Como abordado anteriormente, na seção 5.1, os motivos que descrevem os resultados podem estar relacionados à operação das usinas, como horário de pico, se a barragem está vertendo, que pode alterar a medição dos sedimentos. Além disso, há a possibilidade de que as areias estejam permanecendo no trecho anterior a Jirau, e por isso, menos areia está entrando no trecho adiante. Estudos realizados demonstraram a deposição de areias no remanso de Jirau (Moura et al, 2024).

Diante disso, é preciso cautela nas avaliações a respeito das areias ao longo do Rio Madeira, sendo necessárias novas análises para investigar o estado do comportamento das areias principalmente no trecho anterior a UHE Jirau.

6. CONCLUSÃO

O uso dos balanços interanuais comportamentos permitiu identificar comportamento semelhante nos períodos hidrológicos - análise que foi mais complicada com dados observados mensais - que foram cheias que podem tanto acumular quanto estimular a perda de sedimentos; vazantes em que ocorrem diminuições na acumulação de sedimentos, enchentes onde se inicia momentos de acumulação e seca em que praticamente a quantidade de sedimentos ficam estáveis.

Para os três balanços realizados para sedimentos totais, em todos foi verificado um acúmulo de sedimentos no trecho de 115 km entre a UHE Jirau e a UHE Santo Antônio. No entanto, os valores pelos distintos balanços realizados foram discrepantes entre si, tendo o balanço com dados observados por volta de 4,5 milhões de toneladas de sedimentos totais, o com curva-chave dinâmica cerca de 10 milhões e o estático 30 milhões, demonstrando que para sedimentos totais, o modelo dinâmico estimou valores mais próximos ao observado que o estático.

Em relação às areias, o modelo dinâmico para a estação de Porto Velho não conseguiu representar a escala dos valores observados, superestimando em até 5 vezes a quantidade de areia coletada em campo. Problema esse que pode estar relacionado aos valores de entrada do modelo. Para a estação de montante, as séries geradas por modelos dinâmicos conseguiram representar de modo mais adequado o comportamento das areias, embora tenha sido subestimada. Enquanto isso, o modelo estático subestimou tanto para Porto Velho, quanto para as estações a montante, a quantidade de areia no trecho em análise, todavia apresentou um desempenho melhor para as areias que o dinâmico, considerando os parâmetros utilizados.

Os coeficientes e os resultados apresentados a partir do modelo dinâmico, mostram que o sistema está em constante alteração e há ganho em utilizar esse modelo, uma vez que ele consegue captar comportamentos do sistema que o estático não conseguiria. Ademais, houve variação de ao menos um coeficiente (intercepto ou coeficiente angular), para areias e sedimentos totais jusante ou montante, com destaque para as areias a montante, em que ambos os coeficientes variaram, com tendência e uma estabilização a partir do ano de 2018.

Além disso, o balanço hidrossedimentológico do EIA/RIMA em comparação aos elaborados tiveram resultados distintos, indicando a necessidade de avaliação conjunta das

UHE Jirau e Santo Antônio, com o intuito de avaliar o comportamento das areias em uma escala maior, e identificar as causas dos resultados encontrados.

Ademais, para trabalhos futuros, recomenda-se o estudo dos modelos dinâmicos, utilizando abordagens distintas para obter os hiperparâmetros, que neste estudo foi feito via função verossimilhança, assim como o uso de valores diferentes dos parâmetros iniciais para o vetor de estado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHN, K.-H.; STEINSCHNEIDER, S. Time-varying suspended sediment-discharge rating curves to estimate climate impacts on fluvial sediment transport. Hydrological Processes, v. 32, n. 1, p. 102–117, 2018.

AHN, K.-H.; YELLEN, B.; STEINSCHNEIDER, S. Dynamic linear models to explore time-varying suspended sediment-discharge rating curves. Water Resources Research, v. 53, n. 6, p. 4802–4820, 2017.

ASSELMAN, N. E. M. Fitting and interpretation of sediment rating curves. Journal of Hydrology, v. 234, n. 3, p. 228–248, 1 jul. 2000.

AYES RIVERA, I. et al. Decline of Fine Suspended Sediments in the Madeira River Basin (2003–2017). Water, v. 11, n. 3, p. 514, mar. 2019.

BAPTISTA, M.; LARA, M. Fundamentos de Engenharia Hidráulica. 3a ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

BIPA, Nusrat Jahan; STRADIOTTI, Giulia; RIGHETTI, Maurizio; PISATURO, Giuseppe Roberto. Impacts of hydropeaking: A systematic review. Science of The Total Environment, v. 912, p. 169251, 20 fev. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169251

CHANSON, H. The Hydraulics Of Open Channel Flow: An Introduction. [s.l: s.n.].

ESPINOZA VILLAR, R. et al. A study of sediment transport in the Madeira River, Brazil, using MODIS remote-sensing images. Journal of South American Earth Sciences, Hydrology, Geochemistry and Dynamic of South American Great River Systems. v. 44, p. 45–54, 1 jul. 2013.

FRANCO, Glaura C.; GAMERMAN, Dani; SANTOS, Thiago Rezende dos. Modelos de espaço de estados: abordagens clássica e Bayesiana. Disponível em: http://www.est.ufmg.br/~glaura. Acesso em: 18 jul. 2025.

Furnas et al., 2005a. Usinas Hidrelétricas Santo Antônio e Jirau. RIMA. FURNAS, CNO, Leme Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brazil (2005).

Furnas et al., 2005b. EIA – Estudo de Impacto Ambiental Aproveitamentos Hidrelétricos Santo Antônio e Jirau, Rio Madeira-RO. 6315-RT-G90-001, vol. 8, FURNAS, CNO, Leme Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brazil (2005)

Furnas et al, 2005c.. EIA – Estudo de Impacto Ambiental: Aproveitamentos Hidrelétricos de Santo Antônio e Jirau, Rio Madeira–RO. Tomo B – Estudos Sedimentológicos. Rio de Janeiro: Furnas C.E., CNO & Leme Engenharia, 2005.

GOULDING, M. The Smithsonian atlas of the Amazon. [s.l.] Washington, D.C. : Smithsonian Books, 2003.

KWAK, Semin; GEROLIMINIS, Nikolas. Travel time prediction for congested freeways with a dynamic linear model. Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2020. Disponível em: https://transp-or.epfl.ch/documents/technicalReports/Kwak_Geroliminis_2020.pdf.

LATRUBESSE, E. M. et al. Damming the rivers of the Amazon basin. Nature, v. 546, n. 7658, p. 363–369, 2017.

MA, H. et al. Universal relation with regime transition for sediment transport in fine-grained rivers. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 117, n. 1, p. 171–176, 7 jan. 2020.

MOURA, L. et al. Sediment Discharge At The Madeira River Hydroelectric Complex – Rating Curves And Estimates. . Em: Xxv Sbrh - Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos. Centro de Convenções AM Malls - Sergipe: 19 nov. 2023. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=15486>

MOURA, L. Z. et al. Investigating Effects of Bed Fining on Sand Transport for the Madeira River Hydroelectric Complex. . Em: II Fluhidros - Simpósio Nacional De Mecânica Dos Fluidos E Hidráulica E Xvi Enes - Encontro Nacional De Engenharia De Sedimentos. Curitiba - Pr: 2024. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=16117>

PARKER, G.; ANDREWS, E. D. Sorting of Bed Load Sediment by Flow in Meander Bends. Water Resources Research, v. 21, n. 9, p. 1361–1373, 1985.

PETRIS, G.; PETRONI, S.; CAMPAGNOLI, P. Dynamic Linear Models With R. 2007.

SANTO ANTÔNIO ENERGIA. Licenciamento Ambiental. Santo Antônio Energia, [2025]. Disponível em :https://santoantonioenergia.com.br/sustentabilidade/licenciamento-ambiental/.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS. *HEC-RAS River Analysis System: hydraulic reference manual*. Version 6.0. Davis: Hydrologic Engineering Center, 2025.

WILKS, Daniel S**.** Statistical methods in the atmospheric sciences. 2. ed. San Diego: Academic Press, 2006. (International Geophysics Series, v. 91).