



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB**

**IG/ IB/ IQ/ FACE-ECO/ CDS**

**CURSO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

**DIAGNÓSTICO DO FLUXO DE SEDIMENTOS NA REGIÃO DA BACIA  
DO MÉDIO SÃO FRANCISCO UTILIZANDO DADOS DO SENSOR  
ESPACIAL MODIS**

**JULIANA FARIAS DE LIMA OLIVEIRA**

**BRASÍLIA – DF**

**2017**

JULIANA FARIAS DE LIMA OLIVEIRA

DIAGNÓSTICO DO FLUXO DE SEDIMENTOS NA BACIA DO  
MÉDIO SÃO FRANCISCO UTILIZANDO DADOS DO SENSOR  
ESPACIAL MODIS

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito para a obtenção de diploma de Graduação em Ciências Ambientais da Universidade de Brasília.

Orientador: Luciano Soares da Cunha

Co-orientadores: Jean-Michel Martinez e Rita de Cássia Cerqueira Condé De Piscoya.

Brasília – DF

2017

OLIVEIRA, JULIANA.

Diagnóstico do fluxo de sedimentos na bacia do Médio São Francisco utilizando dados do sensor espacial MODIS.

Orientação: Prof. Dr. Luciano Soares da Cunha

Co-orientação: Jean-Michel Martinez e Rita de Cássia Cerqueira  
Condé De Piscoya

58 páginas

Projeto final em Ciências Ambientais – Consórcio IG/ IB/ IQ/  
FACE-ECO/ CDS – Universidade de Brasília.

Brasília, DF – 2017

1. Erosão. 2. Sedimentos. 3. MODIS. 4. Descarga Sólida.

## **JULIANA FARIAS DE LIMA OLIVEIRA**

Diagnóstico do fluxo de sedimentos na bacia do Médio São Francisco utilizando dados do sensor espacial MODIS.

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito para a obtenção de diploma de Graduação em Ciências Ambientais da Universidade de Brasília, por intermédio dos Institutos de Ciências Biológicas, de Geociências, de Química, do Centro de Desenvolvimento Sustentável e do Departamento de Economia. Comissão Examinadora formada pelos professores:

---

**Prof. Dr. Luciano Soares da Cunha (Orientador)**  
**Instituto de Geociências – UnB**

---

**(Banca Examinadora )**

---

**(Banca Examinadora)**

**Brasília, 2017**

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Astrides e Dilson, por me darem a melhor criação e o maior amor de todos. Por sempre priorizar minha educação em meio às dificuldades, e por estarem sempre me incentivando e me apoiando a alcançar meus objetivos. Obrigada por acreditarem em mim e por transmitirem todo esse amor e cuidado desde que eu nasci. Sem vocês eu não seria o que sou hoje e agradeço por serem fundamentais no meu crescimento como pessoa.

À minha irmã, Joyce, por todo apoio emocional, parceria e amor. Obrigada por estar sempre ao meu lado, ser essa amiga irmã que sempre se preocupa e cuida de mim com tanto amor, sendo uma das pessoas mais importantes da minha vida.

Aos meus orientadores de estágio na Agência Nacional de Águas, Rita de Cássia Cerqueira Condé De Piscoya, especialista em recursos hídricos, e Jean Michel Martinez, professor pesquisador da UnB, por todos os ensinamentos, dedicação, paciência e apoio durante a construção deste trabalho, que sem dúvidas, não seria nada sem vocês. E a todos os meus colegas da ANA, Cláudia Françoise, Simone Freitas, Tayline Serafim, Augusto Bragança, Eurides de Oliveira, pela amizade e aprendizado ao longo do tempo de estágio.

A todos meus amigos, que compreenderam os meus momentos de ansiedade e ausência ao longo do processo do trabalho final, sempre dispostos a me ajudar, me aconselhando, me dando suporte emocional e me incentivando. Em especial às minhas amigas de longa data, Jessycka, Karoline e Ana Paula, por todo companheirismo em todos esses anos. Às minhas amigas de vida, Carolina, Anyk, Jéssica, Hanna, Bruna, Dawanne por partilharem de momentos de alegria e tristeza nos últimos anos. Às minhas amigas e parceiras de curso, Cláudia Dayanne e Caroline Rodrigues, por todo incentivo e momentos bons vividos ao longo da graduação.

Ao meu professor e orientador, Luciano Soares da Cunha, por me ajudar neste período final resolvendo tudo da melhor forma possível e por todos os ensinamentos nesse tempo de curso. Ao professor Pedro Zuchi, por todos os conselhos e apoio. E à secretária do curso, Elaine Souto, por todos os direcionamentos e apoio.

## RESUMO

A compreensão do comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica é fundamental para uma boa gestão dos recursos hídricos. O crescimento das atividades econômicas nas bacias tem aumentado o uso e ocupação desenfreado do solo e da água, prejudicando sua disponibilidade hídrica e sua carga sólida. O monitoramento e gerenciamento dos recursos hídricos ainda passam por muitas dificuldades. A carência de dados pela dificuldade de instalação de instrumentos de monitoramento e seu alto custo de manutenção é um dos principais problemas. Com isso, as técnicas de monitoramento convencionais das águas não conseguem acompanhar o crescimento da demanda do controle ambiental, necessitando do uso de técnicas alternativas. O uso de sensoriamento remoto atendeu à essa necessidade de levantamentos de dados e monitoramentos em um curto espaço de tempo e com menor custo. Este trabalho teve como objetivo caracterizar o fluxo de sedimentos ao longo da sub-bacia do Médio São Francisco utilizando dados do sensor MODIS no período de fevereiro de 2000 a fevereiro de 2017 em cinco estações virtuais próximas às estações convencionais da Agência Nacional de Águas. A partir do processamento das imagens fornecidas pela NASA (National Aeronautics and Space Administration) foram obtidas séries temporais da concentração de sedimentos em suspensão que seguem o comportamento do ciclo hidrológico e da sazonalidade das precipitações. No período de chuvas, de novembro a março, houveram picos de reflectância, enquanto no período de seca, de junho a setembro, houve diminuição dos valores da reflectância. As concentrações de sedimentos gerados a partir de dados de reflectância do MODIS possibilita compreender a dinâmica dos sedimentos ao longo do curso do rio. Os resultados demonstraram uma boa relação entre os dados de satélite e as medições de campo. O monitoramento do fluxo de sedimentos por meio de imagens de satélite atendeu às necessidades de relacionar a resposta espectral das imagens com a variação da descarga sólida de sedimento na bacia do Médio São Francisco.

**Palavras chaves:** Sensor MODIS, sensoriamento remoto, Rio São Francisco, concentração de sedimentos em suspensão, descarga sólida, reflectância, erosão.

## ABSTRACT

The hydrological behavior comprehension of a watershed is fundamental for a good water resources management. The economic activities expansion on the watershed has increased the unrestrained use and occupation of water and land, jeopardizing its water availability and sediment discharge. The water resources monitoring and management still have obstacles. The lack of data due to the complexity of monitoring instruments implementation and the high cost for its maintenance are one of the main problems. Hence, the conventional water monitoring technics can not follow the increase of environment control demand, bringing the need of alternative technics. The use of remote sensing attend this need of monitoring and collection of data in a short period of time and with low cost. This paper has the purpose to characterize the sediment flow along the Medium São Francisco sub basin, using data from the MODIS sensor between February 2000 to February 2017 collected at five virtual stations near to regular stations of the National Water Agency. From the image processing provided by NASA (National Aeronautics and Space Administration), were realised suspended sediment concentration time-series which follow the behavior of the hydrological cycle and the precipitation seasonality. In the rainy period, from November to March, there were reflectance peaks while in the dry period, from June to September, there were a reflectance drop. The sediment concentrations generated by the reflectance data from MODIS make possible to understand the sediment dynamic along the river's course. The results demonstrate a good relation between the satellite data and the field measurements. The monitoring of sediment flow through satellite images respond to the needs of relate the spectral response from the images with the sediment discharge variation in the Medium São Francisco watershed.

**Keywords:** MODIS sensor, remote sensing, São Francisco river, suspended sediment concentration, sediment discharge, reflectance, erosion.

## SUMÁRIO

1 – Introdução.....	11
2 – Revisão Bibliográfica.....	13
2.1 - Erosão do solo.....	13
2.2 - Transporte de sedimentos.....	15
2.3 - Descarga sólida.....	19
2.4 - Uso de satélites para determinação da qualidade de água em rios.....	20
3 – Caracterização da Bacia do Rio São Francisco .....	21
3.1 - Aspectos Socioeconômicos.....	22
3.2 - Aspectos Físicos.....	23
3.2.1 - Clima.....	23
3.2.2 - Vegetação.....	24
3.2.3 - Geologia.....	27
3.2.4 - Geomorfologia.....	28
3.2.5 - Solo.....	30
3.3 - O Médio São Francisco.....	32
4 – Materiais e Métodos.....	33
4.1 - Área de estudo.....	33
4.2 - Imagens de satélite.....	37
4.3 – Processamento digital das imagens de satélite.....	38
4.4 - Estimativa da concentração de sedimentos.....	39
4.5 - Consistência dos dados de reflectância com dados de cota.....	40
4.6 - Cálculo da descarga sólida.....	40
4.7 - Comparação com cota e vazão.....	41
5. Resultados e Discussão.....	42
5.1 - Reflectância.....	42
5.2 - Concentração.....	45
5.3 - Comparação dos dados de satélite com a hidrologia do rio São Francisco....	47
5.3.1 - Concentração e vazão.....	47
5.3.2 - Histerese.....	48
5.4 - Carga sólida.....	50
6 – Considerações Finais.....	54
7 – Referências Bibliográficas.....	56



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Trajetória das partículas sólidas ao longo do curso d'água.
- Figura 2 – Relação entre a bacia hidrográfica e a produção de sedimentos.
- Figura 3 – Gráficos de Descarga Líquida ( $m^3/s$ ) e Concentração de sedimentos (ppm) pelo tempo (hora): a) Pico de concentração de sedimentos se antecipando ao pico de vazão; b) simultaneidade do pico de concentração com o pico de vazão; c) Pico de sedimentos se atrasando em relação ao pico de vazão.
- Figura 4 – Subdivisões fisiográficas das Bacia do São Francisco.
- Figura 5 – Mapa de Biomas da Bacia do Rio São Francisco com estações fluviométricas da ANA.
- Figura 6 – Mapa da Vegetação da Bacia do Rio São Francisco.
- Figura 7 – Mapa da geologia da BHSF por natureza das rochas predominantes.
- Figura 8 – Mapa de domínios morfoestruturais da bacia.
- Figura 9 – Mapa de compartimentos de relevo.
- Figura 10 – Tipos de solo na BHSF divididas por suas regiões fisiográficas.
- Figura 11 – Localização das estações fluviométricas situadas dentro do Médio São Francisco.
- Figura 12 – Polígono criado no Google Earth na estação Cachoeira da Manteiga (42210000) que foi utilizado no processamento das imagens de satélite.
- Figura 13 – Mapa com estações fluviométricas entre os barramentos de Três Marias - MG e Sobradinho – BA.
- Figura 14 – Série temporal da reflectância na banda do infravermelho das estações do médio SF: a) Cachoeira da Manteiga; b) São Francisco; c) Carinhanha; d) Gameleira; e) Morpará.
- Figura 15 – Dinâmica espaço-temporal da reflectância na banda do infravermelho nas estações no Médio São Francisco.
- Figura 16 – Comparação das cotas médias diárias com os valores médios de reflectância na banda do infravermelho estimadas pelo sensor MODIS para a estação de Morpará - 46360000.
- Figura 17 – Dinâmica espaço-temporal da concentração de sólidos em suspensão nas estações do Médio São Francisco.
- Figura 18 – Dinâmica espaço-temporal da concentração e da vazão dos sedimentos no Médio SF.
- Figura 19 – Gráficos de comparação de dados de concentração de sólidos em suspensão com as vazões obtidas em cada estação: a) Cachoeira da Manteiga, b) São Francisco, c) Carinhanha, d) Gameleira e, e) Morpará. Fonte: da autora, 2017.
- Figura 20 – Descarga sólida média por ano de sedimentos das estações do médio SF.
- Figura 21 – Dinâmica espaço-temporal de descarga sólida das estações do médio SF.
- Figura 22 – Descarga sólida média por ano de sedimentos (em barras) e vazão média anual das estações Carinhanha e Morpará.

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 – Dados das estações fluviométricas da ANA analisadas no Médio SF.
- Tabela 2 – Média mensal, mediana, valores máximos e mínimos dos valores da reflectância no Infravermelho para os pontos selecionados na bacia do Médio São Francisco.
- Tabela 3 – Concentrações médias, máximas e mínimas mensais para os pontos selecionados na bacia do Médio São Francisco.
- Tabela 4 – Média de Descarga Sólida (T/dia) de 2000 a 2017.
- Tabela 5 – Análise da descarga sólida em suspensão média diária por ano das estações nos anos de 1975 a 2001.
- Tabela 6 – Média de Descarga Sólida (T/dia) de 2000 a 2017 calculada a partir de concentração obtidos por sensoriamento remoto.

## **LISTA DE SIGLAS**

ANA – Agência Nacional de Águas  
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica  
CBHSF – Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco  
CODEVASF – Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco e do Parnaíba  
CSS – Concentração de Sedimentos em Suspensão  
HIDRO – Sistema de Informações Hidrológicas  
IDH – Índice de Desenvolvimento Humano  
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
IRD – Institut de Recherche pour Le Développement  
MEG-HIBAM – Monitoramento Espacial Hidrológico de Grandes Bacias  
MMA – Ministério do Meio Ambiente  
MODIS – MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer  
MOD3R – MODIS River Reflectance Retrieval  
NASA – National Aeronautics and Space Administration  
PIB – Produto Interno Bruto  
PBHSF - Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco  
PNRH – Plano Nacional de Recursos Hídricos  
PRH-SF – Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco  
SF – São Francisco

## 1. INTRODUÇÃO

O Rio São Francisco possui uma extensão de 2.700 km e sua bacia abrange sete unidades da federação (Bahia, Minas Gerais, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Goiás e Distrito Federal) e 507 municípios (CBHSF, 2017). É considerada uma das bacias mais importantes do Brasil pelo seu potencial hídrico e importância econômica.

O aumento das atividades produtivas na bacia, como a agropecuária, atividades minerais, de irrigação, construções de barragens, abastecimento doméstico e industrial, pesca, piscicultura, entre outros (SILVA E ROSA, 2009), aumentou o uso desenfreado da água prejudicando a disponibilidade hídrica natural da bacia do Rio São Francisco, assim como, o aumento da quantidade de sedimentos pelo mau uso do solo na região.

O crescimento acelerado da urbanização teve como consequência o uso e ocupação inadequados do solo, resultando em uma maior perda de solo. A retirada da cobertura vegetal é um dos principais fatores que contribuem para o aumento desses processos erosivos, o que tem comprometido a qualidade da água, impactando tanto a vida do rio quanto às atividades dependentes dele (CUNHA et al., 2011).

As construções de barragens ao longo do rio podem modificar o seu fluxo natural, como a mudança do percurso e a diminuição da velocidade, podendo causar uma maior concentração de sedimentos (CARVALHO, 2008). Com isso, há uma maior deposição de sedimentos dentro dos reservatórios, o que causa uma perda da capacidade de armazenamento de água e assim prejudica o funcionamento das barragens. (LIMA et al, 2001).

A carência de dados hidrológicos para se estimar a quantidade de sedimentos numa bacia se dá devido à dificuldade de monitoramento onde há grande dificuldade de instalação de instrumentos no campo e pelo seu alto custo de manutenção (PINTO apud CARVALHO, 2014) em consequência de sua grande extensão. Com a crescente necessidade de melhorias nos trabalhos de controle ambiental, as técnicas habituais de monitoramento de campo não conseguem acompanhar essa demanda, necessitando assim de novas tecnologias (MARTINEZ, 2014).

O uso do sensoriamento remoto e das ferramentas de geoprocessamento são alternativas que permitem tornar mais ampla a representatividade espacial e temporal das técnicas convencionais (MENEZES, 2013), resultando em imagens de satélite capazes de medir a concentração de sedimentos em um corpo hídrico com base em valores de reflectância da água nas bandas do vermelho e infravermelho. Além disso, permite um menor custo em relação à manutenção, ao transporte e deslocamento da equipe técnica para medição em campo, fornecendo uma maior rapidez de informação e melhorando a precisão dos dados coletados.

A Agência Nacional de Águas – ANA, juntamente com o *Institut de Recherche pour Le Développement* – IRD desenvolveram o projeto “Monitoramento Espacial Hidrológico de Grandes Bacias – Projeto MEG-HIBAM” com o objetivo de apresentar a possibilidade de se monitorar parâmetros hidrológicos a partir do uso de satélites. Desenvolveram técnicas de calibração e validação dos dados de satélites gerando dados complementares aos analisados em campo, através de um estabelecimento de redes de estações virtuais. Trabalhos realizados na bacia Amazônica (MARTINEZ, 2009; VILLAR, 2013) demonstraram a relação da quantidade de sedimentos em suspensão e as propriedades ópticas da água por meio de uso de satélites. Atualmente a Agência Nacional de Águas vem trabalhando para a ampliação da rede virtual de estações de monitoramento por satélite do Sistema HidroSat ([www.hidrosat.ana.gov.br](http://www.hidrosat.ana.gov.br)). O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito deste projeto no período de 2015 a 2016 na Superintendência da Gestão da Rede Hidrometeorológica da Agência Nacional de Águas sob a supervisão da especialista em recursos hídricos Rita de Cássia Cerqueira Condé De Piscocya.

Este trabalho apresenta o estudo de cinco estações virtuais sedimentométricas situadas no Médio São Francisco, mais especificamente após a barragem de Três Marias, em Minas Gerais, e à montante da barragem de Sobradinho, na Bahia, dentro da Bacia do Rio São Francisco. O objetivo principal é aplicar a metodologia desenvolvida pela ANA/IRD para avaliar o processo de transporte de sedimentos ao longo do rio com dados do sensor MODIS e dados de campo a fim de obter dados hidrológicos mais detalhados como a concentração de sedimentos, a vazão e a descarga sólida no período de 2000 a 2017, dando subsídios para a implementação do monitoramento automatizado de sedimentos na bacia do rio São Francisco.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo são apresentadas revisões de alguns principais temas abordados no estudo como: (a) Erosão do solo; (b) Transporte de sedimentos; (c) Descarga Sólida (d) Uso de satélites para determinação da qualidade de água em rios.

### **2.1. Erosão do solo**

O termo erosão vem do latim “erodere” que significa “corroer”, “escavar”. É um fenômeno de desgaste de rochas e solos com desagregação, deslocamento e arrastamento das partículas por processos químicos ou físicos, natural ou antrópica (BORGES, 2009).

Carvalho (2008) distingue a erosão em duas classes: geológica e acelerada. A erosão geológica, ou natural, é aquela processada normalmente, de forma lenta e contínua, incluindo o processo de retirada de partículas ou materiais e seu deslocamento, sem a intervenção humana. E a erosão acelerada, ou antrópica, é aquela induzida por práticas humanas causadas principalmente por atividades agrícolas e obras, apresentando um processo mais rápido.

De acordo com Borges (2009), a erosão pode ser classificada de acordo com seus agentes erosivos. Estes são elementos que afetam diretamente a erosão podendo ser passivos e ativos. Os principais agentes ativos são água, gelo, vento, neve, temperatura, animais, plantas e ação humana. Os agentes passivos são a gravidade, topografia, cobertura vegetal, o tipo de solo e formações superficiais (CARVALHO, 2008). Entretanto, as erosões hídricas e eólicas são consideradas as mais importantes, por atingirem grandes áreas causando maiores danos ao meio ambiente.

Em regiões tropicais, a erosão hídrica é o principal agente erosivo, pois a quantidade de chuvas é mais elevada e mais intensa em algumas estações do ano, o que aumenta o processo de erosão (BORGES apud GUERRA et al., 2009). Isso acarreta diversos problemas no manejo dos recursos hídricos como a alta concentração de sedimentos no rio que dificulta o funcionamento de hidrelétricas, diminuindo o volume da água necessária para abastecimento urbano e para a

geração de energia, além do transporte e depósito de sedimentos contaminados de origem difusa.

Carvalho (2008) apresenta a erosão hídrica superficial processada das seguintes formas:

- Erosão pluvial ou *splash*: as gotas da chuva causam impacto sobre a superfície, afetando a estrutura da capa superficial do solo resultando em um desprendimento das partículas que serão mobilizadas pelo escoamento.
- Erosão laminar: ocorre quando o solo já está saturado sendo produzida por um desgaste da camada superficial em toda sua extensão. Desenvolve-se mais facilmente quando há menos obstáculos ao longo do caminho, possibilitando o escoamento.
- Erosão por escoamento difuso: a água escoada pela superfície percorre uma pequena distância, podendo formar sulcos em que há uma infiltração depositando o material transportado.
- Erosão por escoamento difuso intenso: a água percorre maiores distâncias transportando uma quantidade maior de material, obtendo um escoamento mais aprofundado.
- Erosão por escoamento concentrado: é acarretada pela má estrutura solo com camada impermeável profunda, formando grandes sulcos que futuramente sofrerão deslizamentos e desabamentos. Com isso, são formadas as voçorocas (grandes buracos no solo).

Dentre esses tipos de erosão, a erosão laminar é a mais comum, pois atinge áreas em que a vegetação é escassa e possui solo desgastado, como na região semiárida. Dificilmente consegue ser detectada porque ocorre de forma difusa e lenta, o contrário da erosão por escoamento concentrado (voçorocamento) (BORGES, 2009).

Além dos fatores naturais que causam as erosões, é importante ressaltar o aumento da exploração de recursos naturais causado pelo crescimento populacional sem nenhum planejamento adequado. O uso irracional e intensivo da terra combinados com insumos agrícolas e desmatamento alteram a qualidade do solo prejudicando seus nutrientes e consequentemente sua produtividade.

A ocorrência desses escoamentos superficiais provenientes das erosões tem aumentado a quantidade de sedimentos carregados até a calha dos rios, causando problemas socioeconômicos e ambientais.

Na Bacia do São Francisco, o crescimento da industrialização, do aproveitamento hidrelétrico (com a construções de barragens), da intensa atividade agrícola e dos processos de urbanização, gerou a má distribuição espacial e temporal dos recursos hídricos (BORGES, 2009), assim como o mau uso e ocupação do solo de forma bastante diversificada. Com o forte impacto dessas atividades econômicas, a bacia torna-se suscetível à processos erosivos, impactando, assim o fluxo de sedimentos da bacia.

## **2.2. Transporte de sedimentos**

Segundo Carvalho (2008) o sedimento é definido como a partícula derivada da fragmentação de rochas ou de materiais biológicos por processos químicos ou físicos, transportada pela água ou pelo vento do lugar de origem dos rios e dos locais de deposição. Essa partícula derivada da rocha passa por processos de erosão, deslocamento das partículas por meio de enchentes ou escoamento superficial, transporte de sedimento, deposição na calha do rio ou em reservatórios e compactação. Processos como esses são mais comuns ocorrerem em épocas chuvosas, em especial com chuvas intensas.

De acordo com Arroio Junior (2013), os materiais resultantes dos processos de erosão são transportados pelo escoamento superficial sendo influenciados pela topografia do local assim como a granulometria do material transportado. Dependendo da força da água, bem como o peso e o tamanho, a partícula poderá ser depositada no fundo do rio ou manter-se em suspensão. A trajetória das partículas sólidas no curso d'água é representada pela Figura 1:

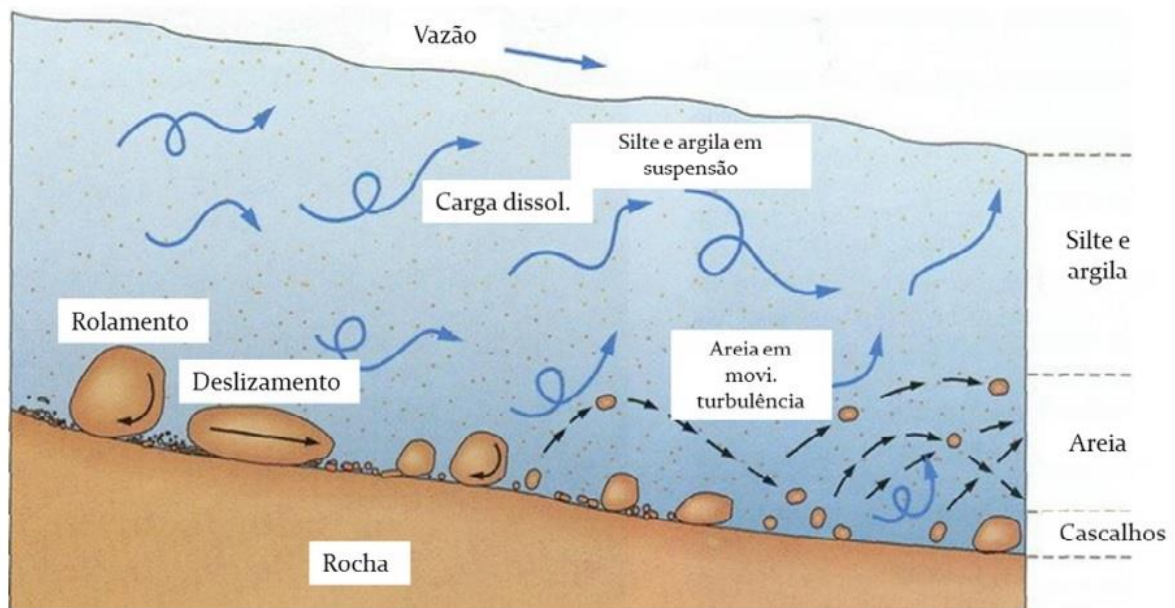


Figura 1 – Trajetória das partículas sólidas ao longo do curso d'água. Fonte: Marcondes, 2011.

Para isso, Carvalho (2008) definiu o transporte de sedimentos de acordo com o tamanho, peso, a forma das partículas e com as condições físicas do local e escoamento de três modos:

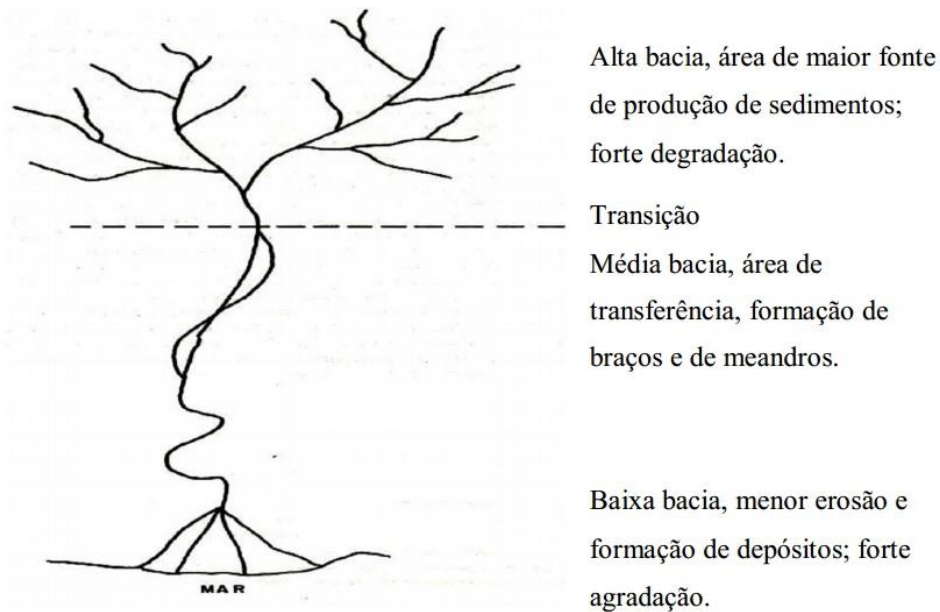
Carga Sólida de Arrasto – são partículas de sedimento que rolam ou escorregam longitudinalmente no curso d'água. As partículas estão em contato com o leito todo o tempo.  
 Carga Sólida Saltante – são as partículas que pulam ao longo do curso d'água por efeito da correnteza ou devido ao impacto de outras partículas.  
 Carga Sólida em Suspensão – são partículas que estão suportadas pelas componentes verticais das velocidades do fluxo turbulento, enquanto estão sendo transportadas pelas componentes horizontais dessas velocidades, sendo pequenas suficientemente para permanecerem em suspensão.

De acordo com o mesmo autor, os maiores responsáveis pelo transporte de sedimentos são as chuvas que desagregam o solo e as enxurradas que transportam esses sedimentos até o rio.

A natureza procura manter um equilíbrio relacionado à quantidade de sedimentos no rio. Se há uma carga sólida maior, haverá um fenômeno de deposição enquanto se houve uma carga sólida menor, o rio se encarregará de degradar o seu leito. A carga em suspensão é maior que a carga de fundo no alto curso de uma bacia (90% a 95%) e a carga de fundo vai crescendo à medida que diminui o número de erosões e a declividade do curso d'água (65% a 90%) até sua



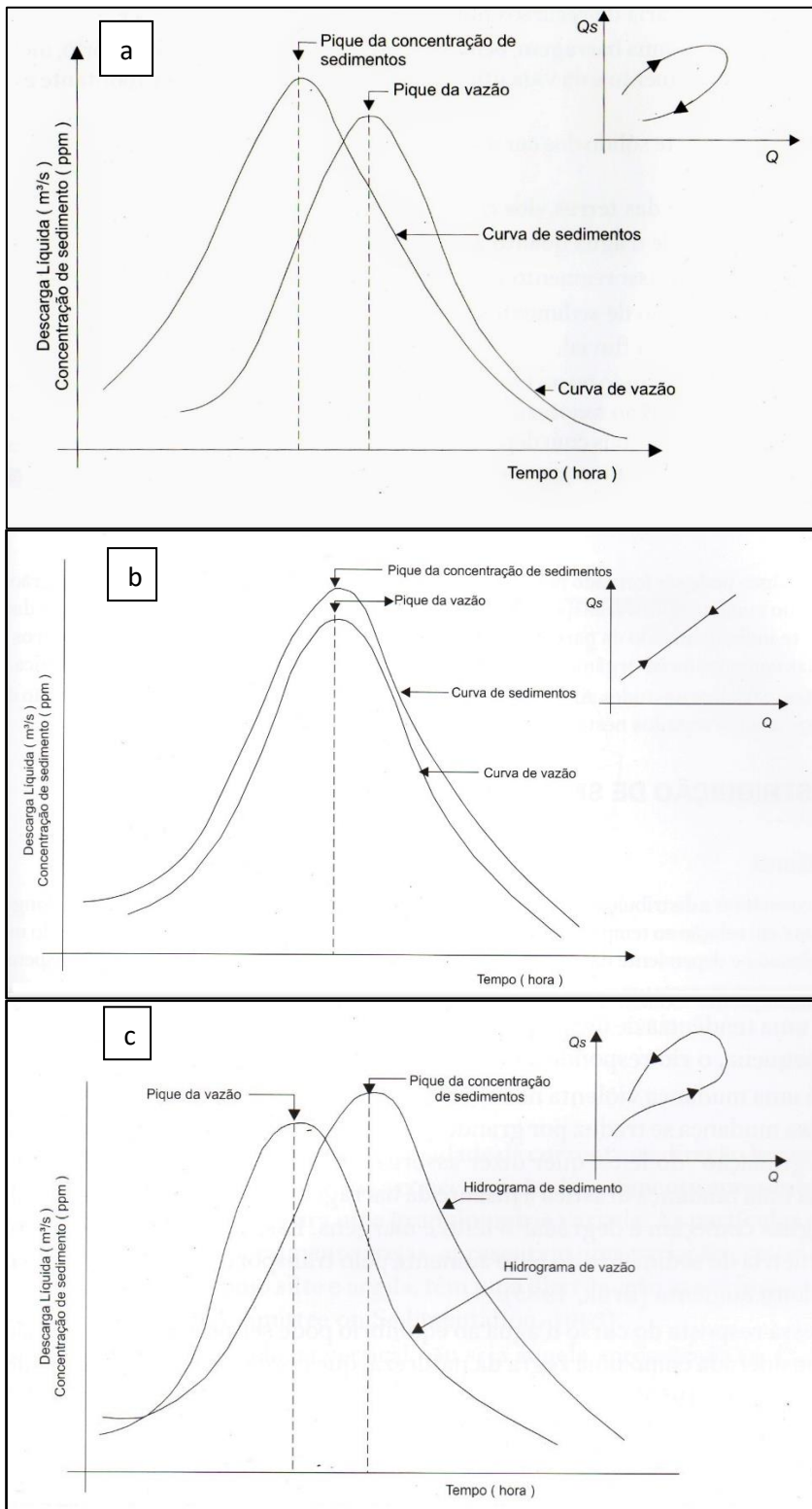
jusante/foz (CARVALHO, 2008). A Figura 2 representa essa relação da produção de sedimentos com o curso d'água em uma bacia hidrográfica.



**Figura 2 – Relação entre a bacia hidrográfica e a produção de sedimentos. Fonte: Carvalho, 2008.**

Quantificar a carga sólida é muito importante para os estudos dos sedimentos em bacias hidrográficas tal como o resultado da interferência de reservatórios e atividades que levam a esse aumento de sedimentos. Um dos propósitos deste trabalho é mostrar a medição da descarga sólida em suspensão na bacia do Médio São Francisco.

De acordo com Carvalho (2008), a curva da quantidade de sedimentos transportada acompanha a onda de enchente de três formas diferentes (Figura 3): o pico com a carga sólida se atrasa em relação à vazão, se igualam no movimento e o pico de concentração de sedimentos segue na frente da maior vazão. O mais comum é o pico de sedimentos se antecipar do pico de enchentes, pois no início do período de chuvas, há uma grande quantidade de sedimentos a serem carreados e por isso, o aumento de sedimentos. Este acontecimento é chamado de histerese, onde há um aparecimento de um atraso na evolução de um fenômeno físico em relação a outro. A curva da histerese é influenciada pela quantidade de chuvas, tamanho da bacia, umidade do solo e das condições anteriores ao evento (LOPES apud SEEGER et al., 2007).



**Figura 3 – Gráficos de Descarga Líquida (m<sup>3</sup>/s) e Concentração de sedimentos (ppm) pelo tempo (hora): a) Pico de concentração de sedimentos se antecipando ao pico de vazão; b) simultaneidade do pico de concentração com o pico de vazão; c) Pico de sedimentos se atrasando em relação ao pico de vazão. Fonte: Carvalho, 2008.**

### 2.3. Descarga Sólida

A medição da descarga sólida tem como finalidade medir a quantidade de sedimentos transportados pelos rios (CARVALHO, 2008). Para melhor conhecimento acerca dos sedimentos transportados é importante realizar medições da descarga sólida em suspensão, da descarga sólida de arrasto e da descarga sólida total.

Como a distribuição do sedimento não é uniforme é necessário levar em consideração a variação da concentração ao longo da seção transversal com amostras pontuais, verticais e em um número adequado de posições (MARCONDES, 2011). A determinação da medição da descarga sólida é feita de maneira direta e indireta. A medição direta é feita *in situ*, necessitando de um cálculo e a medição indireta depende de outras grandezas, como a vazão, as velocidades pontuais e médias, larguras parciais e totais e profundidades nas verticais e médias tendo como o cálculo da descarga sólida o resultado final (CARVALHO, 2008).

A medição da descarga sólida é dividida em três partes: a medição da descarga sólida em suspensão, a medição da descarga sólida de arrasto e a medição da descarga sólida total. A medição da descarga sólida em suspensão leva em consideração a concentração e a descarga líquida calculadas *in situ*. Para encontrar um valor de concentração, e conseqüentemente da descarga sólida, é necessário fazer amostragens ao longo da seção sendo pontuais ou verticais devido à variação de concentração que ocorre no rio, podendo ser feita pelo método direto, com o uso do turbidímetro, equipamento que mede a turbidez da água ou com algum outro equipamento que obtém a concentração como valor imediato, e por método indireto, onde a concentração é calculada com equipamentos que coletam uma amostra para análise em laboratório (MARCONDES, 2011). A medição da descarga sólida de arrasto leva em conta a quantidade de sedimento transportado ao longo da seção (CARVALHO, 2008).

Grande parte dos sedimentos transportados corresponde às partículas em suspensão e com isso, a descarga sólida em suspensão representa o total de sedimentos transportados ao longo do curso d'água.

## **2.4. Uso de satélites para determinação da qualidade de água em rios**

Em razão da dificuldade do levantamento de dados em algumas regiões hidrográficas muito extensas surgiu a necessidade de encontrar um tipo de monitoramento que não tivesse um custo muito elevado, nem uma logística muito complexa como acontece com as técnicas convencionais. Com isso, o sensoriamento remoto se mostrou adequado a este tipo de serviço visto que tem a capacidade de “ampliar a representatividade espacial e temporal das amostragens convencionais” (MENEZES, 2013).

Trabalhos realizados (PISCOYA et al., 2013; MENEZES, 2013; MENDES et al., 2017; PINTO et al. 2013; Villar, 2013) demonstraram a viabilidade de relacionar as propriedades ópticas da água com a quantidade de sedimentos produzidas, sendo diretamente influenciadas pelo seu tipo (orgânicos e inorgânicos) e pela sua concentração no rio.

Pesquisas feitas em rios da Amazônia avaliaram a concentração de sedimentos em suspensão por meio de imagens de satélite executando balanços de vazão sólida (MARTINEZ, 2009; VILLAR, 2013), considerando, assim, a capacidade de ampliar a rede de monitoramento hidrossedimentológica com um monitoramento preciso em áreas pouco monitoradas (MENEZES, 2013).

O monitoramento dos sedimentos em suspensão utilizando imagens de satélite permite a ampliação do monitoramento da rede hidrossedimentológica que é realizado pela Agência Nacional de Águas, a um custo mais baixo que o monitoramento convencional. Além da dificuldade de se monitorar algumas áreas devido aos custos elevados com as campanhas de campo, a rede sedimentométrica nacional faz levantamentos de dados quatro vezes por ano, o que limita a quantidade de dados fornecidos demandando utilização de outros meios de monitoramento.

A relação da concentração de material em suspensão com dados espectralradiométricos, foi aplicada com eficiência em trabalhos na Amazônia (VILLAR, 2013), na bacia do rio Araguaia (MENDES et al., 2017), nos reservatórios das usinas hidroelétricas de Três Marias – MG (MENEZES, 2013), na UHE

Jurumirim - SP/PR (PISCOYA et al., 2013) e de Sobradinho – MG/BA (PISCOYA et al., 2017).

### **3. CARACTERIZAÇÃO DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO**

A Bacia do São Francisco é uma das maiores e mais importantes bacias hidrográficas do Brasil. Segundo dados do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (CBHSF), possui 639.219 km<sup>2</sup> de área de drenagem (7,5% do país) e vazão média de 2.850 m<sup>3</sup>/s (2% do total do país). Está localizada entre as coordenadas 7°17' a 20°50' de latitude sul e 36°15' a 47°39' de longitude oeste e corresponde a 8% do território nacional (MMA, 2006).

O Rio São Francisco possui 2.700 km de extensão, nascendo na Serra da Canastra, em Minas Gerais, e desembocando no Oceano Atlântico na divisa entre Alagoas e Sergipe, passando por vários estados. A bacia abrange sete unidades da federação - Bahia (48,2%), Minas Gerais (36,8%), Pernambuco (10,9%), Alagoas (2,2%), Sergipe (1,2%), Goiás (0,5%), e Distrito Federal (0,2%) – e 507 municípios (cerca de 9% do total de municípios do país).

Por ser uma das maiores bacias hidrográficas do Brasil, com grande dimensão territorial, ela foi subdividida em quatro regiões (Figura 4) para melhor monitoramento e identificação de populações e ambientes levando-se em conta, também, a altitude de cada região. A parte de onde nasce o rio, localizada na Serra da Canastra até a cidade de Pirapora – MG, com área de 111.804 km<sup>2</sup> foi denominada Alto São Francisco. Seguindo pelo oeste da Bahia até a represa de Sobradinho, na cidade de Remanso, com 339.763 km<sup>2</sup> de extensão, é denominado de Médio São Francisco. Após Remanso, acompanhando a divisa natural dos estados da Bahia e Pernambuco, com 155.637 km<sup>2</sup> de área, é o SubMédio São Francisco. E por fim, na direção leste, seguindo a divisa de Alagoas e Sergipe até desembocar no Oceano Atlântico, com área de 32.013 km<sup>2</sup>, está o Baixo São Francisco (CBHSF, 2016).



Figura 4 – Subdivisões fisiográficas das Bacia do São Francisco. Fonte: CODEVASF, 2002.

### 3.1. Aspectos Socioeconômicos

A questão socioeconômica da bacia apresenta bastante contraste entre as regiões, os estados e a população que o compõem, devido à grande desigualdade que caracteriza o Brasil.

No âmbito social, de acordo com o Plano Nacional de Recursos Hídricos da Bacia (PNRH, 2002) há uma grande variação nos indicadores como índice de mortalidade infantil, o Índice de Desenvolvimento Humano – IDH e o PIB per capita. A população total da Bacia atinge mais de 14,2 milhões de habitantes sendo a região do Alto São Francisco com maior número de habitantes.

Em virtude do crescimento populacional e econômico, a quantidade de lançamentos de efluentes domésticos e industriais com a disposição indevida de resíduos sólidos, compromete a qualidade dos rios. O quadro de saneamento básico é bastante crítico na Região Metropolitana de Belo Horizonte, com uma elevada carga inorgânica poluidora resultante da extração e aproveitamento de minerais (PNRH, 2002).

No contexto econômico, cada região fisiográfica possui uma atividade predominante. No Alto, Médio e SubMédio, predomina a presença de indústrias e agroindústrias nas zonas industriais extrativistas de Minas Gerais e polos agroindustriais no Norte e Oeste da Bahia e Sul de Pernambuco. No Baixo, a atividade pesqueira ainda está bastante ligada com a agricultura, com o crescimento da aquicultura, turismo e lazer.

De acordo com a PNRH (2002), a irrigação é a maior demanda da região possuindo 69% da demanda total, sendo mais significativa no Médio e Submédio São Francisco.

O rio também possui um grande potencial para o suprimento de energia para a região Nordeste do país, possuindo nove usinas hidrelétricas em operação. Segundo Tucci e Junior (2017):

“Os principais usos das águas do rio São Francisco são: os grandes aproveitamentos hidroelétricos que geram 10.356 MW de energia elétrica; a irrigação com 330.000 ha de áreas cultivadas; a navegação com 1.500 km navegáveis; o suprimento de água para o abastecimento de 13.141.400 habitantes residentes na bacia; pesca e aquicultura.”

Além disso, o São Francisco possui um grande potencial para o desenvolvimento do transporte hidroviário com dois principais trechos: 1.312 km entre Pirapora (MG) e Juazeiro (BA) e 208 km entre Piranhas (AL) e a Foz.

## **3.2. Aspectos Físicos**

### **3.2.1. Clima**

O clima da bacia do Rio São Francisco possui uma transição de úmido para árido em razão às diferentes regiões em que ele se incorpora. Segundo o Plano de

Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (PRH-SF,2015), está dividido de acordo com as quatro regiões fisiográficas:

- Alto São Francisco: clima predominante Aw, quente e úmido com verão chuvoso e inverno seco.
- Médio São Francisco: possui clima Aw, quente e úmido, com uma variação climática BShw, semiárido.
- SubMédio São Francisco: clima BShw, semiárido.
- Baixo São Francisco: clima predominante é o AS, sendo quente e úmido com invernos chuvosos, mas com variações na zona noroeste com características de clima BSh, ou seja, semiárido com estação chuvosa curta no outono/inverno.

Possui temperatura média anual de 18°C a 27°C com baixo índice de nebulosidade e grande incidência de raios solares. A precipitação média anual é de 1.036 mm, com valores mais altos de 1.400 mm nas nascentes do Rio São Francisco e valores mais baixos em regiões como Paulo Afonso (BA) com valores de 350 mm.

### **3.2.2. Vegetação**

O Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (CBHSF) classifica a cobertura vegetal da Bacia do Rio São Francisco sendo composta por diversas condições naturais e diferentes biomas em suas regiões, como: Cerrado, Caatinga, Mata Atlântica, Costeiros e Insulares (Figura 5), sendo os 3 primeiros os mais importantes abrangendo 3,3%, 57,2% e 39,5% da sua superfície, respectivamente.

Contemplando o Alto e Médio São Francisco, de Minas Gerais até o oeste e sul da Bahia, predomina o Cerrado, segundo maior bioma da América do Sul, considerado a savana brasileira pelas características de sua vegetação (de campos limpos à veredas e buritis), e nele que nasce a maioria dos cursos d'água. Já a Caatinga, cobre o Médio, Submédio e Baixo São Francisco, presente em áreas de clima árido e semiárido tem a predominância da savana estépica com vegetação do tipo xerófila tropical, capaz de suportar o clima seco e à baixa quantidade de água, com um extrato arbóreo com altitudes variáveis. A Mata Atlântica possui uma parte muito reduzida, com 3% apenas da superfície da bacia, predominando-se em



regiões mais úmidas como no Alto São Francisco, em Minas Gerais, e no Baixo São Francisco, nas faixas costeiras de Sergipe e Alagoas. Sua vegetação é caracterizada por árvores de médio e grande porte formando uma floresta densa e fechada, como matas ciliares e matas de galeria. Os Costeiros e insulares predominam na parte do Baixo São Francisco, mais próximo à foz, com cordões litorâneos e dunas, assim como a presença de manguezais e campos salinos (PRH-SF,2015).

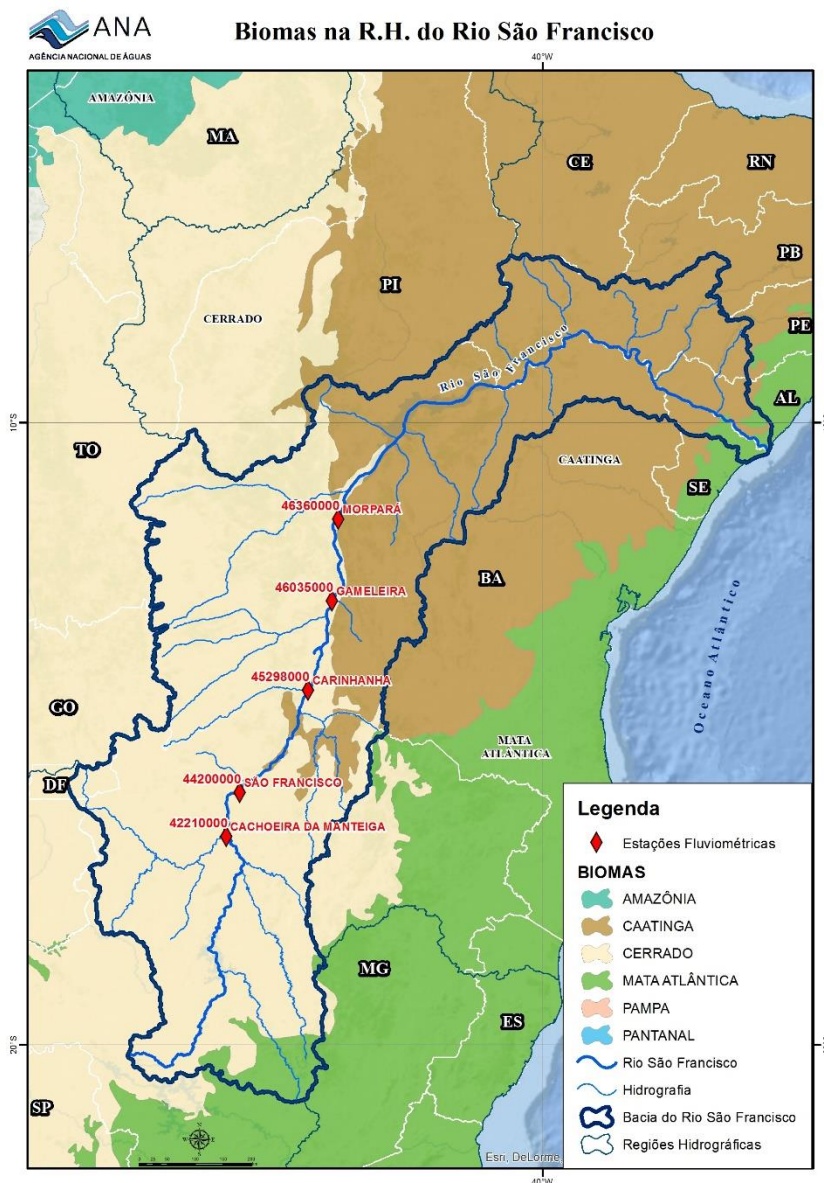


Figura 5 – Mapa de Biomias da Bacia do Rio São Francisco com estações fluviométricas da ANA. Fonte: da autora, 2016.

As classificações da cobertura vegetal da bacia (Figura 6) são: Floresta Estacional Semidecidual (Floresta Tropical Subcaducifólia), Floresta Estacional Decidual (Floresta Tropical Caducifólia), Savana (Cerrado), Savana Estépica (Caatinga), Vegetação com influência fluvio-marinha (manguezal e campo salino), influência fluvial e marinha (Formações Pioneiras), Áreas de tensão ecológica, Refúgios ecológicos, Sistema de vegetação secundária, Agropecuária, Reflorestamento ou Florestamento, Sistema de áreas sem vegetação (dunas), áreas degradadas por motivos antrópicos e áreas urbanizadas/perímetros urbanos.

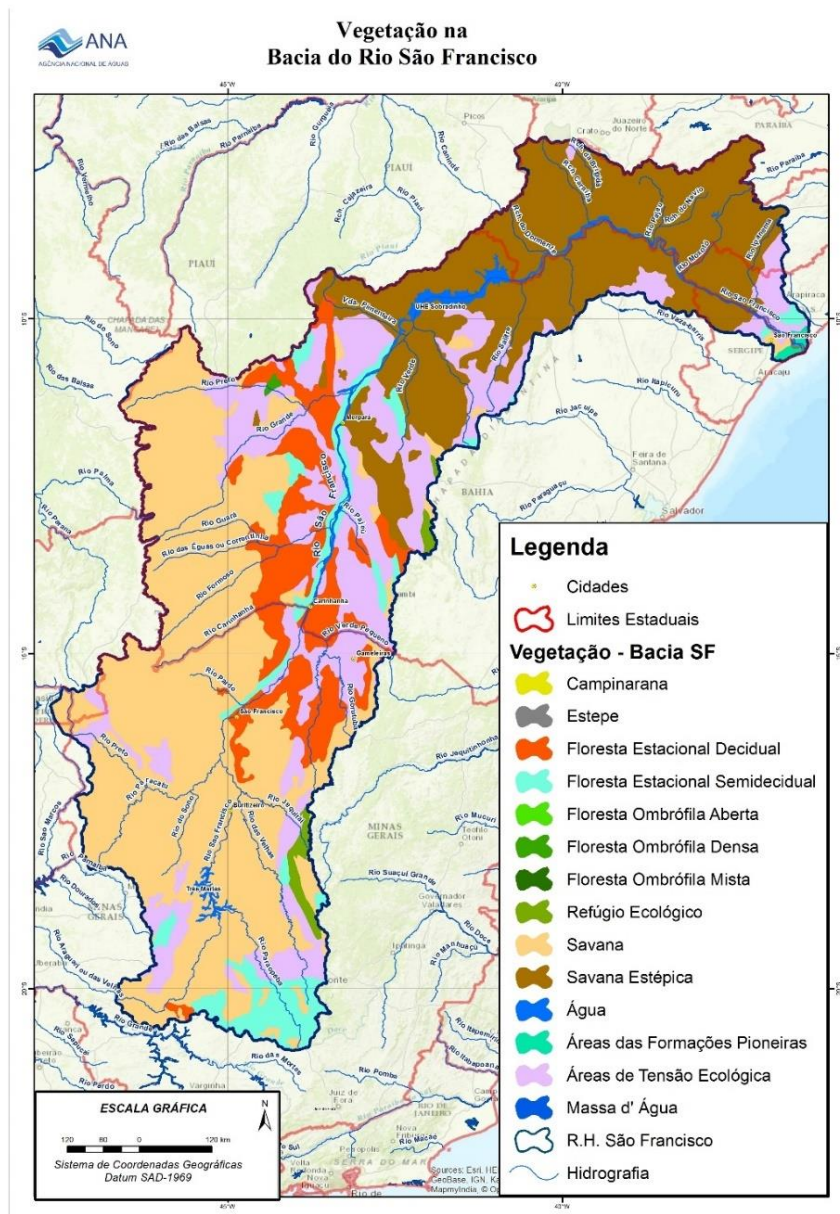


Figura 6 – Mapa da Vegetação da Bacia do Rio São Francisco. Fonte: da autora, 2016.

### 3.2.3. Geologia

Levando-se em conta a dimensão da bacia do rio São Francisco, há uma grande diversidade de formações geológicas, como as rochas mais antigas, do período Eoarqueano, ocorrendo de forma mais localizada, enquanto as mais recentes ocorrem de forma mais dispersa. Ainda considerando o tamanho da bacia, os terrenos da Era do Proterozóico predominam a região, principalmente as rochas sedimentares (69% da bacia), seguidas de rochas metamórficas, metassedimentares e metaígneas (26% do total), e rochas ígneas que só se manifestam em 5% do total (PHR-SF, 2015). A seguir, a Figura 7 mostra o mapa em que a geologia é dividida de acordo com a natureza da rocha:

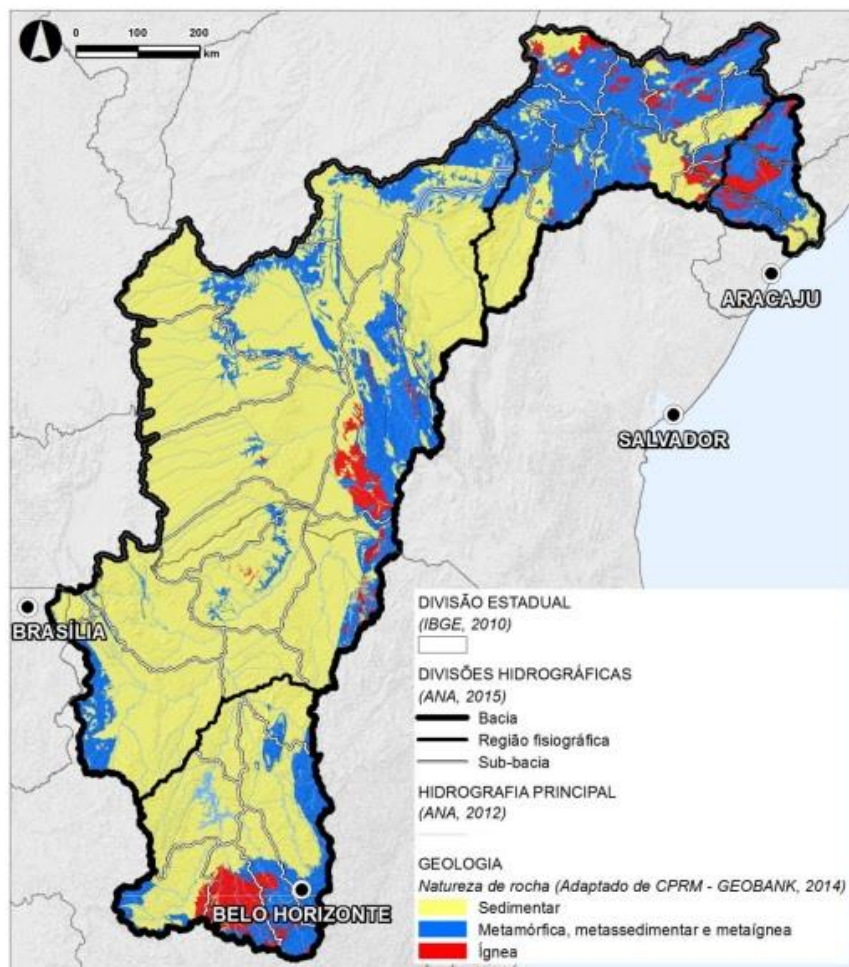


Figura 7 – Mapa da geologia da BHSF por natureza das rochas predominantes. Fonte: PHR – SF, 2015.

### 3.2.4. Geomorfologia

Metade da Bacia compreende o domínio morfoestrutural dos Crátos Neoproterozóicos, o que o denominou de Cráton do São Francisco, correspondendo à uma zona estável com terrenos de natureza metamórfica e granitoide, suscetível à processos erosivos dando origem à compartimentos morfológicos como depressão, chapadas e serras.

Conforme PRH-SF (2015), boa parte da bacia é de domínio da região Nordeste e corresponde às zonas de depressões intermontanhas e interplanálticas semiáridas (domínio morfoclimático da Caatinga). E na parte oriental e sul da bacia, há a presença de Chapadões tropicais interiores com o Cerrado e florestas-galeria (Cerrado). Bacias e coberturas sedimentares do Fanerozóico desenvolveram-se nas rochas do embasamento cristalino do Cráton. O Baixo São Francisco é o único que não é predominado pelos Crátos Neoproterozóicos, sendo assim, dominado pelos terrenos dos Cinturões Móveis Neoproterozóicos. De acordo com o mesmo Plano, estes Cinturões estão “associados aos terrenos metamórficos e ígneos do Proterozóico e do Eoarquano, representados por extensas áreas de planalto, serras e depressões interplanálticas resultantes da erosão das antigas cadeias montanhosas” (Figura 8).

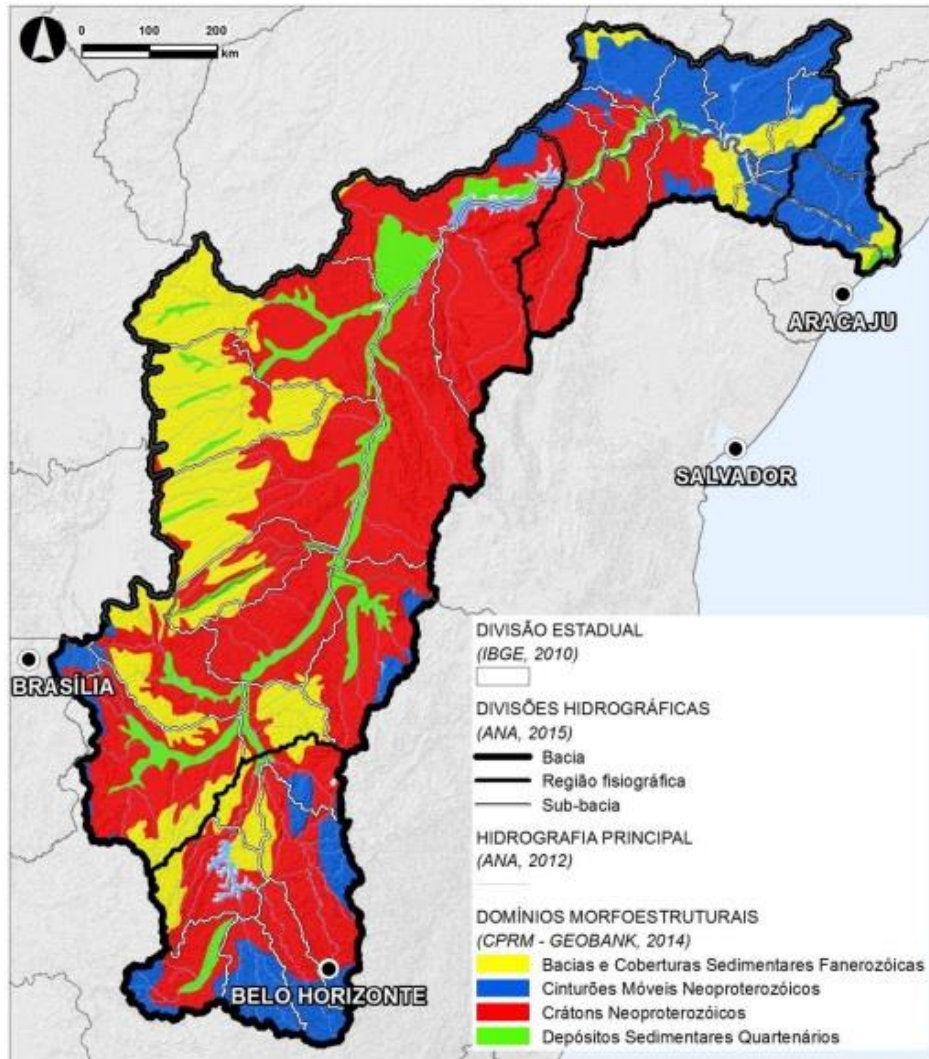


Figura 8 – Mapa de domínios morfoestruturais da bacia. Fonte: PRH-SF, 2015.

As depressões são o compartimento do relevo de maior representatividade na bacia hidrográfica (40%), onde, Alto-Médio e Baixo-Médio ocupam 18% a 12% da região hidrográfica. Levando em consideração a área, a chapada constitui 12% da região hidrográfica, os patamares (14%), as serras (10%), as zonas de planície (8%), os planaltos (5%) e os tabuleiros (3%), como é representado na Figura 9 a seguir:

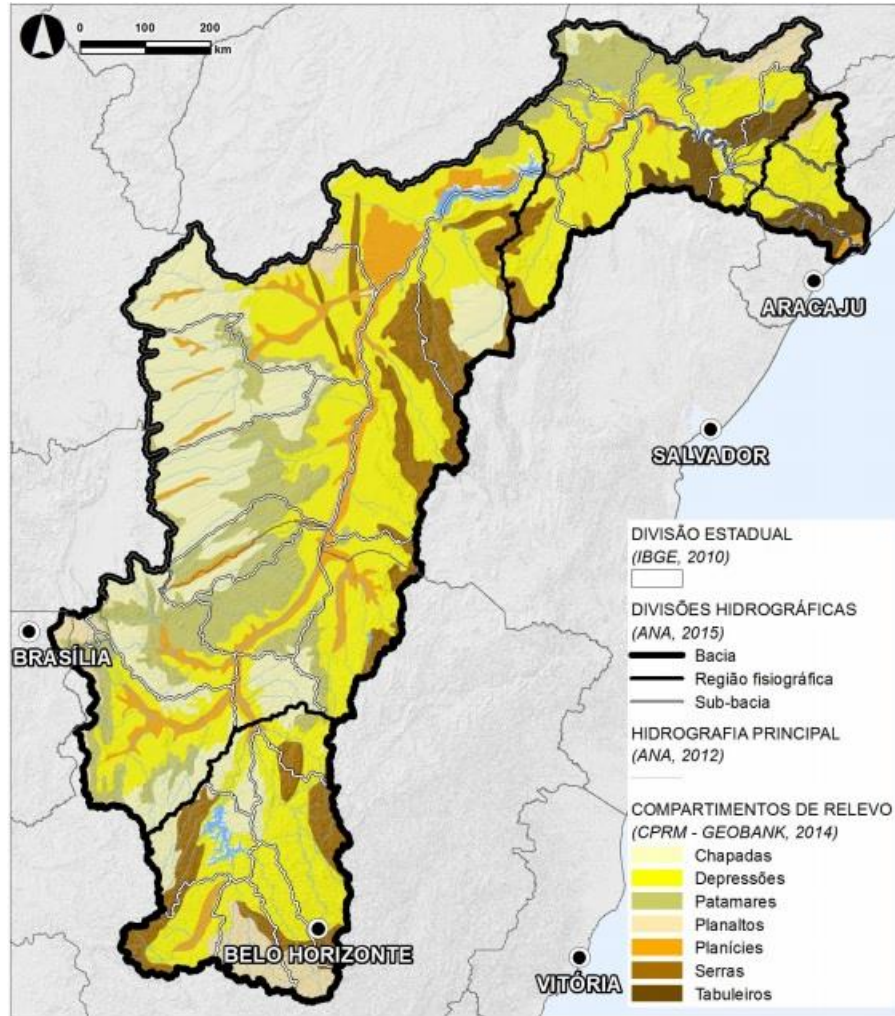


Figura 9 – Mapa de compartimentos de relevo. Fonte: PRH-SF, 2015.

### 3.2.5. Solo

Os tipos de solo predominantes na bacia hidrográfica do rio São Francisco são latossolos (35,3%), neossolos (26,5%) e os cambissolos (15,8%). A análise mais detalhada de cada região fisiográfica mostra a diferenciação entre os tipos de solos na bacia (Figura 10). No Alto e Médio São Francisco, os tipos de solos que os representam são os mesmos que compõem a maior parte da bacia, mas com proporções diferentes, como os latossolos (43,9% e 31,1%), neossolos (31,1% e 10,6%) e cambissolos (14% a 36,6%). No SubMédio, predominam os luvisolos (27,9%), neossolos (22,9%) e planossolos (16,1%). E no Baixo, os que possuem maior relevância são os planossolos (41,5%), os neossolos (32,5%) e os argissolos (13,3%), não tendo existência dos outros tipos (PRH-SF, 2015).

É importante mencionar que os tipos de solos caracterizados em cada região, possui certa importância em relação ao seu uso. Os argissolos e os latossolos tem grande potencial agrícola, apesar de o latossolo necessitar de uso intensivo de adubos e da correção de sua acidez, e, além disso, tem uma capacidade maior de infiltração do que os argissolos. Os luvisolos e os neossolos não tem potencial agrícola, pois tem uma suscetibilidade maior às erosões. E o neossolo possui alta taxa de infiltração e pouca fertilidade (MMA, 2006).

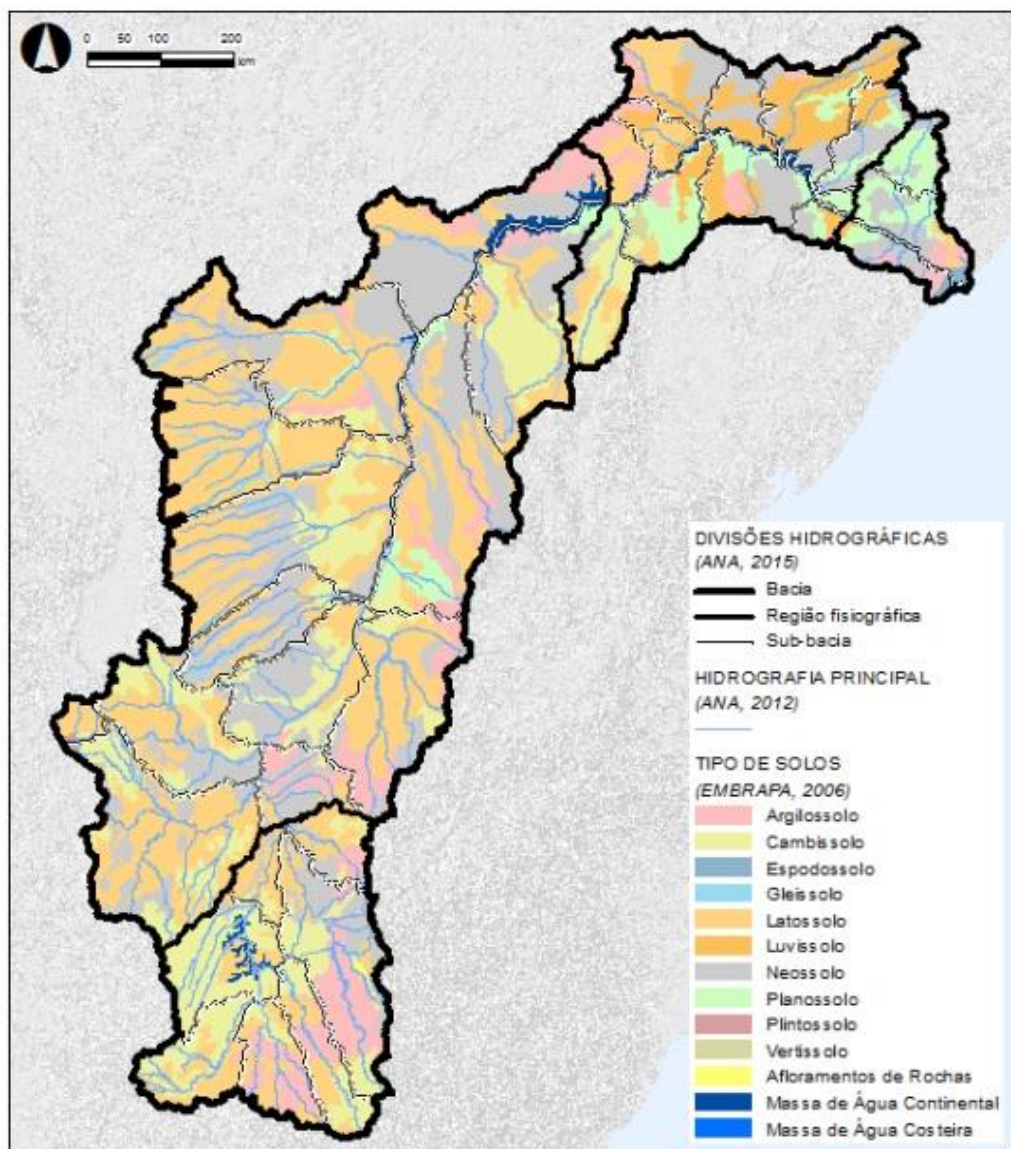


Figura 10 – Tipos de solo na BHSF divididas por suas regiões fisiográficas. Fonte: PRH-SF, 2015.

### 3.3. O Médio São Francisco

O Médio São Francisco está localizado entre o Alto São Francisco e o Sub Médio São Francisco e é a maior das quatro divisões, com uma área de 339.763 km<sup>2</sup>, abrangendo 50% da bacia. Apresenta características climáticas de uma região tropical semiárida com temperatura média anual de 24°C e evaporação de 2.900 mm anuais. Sua altitude varia de 2.000 a 500 m, tendo como divisor de águas as serras que compõem a Chapada Diamantina, com altitude entre 2.000 a 1.000 m intercalados por vales.

Tem como principais afluentes rios como: Paracatu, Urucuia, Carinhanha, Corrente, Grande, Verde Grande, Paramirim; Pilão Arcado, a oeste; e do Jacaré ao leste, nos estados de Minas Gerais e Bahia (ALMANAQUE VALE DO SÃO FRANCISCO, 2001).

Esta região possibilita uma subdivisão em Médio Superior e Médio Inferior devido à localização e suas características. O Médio Superior compreende o trecho entre Pirapora e a divisa com a Bahia, limitados pelos rios Carinhanha e Verde Grande, tendo assim, atributos semelhantes ao do Alto São Francisco (ALMANAQUE VALE DO SÃO FRANCISCO, 2001).

Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA), esta bacia tem uma grande importância, pois dispõe de uma diversidade de culturas, de sítios arqueológicos, lugares históricos e grandes centros urbanos. E devido à sua grande dimensão, além de gerar aumento na quantidade de barragens e uma maior utilização de recursos, suas belezas naturais atraem maiores atividades turísticas.

O Médio SF é composto por 2 biomas: Cerrado e Caatinga. Sua vegetação é definida de acordo com a região em que se ocupa. A parte superior dessa região é marcada pela Savana Arborizada e Gramíneo-Lenhosa, com um intenso processo de antropização ao longo de alguns principais rios, como Paracatu (MG), Preto (MG) e Grande (BA e MG). Ainda nessa região, observa-se a presença de Savana-Floresta Estacional e Floresta Decidual Montana (mata seca) ao longo do Vale Verde Grande (MG). Na parte inferior, há uma heterogeneidade dessa vegetação onde a Savana Estépica-Floresta Estacional é mais frequente. Na área oeste há predominância da Savana Arborizada e Gramíneo-Lenhosa, existindo também



formações de Florestas Estacionais Deciduais, nas quais estão sofrendo processo de antropização (MMA, 2006).

A disponibilidade hídrica dessa região é uma das maiores entre as sub bacias do São Francisco atingindo 35% do total, sendo utilizada, principalmente, para abastecimento urbano, animal, industrial e irrigação. Por possuir predominância do latossolo, os solos possuem uma elevada compatibilidade com atividades agrícolas, assim sendo a região com maior proporção de área irrigáveis de toda a bacia.

De acordo com o CBHSF (2015):

O Médio São Francisco sofre com a poluição agrícola. A agricultura praticada sem as devidas restrições para que os recursos hídricos sejam preservados, assim também como os projetos de irrigação, provocam o desmatamento da mata ciliar, e, conseqüentemente, carregam sedimentos para o rio. O desmatamento nas margens do rio, ao lado da represa de Três Marias e em outros trechos das margens do Velho Chico, provoca violentos processos de erosão. A construção de hidrelétricas ao longo do rio também é um grave problema dessa sub-região da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco.

Em consequência do aumento das construções de hidrelétricas na bacia, a velocidade do rio é prejudicada assim como o transporte de sedimentos. Com isso, é importante que haja um estudo aprofundado e um monitoramento eficiente que defina a quantidade de sedimentos que está sendo transportado e qual a consequência disso para a vida do rio e da população, realizando-se uma boa gestão dos recursos hídricos.

Poucos estudos investigam o comportamento dos sedimentos do rio no trecho do Médio São Francisco. Este trabalho tem o propósito de analisar a concentração de sedimentos transportados ao longo de duas barragens mais importantes da bacia: Três Marias-MG e Sobradinho-BA.

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1. Área de Estudo**

Para a realização deste estudo, foram definidas cinco áreas próximas às estações convencionais fluviométricas da ANA, em cinco cidades situadas na região do Médio São Francisco (Tabela 1). Ao redor de cada estação foi definido um

quadrante (Figura 11) para download das imagens de satélite fornecidas pela NASA, e dentro deste, foi criada máscara em formato km., de aproximadamente 15 km de extensão (Figura 12), utilizadas no processamento das imagens.

**Tabela 1. Dados das estações fluviométricas da ANA trabalhadas no Médio SF.**

<b>Estações</b>	<b>Código</b>	<b>Município</b>	<b>Estado</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>
CACHOEIRA DA MANTEIGA	42210000	BURITIZEIRO	MG	-16,65722	-45,08083
SÃO FRANCISCO	44200000	SÃO FRANCISCO	MG	-15,94944	-44,86778
CARINHANHA	45298000	CARINHANHA	BA	-14,30444	-43,76333
GAMELEIRA	46035000	SÍTIO DO MATO	BA	-12,86861	-43,37972
MORPARÁ	46360000	MORPARÁ	BA	-11,55833	-43,28250

**Fonte: Da autora, 2016.**

A escolha dessas estações foi feita priorizando as estações que possuísem dados hidrológicos mais completos armazenados no banco de dados da ANA, o HIDRO 1.3. Com o auxílio do software ArcGis e com ferramentas do Google Earth foi possível determinar e localizar cada estação a ser utilizada, como mostrado nas Figuras 11 e 12.

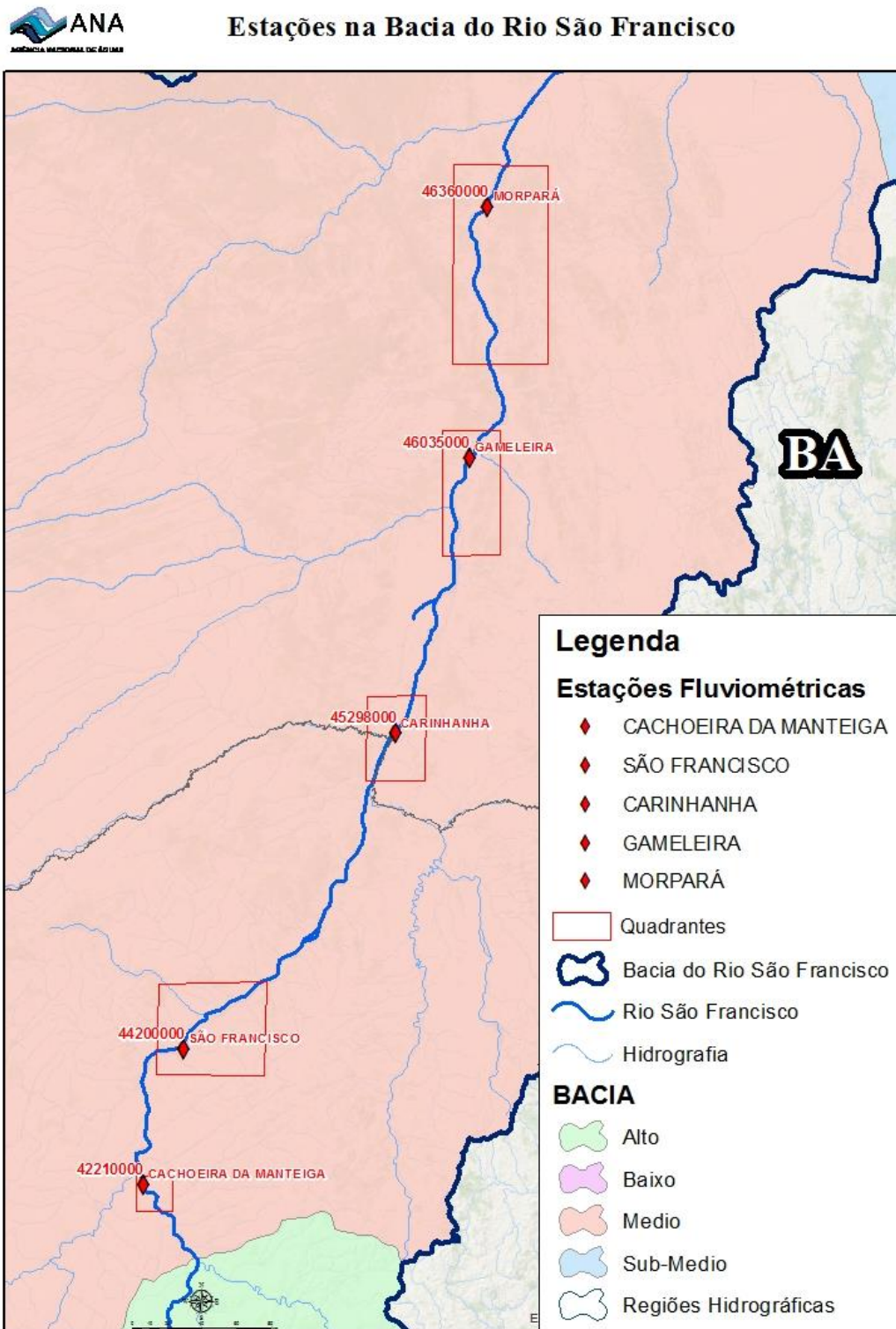
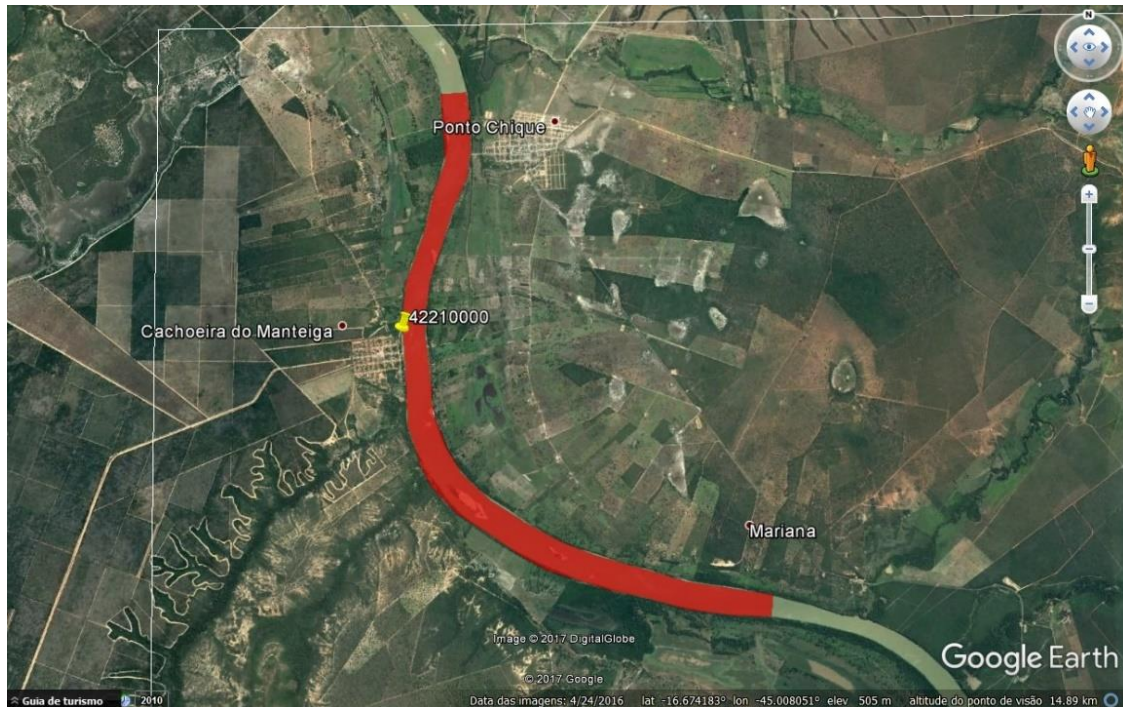


Figura 11 – Localização das estações fluviométricas situadas dentro do Médio São Francisco com demarcação dos quadrantes utilizados para recortar as imagens da NASA. Fonte: da autora, 2016.



**Figura 12 – Polígono criado no Google Earth na estação Cachoeira da Manteiga (42210000) que foi utilizado no processamento das imagens de satélite. Fonte: da autora, 2016.**

As estações estudadas localizam-se na sub-bacia do Médio SF, sendo a primeira estação mais a montante do rio, após o reservatório de Três Marias – MG, e a estação mais a jusante localizando-se à montante da barragem de Sobradinho – BA (Figura 13).

Para entender a variabilidade do ciclo hidrossedimentológico, foram obtidas séries temporais que acompanham o ciclo hidrológico, bem como a sazonalidade das precipitações ao longo da bacia estudada. Foram obtidos dados de reflectância nas bandas do vermelho e do infra-vermelho próximo a partir do processamento de imagens do satélite MODIS no período de fevereiro de 2000 a fevereiro de 2017 e calculados os valores de sedimentos em suspensão e descarga sólida (sedimentos em suspensão e vazão) das estações de monitoramento citadas na Tabela 1.

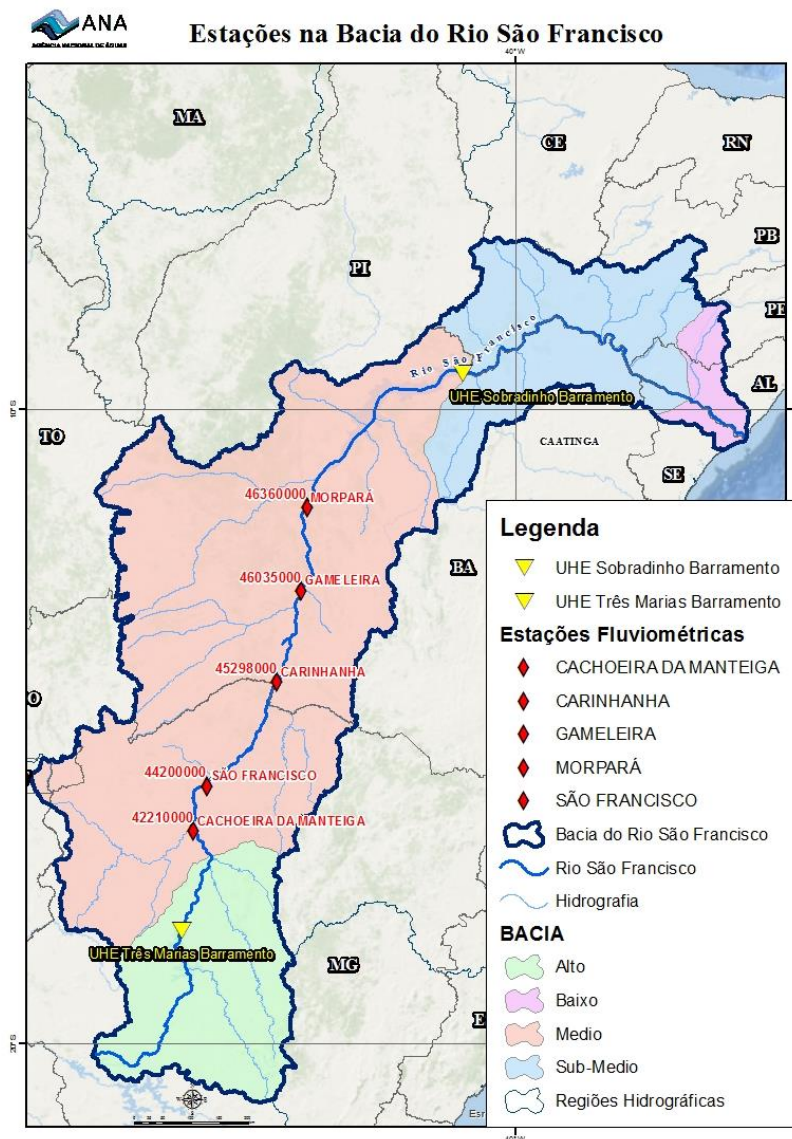


Figura 13 - Mapa com estações fluviométricas entre os barramentos de Três Marias - MG e Sobradinho - BA. Fonte: da autora, 2016.

## 4.2. Imagens de satélite

As imagens de satélite utilizadas são do sensor MODIS (*MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer*) dos satélites americanos TERRA e AQUA fazendo parte do programa EOS (*Earth Observing System*) liderado pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) projetado para fornecer informações a respeito de mudanças globais (RUDORFF et al., 2007).

As imagens do sensor utilizadas dizem respeito aos produtos de reflectância da superfície MOD09 (satélite TERRA) e MYD09 (satélite AQUA) que consistem na

análise pixel por pixel de imagens diárias para intervalo de oito dias, selecionando os pixels de melhor qualidade com menor cobertura de nuvens e melhor geometria. Neste trabalho, as imagens são de dois tipos: A1 e Q1. As imagens MOD09A1 e MYD09A1 possuem resolução espacial de 500m e são utilizadas para extrair informações sobre a qualidade do processamento, enquanto as imagens MOD09Q1 e MYD09Q1 tem resolução espacial de 250m e são utilizadas para o processamento de duas bandas radiométricas: 1 - vermelho (620-670nm) e 2 - infravermelho (841-876nm) (RUDORFF et al., 2007). As imagens, fornecidas gratuitamente pela NASA, são georeferenciadas e possuem correção atmosférica.

### **4.3. Tratamento das imagens de satélite**

Em consequência da baixa resolução espacial do sensor MODIS, os pixels de água pura são reduzidos pela mistura espectral com outros componentes, tornando-se maior a dificuldade de analisar as imagens detalhadamente. Com isso, viu-se a necessidade de automatizar o processamento das imagens utilizando o programa MOD3R (MODIS River Reflectance Retrieval) desenvolvido em linguagem JAVA pelo IRD, a fim de obter os valores de reflectância de superfície da água. O programa possui um algoritmo que determina com consistência e melhor precisão os pixels de água pura de uma imagem, em uma escala temporal, independentemente do tamanho e das características do rio. Com a obtenção de valores de reflectância das bandas do vermelho e infravermelho das imagens MODIS, e após a calibração com dados de campo, é possível definir a concentração dos sedimentos e de turbidez.

O programa apresenta uma interface simples para seleção das imagens e dos parâmetros necessários para os cálculos. Sendo assim, são gerados arquivos de saída com resumo das imagens processadas e cada imagem é acompanhada por um indicador de qualidade (PISCOYA et al., 2014), variando entre 1 (bom) e 3 (ruim).

Neste trabalho, bem como em Pinto et al. (2014) e Menezes (2013), as imagens escolhidas foram as de oito dias com correção atmosférica e melhor qualidade de dados a serem processados, sem imagens com nuvens, e com a redução do efeito da direção da reflectância bidirecional e da atmosfera.

Foram utilizadas mais de 15 mil imagens dos satélites TERRA e AQUA de todas as estações. O processamento foi feito separadamente para cada área e para cada satélite, sendo o mesmo número de imagens de 500m de resolução (MOD09A1 e MYD09A1) para a obtenção dos valores de qualidade. Após processar as imagens, os resultados são inseridos em uma planilha Excel denominada “fusion”, onde é executada a função “macro” que seleciona os resultados de melhor qualidade de cada dia, dos satélites TERRA e AQUA.

#### **4.4. Estimativa da concentração de sedimentos**

A água, na sua forma pura, possui baixa reflectância pela ausência de constituintes suspensos na água, diminuindo o coeficiente de espalhamento. O comportamento espectral da água depende dos componentes opticamente ativos como: 1) partículas em suspensão (orgânicas e inorgânicas); 2) organismos vivos (fitoplâncton e zooplâncton); e 3) substâncias orgânicas dissolvidas. Logo, quanto maior a concentração desses componentes, maior será o coeficiente de espalhamento, e assim, maior a reflectância (NOVO, 2010). Em função da resposta espectral da água aos componentes em suspensão, o presente trabalho foi desenvolvido.

Conforme apresentado em Piscoya et al. (2017), para a estimativa da concentração de material em suspensão foi utilizada a equação de calibração que relaciona concentração de material em suspensão e dados espectralradiométricos obtidos com o radiômetro da TRIOS em diversas campanhas realizadas no reservatório da UHE Três Marias, por Menezes (2013) e por Piscoya et al. (2017) no trecho Pirapora a Barra, do rio São Francisco, e nos seguintes afluentes: rio das Velhas, rio Paracatu, rio Corrente, rio Grande e rio Urucuia. Os dados hiperespectrais de campo foram utilizados para simular as bandas MODIS e calcular a equação de calibração para a obtenção dos valores de concentração no Infravermelho. A equação de calibração utilizada foi fornecida pela Especialista em Recursos Hídricos da Agência Nacional de Águas, Rita de Cássia Cerqueira Condé de Piscoya, e doutoranda do programa de Pós-graduação em Geociências Aplicadas da Universidade de Brasília, devendo ser publicada na finalização do doutorado da mesma.

#### **4.5. Consistência dos dados de reflectância com dados de cota**

Nesta etapa do trabalho foi utilizada a metodologia da ANA para checar a consistência dos dados obtidos de reflectância no vermelho e infravermelho no processamento de imagens, comparando a série temporal de reflectância com dados hidrológicos.

No início do período de chuvas, há um acréscimo do volume da calha fluvial, aumentando a concentração de sedimentos e de turbidez. Em seguida, tendem a diminuir devido à diluição que ocorre à medida que aumenta o volume de água (PISCOYA et al., 2013). Com o aumento das precipitações, ocorre um aumento da cota, e com isso é esperado que a curva da reflectância acompanhe a curva da cota.

Além da comparação com os dados de cota, foi feita também a comparação com dados de concentração de sólidos em suspensão das estações convencionais da ANA, disponibilizadas no HidroWeb (banco de dados que fornece informações coletadas pela rede hidrometeorológica pela ANA), localizadas nos pontos selecionados no item 4.1. Séries temporais foram geradas com informações de suas médias mensais em um certo intervalo de tempo e comparadas com os gráficos das séries temporais das reflectâncias.

#### **4.6. Cálculo da descarga sólida**

Segundo Carvalho (2008), a carga em suspensão representa a maior quantidade de carga sólida em um curso d'água. Para determinar a quantidade da descarga sólida total é necessário determinar a concentração dos sólidos em suspensão, a velocidade média da corrente, a profundidade e a largura do rio. Porém, como neste trabalho será calculada a descarga sólida em suspensão, a concentração utilizada corresponde ao valor médio na seção, sendo assim representada pela equação:

$$Q_{ss} = 0,0864 \cdot Q \cdot C ;$$

onde  $Q_{ss}$  é a descarga sólida em suspensão,  $Q$  é a descarga líquida (vazão) em  $m^3/s$ ,  $C$  é a concentração em  $mg/L$ , e 0,0864 sendo o fator de multiplicação em que a descarga sólida será representada em T/dia.



Foram utilizados os valores de descarga líquida calculados a partir das curvas de descarga (curvas-chave) das estações da ANA disponíveis no HidroWeb. Os valores de concentração utilizados foram aqueles calculados a partir da curva do item 4.4.

Com os valores de concentração obtidos a partir dos dados de reflectância no infravermelho e da curva de calibração que relaciona reflectância e concentração de sedimentos em suspensão, realizou-se o cálculo da descarga sólida para encontrar a média da quantidade de sedimentos em suspensão transportados nas estações estudadas em uma série temporal de 17 anos.

#### **4.7. Comparação com cota e vazão**

Medições de vazões são realizadas quatro vezes ao ano nas estações da Agência Nacional de Águas para determinar a relação entre o nível d'água de um rio em uma seção e a sua vazão. Essa relação entre o nível (cota) e a vazão é chamada de curva-chave e permite a obtenção dos dados de vazões diários a partir das cotas fornecidas diariamente pelos observadores das estações hidrológicas. As curvas-chave (ou curva de descarga líquida) permitem também um cálculo aproximado dos dados diários de sedimentos e de descarga sólida média. Os fatores que influenciam nessa curva são a variação sazonal, tempo entre o pico de concentração e o de vazão, assim como eventos extremos de chuvas (Carvalho, 2008).

Assim, a partir dos dados de cotas e de vazão obtidos a partir das curvas-chave de cada estação disponíveis no banco HIDRO fornecido pela ANA, foi feita uma série temporal de todas as estações de modo a avaliar o comportamento do rio ao longo do tempo. O aumento da cota, acompanhado do aumento da vazão, é causado por fortes precipitações que geram turbulência na água e suspende o sedimento, influenciando na resposta espectral (MENDES, 2017).

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1. Reflectância**

As séries temporais de reflectância na banda do infravermelho das cinco áreas representativas do Médio São Francisco, obtidas através do processamento das imagens utilizando o programa MOD3R, são apresentadas na Figura 14.

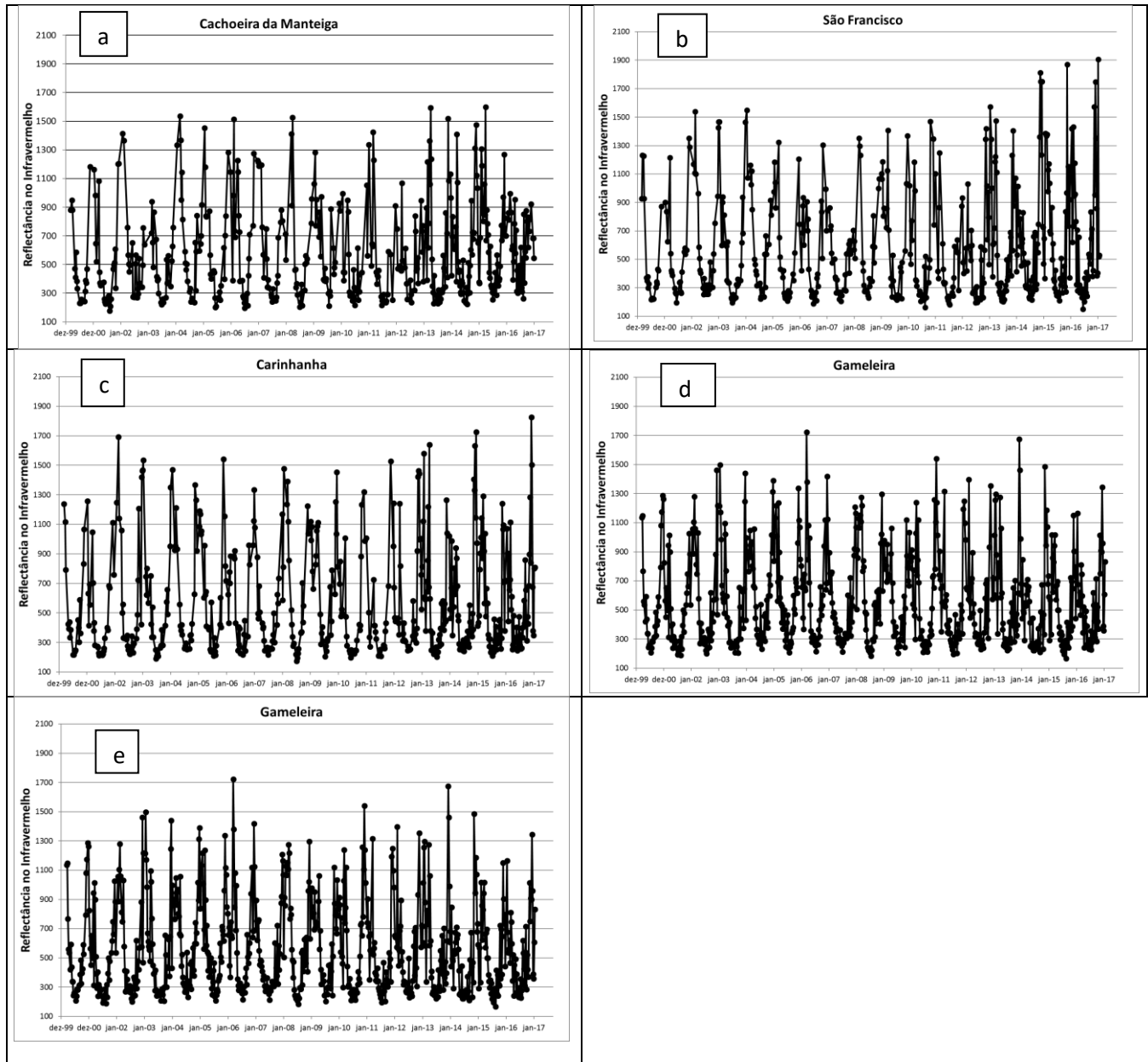


Figura 14 – Série temporal da reflectância na banda do infravermelho das estações do médio SF: a) Cachoeira da Manteiga; b) São Francisco; c) Carinhonha; d) Gameleira; e) Morpará. Fonte: da autora, 2017.

Considerando a grande quantidade de dados e sua variação, foi realizada a média, mediana, valores mínimos e máximos da reflectância na banda do infravermelho de todos os valores de reflectância para uma melhor avaliação do

padrão de reflectância encontrado nas áreas estudadas (Tabela 2). Nota-se que não há muita diferença entre os valores encontrados nas cinco estações.

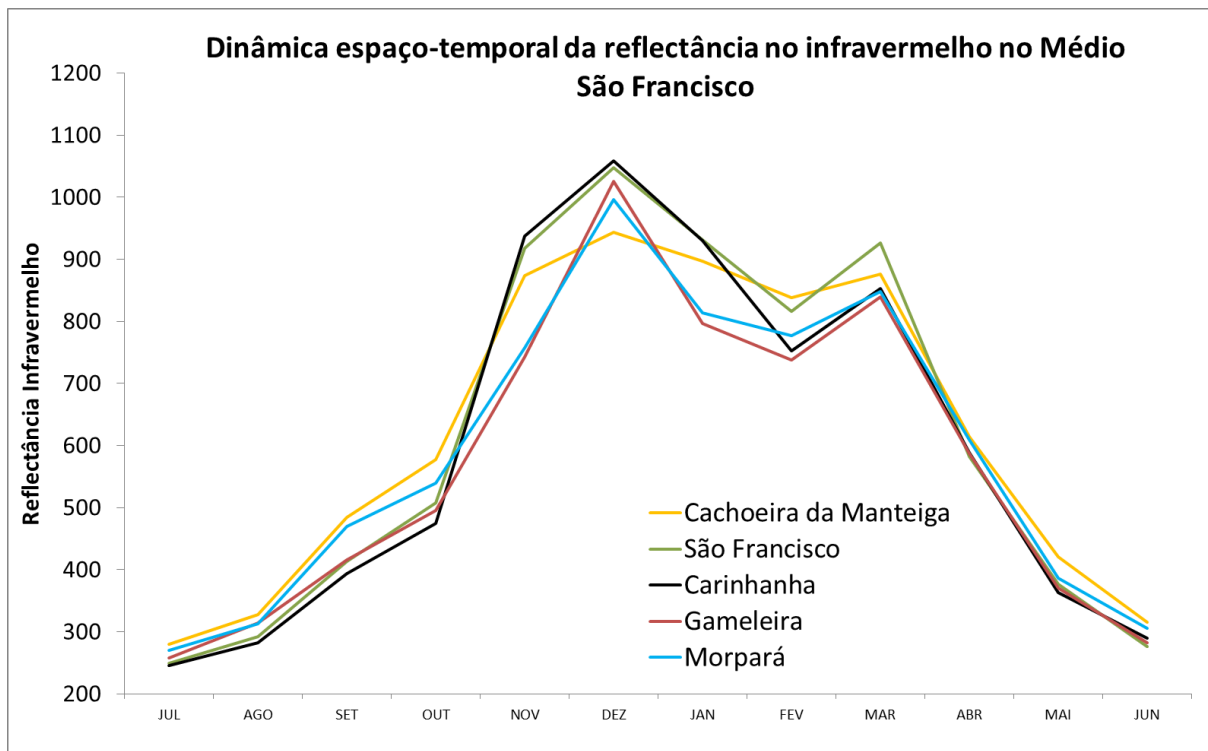
**Tabela 2. Média, mediana, valores máximos e mínimos dos valores da reflectância no Infravermelho para os pontos selecionados na bacia do Médio São Francisco.**

Código da estação	Nome da estação	Reflectância na banda do Infravermelho			
		Médias	Medianas	Máximas	Mínimas
42210000	Cachoeira da Manteiga	578	475	1599	177
44200000	São Francisco	584	455	1905	149
45298000	Carinhanha	572	426	1824	174
46035000	Gameleira	556	465	1723	167
46260000	Morpará	574	472	1649	176

Fonte: Da autora, 2017.

A Figura 15 apresenta a dinâmica espaço-temporal dos sedimentos das estações, elaborada a partir da média mensal para um período de 17 anos de dados. De uma forma geral, na análise mensal a tendência encontrada é o aumento da reflectância de montante para a jusante, principalmente no primeiro trecho do rio, de Cachoeira da Manteiga para a estação Carinhanha. Entretanto, este comportamento não ocorre em todos os meses no trecho entre Carinhanha até Morpará. Nos meses de outubro a dezembro, a estação Carinhanha apresenta valores médios mensais de reflectância maiores que os das duas estações mais a jusante, Gameleira e Morpará. Afluentes como o rio Paracatu, que tem uma bacia antropizada com agricultura, deve fornecer sedimentos para o Rio São Francisco contribuindo para o aumento da reflectância na estação São Francisco. Por sua vez, outros afluentes com menor quantidade de sedimentos devem contribuir para a diminuição das concentrações no rio São Francisco nas áreas próximas à Gameleira e Morpará.

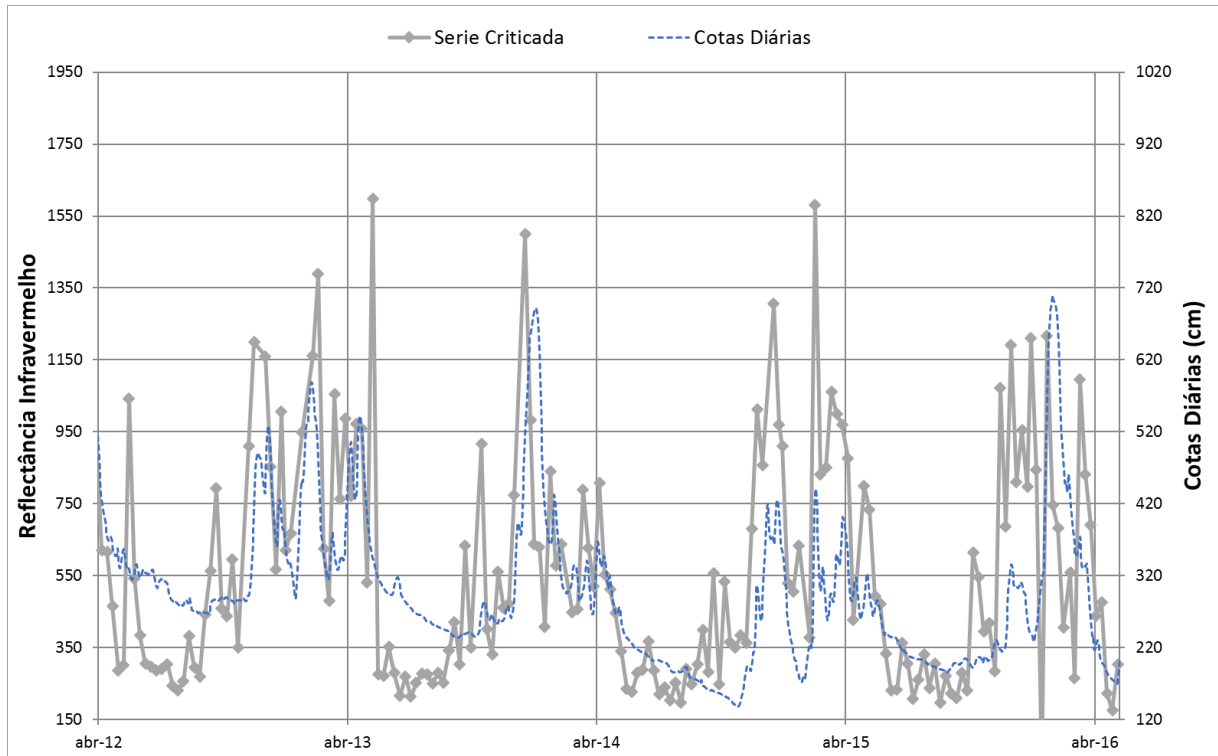
É possível observar a ocorrência dos picos de reflectância nos meses de novembro a março, correspondendo ao período de chuvas da região, como mostra o gráfico da dinâmica espaço-temporal das estações na Figura 15.



**Figura 15 – Dinâmica espaço-temporal da reflectância na banda do infravermelho nas estações no Médio São Francisco. Fonte: Da autora, 2017.**

Os gráficos obtidos também permitiram analisar um ciclo sazonal bem definido com altos valores de reflectância no período de chuvas (novembro a março) e baixos valores nos meses de seca (abril a outubro), além da variação da reflectância ao longo do curso do rio no sentido de montante à jusante com valores máximos de reflectância de 1905 (estação São Francisco) e baixos valores de 145 e 167 (São Francisco e Gameleira, respectivamente), mostrados na Tabela 2.

A Figura 16 apresenta a comparação das médias de reflectância com os dados de cota para a estação. Nota-se que os dados de reflectância acompanham as alterações observadas na cota, seguindo a mesma tendência entre os períodos de chuvas e de secas. Com a incidência das chuvas e aumento das cotas dos rios, ocorre movimentação e carreamento dos sedimentos, aumentando a reflectância das águas devido a maior concentração de sólidos em suspensão.



**Figura 16. Comparação das cotas médias diárias com os valores médios de reflectância na banda do infravermelho estimadas pelo sensor MODIS para a estação de Morpará - 46360000. Fonte: Da autora, 2017.**

## 5.2. Concentração

Para a obtenção dos valores de concentração para a banda do Infravermelho, foi utilizada a equação de calibração de Piscoya (2017), citada no item 4.4 deste trabalho, para cada estação. A Tabela 3 apresenta as concentrações médias, medianas, valores máximos e mínimos de concentração de sedimentos em suspensão calculados para cada estação.

Como visto nos valores de reflectância, os valores de concentração do material em suspensão seguem a mesma tendência, tendo pouca variação das médias de concentração das estações.

**Tabela 3. Concentrações médias, máximas e mínimas mensais para os pontos selecionados na bacia do Médio São Francisco.**

Distância (km)	Nome da estação	Concentração de Material em Suspensão (mg/L)			
		Médias	Medianas	Máximas	Mínimas
0	Cachoeira da Manteiga	91	74	264	26
105	São Francisco	92	70	317	22
345	Carinhanha	90	66	303	26
525	Gameleira	87	71	285	25
700	Morpará	91	73	272	26

Fonte: Da autora, 2017.

Observando com mais detalhe, a análise mensal da concentração em cada estação, mostrada na Figura 17 demonstra uma tendência parecida com a da reflectância, onde há o aumento da concentração de montante para a jusante. Porém, no período de seca, principalmente, a estação Cachoeira da Manteiga possui valores altos de concentração em comparação às estações seguintes, São Francisco e Carinhanha. No entanto, este comportamento não ocorre no período de chuvas, seguindo a tendência do aumento da concentração de montante à jusante. Nos meses de outubro a dezembro ocorre o mesmo da reflectância, a estação Carinhanha apresenta valores médios de concentração maiores ( $\approx 170$  mg/L) que os das duas estações mais a jusante, Gameleira ( $\approx 160$  mg/L) e Morpará ( $\approx 150$  mg/L), podendo ser devido à contribuição do importante afluente do rio Paracatu.

Assim como a reflectância, o aumento da concentração de sedimentos também se dá no período chuvoso, onde a turbulência das águas suspende o sedimento pelas fortes precipitações aumentando a quantidade de sedimentos. Como a concentração de sedimentos em suspensão influencia a resposta espectral, é de se esperar que quanto maior os valores de concentração (mais sedimentos), maior será a reflectância, como acontece nos períodos chuvosos, e o contrário, nos períodos de seca.

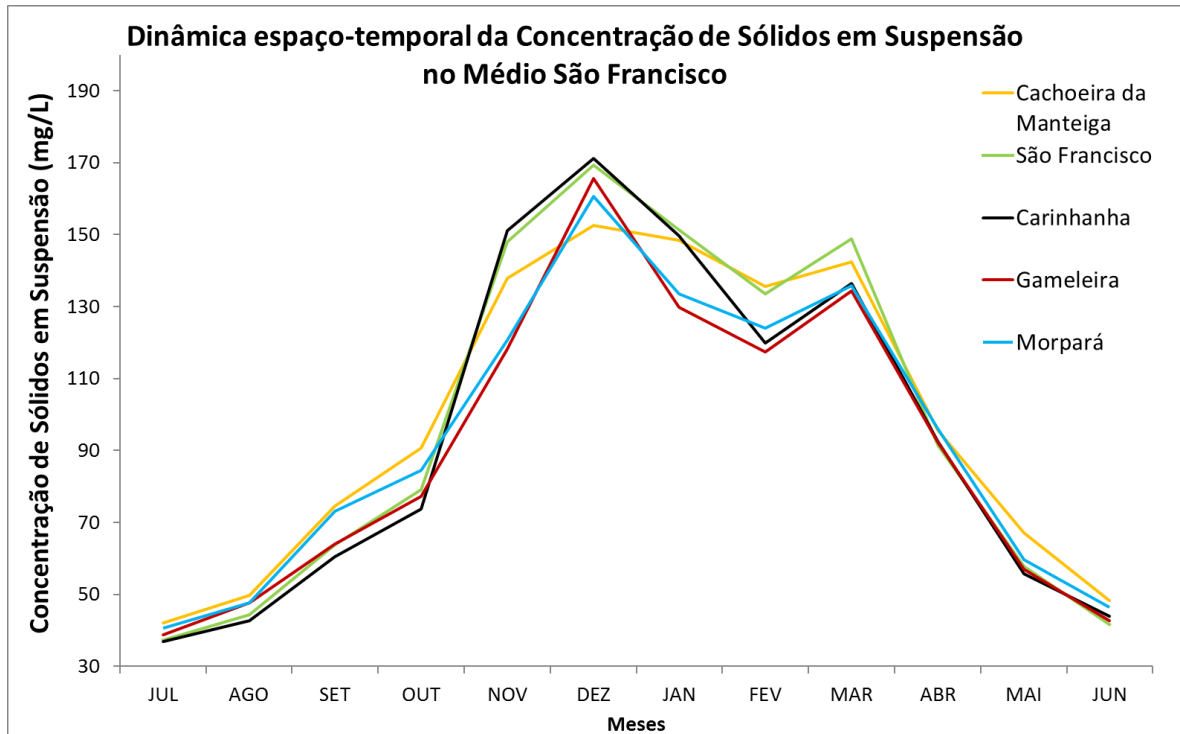


Figura 17 – Dinâmica espaço-temporal da concentração de sólidos em suspensão nas estações do Médio São Francisco. Fonte: Da autora, 2017.

### 5.3. Comparação dos dados de satélite com a hidrologia do Rio São Francisco

#### 5.3.1. Concentração e vazão

Os valores de concentração calculados pela equação de calibração foram comparados com valores de vazão para analisar o comportamento delas em cada estação. A Figura 18 apresenta a relação entre os dois parâmetros, mostrando a ocorrência do fenômeno da histerese, onde os picos das concentrações de sedimentos em suspensão antecipam os picos de vazão. A estação com o menor valor de vazão é Cachoeira da Manteiga com um valor máximo de aproximadamente 1700 m<sup>3</sup>/s, enquanto seu pico de concentração atinge 152 mg/L.

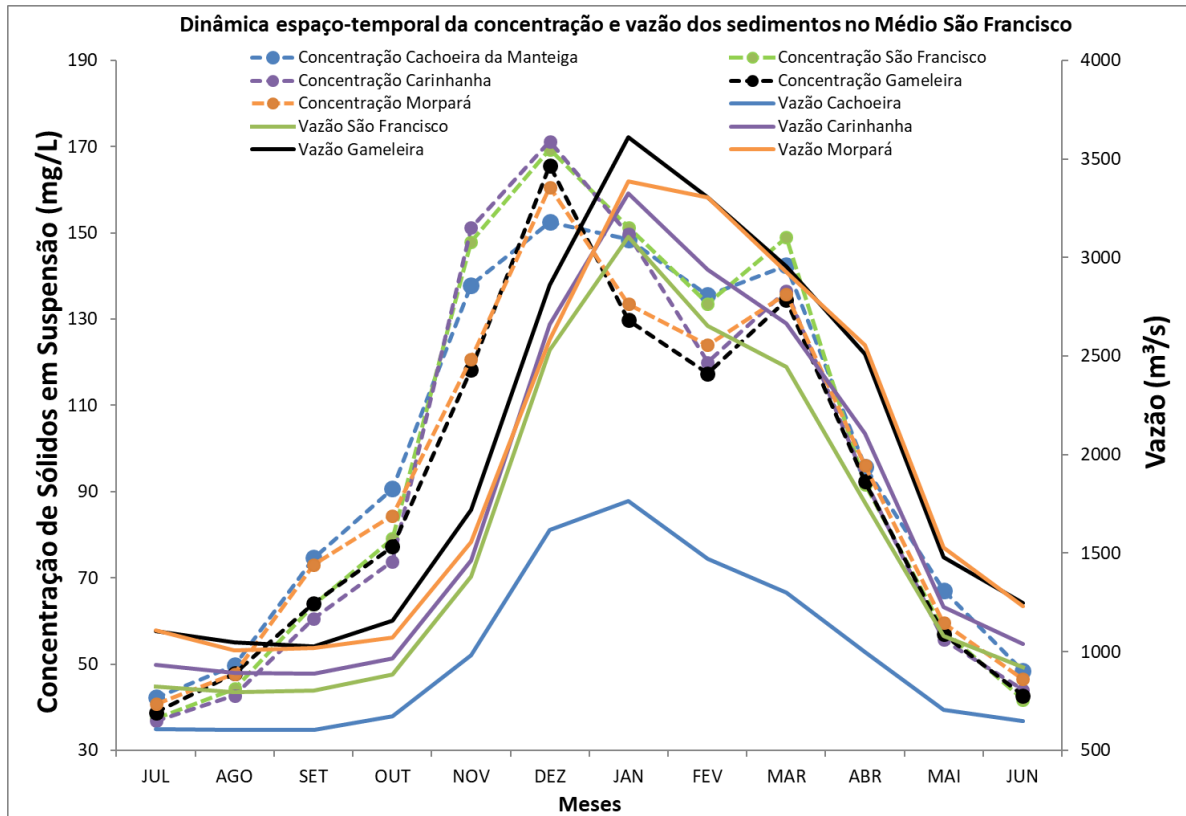
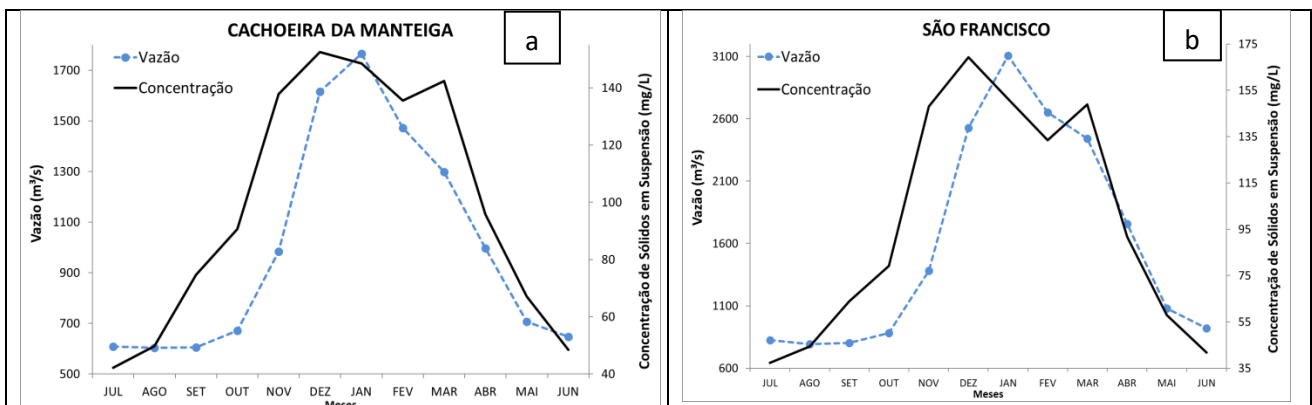


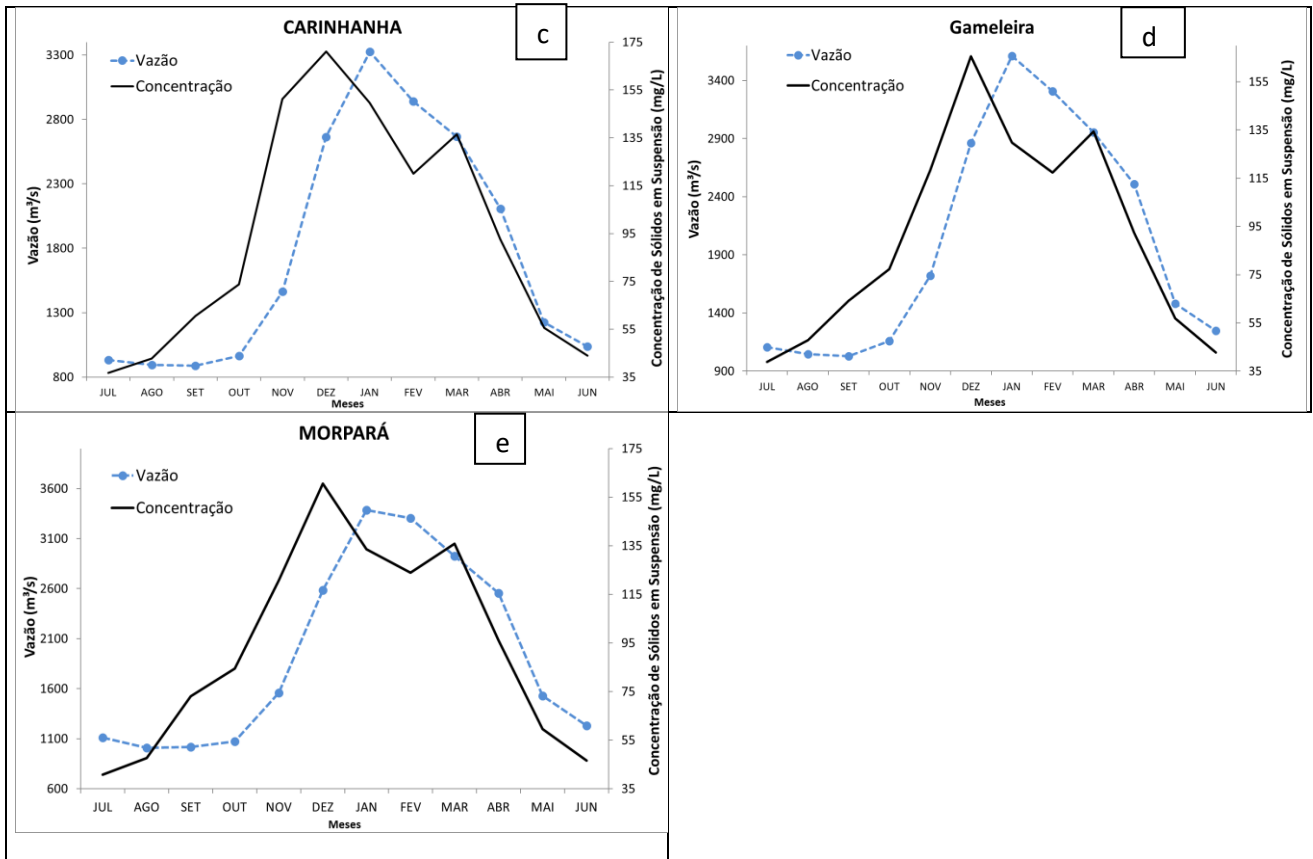
Figura 18 - Dinâmica espaço-temporal da concentração e da vazão dos sedimentos no Médio SF. Fonte: Da autora, 2017.

### 5.3.2. Histerese

A Figura 19 apresenta a comparação dos dados de vazão de estações da ANA nas áreas de estudos com os valores de concentração de sólidos em suspensão calculados. Pode-se observar que o pico da concentração de sedimentos é acompanhado pelo pico de enchentes, sendo o caso mais comum da histerese, conforme apresentado por Carvalho (2008).







**Figura 19 – Gráficos de comparação de dados de concentração de sólidos em suspensão com as vazões obtidas em cada estação: a) Cachoeira da Manteiga, b) São Francisco, c) Carinhanha, d) Gameleira e, e) Morpará. Fonte: da autora, 2017.**

As chuvas que desagregam os solos e as enxurradas que os transportam para os cursos d'água são as maiores responsáveis pelo transporte de sedimentos. No caso do rio São Francisco, na época da seca, devido à diminuição das chuvas e da velocidade do rio, há diminuição do transporte das partículas. Com início da época das chuvas há uma grande concentração de sedimentos que é transportada logo nas primeiras chuvas, com o pico da concentração se antecipando ao da vazão.

Conforme a Tabela 3 e os gráficos da Figura 19, não há muita variação entre os valores médios da concentração das estações da montante à jusante. No caso da vazão, a estação Cachoeira da Manteiga apresenta um valor máximo de vazão muito menor em relação às outras estações, possuindo o valor de aproximadamente 170 m<sup>3</sup>/s.

## 5.4. Carga sólida

Com dados de material em suspensão, calculados a partir da reflectância, e a vazão do rio, pode-se determinar o fluxo total de sedimentos em suspensão (a vazão

sólida ou carga sólida). Como os valores da reflectância na banda do infravermelho obteve uma melhor resposta, em comparação à reflectância no vermelho, foi utilizada a equação de calibração no infravermelho para calcular a concentração, fornecidos por Piscoya et. al (2017) como citado no item 4.4. Essa equação se baseia em dados de concentração estimadas em campo aliados à valores de reflectância obtidos no processamento das imagens do sensor MODIS.

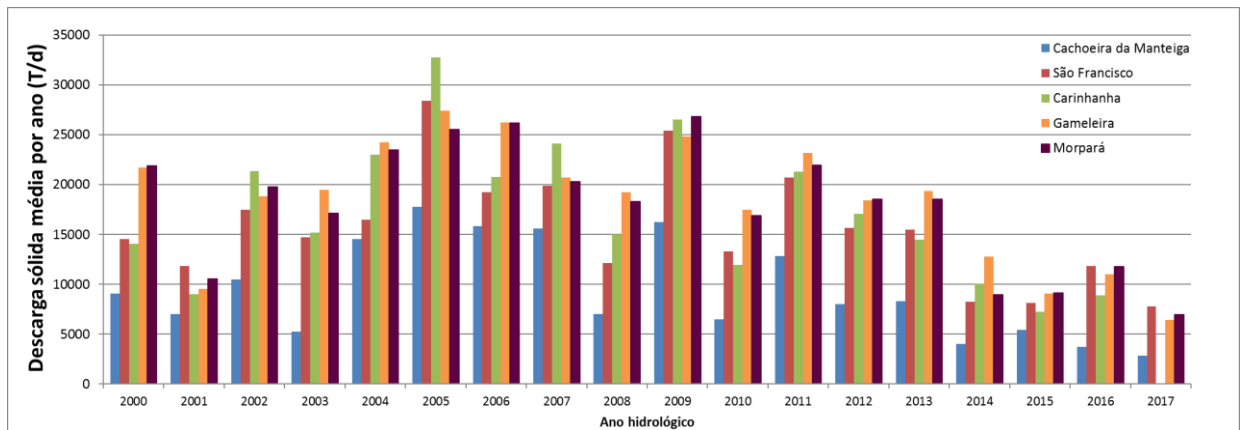
Ao ser aplicada a equação de calibração com os dados de reflectância no infravermelho, encontrou-se os valores de concentração de sedimentos em suspensão desejados. Para encontrar o valor da descarga sólida total na bacia do Médio SF, em um período de 17 anos, a concentração encontrada com a equação de calibração foi aplicada na equação determinada por Carvalho (2008), citada no item 4.6 deste trabalho. A Tabela 4 representa a média de descarga sólida calculada em cada ano para cada estação.

**Tabela 4. Média de Descarga Sólida (T/dia) de 2000 a 2017.**

Descarga Sólida (T/dia)					
	Cachoeira da Manteiga	São Francisco	Carinhanha	Gameleira	Morpará
2000	9100	14551	14077	21681	21907
2001	7035	11832	9028	9532	10546
2002	10474	17447	21332	18844	19765
2003	5238	14707	15200	19484	17112
2004	14531	16462	23007	24238	23445
2005	17794	28420	32779	27403	25516
2006	15854	19250	20793	26246	26193
2007	15612	19863	24134	20689	20274
2008	7021	12135	15023	19243	18307
2009	16213	25389	26548	24831	26837
2010	6486	13287	11949	17461	16874
2011	12821	20718	21279	23157	21967
2012	8039	15631	17036	18397	18514
2013	8292	15457	14495	19346	18521
2014	4027	8272	10101	12755	8942
2015	6833	8116	7256	9071	9159
2016	13902	11825	8882	10994	11757
2017	11853	7771	92	6426	6960
Média	10618	15618	16278	18322	17922

Fonte: Da autora, 2017.

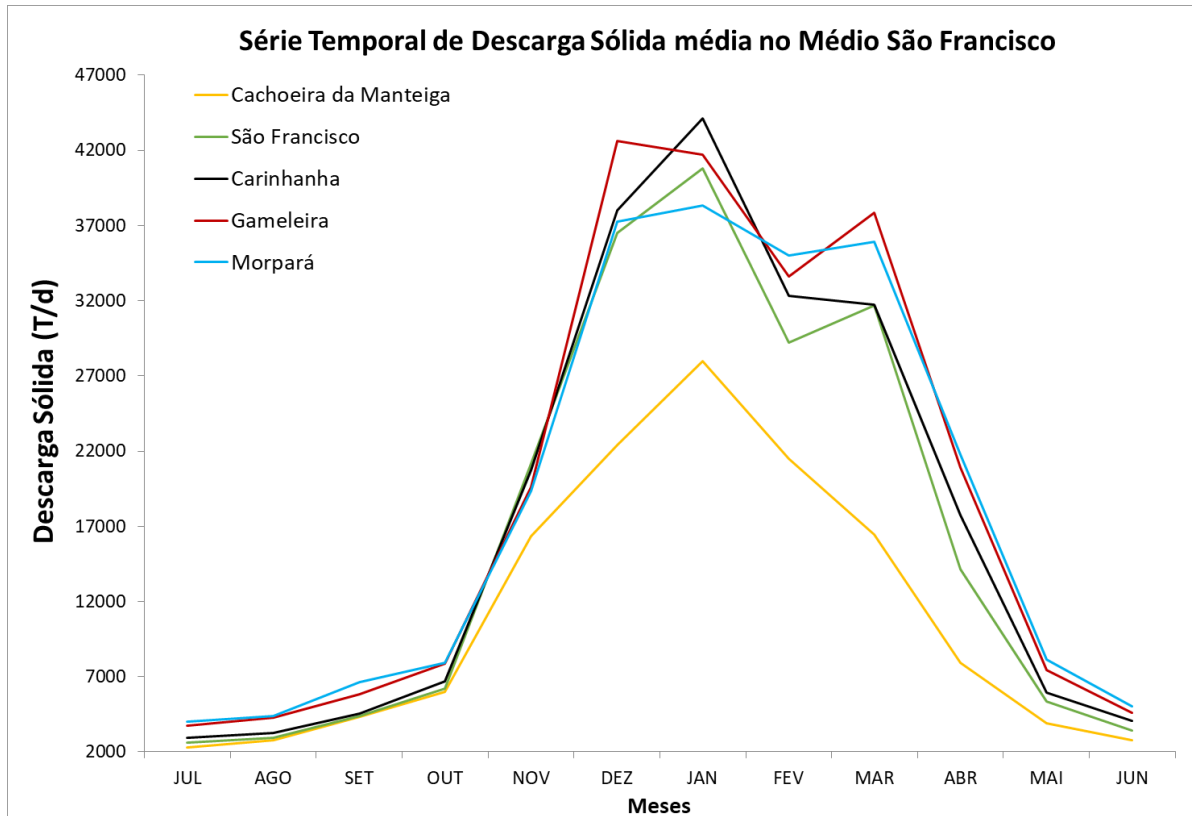
A média total das descargas em todos os anos mostra o crescimento da quantidade de carga sólida da estação mais à montante até a mais jusante. A Figura 20 apresenta a variação temporal de descarga de sedimentos em suspensão para cada estação em cada ano.



**Figura 20 – Descarga sólida média por ano de sedimentos das estações do Médio SF. Fonte: Da autora, 2017.**

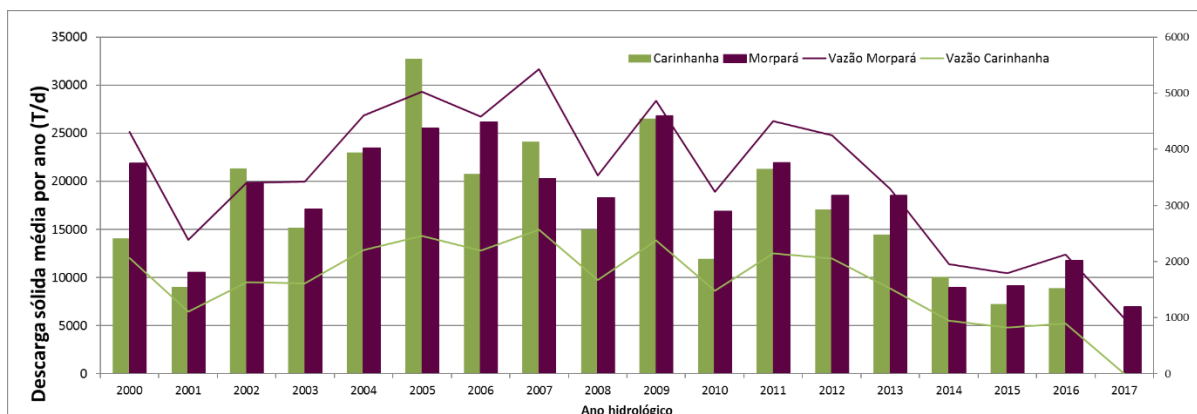
É possível notar que, de acordo com o gráfico da Figura 20, os anos de 2005 e 2009 demonstraram um pico maior de carga sólida no rio. Nos últimos anos há um decréscimo da descarga sólida em decorrência da diminuição das chuvas e, conseqüentemente, da vazão dos rios da região.

De acordo com o gráfico da Figura 20, a estação Carinhanha foi a que teve maiores valores de descarga sólida ao longo da série temporal. A Figura 21 também mostra que a estação que obteve um pico maior de carga sólida foi Carinhanha com um total de 44.129 T/dia na análise de descarga sólida média.



**Figura 21 – Dinâmica espaço-temporal da Descarga Sólida média das estações do médio SF. Fonte: Da Autora, 2017.**

A Figura 22 mostra a variação temporal de descarga de sedimentos em suspensão estimada a partir da equação de Carvalho (2008) e a vazão das estações de Carinhanha e Morpará. É possível notar nos últimos anos a seca na bacia com a queda da vazão (descarga líquida) e da descarga sólida.



**Figura 22 – Descarga sólida média por ano de sedimentos (em barras) e vazão média anual das estações Carinhanha e Morpará. Fonte: da autora, 2017.**

Outros trabalhos realizados na bacia do São Francisco, como em Lima et al. (2001), notaram a importância de se observar o comportamento hidrológico da bacia, analisando o fluxo de sedimentos. Foram utilizados dados hidrológicos e hidrossedimentométricos fornecidos pelo banco de dados Hidro 1.0, na época, sob gestão da ANEEL. Empregaram, também, a mesma metodologia de Carvalho (2008) para obter as curvas-chave de sedimentos de cada estação, com dados de 1975 a 2001. Para transformar as séries de vazões médias de cada estação em fluxo de sedimentos, ele utilizou a correlação entre vazão sólida e vazão líquida. Porém, não é interessante comparar os dois porque há poucos dados coletados nas estações.

Apesar de algumas estações não possuírem dados completos disponíveis (nos anos de 1975 a 1986), foram encontrados valores anuais para cada estação. Para este trabalho, foi interessante analisar o resultado da descarga sólida média das estações utilizadas em ambos os trabalhos: São Francisco, Gameleira e Carinhanha (Tabela 5).

**Tabela 5. Análise da descarga sólida em suspensão média diária por ano das estações nos anos de 1975 a 2001.**

<b>Descarga Sólida (T/dia)</b>		
<b>São Francisco</b>	<b>Gameleira</b>	<b>Morpará</b>
43.929	42.783	64.808

Fonte: Lima et al. (2001)

A média da descarga sólida calculada a partir da concentração obtida através de dados de reflectância está representada na Tabela 6. Ao analisar os dados de campo de Lima et al. (2001) com os dados do presente trabalho, de 2000 a 2017, observa-se que os valores de descarga sólida média por ano calculados no presente trabalho representam em média 35% dos valores encontrados por Lima et al. (2001). Esta diferença é esperada tendo em vista que a resposta espectral fornecida pelas imagens de satélite é da superfície das águas, ou seja, representando apenas as partículas finas. Além disso, tem-se menos vazão no rio e aumento da sedimentação devido a diminuição do fluxo ocorrida pela seca prolongada ocorrente no período recente e a construção de reservatórios construídos ao longo dos anos, que tem contribuído para a diminuição da descarga sólida.

Esses dois trabalhos não podem ser comparados diretamente porque foram feitos em períodos distintos e o estudo de Lima et al. (2001) possui poucos dados

fornecidos em suas estações, visto que são feitas apenas quatro medições por ano em cada estação hidrométrica, o que pode resultar em erros discrepantes devido à disparidade entre os anos secos e chuvosos.

**Tabela 6. Média de Descarga Sólida por ano (T/dia) de 2000 a 2017 calculada a partir de concentração obtidos por sensoriamento remoto.**

<b>Descarga Sólida (T/dia)</b>		
<b>São Francisco</b>	<b>Gameleira</b>	<b>Morpará</b>
15.618	18.322	17.922

Fonte: da autora, 2017.

Conforme análises concluídas no estudo de Lima et al. (2001), a estação de Morpará foi indicada como uma área de maior potencial de deposição de sedimentos. O mesmo ocorre com as estações trabalhadas neste estudo, onde a tendência os valores da descarga sólida média por ano tende a crescer de montante à jusante. Apesar da estação Gameleira (18.322 T/dia) possuir um valor maior de descarga sólida em relação à estação Morpará (17.922 T/dia), a diferença é mínima levando-se em consideração a dimensão do Rio São Francisco.

## **6. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O monitoramento do fluxo de sedimentos na bacia do Médio São Francisco por meio de imagens de satélite do sensor MODIS se mostrou eficiente e robusto. As séries temporais de reflectância obtidas através do processamento dessas imagens demonstrou a influência da sazonalidade das precipitações ao longo do trecho analisado, com picos de reflectância nos períodos de chuva, de novembro a março, e no período de seca com baixos valores de junho a setembro.

As estações que tiveram maiores picos de reflectância e concentração foram São Francisco e Carinhanha, podendo ser resultado da influência do rio Paracatu, afluente que se situa antes da área da estação de São Francisco e depois da estação de Cachoeira da Manteiga. Em geral, o Médio São Francisco apresentou

valores moderados de concentração (de 87 mg/L a 92 mg/L) das estações seguindo o padrão de montante até a jusante.

O resultado do cálculo da descarga sólida média por ano das estações apresentou uma mesma tendência da concentração, onde há o aumento da carga sólida das estações de montante à jusante, mesmo com alguns valores de diferença entre Gameleira e Morpará.

Com isso, é possível notar que, monitoramentos de fluxo de sedimentos através de dados de imagens de satélites são de grande importância para a complementação dos dados hidrossedimentológicos obtidos em campanhas de campo, e assim, contribuir para uma melhor gestão dos recursos hídricos.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARROIO JUNIOR, Paulo Ponce. **Avaliação da produção e transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Itaqueri, municípios de Itirapina e Brotas – SP.** São Carlos, 2013.

BARCELOS, Rafael Bandeira Chaves. **Utilização de dados do sensor espacial modis para caracterização do fluxo de sedimentos no rio Tocantins.** Brasília – DF. 2015.

BETTENCOURT, Pedro et al. **Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio São Francisco.** Recursos Hídricos, v. 37, n. 1, 2016.

BORGES, Kelly Maria Resende Borges. **Avaliação da susceptibilidade erosiva da Bacia do Rio Carinhonha (MG/BA) por meio da EUPS – Equação Universal de Perda de Solos.** (Dissertação de Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Geografia. Universidade de Brasília, 2009. 68 p.

CARVALHO, Newton de Oliveira. **Hidrossedimentologia prática.** Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 2ª ed., rev., atual e ampliada.

CBHSF. **A Bacia.** <<http://cbhsaofrancisco.org.br/a-bacia/>> Acesso em 20 de outubro de 2016, às 16h25min.

CBHSF. **Assoreamento, desmatamento e erosão na bacia.** Disponível em <<http://cbhsaofrancisco.org.br/assoreamento-desmatamento-e-erosao-na-bacia/>>15 de dezembro de 2014. Acesso em maio de 2017, às 11h45min.

CBHSF. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.** Módulo 1 – Resumo Executivo. Salvador – BA. Junho de 2004. Disponível em <<http://cbhsaofrancisco.org.br/documentacao/plano-decenal-de-recursos-hidricos/>>. Acesso em 20 de outubro de 2016, às 19h11min.

CUNHA, T., SA, I., TAURA, T., GIONGO, V., da SILVA, M. S. L., de OLIVEIRA NETO, M. B., & de ARAUJO FILHO, J. C. **Uso atual e ocupação dos solos na margem direita do Rio São Francisco em municípios do estado da Bahia.** Embrapa Semiárido-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E), 2011.

JÚNIOR, O. B. S.; TUCCI, C. E. M. **Estimativa de indicadores hidrológicos para as sub-bacias do rio São Francisco.** 2017.

LIMA, Jorge Enoch Furquim Werneck [et al.]. **Diagnóstico do fluxo de sedimentos em suspensão na Bacia do Rio São Francisco** - Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, Brasília, DF: ANEEL: ANA, 2001.



LOPES, Nadia Hidemi Yano; KOBAYAMA, M.; SANTOS, I. **Relação entre concentração de sedimentos em suspensão e vazão em microbacias experimentais na região norte do estado de Santa Catarina, Brasil**. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo: ABRH, Anais, CD-rom, 12p, 2007.

MARCONDES, Carlos Renato. **Estudo de descarga sólida em suspensão nos cursos d'água da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí**. Itajubá, (MG): [s.n.], 2011.78 p.: il.

MENDES, R. A.; PISCOYA, R. C. C. C.; MARTINEZ, J. M.; SILVA, I. R. O.; SERAFIM, T. A. M.; BARAN, C. B.; GONÇALVES, P. B. C.; COCHONNEAU, G.; OLIVEIRA, E.; CARVALHO, J. C.; LOPES, W. T. A. **Utilização de dados do sensor espacial MODIS para caracterização do fluxo de sedimentos na bacia do rio Araguaia**. XXII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. 2017. (submetido à publicação).

MENEZES, P.H. B. J. **Estudo da dinâmica espaço-temporal do fluxo de sedimentos a partir das propriedades ópticas das águas no reservatório de Três Marias – MG**. 2013.

MINELLA, Jean PG; MERTEN, Gustavo H.; MAGNAGO, Priscila F. **Análise qualitativa e quantitativa da histerese entre vazão e concentração de sedimentos durante eventos hidrológicos**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi, v. 15, n. 12, 2011.

MMA. **Caderno da Região Hidrográfica do São Francisco** / Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. – Brasília: MMA, 2006. (6 de fevereiro de 2017, 16h) (citação da página 19).

NOVO, Evelyn M. L. de Moraes. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4ª ed. – São Paulo: Bluncher, 2010.

PARREIRAS, Matheus. **Desmatamento e poluição deixam leito do Rio São Francisco assoreado**. Disponível em:

[http://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2015/06/02/interna\\_gerais,653885/desmatamento-e-poluicao-deixam-leito-do-rio-sao-francisco-assoreado.shtml](http://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2015/06/02/interna_gerais,653885/desmatamento-e-poluicao-deixam-leito-do-rio-sao-francisco-assoreado.shtml). Acesso em 06 de agosto de 2016, às 22h30min.

PINTO, C. T.; MENEZES, P. H. B. J.; MARTINEZ, Jean-Michel; ROIG, H. L.; VILAR, R. A.E. (2014). **Uso de imagens MODIS no monitoramento do fluxo de sedimentos no reservatório de Três Marias**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 18 (Online), 507-516.

PISCOYA, R. C. C. C.; MARTINEZ, J. M.; NOGUEIRA, M. G.; LOPES, W. T. A.; COCHONNEAU, G.; VENTURA, D. T.; VIEIRAM M.R.; OLIVEIRA, E.; GUIMARÃES, V.S. (2013). **Avaliação do impacto dos reservatórios em cascata sobre o fluxo de sedimentos do rio Paranapanema**. XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. Abril de 2013.

PISCOYA, R. C. C. C.; MARTINEZ, J. M.; LOPES, W. T. A.; COCHONNEAU, G.; NOGUEIRA, M. G.; VENTURA, D. T.; OLIVEIRA, E. (2013). **Caracterização do**

**fluxo de sedimentos no reservatório da UHE Jurumirim utilizando dados do sensor espacial MODIS.** XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves – RS, Novembro. 2013.

PNRH. **Plano Nacional de Recursos Hídricos. Agência Nacional de Águas – ANA.** SPR – Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos. 2002.

RODRIGUES, Bruno Nespoli. **Estudo da Erosão Hídrica.** Campo Grande – MS. Brasil. 2009.

RUDORFF, C. M.; NOVO, E. M. L. M.; GALVÃO, L. S.; PEREIRA FILHO, W. **Análise derivativa de dados hiperespectrais medidos em nível de campo e orbital para caracterizar a composição de águas opticamente complexas na Amazônia.** Acta Amazônica, v.37. 2007.

RUDORFF, BERNARDO FT RUDORFF. **Sensor Modis e Suas Aplicações Ambientais no Brasil.** Editora Parêntese, 2007.

SANTOS, André Luis Martins Real dos Santos; MARINHO, Thiago Pimentel; MARTINEZ, J.M.; **Monitoramento por satélite dos fluxos sedimentares na bacia do rio Purus, Amazônia, Brasil;** Acesso em 01 de Novembro de 2016, às 19h07.

SILVA, Mirna Karla Amorim; ROSA, Roberto; **Diagnóstico do meio físico da bacia hidrográfica do rio São Francisco, no Estado de Minas Gerais, Brasil;** Acesso em 25 de Maio de 2017 às 17h15.

VILLAR, Raul Espinoza. **Monitoramento das dinâmicas espaciais e temporais dos fluxos sedimentares da bacia Amazônica a partir de imagens de satélite.** Brasília – DF. 2013