



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Curvas-chave de descargas de sedimentos em suspensão no Baixo São Francisco

Solange Cavalcanti de Melo¹, José Coelho de Araújo Filho², Renata M. C. M. de O. Carvalho³

¹Discente do Mestrado Profissional em Gestão Ambiental – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Recife-PE. Autor correspondente: sol.melo36@gmail.com; ²Agrônomo da Embrapa Solos – UEP Recife, coelhoembrapa@gmail.com; ³Docente do Mestrado Profissional em Gestão Ambiental – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Recife-PE, ren.carvalho@rotmail.com

Artigo recebido em 27/11/2019 e aceito em 25/05/2020

RESUMO

O conhecimento da análise quantitativa das concentrações de sedimentos em suspensão transportados pelo rio São Francisco bem como sua relação com as vazões é de muita importância, pois pode auxiliar na identificação dos efeitos da intervenção humana e/ou ocasionados pelas condições naturais da região. As regiões a jusante dos barramentos no rio São Francisco apresentam como principal consequência a regularização das vazões e a diminuição das concentrações de sedimentos. O objetivo da pesquisa foi determinar as curvas-chave de sedimentos em suspensão (CCS) nas estações fluviométricas instaladas no Baixo São Francisco (BSF) após a barragem de Xingó. Para o estabelecimento dessas curvas foram utilizados dados de vazão e concentração de sedimentos em suspensão, obtidos do sistema Hidroweb no site da Agência Nacional da Água (ANA) no período de 1999 a 2018. Foram obtidas CCS para todo o trecho do BSF as quais apresentaram bons coeficientes de determinação. Com base na análise dos dados também foi possível perceber que nos últimos anos, desde 2013 houve redução gradativa das vazões disponibilizadas na barragem de Xingó. Consequentemente, houve também a redução gradativa das cargas de sedimentos em suspensão geradas nas estações de Piranhas, Traipu e Propriá, ou seja, os menores valores já registrados no BSF correspondendo as menores séries históricas tanto de vazão como de sedimentos em suspensão.

Palavras-chave: barragem, vazão, sedimentos.

Keys curves of sediment discharges in suspension in the Lower São Francisco

ABSTRACT

The knowledge of the quantitative analysis of suspended sediment concentrations carried by the São Francisco River as well as its relation with the flows is of great importance, since it can help in the identification of the effects of human intervention and/or caused by the natural conditions of the region. In the downstream regions of the São Francisco riverbanks, the main consequence was the regularization of flow rates and the reduction of sediment concentrations. The objective of the research was to determine the key curves of suspended sediments (CCS) at the fluviometric stations installed in the lower São Francisco river after Xingó dam. For the evaluation, flow data and suspended sediment concentration were used. These data were obtained from the Hidroweb system on the website of the National Water Agency (ANA) from 1999 to 2018. CCS were plotted for all stretches and presented good coefficients of determination (R^2). Based on the analysis of the data it was also possible to notice that in recent years, since 2013 there has been a gradual reduction of the flows available in the Xingó dam. Consequently, there was also a gradual reduction of suspended sediment loads generated at the Piranhas, Traipu and Propriá stations, that is, the lowest values already recorded in lower São Francisco, corresponding to the lower historical series of both discharge and suspended sediments.

Keywords: dam, flow, sediments.

Introdução

O rio São Francisco é um dos cursos de água mais importantes do Brasil, principalmente

por atravessar a região semiárida brasileira situada em sua maior parte na região Nordeste.

O carreamento dos sedimentos nos cursos de águas está relacionado à sua estrutura

morfológica, topográfica além da cobertura vegetal e da composição do solo. Esses fatores influenciam na quantidade de sedimentos que chegam nos leitos dos rios de bacias hidrográficas (Cavazzana et al., 2019).

A vazão sólida num curso de água é a quantidade do material que atravessa a seção durante o tempo, podendo ser expresso por kg/s ou t/dia. Quanto a força do fluxo diminui as partículas em suspensão poderão sedimentar-se num ambiente mais brando (Pomerol et al., 2013).

O estudo de Fontes (2016) no Baixo São Francisco (BSF) afirma que o regime hidrológico depois da construção das barragens sofreu mudanças significativas, principalmente com o controle da vazão liberada. Além do uso e ocupação irregular de suas margens, o mesmo também está sendo afetado por eventos erosivos ao longo do rio potencializados pelas ações antrópicas combinadas com os processos naturais.

Em 2013 houve a primeira redução de vazão de acordo com a Resolução nº 442/2013. Desde então, a redução progressiva veio se intensificando com o processo de estiagem na região. Em julho de 2017, através da Resolução nº 1.291/2017, foi autorizada a prática da liberação de água acima de 523 m³/s, garantindo a média de 550 m³/s (ANA, 2018). Essa foi a menor vazão de regularização no São Francisco, principalmente na região do BSF permitindo invasão do mar nos trechos próximos à foz.

Identificar os efeitos nas cargas sólidas nos cursos de água podem mostrar interferências antrópicas ou naturais (climáticos) no rio. O desenvolvimento regional vem afetando o equilíbrio natural em vários aspectos como a atividade pesqueira (diminuição de peixes), aumento do assoreamento, alteração da paisagem (estradas, pontes etc.), redução de água (crescimento da agricultura de exportação, exigindo grandes áreas de irrigação), entre outros.

A medição de descarga sólida é um processo muito trabalhoso e caro, o que impede que as medições sejam feitas com muita frequência. Daí a importância da utilização das curvas-chave de sedimentos (CCS). Com a CCS é possível transformar médias diárias de vazão, em médias diárias de sedimentos, ou seja, estimando a produção de sedimento nos cursos de água.

Segundo Carvalho (2008) a CCS será mais expressiva, quanto maior for o número de medições e maior variação de vazão (amplitudes). Quando a dispersão dos pontos medidos é grande, pode também implicar numa grande variação de sedimento para uma mesma vazão.

De acordo com Glyson (1987), citado por Carvalho (2008), os métodos mais usados para determinar a curva-chave e consequentemente sua equação são: o método do traçado visual, a média por agrupamento e a regressão linear. Segundo Córdova e Gonzalez (1997) a utilização das curvas-chave de sedimentos é mais apropriada para bacias com área de drenagem de grande porte, pois as distinções entre as vazões médias, máximas e mínimas diárias não são muito expressivas. Contudo, esses procedimentos precisam de realizações de medição de descarga sólida em período reduzido para uma melhor representação real dos resultados.

Pouco se sabe sobre o aporte da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio São Francisco em seu trecho baixo, principalmente após o período de seca, desde 2012, no qual a vazão no rio veio decaindo. Desse modo, o trabalho teve como objetivo determinar CCS que representem cargas de sedimentos em suspensão no BSF que possa estimar a carga de sedimento em suspensão nesse processo de decaimento do fluxo de água liberado pela barragem de Xingó. As CCS podem contribuir para caracterizar a situação atual das concentrações de sedimentos em suspensão ao longo do rio São Francisco no seu trecho baixo.

Medidas devem ser tomadas para melhorar as condições dos fluxos do rio como introduzir normas de operação da barragem para fornecer a reparação ecológica. Deve-se respeitar a sazonalidade natural das vazões anualmente para que se possa atender às dinâmicas do ecossistema aquático e às comunidades costeiras (Santana et al., 2016). O estudo de Souza et al. (2013) afirma que o rio São Francisco se encontra em condições de degradação, pois as suas margens fluviais estão sendo erodidas pela ausência da mata ciliar. Daí a importância dos estudos da quantificação dos sedimentos carregados nas margens ou encostas.

O uso intensivo do solo em suas margens intervém na sua deterioração, aumentando a ocorrência da erosão marginal e consequentemente modifica a dinâmica do rio. O fator determinante da suscetibilidade ao processo erosivo é a granulometria do solo do talude, assim como o comportamento mecânico do mesmo (Araújo Filho et al., 2017).

A presente pesquisa busca gerar informações para uma visão sistêmica dos fluxos de descargas sólidas em suspensão no BSF por meio do uso da CCS com vistas ao uso racional dos recursos hídricos da região.

Material e Métodos

Área de estudo

O presente estudo abrange a região do BSF que compreende uma área de 32.013 km². Começa em Paulo Afonso (BA) e segue até a sua foz no Oceano Atlântico, passando pelos estados da Bahia, Pernambuco, Sergipe e Alagoas (CBHSF, 2018).

A região do BSF (Figura 1) representa apenas 5,1% da área total da bacia, correspondendo a menor porção dentre as quatro subdivisões do rio São Francisco: Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco (CBHSF, 2018).

As principais características hidroclimáticas da região são: clima dominante semiárido que grada para o tropical úmido (junto à foz), com precipitação média anual de 350 a 1500 mm e temperatura média de 25^o C (CBHSF, 2004).

Segundo Tavares (2013), a região do BSF possui diferentes finalidades econômicas e sociais: abastecimento de água, irrigação (culturas de ciclo curto), aquicultura (camarão), ecoturismo, navegação e hidroelétricas.

Usina hidrelétrica de Xingó

A usina Hidrelétrica de Xingó está instalada no rio São Francisco em seu trecho baixo aproximadamente 65 km a jusante do complexo de Paulo Afonso. Localiza-se no canyon entre os estados de Alagoas e Sergipe, cerca de 6 km da cidade de Piranhas (AL). Seu aproveitamento hidrelétrico está localizado entre os estados de Alagoas e Sergipe (CHESF, 2018).

A região do delta do São Francisco está localizada na divisa dos estados de Sergipe e Alagoas, praticamente na cidade de Piaçabuçu (SE), distando 130 km de Maceió (AL). Apresenta-se com longas faixas de areia, na qual formam-se dunas móveis, e diversas ilhas formando vários corredores ao longo do leito do rio (CBHSF, 2018).

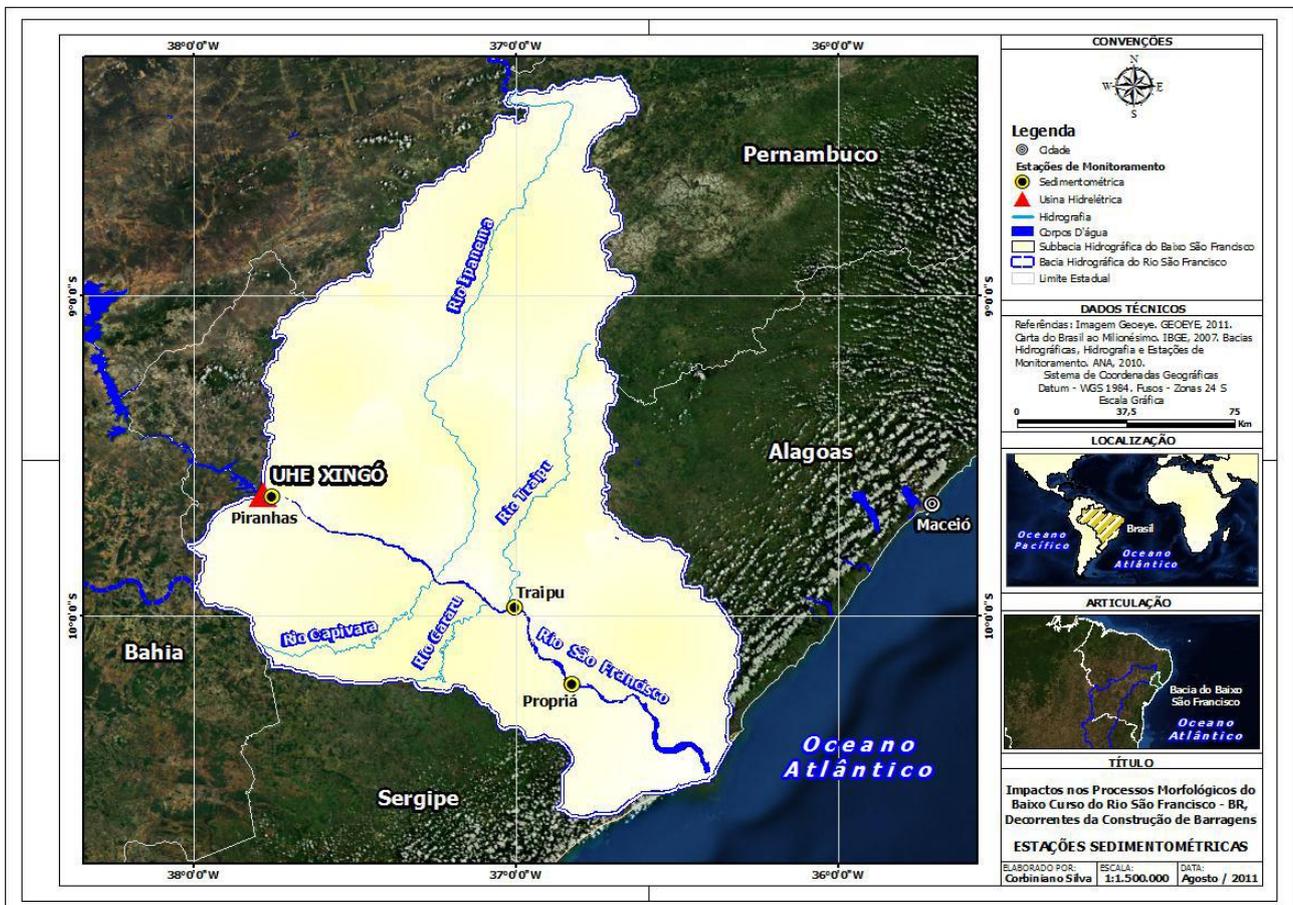


Figura 1- Região do Baixo São Francisco. Fonte: Cavalcante (2011)

Estações fluviométricas no Baixo São Francisco

Para estimativa do transporte de sedimentos após a barragem de Xingó até sua foz, o estudo foi baseado nos dados de vazão e concentração de sedimentos em suspensão disponíveis no Sistema Hidroweb no site da ANA. Foram estudadas três estações hidrossedimentológicas no BSF, as quais

pertencem à rede hidrométrica gerenciada pela ANA e operada pela CPRM (CPRM, 2017). Informações gerais das estações fluviométricas estudadas constam na Tabela 1. A Figura 2 ilustra o diagrama unifilar no trecho BSF com as ordens de posicionamentos das estações fluviométricas ao longo do rio, assim como seus principais afluentes até sua foz no Oceano Atlântico.

Tabela 1 - Estações fluviométricas no trecho Baixo São Francisco. Fonte: dados da ANA (2018).

| Código | Estação | Dados | Latitude | Longitude | Altitude (m) |
|----------|---------------|----------------------|---------------|----------------|--------------|
| 49330000 | Piranhas (AL) | Vazão/sedimento/cota | -09° 37' 34'' | -037° 45' 22'' | 10,85 |
| 49660000 | Traipu (AL) | Vazão/sedimento/cota | -09° 58' 17'' | -037° 00' 10'' | 2,29 |
| 49705000 | Propriá (SE) | Vazão/sedimento/cota | -10° 12' 50'' | -036° 49' 26'' | 1,57 |

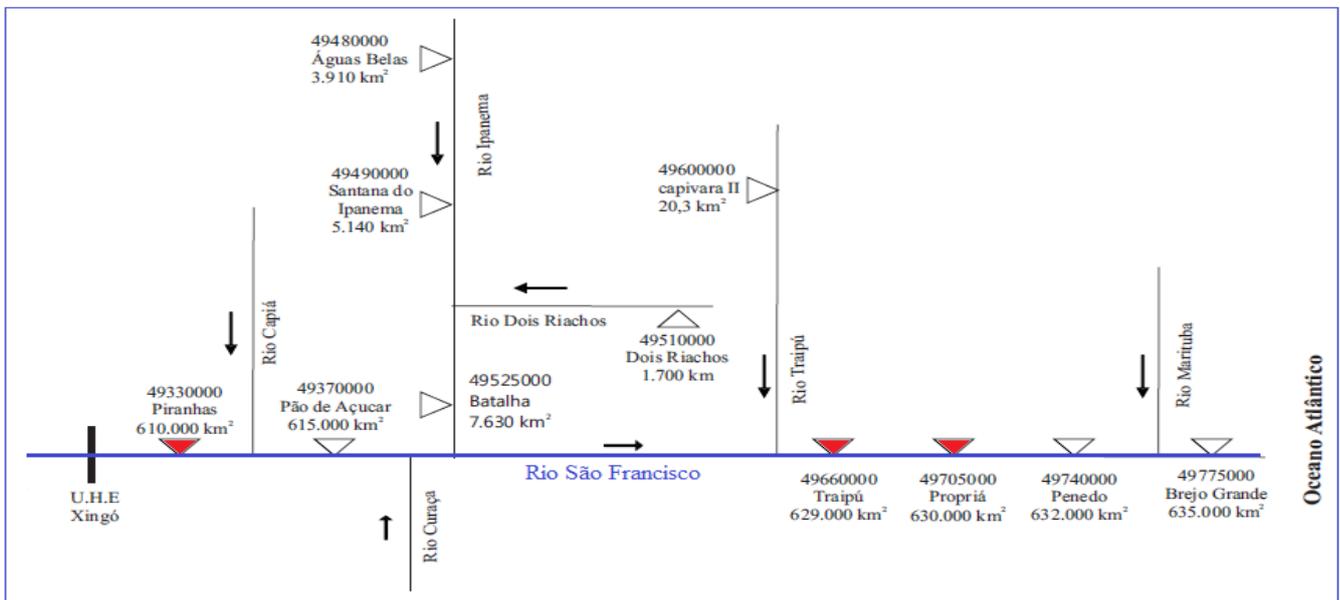


Figura 2 – Diagrama Unifilar no trecho Baixo São Francisco a partir da barragem de Xingó. Fonte: Adaptado da CPRM de dados não publicados.

Análise de consistência dos dados

O tratamento das informações foi realizado nos dados brutos, contudo, em alguns casos foi realizado na série do consistido alguns preenchimentos de falhas para completar a série. Essa verificação da consistência dos dados foi realizada conforme as normas técnicas “Diretrizes

para Análise de Dados Hidrométricos” e “Normas para Identificação de Correções e Preenchimentos” (versão de julho/2005 elaborado pela CPRM – Não publicado).

De posse dos dados consistidos, foram realizados tratamentos estatísticos com o auxílio do software HIDRO 1.3 desenvolvido pela ANA. Foram calculados os dados médios, diários e

mensais de cotas e vazões. Os dados calculados foram exportados para uso no programa Excel onde foram criadas planilhas para obtenção de tabelas e gráficos.

Ressalta-se que para análise de dados de sedimento é preciso muita cautela. Segundo Carvalho (2008), a obtenção de dados de concentração de sedimento passa por diversas fases para ser concluída: escolha de equipamento, processo de amostragem, análise do material e os cálculos, todos sujeitos a erros diversos. Contudo, os dados estudados foram analisados em planilhas do Excel onde foram realizadas: a estatística para verificação da correlação entre os dados de sedimento com os de vazão e, após isso, determinar a CCS para as estações. Antes da determinação da CCS, para obtenção das concentrações de sedimentos, foram realizados os cálculos para as descargas sólidas diárias em suspensão pela fórmula:

$$Q_{ss} = 0,0864 \cdot Q \cdot C_{ss} \quad (1)$$

Em que:

Q_{ss} = descarga sólida de sedimentos em suspensão (t/dia);

Q = vazão líquida média (m^3/s);

C_{ss} = concentração de sedimentos em suspensão (ppm);

0,0864 = constante (fator de transformação de unidades) (Carvalho, 2008).

Determinação da CCS

Após a determinação dos valores da descarga sólida em suspensão (Q_{ss}) para cada medição, foram traçadas as CCS para as estações, utilizando a metodologia proposta por Carvalho (2008). A CCS é obtida por meio de um ajuste matemático em um modelo potencial, como apresentado na Equação 2.

$$Q_{ss} = a \cdot Q^n \quad (2)$$

Em que:

“a” e “n” = constantes de ajuste do modelo.

No Excel, para determinar a CCS são plotados os valores de vazão líquida em suspensão (Q_{ss}) no eixo das ordenadas e os valores de vazão líquida (Q) no eixo das abscissas. Através da

regressão linear foram obtidas as equações correspondentes às curvas, assim como o R^2 .

Nos gráficos foram analisados as dispersões dos pontos e o valor de R^2 o qual foi utilizado como critério para aceitar a correlação dos dados que, segundo Lima et al. (2006), precisa estar acima de 60%. Essa metodologia também mostra se existe a necessidade de mais uma curva para o período estudado. Valores muito divergentes da curva (outliers) foram descartados para melhorar o R^2 . Isso foi realizado com as informações de todas as estações fluviométricas.

Cabe destacar que o uso da CCS torna-se necessário quando os dados diários de vazão são disponíveis e os de sedimentos não o são. A existência da curva permite, assim, um cálculo aproximado (estimados) de dados de sedimentos e da descarga sólida média anual.

Entretanto, na natureza, para cada vazão num determinado momento pode existir valores distintos de descarga sólida. Por esse motivo, a CCS não pode substituir os valores reais confiáveis. O fenômeno é muito aleatório, sendo que a CCS permite obter valores médios (Carvalho, 2008).

Na estação Piranhas a determinação da CCS foi realizada para todo o período de estudo, apesar do espaço sem dados entre os anos de 2010 e 2013. Contudo, foi preciso retirar dois pontos para melhor representar a curva. Os pontos foram às medições de julho/2007 e março/2008 que causaram a diminuição do R^2 para 0,4.

Na estação Traipu, no período compreendido de 2002 a 2004, não foi possível obter uma correlação entre os dados para se obter uma CCS. O R^2 ficou muito abaixo do permitido com um valor de 0,07. Neste caso, foi utilizado o método de regressão linear nas médias mensais de sedimentos com a estação de apoio (Propriá). Essa alternativa também foi proposta por Lima et al. (2006).

Contudo, é necessário que fique anotado, que os resultados encontrados em estudos sedimentológicos, muitas vezes dependem do conhecimento e também da sensibilidade de quem analisa, podendo estar sujeitos à críticas (Carvalho, 2008).

Resultados e Discussão

Sedimentos em suspensão e a CCS na estação de Piranhas

O estudo do comportamento dos dados de sedimento em suspensão no BSF foi realizado em

ordem de posição das estações ao longo do rio começando com a estação de Piranhas (AL). As medições de descargas sólidas e líquidas realizadas nesta estação constam na Figura 3.

Na análise dos dados brutos, verifica-se que, nos anos de 2006 a 2009, a maioria dos dados tanto das vazões como de sedimentos apresentaram valores mais altos, em relação ao período de 2014 a 2016. Isso indica que no período de 2006 a 2009 existiu uma alternância de processos erosivos e

sedimentares na referida estação. Em contrapartida, no período de 2014 a 2016, houve um ligeiro predomínio de processos de sedimentação.

A Figura 4 ilustra a CCS para a estação Piranhas sem os dois pontos discrepantes julho/2007 e março/2008. Os dois pontos retirados podem ser visualizados nos dados brutos da Figura 3. Desprezando-se esses registros, o coeficiente de determinação passou para 0,76.

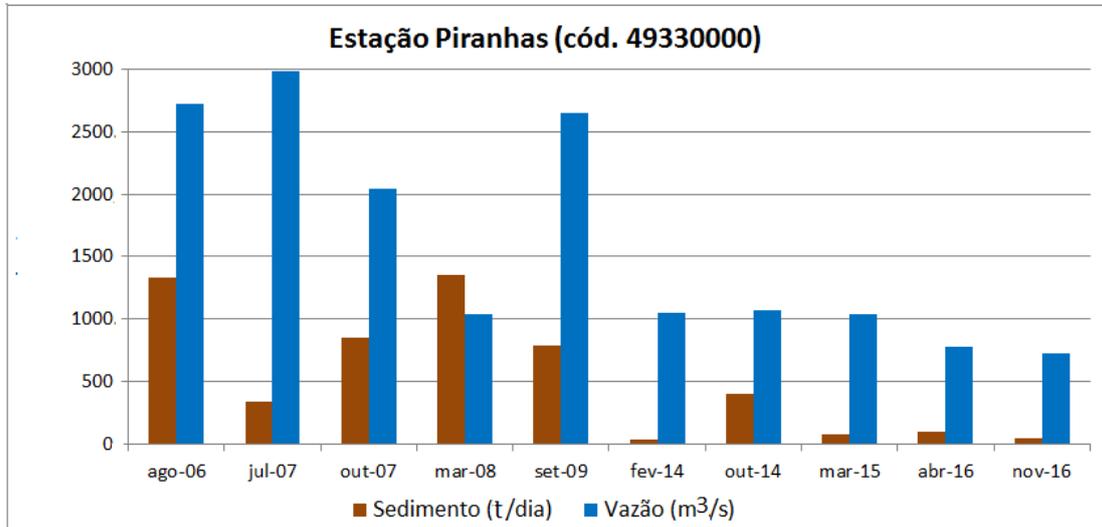


Figura 3 – Dados brutos das concentrações de descarga sólida em suspensão e descarga líquida no período de 2006 a 2016. Fonte: dados primários da ANA (2018).

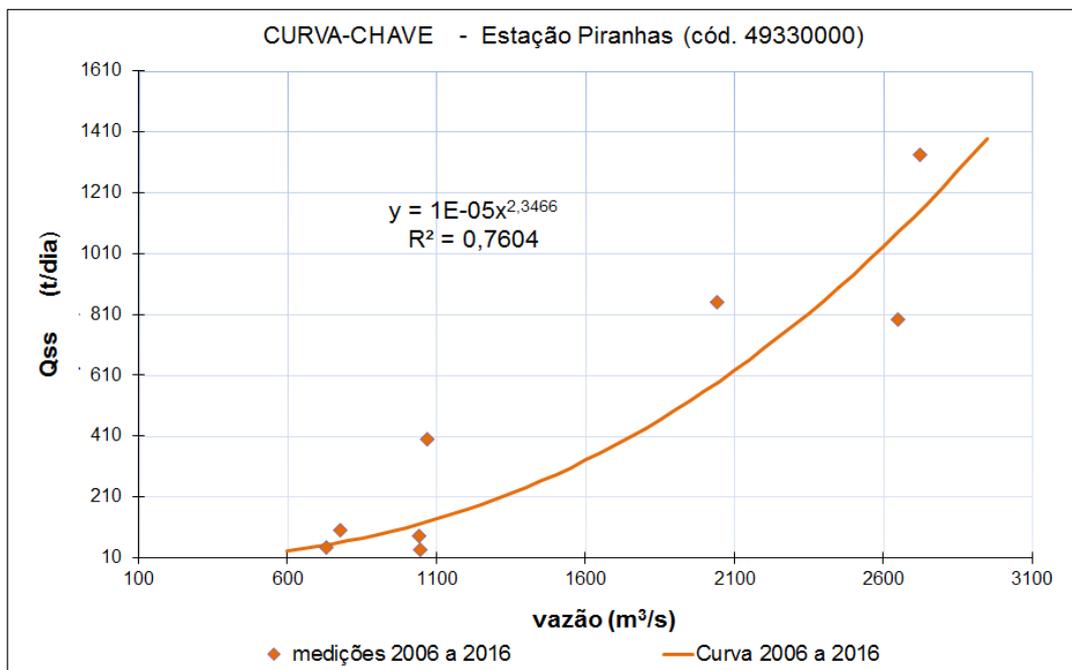


Figura 4 – Curva-chave de sedimentos em suspensão na estação Piranhas (AL) no período de 2006 a 2016. Fonte: dados primários da ANA (2018).

Sedimentos em suspensão e a CCS na estação de Traipu

Na análise da estação de Traipu (AL) situada após a estação de Piranhas, distante 108 km da foz, os dados obtidos correspondem a um período de 19 anos, de 1999 a 2018. A Figura 5 ilustra a dispersão dos dados brutos, concentração de sólidos em suspensão e descarga líquida para o período de estudo na referida estação.

Na análise dos dados brutos, os resultados mostram um acerta oscilação das vazões regidas pela barragem, assim como, dos dados de sedimentos em suspensão no período de 1999 a 2011. Contudo, mostram que existem alguns picos de sedimentos, porém com uma alternância entre os processos erosivos e sedimentares na estação. Porém, a partir de 2011 houve um predomínio de

processos de sedimentação notado pela diminuição das vazões e de sedimentos em suspensão.

Na análise estatística dos dados para determinação da CCS, foi possível elaborar três curvas. A primeira foi elaborada para o ano de 1999, a segunda para o período de 2000 a 2001, e a terceira para o período de 2005 a 2018.

O período entre 2002 e 2004 estatisticamente não apresentou correlação entre os dados de sedimentos e de vazão. Neste caso, o R² apresentou um valor menor que 60% e, por isso, não foi possível obter a CCS para esse período. Na elaboração da terceira curva, três medições foram retiradas para aumentar o R² que ficou abaixo do permitido. Os valores retirados foram os de outubro/2007, de março/2008 e de abril/2010, pois se apresentaram muito fora da curva. As Figuras 6, 7 e 8 ilustram as CCS da estação de Traipu para os três períodos.

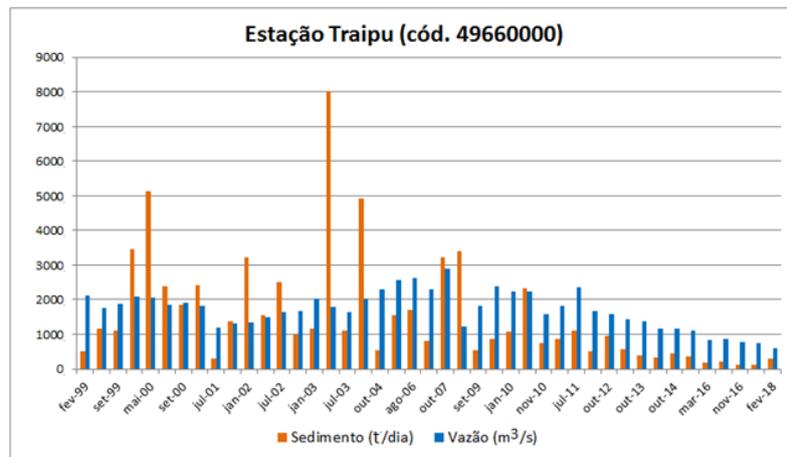


Figura 5 – Dados brutos das concentrações de descarga sólida em suspensão e descarga líquida no período de 1999 a 2018. Fonte: dados primários da ANA (2018).

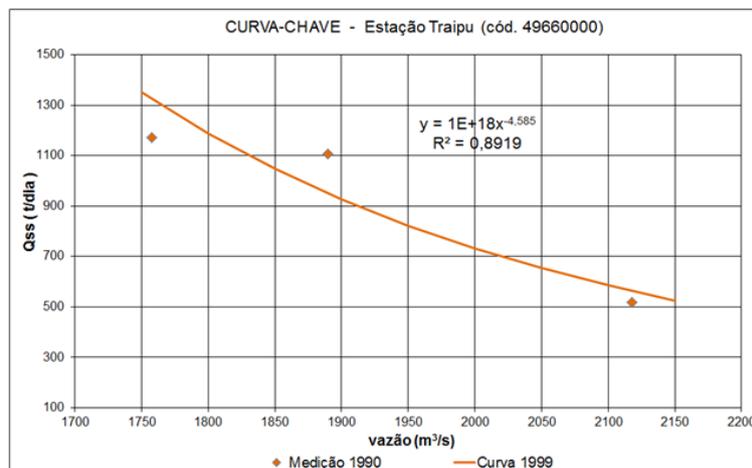


Figura 6 – Curva-chave da estação Traipu (AL) para o ano de 1999. Fonte: dados primários da ANA (2018).

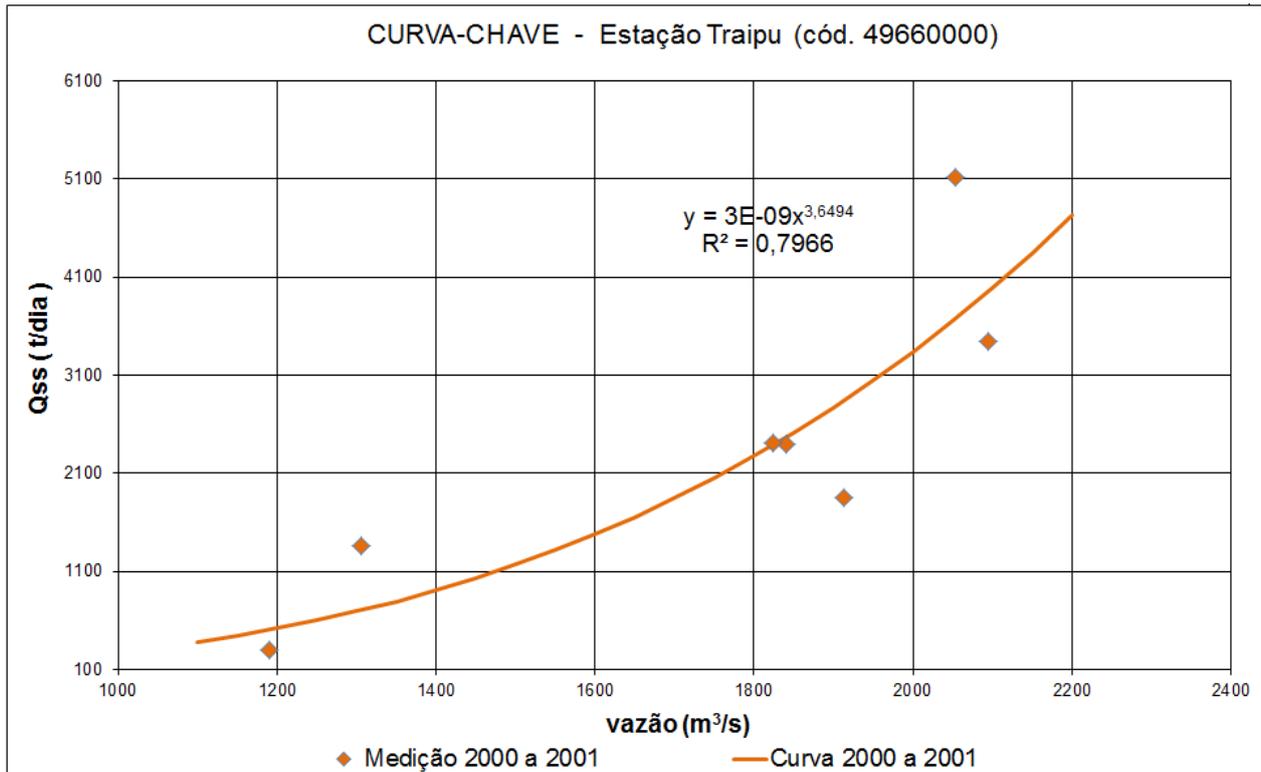


Figura 7 – Curva-chave da estação Traipu (AL) para os anos de 2000 a 2001. Fonte: dados primários da ANA (2018).

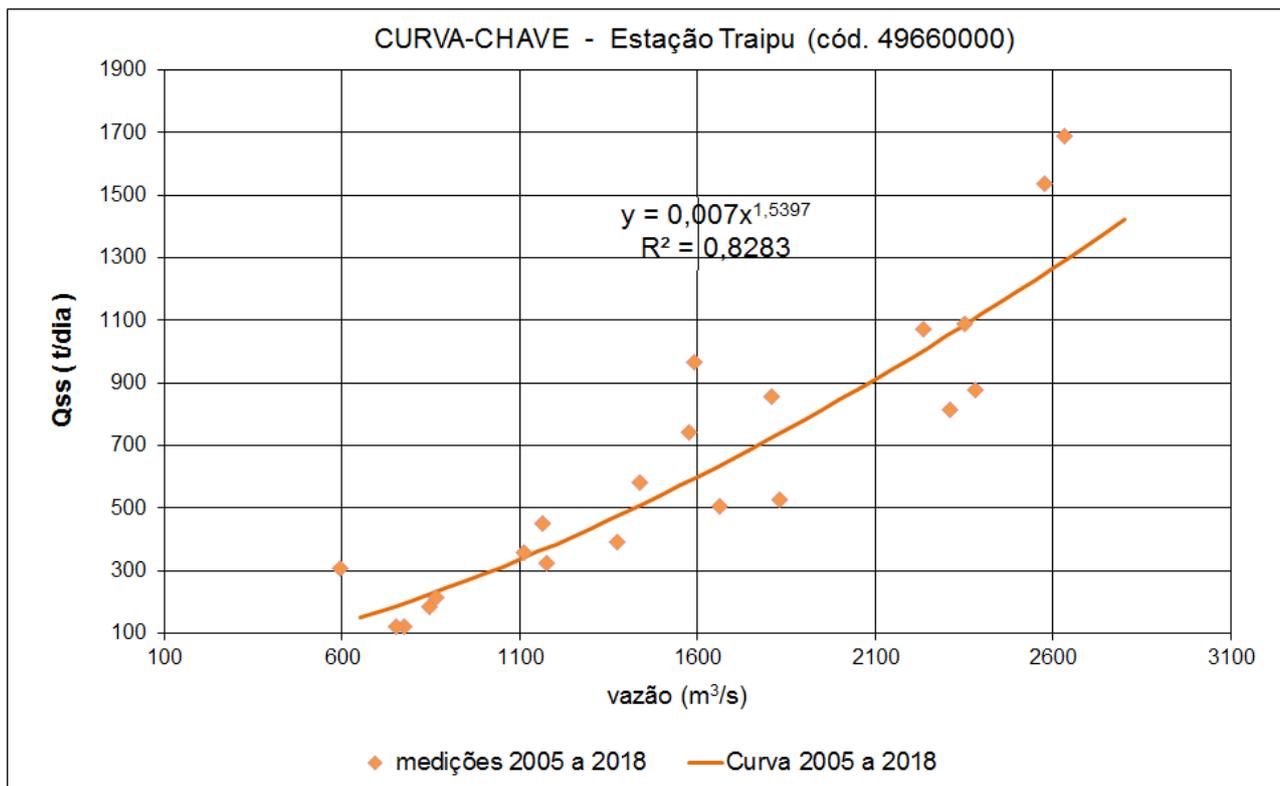


Figura 8 – Curva-chave de sedimento da estação Traipu (AL) no período de 2005 a 2018. Fonte: dados primários da ANA (2018).

Sedimentos em suspensão e a CCS na estação de Propriá

Os estudos abrangeram o período de 2000 a 2017, totalizando 17 anos de dados. A Figura 9 ilustra a dispersão dos dados brutos das concentrações de sedimentos em suspensão e das descargas líquida para o período de estudo na estação de Propriá (SE).

Os dados mostraram-se parecidos com aqueles da estação Traipu (AL), onde as vazões apresentam oscilações e uma alternância na variação de sedimentos, caracterizando processos erosivos e sedimentares. A estação também apresenta um decaimento das vazões a partir de 2012, indicando processos de sedimentação na região nesse período.

Para determinar a CCS foram elaboradas duas curvas-chave dividindo o período de 1999 a

2018 em dois. A primeira curva refere-se aos anos de 2000 a 2005 e a segunda, ao período de 2006 a 2017. Na primeira curva foram retirados alguns dados para aumentar o R^2 para 0,64. Foram os dados de fevereiro, maio e junho/2000, abril e julho/2003 e julho/2004. Na segunda curva foi retirada a medição de agosto/2006 para aumentar o R^2 para 0,79. As Figuras 10 e 11 ilustram as CCS da estação de Propriá para os dois períodos.

Quanto maior o espaçamento maior a dificuldade de correlações entre vazão e sedimento para definição da CCS, ocasionando valores mais baixos de R^2 . Para a análise do comportamento, quanto maior a vazão líquida menor a vazão sólida, caracterizando ocorrências de processos erosivos. Quanto menor a vazão líquida, maior é a vazão sólida, caracterizando ocorrência de processos sedimentares.

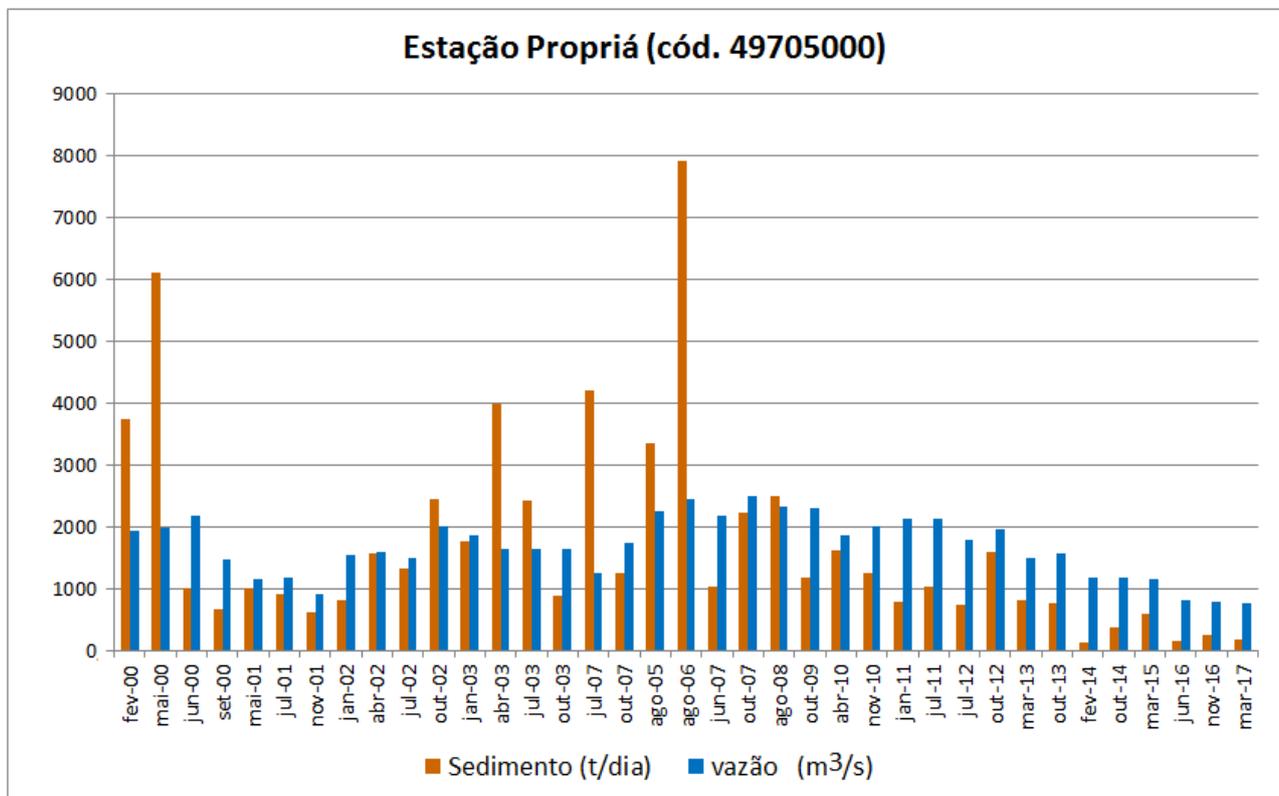


Figura 9 - Dados brutos das medições de descarga sólida em suspensão e descarga líquida no período de 2000 a 2017. Fonte: dados primários da ANA (2018).

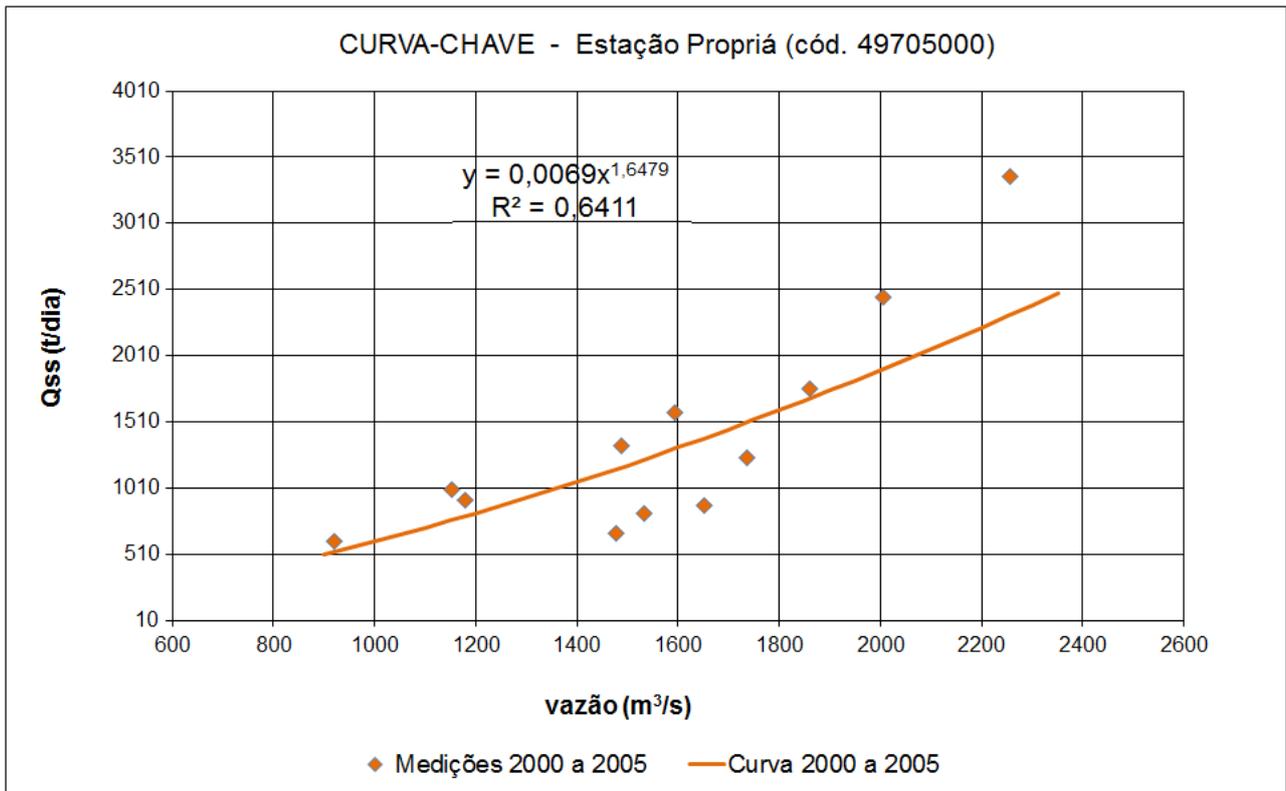


Figura 10 – Curva-chave de sólidos suspensos da estação Propriá (SE) no período de 2000 a 2005. Fonte: dados primários da ANA (2018).

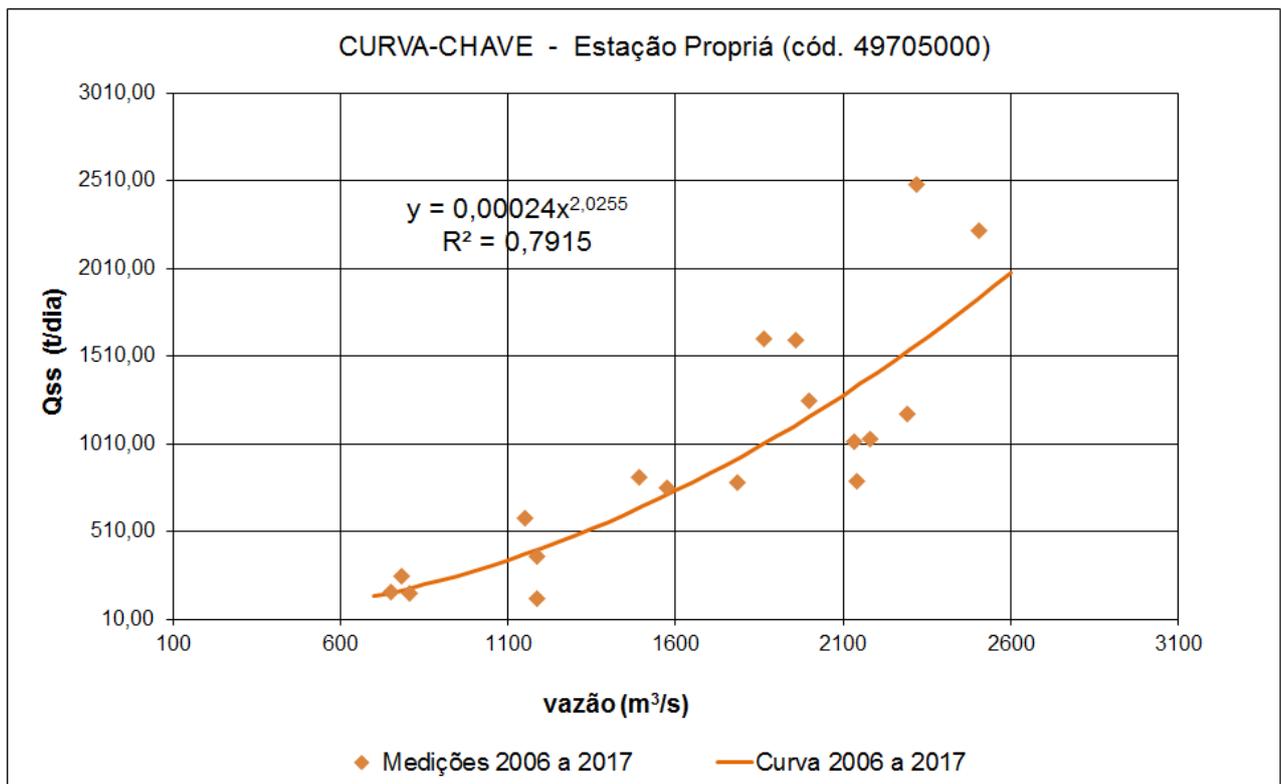


Figura 11 – Curva-chave de sedimento da estação Propriá (SE), no período de 2006 a 2017. Fonte: dados primários da ANA (2018).

Neste estudo, as medições foram realizadas em intervalos de tempo muito espaçados e, considerando que as concentrações de sedimentos podem variar em períodos curtos, foi adotado anos inteiros para definir os períodos das CCS

elaboradas. As equações das CCS, e seus respectivos R^2 das estações estudadas estão resumidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Resumo das curvas-chave elaboradas pelo método do regressão linear para cada estação de estudo no BSF. Fonte: parâmetros de equações obtidos a partir de dados primários da ANA (2018).

| Código | Estação | CCS | R^2 | Nº de curva | Período |
|----------|---------------|--------------------------|--------|-------------|--------------|
| | | Equações ⁽¹⁾ | | | |
| 49330000 | Piranhas (AL) | $Y = 1E-05x^{2,3466}$ | 0,7604 | 1 | 2006 a 06/18 |
| 49660000 | Traipu (AL) | $Y = 1,00E-18x^{-4,585}$ | 0,8919 | 3 | 1999 |
| | | $Y = 3,00E-09x^{3,6494}$ | 0,7966 | | 2000 a 2001 |
| | | $Y = 0,007x^{1,5397}$ | 0,8283 | | 2005 a 2018 |
| 49705000 | Propriá (SE) | $Y = 0,0069x^{1,6479}$ | 0,6411 | 2 | 2000 a 2005 |
| | | $Y = 0,00024x^{2,0255}$ | 0,7915 | | 2006 a 2018 |

⁽¹⁾ Na equação x: vazão (m³/s); e Y: descarga sólida de sedimentos em suspensão – Q_{ss} (t/dia).

Sugere-se que em rios com sequência de barragens, deve-se fazer um maior número de medições para melhor representar os dados estimados de carga de sedimento que chegam à foz do rio em questão.

Vaughan et al. (2017) também utilizaram as curvas-chave para classificar os sedimentos (SRCs). Foram gerados SRCs com total de sólidos suspensos recentes (TSSs), onde foram descarregados dados de 45 medidores em 36 rios em todo o estado de Minnesota, EUA. As bacias hidrográficas estudadas variavam de 32 a 14.600 km² e representam configurações distintas em termos de topografia, cobertura da terra e história geológica.

No Brasil, Garrido et al. (2018) também utilizaram as curvas-chave para estimar a carga de sedimento na bacia hidrográfica do rio Piancó – Piranhas-Açu (PB). O período de estudo ocorreu entre nov/2012 a mai/2013 totalizando 15 campanhas de medições mensais, de vazão e amostras de água com sedimentos em suspensão no período seco e no período chuvoso.

O comportamento das medições de descarga sólida e líquida, no trecho BSF nas estações estudadas apresentaram valores alternados de erosão e sedimentação antes do ano de 2013. No entanto, a partir de 2013 houve

predominância de processos de sedimentação, devido à diminuição das vazões causada pelo período de estiagem.

Cavalcante (2011), no período de 2000 até 2010, também encontrou alternância de processos erosivos e sedimentares nas três estações em estudos. Esse autor também concluiu que os sedimentos presentes são oriundos de processos erosivos de suas margens ou talvez de sedimentos adquiridos de seus pequenos tributários como Ipanema, Traipu, Gararu e Capivara.

A concentração de sedimento varia no tempo e no espaço, por isso, é importante a realização de medições de sedimentos em intervalos de tempo curtos para que se possa melhor entender a dinâmica dos sedimentos. Medições com grandes intervalos de tempo podem esconder variações significativas de produção de sedimentos (Vestena et al., 2008).

Por isso, na elaboração das CCS, o valor do R^2 é de extrema importância para avaliação da correlação entre os dados de vazão e sedimento.

Segundo Morais (2015), dados que apresentam baixa correlação podem conter algum tipo de anomalia específica na área, casos como: ação antrópica com alguma atividade que cause uma ação excessiva de sedimentos (desmatamento,

agricultura, construção de pontes) ou mesmo até por estarem a jusante de represas.

No ambiente natural dos cursos de águas para uma dada vazão podem existir valores diferentes para descarga sólida e, por isso, a CCS não pode substituir os valores reais. Além disto, o fato da CCS estar relacionado somente com o dado de vazão é preciso ficar atento para outros fatores que podem interferir na oferta de sedimento como o uso do solo, intervenções hidráulicas, dentre outros (Cavalho, 2008).

Medeiros et al. (2011) também afirmam que essas dificuldades também podem existir devido as alterações hidrológicas oriundas do impacto das barragens. A ausência de medições mais distribuídas ao longo dos anos nas diferentes faixas de vazão podem interferir na estimativa de resultados. Isso ocorre porque a vazão e o material em suspensão, aliado ao tempo de residência destes na calha do rio e nos reservatórios, variam ao longo dos anos.

Estudos mais aprofundados sobre as CCS podem ser vistos na pesquisa de Walling (1977), onde se analisou os erros na curva-chave tradicional de sedimentos. O referido estudo encontrou erros anuais acima de 280% e erros mensais variando entre +900% e -80%. E ainda salienta que os erros da CCS estão sujeitos a vários fatores: intervalo de tempo, procedimento utilizado na derivação da curva e a aplicação da curva de calibração.

No presente estudo, a elaboração das CCS possibilitou observar reduções das vazões e de sedimentos no final do ano de 2012 para 2013, aproximadamente quando começou o período de estiagem na região do semiárido. Pela análise dos gráficos, a seca veio se prolongando e diminuindo ainda mais as vazões até junho de 2018 devido à estiagem severa na região. Cabe salientar que, a vazão disponibilizada em Xingó é em função das barragens rio acima, principalmente a de sobradinho situado na região do semiárido aonde vem sofrendo com o problema de estiagem.

Notou-se, também, que a carga de sedimentos em suspensão no BSF foi reduzida desde a entrada de barragem de Xingó. Contudo, houve novamente outra redução com a chegada da seca a partir de 2012/2013 nas regiões acima da barragem de Xingó, comprometendo o comportamento dos fluxos das vazões e das cargas de sedimentos no BSF.

No estudo de Lima et al. (2006), realizado em diversos rios, foi constatado que o rio São Francisco no trecho baixo já contribuía com o menor valor de sedimentos lançado na sua foz entre

as bacias estudadas. Cabe salientar que o referido estudo também utilizou a metodologia das CCS para estimar as cargas sólidas nos rios.

Essa problemática também existe em outras bacias, como a bacia do rio Yangtze, localizado na China e considerado o maior rio da Ásia. Na referida bacia foi analisado a variação espaço-temporal do escoamento e verificou-se que o barramento afetou significativamente o sedimento fluvial, como também o processo sedimentar de toda a bacia. Obteve-se como consequência, também, a recessão do delta do Yangtze (Lin et al., 2016).

Na pesquisa de Zhao et al. (2017) sobre o efeito de barragens em cascatas sobre fontes de sedimentos (orgânicos), constatou-se que os reservatórios de Manwan e Dachaoshan, em cascata ao longo do rio Lancang-Mekong, mudaram de modo permanente o ambiente aquático e cujos fluxos de carbono foram modificados mostrando outras diversificações de fontes de matéria orgânica encontrada.

O Plano de Recursos Hídricos do rio São Francisco (PRH-SF) 2016 – 2025 mostra que o balanço hídrico superficial apresentou vazão demanda versus curva de permanência regularizada (Q_{95}) em situação muito crítica e preocupante, principalmente para a agropecuária, porém bastante confortável nas águas subterrâneas (CBHSF, 2016). Neste estudo, é possível identificar a redução de vazão e consequentemente a redução da produção de sedimento no BSF.

A diminuição de velocidade do fluxo de água provoca a sedimentação ao longo do rio, processo denominado de deposição de sedimentos. Um dos problemas mais sérios causados pelo acúmulo de sedimento nas calhas de rios e das barragens é o assoreamento, ou seja, a obstrução de rios e lagos. Em alguns casos essas obstruções são aproveitadas para agricultura e pelas populações ribeirinhas (Reis e Falcão, 2010).

Em relação à época de chuvas, 2016 e 2017 foram considerados os piores anos hidrológicos da bacia do rio São Francisco quando choveu em torno de 51% abaixo da média para a época (Costa, 2017).

Bandeira et al. (2013) afirmaram em seus estudos que as principais consequências na foz do rio São Francisco devido à redução de sedimentos ocasionada pelas barragens foram: (a) Redução de 90% da população de peixes, por causa da diminuição dos sedimentos finos que carregam nutrientes e matéria orgânica fundamental à fauna aquática; e (b) a erosão da foz do São Francisco

ocorrida depois da construção da Hidrelétrica de Paulo Afonso (1950).

Em uma avaliação geral da presente pesquisa para estimativa dos fluxos de sedimentos em suspensão de acordo com as CCS nos últimos cinco anos, pode-se dizer que a foz do São Francisco atualmente se constitui num ambiente em transformação devido à falta de águas novas e aporte de sedimentos. Essa redução abrupta do transporte de sedimento em suspensão vem ocasionando mudanças na paisagem da sua foz, além das mudanças no meio físico e biótico.

Conclusões

As CCS elaboradas mostram valores de correlação entre vazões e sedimentos dentro dos limites aceitáveis para realizar as estimativas de sedimentos em suspensão no Baixo São Francisco.

Constatou-se que para se chegar numa avaliação mais adequada das cargas de sedimentos no BSF, a Rede Hidrometeorológica Nacional precisa introduzir mais medições de descarga sólida no planejamento anual de modo a representar melhor o comportamento sedimentológico e estimar melhor o fluxo de sedimentos no rio.

Nas três estações estudadas no BSF houve variações das concentrações de sedimentos, alternância de períodos de erosão e deposição até o ano de 2012. Já a partir de 2013 houve um processo gradativo de redução de vazão e de sedimentos ao longo do rio. Esse período gradativo abrange até agora a menor série histórica registrada. A redução da carga de sedimento em suspensão pode estar ocasionando mudanças na paisagem da foz do rio São Francisco e comprometendo o ambiente físico e biótico do local.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Mestrado Profissional de Gestão Ambiental do Instituto Federal de Pernambuco (IFPE) campus Recife, pelo apoio e incentivo à elaboração da presente pesquisa.

Referências

- ANA. Agência Nacional da Água. 2018. Hidroweb - Sistema de Informações Hidrológicas. Brasília –DF. Disponível: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf>. Acesso: 30 out. 2018.
- ANA. Agência Nacional da Água. 2018. ANA mantém defluência mínima diária da barragem de Sobradinho (BA) em 550m³/s até novembro. Disponível: <http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/noticias/ana-mantem-defluencia-minima-diaria-da-barragem-de-sobradinho-ba-em-550m3-s-ate-novembro>. Acesso: 01 dez. 2018.
- ANA. Agência Nacional da Água. 2018. Reservatório de Xingó no rio São Francisco, passará a liberar média mensal de 600m³/s a partir de 1º de maio. 2018. Disponível: <http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/noticias/reservatorio-de-xingo-passara-a-liberar-media-mensal-de-600m3-s-a-partir-de-1o-de-maio>. Acesso em: 26 dez. 18.
- Araújo Filho, R. N., Holanda, F. S. R.; Pedrotti, A.; Santos, A. P.; Santos, T. O.; Lino, J. B.; Rocha, I. P. (2017). Influência dos atributos físicos-mecânicos do solo na estabilidade do talude do baixo São Francisco. *Revista Scientia Agraria*. Versão On-line ISSN 1983-2443, Versão Impressa ISSN 1519-1125, SA vol. 18 n°. 4, Curitiba Out/Dez2017 p. 107-113. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rsa.v18i4.52140>.
- Bandeira, J. V.; Farias, E. G. G.; Lorenzetti, J. A.; Salim, L. H. 2013. Resposta morfológica da foz do rio São Francisco, devido à retenção de sedimentos nos reservatórios. *Vetor-Revista de Ciências Exatas e Engenharia*, Rio Grande, v. 23, n. 1, p 5-17.
- Carvalho, N. O., 2008. *Hidrossedimentologia Prática*. 2ª ed. rev. atual e ampliada. Rio de Janeiro: Interciência.
- Cavalcante, A. J. B. D. 2011. Impactos nos processos morfológicos do baixo curso do rio São Francisco, decorrentes da construção de barragens. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Cavazzana, G. H., Souza, D. L., Zubcov, H. T., Filho, F. J. C. M. 2019. Transporte de sedimentos na bacia cênica do rio Formoso em Bonito/MS. *Revista Brazilian Journal of Development* (ISSN:2525-8761), Curitiba, v. 5, n. 7, jul. 2019. Disponível: <https://doi.org/10.34117/bjdv5n7-195>.

- CBHSF. Comitê da bacia hidrográfica do rio São Francisco. 2018. Câmara Consultiva Regional – CCR Baixo São Francisco. Disponível: <http://2017.cbhsaofrancisco.org.br/ccrs/baixo-sao-francisco/>. Acesso: 02 dez 2018.
- CBHSF. Comitê da bacia hidrográfica do rio São Francisco. 2018. Delta do São Francisco: o encontro do rio com o mar. Disponível: https://cbhsaofrancisco.org.br/noticias/natureza_blog/o-delta-do-sao-francisco/. Acesso: 03 nov. 2018.
- CBHSF. Comitê da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco. 2016. Plano de Recursos Hídricos da Bacia do rio São Francisco 2016 -2025. Associação Executiva de apoio à Gestão de Bacias Hidrográficas Peixes Vivos, Maceió - AL. Disponível: http://cbhsaofrancisco.org.br/planoderecursoshidricos/wp-content/uploads/2015/04/RF3_24jan17.pdf. Acesso: 02 nov. 2018.
- CBHSF. Comitê da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco. 2004. Plano de Recursos Hídricos da Bacia do rio São Francisco - baseado no Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco – PBHSF (2004-2013) – Resumo Executivo. ANA, GEF, PNUMA e OEA. Disponível: https://cdn.agenciapeixe vivo.org.br/files/uploads/2010/09/images_AAGB_comites_cbhsf_PlanodecenaldeRecursosHidricos.pdf. Acesso:
- CHESF. Companhia Hidrelétrica do São Francisco. 2018. Descrição do aproveitamento de Xingó. Recife. Disponível: <https://www.chesf.gov.br/SistemaChesf/Pages/SistemaGeracao/Xingo.aspx>. Acesso: 15 dez. 2018.
- CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 2017. Rede Hidrometeorológica Nacional. Rio de Janeiro: CPRM/RHN. Disponível: <http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Apresentacao/Rede-Hidrometeorologica-Nacional---RHN-304.html>. Acesso: 25 maio 2017.
- Córdova, J. R.; Gonzalez, M. 1997. Sediment yield estimation in small watersheds based on streamflow and suspended sediment discharge measurements. *Soil technology*, v. 11, p. 57-65, 1997. *Revista Eletrônica*. Disponível: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S09333363096001158>. Acesso: 12 dez.18.
- Costa, W. 2017. IBAMA autoriza redução da vazão do rio São Francisco para 600 m³/s. G1: portal de notícias, Alagoas. 15 de maio de 2017. Disponível: <https://g1.globo.com/al/alagoas/noticia/ibama-autoriza-reducao-da-vazao-do-rio-sao-francisco-para-600-ms.shtml>. Acesso: 05 ago. 2017.
- Fontes, C. dos S. 2016. Dinâmica dos processos erosivos em taludes do baixo curso do rio São Francisco: desafios para seu controle com uso de geotêxteis. Tese (Doutorado em Geografia) Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Sergipe. Disponível: https://bdtd.ufs.br/bitstream/tede/2928/2/CATI_A_SANTOS_FONTES.pdf. Acesso: 05 maio 2017.
- Garrido, J. W. A.; Sousa, T. M. I.; Ismael, L. L.; Crispim, D. L.; Ferreira, P. M. L.; Queiroz, M. M. F. 2018 Determinação das curvas-chave de descargas de sedimentos em suspensão na bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental* v.23 n.1; jan/fev 2018; 69-75. DOI: 10.1590/S1413-41522018138711.
- Li N; Wang L., Zeng C., Wang D., Liu D., Wu X. 2016. Variations of Runoff and Sediment Load in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, China (1950-2013). *Revista Eletronica. PLoS ONE* 11(8): e0160154. doi:10.1371/journal.pone.0160154 de <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0160154>.
- Lima, J. E. F. W.; Lopes, W. T. A.; Carvalho, N. O.; Silva, E. M. da; Vieira, M. R. 2006. Fluxo de sedimentos em suspensão no exutório de grandes bacias hidrográficas em território brasileiro. VII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. Porto Alegre – RS. Disponível: https://www.researchgate.net/publication/242773253_FLUXO_DE_SEDIMENTOS_EM_SU SPENSAO_NO_EXUTORIO_DE_GRANDE S_BACIAS_HIDROGRAFICAS_EM_TERRITORIO_BRASILEIRO. Acesso: 04 nov. 2018.
- Medeiros, P. R. P.; Knoppers, B.; Souza, W. F. L.; Oliveira, E. N. 2011. Aporte de material em suspensão no baixo rio São Francisco (SE/AL), em diferentes condições hidrológicas. *Braz. J. Aquat. Sci. Technol.*, 15(1): 42-5. Disponível: <https://siaiap32.univali.br/seer/index.php/bjast/article/viewFile/1909/1897>. Acesso: 18 ago. 2018.
- Morais, R. C. S. 2015. Estimativa de produção e transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Parnaíba, Nordeste do Brasil. *Revista Equador (UFPI) Revista da Pós-graduação em*

- Geografia, do Centro de Ciências Humanas e Letras ISSN 2317-3491, Vol. 4, Nº 4, p.81-97, de
<https://revistas.ufpi.br/index.php/equador/artic/e/view/3656>.
- Pomerol, C.; Lagabriele, Y.; Renard, M.; Guillot, S. 2013. Princípios de Geologia : técnicas, modelos e teorias. 14ª ed. –Porto Alegre: Bookman.
- Reis, R.; Falcão, S. 2010. Hidrossedimentologia Básica. In: AZEVEDO, José Roberto (Org.) Hidrometria Aplicada à Gestão dos Recursos Hídricos. Recife: Ed. Universitária da UFPE. 484p.:il., figs., gráfs.
- Santana, K. N. C.; Torres, C. J. F.; Fontes, A. S.; Costa, A. R.; Peso-Aguiar, M. C.; Santos, A. C. A.; Medeiros, Y. D. P. 2016. Efeitos da regularização dos reservatórios na ictiofauna do baixo curso do rio São Francisco. Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais. ISSN: 2317-563X, 2016;4(1):95-108. DOI 10.9771/gesta.v4i1.15080.
- Sousa, M. E. Filho, N.E.S.S.; Pereira, L. A.; Lyra, L.H.B. 2013. Monitoramento e caracterização do assoreamento no rio São Francisco nas orlas urbanas de Petrolina-PE e Juazeiro-BA. Revista Casa da Geografia de Sobral (RCGS), Sobral - CE, V.15, n.1, p.68-80, 2013. De <http://rcgs.uvanet.br/index.php/RCGS/article/view/145>.
- Tavares, E. 2013. São Francisco: rio de Lágrimas. Blogspot. 22 de outubro de 2013. Disponível: <http://ducamendes.blogspot.com.br/2013/10/>. Acesso: 22 jan. 2018.
- Vaughan, A.A., Patrick Belmont, Charles P. Hawkins, Peter Wilcock. 2017. Near-Channel Versus Watershed Controls on Sediment Rating Curves. Magazine AGU advancing Earth and Space Science. JGR Earth Surface. 2017, de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2016JF004180>.
- Vestena, L. R.; Lucini, H.; Kobiyama, M. 2008. Avaliação da Concentração de Sedimento em Suspensão no rio Caeté, em AlfredoWagner/SC. Revista União da geomorfologia brasileira. Revista Eletrônica, de <http://sie.unb.br/ugb/sinageo/7/0215.pdf>.
- Walling, D. E. 1977. Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small basin. Water Resources Research. 13 (3), 531-538, 1977. Revista Eletrônica, de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/WR013i003p00531>.
- ZHAO, C.; DONG, S.; LIU, S.; AN, N.; SYLVIE, I.; ZHAO, H.; LIU, Q.; WU, X. (2107). Preliminary study on the effect of cascade dams on organic matter sources of sediments in the middle Lancang–Mekong River. Journal of Soils and Sediments ISSN1439-0108. Volume 18; Number 1 Sediments, sec 2 • Physical and biogeochemical processes. DOI: 10.1007 / s11368-017-1790-5