

CARGAS DE FÓSFORO TOTAL E MATERIAL EM SUSPENSÃO EM UM RESERVATÓRIO DO SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO

Francisco Rafael Sousa Freitas¹, Antônio Marozzi Righetto¹ & José Luiz Attayde^{2*}

¹Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Departamento de Engenharia Civil - CT / LARHISA, Campus Universitário, Natal, RN, Brasil. CEP: 59072-970.

²Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Departamento de Botânica, Ecologia e Zoologia – CB / LEA, Campus Universitário, Natal, RN, Brasil. CEP: 59072-970.

E-mails: freitas.sousa@gmail.com, righetto@ct.ufrn.br, attayde@cb.ufrn.br.

RESUMO

Os açudes do semi-árido brasileiro são reservatórios altamente vulneráveis à eutrofização e ao assoreamento, pois apresentam um elevado fator de envolvimento (área da bacia de drenagem/área do reservatório) e elevado tempo de residência da água, o que favorece a retenção dos nutrientes e sedimentos exportados de suas bacias de drenagem. No entanto, as cargas externas de nutrientes e sólidos em suspensão para os açudes bem como seus coeficientes de retenção são desconhecidas. Com o objetivo de quantificar as cargas de fósforo total e sólidos em suspensão exportadas da bacia hidrográfica do açude Cruzeta (RN) e descrever os padrões de variação temporal das concentrações de nutrientes, sólidos em suspensão e clorofila *a* na água do açude, foram realizadas coletas quinzenais (n=26) em cinco pontos de coleta do reservatório entre março de 2007 e maio de 2008. A bacia hidrográfica do açude Cruzeta exportou anualmente 0,03g de fósforo total e 7,08g de sólidos suspensos por metro quadrado de bacia. As cargas anuais de fósforo total e sólidos suspensos foram de 4,8 e 1.160,7 gramas por metro quadrado de açude. Os resultados do balanço de massa demonstram que o reservatório reteve cerca de 94% da carga de sólidos em suspensão e 50% da carga de fósforo total. As medianas das concentrações de fósforo total e clorofila *a* foram 0,12mg L⁻¹ e 12µg L⁻¹ respectivamente durante o período de estudo. As razões TN:TP (atômica) estiveram frequentemente abaixo de 16:1 sugerindo uma limitação por nitrogênio. A correlação negativa observada (r²=0,40; p<0,001) entre a concentração de sólidos fixos em suspensão e a transparência da água do reservatório demonstra que grande parte da turbidez é de origem mineral, sugerindo potencial limitação por luz no reservatório estudado. A elevada turbidez abiogênica e a provável limitação por luz e/ou nitrogênio fazem com que as concentrações de clorofila *a* observadas sejam menores do que seria esperado em virtude das concentrações de fósforo total observadas na água do açude.

Palavras-chave: Balanço hídrico; balanço de massa; eutrofização; reservatório; semi-árido.

ABSTRACT

SUSPENDED SOLIDS AND PHOSPHORUS LOAD IN A BRAZILIAN SEMI-ARID RESERVOIR.

Semi-arid reservoirs are highly vulnerable to eutrophication and siltation, as they have a large catchment : surface area ratio (AD: A_L), and high water residence time, which underlies their potential for high retention of nutrients and sediments exported from the watershed . Nevertheless, the external loads of nutrients and suspended solids to these reservoirs and their retention coefficients are unknown. In order to quantify the loads of total phosphorus and suspended solids exported from the watershed of Cruzeta (RN) reservoir, and to describe the patterns of temporal variation in total phosphorus, suspended solids and chlorophyll *a* concentrations in the water, five sampling points in the reservoir were monitored between March 2007 and May 2008 (n = 26). The annual exportation coefficients of total phosphorus and suspended solids were respectively, 0.03g and 7.08g per square meter of watershed. The annual loads of total phosphorus and suspended solids were respectively, 4.8g and 1160.7g per square meter of reservoir . The mass balance results shows that the reservoir retained 94% of the incoming suspended solids and 50% of the incoming total phosphorus load. The median

concentrations of total phosphorus and chlorophyll *a* were 0,12mg L⁻¹ and 12µg L⁻¹ respectively, over the study period. The TN:TP ratio (atomic) were often below 16:1 suggesting nitrogen limitation. The observed negative correlation ($r^2=0.40$; $p < 0.001$) between fixed suspended solids and transparency (secchi depth) indicates that the major source of turbidity was abiogenic and suggests potential light limitation of primary production. The likely light and/or nitrogen limitation might explain the lower than expected chlorophyll *a* per total phosphorus concentrations observed in the reservoir.

Keywords: Water balance; mass balance; eutrophication; reservoir; semi-arid.

RESUMEN

CARGA DE FÓSFORO TOTAL Y MATERIALES EN SUSPENSIÓN EN UN DEPÓSITO SEMIÁRIDO DE BRASIL. Los depósitos semiáridos son altamente vulnerables a la eutrofización y sedimentación, ya que tienen una gran captación: relación área-superficie (AD: A_L), y alto tiempo de permanencia en agua, lo cual es la base de su potencial para la alta retención de nutrientes y sedimentos exportados de la línea divisoria de aguas. Sin embargo, se desconocen las cargas externas de nutrientes y sólidos suspendidos en estos depósitos y sus coeficientes de retención. Para cuantificar las cargas de total de fósforo y sólidos en suspensión exportados desde la línea divisoria de aguas del depósito Cruzeta (RN), y describir los patrones de variación temporal en el total de fósforo, sólidos suspendidos y concentración de clorofila *a* en el agua, se monitorearon entre Marzo de 2007 y Mayo de 2008 cinco puntos de muestreo en el depósito ($n=26$). Los coeficientes de exportación anual de total de fósforo y sólidos en suspensión fueron 0,03 g y 7,08 g por metro cuadrado de la línea divisoria de aguas respectivamente. Las cargas anuales de total de fósforo y sólidos suspendidos fueron 4,8 g y 1160,7 g por metro cuadrado de depósito respectivamente. Los resultados de equilibrio de masas muestran que el depósito conservó el 94% de los sólidos suspendidos entrantes y el 50% de la carga de fósforo total que recibe. Las medianas de las concentraciones de fósforo total y clorofila *a*, durante el período de estudio, fueron 0,12mg L⁻¹ y 12 µg L⁻¹ respectivamente. La relación (atómica) TN:TP fue con frecuencia menor a 16:1 sugiriendo una limitación de nitrógeno. La correlación negativa observada ($r^2 = 0,40$; $p < 0,001$) entre los sólidos suspendidos fijos y la transparencia (profundidad Secchi) indica que la fuente principal de turbidez era abiogénica y sugiere una limitación potencial ligera de la producción primaria. La luz probable y/o la limitación de nitrógeno podrían explicar el valor más bajo que el esperado de clorofila *a* por concentraciones de fósforo total observados en el depósito.

Palabras clave: Balance hídrico; balance de masa; eutrofización; depósitos; semiáridos.

INTRODUÇÃO

A construção de reservatórios, regionalmente chamados de açudes no semi-árido brasileiro, foi vital para o desenvolvimento da região. Esses reservatórios são utilizados para múltiplas finalidades como o abastecimento doméstico e industrial, irrigação, dessedentação animal, pesca, aquicultura e lazer, constituindo-se, portanto, em ecossistemas de grande valor sócio-econômico e cultural. No entanto, a qualidade da água desses ambientes vem sendo reduzida por emissões antropogênicas de poluentes ao mesmo tempo em que crescem as necessidades de consumo e a demanda de água, gerando consequentemente conflitos de uso (Carvalho *et al.* 2002).

Estimativas de cargas de nutrientes e sedimentos transportados pelos rios das bacias de drenagem para os lagos e reservatórios são informações essenciais para qualquer programa de manejo e restauração desses ecossistemas (Torres *et al.* 2007, Cook *et al.* 2010). Uma característica distintiva dos reservatórios de zonas semi-áridas, é a alta relação existente entre a área da bacia hidrográfica e a área do reservatório, necessária para manter certo volume de água acumulado (Thornton & Rast 1989, 1993). Como os solos do semi-árido brasileiro são geralmente rasos e a vegetação de pequeno porte (Oyama & Nobre 2004), as chuvas intensas que ocorrem de forma concentrada em poucos dias do ano, promovem uma maior erosão, que associadas às grandes áreas de captação das bacias, elevam a carga de sedimentos

carreados para os reservatórios (Alves & Campos 2009) e conseqüentemente o assoreamento dos mesmos. Desta forma, os sedimentos depositados reduzem a capacidade acumulativa e o tempo de vida útil dos açudes (Araújo 2003). A denudação física e química dos solos das bacias também resulta em fontes externas de nutrientes para os açudes os quais somados às emissões antropogênicas de nutrientes vêm acelerando o processo de eutrofização dos reservatórios do semi-árido, comprometendo a qualidade da água, principalmente por florações de cianobactérias potencialmente tóxicas, que além de oferecerem riscos à saúde humana e animal, causam prejuízos econômicos e alteram a estrutura e o funcionamento dos ecossistemas (Bouvy *et al.* 2000, Barbosa *et al.* 2006, Eskinazi-Sant'anna *et al.* 2006, Panosso *et al.* 2007, Costa *et al.* 2009).

Diante do exposto, constitui-se de fundamental importância para o manejo dos reservatórios eutrofizados do semi-árido, o conhecimento das cargas externas de nutrientes originados de fontes pontuais

e difusas. Entre essas fontes estão aquelas advindas da drenagem de áreas florestais, agrícolas, pastoris e urbanas além das precipitações pluviométricas. Desta forma, os principais objetivos dessa pesquisa foram: 1) estimar as cargas de nutrientes (fósforo total) e material em suspensão (sólidos totais, fixos e voláteis) exportadas da bacia hidrográfica de um açude do semi-árido brasileiro e 2) realizar um balanço de massa de fósforo total e materiais em suspensão para determinar os seus respectivos coeficientes de retenção no açude.

MATERIAIS E MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado no açude Cruzeta (Figura 1), localizado na bacia hidrográfica do rio Seridó, no semi-árido do Rio Grande do Norte, limitada pelos paralelos 06°03' e 06°25'S e os meridianos 36°35' e 36°57'W.

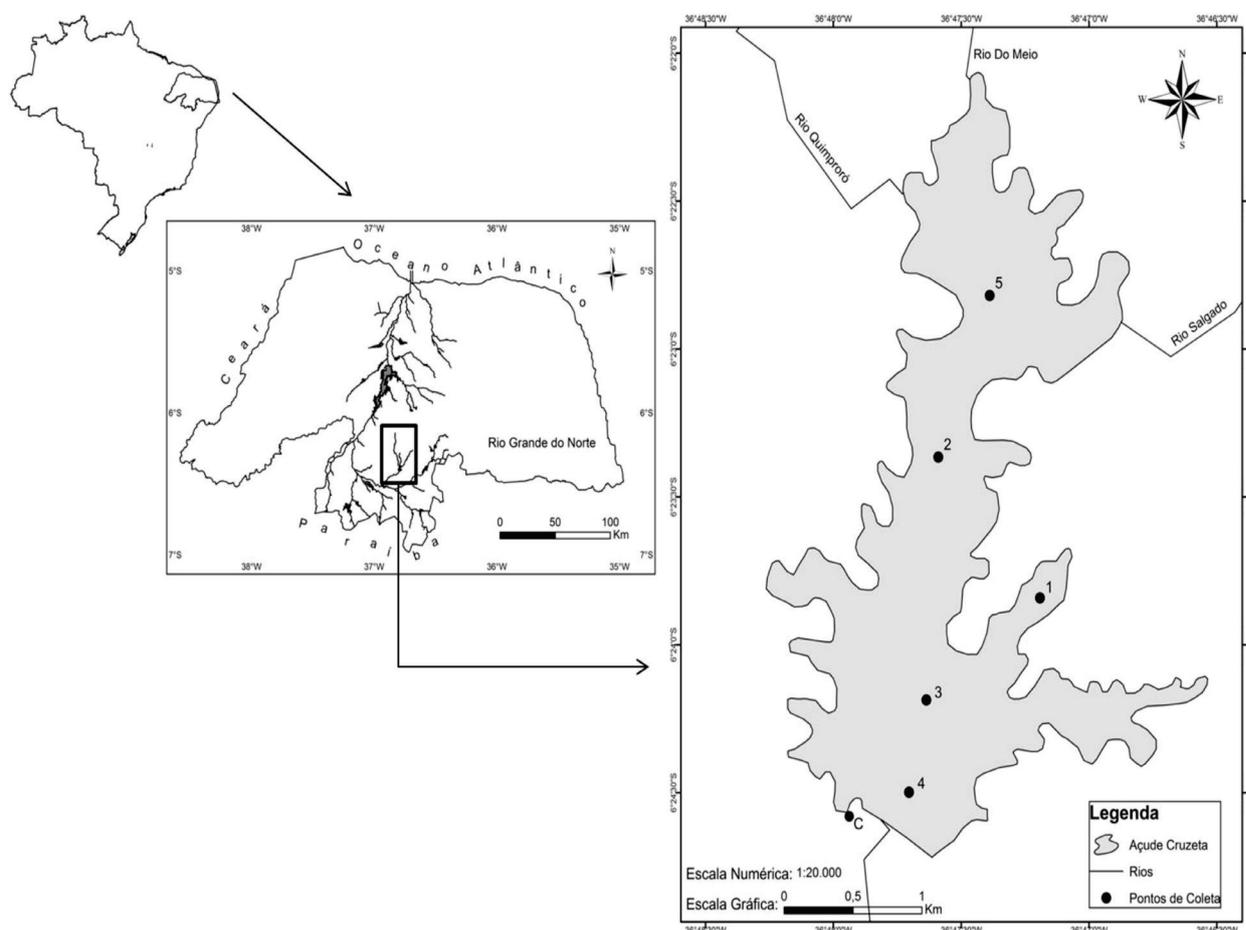


Figura 1. Localização do reservatório Cruzeta e das estações de coleta na região semi-árida do Rio Grande do Norte, Brasil.

Figure 1. Location of Cruzeta reservoir and its sampling sites in the semi-arid region of Rio Grande do Norte, Brazil.

Na bacia do açude Cruzeta (área de 1.010km² e perímetro 157km), o regime pluviométrico é do tipo tropical, com a estação das chuvas ocorrendo de janeiro a junho, com o máximo ocorrendo entre março e abril. Entretanto, o início e término da estação chuvosa apresentam-se de forma bastante aleatória, e mesmo no período de estiagem podem ocorrer chuvas. A precipitação média anual na bacia do açude Cruzeta é de 585,1mm com base nas normais climatológicas de 1936 a 1985 (Guimarães Jr. *et al.* 2000) enquanto a evaporação potencial média anual é da ordem de 3.323mm, caracterizando um alto déficit hídrico (Melo 2002).

O açude Cruzeta teve a construção finalizada em 1929 e barra o riacho São José no ponto de Latitude 06°24'32"S e Longitude 36°48'01"W, possui baixa profundidade média (< 3m) e é um ambiente bem misturado e espacialmente homogêneo (Freitas 2008). A área da bacia hidráulica é de 6,16km² e a relação AD (área da bacia drenagem): A_L (área da bacia hidráulica) é de 163,96. O açude é utilizado como fonte de abastecimento da cidade de Cruzeta além da irrigação, pesca, recreação e dessedentação de animais (Melo 2002). O reservatório tem como principais afluentes: o rio Quimproró, rio Do Meio e rio Salgado, cujas sub-bacias representam cerca de 95% da área total da bacia de drenagem. Originalmente, possuía uma capacidade máxima de acumulação de 35.000.000m³, mas atualmente essa capacidade encontra-se reduzida a 23.545.745,33m³, de acordo com o levantamento batimétrico realizado em janeiro de 2010 pela Secretaria Estadual do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte - SEMARH. Portanto, o açude perdeu cerca de 1/3 de sua capacidade de acumulação em 81 anos de operação, o que significa um assoreamento médio anual de 0,4%. Assumindo uma densidade média dos sedimentos de 1,4 ton/m³, estima-se que cada quilômetro quadrado da bacia contribuiu em média com 196 toneladas de sedimentos por ano, considerando a área da bacia hidrográfica de 1.010 km².

METODOLOGIA

Amostragem

Amostras de água foram coletadas entre março de 2007 e maio de 2008, quinzenalmente, em cinco

pontos de coleta (Figura 1), totalizando 26 (vinte e seis) campanhas amostrais, para determinação das concentrações de fósforo total, nitrogênio total, clorofila *a* e sólidos em suspensão. As coletas foram realizadas no período da manhã, no intervalo das 7:30 às 11:00h. Em cada ponto de coleta, foram retiradas amostras de água a cada metro de profundidade com uma garrafa tipo Van Dorn. As amostras foram reunidas em uma caixa plástica de 40 litros, da qual foram retiradas sub-amostras representativas de cada ponto de coleta. A transparência da coluna d'água foi mensurada com um disco de Secchi (30cm de diâmetro). As médias das variáveis nos cinco pontos de coleta foram utilizadas para descrever as variáveis limnológicas em cada data de amostragem. Os dados de precipitação e variação volumétrica do reservatório, ao longo do período da pesquisa, foram obtidos junto ao Departamento Nacional de Obras Contra as Secas - DNOCS (escritório da cidade de Cruzeta - RN).

Análises das amostras

No laboratório foram determinadas as concentrações de clorofila *a* (extração com etanol 95%), segundo Jaspersen & Christoffersen (1988), não sendo realizada a correção da feofitina, visto que a mesma reduz a acuracidade e a precisão do resultado (Stich & Brinker 2005, Schilling *et al.* 2006). A determinação do fósforo total foi realizada pelo método colorimétrico do cloreto estanhoso com pré-digestão da amostra com os ácidos sulfúrico e nítrico com leitura espectrofotométrica no comprimento de onda de 690nm (APHA 1998). As concentrações de nitrogênio total foram determinadas através do método Semi-macro Kjeldahl (APHA 1998) com a amônia medida através do método Fotométrico da Nesslerização Direta com leitura espectrofotométrica no comprimento de onda de 450nm (APHA 1989). Os sólidos em suspensão (totais, e fração fixa e volátil) foram quantificados gravimetricamente, sendo utilizados filtros de fibra de vidro Whatman 934-AH (47mm; 1,5µm de porosidade), com secagem em estufa a 105°C e ignição em forno mufla a 550°C (APHA 1998). As medidas de Turbidez foram realizadas por nefelometria (APHA 1998), com auxílio de um turbidímetro da marca TECNAL (modelo TB-100).

Avaliação das cargas e coeficientes de exportação

A quantificação das cargas de entrada foi feita com base no volume total de água recebido pelo reservatório e na concentração média de fósforo total e sólidos suspensos para o período chuvoso de 2007 (n=7) e 2008 (n=8) a partir das amostragens dos três principais afluentes do reservatório (rio Quimproró, rio Do Meio e rio Salgado). O número de amostras coletadas é justificado pelo caráter intermitente dos rios, que apresentavam vazão apenas por curtos espaços de tempo.

A entrada total de água no reservatório, foi obtida através do balanço hídrico com a utilização da Equação 1 (Gomes Filho *et al.* 1999).

$$E_{n,m} = (V_f)_{n,m} - (V_i)_{n,m} + S_{n,m}$$

Equação (1)

em que:

$E_{n,m}$ é o volume total de entrada de água no reservatório do mês m do ano n; $(V_f)_{n,m}$ é o volume de água no reservatório no final do mês m do ano n (determinado pela curva cota - área - volume do açude); $(V_i)_{n,m}$ é o volume de água no reservatório observado no início do mês m do ano n e $S_{n,m}$ é a demanda hídrica total do reservatório que inclui a evaporação e o abastecimento, no mês m do ano n.

Na estimativa das cargas de fósforo total, também foi considerado o volume total precipitado sobre a bacia hidráulica do reservatório. A quantificação do fósforo total na água de precipitação pluvial foi realizada para a obtenção de uma concentração média de fósforo total para os períodos chuvosos de 2007 (n=09) e 2008 (n=11).

As cargas de saída foram calculadas considerando os volumes liberados para abastecimento e irrigação monitorados a partir de uma estação limimétrica localizada no canal de derivação do reservatório, e dos volumes liberados pelo vertedouro (dados obtidos a partir da curva chave do vertedouro do açude) que durante o tempo monitorado extravasou apenas no período chuvoso de 2008. Para quantificação das concentrações de fósforo total e sólidos em suspensão, foram realizadas amostragens da água

liberada pelo canal de derivação (n=27; ponto C – Figura 1) e no vertedouro (n=6). Deve-se salientar que para o cálculo das cargas, não foi considerada a deposição seca (oriunda do carreamento de matéria pelo vento).

O cálculo do coeficiente de exportação de fósforo total e sólidos em suspensão da bacia (L_e), foi obtido dividindo-se a massa correspondente carreada, pela área da bacia de drenagem. Posteriormente procedeu-se o cálculo da carga de fósforo total e sólidos em suspensão sobre o reservatório, através da Equação 2 (Toledo Jr. *et al.* 1983).

$$L(B) = \frac{AD \times L_e}{A_L}$$

Equação (2)

em que:

$L(B)$ representa a carga de fósforo total ou material em suspensão sobre o reservatório ($g/m^2.ano$); AD é área da bacia de drenagem (m^2); L_e é coeficiente de exportação de fósforo total ou material em suspensão ($g/m^2.ano$) e A_L é a área da bacia hidráulica (m^2).

Análise estatística dos dados

Análises de regressão linear foram usadas para descrever as relações entre as concentrações de sólidos em suspensão, transparência (Secchi) e clorofila *a* no reservatório. As análises foram realizadas utilizando o software STATISTICA 6.0 (Statsoft, Inc., Tulsa, OK, U.S.A.), assumindo um nível de significância de $\alpha = 0,05$.

RESULTADOS

CARACTERIZAÇÃO DO RESERVATÓRIO

Ao final do período chuvoso de 2007 o açude Cruzeta atingiu 61% da capacidade de acumulação, chegando ao final do período de estiagem com cerca de 23% da capacidade. Durante período chuvoso de 2008 o reservatório aumentou o volume armazenado, atingindo a capacidade máxima de acumulação, passando a verter no início de abril/2008 (Figura 2).

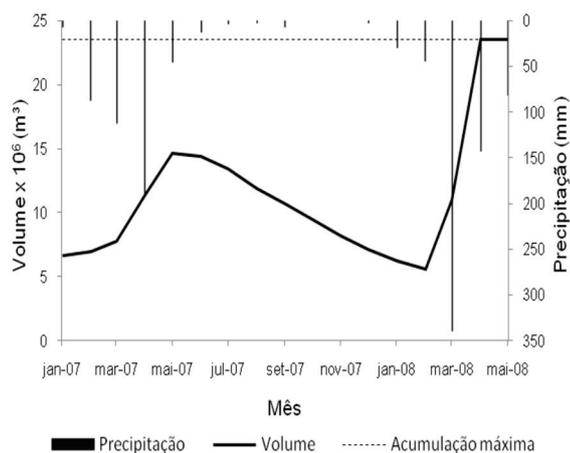


Figura 2. Variação temporal da precipitação pluvial acumulada (mm) e do volume médio mensal ($\times 10^6 \text{ m}^3$) do reservatório Cruzeta (Janeiro 2007 a Maio 2008).

Figure 2. Temporal variation of monthly pluvial precipitation (mm) and mean volume ($\times 10^6 \text{ m}^3$) of Cruzeta reservoir (January 2007 to May 2008).

Considerando o intervalo de janeiro de 2007 a maio de 2008, o tempo de residência médio da água no açude Cruzeta foi de 157 dias. Os maiores valores foram observados no período chuvoso de 2007 com máximo ocorrendo em maio/2007 (428,91 dias) período em que o reservatório recebeu aporte de água, entretanto não verteu. Observou-se uma tendência de diminuição do tempo de residência ao longo do

período de estiagem (junho/2007 a fevereiro/2008), associada à intensa evaporação e/ou incremento da demanda no período. O menor valor (12,77 dias) ocorreu no período chuvoso de 2008, concomitante com o início do vertimento do reservatório em abril/2008 (Figura 3).

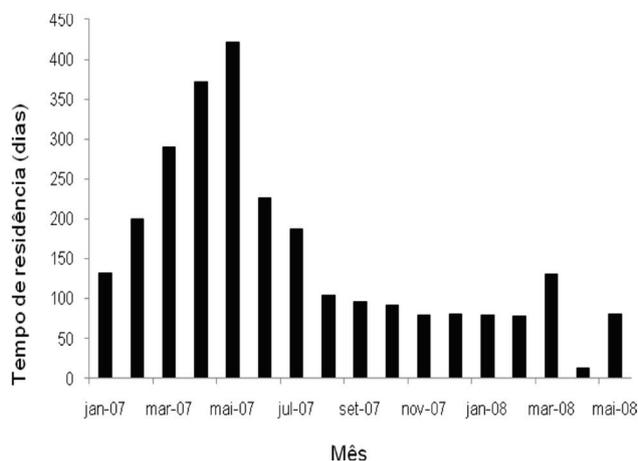


Figura 3. Tempo de residência médio da água no açude Cruzeta (dias) de Janeiro de 2007 a Maio de 2008.

Figure 3. Mean water retention time in Cruzeta reservoir (days) from January 2007 to May 2008.

Os resultados das estatísticas descritivas das variáveis monitoradas no reservatório encontram-se descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Estatísticas descritivas das variáveis monitoradas.
Table 1. Descriptive statistics of the monitored variables.

PARÂMETRO	MÍNIMO	MÁXIMO	*MÉDIA ARITIMÉTICA	MEDIANA	DESVIO PADRÃO
Transparência – SECCHI (m)	0,19	1,51	0,72	0,63	0,34
Turbidez (UNT)	6,05	196,40	30,42	18,65	37,75
Fósforo Total – P (mg/l)	0,015	0,33	0,15	0,12	0,095
Nitrogênio Orgânico Total (mg/l)	0,07	0,96	0,28	0,21	0,19
Razão N:P (atômica)	1,30	19,94	7,10	3,66	6,06
Sól. Susp. Totais – SST (mg/l)	3,64	22,16	11,04	9,94	5,26
Sól. Susp. Fixos –SSF (mg/l)	1,59	15,40	7,26	5,45	4,73
Sól. Susp. Voláteis – SSV (mg/l)	1,12	8,36	3,79	3,35	1,81
Clorofila – a ($\mu\text{g/l}$)	2,43	41,00	17,65	11,82	11,99

*n=26.

A turbidez no reservatório apresentou valores crescentes ao longo do período de estiagem de 2007, com pico de 196,40 UNT em abril/2008, determinando inversamente o comportamento da transparência que em abril/08 apresentou menor valor (0,19m). O fósforo total atingiu os maiores valores durante os meses de novembro e dezembro de 2007 (0,33 – 0,32mg/l respectivamente) no final do período de estiagem, e em abril e maio de 2008 (0,28 – 0,31mg/l respectivamente) no período chuvoso, não sendo observadas variações sazonais bem definidas (Figura 4). Percebe-se que durante o período chuvoso houve um incremento nas concentrações de fósforo, através do input de material alóctone carreado da bacia para o reservatório; entretanto, o aumento das concentrações de fósforo durante o período de estiagem pode estar relacionado com a diminuição do volume e da profundidade do reservatório, que incrementa a eficiência da ação dos ventos na ressuspensão dos sedimentos, além do efeito de concentração do nutriente, resultante da evaporação da água no período de estiagem.

A concentração de nitrogênio orgânico total foi relativamente constante durante o período estudado, sendo que o maior valor (0,96mg/l) foi verificado em junho/2007. As razões N:P (atômica), apresentaram grande amplitude (18,64) ao longo do período monitorado, com média de 7,10 (\pm 6,06), e permaneceram quase sempre abaixo das razões de Redfield 16:1 (Redfield 1958), com exceção dos meses de março (17,27), abril (17,46) e junho (19,94) de 2007, devido ao aumento das concentrações de nitrogênio nesses meses, já que o fósforo manteve valores relativamente constantes nesse período.

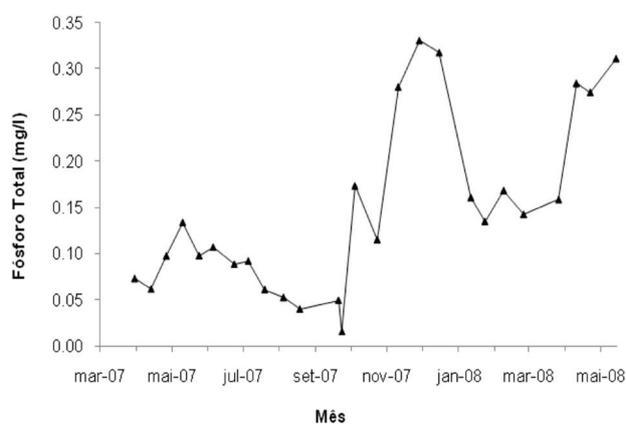


Figura 4. Variação temporal das concentrações de fósforo total (mg/l) no reservatório Cruzeta (março/07 a maio/08).

Figure 4. Temporal variation of total phosphorus concentration (mg/l) in Cruzeta reservoir (march/07 to may/08).

Os sólidos suspensos fixos (SSF) apresentaram padrão de variação semelhante ao padrão dos sólidos suspensos totais (SST), tendo uma variação sazonal relativamente bem definida, com picos em abril/2007 (13,87mg/l – SSF; 17,01mg/l – SST) e abril/2008 (15,40mg/l – SSF; 18,96mg/l – SST) no período chuvoso, e no final do período de estiagem nos meses de dezembro de 2007 (13,80mg/l – SSF; 22,16mg/l – SST) e janeiro de 2008 (15,29mg/l – SSF; 18,63mg/l – SST – Figura 5).

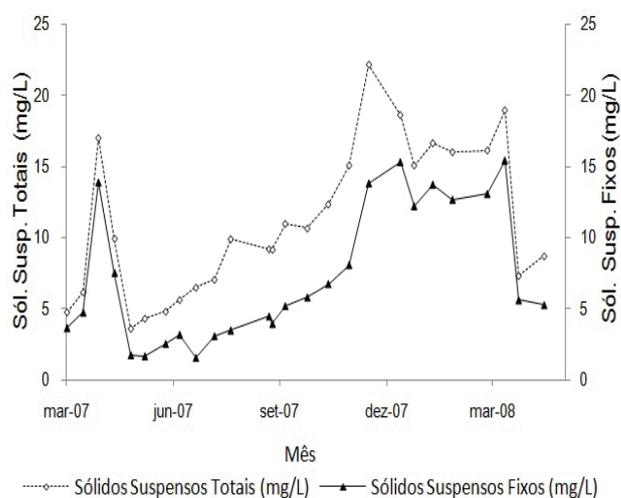


Figura 5. Variação temporal das concentrações de SST e SSF (mg/l) no reservatório Cruzeta (março/07 a maio/08).

Figure 5. Temporal variation of TSS and FSS concentrations (mg/l) in Cruzeta reservoir (march/07 to may/08).

Os sólidos suspensos voláteis (SSV) apresentaram comportamento semelhante ao da biomassa fitoplanctônica (clorofila *a*). Os maiores valores foram observados em novembro (7,00mg/l) e dezembro (8,36mg/l) de 2007, coincidindo também com os picos de clorofila *a* que foram de 41,00 μ g/l e 39,05 μ g/l nos meses de novembro e dezembro de 2007 respectivamente.

Embora não tenha sido identificada variação sazonal bem definida, observou-se que a clorofila *a* apresentou valores crescentes ao longo do período de estiagem, sofrendo uma queda entre os meses de dezembro/2007 e janeiro/2008 de uma concentração de 39,05 μ g/l para 10,14 μ g/l.

As análises de regressão linear demonstraram que os sólidos suspensos fixos (SSF) explicaram 88% da variação dos sólidos suspensos totais (SST) ($r^2=0,88$; $p<0,001$; $n=26$). A transparência da água (Secchi) também esteve negativamente correlacionada com os sólidos suspensos totais ($r^2=0,49$; $p=0,009$; $n=26$) e

fixos ($r^2=0,40$; $p<0,001$; $n=26$), e não apresentou correlação significativa com sólidos voláteis (SSV) e clorofila *a*, indicando que a maior parte da turbidez do reservatório deve-se à fração mineral (turbidez inorgânica).

CARGAS DE FÓSFORO TOTAL E MATERIAL EM SUSPENSÃO

Com base nas concentrações médias de fósforo total e material em suspensão obtidos para os períodos chuvosos de 2007 e 2008 (Tabela 2), foram estimadas

as cargas advindas da bacia hidrográfica e realizado o balanço de massa para o açude Cruzeta, através do qual verificou-se que, no período de janeiro/2007 a maio/2008, o reservatório reteve cerca de 19,87ton de fósforo total (49,6% da carga).

A retenção de sólidos suspensos totais foi de cerca de 9.647,54ton (93,63% da carga) da qual 8.125,15ton representa a fração mineral (sólidos suspensos fixos). As cargas de entrada obtidas para fósforo total e material em suspensão, bem como os coeficientes de exportação e as cargas sobre o reservatório, estão sumarizadas na Tabela 3.

Tabela 2. Concentrações médias de fósforo total (Ptotal) e sólidos em suspensão totais (SST), fixos (SSF) e voláteis (SSV) nos canais afluentes e de fósforo total (Ptotal) na água precipitada sobre o reservatório para o período chuvoso de 2007 e 2008.

Table 2. Average concentrations of total phosphorus (Ptotal) and total (TSS), fixed (FSS) and volatile (VSS) suspended solids in the tributaries and total phosphorus (TP) in the rain over the surface reservoir during the wet season of 2007 and 2008.

FONTE	Período chuvoso 2007 (g/m ³)				Período chuvoso 2008 (g/m ³)			
	PT	SST	SSF	SSV	PT	SST	SSF	SSV
Afluentes	0,28	168,33	143,00	25,33	0,44	92,27	77,52	14,75
Precipitação	0,015				0,030			

Tabela 3. Cargas externas (ton/ano) e coeficientes de retenção (%) do reservatório Cruzeta e coeficientes de exportação (g/m².ano) da bacia de drenagem de fósforo total e sólidos em suspensão totais (SST), fixos (SSF) e voláteis (SSV).

Table 3. Reservoir external loading (ton/year) and retention coefficient (%) and watershed exportation coefficient (g/m².year) of total phosphorus and total (TSS), fixed (FSS) and volatile (VSS) suspended solids.

	P _{total}	SST	SSF	SSV
Taxa transportada (ton/ano)	28,24	6.818,03	5.735,40	1.074,63
% Retenção	49,66	93,63	95,46	83,89
Coefficiente de exportação (L _e) g/m ² .ano	0,029	7,079	5,962	1,117
Carga sobre o reservatório (LB) g/m ² .ano	4,799	1.160,729	977,564	183,165

Observa-se que o coeficiente de exportação de fósforo da bacia foi de aproximadamente 0,03g P_{total}/m².ano, o que resultou em uma carga de fósforo sobre o reservatório de cerca de 4,8g P_{total}/m².ano. O coeficiente de exportação de sólidos suspensos totais da bacia foi cerca de 7,08g SST/m².ano, resultando em uma carga sobre o reservatório de 1.160,73g SST/m².ano.

DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Algumas características dos reservatórios de zonas semi-áridas, como a grande relação AD (área

da bacia drenagem): A_L (área da bacia hidráulica do reservatório), solos rasos e suscetíveis à erosão que são bem lixiviados no período chuvoso, contribuem para o aporte externo de nutrientes nesses ambientes, resultando em altas concentrações de fósforo total como o observado no açude Cruzeta.

Considerando que a maior parte dos sólidos totais em suspensão no reservatório é de origem inorgânica, verifica-se que a elevada turbidez do reservatório sofreu pouca influência dos sólidos voláteis em suspensão e da biomassa algal. O reservatório de Tapacurá no semi-árido de Pernambuco, estudado por

Bouvy *et al.* (2003), também apresentou alta turbidez, com valor médio de transparência próximo de 0,5m. Segundo Thornton & Rast (1993), altas concentrações de material em suspensão são esperadas em reservatório de zonas semi-áridas, devido ao intenso carreamento de sedimentos da bacia de drenagem, o que corrobora com os resultados apresentados pelo coeficiente de exportação de sólidos suspensos totais (7,08g SST/m².ano) onde cerca de 84% é constituída de sólidos suspensos fixos (fração mineral).

No que concerne à quantificação de coeficientes de exportação de fósforo total em bacias hidrográficas, a literatura apresenta diversos trabalhos como os de Kalff (2002), que obteve, para áreas de agricultura em regiões de clima temperado, um coeficiente de exportação de P_{total} igual a 0,018g P_{total} /m².ano; os de Diogo *et al.* (2003) que observaram, para áreas de agricultura, e mais especificamente para áreas agrícolas com culturas permanentes, um coeficiente de exportação de 0,03g P_{total} /m².ano; para áreas agrícolas com culturas anuais, um coeficiente de exportação de 0,1g P_{total} /m².ano; para áreas agrícolas heterogêneas, um coeficiente de exportação de 0,07g P_{total} /m².ano; para pastagens, um coeficiente de exportação de 0,09g P_{total} /m².ano e para florestas temperadas, um coeficiente de exportação de 0,01g P_{total} /m².ano.

Mansor (2005) estudando exportação de nutrientes para a área rural da bacia do rio Jaguari (3.395km²), e Toledo Jr *et al.* (1983) avaliando a exportação de P_{total} na bacia do rio do Peixe – 1.134km² (ambos no Estado de São Paulo), obtiveram coeficientes de 0,04g P_{total} /m².ano e 0,021g P_{total} /m².ano respectivamente. O coeficiente de exportação de P_{total} obtido para a área de drenagem da bacia do açude Cruzeta (0,03g P_{total} /m².ano) aproximou-se dos valores avaliados por esses autores. Entretanto, observa-se que as bacias estudadas por esses autores apresentam intenso uso e ocupação do solo, com agricultura temporária ou perene, extensas áreas de pastagens e campos antrópicos, diferentemente da bacia do açude Cruzeta cujas principais atividades praticadas são a agricultura e pecuária de subsistência.

A carga de P_{total} sobre o açude Cruzeta foi de cerca de 4,8g P_{total} /m².ano, bem acima do valor observado por Toledo Jr *et al.* (1983) para a carga de P_{total} sobre o reservatório de Barra Bonita no Estado de São Paulo (0,399g P_{total} /m².ano). Salienta-se, entretanto, que comparativamente,

a relação entre AD (área da bacia drenagem): A_L (área da bacia hidráulica) dos dois reservatórios também difere bastante. Enquanto o açude Cruzeta possui uma relação AD: A_L de cerca de 163,96, o reservatório de Barra Bonita apresenta relação AD: A_L de aproximadamente 19,27. De fato a alta relação AD: A_L foi descrita por Thornton & Rast (1993) como uma característica distintiva de reservatórios do semi-árido, acentuando ainda mais o impacto dos efeitos da drenagem da bacia nas características limnológicas e no potencial de eutrofização e assoreamento desses ambientes.

As elevadas porcentagens de retenção de fósforo total (50%) e sólidos suspensos totais (93,6%) observadas, corroboram com o fato de que altos valores de tempo de residência da água como os verificados no reservatório, potencializam drasticamente os impactos da bacia sobre o reservatório (Meybeck 2006, Thothong *et al.* 2011).

Por fim, os aspectos discutidos demonstram que reservatórios de zonas semi-áridas como o Cruzeta, são fortemente susceptíveis ao assoreamento e à eutrofização devido as grandes cargas de sedimentos e nutrientes carreados anualmente da bacia para o reservatório. A situação é ainda mais grave pelo fato de que, além de tratar-se de uma área cuja água é instrumento de intensos conflitos de uso, localiza-se em uma das regiões mais afetadas pelo processo de aquecimento global, o que representa um grande desafio à gestão desses recursos hídricos.

AGRADECIMENTOS: Os autores agradecem ao CNPq / CT - HIDRO (Edital 040/2006) pela concessão de bolsa de mestrado do primeiro autor, ao MCT/FINEP / CT - HIDRO (Edital 04/2005) pelo financiamento da pesquisa através do projeto BEER-RN, e ao revisor anônimo, pelas valiosas sugestões para melhoria do manuscrito.

REFERÊNCIAS

- ALVES, F.G. & CAMPOS, R. 2009. Propensão ao assoreamento de reservatórios do semi-árido brasileiro. *In:* X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Fortaleza, CE, Brasil. 1 CD-ROM.
- APHA; AWWA; WEF. 1989. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Seventeenth Edition. APHA, AWWA, WEF, Washington, DC. 1134p.

- APHA; AWWA; WEF. 1998. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Twentieth Edition. APHA, AWWA, WEF, Washington, DC. 937p.
- ARAÚJO, J.C. 2003. Assoreamento em reservatórios do semi-árido: modelagem e validação. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 2: 38-56.
- BARBOSA, C.M. de S.; MOURA, E.M. de; SENA, D.S. de; RIGHETTO, A.M. & MATTOS, A. 2006. Problemática ambiental dos recursos hídricos na região do Seridó do RN. In: VIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Gravatá, PE, Brasil. 1 CD-ROM.
- BOUVY, M.; FALCÃO, D.; MARINHO, M.; PAGANO, M. & MOURA, A. 2000. Occurrence of *Cylindrospermopsis* (Cyanobacteria) in 39 Brazilian tropical reservoirs during the 1998 drought. *Aquatic Microbial Ecology*, 23: 13-27.
- BOUVY, M.; NASCIMENTO, S. M.; MOLICA, R. J. R.; FERREIRA, A.; HUSZAR, V. & AZEVEDO, A. M. F. O. 2003. Limnological features in Tapacurá reservoir (northeast Brazil) during a severe drought. *Hydrobiologia*, 493: 115-130.
- CARVALHO, F.S.; BUARQUE, D.C. & CARVALHO, G.S. 2002. Disponibilidade Hídrica da Bacia Hidrográfica do Rio São Miguel. In: VI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Maceió, AL, Brasil. 1 CD-ROM.
- COOK, P.L.M.; ALDRIDGE, K.T.; LAMONTAGNE, S. & BROOKES, J.D. 2010. Retention of nitrogen, phosphorus and silicon in a large semi-arid riverine lake system. *Biogeochemistry*, 99: 49-63.
- COSTA, I.A.S.; CUNHA, S.R. de S.C.; PANOSSO, R.; ARAÚJO, M.F.F.; MELO, J.L. de S. & ESKINAZI-SANT'ANNA, E.M. 2009. Dinâmica de cianobactérias em reservatórios eutróficos do semi-árido do Rio Grande do Norte. *Oecologia Brasiliensis*, 13: 382-401.
- DIOGO, P.A.; COELHO, P. S.; ALMEIDA, M. C.; MATEUS, N. S. & RODRIGUES, A. C. 2003. Estimativa de cargas difusas com origem agrícola na bacia hidrográfica do rio Degebe. Pp. 135-146. In: 6º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa. Cabo Verde, Portugal, 1 CD-ROM.
- ESKINAZI-SANT'ANNA, E.M.; PANOSSO, R.F.; ATTAYDE, J.L.; COSTA, I.S.; ARAUJO, M.; SANTOS, C.M. & MELO, J.L.S. 2006. Águas Potiguarenses: Oásis Ameaçados. *Ciência Hoje*, 231: 1-5.
- FREITAS, F.R.S. 2008. Eutrofização do reservatório Cruzeta na bacia representativa do rio Seridó – RN. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN, Brasil. 80p.
- GOMES FILHO, M.F.; ARAGÃO, J.O. & SRINIVASAN, V.S. 1999. Relações entre as TSM's globais e os volumes dos principais reservatórios de água da Paraíba. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 3: 74-81.
- GUIMARÃES Jr., J. A.; RIGHETTO, A.M. & GOMES, J.M.B. 2000. Aplicação do modelo MODHISA para geração de vazões médias mensais em rios do semi-árido nordestino. Pp. 530-540. In: V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Natal, RN, Brasil.
- JESPERSEN, A.M. & CHRISTOFFERSEN, K. 1988. Measurements of chlorophyll-a from phytoplankton using ethanol as extraction solvent. *Archiv für Hydrobiologie*, 109: 445-454.
- KALFF, J. 2002. *Limnology: inland water ecosystems*. Prentice-Hall. New Jersey, NJ. 592p.
- MANSOR, M.T.C. 2005. Potencial de poluição de águas superficiais por fontes não pontuais de fósforo na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Pinhal, Limeira-SP. *Tese de Doutorado*. Universidade Estadual de Campinas. São Paulo, SP, Brasil. 189p.
- MELO, J.M.B. 2002. Curvas de garantia para operação de açudes com fins múltiplos. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN, Brasil. 75p.
- MEYBECK, M. 2006. Origin and behaviours of carbon species in world rivers. Pp. 209-238. In: E.J. Roose, R.F. Lal, C. Feller, B. Barthès & B.A. Stewart (eds.). *Soil erosion and carbon dynamics*. CRC Taylor and Francis Group, Boca Raton/London/NY. 352p.
- OYAMA, M.D. & NOBRE, C.A. 2004. Climatic consequences of a large-scale desertification in Northeastern Brazil: a GCM Simulation study. *Journal of Climate*, 50: 1718-1730.
- PANOSSO, R.; COSTA, I.A.S.; SOUZA, N.R. de; ATTAYDE, J.L.; CUNHA, S.R. de S. & GOMES, F.C.F. 2007. Cianobactérias e cianotoxinas em reservatórios do Estado do Rio Grande do Norte e o potencial controle das florações pela Tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*). *Oecologia Brasiliensis*, 11: 433-449.
- REDFIELD, A.C. 1958. The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist*, 46: 205-221.

SCHILLING, P.; POWILLEIT, M.; UHLIG, S. 2006. Chlorophyll-*a* determination: results of an interlaboratory comparison. *Accreditation and Quality Assurance*, 11: 462-469.

STICH, H. B. & BRINKER, A. 2005. Less is better: Uncorrected versus pheopigment-corrected photometric chlorophyll-*a* estimation. *Archiv für Hydrobiologie*, 161: 111-120.

THORNTON, J.A. & RAST, W. 1989. Preliminary observations on nutrient enrichment of semi-arid, manmade lakes in the northern and southern hemispheres. *Lake and Reservoir Management*, 5: 59-66.

THORNTON, J.A. & RAST, W. 1993. A test of hypothesis relating to the comparative limnology and assessment of eutrophication in semi-arid man-made lakes. Pp. 1-24. *In*: M. Straskraba, J.G. Tundisi & A. Duncan (eds.). Comparative reservoir limnology and water quality management. Kluwer Academic Publishers. Vol. 77, Kluwer, Dordrecht. 304p.

THOTHONG, W.; HUON, S.; JANEAU, J.L.; BOONSANER, A.; ROUW, A.; PLANCHON, O.; BARDOUX, G. & PARKPIAN, P. 2011. Impact of land use change and rainfall on sediment and carbon accumulation in a water reservoir of North Thailand. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 140: 521-533.

TOLEDO Jr., A.P.; TALARICO, M.; CHINEZ, S.J. & AGUDO, E.G. 1983. A aplicação de modelos simplificados para a avaliação de processos de eutrofização em lagos e reservatórios tropicais. Pp. 1-34. *In*: XII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Camboriú, SC, Brasil.

TORRES, I.C.; RESCK, R.P. & PINTO-COELHO, R.M. 2007. Mass balance estimation of nitrogen, carbon, phosphorus and total suspended solids in the urban eutrophic, Pampulha reservoir, Brazil. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 19(1): 79-91.

Submetido em 21/03/2011

Aceito em 15/08/2011