

FÓSFORO E GEOQUÍMICA DOS SEDIMENTOS ORGÂNICOS SUPERFICIAIS DE FUNDO NO RESERVATÓRIO DIVISA, RIO GRANDE DO SUL, BRASIL

Melissa Franzen¹
Luiz Fernando Cybis²
Gustavo Henrique Merten²
Marta Maria Menezes Bezerra Duarte³
Enjôlras de Albuquerque Medeiros Lima¹
Helder Lima de Moura³
Danilo Emídio de Souza Cavalcanti³
Valdinete Lins da Silva³

¹ Serviço Geológico do Brasil (CPRM), mfranzen@re.cprm.gov.br.

² Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

³ Departamento de Engenharia Química (DEQ), Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

RESUMO

Os reservatórios do Sistema Salto de Hidrelétricas, Divisa, Blang e Salto, se localizam numa área de nascentes, no município de São Francisco de Paula, região serrana do Rio Grande do Sul, Brasil. Fatores como a baixa densidade demográfica, o solo utilizado com campo, mata nativa e florestamento e o clima subtropical úmido, são fatores que favorecem a qualidade da água desses reservatórios em cascata. O reservatório Divisa é o primeiro da série de reservatórios em cascata do Sistema Salto de Hidrelétricas. Classificado como oligotrófico a mesotrófico, com uma área superficial de 1,7 Km², possui profundidade média de 10 m e máxima de 18 m. O sedimento superficial de fundo é marrom a marrom escuro, com uma elevada relação C/N (> 10). Representado essencialmente por húmus ácido e baixo conteúdo relativo de nitrogênio, este sedimento classificado como *Dy* é característico de lagos pequenos, onde a produtividade do litoral é dominante. Os sedimentos de fundo dos reservatórios foram avaliados como suporte para o fósforo. Os teores de elementos maiores (EM) em termos de óxidos foram obtidos na fração < 63 µm através de Fluorescência de Raios-X. Resultados mostraram que, dentre os EM e a perda ao fogo (PF), o fósforo apresentou maior correlação com a PF, que representa a matéria orgânica volátil. Selecionando os EM de maior interesse e os nutrientes em sedimentos de ambientes lênticos, os resultados indicam que o controle geoquímico do P total pode estar relacionado aos complexos formados entre a MO e o Al, enquanto que o P disponível se mostrou mais correlacionado ao Fe e Mn.

Palavras-chave: Fósforo, sedimento aquático, elementos maiores, controle geoquímico.

ABSTRACT

The reservoirs of the Salto System of hydroelectric plants are located in an area of headwaters at the municipality of Sao Francisco de Paula, on the highlands of Rio Grande do Sul, Brazil. Aspects such as low population density, rural land use, native woods, afforestation, and the humid subtropical climate, contribute to the good water quality in these reservoirs. The Divisa reservoir is the first of the series of cascade reservoirs of the Salto System. Classified as oligotrophic to mesotrophic, it has an average depth of 10 m, with a maximum depth of 18 m and surface area of 1.7 km². The sediment surface is deep brown to dark brown, with a C/N > 10, represented mainly by acid humus and it has low relative content of nitrogen. This sediment is classified as *Dy* and is characteristic of small lakes, where coast productivity is dominant and there is significant input of allochthonous material. The bottom sediment of reservoirs has been assessed as support for phosphorus. The contents of major elements (ME) in terms of oxides were obtained in the < 63 µm fraction by X-ray Fluorescence. Results show that, among all MS and PF, phosphorus showed a higher correlation with the PF, which represents the volatile organic matter. Selecting the main EM and the nutrients in sediments from lentic environments, the results indicate that the geochemical control of total P could be related to the compounds formed by organic matter and Al, whilst available P has shown greater correlation with Fe and Mn.

Keywords: Phosphorus, aquatic sediment, major elements, geochemical control.

INTRODUÇÃO

A disponibilidade de fosfato varia consideravelmente entre os ecossistemas aquáticos lênticos e nos sedimentos de fundo desses ambientes. A concentração na forma solúvel e imediatamente disponível para os produtores primários normalmente é baixa em águas naturais devido ao rápido consumo (Wetzel, 1993) e a sua elevada afinidade com a fase sólida (Spósito, 2008).

A associação do fósforo (P) com os sedimentos aquáticos é influenciada por mudanças nas características físicas e químicas do meio, que possibilitam sua mobilização e retorno para a coluna de água. Estudos mostram que o fosfato (PO_4) tem sua dinâmica altamente relacionada ao pH e ao potencial redox (Eh) na interface água-sedimento (Olila & Reddy, 1995; 1997), com a temperatura e a atividade microbiana, com os níveis de fósforo solúvel na água intersticial, com a presença de cátions maiores (Ca, Fe, Al) e de outros aceptores alternativos de elétrons (Moore *et al.*, 1991; Clavero *et al.*, 1997; Moore, 1998).

A presença de carbono orgânico estimula a mineralização, diminuindo o Eh do meio. Com a aceleração da produtividade primária, aumenta a espessura da camada inferior anaeróbica e, com isso, predominam os compostos e elementos no estado reduzido. Como as formas reduzidas das fases minerais de Fe e Mn são mais solúveis que as suas contrapartidas oxidadas, a liberação de PO_4 é normalmente maior em condições anaeróbicas, mesmo em sedimentos ricos em Fe, devido à redução bacteriana que reduz a precipitação de fosfatos férricos. Sob condições oxidadas, por outro lado, o PO_4 pode ser sorvido à superfície de óxidos e hidróxidos de Fe (Moore & Reddy, 1994).

Em condições ambientais normais, a carga elétrica superficial da matéria or-

gânica (MO) é negativa, com efeitos que vão desde a competição com o PO_4 pelos sítios disponíveis, até o favorecimento à sorção. O fósforo orgânico pode estar associado aos ácidos fúlvicos (Gilbin *et al.*, 2000) ou aos ácidos húmicos (Golterman *et al.*, 1998).

Na maioria dos ecossistemas aquáticos lênticos, o sedimento de fundo é orgânico e, em função da origem dessa porção orgânica, se autóctone ou alóctone, os sedimentos podem ser classificados como *Gyttja* ou *Dy*, respectivamente (Wetzel, 1993). Essa classificação é utilizada para representar a origem da matéria orgânica nos ambientes aquáticos. O termo *Gyttja* designa o material orgânico autóctone (Hansen, 1959), enquanto que no tipo *Dy* é importante a contribuição alóctone (Wetzel, *op cit.*).

O objetivo deste estudo foi identificar, entre os elementos maiores, o controle geoquímico do fósforo em sedimentos orgânicos tipo *Dy*.

Área de estudo

O reservatório Divisa é o primeiro da série de reservatórios em cascata do Sistema Salto de Hidrelétricas, localizado nas cabeceiras da bacia hidrográfica do Rio Caí, região NE do Rio Grande do Sul, Brasil. Classificado como oligotrófico a mesotrófico (Carvalho *et al.*, 2003), tem uma profundidade média de 10 m, com máxima de 18 m e área superficial de 1,7 km². O sedimento superficial de fundo é marrom a marrom escuro, com baixo conteúdo relativo de nitrogênio ($\text{C/N} > 10$), que o classifica como tipo *Dy*, que é característico de lagos pequenos, onde a produtividade do litoral é dominante (Wetzel, 1993).

A figura 1 apresenta a localização dos reservatórios e as Tabelas 1 e 2 apresentam as características físicas e de ocupação do solo.

Tabela 1 – Localização e características físicas da bacia hidrográfica do Sistema Salto.

CARACTERÍSTICA	DIVISA
Localização	50°33'33,725" W e 29°17'35,452" S
Área bacia (km ²)	52,5
Área do reservatório (km ²)	1,7
Volume reservatório (milhões m ³)	30,5

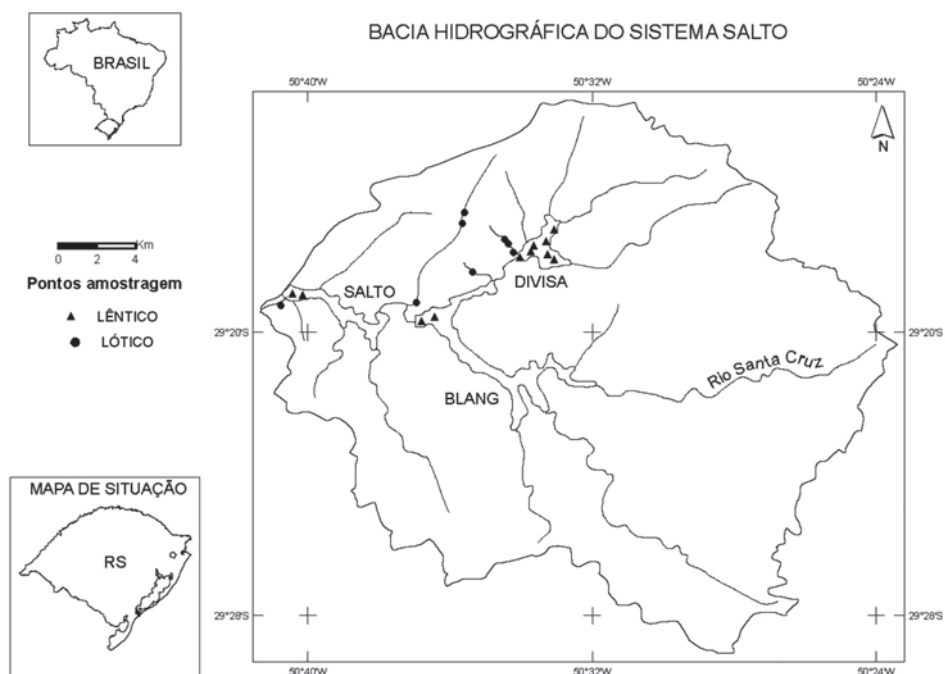


Figura 1 - Localização dos pontos de amostragem nos reservatórios Divisa, Blang e Salto (lêntico) e tributários (lótico) do Sistema Salto (RS).

O Sistema Salto se localiza próximo ao trópico de Capricórnio, em torno dos 800 m de altitude, região em que o clima é subtropical úmido. A geologia é composta essencialmente de rochas vul-

cânicas, de composição ácida à intermediária, pertencentes às camadas de topo do vulcanismo Serra Geral, na Bacia do Paraná, de idade Juro-Cretácea (Mesozóico) (Wildner *et al.*, 2004).

Tabela 2 - Ocupação da bacia do Sistema Salto.

CARACTERÍSTICA	DIVISA
Campo	74,5 % savana, pecuária extensiva
Mata Nativa	12,9 % mata de araucária
Florestamento	8,9 % pinus e eucalipto
Agricultura	1,3 % subsistência
Urbano	0,5 % esparsa
Água e estradas	1,9 % água

(Fonte: Franzen *et al.*, 2004).

Os usos do solo na bacia hidrográfica são representados por campo (74,5 %), onde se desenvolve a pecuária extensiva; mata nativa (12,9 %), representada por fragmentos da Mata de Araucária; florestamento (8,9 %), restrito a Pinus e Eucalipto; áreas agrícolas (1,3 %), urbana (0,5 %) e água (1,9 %) (Franzen *et al.*, 2004). A distribuição dos usos de solo favorece a qualidade da água do sistema, uma vez que, os usos de maior potencial gerador de P, urbano e agricultura, são pouco representativos em termos de área drenada.

Coleta e Preservação

As amostras de sedimentos de fundo foram coletadas no eixo central dos tributários (n=8) e reservatórios (n=11), com draga tipo *Ekman*, condicionadas em sacos plásticos e mantidas em isopor com gelo até a chegada ao laboratório. Todas as amostras foram mantidas refrigeradas até o início da preparação para a análise química.

A preparação das amostras de sedimento foi realizada no Laboratório de Sedimentologia do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), seguindo recomendações propostas em Mudrock & Azcue (1995). A separação da fração < 63 mm foi realizada por peneiramento a úmido, em peneira inerte de PVC com malha de nylon, com secagem em estufa em temperatura inferior a 40° C.

Análise Química

As análises de fósforo total (PT), nitrogênio total (NT), carbono orgânico total (CT) e fósforo disponível (PD) foram realizadas no Laboratório de Saneamento do IPH / UFRGS, segundo metodologias descritas em Tedesco *et al.* (1995).

Fósforo Total

Digestão com H₂SO₄, mistura de digestão (Cu e Se) e adição de H₂O₂. A meto-

dologia possibilita extrair PT e NT em uma única digestão. A determinação de PT foi realizada pelo método vanadomolibdofosfórico, onde a cor desenvolvida é medida em espectrofotômetro a 400 nm. A técnica detalhada em Malavolta *et al.* (1997) atende um amplo espectro de concentrações, sendo também empregada para análise de plantas e resíduos orgânicos.

Nitrogênio Total

A determinação do conteúdo de nitrogênio total (NT) foi feita no mesmo extrato de digestão, baseado no método recomendado por Bremner (1965) *apud* Tedesco *et al.* (1995). Para tal, retira-se uma alíquota para destilação em aparelho de arraste de vapor (Micro-Kjeldahl), após adição de NaOH 10 M, coletando o destilado em indicador de ácido bórico e titulando com H₂SO₄ diluído.

Fósforo Disponível

O fósforo disponível (PD) foi determinado pelo método Melich I, ou extrator duplo ácido (HCl 0,05M e H₂SO₄ 0,0125M), que solubiliza parte do fósforo adsorvido, ou quantidades consideradas disponíveis pelos estudos de correlação (Tedesco *et al.*, 1995). A determinação foi feita com adição dos reagentes P-B (molibdato de amônio) e P-C (ácido 1-amino-2-naftol-4-sulfônico, sulfito de sódio e metabissulfito de sódio), sendo a leitura realizada em espectrofotômetro a 660 nm.

Carbono Orgânico Total

O carbono orgânico total (CT) foi determinado pelo método de Walkley-Black, que se baseia na oxidação com dicromato de

potássio em meio ácido, com aquecimento externo até 150°C (Tedesco *et al.*, 1995).

Elementos Maiores

Os teores de elementos maiores (EM) (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, TiO₂ e P₂O₅) e a Perda ao Fogo (PF) foram obtidos através de Fluorescência de Raios-X em aparelho Rigaku (Modelo RIX 2000), no Laboratório de Geoquímica do Instituto de Geociências da UFRGS.

Análise Estatística

A Análise de Componentes Principais (ACP) foi realizada através do software Minitab 15, a partir de matrizes com dados de EM e PF, em sedimentos dos ambientes lótico e lêntico; e de EM selecionados, PF, PT, NT, CT e PD em sedimentos dos ambientes lênticos. Aos dados originais, foram aplicadas correções como normalização e centralização vetorial.

Resultados

A composição química em termos de EM e PF em sedimentos de ambientes lóticos e lênticos (Tabela 3), demonstram que esses sedimentos superficiais de fundo são silicosos ($\geq 50\%$) e possuem elevados teores de Al ($\geq 16\%$) e Fe ($\approx 10\%$). A presença de Ti em teores acima de 1% sugere que este pode estar presente em alguma fase mineral importante ou mais de uma. Os teores de CaO e MgO inferiores a 1%, em ambos os ambientes, descartam a origem carbonática. Os teores médios de P₂O₅ foram 50% superiores nos reservatórios, onde também se observa maior importância da perda ao fogo (PF), que reflete o material orgânico volátil.

Tabela 3: Teores médios e desvio padrão (DP) de elementos maiores e perda ao fogo (PF) em sedimentos de ambientes lóticos (n=8) e lênticos (n=6), em %.

		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF
Lótico	Média	50,86	18,05	11,05	0,18	0,45	0,36	0,22	0,34	1,92	0,18	16,40
	DP	4,67	3,77	3,13	0,16	0,21	0,12	0,03	0,06	0,34	0,04	2,83
Lêntico	Média	53,46	16,87	8,03	0,11	0,34	0,22	0,22	0,37	1,41	0,27	18,72
	DP	4,99	2,17	1,73	0,03	0,04	0,09	0,05	0,14	0,18	0,03	2,03

A figura 2 apresenta o resultado da Análise de Componentes Principais (ACP) entre EM e PF nos ambientes lótico e lêntico.

onde se observa que as duas primeiras componentes principais explicam 59,5% da variância obtida.

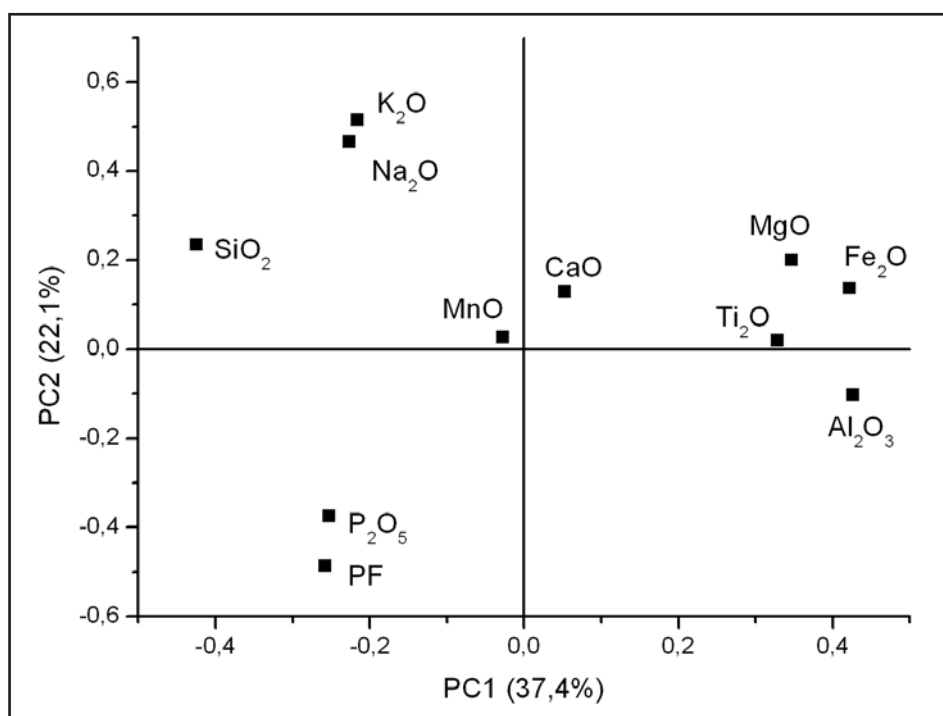


Figura 2 - Análise de componentes principais entre 11 variáveis em sedimentos de ambientes lótico e lêntico.

A primeira componente principal (PC1) representa 37,4% da variabilidade total e separa: 1) Si, Na e K; 2) Fe, Al, Mg e Ti; e 3) P e PF. A segunda componente (PC2) representa 22,1% e separa

o grupo formado por P e PF das demais variáveis e, desta forma, os ambientes lótico e lêntico, conforme demonstrado na Figura 3, que demonstra a ACP entre unidades amostrais.

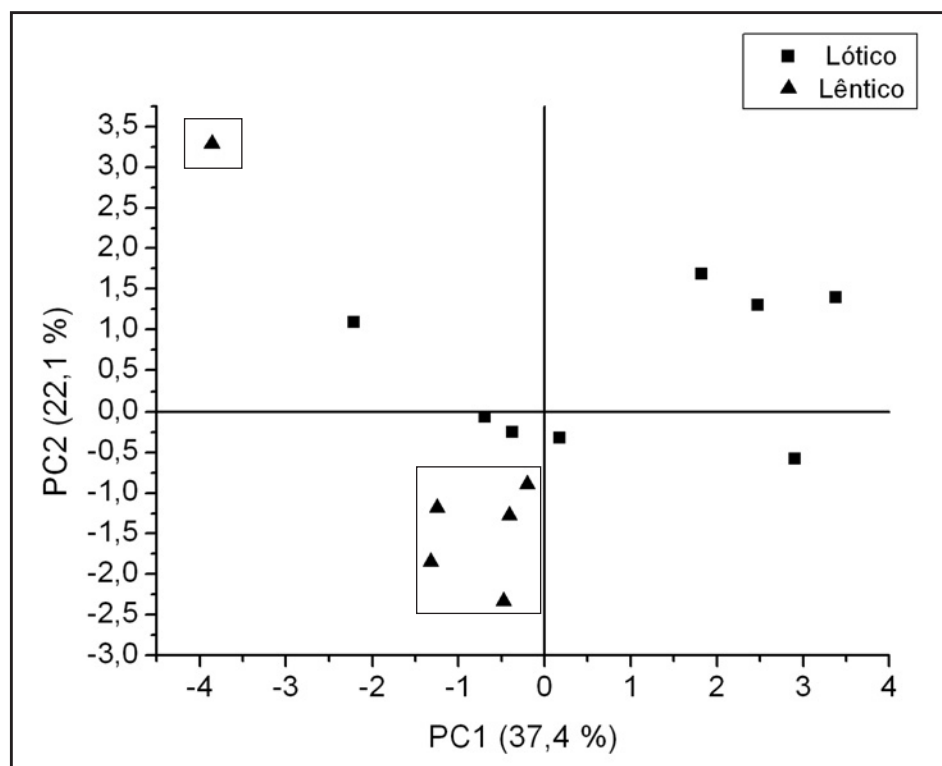


Figura 3 - Análise de componentes principais entre 14 unidades amostrais de sedimentos dos ambientes lótico e lêntico.

Os resultados indicam que: i) dentre todos os parâmetros considerados na análise, P apresenta maior correlação com a PF; ii) o grupo formado por P e PF se apresenta mais concentrado no ambiente lêntico; e iii) amostras do ambiente lótico se encontram mais correlacionadas com os grupos 1 (Si, Na e K) e 2 (Fe, Al, Mg e Ti), conforme sua distribuição granulométrica seja mais siltosa ou argilosa, respectivamente. O Ti_2O , por ser um elemento litófilo, possui afinidade

com a SiO_2 , porém se encontra associado com o Fe.

Ambiente lêntico

Os teores médios de PT, PD, NT e CT em sedimentos dos ambientes lênticos são apresentados na Tabela 4, que demonstra elevado conteúdo médio de PT ($1033,2 \text{ mg.kg}^{-1}$), dos quais apenas 2,0 % são de PD, e uma elevada razão C/N (13,3) que o classifica como tipo Dy.

Tabela 4 - Teores médios e desvio padrão (DP) de fósforo total e disponível (PT, PD), nitrogênio total Kjeldahl (NT) (mg.kg^{-1}) e carbono orgânico total (CT) (%) em sedimentos de ambientes lânticos ($n=11$).

		PT	NT	CT	PD
Lântico	Média	1033,2	2895,2	3,9	21,9
	DP	243,1	1186,9	1,0	9,7

Nos ambientes lânticos, os principais parâmetros geoquímicos envolvidos na dinâmica do P na interface água-sedimento são: Fe, Mn, Al, Ca e CT (Boström *et al.*, 1988; Golterman, 1998; Chistophoridis & Fytianos, 2006). Por este motivo, foram selecionados para análise através de ACP alguns elementos

maiores (Fe_2O_3 , Al_2O_3 , MnO, CaO, P_2O_5) em função de sua reconhecida influência sobre a dinâmica do P, cujos teores médios acrescidos da SiO_2 e da PF correspondem a 97,7%. A Figura 4 apresenta a ACP com 8 variáveis (SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , MnO, CaO, P_2O_5 , PF e PD) para o ambiente lântico ($n=6$).

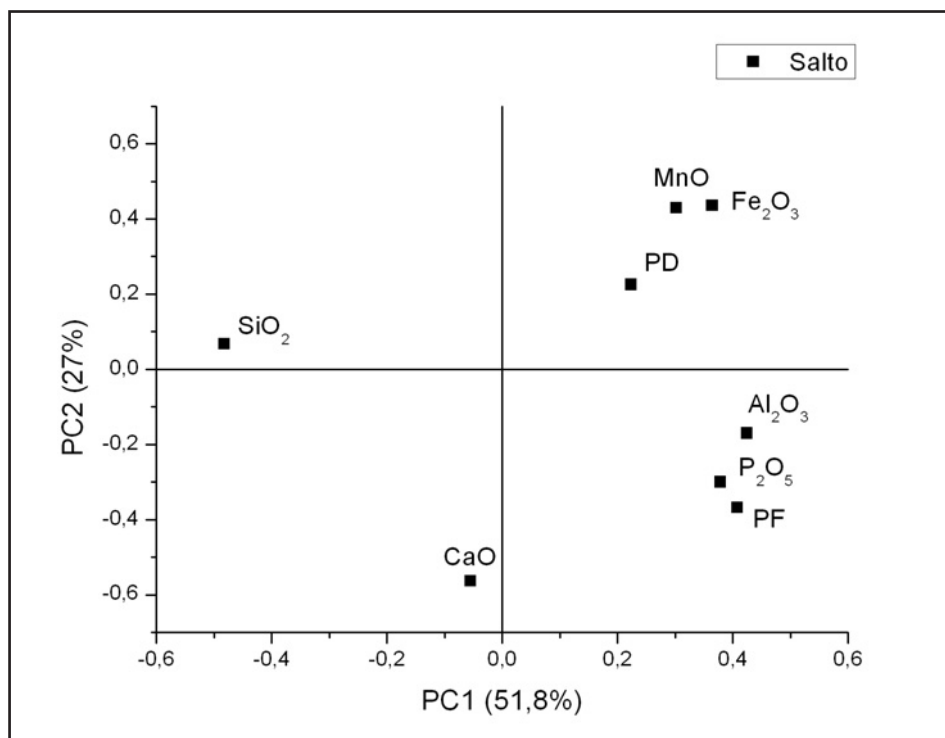


Figura 4 - Análise de componentes principais entre 8 variáveis em sedimentos de ambiente lântico.

Observa-se que as duas primeiras componentes principais explicam 78,8% da variância obtida. A primeira componente (PC1) representa 51,8% da variabilidade total e separa os elementos que se encontram correlacionados ao P daqueles que não estão relacionados (SiO_2 e CaO).

A segunda componente (PC2) representa 22,1% e separa: 1) Fe_2O_3 , MnO e PD; de 2) Al_2O_3 , P_2O_5 e PF.

A Figura 5 apresenta os resultados da ACP entre 11 variáveis (incluindo os EM, PF e PD anteriormente selecionados e os nutrientes PT, NT, CT).

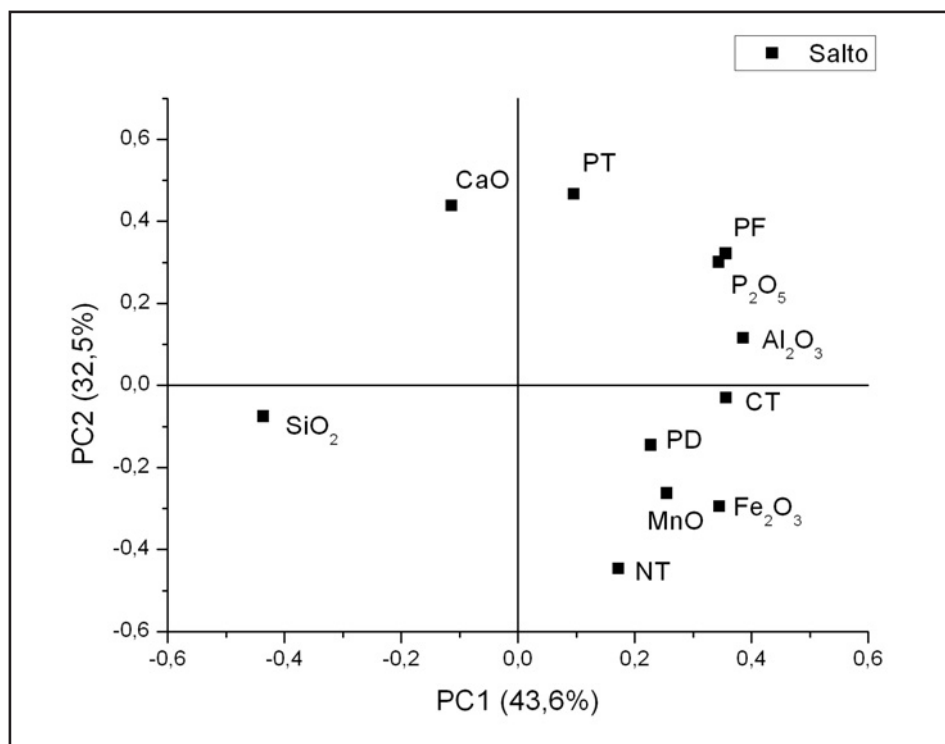


Figura 5 - Análise de componentes principais entre 11 variáveis em sedimentos de ambiente lântico.

As duas primeiras componentes principais explicam 76,1% da variância obtida. A primeira componente (PC1) representa 43,6% da variabilidade total e separa os elementos que se encontram relacionados ao P daqueles que não estão relacionados (SiO_2 e CaO). A segunda componente (PC2) representa 32,5% e separa: 1) PT, PF, P_2O_5 e Al_2O_3 ; de 2) CT, PD, Fe_2O_3 , MnO e NT.

Estes resultados indicam que: i) P se encontra correlacionado ao Fe, Mn, Al e a MO; ii) P_2O_5 (que inclui P orgânico e representa P total) se apresenta mais correlacionado à MO e ao Al, provavelmente associado ao P-orgânico e à formação de complexos resistentes entre Al e MO (quelatos); enquanto que iii) PD (solúvel em ácido diluído) se encontra mais relacionado ao CT, Fe, Mn e NT.

Nas condições ambientais reduzidas dos hipolímnios anaeróbios, acredita-se que o PO_4 que não está presente na constituição dos organismos vivos, pode ter a MO como principal sorvente (Franzen *et al.*, a ser publicado), por meio de pontes de cátions (principalmente Al^{3+} , Fe^{3+} e Ca^{2+}) e com a participação de carboxilas desprotonadas (Dick, *et al.*, 2009). Nestas condições, as superfícies dos óxidos também apresentam carga predominante negativa, em função da proximidade entre o pH do meio (em torno da neutralidade) e o PCZ da maioria dos óxidos de Fe e Al (Sparks, 1995), e do grupo FeOH não realizar interações via ponte de cátions na mesma intensidade que as carboxilas (Sposito, 2008).

CONCLUSÕES

Considerando somente os EM e a PF, em amostras de ambientes lótico e lântico, a ACP demonstrou maior correlação de P_2O_5 com a PF, que representa a MO volátil. Entre os sedimentos estudados, o ambiente lântico demonstrou conteúdo 50% maior de P_2O_5 do que o ambiente lótico.

Quando considerados os EM selecionados (SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , MnO , CaO , P_2O_5) e os nutrientes (PT, PD, NT e CT) no ambiente lântico, a ACP discriminou dois grupos de variáveis relacionadas com o P: 1) PT, PF, P_2O_5 e Al_2O_3 ; e 2) CT, PD, Fe_2O_3 , MnO e NT. Os resultados indicam que o controle geoquímico do P total (PT, P_2O_5) pode estar sendo realizado pelos complexos formados entre a MO e o Al, na forma de quelatos, enquanto que o PD se mostrou mais correlacionado aos complexos formados entre a MO (CT, NT) e Fe ou Mn.

O fato de PD estar mais correlacionado ao Fe do que ao Al, provavelmente, ocorre devido influência do potencial redox sobre o Fe e à transitoriedade das con-

dições redox, ao passo que o Al está condicionado ao pH, que é mantido em torno da neutralidade nos hipolímnios anaeróbios em função do tamponamento exercido pela MO.

Os resultados mostraram que a interpretação de análises químicas através da ACP pode simplificar a interpretação dos resultados, desde que sejam bem compreendidos os significados dos parâmetros utilizados na análise.

REFERÊNCIAS

- Boström, B.; Andersen, J.M.; Fleischer, S.; Jansson, M. 1988. Exchange of phosphorus across the sediment-water interface. *Hydrobiologia*, Dordrecht, v. 170, p. 229-244.
- Carvalho, E.; Cybis, L.F.; Yunes, J.S.; Merten, G.H.; Franzen, M. 2003. O fósforo como um elemento limitante do crescimento fitoplancônico nos reservatórios do Sistema Salto de Hidrelétricas (RS). IX Congresso Brasileiro de Limnologia, Juiz de Fora, 2003.
- Chistophoridis, C. & Fytianos, K. 2006. Conditions affecting the release of phosphorus from surface lake sediments. *J. Environ. Qual.* 35: 1181-1192.
- Clavero, V.; García-Sánchez, M.J.; Niell, F.X.; Fernández, J.A. 1997. Influence of sulfate enrichment on the carbon dioxide and phosphate fluxes across the sediment-water interface, *Hydrobiologia*, Dordrecht, v. 345, p. 59-65.
- Dick, D.P.; Novotny, E.H.; Dieckow, J.; Bayer, C. 2009. Química da matéria orgânica do solo. Capítulo XI, páginas 1 a 72. In: Melo, V.F. & Alleoni, L.R. (Ed.) Química e mineralogia do

- solo. Parte II: aplicações. SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, Viçosa.
- Ferreira, A. 2002. Dinâmica do fitoplâncton de um reservatório hipereutrófico (Tapacurá, Recife, PE), com ênfase em *Cylindrospermopsis raciborskii* e seus morfótipos. Tesis da Universidade do Rio de Janeiro.
- Ferreira, A.; Huszar, V.; Nascimento, S.; Molica, R.; Bouvy, M. 2001. Associações fitoplanctônicas em um reservatório eutrófico do semi-árido de Pernambuco (Tapacurá, PE) dominado por *Cylindrospermopsis raciborskii* e cianofíceas coloniais. Anais do VIII Congresso Brasileiro Limnologia, João Pessoa, Brasil.
- Franzen, M.; Cybis, L.A.; Merten, G.H.; Carvalho, E.N. 2004. Possíveis causas de disponibilização de fósforo nos reservatórios do Sistema Salto (RS). Anais... I Simpósio Ecologia de Reservatórios, Avaré, São Paulo, Brasil.
- Franzen, M.; Cybis, L.F.; Merten, G.H.; Silva, V.L.; Duarte, M.M.M.B.; Dick, D.P. Cinética e sorção de fosfato em sedimentos aquáticos tipo *Dy* e *Sapropel* com ênfase nos efeitos do potencial redox. [A ser publicado].
- Gilbin, R.; Gomez, E.; Picot, B. 2000. Phosphorus and organic matter in wetland sediments: analysis through gel permeation chromatography. Agronomie, Paris, v. 20, p. 567-576.
- Golterman, H.; Paing, J.; Serran, L.; Gomez, E. 1998. Presence of and phosphate release from polyphosphates or phytate phosphate in lake sediments. Hydrobiologia, Dordrecht, v. 364, p. 99-104.
- Golterman, H.L. 1998. The distribution of phosphate over iron-bound and calcium-bound phosphate in stratified sediments. Hydrobiologia, Dordrecht, v. 364, p. 75-81.
- Hansen, K. 1959. The terms *Gyttja* and *Dy*. Hydrobiologia, v.13, n.4: 309-315.
- Moore, P.A.; Reddy, K.R.; Graetz, D.A. 1991. Phosphorus geochemistry in the sediment-water column of a hypereutrophic lake. Journal of Environmental Quality, Madison, v. 20, p. 869-875.
- Moore, P.A.; Reddy, K.R. 1994. Role of Eh and pH on phosphorus geochemistry in sediments of Lake Okeechobee, Florida. Journal of Environmental Quality, Madison, v. 23, p. 955-964.
- Olila, O.G.; Reddy, K.R. 1997. Influence of redox potential on phosphate uptake by sediments in two sub-tropical eutrophic lakes. Hydrobiologia, Dordrecht, v. 345, p. 45-57.
- Olila, O.G.; Reddy, K.R.; Harris, W.G. 1995. Forms and distribution of inorganic phosphorus in sediments of two shallow eutrophic lakes in Florida. Hydrobiologia, Dordrecht, v. 302, p. 147-161.
- Sparks, D.L. 1995. Environmental soil chemistry. San Diego: Academic Press. 267 p.
- Sposito, G. 2008. The chemistry of soils. 2nd ed. Oxford University. 329 p.
- Tedesco, M. J. et al. 1995. Análises de solo, planta e outros materiais. 2. ed. rev e ampl. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS. 174 p. (Boletim Técnico [de Solos]/UFRGS. Departamento de Solos, n. 5).
- Wetzel, R.G. 1993. Limnologia. Trad. Boavid, M.J. Ed. Fundação Calouste Gulbenkian. Limnology. 2nd ed. 1983. Philadelphia: Saunders College. 760 p.
- Wildner, W; Orlandi Fº, V.; Giffoni, L.E. Excursão virtual aos Aparados da Serra – RS/SC: Aspectos geológicos e turísticos dos cânions Itaimbezinho e Fortaleza. CPRM, 2004. In: <http://www.cprm.gov.br/Aparados/index.htm>.