

Qualidade da água em região alterada pela mineração de carvão na microbacia do rio Fiorita (Siderópolis, Estado de Santa Catarina, Brasil)

Marcelo Luiz Martins Pompêo¹, Viviane Moschini-Carlos^{*1}, Nadja Zin Alexandre² e Eder Santo²

¹Universidade de São Paulo, Instituto de Biociências, Departamento de Ecologia, Rua do Matão, Travessa 14, n. 321, Butantã, 05508-900, São Paulo, São Paulo, Brasil. ²Universidade do Extremo Sul Catarinense, Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas, Rodovia Jorge Lacerda, km 4,5, Sangão, 88805-350, Criciúma, Santa Catarina, Brasil. *Autor para correspondência. e-mail: vivimarc@uol.com.br

RESUMO. A mineração de carvão constitui importante atividade econômica na região sul catarinense. A área da bacia hidrográfica do rio Fiorita (Município de Siderópolis, SC) foi intensamente minerada e atualmente apresenta inúmeros locais com rejeitos, estéreis de mineração e lagos ácidos. Este trabalho teve como principal objetivo verificar os efeitos da mineração de carvão na qualidade da água dos corpos de água na microbacia do rio Fiorita. As análises gráficas e multivariada ("cluster") sugerem que a microbacia apresenta um gradiente horizontal, com redução da qualidade da água em direção à parte baixa da bacia, com diminuição do pH e elevação nos valores de acidez total, condutividade elétrica, Eh e nos teores de sólidos totais, sulfato, alumínio, cálcio, ferro II e total, magnésio e manganês. Esses dados sugerem o efeito da concentração de metais. Como primeira aproximação, de acordo com a Resolução Conama 20 de 1986, as águas da microbacia do rio Fiorita apresentam-se com elevado grau de comprometimento de sua qualidade e de uso restrito. Também são apresentadas considerações visando contribuir com subsídios à recuperação ambiental da área em questão.

Palavras-chave: mineração, lago de mina, recuperação, drenagem ácida, qualidade da água.

ABSTRACT. *Water quality in disturbed area by coal mining, Fiorita River basin (Siderópolis, State of Santa Catarina, southern Brazil).* Coal mining is an important economical activity in the south of Santa Catarina, Brazil. The Fiorita River basin (municipality of Siderópolis) was heavily mined out and nowadays several places with mining spoils and sterile soil, as well as acid lakes, can be found in its area. This study aimed to carry out an environmental diagnosis on the water bodies quality in that region. Graphic and cluster analysis suggested that the Fiorita River basin was compartmented. It seemed that there was a deterioration gradient in water quality toward the lower portion of the basin, with pH decrease and a rise in values of total acidity, electric conductivity, Eh, total solids contents, sulphate, aluminium, calcium, iron II and totals, manganese and magnesium. Data suggested concentration effect, mainly of metals. As a first approach, according to Conama 20 (1986), water quality of Fiorita River basin is low and restricted to use. Subsidies to environmental recuperation of the area are also contemplated.

Key words: mining, mine lake, recovering, acid mine drainage, water quality.

Introdução

É inegável que, no mundo moderno, a mineração assume contornos de importância decisiva para o desenvolvimento, pois se observa que os elementos extraídos da natureza estão direta ou indiretamente presentes em todos os produtos utilizados pelo homem (Kopeziński, 2000).

A atividade mineral requer, para seu êxito, cuidadoso planejamento a partir do conhecimento efetivo da situação, a adoção de novas tecnologias e

aplicável ao caso específico por equipe qualificada e o reestabelecimento das condições anteriormente encontradas ou recomendadas (Kopeziński, 2000). No entanto, desde o início de sua colonização até os dias de hoje, o Brasil sofre o reflexo de uma atividade extrativa desordenada.

Os seis principais estágios da atividade de mineração (exploração, desenvolvimento, extração, concentração do minério, processamento e refinamento e desativação após o fechamento da

mina) têm diversos impactos ambientais, desde distúrbios no solo, poluição do ar e até a contaminação da água (McAllister e Milioli, 2000). Podem ser associadas a essas atividades as seguintes alterações: desmatamento; alteração da superfície topográfica e da paisagem; perda ou destruição de solos superficiais férteis; instabilização de encostas e terrenos em geral; alteração de corpos de água e de níveis freáticos e exposição de áreas aos fenômenos de dinâmica superficial, como erosão e assoreamento (Kopeziński, 2000). Este autor salienta que nas etapas subseqüentes verificam-se problemas relacionados ao transporte dos materiais extraídos, à etapa de beneficiamento, quando são empregados inúmeros métodos e técnicas associadas ao tipo de minério, com a utilização de aditivos químicos, tratamento mecânico ou queima de combustível e, por fim, à estocagem do minério de baixo teor, dos estéreis e rejeitos em geral.

Em relação ao carvão, os seguintes processos atuantes no meio físico, particularmente durante as etapas de exploração, podem ser discriminados (Ibram, 1992 *apud* Kopeziński, 2000): o tipo de extração é por desmonte mecânico, sendo o beneficiamento efetuado por lavagem e concentração gravimétrica, os rejeitos são originados pelo decapeamento e a disposição em bacias de decantação (na região sul catarinense é comum a disposição final dos rejeitos em pilhas), e o impacto negativo é a devastação total, com abatiamento de superfície, drenagem ácida, problemas de combustão espontânea das pilhas de rejeitos. A magnitude e as conseqüências da alteração ambiental causada pela atividade extrativa dependerá exclusivamente da ação antrópica (Kopeziński, 2000).

Pode-se, a grosso modo, dividir o processo de extração de carvão em duas etapas. A primeira etapa compreende desde estudos iniciais até a extração do minério propriamente dito. A segunda etapa deve considerar a reabilitação (ABNT, 1999) da área minerada ao uso futuro. No Brasil, o processo de mineração de carvão incorpora unicamente a primeira etapa. A implementação de medidas mitigadoras é fundamental para a redução dos riscos à saúde humana e ambiental. Como exemplo, na atualidade, principalmente fruto da inexistência de legislação específica e pela falta de cumprimento da exígua legislação em vigor no período de exploração ativa, muitas áreas de mineração de carvão na região do município de Siderópolis (Sul do Estado de Santa Catarina, Brasil) estão abandonadas há cerca de 30 anos, representando um substancial passivo ambiental. Assim, não apenas o momento da extração de carvão deve incorporar o componente

ambiental, mas também a etapa posterior, quando do término da exploração em determinada área e o fechamento da mina.

A forma de qualificar e quantificar a degradação em áreas resultantes da mineração dependerá exclusivamente dos atributos do meio físico a serem avaliados. Independente da forma de avaliar, importante é o modo pelo qual se poderá reestabelecer alguma condição de usufruto nas áreas mineradas. Aspecto fundamental no estudo de áreas alteradas pela mineração, particularmente de carvão, é o entendimento do papel do Homem como agente transformador. O Homem tem uma dupla responsabilidade como agente, a de promover todas as alterações causadas ao meio pela exploração do carvão, e a de proporcionar os meios técnicos, financeiros e políticos visando à restauração da área alterada para usos múltiplos futuro (Kopeziński, 2000).

Desta forma, o estudo de regiões mineiras tem que levar em consideração não apenas a área alterada pela mineração de carvão propriamente dita e seu entorno, mas também englobar componentes sociopolítico como forma de melhor entender a realidade local, visando propor mecanismos de restauração.

Principalmente devido à drenagem ácida e à água de lixiviação, com grandes quantidades de metais pesados e sólidos em suspensão (Jemai, 1998; Verb e Vis, 2001), os corpos de água da região de mineração apresentam substancial comprometimento na sua qualidade. Cabe lembrar que a água doce, como fonte primária de recurso para a sociedade moderna, a produção de alimento e as atividades industriais, tem sido primordial para o Homem e o estabelecimento das civilizações através dos tempos tem ocorrido principalmente baseado na sua proximidade com os corpos de água (Committee On Inland Aquatic Ecosystem, 1996; Tundisi, 1999). Tanto a quantidade como a qualidade da água, igualmente importantes, estão sendo modificadas ao longo do desenvolvimento humano (Wetzel, 2000). Segundo Wetzel (2000), o metabolismo de lagos e rios é dependente, e, em grande parte, regulado por sua área de drenagem, em especial pela interface biogeoquímica terra-água (Wall *et al.*, 2001). Dessa forma, os usos e ocupações da área de drenagem da bacia hidrográfica refletem diretamente no corpo d'água, com a potencialidade de causar grandes alterações, como a eutrofização (Smith *et al.*, 1999; Thomaz e Bini, 1999; Tundisi, 1999; Howard e McGregor, 2000), e um expressivo impacto devido à atividade de mineração, como verificado na região mineira no Estado de Bihar, Índia (Singh e

Chowdhury, 1999) e em rios bolivianos (Bervoets *et al.*, 1998). Assim, o controle no uso e o monitoramento da quantidade, qualidade da água e dos usos e ocupações da área adjacente ao corpo d'água, particularmente em áreas de mineração, são fundamentais para a restauração e manutenção da qualidade ambiental.

Este trabalho visa apresentar um diagnóstico ambiental para a região da microbacia do rio Fiorita (Siderópolis, SC), área abandonada há cerca de 30 anos pelas empresas mineradoras de carvão, relacionado à qualidade de seus corpos de água. Posteriormente, são apresentadas considerações visando contribuir com subsídios à restauração ambiental da área em questão.

Área de estudo

O sul do Estado de Santa Catarina ocupa uma área de 9.049km² (9,8% da área total do Estado). Compreende 39 municípios com uma população estimada em 800 mil habitantes, sendo que cerca de 500 mil estão localizados em áreas urbanas. Divide-se em três microrregiões: a) Associação dos Municípios da Região Carbonífera (AMREC); b) Associação dos Municípios do Extremo Sul Catarinense (AMESC); e c) Associação dos Municípios da Região de Laguna (Amurel). O município de Siderópolis faz parte da AMREC.

O desenvolvimento da região em estudo foi baseado principalmente na exploração do carvão, porém, nos últimos anos, vem ocorrendo um incremento industrial nas áreas de cerâmica, confecções, plásticos e descartáveis e metal-mecânica.

A mecanização na lavra de carvão iniciou-se em Siderópolis, em minas a céu aberto. A exploração era realizada em áreas baixas, nas proximidades dos rios, onde a cobertura do terreno raramente ultrapassava 30m de altura. O carvão explorado encontra-se na camada superior da Formação Rio Bonito, na Camada Barro Branco. Inicialmente, a cobertura era removida por escavadeiras, após detonação. Em 1959, a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) ampliou a lavra, introduzindo uma "dragline" de grande porte, com 23m³ de caçamba e lança de 70m de comprimento, conhecida como Marion. Esse equipamento foi responsável pela devastação de mais de 1000 ha de terras férteis nos 30 anos de exploração do carvão pela CSN na região (JICA, 1998). No processo de lavra a céu aberto, a remoção do capeamento era realizada de forma desordenada, provocando a inversão das camadas, dando origem à chamada "paisagem lunar", onde, ainda hoje, predominam pilhas de estéréis em formato cônico,

com até 30m de altura, cuja base é constituída da camada fértil do solo e nas suas cristas aparecem arenitos, siltitos, folhelhos carbonosos e piritosos. Essa configuração das pilhas dificulta a reabilitação da região. As raízes da vegetação não penetram profundamente, permanecendo superficiais, sendo comum a presença de árvores tombadas com suas raízes retorcidas e expostas.

Na atualidade, a maior parte da mineração de carvão é proveniente da lavra subterrânea. O acesso às camadas inferiores ocorre mediante galerias embocadas à meia encosta dos afloramentos ao longo das paredes altas expostas pela lavra de superfície ou através de poços inclinados ou verticais que partem da superfície e atingem geralmente os pontos mais baixos das jazidas (JICA, 1998).

Nos municípios de Urussanga e Siderópolis, as áreas de lavras a céu aberto ultrapassam os 2.100 hectares. Em poucas áreas, os terrenos foram nivelados mecanicamente e reflorestados com espécies de eucaliptos que apresentam reduzido crescimento devido à falta de técnicas de manejo adequadas, pela precariedade do solo e pela presença de água altamente poluída e tóxica.

Os locais destinados à disposição final dos rejeitos da mineração, ocupavam, já em 1979, uma área de 1600 hectares (JICA, 1995). Esse fato reveste-se de importância pois, até a exaustão das reservas medidas, cerca de 1,5 bilhões de toneladas de carvão poderão ser gerados em torno de 187,5 milhões de m³ de rejeito (cerca de 50% do minério bruto é constituído pelo rejeito). Esse rejeito, se disposto em pilhas de 15m de altura, ocupará uma área estimada em 1250 ha. Além disso, ao contrário da maioria das indústrias, o fechamento das minas não encerra o processo poluidor, que continua enquanto houver material piritoso exposto à oxidação, persistindo por décadas.

Devido ao modo de exploração e descarte, a situação ambiental da região é grave, particularmente gerada pela carga poluidora da lavra, beneficiamento, transporte e estocagem do rejeito da mineração pelas unidades produtoras de coque e pela usina-termoelétrica. No dia 25 de setembro de 1980 foi assinado o Decreto n. 85.206, enquadrando a Região Sul de Santa Catarina como a 14ª Área Crítica Nacional, para efeitos de controle da poluição gerada pelas atividades de extração, beneficiamento e usos do carvão mineral (Vaz e Mendes, 1997).

Além do impacto causado ao meio físico e biótico, as emissões de gases tóxicos e de material particulado causam danos à saúde humana. A pneumoconiose, doença provocada pelo acúmulo de poeira nos bronquíolos e alvéolos, pode incapacitar o

mineiro para o trabalho e até causar a morte pelo comprometimento do aparelho respiratório.

O município de Siderópolis, situado nas coordenadas 28°26'S e 49°25'W, foi fundado em 1891. Com a dinamização econômica proporcionada pela CSN, instalada na década de 50, o carvão passou a ser a principal economia do município, notadamente a partir da década de 60, fortalecida com a crise do petróleo na década de 70. A área estudada neste trabalho, também conhecida como Campo Mina Malha II, localizada na parte alta da microbacia do rio Fiorita, foi intensamente minerada pela CSN, sendo verificada a presença de extensas áreas com paisagem lunar, leito de rio abandonado, lagoas ácidas e pilhas de estéréis e de rejeito piritoso (Figura 1). No local, o rio teve seu curso inúmeras vezes modificado e hoje corre nas cavas de mineração formadas pela remoção, pela Marion, do estéril e do carvão (Jica, 1995, 1998; Santa Catarina, 1997).

Para permitir melhor acesso às áreas mineradas na região de Campo Mina Malha II, e como forma de descarte, o rejeito piritoso era lançado como cascalho nas estradas. Vários dos lagos também foram parcialmente preenchidos com rejeitos de mineração. Na região, os lagos são formados nas

cavas de mineração por escoamento superficial ou pela recarga do lençol freático. Também têm sua gênese associada ao barramento de rios, ocorrendo entre pilhas, nos canais de drenagem ácida e pelo preenchimento de galerias, no caso de minas subterrâneas. Na microbacia do rio Fiorita, a maioria dos lagos foi formada nas antigas cavas de mineração de carvão.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é mesotérmico úmido com verões quentes (Cfa), com temperatura média anual em torno de 16 a 20°C, com elevação entre dezembro a fevereiro. A pluviosidade total anual varia de 1400 a 1600mm, com pluviosidade máxima no verão e mínima no inverno (Santa Catarina, 1997).

As lagoas estudadas compreendem a bacia hidrográfica do rio Araranguá, a qual em conjunto com as bacias dos rios Urussanga e Tubarão, formam a bacia carbonífera (Santa Catarina, 1997). Grande parte das massas de água presentes na região encontra-se comprometida pela poluição oriunda de mineração de carvão, colocando em risco o abastecimento de água para toda região. Entre outros, têm suas águas impróprias para o consumo os rios Mão Luzia, Pio, Fiorita e Kuntz.

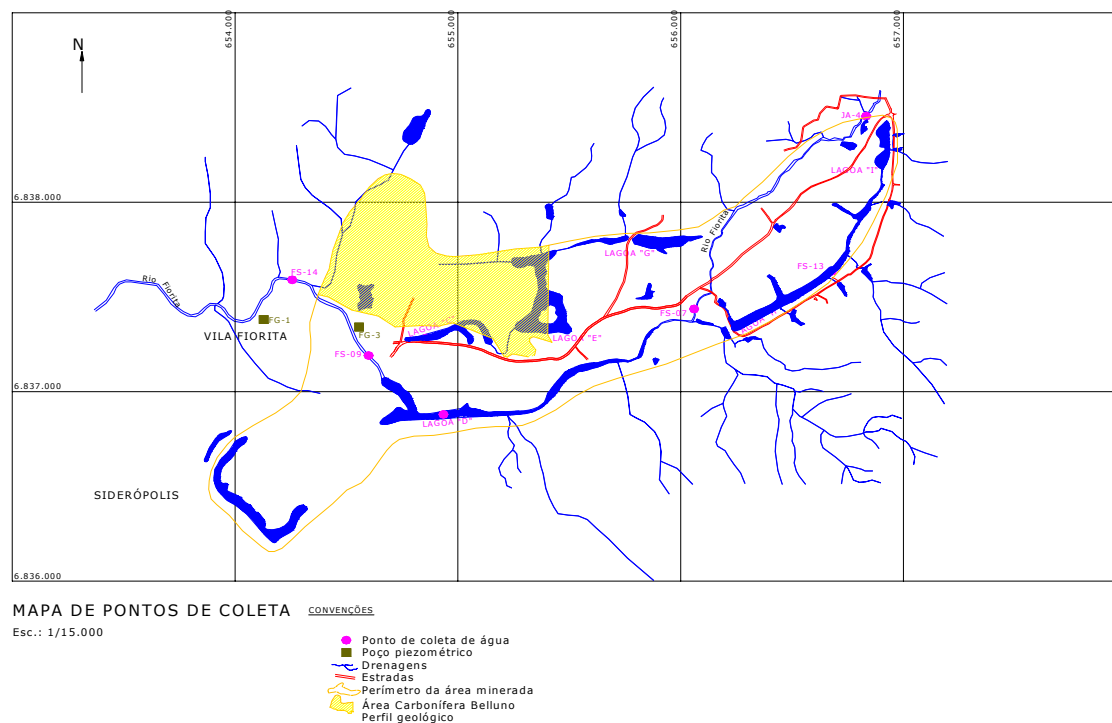


Figura 1. Localização dos pontos amostrados na microbacia do rio Fiorita (Siderópolis, Santa Catarina).

Material e métodos

Os pontos amostrados na microbacia do rio Fiorita estão localizados na Figura 1 (rio: JA 04, FS 07, FS 09 e FS 13; lagos: I, H, G, E e C). Esses foram selecionados baseado no relatório JICA (1998), à exceção do ponto FS 13, selecionado exclusivamente para amostragem neste trabalho. Nos lagos, as amostras de água foram tomadas em uma única estação a três diferentes profundidades e nos rios foram coletadas amostras da água superficial (Tabela 1).

Tabela 1. Lagos e rios estudados, data e hora das coletas e profundidades amostradas.

prof (m)	lagos				
	I	H	G	E	C
Superfície	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Meio	1,0	2,0	1,0	1,5	1,0
Fundo	2,0	4,0	3,0	3,5	2,0
Data	22/jan/02	22/jan/02	23/jan/02	23/jan/02	23/jan/02
Hora	10h 27min.	13h 10min.	9h 50min.	12h 32min.	14h 40min.
	rios				
	JA 4	FS 07	FS 09	FS 13	
Data	22/jan/02	22/jan/02	22/jan/02	22/jan/02	
Hora	11h 30min.	14h 40min.	15h 00min.	12h 05min.	

Nas Tabelas 2 e 3 são apresentadas para todos os pontos amostrados, as profundidades de coleta, as variáveis ambientais analisadas, os métodos e equipamentos empregados e seus respectivos limites de detecção e referências. Para o sedimento, foram analisados os teores de alumínio, manganês, magnésio e ferro total.

Multiplicando-se o valor da profundidade de desaparecimento visual do disco de Secchi por um fator igual a 3, pode-se estimar a profundidade da zona fótica de um lago (Pompêo, 1999).

Visando agrupar pontos com mesmas características, foi efetuada análise de agrupamento (métodos UPGMA - “*Unweighted pair-group average*”) (Curi, 1983; Valentin, 2000). Os dados de campo foram previamente padronizados, o valor numérico foi retirado da média e o resultado dividido pelo desvio padrão (Curi, 1983). Para os cálculos, foram utilizadas as seguintes variáveis ambientais: pH, acidez total, condutividade elétrica, Eh e os teores de sólidos totais, sulfato, cálcio, ferro total, magnésio e manganês, variáveis essas determinadas exclusivamente na água superficial. Na análise de agrupamento, o ponto FS 09 foi excluído.

Para o enquadramento do sistema dentro de padrões de classificação das águas doces no Brasil, permitindo avaliar a qualidade das águas e assegurar seus usos preponderantes, foi utilizada a Resolução Conama 20 (Brasil, 1986), de classes de uso da água.

Resultados

Na Tabela 4 são apresentadas a profundidade de desaparecimento do disco de Secchi e a hora de medida. A profundidade máxima estimada foi obtida de Jica (1995). Para os lagos G, E e C, o disco de Secchi atingiu o sedimento.

Para as demais variáveis ambientais estudadas, foram verificadas as seguintes amplitudes de variação: temperatura de 21,0 (JA 04) a 31,0°C (Lago C); pH de 3,0 (Lagos E e C) a 7,0 (JA 04); Eh de 132,0 (FS 07) a 615,9mv (Lago E); oxigênio dissolvido de 6,7 (Lago C) a 10,0mg/L (Lago I); condutividade elétrica de 54,7 (JA 04) a 1205,0 µS/cm (Lago C); acidez de 3,0 (JA 04) a 246,0 mgCCO₃ (Lagos E e C); alcalinidade de 7,0 (FS 07)

Tabela 2. Variáveis ambientais determinadas nos locais amostrados e profundidade de amostragem (S – superfície, M – meio, F – fundo).

Variável	unidade	local amostrado									
		Lago I	Lago H	Lago G	Lago E	Lago C	JA 4	FS 07	FS 09	FS 13	
pH		S/M/F	S/M/F	S/M/F	S/M/F	S/M/F	S	S	S	S	
Disco de Secchi	m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Acidez total	mg/L CaCO ₃	S	S	S	S	S	S	S	S	S	
Alcalinidade total	mg/L CaCO ₃	S	S	S	S	S	S	S	S	S	
Condutividade elétrica	µS/cm	S/M/F	S/M/F	S/M/F	S/M/F	S/M/F	S	S	S	S	
Temperatura	°C	perfil	perfil	perfil	perfil	perfil	S	S	S	S	
Oxigênio dissolvido	mg/L	S/M/F	S/M/F	S/M/F	S/M/F	S/M/F	S	S	S	S	
Eh	mv	S/M/F	S/M/F	S/M/F	S/M/F	S/M/F	S	S	S	S	
Nitrogênio total	mg/L	S/M/F	S/M/F	S/M/F	S/M/F	S/M/F	S	S	S	S	
Sólidos totais	mg/L	S/M/F	S/M/F	S/M/F	S/M/F	S/M/F	S	S	S	S	
Sulfato	mg/L	F	F	F	F	F	-	-	-	-	
Sulfato	mg/L	S/M/F	S/M/F	S/M/F	S/M/F	S/M/F	S	S	S	S	
Alumínio	mg/L	S/M/F	S/M/F	S/M/F	S/M/F	S/M/F	S	S	S	S	
Cálcio	mg/L	S	S	S	S	S	S	S	S	S	
Ferro II	mg/L	S/M/F	S/M/F	S/M/F	S/M/F	S/M/F	S	S	S	S	
Ferro total	mg/L	S/M/F	S/M/F	S/M/F	S/M/F	S/M/F	S	S	S	S	
Magnésio	mg/L	S	S	S	S	S	S	S	S	S	
Manganês	mg/L	S/M/F	S/M/F	S/M/F	S/M/F	S/M/F	S	S	S	S	
Colimetria	NMP/100ml	S	S	S	S	S	S	S	S	S	
Sedimento		-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tabela 3. Variáveis ambientais analisadas, métodos de análise, equipamentos, limites de detecção e as respectivas referências bibliográficas utilizadas.

Variável	métodos	equipamentos	limites	Referências
pH	potenciométrico	Analion PM 606 F	0,1	EATON <i>et al.</i> (1995)
Penetração da luz	medida direta	disco de Secchi	-	-
Acidez total	titulométrico	Bureta manual	1,0 mgL/CaCO ₃	EATON <i>et al.</i> (1995)
Alcalinidade total	titulométrico	Bureta manual	1,0 mgL/CaCO ₃	EATON <i>et al.</i> (1995)
Condutividade elétrica	medida direta	Hach CO 150	0,001 Ms/cm	EATON <i>et al.</i> (1995)
Temperatura da água	medida direta	YSI 60	0,1 °C	-
Oxigênio dissolvido	Winkler/titulométrico	Bureta manual	0,1 mg/L	EATON <i>et al.</i> (1995)
Eh	potenciométrico	Analion PM 606 F	0,1	EATON <i>et al.</i> (1995)
Fosfato total	espectrofotométrico	Hach DR 2000	0,01 mg/L	EATON <i>et al.</i> (1995)
Nitrogênio total	titulométrico	Kjeldahl	0,1 mg/L	EATON <i>et al.</i> (1995)
Sólidos totais	gravimétrico	Sciencetech SA210	1,0 mg/L	EATON <i>et al.</i> (1995)
Sulfeto	espectrofotométrico	Hach DR 2000	0,01 mg/L	EATON <i>et al.</i> (1995)
Sulfato	turbidímetro	Hach 2100 P	1,0 mg/L	EATON <i>et al.</i> (1995)
Alumínio	absorção atômica	Zeiss – AAS4	0,1 mg/L	EATON <i>et al.</i> (1995)
Cálcio	absorção atômica	Zeiss – AAS4	0,01 mg/L	EATON <i>et al.</i> (1995)
Ferro II	absorção atômica	Zeiss – AAS4	0,02 mg/L	EATON <i>et al.</i> (1995)
Ferro total	absorção atômica	Zeiss – AAS4	0,02 mg/L	EATON <i>et al.</i> (1995)
Magnésio	absorção atômica	Zeiss – AAS4	0,01 mg/L	EATON <i>et al.</i> (1995)
Manganês	absorção atômica	Zeiss – AAS4	0,01 mg/L	EATON <i>et al.</i> (1995)
Colimetria	tubos múltiplos	-	-	EATON <i>et al.</i> (1995)
Sedimento	Coleta direta	Draga Peterson	-	-

x a 30,0mgCCO₃ (FS 13); nitrogênio total de 0,12 (Lago H) a 1,03mg/L (FS 07); alumínio de abaixo do limite de detecção do método (Lagos I, H e G) a 22,4mg/L (Lago E); ferro II de abaixo do limite de detecção do método (Lago G) a 3,23mg/L (FS 07); ferro total de 0,05 (Lago G) a 3,72mg/L (Lago H); magnésio de 1,27 (FS 04) a 26,0mg/L (Lago E); manganês de abaixo do limite de detecção do método a 9,0 mg/L (Lago H); cálcio de 4,0 (Lago I) a 93,7mg/L (Lago E); sulfato de 5,0 (FS 04) a 540mg/L (Lago E); sulfetos de abaixo do limite de detecção do método; sólidos totais de 16,0 (FS 04) a 981,0mg/L (Lago E).

Tabela 4. Profundidade de desaparecimento do disco de Secchi e, segundo JICA (1995), a profundidade máxima das lagoas.

	Lago				
	I	H	G	E	C
hora de leitura	10h 27min	13h 10min.	9h 50min.	12h 32min	14h 40min.
prof. (m)	1,92	1,40	4,71*	4,00*	3,50*
prof. máxima (m)	6,0	4,5	6,7	7,8	6,3

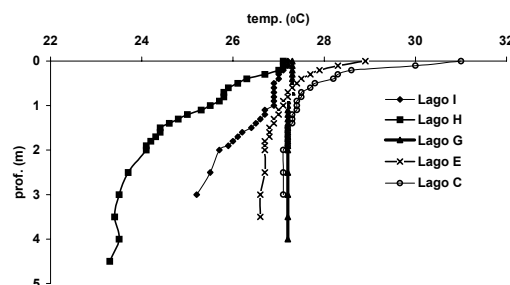
*disco de Secchi atingiu o sedimento

As medidas de temperatura da água (Figura 2) indicam que os lagos apresentam-se estratificados, à exceção do Lago G, refletindo os diferentes horários de medição (Tabela 1).

Os perfis das demais variáveis ambientais analisadas sugerem que o Lago H apresenta maior descontinuidade na massa d'água que os demais lagos (Figura 3), indicando estratificação química.

A análise espacial dos dados sugere que os Lagos E e C discriminam dos demais pontos amostrados (Figura 4), na elaboração gráfica,

foram consideradas apenas as variáveis ambientais determinadas nas amostras de água obtidas na superfície). Pode-se observar que os Lagos E e C apresentam menor pH, maiores acidez total, condutividade elétrica, Eh e teores de sólidos totais, sulfato, alumínio, cálcio, ferro II, ferro total, magnésio e manganês do que os demais pontos.

**Figura 2.** Perfis de temperatura da água nos lagos estudados na microbacia do rio Fiorita, Siderópolis.

A análise multivariada dos dados (Figura 5) sugere que a microbacia do rio Fiorita apresenta um gradiente horizontal, o que já era sugerido pela análise gráfica.

No sedimento dos lagos, foram observados maiores teores de ferro total, seguido de alumínio, magnésio e manganês (Tabela 5).

A análise microbiológica indica que o ponto JS 04 apresenta o maior número de coliformes totais, enquanto que no Lago I há maior presença de coliformes fecais (Tabela 6).

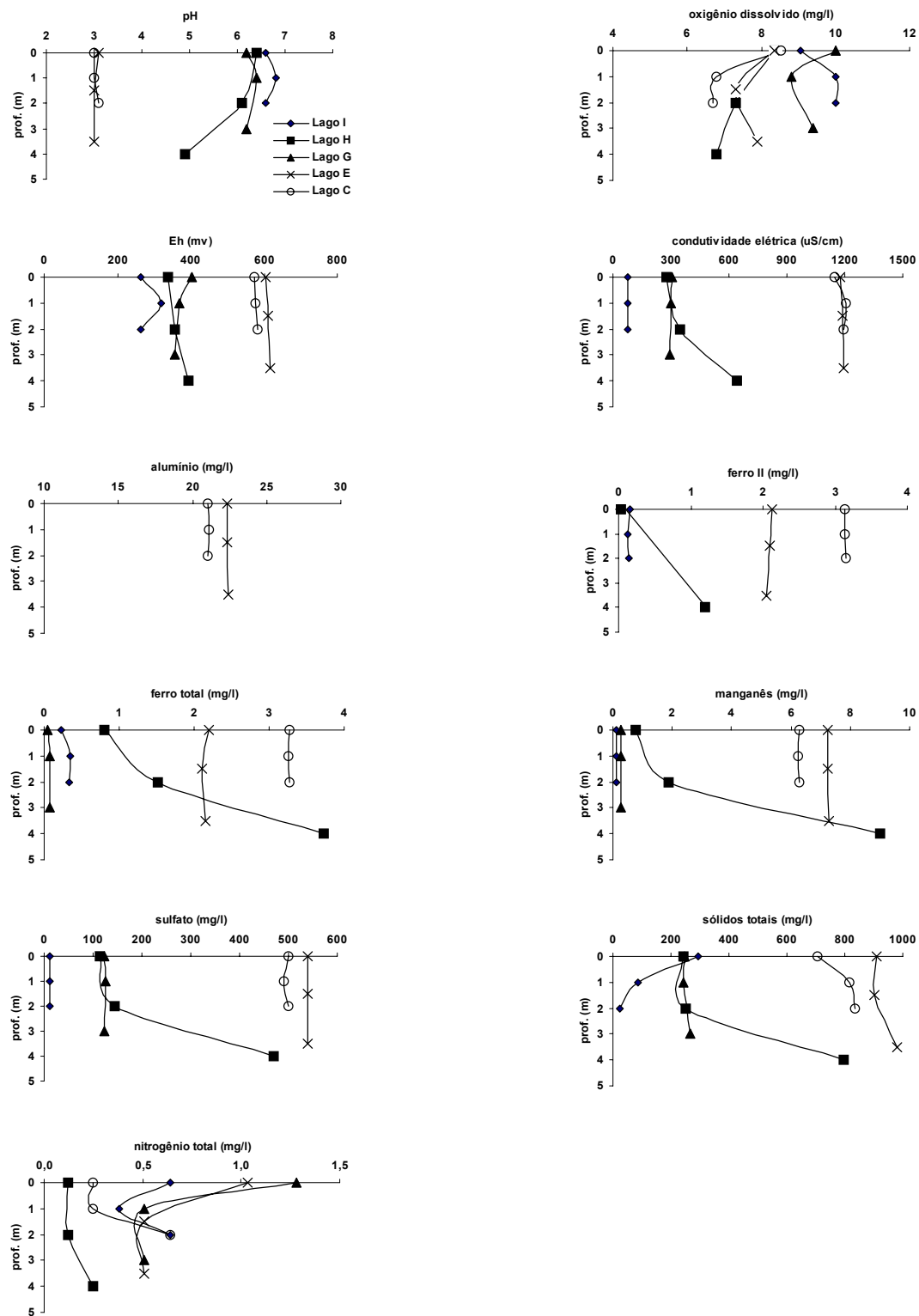


Figura 3. Perfis das variáveis ambientais analisadas nos lagos da microbacia do rio Fiorita, Siderópolis.

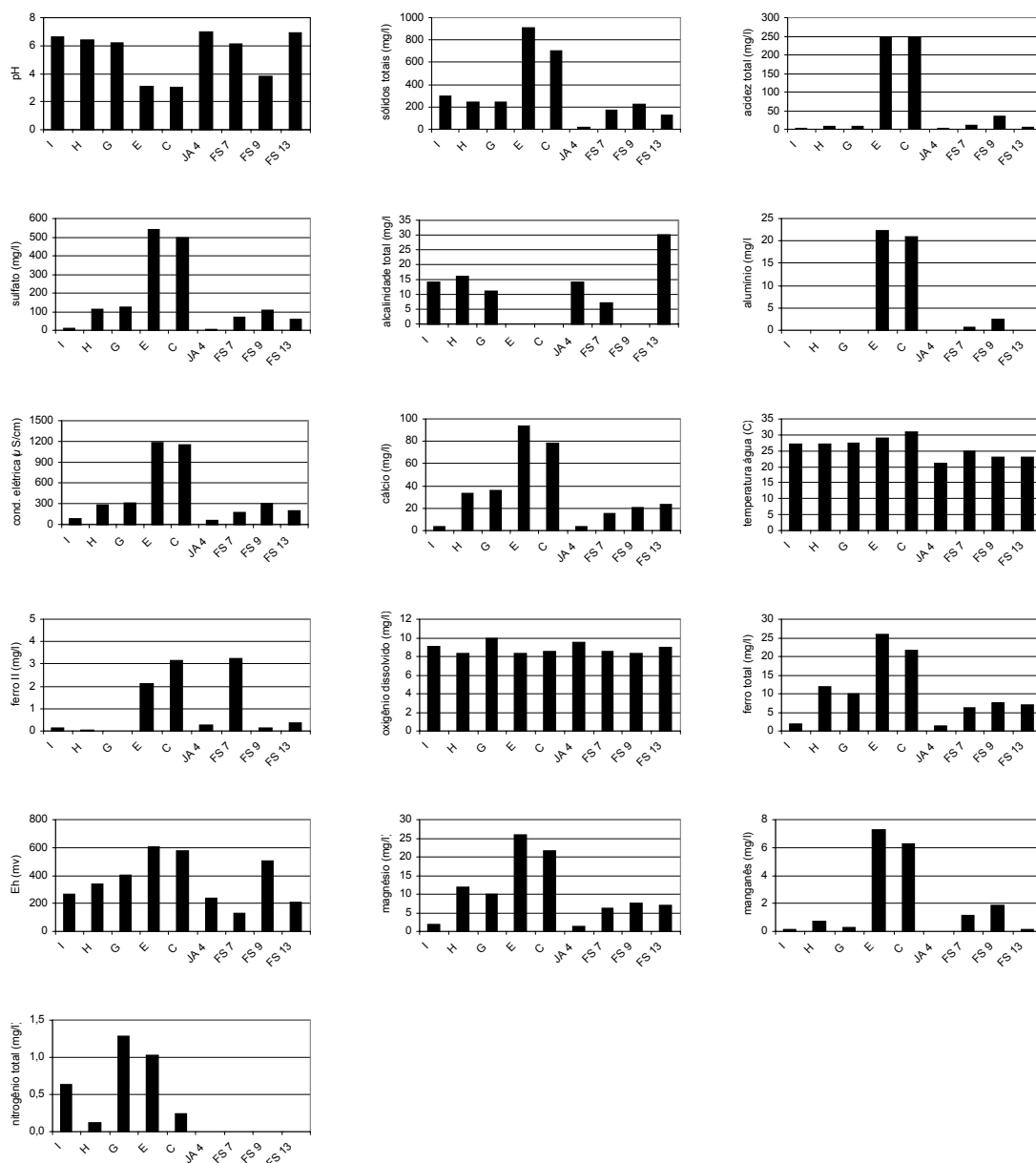


Figura 4. Variáveis ambientais analisadas na água superficial em diversos pontos na microbacia do rio Fiorita, Siderópolis.

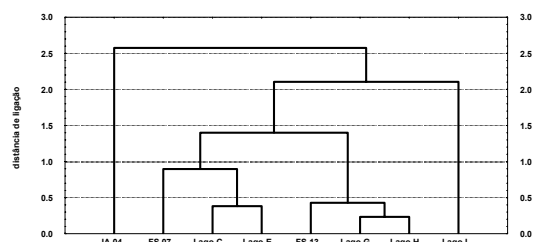


Figura 5. Análise de agrupamento (UPGMA e distância Euclidiana) utilizando dados das amostras de água superficial de diversos pontos da microbacia do rio Fiorita, Siderópolis.

Discussão

Através da relação do valor da profundidade de desaparecimento visual do disco de Secchi multiplicado pelo fator 3, pode-se verificar que os lagos estudados na microbacia do rio Fiorita apresentam-se com luz em praticamente toda coluna d'água, atingindo o sedimento. Dessa forma, os dados sugerem que a maior parte da massa de água é potencialmente trofогênica.

Tabela 5. Porcentagem com base no peso seco dos teores de metais no sedimento de lagos na microbacia do rio Fiorita.

	Lagos				
	I	H	G	E	C
	% PS				
alumínio	9,29	6,21	10,19	6,31	9,56
manganês	0,040	0,025	0,016	0,007	0,006
magnésio	0,060	0,030	0,022	0,036	0,010
ferro total	6,59	24,83	11,12	16,76	9,07

Tabela 6. Análise microbiológica de coliformes totais e fecais de amostras de água superficial na microbacia do rio Fiorita, Siderópolis.

Colifor- mes	Lago I	Lago H	Lago G	Lago E	Lago C	JA 04	FS 07	FS 09	FS 13
	NMP / 100 ml								
Totais	7900	330	1700	45	490	9200	1300	700	1300
Fecais	1300	20	61	20	45	280	20	330	490

Os lagos amostrados apresentam temperatura da massa de água ligeiramente inferior nos lagos H e I quando comparados com os valores medidos nos lagos C, E e G. Pode ser verificado que, ao longo do dia, devido aos horários de medida, ocorreu elevação da temperatura da massa de água, particularmente na superfície, refletindo em um pronunciamento da estratificação. Esses dados sugerem que no início da manhã os lagos devem estar desestratificados. Medidas efetuadas em lagos originados pela exploração de carvão na região do rio Morozini (Treviso, SC), próximo ao local deste estudo, também sugerem desestratificação da massa de água nas primeiras horas da manhã (Moschini-Carlos e colaboradores, dados não publicados). Em função das baixas profundidades máximas (Tabela 4), permitindo a ação do vento em toda coluna de água, nesta análise inicial pode-se inferir que os lagos estudados na microbacia do rio Fiorita passam por um periódico processo de circulação, sendo considerados polimíticos. Estudo em ciclo nictimeral em duas diferentes épocas do ano, particularmente em julho (mês mais frio) e janeiro (mês mais quente), confirmará esse padrão de circulação, com implicações na disponibilidade de nutrientes e metais para o sistema.

Em relação aos teores de sólidos totais, é função principalmente dos elevados teores de sulfato dissolvido presente nos lagos estudados, podendo representar mais do que 50% dos sólidos totais, por exemplo, como verificado nos lagos E e C.

Na bacia de drenagem do rio Hocking (Ohio, USA), Verb e Vis (2001) encontraram altas concentrações de ferro total e alumínio, variando respectivamente de 0,5 a 9,7mg/L e 0,01 a 4,20mg/L, particularmente em locais com baixo pH, da mesma forma como o verificado neste trabalho. No entanto, os valores determinados na microbacia do rio Fiorita

são cerca de 5 vezes superiores aos encontrados por Verb e Vis (2001). Já os teores de manganês foram semelhantes, variando no rio Hocking de 0,0 a 13,4mg/l. Os valores levantados nesta pesquisa são semelhantes aos verificados em outros corpos d'água receptores de drenagem de mineração de carvão (Axler *et al.*, 1996; Rodrigues *et al.*, 2000).

As análises gráfica e multivariada sugerem que a microbacia do rio Fiorita apresenta uma zonação longitudinal. A parte alta da microbacia, ponto JA 04 e Lago I, apresenta melhor qualidade da água quando comparada com o ponto FS 13 e os Lagos G e H e estes, quando comparados com a região do ponto FS 07 e Lagos C e E. Assim, pode-se inferir que há um gradiente com redução na de qualidade da água em direção à parte baixa da bacia, com diminuição do pH e elevação nos valores de acidez total, condutividade elétrica, Eh e nos teores de sólidos totais, sulfato, alumínio, cálcio, ferro II e ferro total, magnésio e manganês. Esses dados sugerem que em direção à parte baixa da bacia há um efeito de concentração particularmente de metais. Isto pode ser explicado pela oxidação da pirita formando ácido sulfúrico, promovendo a solubilização dos minerais presentes no rejeito (Gaivizzo *et al.*, 2000). Provavelmente, em período de elevada precipitação pluviométrica, a água de escoamento superficial que percola através do rejeito de elevada acidez e alta concentração de metais dissolvidos deverá potencializar o comprometimento da qualidade da água superficial. Esse comprometimento é mais preocupante devido à potencialidade da drenagem ácida em tornar o ambiente tóxico, como verificado por Lopes *et al.* (1999).

Para diversas lagoas naturais presentes no litoral do Estado do Rio de Janeiro os teores de alumínio e ferro total verificados no sedimento são menores do que os determinados nesta pesquisa (Tabela 4). Nas lagoas do Rio de Janeiro, foram determinados valores médios de 0,027%PS e 0,167 %PS para ferro total e magnésio, respectivamente (Esteves *et al.*, 1983). A diferença verificada no teor de ferro total pode ser atribuída ao processo de mineração e à posterior retenção desse metal no sedimento dos lagos da microbacia do rio Fiorita. Cabe ressaltar que a interface sedimento-água tem um papel muito importante para o metabolismo de lagos, particularmente em ambientes rasos, permitindo a liberação de nutrientes para a coluna de água (Berman *et al.*, 1993; Azcue *et al.*, 1994), o que em parte explica os valores elevados verificados na água próximo ao fundo, particularmente no Lago H.

Pela legislação brasileira em vigor (Brasil, 1986) pode-se avaliar a contaminação de um corpo d'água por fezes humanas mediante o emprego da colimetria com tubos múltiplos. Segundo essa resolução, os pontos JA 04 e FS 13 e Lagos I e G apresentam águas destinadas aos usos discriminados para a Classe 2, os demais pontos indicam Classe 4, destinadas à navegação, o que não é o caso, devido ao tamanho dos corpos de água da região, à harmonia paisagística e aos usos menos exigentes (Tabelas 7 e 8). Particularmente relacionada à colimetria, é necessária amostragem com maior periodicidade para observações mais conclusivas (Brasil, 1996; Bastos *et al.*, 2000). No entanto, visando salvaguardar a saúde ambiental e da população, com base na resolução Conama 20 (Brasil, 1996), como primeira aproximação, as águas da microbacia do rio Fiorita podem ser enquadradas na Classe 4. A qualidade da água também interfere na revegetação do local de estudo (Grunwald *et al.*, 1993), o que pode explicar a baixa cobertura vegetal e a riqueza de espécies verificadas na microbacia do rio Fiorita (Vanilde Citadini-Zanette, Unesc, Criciúma, Estado de Santa Catarina, comunicação pessoal). Assim, há necessidade do empreendimento de técnicas que visem tanto à reabilitação da qualidade da água quanto da região adjacente ao corpo de água.

Tabela 7. Classificação das águas segundo a Resolução Conama (Brasil, 1986).

	Un.	classificação: Resolução CONAMA*			
		Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
pH		6,0 a 9,0	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0
Oxigênio dissolvido	mg/L	> 6,0	> 5,0	> 4,0	> 2,0
Sulfeto	mg/L	0,002	0,002	0,3	
Sulfato	mg/L	250	250	250	
Alumínio	mg/L	0,1	0,1	0,1	
Ferro II	mg/L	0,3	0,3	5,0	
Manganês	mg/L	0,1	0,1	0,5	

*Para a Classe Especial, visando o uso da água para abastecimento sem prévia desinfecção, os coliformes totais deverão estar ausentes em qualquer amostra.
Para sulfeto, sulfato, alumínio, ferro solúvel e manganês: valores máximos permitidos

Como forma de contribuir no manejo da microbacia do rio Fiorita, de minimizar os danos causados na etapa de reabilitação e os custos financeiros envolvidos no processo, além de permitir a participação da sociedade civil, é recomendado remover os rejeitos piritosos distribuídos em diversos pontos da área e a sua concentração em local pré-estabelecido; transformar a região em Área de Proteção Ambiental; criar uma Estação Experimental para Recuperação de Áreas Alteradas pela Mineração de Carvão; revegetar margem dos corpos de água com espécies nativas; reabilitar a qualidade da água com a contribuição de áreas alagadas construídas, pelo emprego de macrófitas

aquáticas e organismos associados. Tanto a reabilitação da vegetação marginal e o desenvolvimento de banhados permitirão o incremento da biodiversidade com a potencialidade de aumentar a resiliência do local.

Tabela 8. Condições de uso das águas da microbacia do rio Fiorita, Siderópolis, conforme sistema de classificação da Resolução CONAMA 20 (BRASIL, 1986), análises para as Classes Especial (cl. E), 1 (cl. 1), 2 (cl. 2), 3 (cl. 3) e 4 (cl. 4) e recomendação de uso sugerido.

Variável	Lago I	Lago H	Lago G	Lago C	JA 4	FS 07	FS 09	FS 13
pH	cl. 1	cl. 4	cl. 1	cl. 4	cl. 1	cl. 1	cl. 4	cl. 1

Oxigênio dissolvido	cl. 1	cl. 1	cl. 1	cl. 1	cl. 1	cl. 1	cl. 1	cl. 1
Sulfeto *	cl. 1	cl. 1	cl. 1	cl. 1	-	-	-	-
Sulfato	cl. 1	cl. 4	cl. 1	cl. 4	cl. 1	cl. 1	cl. 1	cl. 1

Alumínio **	cl. 1	cl. 1	cl. 1	cl. 4	cl. 1	cl. 4	cl. 4	cl. 1
Ferro II	cl. 1	cl. 2	cl. 2	cl. 2	cl. 1	cl. 2	cl. 1	cl. 2
Manganês	cl. 2	cl. 3	cl. 2	cl. 3	cl. 1	cl. 2	cl. 2	cl. 1
Colimetria	cl. 2	cl. 1	cl. 1	cl. 1	cl. 2	cl. E	cl. 1	cl. 1
Recomendação	cl. 2	cl. 4	cl. 2	cl. 4	cl. 2	cl. 4	cl. 4	cl. 2

* limite de detecção de 0,01 mg/L

** limite de detecção de 0,1 mg/L

*** determinação na amostra de fundo.

Yozzo *et al.* (1996) estimam em mais de 20 anos o período para a reabilitação de áreas mineradas. Esse período indica a necessidade de monitoramento constante visando avaliar e adequar os rumos da reabilitação em curso. Vários são os tipos de monitoramento da qualidade da água: a) de acordo com a legislação local; b) para avaliação de um uso especial do corpo de água; e c) para fins de pesquisa científica (OITC, sem data). De acordo com Smyth e Dearden (1998), estudos de curta duração devem ser empreendidos particularmente por indústrias, no caso em questão, pelas empresas mineradoras de carvão. Estes autores discutem que estudos de longa duração, maiores do que seis anos, devem ser desenvolvidos por grupos de pesquisa, agências governamentais e por consultores. Esse procedimento é devido aos diferentes interesses desses grupos. No caso da indústria, a rápida solução do problema e, em estudos mais elaborados, a verificação de efeitos em longo prazo. Todavia, independentemente dessas questões, sugerem que o programa de monitoramento deve ser elaborado por meio de um consenso entre as partes. No monitoramento proposto neste trabalho, tem-se como objetivo principal avaliar os resultados obtidos na melhoria da qualidade da água após a implementação das medidas de reabilitação sugeridas. Assim, recomenda-se que a periodicidade no monitoramento seja bimestral, com início previsto antecedendo às ações de reabilitação. Além dos pontos amostrados neste trabalho, dois novos

locais podem ser considerados, como sugestão a Lagoa D e FS-14 (Figura 1).

A indicação de que a área apresenta um gradiente horizontal indica que todas as ações de reabilitação devem ser tratadas de forma integrada, pois ações tomadas a montante refletirão na qualidade da água a jusante. Como a microbacia do rio Fiorita ainda apresenta fontes potenciais de carvão para exploração futura, isso implica que a instalação de novos pontos de mineração deve ser analisado e avaliado em conformidade com o plano de recuperação ambiental para a área como um todo. Dessa forma, menor prejuízo às áreas já recuperadas poderá ser esperado.

Referências

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Elaboração e apresentação de projetos de reabilitação de áreas degradadas pela mineração de carvão. Rio de Janeiro. NBR 13030, jun. 1999. 05p.
- AXLER, R. *et al.* Water quality issues associated with aquaculture: a case study in mine pit lakes. *Water Environ. Res.*, Alexandria, v. 68, n. 6, p. 995-1011, 1996.
- AZCUE, J.M. *et al.* Role of sediment porewater in the cycling of arsenic in a mine-polluted lake. *Environ. Int.*, Lancaster, v. 20, n. 4, p. 517-527, Jun. 1994.
- BASTOS, R.K.X. *et al.* Coliformes como indicadores da qualidade da água: alcance e limitações. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27., 2000, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: AIDIS/ABES, 2000. 12p.
- BERMAN, T. *et al.* Sediment water integration chemistry as a determinant of water quality in lakes and reservoir. In: AUSTRALIAN SYMPOSIUM ANALYTICAL CHEMISTRY, 12 and ENVIRONMENT CHEMISTRY CONFERENCE, 3., Perth: Proc... 1993. p. 32-42.
- BERVOETES, L. *et al.* Trace metal levels in Chironomid larvae and sediments from a Bolivian river: impact of mining activities. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, San Diego. v. 41, n. 3, p. 275-283, Nov. 1998.
- BRASIL (País), Secretaria Especial do Meio Ambiente. Resolução CONAMA 20, julho de 1986. Diário Oficial da União, Brasília, 30 jun. 1986.
- COMMITTEE ON INLAND AQUATIC ECOSYSTEM, WATER SCIENCE AND TECHNOLOGY BOARD, COMMISSION ON GEOSCIENCES, ENVIRONMENTAL, AND RESOURCE Freshwater ecosystem: revitalizing educational programs in Limnology, Washington, DC: National Academic Press, 1996. 384p.
- CURI, PR. Análise de agrupamento: métodos seqüenciais, aglomerativos e hierárquicos. Ciência e Cultura, São Paulo, v. 35, n. 10, p. 1416-1429, out. 1983.
- EATON, A.D. *et al.* (eds.) Standard methods: for the examination of water and wastewater. Washington, DC: American Public Health Association, 1995.
- ESTEVES, F.A. *et al.* Estudos limnológicos em algumas lagoas costeiras do Estado do Rio de Janeiro. In: SEMINÁRIO REGIONAL DE ECOLOGIA, 3., 1983, São Carlos. Anais... São Carlos: UFSCar, 1983. 3: 25-38.
- GAIVIZZO, L.B. *et al.* Recuperação de áreas utilizadas para depósitos de rejeitos de minas de carvão. In: CENTRO DE ECOLOGIA (Org.), Carvão e Meio Ambiente. Porto Alegre: Ed. Universidade, 2000. p. 480-491.
- GRUNWALD, C. *et al.* Abandoned mines in Illinois and North Dakota: Toward an understanding of revegetation problems. In: CAIRNS Jr., J (Ed.) *Rehabilitating damaged ecosystems*, Boca Raton: CRC Press, 1993. p. 39-59.
- HOWARD, J.; MCGREGOR, D. Reducing nutrient enrichment of waterways through public education – A tale of two cities. *Environ. Conserv.*, Lausanne, v. 27, n. 4, p. 351-358, Dec. 2000.
- JEMAI - JAPAN ENVIRONMENTAL MANAGEMENT ASSOCIATION FOR INDUSTRY. Industrial Pollution Control: general review and practice in Japan, air and water. 2nd revised. Tokyo: Brainwork, Inc, 1998. 354p.
- JICA - JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY. The feasibility study on recuperation of mined out areas in South region of Santa Catarina State, the Federation Republic of Brasil, Mitsubishi Materials Corporation, Chiyoda-Dames e Moore Co., Ltd, Japan, 1995. 397p. (Report)
- JICA - JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY. Estudo de viabilidade da recuperação das áreas mineradas na região sul de Santa Catarina, República Federativa do Brasil. Mitsubishi Materials Corporation, Chiyoda-Dames e Moore Co., Ltd, Japan, março.1998. 59p. (Relatório Principal, Estudo Setorial)
- KOPEZINSKI, I. *Mineração X meio ambiente: considerações legais, principais impactos ambientais e seus processos modificadores.* Porto Alegre: Editora da Universidade. 2000.
- LOPES, I. *et al.* Discriminating the ecotoxicity due to metals and to low pH in acid mine drainage. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, San Diego. v. 44, n. 2, p. 207-214, Oct. 1999.
- MALLISTER, M.L.; MILIOLI, G. Mining sustainably: opportunities for Canada and Brazil. *Mineral & Energy*, Lulea, v. 15, n. 2, p. 3-14, Sep. 2000.
- OITC - OSAKA INTERNATIONAL TRAINING CENTER. Strategies and appropriate technologies and measures for conservation of lake environment. Monitoring for the preservation of the Lake Biwa water quality. Japan: OITC, JICA, ILEC, sem data. 28p.
- POMPÊO, M.L.M. O disco de Secchi. *Bioikos*, Campinas, v. 13, n. 1/2. p. 40-45, 1999.
- RODRIGUES, M.T.R. *et al.* Parâmetros físicos e químicos das águas superficiais e avaliação da atividade bacteriana em ambientes lóticos receptores da drenagem da mineração de carvão. In: CENTRO DE ECOLOGIA

- (Org.). Carvão e Meio Ambiente. Porto Alegre: Ed. Universidade, 2000. p. 492-553.
- SANTA CATARINA, Secretaria de Estado do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. Diretoria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos; AMREC, Associação de Municípios da Região Carbonífera; UNESCO, Universidade do Extremo Sul Catarinense. Plano básico de desenvolvimento ecológico-econômico, PBDEE, Florianópolis, IOESC, 628p. 1997.
- SINGH, R.K.; CHOWDHURY, A. Effect of mine discharge on the pattern of riverine habitat use of elephants *Elephas maximus* and other mammals in Shinghbhum forest, Bihar, India. *J. Environ. Manag.*, Cambridge. v. 57, n. 3, p.177-192, 1999.
- SMITH, V.H. et al. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*, Amherst. v. 100, n. 1-3, p. 179-196, Jan/Dec. 1999.
- SMYTH, C.R.; DEARDEN, P. Performance standards and monitoring requirements of surface coal mine reclamation success in mountainous jurisdictions of western North America: a review. *J. Environ. Manag.*, Cambridge. v. 53, p. 209-229, jul. 1998.
- THOMAS, S.M.; BINI, L.M. Limnologia: enfoques e importância para o manejo dos recursos hídricos. *Cadernos de Biodiversidade*, Curitiba, v. 2, n. 1, p. 11-26, 1999.
- TUNDISI, J.G. *Limnologia no século XXI: perspectivas e desafios*. São Carlos: Instituto Internacional de Ecologia, 1999. 24p.
- VALENTIN, J.L. *Ecologia numérica: uma introdução à análise multivariada de dados ecológicos*. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2000.
- VAZ, P.A.B.; MENDES, M. Meio ambiente e mineração. *Revista de Tecnologia e Ambiente*, Criciúma, v. 3, n. 1, p. 55-67, 1997.
- VERB, R.G.; VIS, M.L. Macroalgal communities from an acid mine drainage impacted watershed. *Aquat. Bot.*, Amsterdam, v. 71, n. 2, p. 93-107, Oct. 2001.
- YOZZO, D. et al. Planning and evaluating restoration of aquatic habitats from an ecological perspective. Evaluation of Environmental Investments Research Program, US Army Corps of Engineers, IWR Report 96 EL-4, 1996.
- WALL, D.H.; PALMER, M.A.; SNELGROVE, V.R. Biodiversity in critical transition zones between terrestrial, freshwater, and marine soils and sediments: process, linkages, and management implications. *Ecosystems*, New York, v. 4, n. 5, p. 418-420, 2001.
- WETZEL, R.G. Freshwater ecology: changes, requirements, and future demands. *Limnology*, Otsu. v. 1, n.1, p. 3-9, 2000.

Received on August 22, 2003.

Accepted on June 30, 2004.