IV-014 – AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DE LAGOS DE MINERAÇÃO

Luciana Viana Gonçalves[(1)]
Mestranda em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos – UFMG. Engenheira Química e Técnica em Química – FEMC.
Eduardo von Sperling[(2)]
Engenheiro Civil e Sanitarista, Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG

Endereço[(1)]**:** Rua Juacema nº 780, Apt. nº.801, Graça; Belo Horizonte – MG; CEP: 31140-030 – Brasil - tel.: +55 (31) 9667-1496; e-mail: **luviana@gmail.com.**

RESUMO

Os lagos de mineração são formados nas cavas das minas, podendo ser de minas exauridas ou abandonadas. Seu preenchimento é realizado de forma natural (precipitação e subterrânea) e/ou artificial (água superficial). Os lagos de mineração originados de minerais sulfetados comumente possuem carácter ácido e aqueles decorrentes de minerais inertes tendem a apresentar pH neutro. O intuito desta pesquisa é verificar a qualidade da água, o comportamento hidrodinâmico, discutir os parâmetros analisados correlacionando-os com a resolução CONAMA 357/05 e os prováveis usos dos lagos de mineração estudados. Os estudos de caso deste trabalho são o Lago de Águas Claras da mina de Águas Claras (minério de ferro) e os lagos Cava Norte e Cava Sul da mina de Riacho dos Machados (ouro). Os dados de monitoramento utilizados neste trabalho foram de carácter secundário; a partir destes dados realizou-se análise temporal, estatística descritiva, testes não paramétricos de distribuição normal dos dados pelo *Shapiro Wilk W test*, análise sazonal pelo *Mann-Whitney U test* para todos os lagos e análise espacial *Kruskal Wallis test* somente para o lago de Águas Claras.
A partir dos estudos dos lagos conclui-se que, para os lagos Cava Norte e Cava Sul, não foi possível determinar o comportamento hidrodinâmico por se necessitar análises de mais parâmetros e outros testes. A drenagem ácida influencia na qualidade da água como observado na Cava Norte. As características da região também influenciam na qualidade da água. O lago de Águas Claras possui boa qualidade, atendendo a resolução CONAMA 357/05 em todos os parâmetros estudados para o conjunto de dados analisados a partir da estatística descritiva, possui comportamento meromítico (circulações parciasi) e após sua formação completa terá 234 metros de profundidade, tornando-se o ambiente lêntico mais profundo do país.

PALAVRAS-CHAVE: Lagos de mineração, limnologia, comportamento hidrodinâmico e qualidade da água.

INTRODUÇÃO

Os lagos de mineração "*pit lakes*" surgiram inicialmente na Europa, e hoje estão presentes em todo o mundo. Esses lagos são formados a partir de minas abandonadas ou após a exaustão das minas, onde podem possuir benefícios, como função paisagística, balneabilidade, dentre outros. A criação dos lagos de mineração a partir da cava de minas exauridas tem o intuito de reduzir os impactos causados pela exploração, uma vez que os mesmos possuem características próprias do meio aquático formado.

Os processos para a formação dos lagos são de origem artificial, que é pela utilização de água superficial, por origem hidrológica proveniente da água subterrânea, antes retirada da cava, e por precipitação. Após os estudos, define-se o método a ser empregado, embora o processo possa ser concomitante (VILLAIN *et al*., 2011).

O uso das águas superficiais para o preenchimento tem como intuito diminuir o tempo de enchimento, bem como reduzir também o tempo de oxidação dos compostos com as paredes da cava (CASTENDYK; EARY, 2009). A água superficial que será utilizada para o preenchimento da cava deve possuir uma qualidade elevada pelo fato de influenciar quimicamente na qualidade da água do futuro lago (CASTENDYK; EARY, 2009). Para o lago atingir as condições de equilíbrio químico e biológico, pode levar décadas.

As águas dos lagos de mineração provenientes da extração de materiais inertes (areia, minério de ferro, bauxita, cascalho, calcário, argila, etc.) tendem a espelhar a geoquímica do meio e, normalmente, possuem características de boa qualidade (GAMMONS *et al*., 2009). Já as águas dos lagos provenientes da extração de mineral sulfetado tendem a possuir baixo pH e concentrações médias a elevadas de metais pesados.

A qualidade da água e o sistema hidrológico dependem das características da mineração, do clima, do vento, das contribuições externas, da profundidade, dentre outras; auxiliam na definição das características que o lago de mineração terá, bem como na previsão dos prováveis usos e riscos que poderá apresentar.

A circulação dos lagos de mineração ocorre na forma meromítica (circulações verticais parciais) ou na holomítica (circulação vertical completa). Normalmente, os lagos de mineração apresentam característica meromítica devido à elevada profundidade e à área reduzida. Essa característica pode ser detectada através do cálculo da profundidade relativa do lago (88,6 x (profundidade máx / raiz quadrada da área superficial do lago)), embora existam outros fatores de interferência, como a ação dos ventos, a temperatura da água e a salinidade, apesar do fato de que o comportamento do lago possa se alterar com o passar dos anos (CASTENDYK; WEBSTER-BROWN, 2007; WENTD-POTTHOFF *et al*., 2011; BOEHER; SCHULTZE, 2008; GAMMONS; DUAIME, 2006). Os lagos de mineração possuem profundidade relativa entre 10 e 40% (CASTRO; MOORE, 2000).

O lago meromítico possui uma parte denominada mixolímnio, que circula, e outra chamada monimolímnio, que não circula. O monimolímnio possui características químicas diferentes do mixolímnio, como, por exemplo, apresenta zona anóxica e elevada concentração de substâncias dissolvidas, embora a interface mixolímnio-monimolímnio possa sofrer influência da circulação (BOEHER; SCHULTZE, 2008; CASTENDYK; EARY, 2009). No monimolímnio, normalmente, a matéria orgânica é degradada a partir do consumo do nitrato e do sulfato presentes (BOEHER; SCHULTZE, 2008).

A estratificação térmica do lago pode ocorrer em qualquer época do ano. Mas para os lagos de mineração normalmente ocorre no inverno, quando a temperatura da camada superficial diminui e a diferença de temperatura entre as camadas também reduz, juntamente com a ação dos ventos, que favorece a circulação.
Durante o período de estratificação térmica, o lago se divide em, basicamente, três camadas: o epilímnio, o metalímnio, também conhecido como termoclima, e o hipolímnio. O epilímnio é onde ocorre a troca de calor entre as substâncias voláteis e a atmosfera, que não é constante durante a estratificação e, na maioria dos lagos, a sua espessura é definida pela ação dos ventos. O metalímnio é a camada do meio do lago, onde ocorrem a decomposição da maior parte da matéria orgânica e as reações físico-químicas, o consequente consumo de oxigênio dissolvido e a produção do mesmo a partir da atividade fotossintética (CASTENDYK; EARY, 2009). E na camada profunda, denominada hipolímnio, praticamente não ocorrem trocas com as camadas superiores e o transporte das substâncias dissolvidas pela variação da densidade é pequeno, sendo realizado na maior parte através da precipitação química e da sedimentação das partículas.

Os processos químicos que mais afetam a qualidade da água dos lagos de mineração são: no mixolímnio, a evaporação, a fotossíntese, a oxidação, a precipitação de metais, a dissolução de minerais expostos nas paredes submersas, a adsorção de partículas minerais e de matéria orgânica, dentre outros; no monimolímnio, a respiração a partir de carbono orgânico, a redução microbiana de sulfato, de nitrato, de óxidos de ferro e de manganês, dentre outros (GAMMONS *et al*., 2009).

O parâmetro mais importante para o estudo da qualidade é o pH, pois a concentração de grande parte dos metais e dos metalóides depende de suas variações; os organismos presentes no lago também sofrem interferência deste parâmetro (GAMMONS *et al*., 2009). Os lagos ácidos com pH < 4, tendem a possuir elevada concentração de cátions de metais traço e comuns como: Al^{3+}, Cu^{2+}, Fe^{2+}, Fe^{3+}, Mn^{2+}, Zn^{2+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+} e K^{+}, e os ânions originados do enxofre, que, normalmente, é o sulfato (GAMMONS *et al*., 2009; EARY, 1998). Nos lagos com pH neutro a alcalino, a concentração dos metais e dos cátions dependentes do pH é baixa, e é onde ocorre a maior concentração de íons bicarbonato.

O parâmetro oxigênio dissolvido (OD) em lagos de circulação completa apresenta-se em elevadas concentrações; já em lagos meromíticos, com o aumento da profundidade, a concentração se reduz, sendo utilizada, assim, para a degradação da matéria orgânica e nos processos oxidativos (GAMMONS *et al*., 2009).

Normalmente, os lagos de mineração possuem perfil oligotrófico (pobre em nutrientes). Alguns lagos, no início do enchimento, possuem elevadas concentrações de nitrato, de cianeto, dentre outros, oriundas de produtos utilizados durante a exploração da cava (GAMMONS *et al*., 2009). Para a realização dos processos químicos e biológicos, pode-se utilizar os nutrientes presentes na camada superficial do lago; em concentrações baixas de nutrientes o mesmo irá limitar a produtividade dos organismos oxidativos (GAMMONS *et al*., 2009). Os lagos de mineração ácidos, normalmente, possuem baixas concentrações de nitrato e nitrito e a concentração de nitrogênio aparece na forma de amônia, tendo como fator limitante o pH baixo (KUMAR, *et al.*, 2011).

O lago que é preenchido com o auxílio da água de rios tende a adquirir algumas características desta água, que auxiliam na melhora de qualidade da água do lago (BOEHER; SCHULTZE, 2008). No período de chuva, o lago recebe maior concentração de material suspenso, o que auxilia na renovação das águas profundas (BOEHER; SCHULTZE, 2008).

A hidrobiologia e, como consequência, a diversidade de espécies no lago são influenciadas pela qualidade da água de enchimento, pelo formato da cava, pelas características dos sedimentos provenientes da atividade minerária e dos poluentes, pelas condições de habitat, dentre outros (GAMMONS *et al.*, 2009).

Os lagos de mineração, por serem, normalmente, profundos e íngremes, tendem a apresentar meromixia e zona anóxica, assim, possuem as atividades biológica e química limitadas (GAMMONS *et al.*, 2009). Os lagos recém criados possuem menor atividade e diversidade biológica se comparados com os lagos mais velhos. O mesmo vale para os lagos de mineração que, com o passar dos anos, exibem a tendência de aumentar sua taxa de diversidade biológica (GAMMONS *et al.*, 2009). Como observado por España *et al*. (2008), os lagos ácidos de mineração meromíticos possuem camadas verticais bem definidas dos 15 aos 20 anos de formação e os lagos mais jovens possuem camadas estáveis, mais suscetíveis a circulação e a interferências externas.

Ao ocorrer o preenchimento da cava, os microorganismos tendem a se adaptar ao meio, pois, normalmente, essas cavas não são favoráveis para o aumento da sua taxa de diversidade. Eles influenciam no processo químico, na decomposição da matéria orgânica e, consequentemente, na qualidade da água (GAMMONS *et al.*, 2009). Quando os lagos de mineração são ácidos, eles possuem características distintas influenciáveis, principalmente, pelo baixo pH. Em ambientes com pH $\leq$ 3,5, o meio é impróprio para grande parte dos organismos, mas é possível, entretanto, encontrar bactérias acidofílicas, como a *Thiobaciillus ssp*., que auxiliam nos processos de oxidação (BAPTISTA, 2006, FARFAN, 2004).

O lago de mineração pode possuir funções de paisagismo, de recreação, de prática de esportes, de abastecimento, de recuperação do ambiente degradado, de piscicultura, de irrigação, de consumo animal, dentre outras (GAMMONS *et al*., 2009; SPERLING *et al*., 2004). É necessário um monitoramento prévio da qualidade da água para definir o tipo de uso adequado para cada lago e, após esta definição, deve ser realizado um monitoramento contínuo indicado para cada finalidade. No Brasil, há um projeto para o uso da área da mina de Águas Claras, onde serão construídos condomínios habitacionais, hotéis, centros esportivos e culturais, além do reflorestamento da área (DAMASCENO, E.; DAMASCENO, P., 2000).

Os problemas mais recorrentes nos lagos de mineração são a acidez e a salinidade do meio. Há, ainda, outros como a elevada concentração de metais e de metaloides; o excesso de alcalinidade ou de acidez; o risco de acidentes; a bioacumulação; a ocorrência de doenças hídricas e a presença de insetos. De acordo com as características do lago pode-se empregar diversas técnicas de remediação, como adsorção e sedimentação, tratamento químico e biológico, neutralização e precipitação/adsorção de metais, dentre outras (CASTENDYK; EARY, 2009; GAMMONS *et al*., 2009; AKCIL; KOLDAS, 2006).

A formação dos lagos de mineração é tema recente nas áreas da limnologia, da geoquímica e da hidrodinâmica, e por conseguinte há poucos dados relacionados à formação e ao monitoramento dos lagos de mineração no Brasil, principalmente aqueles que têm origem na mineração de grande porte. Assim, este trabalho possui o intuito de avaliar a qualidade da água, discutir os parâmetros analisados conforme a resolução CONAMA 357/05, o comportamento hidrodinâmico e os prováveis usos dos lagos estudados.

METODOLOGIA

O presente trabalho foi realizado no lago de Águas Claras, na mina de Águas Claras (mineração de ferro), no município de Nova Lima/MG e nos lagos Cava Norte e Cava Sul, na mina de Riacho dos Machados (mineração de ouro), no município de Riacho dos Machados/MG. Enquanto o lago de mineração da primeira mina encontra-se ainda em processo de enchimento, para a segunda mina esta etapa já foi encerrada.

A Mina de Águas Claras, iniciou a exploração em 1973, pela Mineradora MBR (Minerações Brasileiras Reunidas S/A), que pertence, atualmente, à empresa VALE, e as atividades foram encerradas em 2000/2001.

Com a exaustão, foi iniciado o processo de enchimento da cava em 2001 através do uso de águas subterrâneas, superficial (Ribeirão do Prata) e por precipitação pluviométrica, constituindo, então, o lago de mineração.

A mineração Riacho dos Machados foi implementada em 1989 pela Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) com operação até 1997; durante a exploração a céu aberto houve a formação de cavas (MINAS GERAIS a, 2011). Em 2007 o grupo canadense Carpathian Gold Inc. adquiriu o direito minerário e iniciou o plano para reativação da mina.

Para a execução dos objetivos propostos, foram utilizados dados de monitoramento de coletas realizadas pelas empresas e relatórios internos das mesmas, com a ressalva de que as informações são fornecidas pelas empresas e que não possuem os mesmos parâmetros analisados na sua totalidade.

Os lagos são analisados separadamente por serem de diferentes tipos de extração e de composição mineral e por estarem em regiões com características distintas. Assim como são diferentes as possíveis interferências que venham a sofrer.

As características hidrodinâmicas e limnológicas dos lagos são analisadas a partir de dados secundários fornecidos pelas empresas, como a profundidade relativa do meio, os parâmetros temperatura, profundidade, pH, oxigenação do meio, teor de metais e de metalóides, potencial redox, condutividade, características do meio (mineral extraído) e possíveis intervenções (contribuição externa).

A qualidade das águas foi avaliada a partir das análises de monitoramento de dados secundários dos lagos existentes. Quando possível, foram construídos gráficos da concentração em função do tempo utilizando-se o *software* Microsoft Office Excel 2010, produzido pela Microsoft.

O método de análises dos parâmetros segue o "*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*" para todos os parâmetros usados, com exceção do Sulfato pelo método EPA 300.1 para as análises de Riacho dos Machados.

As amostras coletadas para o Lago Águas Claras foram de frequência mensal de fevereiro de 2001 a maio de 2007, e os lagos de Riacho dos Machados, de novembro de 1999 a fevereiro 2011, com frequência alternada de 2 em 2 meses ou em maior espaço de tempo.

Para o tratamento estatístico dos dados, o limite de detecção do método utilizado é o menor resultado que está sendo considerado e os dados de amostras não coletadas, consideradas como dado faltante.

A partir dos dados obtidos, foi realizada a estatística descritiva utilizando-se o *software* Microsoft Office Excel 2010.

Os testes estatísticos empregados foram aqueles para populações não normais, testes não paramétricos.
Foram plotados gráficos da distribuição de frequência (histograma) com o "p" do *Shapiro Wilk W test*, a fim de verificar a normalidade dos dados e a concentração de resultados para cada parâmetro ($p < 0,05$, distribuição não normal).

O teste não paramétrico *Kruskal-Wallis* é utilizado para diferença entre grupos independentes com múltiplas amostras (OLIVEIRA, 2012). Esse teste foi realizado a partir dos dados de cada parâmetro somente para o

lago de Águas Claras; correlacionado com a profundidade $p < 0,05$, existe diferença significativa entre a superfície e o fundo.

De acordo com Oliveira (2012), o teste U de *Mann-Whitney* é aplicável para diferença entre grupos independentes com duas amostras. Esse teste foi empregado correlacionando-se os parâmetros com o período climático (chuvoso e seco), e o "p" foi inserido no *box-plot* ($p < 0,05$, existe diferença significativa entre o período de chuva e de seca). O período de seca considerado é de abril a setembro.

RESULTADOS

ÁGUAS CLARAS

De acordo com Grandchamp (2003), estima-se que o lago, para obter a formação completa, leve de 15 a 22 anos contados a partir do final de 2002, dependendo da contribuição externa, portanto, entre 2017 e 2024 estará formado. Após a formação completa, o lago possuirá 234 metros de profundidade (mais profundo do país) e área de 0,67 km², com um volume total de 58 milhões de m³ e profundidade relativa (Z_r) de 25% (SPERLING *et al.*, 2004; GRANDCHAMP *et al.*, 2001).

Durante o início do enchimento do lago de Águas Claras, o mesmo registrava temperatura da água regularmente superior à do ar, apresentando, portanto uma característica hipotérmica ($T_{água} > T_{ar}$) até março/2005, atribuída à pequena dimensão do lago e à ação dos ventos. A partir de abril/2005, o lago passou para a condição hipertérmica ($T_{água} < T_{ar}$), que é o padrão habitual de lagos e represas. A temperatura superficial da água é superior a do fundo, devido à relação inversa da temperatura com a densidade.

Durante as estações de inverno e verão nota-se mais facilmente as oscilações de temperatura presente no meio. No período de verão as temperaturas entre as camadas oscilaram em até 5,5ºC, No inverno as temperaturas das camadas tendem a se aproximar devido à menor oscilação entre as mesmas. Assim, as camadas com densidades próximas ficam susceptíveis à circulação da massa líquida, dependendo da ação dos ventos. Durante a estratificação do lago de Águas Claras, constatou-se a formação de camadas do epilímnio, metalímnio e hipolímnio bem definidas. Por se tratar de uma cava muito profunda e cônica, espera-se que o hipolímnio seria maior do que a as demais camadas, o que foi constatado em 2007, onde delimitou-se de 5 a 10 metros a espessura do epilímnio e 80 metros a do hipolímnio de acordo com Sperling (2007).

Por Águas Claras ser um lago de mineração, a concentração de sais dissolvidos é alta, principalmente no período de enchimento. A turbidez atendeu a classe 1 CONAMA 357/05, exceto em duas amostras. Os baixos resultados foram atribuídos à pequena contribuição superficial e baixa velocidade de escoamento.

O pH do lago de Águas Claras (figura 1) atendeu a CONAMA 357/05 classe 1 e 2, exceto em 6 amostras, estas com resultados entre 9,1 a 9,6 na superfície. De acordo com os resultados obtidos, não foi observada interferência sazonal nos teores resultados de pH no gráfico de série temporal. O pH da superfície, proveniente da atividade fotossintética dos fitoplânctons, tende a ser maior que o do fundo, além de contribuir para a elevação do pH do meio.

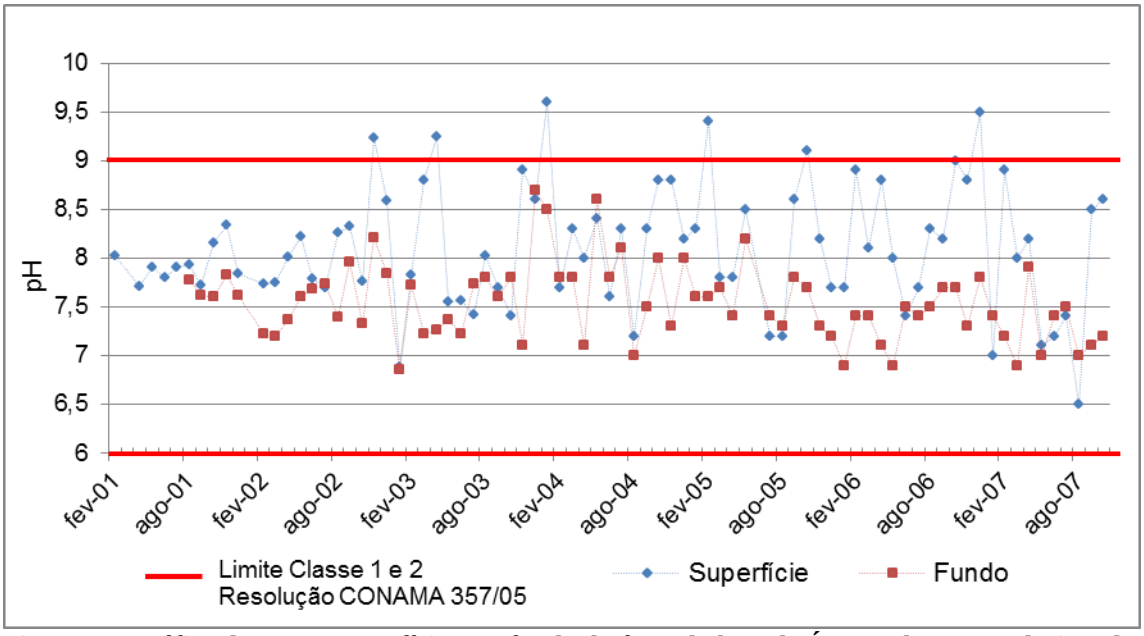

Figura 1 – Gráfico do pH na superfície e no fundo da água do lago de Águas Claras correlacionado com o limite estabelecido pela CONAMA 357/05.

A concentração de oxigênio dissolvido no lago de Águas Claras (figura 2) durante o processo de enchimento mostrou no geral bons resultados, atendendo à classe 2 da CONAMA 357/05, exceto em 5 amostras de água profunda. O oxigênio dissolvido possui maiores concentrações nas camadas superficiais devido à atividade fotossintética, apresentando supersaturação em 6 amostras (> 9 mg/L). Observou-se que, no período do inverno, as baixas temperaturas favorecem a dissolução de gases no meio, com a consequente redução das oscilações de concentrações entre as camadas, assim predispondo à circulação da massa líquida. Com o aumento da profundidade do lago, a camada profunda tende a reduzir sua concentração de oxigênio dissolvido, podendo ocorrer a formação de uma zona anóxica, como abordado por Castendy e Eary (2009) e Gammmons *et al*. (2009).

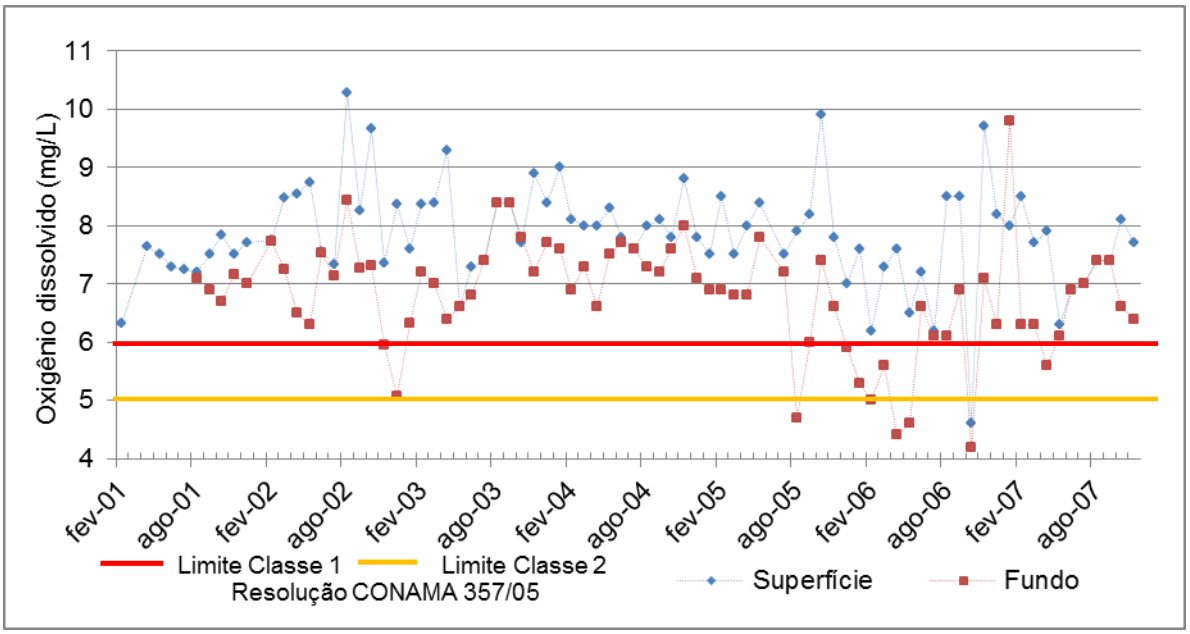

Figura 2 – Gráfico da concentração de oxigênio dissolvido na superfície e no fundo da água do lago de Águas Claras correlacionado com os limites estabelecidos pela CONAMA 357/05.

O lago possui baixa concentração de DBO, atendendo à classe 1 da CONAMA 357/05 exceto em duas amostras (4,26 e 5,8 mg/L). Os maiores teores foram obtidos no período chuvoso devido à maior concentração de material aportado e na superfície, onde ocorre a decomposição da matéria orgânica.

Para os principais nutrientes que favorecem a eutrofização, a série nitrogenada obteve pequenos teores e todos atenderam ao limite da CONAMA 357/05 para a classe 1 e 2. O mesmo não ocorreu para o fosfato total que, em diversas amostras, não atendeu ao referido limite. Observou-se que os maiores resultados foram obtidos no início do enchimento e no período chuvoso, sendo isto atribuído ao carreamento do solo, decomposição da matéria orgânica e possível dissolução das rochas no primeiro momento. Com o aumento da profundidade o teor de fosfato total reduziu-se.

Para os metais ferro e manganês, o estado de Minas Gerais principalmente a área conhecida como Quadrilátero Ferrífero, apresenta seus teores superiores às demais regiões, tanto nos rios e lagos quanto nas águas subterrâneas. O lago de Águas Claras, por ser oriundo da exploração de ferro, tende a apresentar teores mais elevados, como comprovado nas análises de ferro total através da figura 3.

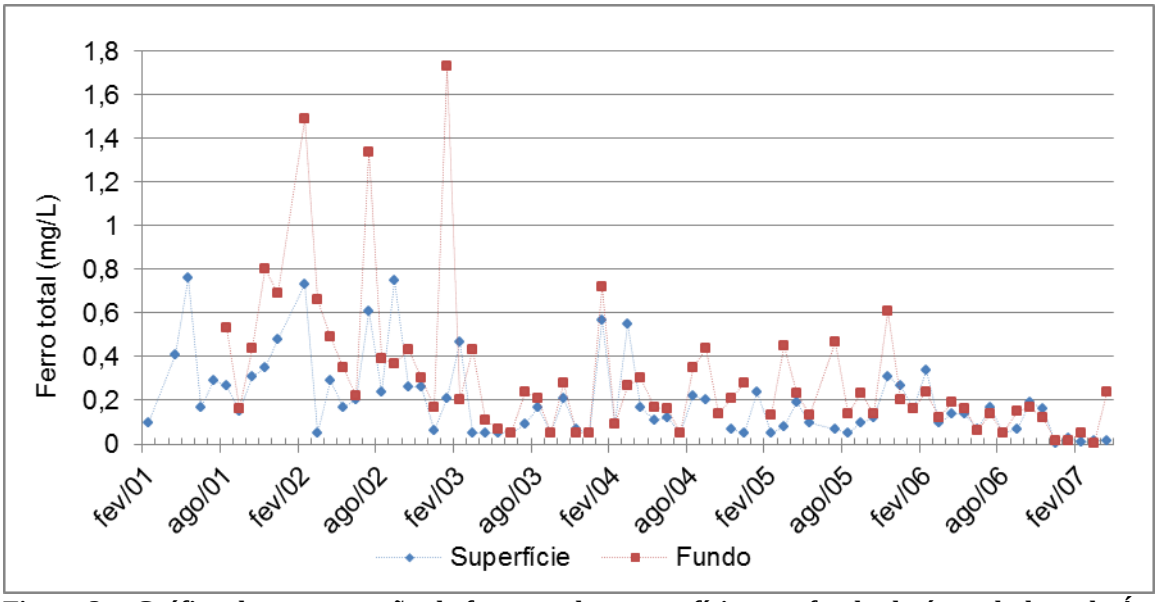

Figura 3 – Gráfico da concentração de ferro total na superfície e no fundo da água do lago de Águas Claras.

Para o ferro solúvel todas as amostras atenderam à CONAMA 357/05, classes 1 e 2. O mesmo ocorreu para o caso do manganês, cujos teores tendem a reduzir-se com o gradativo enchimento do lago.

Os resultados de sulfato ficaram bem abaixo do limite estabelecido pela CONAMA 357/05 classes 1 e 2 (250 mg/L) variando de 9,1 mg/L a 26,1 mg/L.

Os resultados bacteriológicos de coliformes fecais e *E.coli* foram satisfatórios, por atenderem a CONAMA 357/05 quase em sua totalidade, sendo que os maiores teores foram obtidos no período chuvoso.

A partir da estatística descritiva do conjunto de dados, conclui-se que o lago atende todos os parâmetros analisados que estão dispostos na resolução CONAMA 357/05 para a classe 2.

A partir do teste de normalidade dos dados (*Shapiro Wilk W test*), tem-se que não existe distribuição normal dos dados analisados para o lago de Águas Claras.

O teste não paramétrico *Kruskal-Wallis* realizado entre a superfície e o fundo, indica diferença significativa para os parâmetros DBO, OD, pH, ferro total e temperatura. Segundo Castro e Moore (2000), com o aumento da profundidade, algumas características e concentrações do lago tendem a serem diferentes entre as camadas.

Como observado no lago, o OD é consumido e pode apresentar zonas anóxicas na camada profunda; o ferro possui maior concentração no fundo devido à própria exploração da cava.

A partir do teste de *Mann-Whitney U* verifica a interferência de sazonalidade do lago, sendo que o teste foi realizado com as amostras de superfície e de fundo. As amostra de superfície apresentaram diferença significativa entre os períodos de seca e chuva nos parâmetros alcalinidade, dureza, DBO, pH, temperatura e turbidez, a alcalinidade e a dureza apresentaram maiores concentrações no período da seca e os demais no período chuvoso. Para as amostras de fundo apresentaram diferença significativa os parâmetros fosfato total e turbidez, com maiores concentrações no período chuvoso.

RIACHO DOS MACHADOS

O lago Cava Norte possui área superficial de 22.644 m², profundidade máxima de 27 metros, dimensões aproximadas de 300 por 100 metros e volume próximo de 378.748 m³. Esta cava recebe o lixiviado das pilhas de estéreis (MINAS GERAIS b., 2011), e iniciou a contenção da drenagem ácida em 2002. O lago Cava Sul possui volume aproximado de 221.195 m³; as dimensões da cava são de 300 por 70 metros, área superficial de 17.489 m² e profundidade máxima de 16 metros (MINAS GERAIS a., 2011).

Os lagos Cava Norte e Cava Sul, possuem Zr de 15,9% e 10,7%, fato característico de lagos de mineração, conforme destacado por Castro e Moore (2000), com tendência a meromixia $Z_r > 5\%$, se comparado com os lagos naturais. Apenas os valores de Z_r não são possíveis para determinar o comportamento hidrodinâmico destes lagos, sendo necessários, portanto, mais dados de monitoramento, como de densidade, para o cálculo da RTR, para que se possa verificar a estabilidade do lago.

Os valores de pH dos lagos Cava Norte e Cava Sul são distintos, principalmente antes da correção da drenagem ácida da mina, como pode ser observado na figura 4.

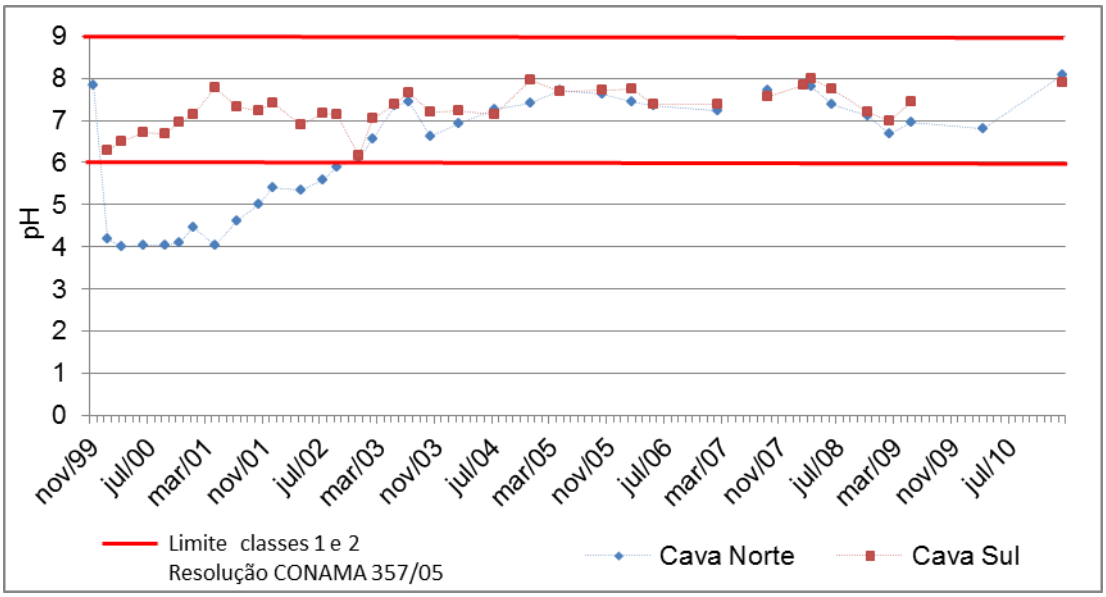

Figura 4 – Gráfico do pH nos lagos Cava Norte e Sul, correlacionado com o limite estabelecido pela CONAMA 357/05.

A Cava Norte, após o fechamento da mina, recebia a carga da drenagem das pilhas de estéreis, e possuía reduzido pH, que influenciou a acidez do lago. A Cava Sul não recebe influência de drenagem ácida da mina, assim, isso caracteriza uma água sem predisposição direta à acidez, dependendo, exclusivamente, da composição mineral da cava, de eventuais contribuições externas e de ações de intemperismo. O lago Cava Sul atendeu em todas as amostras a resolução CONAMA 357/05, já o lago Cava Norte somente a partir de dezembro de 2002.

O baixo pH do lago Cava Norte foi atribuído ao recebimento da drenagem ácida da mina, pois, após a correção da DAM, o lago revelou tendência ao pH neutro, apresentando pH próximo ao da Cava Sul. Embora a exploração da mina seja de arsenopirita, o fato do pH dos lagos tenderem à neutralidade se dá por meio da condição presente no lago. Como a região é rica em carbonatos, há ocorrência do tamponamento natural do meio, como destacado por Gammons *et* al. (2009), Duthe *et* al. (2011) e Lapakko (2002).

A análise do arsênio (figura 5) atendeu à deliberação normativa COPAM 10/86 (< 0,05 mg/L) do início do monitoramento até outubro/2003; após este período o limite de detecção da análise reduziu-se para < 0,01 mg/L, que é o estabelecido pela resolução CONAMA 357/05.

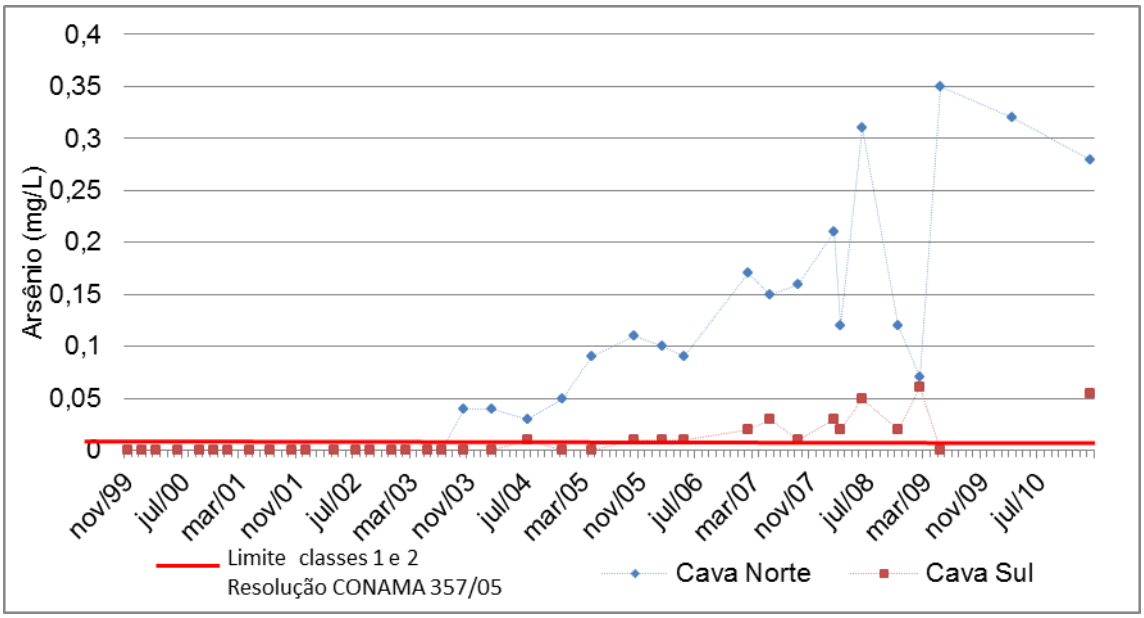

Figura 5 – Gráfico da concentração de arsênio nos lagos Cava Norte e Sul, correlacionada com o limite estabelecido pela CONAMA 357/05.

Cabe ressaltar que, além da própria composição da cava, a Cava Norte recebia o lixiviado das pilhas de estéril, predispondo a maior concentração deste elemento. Comparando-se o pH com o arsênio após as medidas de contenção da drenagem ácida, notou-se que a concentração do arsênio aumentou com a elevação do pH. A Cava Sul possui concentração de arsênio inferior à da Cava Norte e o pH não influenciou na concentração do arsênio, uma vez que o lago não recebeu lixiviado e não houve grandes oscilações.

O cádmio embora seja influenciado pelas águas ácidas, atendeu ao limite da resolução CONAMA 357/05 (0,001 mg/L) em grande parte do monitoramento. Na Cava Norte, não atendeu nas amostras de setembro de 2001 a dezembro de 2001, exceto em julho de 2001, e uma amostra pontual em fevereiro de 2003, estes valores foram atribuídos ao baixo pH do meio. Para a Cava Sul, todas as amostras de cádmio analisadas atenderam à resolução CONAMA 357/05.

A concentração de cobre em pH ácido tende a ser maior que em pH neutro a alcalino. Este fato pode ser observado no lago Cava Norte antes das medidas corretivas da drenagem ácida. O lago apresentou dez amostras no início e quatro amostras no decorrer do monitoramento acima do limite de detecção (< 0,01 mg/L). No lago Cava Sul somente duas amostras foram acima do limite de detecção.

O parâmetro sulfato é indicador de drenagem ácida da mina, como retratado por Farfan (2004) e Gammons *et al.* (2009) e a elevada concentração de sulfato no meio é um forte indício de pH baixo devido às reações de oxidação. As figuras 5 e 6 demonstram a concentração de sulfato correlacionado com o pH nos lagos Cava Norte e Sul, respectivamente.

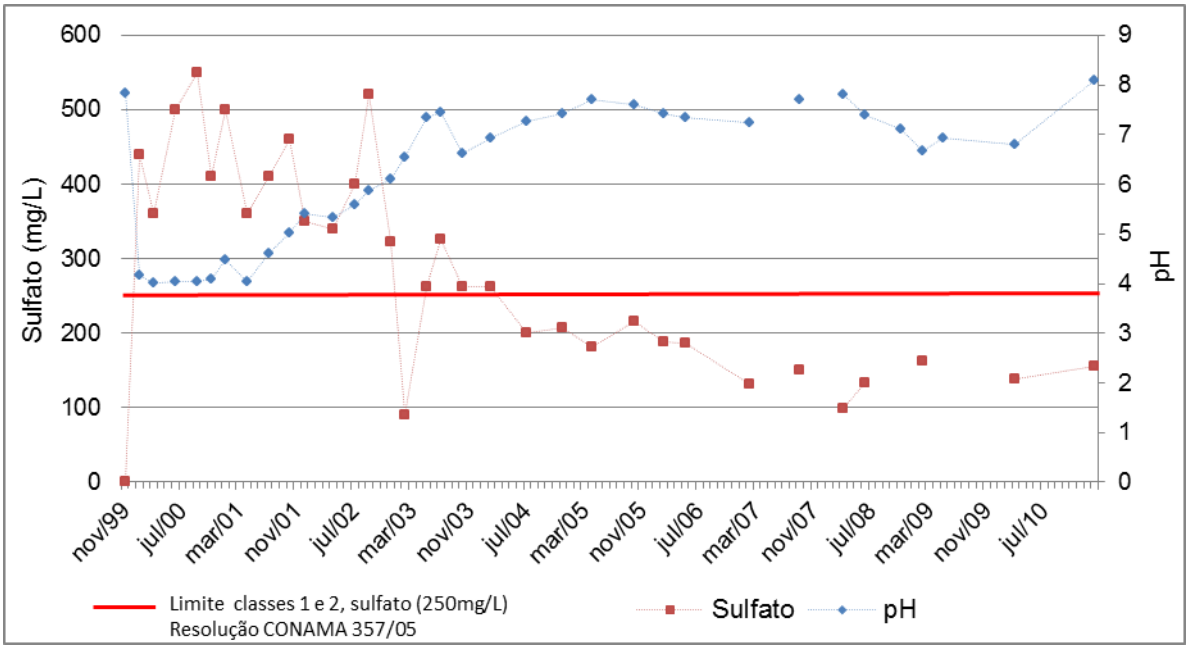

Figura 6 – Gráfico da concentração de sulfato no lago Cava Norte correlacionada com o pH, com o limite estabelecido pela CONAMA 357/05 do sulfato.

Pôde-se notar (figura 6) que, na Cava Norte, houve influência da drenagem ácida da mina, uma vez que a cava recebia o lixiviado das pilhas de estéreis contendo elevada concentração de enxofre proveniente da composição mineralógica da mina. As concentrações de sulfato no lago de fato reduziram após fevereiro de 2004 (262 mg/L, 6,93) quando a última amostra apresentou concentração superior ao limite da resolução CONAMA 357/05 (250 mg/L). Após este período, a maior concentração apresentada foi de 207,0 mg/L (pH 7,42) e a menor de 98,7 mg/L (pH 7,80).

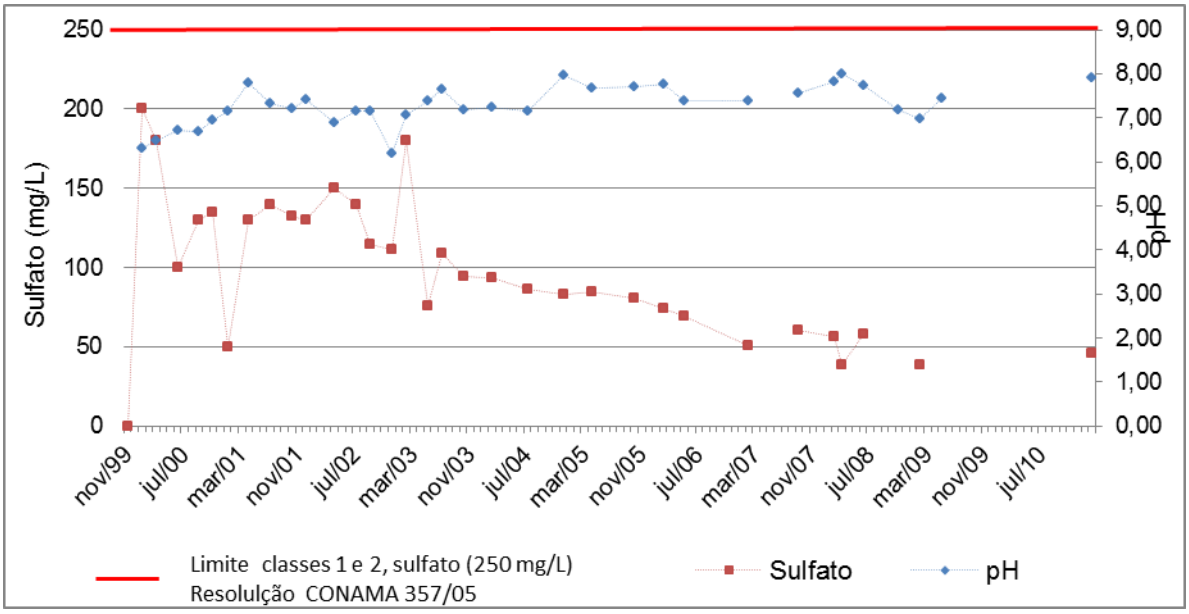

Figura 7 – Gráfico da concentração de sulfato correlacionada com o pH no lago Cava Sul, com o limite estabelecido pela CONAMA 357/05 do sulfato.

Na Cava Sul, a menor concentração ocorreu na primeira amostra < 0,001 mg/L (valor atípico). Embora todas as amostras tenham atendido à resolução CONAMA 357/05 (250 mg/L), pôde-se observar a presença de enxofre na forma de sulfato na Cava Sul, fato atribuído à composição da cava, pois o mineral extraído possuía a presença de enxofre em sua composição.

O limite do zinco estabelecido pela resolução CONAMA 357/05 é de 0,18 mg/L para as classes 1 e 2. O zinco é influenciável pelas águas ácidas, que predispõem a solubilidade do mesmo. O lago Cava Norte a partir de julho de 2003, atendeu à resolução CONAMA 357/05, antes deste período possuía concentrações superiores ao limite estabelecido e somente após as medidas de contenção da drenagem ácida sua concentração começou a reduzir. O lago Cava Sul atendeu em todas as amostras de zinco a resolução CONAMA 357/05.

A análise da estatística descritiva dos lagos indica que ambos os ambientes possuíram mediana superior ao limite estabelecido pela resolução CONAMA 357/05 para o arsênio, valendo ressaltar a mudança da legislação no decorrer do monitoramento. A partir da mediana dos dados analisados os parâmetros cádmio, zinco e o pH atenderam a resolução CONAMA 357/05 em ambos os lagos. O sulfato somente atendeu a resolução CONAMA 357/05 para o lago Cava Sul.

O teste de distribuição normal dos dados aponta que somente o pH no lago Cava Sul e o sulfato em ambos os lagos possuem distribuição normal.

Conforme o teste de sazonalidade de *Mann-Whitney U* para os lagos Cava Norte e Cava Sul, observou-se que não existe diferença significativa dos parâmetros analisados entre os períodos de seca e chuva.

CONCLUSÕES

Conclui-se que o lago de Águas Claras possui boa qualidade de água, por esta atender às legislações CONAMA 357/05 e COPAM-CERH 05/08, para grande parte dos parâmetros da classe 1 e 2 para a série temporal. O pH é levemente alcalino e há baixos teores de minerais dissolvidos, o que para um lago de mineração é extremamente satisfatório, principalmente devido as condições geológicas da cava e das águas de enchimento.

Durante o processo de enchimento do lago de Águas Claras, nota-se as interferências sazonais, as condições e períodos favoráveis para a circulação vertical da massa líquida e da estratificação. Destaca-se o período de circulação durante o inverno, favorecido pela ação dos ventos a partir da redução da diferença entre a temperatura das camadas e consequente aumento da densidade, bem como da dissolução do oxigênio no meio ocasionado pela redução da temperatura. O lago tem carácter meromítico, ou seja, circulação parcial, com consequente ausência de oxigênio dissolvido no hipolímnio devido à elevada profundidade.

A partir das analises estatísticas do lago de Águas Claras, observou-se que, no conjunto de dados para a estatística descritiva, todos os parâmetros analisados atenderam à resolução CONAMA 357/05. O lago não possui distribuição normal dados de nenhum parâmetro do conjunto de resultados analisado. Na avaliação espacial do lago, observou-se que há diferença significativa para DBO, OD, ferro total, pH e temperatura entre o fundo e a superfície. Para a avaliação sazonal, observou-se que existe diferença significativa entre os períodos na superfície para os parâmetros alcalinidade, DBO, dureza, pH, temperatura e turbidez e, no fundo, para os parâmetros fosfato total e turbidez.

De acordo com o padrão de balneabilidade CONAMA 274/00, o lago de Águas Claras pode ser classificado com o padrão excelente. Além de estar apto ao contato primário o lago pode ser utilizado para prática de esportes, como mergulho, natação, paisagismo, pesca, após análises de metais nos peixes e futuramente o uso da água para consumo após tratamento adequado. Como problemas o principal é o risco de afogamento e acidentes devido à elevada profundidade, necessitando sinalização, monitoramento e cercamento do local.

A partir das análises realizadas para o lago Cava Norte da mina de Riacho dos Machados, conclui-se que, após as medidas de correção da drenagem ácida da mina e a retirada do lixiviado das pilhas de estéreis, houve uma expressiva melhora no aumento do pH e na redução da concentração dos parâmetros dependentes do pH, exceto do arsênio, que, com a elevação do pH, apresentou um aumento na sua concentração.

Apesar de não se ter mostrado as coletas de todos os períodos estudados para os lagos Cava Norte e Cava Sul, pode-se concluir que os lagos atendem a maior parte dos parâmetros avaliados às classes 1 e 2 da resolução CONAMA 357/05.

No que se refere às características limnológicas e comportamento hidrodinâmico, não se pode definir as circulações dos lagos, tendo em vista a falta de dados, porém, eles possuem características de lagos meromíticos pelo fato de a profundidade relativa ser próxima de 15,9% para a Cava Norte e 10,7% para a Cava Sul.

A partir das análises da estatística descritiva para os lagos Cava Norte e Cava Sul a mediana dos resultados obtidos somente não atendeu para o parâmetros arsênio em ambos os lagos (0,05 mg/L), valendo ressaltar que houve alteração na legislação durante o monitoramento, reduzindo-se o limite para (0,01 mg/L) e para o sulfato na Cava Norte, atribuído ao recebimento do lixiviado das pilhas de estéreis. Somente o sulfato possui distribuição normal em ambos os lagos e o pH possui essa mesma distribuição apenas para a Cava Sul. Na avaliação de sazonalidade, ambos os lagos não possuem diferença significativa nos parâmetros analisados.

Ademais, para os lagos da mina de Riacho dos Machados, é necessário análise de uma gama maior de parâmetros, como oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, condutividade, dureza, alcalinidade, potencial redox, turbidez, série nitrogenada, fósforo total, ferro total e *E.coli*, bem como os parâmetros já avaliados na forma dissolvida, a fim de atender à resolução CONAMA 357/05 e de auxiliar em um melhor diagnóstico de quais seriam os prováveis usos dos lagos, além do paisagismo.

Conclui-se que o lago de Águas Claras e os lagos da mina de Riacho dos Machados possuem características significativamente distintas nos períodos de seca e de chuva para o parâmetro pH e semelhantes para o sulfato, fato este atribuído a características do meio e da região. Os lagos possuem potencial uso para a comunidade, como por exemplo através da criação de parques.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AKCIL, A.; KOLDAS, S. Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies**. Journal of Cleaner Production**, 14, p.1139-1145, 2006, doi:10.1016/j.jclepro.2004.09.006.
2. APHA; AWWA; WEF**. Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20. ed.. Washington: APHA,1998.
3. BAPTISTA, Melissa Guimarães**. Estudo da qualidade da água, da sucessão ecológica e descrição da comunidade planctônica do lago de mineração de Águas Claras**. 2006. 90f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
4. BOEHER, B.; SCHULTZE. M. Stratification of lakes. **Reviews of Geophysics**, 46, p. 1-27, RG2005, P.N. 2006RG000210, 2008.
5. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 274 de 29 de novembro de 2000. Dispõe sobre os parâmetros de qualidade da água para balneabilidade e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, Retificado em 27 de agosto de 2001.
6. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357 de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 18 de março de 2005.
7. CASTENDYK, D. N.; EARY, L. E. **Mine pit lakes: characteristics, predictive modeling and sustainability**. Littleton, Colorado, USA: SME, 2009. p. 304.
8. CASTENDYK, D. N.; WEBSTER-BROWN, J, G. Sensitivity analyses in pit lake prediction, Martha Mine, New Zealand 1: Relationship between turnover and input water density. **Chemical Geology**, 244, p. 42-55, 2007.
9. CASTRO, J.M. MOORE, J.N. Pit lakes: their characteristics and the potential for their remediation. **Environmental Geology**, 39 (11), p. 1254-1260, 2000.
10. CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL. Deliberação Normativa COPAM n.º 10, de 16 de dezembro de 1986. Estabelece normas e padrões para qualidade das águas, lançamento de efluentes e dá outras providências. **Publicação: Diário do Executivo – "Minas Gerais",** Belo Horizonte, 10 de janeiro de 1987.
11. CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL; CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DE MINAS GERAIS. Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERHMG n.º1, de 05 de maio de 2008. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento e

estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. **Publicação: Diário do Executivo – "Minas Gerais"**, Belo Horizonte, 13 de maio de 2008.

12. DAMASCENO, E. C.; DAMASCENO, P. de T. Reutilização de cavas de minas a céu aberto desativadas em região metropolitanas: exemplos brasileiros. In: VILLAS BÔAS, R. C.; BARRETO, M. L**. Cierre de Minas: experiencias en iberoamerica**. Rio de Janeiro: CYTED/IMAAC/UNIDO, 2000, p. 581. Módulo VII, p. 512-515.
13. DUTHE, D.; MAHONEY, J. J;, SHCHIPANSKY, A. A.; TERRELL, C. Assessment of the Process of Pit lake formation and associated geochemistry in open Pits – Mupane gold mine, Botswana. **Mine Water – Managing the Challenges**, Aachen-Germany, p. 511-516, IMWA, 2011.
14. ESPAÑA, J. S.; PAMO, E. L.; PASTOR, E. S.; ERCILLA, M. D. The acidic mine pit lakes of the Iberian Pyrite Belt: An approach to their physical limnology and hydrogeochemistry. **Applied Geochemistry**, 23, p. 1260-1287, 2008, doi:10.1016/j.apgeochem.2007.12.036.
15. FARFAN, J. R.; BARBOSA FILHO, O.; SOUZA, V.P. **Avaliação do potencial de drenagem ácida de rejeitos da indústria mineral**. Rio de Janeiro: CETEM, 2004. p. 58.
16. GAMMONS, C. H.; DUAIME, T. E. Long Term Changes in the Limnology and Geochemistry of the Berkeley Pit Lake, Butte, Montana. **Mine Water and the Environment**, 25, p 76-85, IMWA, 2006.
17. GAMMONS, C. H.; HARRIS, L. N.; CASTRO, J. M.; COTT P. A.; HANNA, B. W. **Creating lakes from open pit mines: processes and considerations - with emphasis on northern environments**. In CANADIAN TECHNICAL REPORT OF FISHERIES AND AQUATIC SCIENCES 2826, 2009. ISSN 0706-6457.
18. GRANDCHAMP, C. A. P.; BERTACHINI, A. C.; SPERLING, E. von; ALMEIDA, D. C. de. Águas Claras Mine – A successful dewatering story. **Simpósio**, IMWA, 2001.
19. KUMAR, R. N.; MCCULLOUGH, C. D.; LUND, M. A.; LARRANAGA, S. A. Evaluating the factors limiting algal biomass in acidic pit lakes of the collie lake district, Western Australia. **Mine Water – Managing the Challenges**, Aachen-Germany, p. 523-528, IMWA, 2011.
20. LAPAKKO, K. **Metal Mine Rock and Waste Characterization Tools: An Overview**. In MINING, MINERALS AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT, International Institute for Environment and Development, n. 67, 31f., 2002.
21. MINAS GERAIS. SECRETARIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL [SEMAD]; Superintendência Regional de Regularização Ambiental [SUPRAM]. **NM nº 1253/2010**, MARÇO/2011 a. Carpathian Gold Inc. Caracterização do Solo, Águas Subterrâneas e Superficiais na Mineração Riacho dos Machados (Riacho dos Machados/MG). SUPRAM NORTE, Montes Claros/MG.
22. MINAS GERAIS. SECRETARIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL [SEMAD]; Superintendência Regional de Regularização Ambiental [SUPRAM**]. NM nº 1253/2010**, MARÇO/2011 b. Carpathian Gold Inc. Relatório de Atendimento às Informações Complementares da Mineração Riacho dos Machados (Riacho dos Machados/MG). SUPRAM NORTE, Montes Claros/MG.
23. OLIVEIRA, S. C. Notas de aula: Tratamento estatístico de dados ambientais ESA 944 Parte 2. In: Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG. **Apostila**. 76f., 2012.
24. SPERLING, E. von. Relatório sobre a qualidade da água durante o processo de enchimento da cava da Mina de Águas Claras. **Relatório Interno MBR**, 2007.
25. SPERLING, E. von; JARDIM, F. A.; GRANDCHAMP, C. A. P. Qualidade da água durante a formação de lagos profundos em cavas de mineração: estudo de caso do lago de Águas Claras – MG. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 9, n. 3, p. 250-259, 2004.
26. VILLAIN, L.; SUNDSTRÖM, N.; PERTTU, N.; ALAKANGAS, L.: ÖHLANDER, B. Geophysical investigations to identify groundwater pathways at a small open-pit copper mine reclaimed by backfilling and sealing. **Mine Water – Managing the Challenges**, Aachen-Germany, p. 71-76, IMWA, 2011.
27. WENDT-POTTHOFF, K.; KOSCHORRECK, M.; ERCILLA, M. D.; ESPAÑA, J. S. Microbial activity and biogeochemical cycling in a nutrient rich meromictic acid pit lake. **Limnologica**, 14f., 2011, doi: 10.1016/j.limno.2011.10.004.