

# Avaliação ambiental para restauração hidrológica e fluvial em áreas degradadas por atividades de mineração

Submissão: 16/04/14

Revisão: 01/06/14

Aprovação: 09/12/14

Priscilla Moura, Adriana Cardoso, Ana Clara Santos e Márcio Baptista

**RESUMO:** As atividades de mineração, fundamentais no atual contexto econômico brasileiro, provocam impactos ambientais significativos não só durante a exploração mas também após a cessação das atividades, deixando áreas extremamente degradadas tendo em vista as significativas alterações morfológicas, ecológicas e hidrológicas introduzidas, frequentemente com características de irreversibilidade. Para a restauração das áreas degradadas, em sintonia com a legislação ambiental vigente, o estabelecimento de ferramentas e procedimentos de análise que possibilitem identificar o estado de degradação e avaliar alternativas de restauração parece oportuno, à luz do caráter interdisciplinar da questão. O presente artigo apresenta uma metodologia destinada a subsidiar a concepção de alternativas para restauração hidrológica e fluvial das áreas degradadas por atividades minerárias. Assim, com base no diagnóstico do estado de degradação dos cursos de água e do seu potencial de restauração, podem ser estabelecidos cenários de restauração fluvial e reabilitação morfológica e ecológica da área degradada. Em seguida, realiza-se a avaliação hidrológica por meio da comparação da situação inicial da área com as alternativas delimitadas com o uso de indicadores de quantidade, qualidade e regime. A metodologia proposta foi aplicada a uma área minerada localizada no quadrilátero ferrífero em Minas Gerais, tendo se mostrado pertinente e com potencial para aplicação em outros locais degradados.

**PALAVRAS CHAVE:** restauração fluvial, avaliação de impactos ambientais, restauração de áreas degradadas, mineração

**ABSTRACT:** Mining activities, essential in the current Brazilian economic context, cause significant environmental impacts not only during the exploitation phase but also after the activities cease, leaving extremely degraded areas with major, often irreversible morphological, ecological and hydrological changes introduced. It appears appropriate to establish tools and analysis procedures that allow the identification of the state of degradation and assessing alternatives for restoration, seeing that it is interdisciplinary.

This article presents a methodology designed to support the development of alternatives for hydrological and fluvial restoration of areas altered by mining activities. Thus, based on the assessment of the degradation of watercourses and on their potential for restoration, river restoration scenarios can be established, leading to morphological and ecological rehabilitation of the degraded area. Then a hydrological evaluation employing indicators of quantity, quality and regime is performed, comparing the initial situation of the area with the alternatives outlined. The proposed methodology, was applied to a mining area located in Minas Gerais, and was shown to be pertinent and with potential for use in other disturbed areas.

**KEY WORDS:** fluvial restoration, evaluation of environmental impacts, restoration of degraded areas, mining

## INTRODUÇÃO

As atividades de mineração são, historicamente, essenciais nos processos produtivos industriais. No atual contexto brasileiro, com acentuada concentração da exportação na forma de commodities, constata-se a grande, e ainda crescente, importância do setor. De fato, ao setor correspondem cerca de 20% das exportações brasileiras, sendo responsável por mais de 50% do saldo da balança comercial (DNPM, 2013).

A exploração das lavras, notadamente na forma de minas a céu aberto, provoca impactos ambien-

tais significativos não só durante sua operação mas também após a cessação das atividades, deixando áreas extremamente degradadas, tendo em vista as significativas alterações morfológicas, ecológicas e hidrológicas inerentes aos processos de extração e beneficiamento dos minérios.

Segundo Bitar (1997), os principais impactos ambientais consistem em: (i) supressão da vegetação; (ii) reconfiguração de superfícies topográficas; (iii) impacto visual; (iii) aceleração de processos erosivos e assoreamento de cursos d'água; (iv) indução de escorregamentos; (v) modificação de cursos d'água;

(vi) aumento da turbidez e da quantidade de resíduos sólidos em suspensão em corpos receptores; (vii) interceptação do lençol freático e mudanças na dinâmica de movimentação das águas subterrâneas; (viii) inundações a jusante e (ix) aumento da emissão de gases e partículas em suspensão no ar.

Do ponto de vista específico dos recursos hídricos, salienta-se que as vastas alterações topográficas implicam, em alguns casos, em mudanças na própria configuração das bacias hidrográficas; a perturbação dos processos sedimentológicos, com a movimentação de finos e a posterior acumulação em barragens de rejeito eventualmente implantadas – ou nos próprios cursos de água a jusante – permitem discernir alterações em termos de quantidade, qualidade e regime.

Ao término das atividades de exploração mineral, as áreas degradadas devem, em obediência ao explicitado diretamente na própria Constituição Brasileira (BRASIL, 1988), ser reabilitadas, buscando uma condição de equilíbrio ambiental. Entretanto, as degradações citadas frequentemente apresentam características de irreversibilidade, impossibilitando o retorno das áreas degradadas à sua situação original, tornando factíveis, apenas, medidas de mitigação e remediação dos danos. Sua restauração, ou reabilitação, consistiria, portanto, em deixar a área em condições de equilíbrio ambiental, possibilitando o desenvolvimento de novos ecossistemas.

Apesar de todas as leis e normas ambientais existentes, em sintonia com o princípio constitucional, muitas vezes a restauração não é realizada e as áreas continuam impactando o meio ambiente. Nas áreas abandonadas a degradação se acentua, podendo vir a assumir intensidades e magnitudes significativas (BITAR, 1997).

A legislação ambiental exige que se apresente um Plano de Recuperação de Áreas Degradadas – PRAD – (Decreto nº 97.632, de 10 de abril de 1989) e um Plano de Fechamento de Mina (Portaria nº 237, de 18/10/2001, alterada pela Portaria nº 12, de 22/01/2002). O preceito legal estabelece que o PRAD deva considerar soluções técnicas adequadas e abrangentes para uso futuro (IBRAM, 1992; DNPM, 2000).

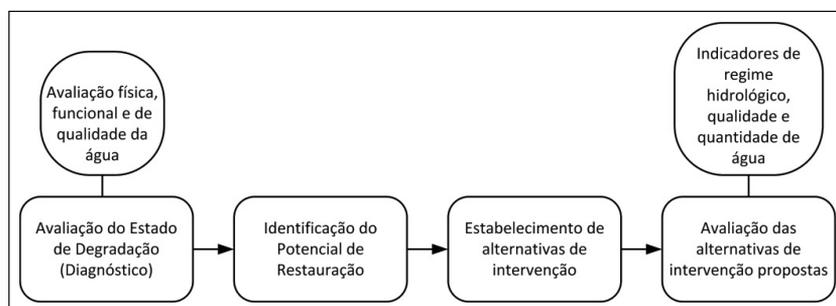
Entretanto, apesar do caráter multidisciplinar e diversificado do problema, o que se observa, segundo Lima et al. (2006), é a ausência de abordagem sistêmica em grande parte dos PRADs. A restauração das áreas, quando ocorre, consiste sobretudo na adoção de medidas restritas à revegetação, com a finalidade de atenuar apenas o impacto da paisagem degradada (BITAR, 1997). Ainda segundo este autor, medidas geotécnicas e de remediação – quando existem contaminantes na área – eventualmente adotadas, não consideram a restauração dos recursos hídricos e dos corpos de água especificamente.

Neste contexto insere-se o presente trabalho, que tem por objetivo propor uma metodologia de análise para subsidiar a proposição de medidas – e sua posterior avaliação – para restauração hidrológica e fluvial em áreas degradadas por atividades de mineração.

## METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia proposta fundamenta-se em quatro etapas distintas, conforme pode ser visto no fluxograma apresentado na Figura 1.

De forma sucinta, a primeira etapa, correspondente ao diagnóstico, à *avaliação do estado de degradação* dos cursos de água da área em análise, consistindo em



**FIGURA 1.** Fluxograma da metodologia proposta.

uma *avaliação física*, à luz de aspectos morfológicos do leito e margens dos mesmos; na sua *avaliação funcional*, fundada em aspectos de estabilidade e de transporte sólido e, finalmente em uma *avaliação da qualidade de águas*, baseada em percepções qualitativas de aspecto e odor.

Segue-se a etapa de *identificação do potencial de restauração*, levando em consideração, além do estado de degradação dos cursos de água constante do diagnóstico, a localização dos trechos dos corpos hídricos na bacia hidrográfica, sua sensibilidade e resiliência frente a distúrbios externos.

Os dados relativos aos cursos de água assim levantados, agregados ao grande volume de informações relativas aos demais aspectos intervenientes na área degradada, possibilitam o *estabelecimento de alternativas de intervenção*, realizado por uma equipe multidisciplinar à luz da complexidade do problema, dentro da perspectiva de sua inserção – forçosamente –, em um projeto abrangente de restauração da área degradada, incluindo os pontos de vista geotécnico e ecológico.

Finalmente, é realizada a *avaliação das alternativas*, por meio de indicadores de quantidade, qualidade e regime, comparando-se o estado atual e os cenários estudados para restauração da área com uma situação de referência, quando a área ainda não apresentava alterações antrópicas significativas.

Descrem-se, nos próximos itens do presente documento, as diferentes etapas metodológicas propostas, ilustrando-se sua aplicação em um estudo relativo a uma área fortemente degradada localizada no Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais.

## **AVALIAÇÃO DO ESTADO DE DEGRADAÇÃO DO SISTEMA FLUVIAL**

O diagnóstico do estado de degradação dos cursos de água é realizado com base em metodologia proposta por Cardoso e Baptista (2009), fundada em estudos de Brierley et al. (2002), na Austrália, e no sistema SEQphy, desenvolvido para avaliação da qualidade de rios na França para atendimento à Diretiva Européia da Água (OUDIN, 2001; REBILLARD, 2001). Deve-se salientar que as avaliações previstas pressupõem um julgamento bastante criterioso por parte do responsável pela análise, uma vez que optou-se por uma avaliação qualitativa expedita, tendo em vista as dificuldades inerentes à quantificação de determinados parâmetros e à subjetividade de enquadramento do estado de degradação dos trechos

em função de valores assim obtidos. Evidentemente se dados quantitativos estiverem disponíveis (e.g. monitoramento de qualidade de água), eles deverão ser integrados na análise.

O primeiro passo da sistemática de análise corresponde à identificação de trechos homogêneos do curso de água em estudo. Nesta etapa torna-se necessária uma primeira escolha, uma vez que a divisão pode ser feita levando-se em consideração aspectos distintos, compatíveis com o nível de detalhamento do estudo e com os objetivos da intervenção. Gregory (2002) sugere a divisão dos trechos a serem estudados em segmentos de características similares. Kellerhals et al. (1976 *apud* Gregory; Chin, 2002), propõem que trechos homogêneos são aqueles em que as condições hidrológicas, geológicas bem como as da superfície da bacia apresentam-se suficientemente uniformes, resultando em um canal com características morfológicas homogêneas. Cardoso e Baptista (2011), propõem a subdivisão levando em consideração, além dos objetivos da intervenção e dos aspectos morfológicos, os tipos de material de revestimento e as condições de uso e ocupação do solo nas áreas adjacentes. Em suma, a divisão em segmentos homogêneos exige uma análise criteriosa, contemplando os aspectos julgados pertinentes, caso a caso, em sintonia com os objetivos da intervenção.

Após a divisão em trechos homogêneos, procede-se à sua avaliação física, funcional e de qualidade das águas, adotando-se uma lógica centrada na comparação entre duas condições de cada trecho em estudo: (i) *condição de referência*, definida como sendo a situação natural, pristina, ou próxima desta, anterior às atividades antrópicas intensivas na área; (ii) *condição atual*, posterior, portanto, às atividades de mineração.

Em sintonia com a abordagem qualitativa proposta, a análise deve ser realizada por meio de uma escala de intensidade de perturbação em cinco níveis, onde o nível de alteração de cada um dos aspectos listados em relação à sua condição natural é avaliado individualmente, de acordo com a sua magnitude. Em seguida, procede-se à integração de todos os aspectos analisados, definindo o nível de degradação global do trecho. Planilhas utilizadas para a avaliação são apresentadas na Figura 2.

A *avaliação física* de cada um dos trechos é realizada quanto aos aspectos morfológicos do leito menor, leito maior e margens do curso de água, além da análise dos revestimentos e características de ocupação eventualmente presentes. A integração

de todos os aspectos possibilita a definição do nível de degradação física.

Quanto à *avaliação funcional* devem ser analisados os aspectos relativos à erosão, assoreamento, presença de resíduos sólidos e estabilidade das áreas marginais, em relação a uma condição de equilíbrio e estabilidade. A avaliação conjunta desses aspectos permitirá a avaliação do grau de perturbação funcional do trecho.

Na *avaliação da qualidade de águas*, na ausência de dados físico-químicos e biológicos, deve ser realizada uma avaliação baseada apenas em percepções qualitativas de aspecto e odor, possibilitando o diagnóstico, ainda que grosseiro, da qualidade das águas.

A avaliação final do estado de *degradação global* de cada trecho deve ser efetuada por meio da agregação das avaliações finais das planilhas constantes da Figura 1, em sintonia com a lógica fundamentalmente qualitativa da metodologia proposta, com base na visão multidisciplinar criteriosa do analista, fundamental para a qualidade do diagnóstico.

### DEFINIÇÃO DO POTENCIAL DE RESTAURAÇÃO

De posse da avaliação do estado de degradação dos cursos de água e das condições gerais da área em estudo, procede-se à análise do potencial de restauração dos trechos homogêneos, que servirá de base para nortear a indicação de alternativas de intervenção apropriadas.

Entende-se aqui como restauração o estabelecimento de melhores condições para ocorrência dos processos hidrológicos, geomorfológicos e ecológicos

em um curso de água degradado, com a substituição e/ou implantação de componentes do sistema natural danificado (WOHL et al., 2005). Neste contexto, o *Potencial de Restauração* refere-se à possibilidade de retorno do curso de água às suas condições naturais ou próximas a ela, de forma que, conforme previamente mencionado, possam ser restabelecidas condições favoráveis para ocorrência dos processos citados. Entende-se, assim, que o potencial de restauração está associado não somente à capacidade de ajuste *natural* do curso de água em relação a uma condição de referência, mas também à sua capacidade de ajuste *decorrente de intervenções antrópicas* com essa finalidade.

Dessa forma, conhecendo-se as características e o estado de degradação do trecho em análise, assim como as condições da bacia e do vale onde o curso de água se insere, podem ser vislumbradas as possíveis condições de evolução física e funcional do canal e previsto o seu potencial de restauração, conforme procura ilustrar a Figura 3.

De acordo com a Figura 3, podem ser identificados cinco estágios de evolução de um determinado curso de água, indo de uma condição intacta ou natural para uma condição degradada, passando pela escala de níveis de degradação considerados. Os estágios indicados pelos números 3 e 4 podem ser considerados “pontos de virada”, ou seja, representam condições a partir das quais o processo de degradação pode ser revertido. No primeiro caso, considera-se que a restauração do trecho do curso de água ainda seja possível; já no segundo, observa-se a criação de uma

		Alteração em relação à condição natural					
Avaliação dos aspectos físicos	Sinuosidade						
	Forma						
	Leito menor	Largura					
		Profundidade					
		Inclinação das margens					
		Declividade do leito					
		Revestimento do leito					
	Leito maior	Revestimento das margens					
		Largura					
		Profundidade					
		Inclinação das margens					
		Ocupação do leito					
	Regime de escoamento quando do levantamento de campo ( ) torrencial ( ) fluvial						
	Período em que o levantamento foi realizado ( ) seco ( ) chuvoso						
	Avaliação final:						
Revestimento do leito maior							
( ) Mata ciliar			( ) Gramíneas				
( ) Vegetação nativa			( ) Ausência de vegetação (solo exposto)				
( ) Vegetação alterada			( ) Área impermeável				

Avaliação dos aspectos funcionais	Aspectos funcionais/ estruturais		Grau de perturbação				
Avaliação dos aspectos funcionais	Área marginal esquerda	Erosão					
		Assoreamento					
		Estabilidade					
	Área marginal direita	Erosão					
		Assoreamento					
		Estabilidade					
Avaliação final (grau de perturbação)							

Aspectos de qualidade da água	Grau de perturbação				
Aspecto visual (turbidez, cor, etc)					
Cheiro					
Presença de esgotos					
Resíduos sólidos					
Avaliação final					

**FIGURA 2. Planilhas para avaliação física, funcional e de qualidade das águas dos trechos.**

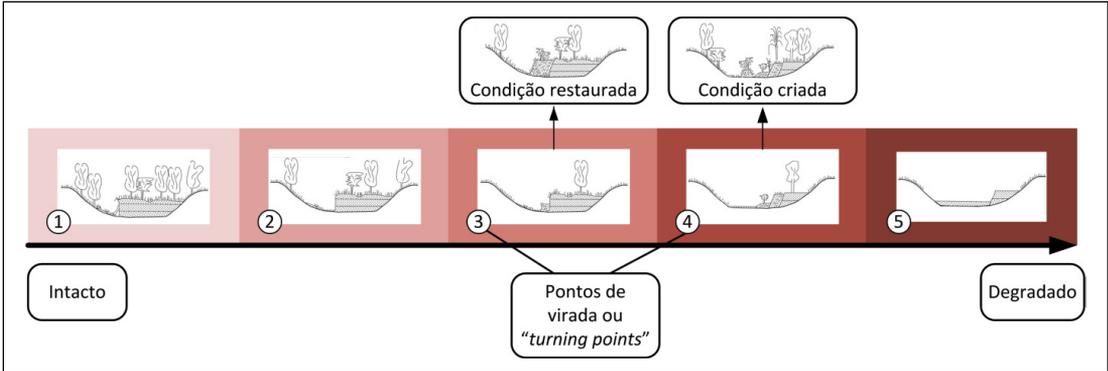


Figura 3. Associação entre estado de degradação e Potencial de Restauração de cursos de água, de acordo com sua provável evolução (adaptado de Brierley et al., 2002).

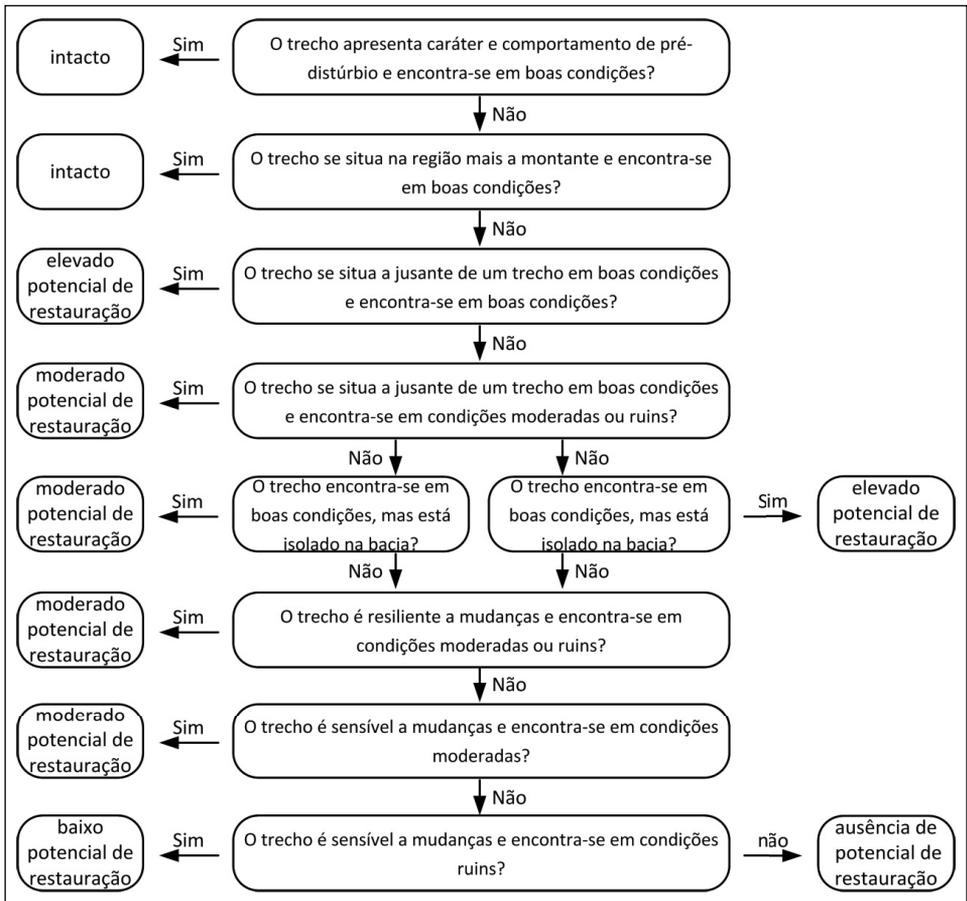


Figura 4 – Fluxograma para determinação do potencial de restauração de trechos de cursos de água (Adaptado de Brierley e Fryirs, 2008)

nova condição de estabilidade do canal diferente da condição intacta. Cabe ressaltar que caso nenhuma intervenção seja realizada, o prognóstico seria de contínua deterioração das características físicas e funcionais do trecho fluvial.

Tendo em vista o interesse de corroborar os prognósticos efetuados a partir da análise da tendência de evolução dos trechos em estudo com base, fundamentalmente, na sua condição de degradação, e melhor subsidiar a indicação de procedimentos para intervenções, procede-se a uma análise mais acurada onde são incorporadas o posicionamento dos trechos na bacia hidrográfica e a sua sensibilidade ou resiliência frente a distúrbios externos. Nesse sentido, foi empregada parte da sistemática proposta pelo *River Styles Framework* (BRIERLEY; FRYIRS, 2008), que adota a seqüência de análise indicada no fluxograma da Figura 4 para proceder à avaliação de cada trecho.

Assim, o Potencial de Restauração do trecho pode ser enquadrado em uma escala de quatro níveis: *Elevado, Moderado, Baixo e Ausente*. Os trechos intactos, evidentemente, não carecem de medidas de restauração.

### PROPOSIÇÃO DE INTERVENÇÕES

A definição das intervenções consiste em indicar medidas e soluções que estejam de acordo com as condições locais da bacia, com o estado de degradação do curso de água e com o potencial de restauração, de forma que haja uma minimização dos impactos negativos da atividade de extração mineral, através da intervenção proposta.

Segundo Cardoso e Baptista (2009), pode-se presumir, de forma geral, que quanto menor o estado de degradação do canal, maior o seu potencial de restauração e, conseqüentemente, maior a possibilidade de adoção de técnicas ambientalmente mais integradas para a sua restauração. Da mesma forma, cursos de água em estado de degradação elevado sinalizam

para a adoção de técnicas tradicionais, à luz do seu baixo potencial de restauração. Estas premissas são ilustradas na Figura 5, devendo manter-se em mente o posicionamento relativo do trecho em análise e a compatibilização da solução com os trechos a montante e a jusante.

Ressalte-se, finalmente, que as intervenções específicas nos sistemas fluviais devem se inserir, forçosamente, no projeto global de restauração da área degradada, envolvendo também ações morfológicas e ecológicas.

### AVALIAÇÃO DAS INTERVENÇÕES DENTRO DA PERSPECTIVA DE RECURSOS HÍDRICOS

As diferentes alternativas de intervenções propostas deverão, em seguida, ser analisadas dentro da perspectiva de recursos hídricos, de acordo com critérios de quantidade, qualidade e regime, em consonância com os princípios estabelecidos na Lei 9433/97.

Assim, a avaliação das alternativas deverá ser realizada em três etapas, descritas a seguir, com base nos cenários correspondentes a cada uma das alternativas propostas.

#### Avaliação de regime hidrológico

Para a quantificação dos impactos no regime hidrológico dois cenários de uso do solo devem ser estudados:

- ▣ condição de referência, já definida anteriormente como sendo uma situação natural ou próxima desta, anterior às atividades antrópicas intensas na área;
- ▣ cenário futuro, considerando as diferentes intervenções previstas na área de drenagem, em cada alternativa.

A avaliação das alterações no regime será efetuada pela comparação da vazão de pico no exutório da



**FIGURA 5. Associação entre estado de degradação, potencial de restauração e alternativas de intervenção a serem adotadas (Cardoso; Baptista, 2009).**

bacia, associada a cada trecho, na situação natural e na situação futura. Assim, para os dois cenários devem ser realizados estudos hidrológicos com a definição topológica e funcional das diversas sub-bacias de drenagem da área, com o uso das informações cartográficas e cadastrais disponíveis, complementadas por inspeções de campo. Para grande parte das bacias, dados de monitoramento não estão disponíveis, devendo os estudos hidrológicos ser efetuados, então, com o uso de modelos de transformação chuva-vazão.

Com base nos trabalhos de Castro (2007), propõe-se aqui um *Indicador de Regime* ( $I_{reg}$ ) sendo que quanto mais próxima a vazão estiver da condição natural, melhor é o cenário:

$$I_{reg} = \frac{2xQ_{pico.alt}}{(Q_{pico.nat} + Q_{pico.alt})} \quad (1)$$

onde:  $I_{reg}$  Indicador de Regime; que assume valor unitário na condição ideal;

$Q_{pico.alt}$ : vazão de pico na situação alterada;  $Q_{pico.nat}$ : vazão de pico na situação natural.

### Avaliação de Quantidade

Da mesma forma, a avaliação das intervenções propostas em termos de quantidade de água, é realizada pela comparação entre a condição de referência

dos trechos e os cenários correspondentes às diferentes alternativas de intervenção. Tal avaliação será efetuada a partir da comparação das alterações, em relação à situação de referência segundo quatro aspectos:

**Sinuosidade**, relacionada à propagação do escoamento no curso de água, tendo influência no hidrograma gerado no trecho;

**Revestimento do canal e margens** do curso de água, com sua influência na permeabilidade, na maior ou menor conexão entre os escoamentos superficial e subsuperficial;

**Uso do solo** da bacia de drenagem, sobretudo a presença de vegetação na bacia de drenagem, com sua influência direta no hidrograma por meio da geração do escoamento superficial.

**Presença de barramentos** no trecho, favorecendo a regularização de vazões, afastando-se, portanto, do comportamento natural do curso de água.

A planilha mostrada à esquerda na Figura 6 deve ser utilizada para a avaliação de quantidade, segundo cinco níveis de alteração. Para a avaliação final deste quesito, integram-se, qualitativamente, todos os aspectos considerados, mais uma vez à luz do discernimento do analista.

### Avaliação de qualidade

A avaliação das alternativas de intervenção em termos de qualidade é baseada em três aspectos: a

Avaliação da quantidade		Grau de perturbação				
		1	2	3	4	5
	Sinuosidade					
	Revestimento canais/margens					
	Revestimento vegetal da bacia					
	Barramentos					
	<i>Avaliação final</i>					

Avaliação da qualidade		Grau de perturbação				
		1	2	3	4	5
	Barramentos					
	Revestimento vegetal da bacia					
	Fontes pontuais de poluição					
	<i>Avaliação final</i>					

Avaliação da quantidade		Grau de perturbação				
		1	2	3	4	5
	Sinuosidade					
	Revestimento canais/margens					
	Revestimento vegetal da bacia					
	Barramentos					
	<i>Avaliação final</i>					

Avaliação da qualidade		Grau de perturbação				
		1	2	3	4	5
	Barramentos					
	Revestimento vegetal da bacia					
	Fontes pontuais de poluição					
	<i>Avaliação final</i>					

FIGURA 6. Planilha de avaliação do aspecto de quantidade (esquerda) e de qualidade (direita) das alternativas propostas.

presença de barramentos, a presença de vegetação na área de drenagem e o tratamento de fontes pontuais de poluição.

Com relação aos barramentos, estes *a priori* propiciam uma melhora na qualidade da água dos trechos de jusante, pois levam à sedimentação do material em suspensão, fortemente presentes em áreas mineradas, responsável pelo carreamento da maior parte dos poluentes.

A presença de vegetação na área de drenagem também é um fator positivo pois a vegetação desempenha uma importante função de proteção contra erosão, evitando o lixiviamento das superfícies, contribuindo, assim de forma significativa para a melhoria da qualidade da água.

Finalmente, o tratamento das fontes pontuais de poluição, tais como o retaludamento e drenagem adequada de pilhas de estéréis, atenuam a degradação da qualidade da água.

A avaliação do conjunto destes aspectos deve ser realizada por meio da planilha mostrada à direita na Figura 6. Como para as demais avaliações efetuadas, esta deverá situar-se em cinco níveis de alteração,

obtendo-se a avaliação final pela agregação dos aspectos considerados.

Finalmente, com base na análise integrada das avaliações das alternativas de intervenção em termos de regime, quantidade e qualidade, pode-se apreciar a adequação das alternativas propostas.

## ESTUDO DE CASO

O estudo apresentado a seguir foi desenvolvido no quadro do atendimento de uma demanda do Ministério Público Estadual para recuperação de uma área de mineração, reativada atualmente para a extração de minério dos rejeitos acumulados durante a exploração anterior. Para tanto foi montada uma equipe multidisciplinar composta de biólogos, geólogos e engenheiros da Universidade Federal de Minas Gerais e da Universidade Federal de Ouro Preto. O desenvolvimento metodológico proposto foi elaborado no contexto deste estudo.

A área localizada em questão está localizada a aproximadamente 55 km do centro da cidade de Belo Horizonte, no município de Brumadinho, na bacia do córrego do córrego Quéias, afluente do ribeirão



FIGURA 7. Condições da Bacia do Quéias (Santos, 2010).

Serra Azul, importante manancial de abastecimento de água da região metropolitana.

Grande parte da bacia do córrego Quéias apresenta-se bastante degradada e longe de uma situação de equilíbrio, como pode ser observado na Figura 7. Podem ser apontadas como principais fatores de degradação, a alteração significativa na topografia e a remoção da cobertura vegetal em grande parte da bacia. Não foi realizado reflorestamento após o término das atividades de lavra, deixando-se o solo exposto por um longo período, levando à ocorrência de processos erosivos em larga escala nas áreas de topografia mais acidentada, incluindo os cursos de água de maior declividade. Associado aos processos erosivos observa-se a sedimentação de um grande volume de finos à jusante, nos trechos de menor declividade dos cursos de água.

### **Avaliação do estado de degradação do sistema fluvial**

Conforme descrito anteriormente, a avaliação do estado de degradação do sistema fluvial se deu por meio da aplicação da metodologia proposta por Cardoso e Baptista (2009).

Inicialmente foi feita a delimitação dos trechos homogêneos, levando-se em consideração as condições físicas e funcionais dos cursos d'água, o uso do solo da

bacia e a presença de afluentes. Os dados necessários para sua delimitação foram levantados em visitas a campo e utilização da ferramenta Google Earth.

Em seguida à delimitação dos trechos homogêneos, a avaliação de cada um deles sob o ponto de vista físico, funcional e de qualidade das águas foi realizada com o uso das planilhas apresentadas na Figura 2. A condição de referência utilizada, obtida através de fotos aéreas datadas de 1965, refere-se a um período anterior às atividades minerárias, com parte da área natural e parte utilizada como pastagens.

O diagnóstico dos trechos homogêneos demonstrou que todos os trechos da área em estudo sofreram alterações. Certos trechos – 11 no total – foram suprimidos, com a implantação de desvios, diques e barragens. Do ponto de vista físico, a maior parte dos trechos apresentou importantes alterações de largura, profundidade, declividade, inclinação e revestimento nos leitos maior e menor. Com relação aos aspectos funcionais, todos os trechos apresentaram alterações no que diz respeito a assoreamento. A qualidade da água dos trechos analisados se mostrou satisfatória, tendo sido observadas alterações apenas referentes à turbidez. Na Figura 8, com fotografias de trechos típicos da bacia do Quéias, pode-se observar trechos em bom estado de conservação e outros com morfologia bastante alterada e presença de sedimentos.



**FIGURA 8.** Trechos típicos dos cursos d'água da bacia do Quéias.

O diagnóstico global dos trechos homogêneos da área em estudo é mostrado na Figura 9. Pode-se observar que a totalidade dos trechos apresenta alterações, sendo a maior parte deles com um nível de degradação elevado a muito elevado.

### Definição do potencial de restauração

Utilizando-se a metodologia precedentemente descrita, sintetizada na Figura 4, foi realizada a definição do Potencial de Restauração de cada um dos trechos

em estudo. Os resultados podem ser observados na Figura 10.

Pode-se observar que dos 32 trechos analisados, todos sofreram interferência em seus estados em termos físicos, funcionais e de qualidade da água em relação a sua condição de referência, sendo que a maior parte dos trechos da área de estudo apresenta um potencial de restauração moderado a baixo e que somente dois trechos (3 e 4) possuem um potencial de restauração elevado.

		Nível do Estado de degradação							Nível do Estado de degradação				
		1	2	3	4	5			1	2	3	4	5
Trecho 1						X	Trecho 17						X
Trecho 2						X	Trecho 18					X	
Trecho 3		X					Trecho 19				X		
Trecho 4		X					Trecho 20						X
Trecho 5					X		Trecho 21						X
Trecho 6		X					Trecho 22			X			
Trecho 7		X					Trecho 23			X			
Trecho 8						X	Trecho 24		X				
Trecho 9		X					Trecho 25				X		
Trecho 10					X		Trecho 26				X		
Trecho 11					X		Trecho 27				X		
Trecho 12						X	Trecho 28				X		
Trecho 13						X	Trecho 29			X			
Trecho 14						X	Trecho 30		X				
Trecho 15						X	Trecho 31			X			
Trecho 16						X	Trecho 32			X			

FIGURA 9. Avaliação final do estado de degradação dos trechos homogêneos dos cursos de água da bacia do Quéias.

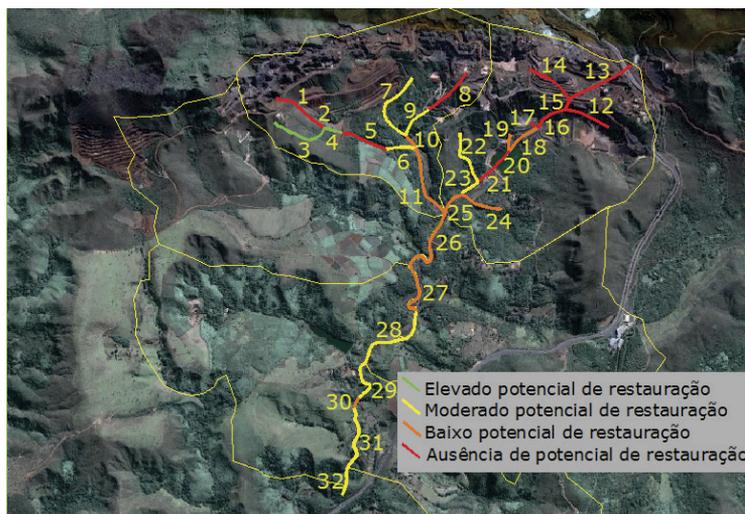


FIGURA 10. Potencial de restauração dos trechos homogêneos da bacia do Quéias.

### Definição das intervenções

A fim de promover a melhoria das condições ambientais da área, um projeto de restauração foi proposto, abrangendo as seguintes vertentes:

- ☞ Geologia/Geotecnia: reconformação topográfica da bacia, com remanejamento dos taludes e controle dos processos erosivos;
- ☞ Botânica: restauração da biota da área degradada, reconstituição de matas ciliares e reinserção de espécies nativas;
- ☞ Hidráulica e hidrologia: favorecimento dos processos hidrológicos na bacia e restauração dos cursos de água.

Assim, no contexto do presente estudo, a compatibilização das medidas previstas no tocante aos aspectos geomorfológicos e botânicos com as fortes restrições quanto ao Potencial de Restauração de grande parte dos trechos fluviais estudados levaram à proposição de apenas uma alternativa global de intervenção, constituindo-se de ações gerais de restauração de todos os trechos, associadas a ações específicas para cada trecho. Busca-se, desta forma, alcançar a evolução para uma nova situação de equilíbrio.

As intervenções previstas comportam as seguintes atividades gerais, complementadas pelas ações específicas por tipologia de trecho:

- ☞ Retirada dos sedimentos depositados ao longo do leito maior dos cursos de água;
- ☞ Revegetação do leito maior;

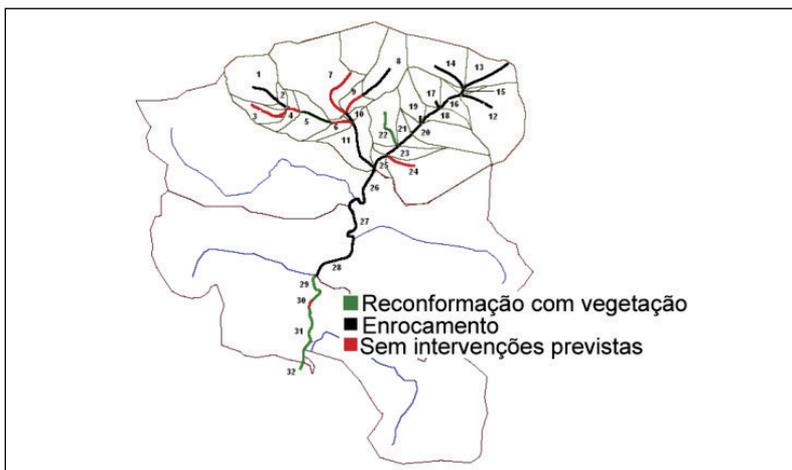
- ☞ Nos trechos menos degradados, onde ainda existe calha definida, deve ser procedido o restabelecimento da calha fluvial menor, com sua reconformação correspondente à vazão dominante, associada ao Tempo de Retorno de dois anos;
- ☞ A reconformação destes trechos deverá ser acompanhada de revestimento com espécies vegetais ou enrocamento de pedras semi-arrumadas, em função do Potencial de Restauração específico de cada trecho e da magnitude da intervenção;
- ☞ Nos trechos mais degradados, onde o curso d'água foi suprimido, deve ser procedida a escavação e revestimento do leito fluvial menor dos cursos de água, com a sua conformação em forma trapezoidal correspondente à vazão dominante, associada também ao Tempo de Retorno de dois anos. Prevê-se seu revestimento em enrocamento de pedras semi-arrumadas.

A Figura 11 mostra o tipo de intervenção proposto para cada um dos trechos estudados.

### Avaliação hidrológica das intervenções propostas

Conforme detalhado anteriormente, a avaliação hidrológica das intervenções compreende três aspectos: quantidade, qualidade e regime.

Para a avaliação em termos de regime, tendo em vista a ausência de monitoramento na área, foi



**FIGURA 11.** Tipos de intervenções propostas para os trechos homogêneos.

estabelecido um modelo hidrológico da bacia com o emprego de um modelo chuva-vazão distribuído, o software HEC-HMS, versão 3.4, do *U. S. Corps of Engineers* (USACE, 2009), cujas etapas de modelagem são descritas de forma sucinta a seguir.

Os dados obtidos, como informações cartográficas e cadastrais disponíveis e de acordo com as características passadas, atuais e previstas de uso do solo foram introduzidos no software, permitindo a obtenção de modelo composto das diversas sub-bacias e áreas de contribuição.

Foram construídos cenários de precipitações de projeto com uso da equação IDF para a Região Metropolitana de Belo Horizonte (GUIMARÃES PINHEIRO; NAGHETTINI, 1998). O Tempo de Retorno de 50 anos foi considerado para a observação do comportamento hidrológico da área quando da ocorrência eventos extremos.

A simulação hidrológica chuva-vazão e a propagação nos reservatórios e diques foi realizada para os diferentes cenários de ocupação e degradação da bacia. A definição dos hidrogramas e a transformação chuva-vazão foram realizadas utilizando o método proposto pelo *U.S. Soil Conservation Service*. A propagação nos reservatórios e diques foi realizada através do método Puls Modificado.

As vazões na saída de cada trecho foram comparadas para os dois cenários de ocupação, o de referência e o futuro. A Figura 12 mostra os valores do Indicador de Regime calculados comparando o cenário de referência com o cenário futuro, e o cenário de referência com a situação atual, lembrando que o valor unitário corresponde ao ideal.

Observa-se na Figura 12 que os valores do indicador de regime estão bastante próximos do valor uni-

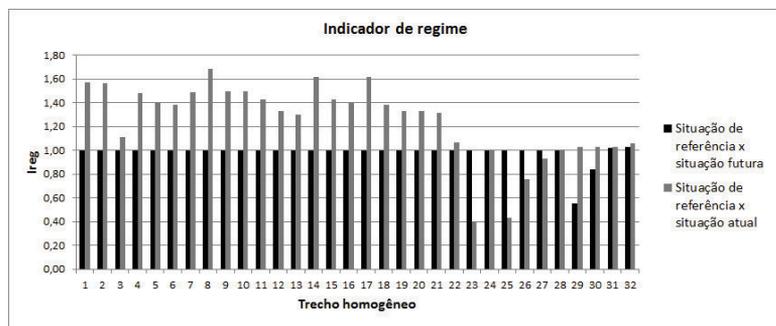
tário, à exceção dos trechos 29 a 32, que na situação futura estão localizados à jusante de uma barragem, que amortece significativamente os picos de cheias. De forma geral, portanto, a situação projetada tende a restabelecer o ciclo hidrológico para uma condição similar à situação de referência, representando melhora significativa em relação à situação atual.

A avaliação das intervenções propostas no que concerne o aspecto de quantidade foi realizada comparando-se o grau de perturbação das intervenções com a situação de referência para cada trecho estudado, com uso da tabela mostrada na Figura 5. Os resultados desta avaliação são mostrados na Figura 13.

É importante ressaltar que para toda a área da bacia estão propostas intervenções que englobam a revegetação de toda a área, além de reconformação topográfica, incluídas as pilhas de estêreis. Pode-se observar na Figura 13 que a maior parte dos trechos tem uma avaliação em relação às intervenções propostas, com grau de perturbação de médio a moderado em relação à condição de referência. A sinuosidade dos trechos foi o quesito que se mostrou pior avaliado. Apenas o trecho 28 teve um grau de perturbação elevado, devido à manutenção de um barramento neste.

Em termos de qualidade, a metodologia proposta realiza a avaliação por meio dos aspectos presença de barramentos, revestimento vegetal da bacia e tratamento das fontes pontuais de poluição. É importante ressaltar que neste caso a presença de barramentos é um aspecto positivo, que propicia uma melhora na qualidade de água no trecho e à jusante deste, como é o caso do trecho 28 do córrego do Quéias. A avaliação dos trechos pode ser observada na Figura 14.

De forma geral a avaliação dos trechos no que tange à qualidade foi de boa, a muito boa, em fun-



**FIGURA 12.** Valores do indicador de regime para cada um dos trechos homogêneos.

ção das intervenções propostas na área de drenagem como um todo.

Assim, a avaliação global das intervenções propostas permite identificar que elas tiveram um bom desempenho, principalmente se considerarmos que o potencial de restauração dos trechos era majoritariamente moderado.

### CONCLUSÕES

No presente artigo propôs-se uma metodologia para avaliação do estado de degradação e do potencial de restauração dos cursos d'água afetados por atividades de mineração, subsidiando a proposição de alternativas de restauração dos mesmos, no bojo de uma ótica abrangente de intervenção. As alternativas são, em seguida, avaliadas quanto aos recursos hídricos por meio de um conjunto de indicadores.

A metodologia foi aplicada a um estudo de caso, constituído de 32 trechos fluviais. Apenas em sete trechos (22%) o estado de degradação do curso d'água foi considerado baixo, prescindindo, portanto de intervenção específica para restauração. Para outros cinco trechos (16%), foi considerado um médio Potencial de Restauração, possibilitando a indicação de intervenções leves, com a reconformação de taludes e revegetação. A maioria dos trechos (62%), entretanto, se encontra em avançado estado de degradação, com Potencial de Restauração baixo, sendo compatíveis apenas soluções tradicionais de Engenharia, tais como o enrocamento com pedras semi-arrumadas.

Com base no Potencial de Restauração foram definidas intervenções, em sintonia com as medidas geomorfológicas e botânicas previstas. Apesar do elevado grau de degradação da bacia, as alternativas estudadas apresentaram melhorias significativas em relação ao

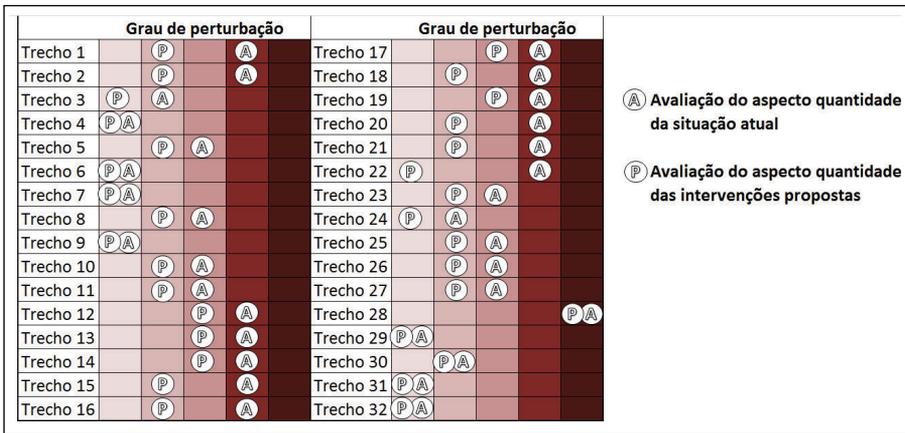


FIGURA 13. Avaliação do aspecto quantidade da situação atual e das intervenções propostas.

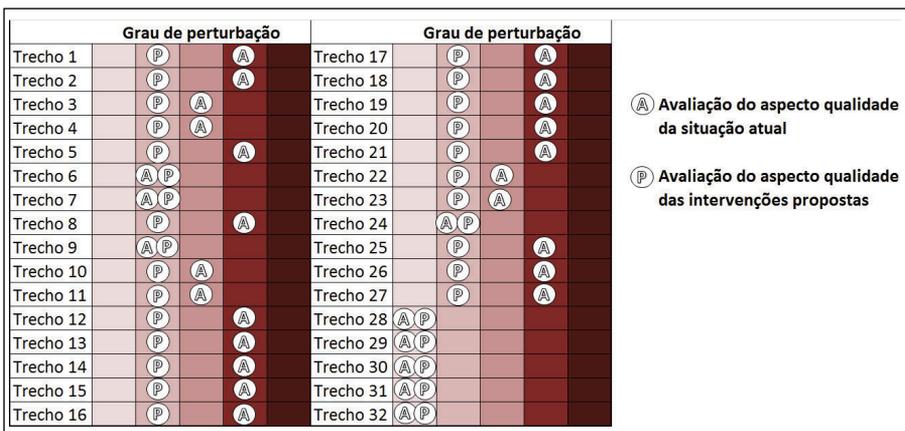


FIGURA 14. Avaliação do aspecto qualidade da situação atual e das intervenções propostas.

cenário atual, com bom desempenho no tocante aos recursos hídricos na avaliação realizada, notadamente quanto aos aspectos de qualidade e regime.

A aplicação da metodologia proposta mostrou-se simples, com resultados realistas e consistentes, segundo avaliação da equipe multidisciplinar integrante do grupo responsável pelo estudo global. As fases de avaliação do estado de degradação e identificação do Potencial de Restauração aportaram subsídios importantes para o delineamento da solução global de intervenção.

Acredita-se que a abordagem aqui adotada possa contribuir para o estabelecimento de ferramentas e procedimentos que possibilitem identificar e avaliar alternativas de restauração, em sintonia com a legis-

lação ambiental vigente e à luz do caráter interdisciplinar da questão.

Ainda, tendo em vista que inúmeras áreas mineradas no Brasil, em geral, e em Minas Gerais, em particular, possuem características ambientais similares às aqui estudadas, pode-se presumir que a sistemática proposta neste trabalho possa ser útil em outros estudos, integrando-se às ferramentas de análise específicas de outras áreas de conhecimento.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, à CAPES e à FAPEMIG pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

## Referências

- BITAR, O.Y. *Avaliação da restauração de áreas degradadas por mineração na Região Metropolitana de São Paulo*. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) - Universidade de São Paulo.
- BRASIL. Constituição (1988). *Constituição [da] República Federativa do Brasil*. Brasília, DF: Senado Federal.
- BRASIL. *Decreto n. 97.632 - 10 abr. 1989*. Dispõe sobre a regulamentação do Artigo 2º, inciso VIII, da Lei n. 6.938, de 31 de agosto de 1981, e dá outras providências.
- BRIERLEY, G.; FRYIRS, K. *Geomorphology and river management: Applications of the river styles framework*. Singapore: Blackwell Publishing, 2008. 398p.
- BRIERLEY G.; FRYIRS K.; OUTHET D.; MASSEY C. *Application of the River Styles framework as a basis for river management in New South Wales, Australia*. Applied Geography, v. 22, p.91-122, 2002.
- CARDOSO, A. S.; BAPTISTA, M. B. *Avaliação e classificação de cursos d'água em bacias urbanas*. XVII SBRH, Campo Grande, 2009.
- CARDOSO, A. S.; BAPTISTA, M. B. . *Metodologia para avaliação de alternativas de intervenção em cursos de água em áreas urbanas*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 16, p. 129-139, 2011.
- CASTRO L. M. A. *Proposição de metodologia para avaliação dos efeitos da urbanização nos corpos de água*. 2007. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais.
- DNPM- Departamento Nacional de Produção Mineral. *Investidor guide's: Mining in Brazil - Basic information for the investidor*, 2000.
- \_\_\_\_\_. *Portaria nº 237, de 18.10.2001*.
- \_\_\_\_\_. *Portaria nº 12, de 22.01.2002*.
- \_\_\_\_\_. Rede Nacional de Informações sobre o Investimento. Disponível em: <http://www.mdic.gov.br>, acesso em março de 2013.
- GREGORY, K.J.; CHIN, A. *Urban stream channel hazards*. Area 34, p.312-321. 2002.
- GREGORY, K.J. *Urban channel adjustments in a management context: An Australian Example*. Environmental Management 29 (5), p. 620-633. 2002.
- GUIMARÃES PINHEIRO, M. M.; NAGHETTINI, M. C. *Análise regional de frequência e distribuição temporal das tempestades na Região Metropolitana de Belo Horizonte*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 3, no. 4, p. 73-88, 1998.
- IBRAM. *Mineração e meio ambiente*. Brasília: Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), 1992.
- KELLERHALS, R.; CHURCH, M.; BRAY, D.I. 1976. *Classification and analysis of river processes*. Journal of Hydraulics Division ASCE 102, p. 813-829.
- LIMA, H. M.; FLORES, J. C. C.; COSTA, F.L. *Plano de restauração de áreas degradadas versus plano de fechamento de mina: um estudo comparativo*. Rem: Rev. Esc. Minas [online]. 2006, vol.59, n.4, pp. 397-402. ISSN 0370-4467.
- ODIN, L.C. 2001. *River quality assessment system in France* in Proceedings MTM III - River quality assessment system in France. p. 169-176.
- REBILLARD, J.P. *Le SEQ-Physique*, Revue de l'agence de l'eau, Adour Garonne, n. 81, 2001, p. 13-15.

SANTOS, A.C.P.B. *Proposição de abordagem para a avaliação do estado de alteração de cursos de água*. 2010. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais.

USACE - U.S. Army Corps of Engineers. *HEC-HMS Hydrologic Modeling System – Technical Reference Manual*. Version 3.4, 2009.

WOHL, E.; ANGERMEIER, P.L.; BLEDSOE, B.; KONDOLF, G.M.; MacDONNEL, L.; MERRITT, D. M.; PALMER, M.A.; POFF, N.L.; TARBO-TON, D. River Restoration. *Water Resources Research* 41, w 10301, p. 1-12, 2005.

**Priscilla Moura** Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos – Universidade Federal de Minas Gerais. E-mail: priscilla.moura@ehr.ufmg.br.

**Adriana Cardoso** Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos – Universidade Federal de Minas Gerais. E-mail: adriana.projetos@gmail.com.

**Ana Clara Santos** Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos – Universidade Federal de Minas Gerais. E-mail: anaclaraps@gmail.com.

**Márcio Baptista** Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos – Universidade Federal de Minas Gerais. E-mail: marcio.baptista@ehr.ufmg.br.