

## **Geomorfologia Cárstica Aplicada à Análise Locacional de Empreendimentos Industriais**

José Sílvio Silveira

(UNIFEMM – Centro Universitário de Sete Lagoas / ssilveirabh@yahoo.com.br)

Roberto Célio Valadão

(UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Geociências / valadao@ufmg.br)

### **Abstract**

The karstic land has specific fragilities and vulnerabilities when compared to those present in other geological-geomorphological contexts, therefore the human activities developed in karstic landscape require special attention. This paper aims at examining the location of industrial enterprises settled, from the geological point of view, on carbonate units, and from the geomorphological point of view, on phenomenology of exo and endokarstic genesis. These enterprises are located in the Industrial District of Pedro Leopoldo, situated in the northern portion of the metropolitan region of Belo Horizonte. The location of this industrial district and, consequently, of the industrial units installed in it are a clear indicator of the need of systematic environmental monitoring, not only of the area occupied, but also of the surroundings.

*Keywords: karstic land; industrial enterprises; locational analysis; environmental impacts.*

### **Resumo**

Os terrenos cársticos apresentam fragilidades e vulnerabilidades específicas quando comparados àquelas inerentes aos demais contextos geológico-geomórfológicos, o que torna as atividades humanas desenvolvidas nas superfícies carstificadas objeto de atenção especial. Este trabalho tem como objetivo analisar a localização de empreendimentos industriais assentados, do ponto de vista litológico, sobre unidades carbonáticas e, do ponto de vista geomorfológico, sobre fenomenologia de gênese exo e endocárstica. Esses empreendimentos estão localizados no Distrito Industrial de Pedro Leopoldo, situado na porção setentrional da Região Metropolitana de Belo Horizonte. A localização desse distrito industrial e, conseqüentemente, das unidades industriais nele instaladas, constituem claro indicador do necessário monitoramento ambiental sistemático não só da área ocupada por ele, como também de seu entorno.

*Palavras-chave: terrenos cársticos; empreendimentos industriais; análise locacional; impactos ambientais.*

## **I. Introdução**

Os empreendimentos que viabilizam a concretização dos múltiplos interesses do homem na sociedade contemporânea acabam, via de regra, por se sobreporem aos espaços e arranjos naturais. Essa sobreposição é, muitas vezes, realizada de forma descompromissada com as fragilidades e vulnerabilidades inerentes ao espaço ocupado. Nesse contexto, é notório o conhecimento científico acerca da especificidade dos ambientes cársticos, que acaba por refletir na sua acentuada fragilidade e vulnerabilidade ambientais.

A grande extensão dos terrenos cársticos localizados a norte de Belo Horizonte tem constituído um desafio aos diferentes atores sociais – públicos ou privados – comprometidos com o uso racional dos recursos naturais, a exemplo da crescente expansão de empreendimentos industriais naquelas áreas periféricas à metrópole mineira que avançam

sobre as rochas carbonáticas do Grupo Bambuí. É nesse contexto que se insere este trabalho, cujo objetivo está voltado para a análise dos condicionantes geomorfológicos do ambiente cárstico presentes em distrito industrial localizado no município de Pedro Leopoldo – MG. Este município está situado na porção setentrional da Região Metropolitana de Belo Horizonte, estando sua economia fortemente vinculada à atividade industrial desde os anos de 1950. Todavia, a expansão dessa atividade durante a segunda metade do século XX e, mais ainda, a sua continuidade neste início de século, tem refletido na demanda crescente por novos espaços industriais, ou, mesmo ainda, no adensamento da ocupação do Distrito Industrial já existente no município, o qual constitui o objeto de análise deste trabalho. Este distrito está localizado às margens da MG-424 que liga Pedro Leopoldo a Matozinhos (Fig. 01).

## II. Condicionantes geológicas do Distrito Industrial de Pedro Leopoldo

O arcabouço geológico regional em que o Distrito Industrial de Pedro Leopoldo encontra-se inserido é caracterizado pela ocorrência de três unidades geológicas principais: (i) o Complexo Gnáissico-migmatítico Indiferenciado, de idade arqueana; (ii) a Formação Sete Lagoas, pertencente ao Grupo Bambuí, do Proterozóico Superior; (iii) os aluviões quaternários (Fig. 01).

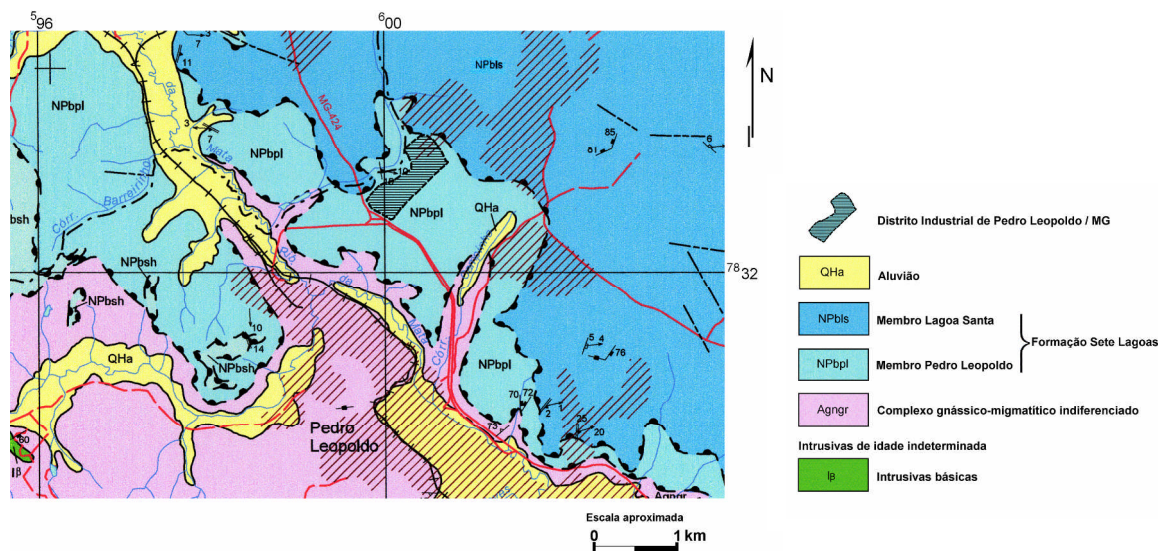


Fig. 01: Mapa geológico da área investigada (Adaptado de: CPRM. Informações básicas para a gestão territorial – GATE. Projeto Vida – Viabilidade Industrial e Defesa Ambiental: Mapeamento Geológico, 2003).

As unidades litológicas do Complexo Gnáissico-Migmatítico Indiferenciado, embora não estejam presentes na área estrita do Distrito Industrial, constituem, em profundidade, o substrato das unidades pelito-carbonáticas da Formação Sete Lagoas as quais, de fato, estão presentes na área de interesse deste estudo. As unidades litológicas desse complexo compreendem um conjunto de rochas polimetamórficas, constituídas por gnaisses de tipologia diversa, associados a granitóides e migmatitos. No conjunto, apresentam-se bem diversificadas e exibem litotipos de composição granito-ganáissica e migmatítica, com padrões texturais e estruturais variando de rochas bandadas fortemente foliadas a incipientes. Os contatos entre os vários litotipos desse Complexo são geralmente transicionais, principalmente entre gnaisses, migmatitos e/ou granitóides (CPRM, 2003).

A Formação Sete Lagoas, pertencente ao Grupo Bambuí, ocupa parcela considerável do arcabouço geológico regional. Essa formação, que recobre as unidades litológicas do Complexo Gnáissico-Migmatítico Indiferenciado, é constituída por dois membros: (i) um estratigraficamente inferior, denominado Membro Pedro Leopoldo; (ii) um estratigraficamente superior, denominado Membro Lagoa Santa (Fig. 02). O Membro Pedro Leopoldo é constituído por seqüência carbonática representada por calcissiltitos e, subordinadamente, por calcarenitos e margas. O Membro Lagoa Santa é composto por seqüência carbonática representada predominantemente por calcarenitos e, secundariamente, por calcissiltitos e calciruditos. Os calcarenitos são calcários cinza escuro a negro, com presença abundante de calcita, que preenchem vazios e fraturas (CPRM, 2003).

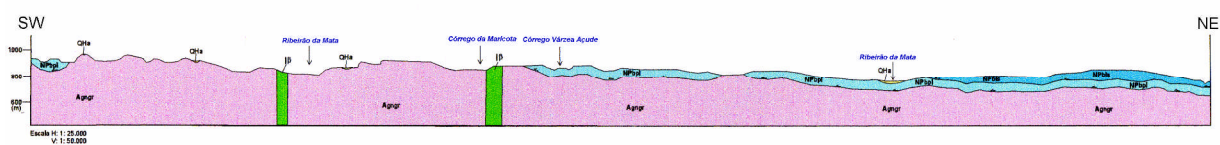


Fig. 02: Seção geológica-estratigráfica regional (Adaptado de: CPRM. Informações básicas para a gestão territorial – GATE. Projeto Vida – Viabilidade Industrial e Defesa Ambiental: Mapeamento Geológico, 2003).

Os depósitos aluviais quaternários ocupam trechos das margens de córregos e ribeirões, correspondendo às áreas de inundação atuais e aos depósitos fluviais antigos, na forma de terraços aluviais. Os depósitos mais recentes, encontrados às margens ou no interior dos canais fluviais, tendem a apresentar distribuição espacial na forma de cordões alongados e contornos irregulares. Esses depósitos são formados por sedimentos continentais terrígenos,

inconsolidados e mal selecionados, em que predominam materiais como cascalhos, areias, siltes e argilas (CPRM, 2003). Além dos aluviões associados aos canais fluviais, é comum a sua ocorrência preenchendo o fundo de depressões fechadas – dolinas, uvalas –, preenchidas ou não pela água. Essas depressões fechadas ocorrem naquelas áreas cujo substrato geológico é constituído pelas unidades pelito-carbonáticas da Formação Sete Lagoas.

Especificamente, a área de interesse deste trabalho está, do ponto de vista geológico, integralmente inserida nas unidades pelito-carbonáticas da Formação Sete Lagoas, pertencente ao Grupo Bambuí (Fig. 03). A totalidade da área ocupada pelo Distrito Industrial tem como substrato geológico as unidades litológicas do Membro Pedro Leopoldo, o qual apresenta seqüência carbonática composta predominantemente por calcissiltitos e, subordinadamente, por calcarenitos e margas. Os calcissiltitos são calcários impuros, às vezes dolomíticos, que apresentam coloração cinza, com intercalações escuras. Afloramentos dessas rochas no interior da área ocupada pelo Distrito Industrial estão ausentes, uma vez que as mesmas encontram-se em avançado estado de alteração por processos intempéricos. Essa alteração foi responsável pela produção de cobertura pedológica de coloração avermelhada muito profunda, a qual, localmente, atinge espessura superior a 8 metros (Fig. 04).

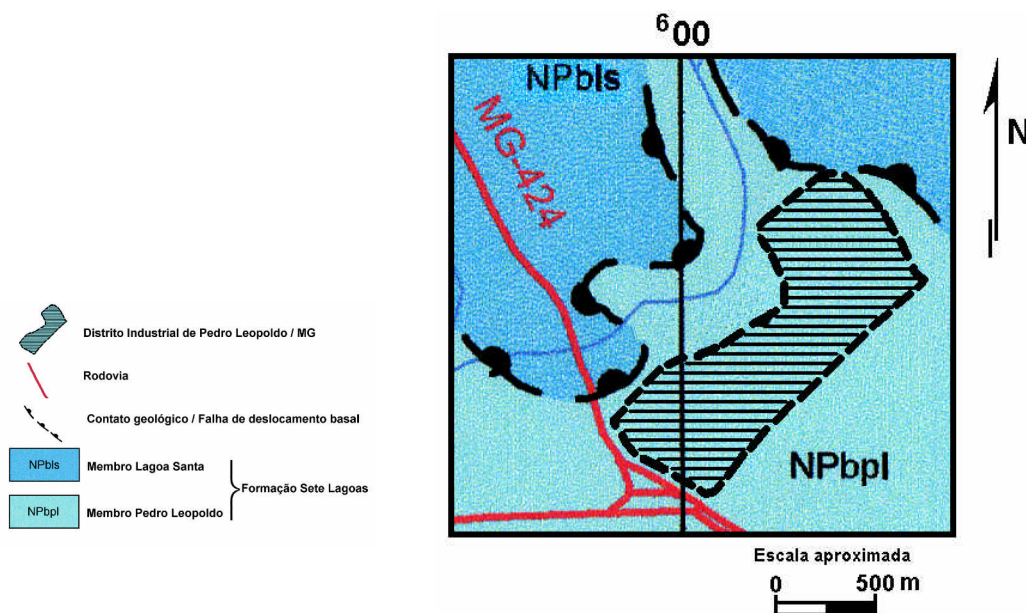


Fig. 03: Esboço geológico da área do Distrito Industrial e de seu entorno (Adaptado de: CPRM. Informações básicas para a gestão territorial – GATE. Projeto Vida – Viabilidade Industrial e Defesa Ambiental: Mapeamento Geológico, 2003).



Fig. 04: Cobertura pedológica tipicamente encontrada na área do Distrito Industrial, resultante da alteração dos calcissiltitos, calcarenitos e margas pertencentes ao Membro Pedro Leopoldo, da Formação Sete Lagoas. É digna de nota a considerável espessura dos solos, bem como o fato da rocha sã não ter sido alcançada em corte de talude com cerca de 8 metros de profundidade. (Fotografia obtida em 02/04/2008, em corte de desaterro localizado à Rua Zico Barbosa, s/n).

As unidades pelito-carbonáticas do Membro Lagoa Santa, embora ausentes na área do Distrito Industrial, ocorrem nas imediações do mesmo, sendo encontradas a norte, leste e oeste (Fig. 03). A presença dessa seqüência carbonática representada predominantemente por calcarenitos e, secundariamente, por calcissiltitos e calciruditos, é de fundamental interesse neste estudo, uma vez que nelas se verificam claramente feições geológicas associadas à dinâmica cárstica, cuja fragilidade ambiental é notória e amplamente reconhecida na literatura especializada. Exposições dessas rochas são encontradas às margens da MG-424, bem como em escarpa rochosa localizada nas margens de pequena lagoa que ocupa o piso da depressão fechada em que se localiza a área de estudo (Fig. 05).



Fig. 05: Afloramentos das unidades litológicas do Membro Lagoa Santa, nas imediações do Distrito Industrial. **A**: rochas carbonáticas de coloração cinza expostas em corte da MG-424, circundadas por cobertura pedológica avermelhada; **B**: rochas carbonáticas de

coloração cinza expostas à margem de depressão fechada – dolina ou uvala. (Fotografia obtida em 02/04/2008)

### **III. Condicionantes geomorfológicos e hidrogeológicos do Distrito Industrial de Pedro Leopoldo e de seu entorno**

A configuração geomorfológica regional em que a área investigada encontra-se inserida é caracterizada pela ocorrência de duas unidades geomorfológicas principais: (i) colinas e vales modelados nas unidades litológicas do Complexo Gnáissico-Migmatítico Indiferenciado; (ii) colinas, vales e depressões fechadas modelados nas unidades litológicas da Formação Sete Lagoas.

A unidade geomorfológica caracterizada pela presença de colinas e vales que tem como substrato os gnaisses e migmatitos arqueanos é composta por trama de vertentes convexo-côncavas, cujos interflúvios situam-se em intervalo altimétrico entre 830 metros e 900 metros. As principais linhas de talvegue são ocupadas por largas planícies de inundação, a exemplo daquelas que margeiam os médios e baixos cursos dos ribeirões da Mata, das Neves e do Urubu. Esses fundos de vale estão altimetricamente situados entre 700 e 740 metros, ao longo dos quais foram instaladas as principais estradas vicinais que, partindo da sede municipal de Pedro Leopoldo, se dirigem às localidades rurais e distritos localizados na porção oeste do município. A própria malha urbana da cidade de Pedro Leopoldo está em grande parte assentada sobre depósitos aluviais quaternários. O limite entre essa unidade geomorfológica com aquela caracterizada pela ocorrência de colinas, vales e depressões fechadas modelados nas unidades litológicas da Formação Sete Lagoas é realizado de maneira brusca. Esse limite, que segue marcante *trend* estrutural NW-SE, é muito bem definido pelo vale do Ribeirão da Mata. É importante observar que o Distrito Industrial de interesse deste trabalho está integralmente inserido nessa última unidade geomorfológica.

Feições geológico-geomorfológicas típicas do carste estão significativamente presentes na unidade cujo relevo foi modelado nas litologias carbonáticas da Formação Sete Lagoas. Nessa unidade geomorfológica as vertentes são relativamente longas e apresentam perfil predominantemente convexo, sendo raros os ravinamentos. A rede hidrográfica é pouco densa, assumindo importância aquela de caráter subterrâneo, típica de regiões cársticas. As depressões fechadas – dolinas e uvalas – são numerosas, bem como vales cegos, sumidouros e surgências. Algumas dessas depressões são preenchidas por água e formam zonas alagadiças

e, por vezes, pequenas lagoas. As altitudes nessa unidade geomorfológica situam-se entre os 650 metros (piso de algumas depressões fechadas) e 880 metros (principais interflúvios).

Do ponto de vista geomorfológico e hidrogeológico a área investigada está situada na borda meridional de uma depressão fechada, cuja gênese está associada à geodinâmica típica do carste. O piso dessa depressão situa-se abaixo dos 780 metros de altitude, ao passo que a linha de interflúvio que a delimita está, grosso modo, entre as cotas de 820 a 890 metros (Fig. 6). A sua formação envolveu, ao longo do tempo geológico, a ação conjunta de processos geomorfológicos superficiais e subterrâneos, tendo a água desempenhado papel fundamental, verificado tanto no aprofundamento das linhas de talvegue pela ação do escoamento pluvial/fluviial, bem como na dissolução geoquímica em profundidade das litologias carbonáticas da Formação Sete Lagoas. As feições geomorfológicas superficiais que atualmente caracterizam a área são, concomitantemente, testemunhas e conseqüências dessa evolução espaço-temporal.

As principais feições geomorfológicas presentes na depressão fechada em que se localiza a área investigada são relacionadas e mapeadas na Figura 7. A configuração geomorfológica representada nessa figura foi obtida a partir de investigações de campo, da análise de mapas topográficos nas escalas 1:25.000 (Convênio PLAMBEL - SECT - COPASA - CETEC - CEMIG. Carta topográfica Matozinhos, 1977) e 1:50.000 (IBGE/IGA. Carta topográfica Pedro Leopoldo, 1986) e da interpretação de imagem de satélite (*Google Earth*, 2008. Acesso em 14/04/2008). Importante observar que o Distrito Industrial, ao ocupar parte da borda meridional da depressão fechada, localiza-se em posição de média vertente, ou seja, não se estende até a linha de interflúvio que delimita a depressão, bem como não alcança, também, o piso da depressão propriamente dito. No interior do piso da depressão ocorrem duas áreas alagadiças que, segundo informações obtidas no campo, no passado correspondiam a uma única lagoa de caráter intermitente, seccionada mais tarde pela construção de estrada vicinal. Essas lagoas, embora intermitentes, apresentam, hoje, estágio avançado de assoreamento, sobretudo aquela de menor extensão de lâmina de água localizada nas imediações do sumidouro (Fig. 7 e Fig. 8).

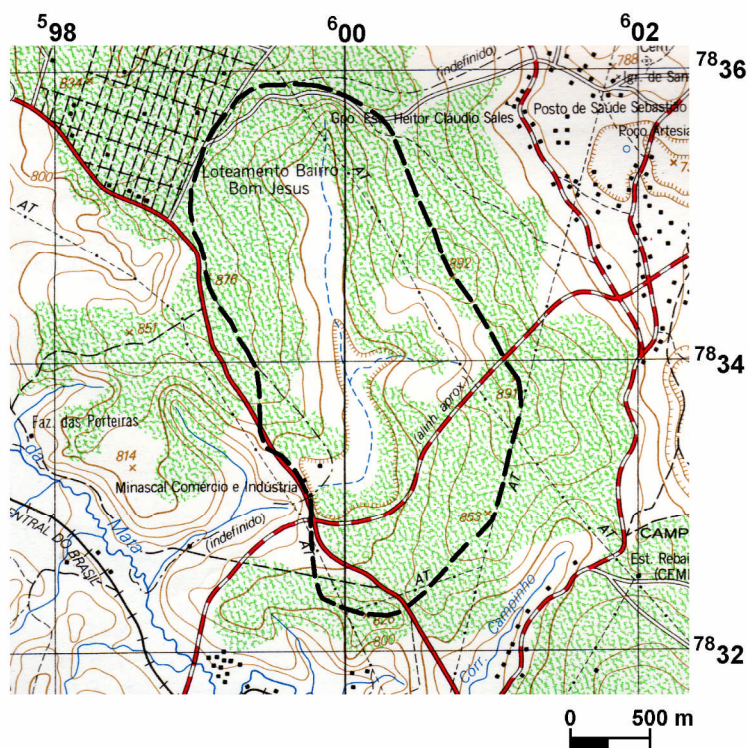


Fig. 06: Mapa topográfico das imediações do Distrito Industrial. A linha tracejada, em destaque nesse mapa, delimita a depressão fechada em que está localizado o referido distrito.  
(Adaptado de: IBGE/IGA. Carta topográfica Pedro Leopoldo, Escala 1:50.000, 1986)

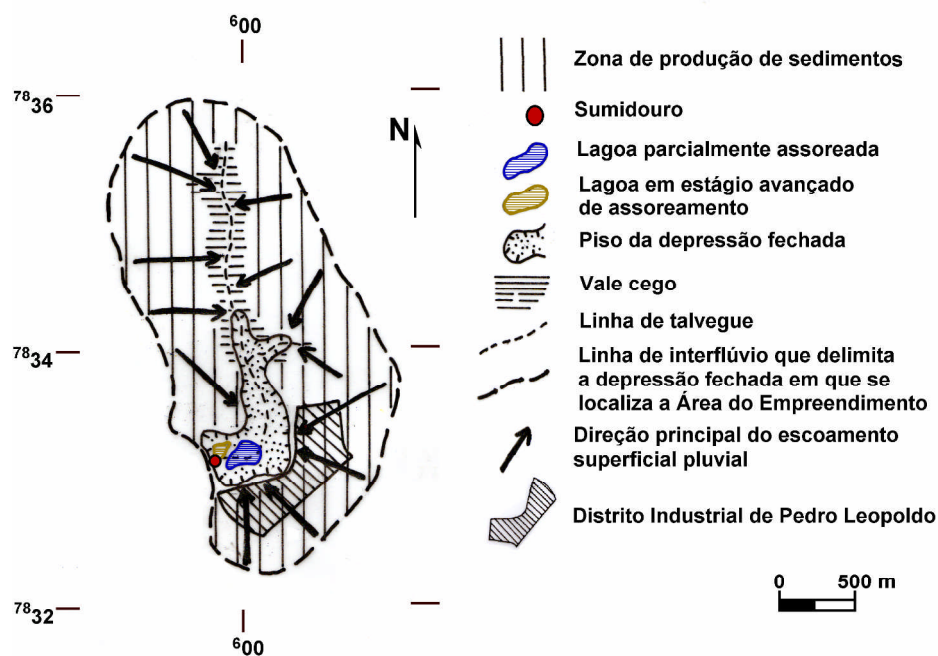


Fig. 07: Esboço da configuração geomorfológica das imediações do Distrito Industrial. A linha tracejada, em destaque nesse esboço, delimita a depressão fechada em que está localizada o Distrito Industrial objeto de análise neste estudo.





Fig. 08: Imagem de satélite que mostra a situação das duas áreas alagadiças (lagoas) que se localizam no interior do piso da depressão, bem como a localização aproximada do sumidouro pelo qual o fluxo superficial passa a assumir caráter subterrâneo. **A**: Lagoa em estágio avançado de assoreamento; **B**: Lagoa parcialmente assoreada; **C**: Sumidouro. Observe que a área ocupada pelo Distrito Industrial (**D**) não ocupa o piso da depressão. (Imagem de satélite disponível [www.google.earth.com](http://www.google.earth.com). Acesso em 14/04/2008)

Digno de nota é o fato do piso da depressão fechada, ao se estender para norte, se articular e estar inserido em um vale cego, feição geomorfológica típica de regiões cársticas (Fig. 06 e Fig. 07). Todo esse corredor topográfico rebaixado, de orientação norte-sul, formado pela associação piso da depressão/vale cego corresponde à zona de recepção da carga de sedimentos produzida nas porções média e alta das vertentes que configuram as bordas da depressão. A zona de produção de sedimentos é mapeada na Figura 07, que mostra a área do Distrito Industrial integralmente inserida nesse contexto geomorfológico. Essa localização, juntamente com a análise da direção principal do escoamento pluvial (Fig. 07), comprovam que as atividades humanas hoje ou no futuro praticadas no Distrito Industrial, bem como o uso e ocupação do seu solo, são determinantes para a contribuição de carga não somente de partículas sedimentares – argila, silte, areia, cascalho –, provenientes da erosão da espessa cobertura pedológica presente na área, bem como daquela oriunda de quaisquer resíduos derivados de atividades industriais que porventura sejam incorporados e carreados pela água.

A produção de sedimentos derivada da ação antrópica é, hoje, elevada, como verificado durante investigações conduzidas no campo. Nesse contexto, destacam-se aquelas ações associadas aos trabalhos de terraplanagem com vistas à instalação de novas unidades

industriais, que acabam por expor o solo à ação das diferentes modalidades de escoamento pluvial, bem como a ação desse mesmo escoamento sobre pilhas de estéreis derivadas de atividades industriais já em curso no distrito (Fig. 09). O sistema de drenagem pluvial já instalado no arruamento do Distrito Industrial comprova o grande volume de água drenado durante eventos de precipitação intensa. Localmente foi observado o comprometimento de antigo equipamento destinado à coleta e vazão pluvial (Fig. 10).



Fig. 09: Produção de sedimentos na área do Distrito Industrial pela ação antrópica. **A**: Corte de talude para desaterro; **B**: Disposição de pilhas de estéreis a céu aberto. (Fotografias obtidas em 02/04/2008, em corte de desaterro e instalação industrial localizados à Rua Zico Barbosa, s/n).



Fig. 10: Equipamento urbano para recepção e vazão do escoamento pluvial de arruamento. É importante observar que um antigo sistema construído com tubulação e aterramento foi destruído pela erosão pluvial, o que tornou necessária a instalação de novo equipamento baseado na utilização de gabiões. (Fotografia obtida em 02/04/2008, na Rua Zico Barbosa, s/n).

#### **IV. Análise locacional dos empreendimentos industriais, impactos ambientais e ações mitigadoras orientadas pela abordagem geomorfológica**

Os condicionantes geológicos, geomorfológicos e hidrogeológicos presentes na área ocupada pelo Distrito Industrial de Pedro Leopoldo lhe conferem acentuada fragilidade do ponto de vista do meio físico. Sua localização na borda meridional de uma depressão fechada – típica de ambientes cársticos –, cuja drenagem superficial é integralmente conduzida para o escoamento subterrâneo ao término de um vale cego, faz com que a água de superfície alcance inevitavelmente condutos cársticos. Ao que tudo indica, esses condutos cársticos transportam a água em subsuperfície para além da depressão fechada em direção a uma das cabeceiras de drenagem do Ribeirão da Mata, onde essa é exfiltrada em uma nascente (Fig. 11).

A investigação de campo, bem como aquela derivada da análise de produtos de sensor remoto, apontam, de forma inequívoca, para o estágio avançado de assoreamento do piso da depressão. É importante observar que esse assoreamento não deriva exclusivamente da área estrita do Empreendimento, mas, também, de atividades humanas outras desenvolvidas no interior da depressão – como, por exemplo, da atividade pecuária, mas, sobretudo, daquelas atividades associadas ao uso do solo urbano nas imediações do Distrito Industrial.

Essa análise locacional permite tecer algumas considerações acerca das ações mitigadoras dos impactos ambientais atuais e futuros que venham a ser reproduzidos na área, segundo avaliação geológica e geomorfológica da área do Distrito Industrial e de seu entorno. Sugere-se que essas ações estejam orientadas para esforços de: (a) realizar, de forma racional, as atividades de terraplanagem que visam viabilizar a instalação de novos equipamentos urbano/industriais, com vistas a reduzir, de forma significativa, a produção de sedimentos na área do Distrito Industrial e, conseqüentemente, a remoção e transporte dos mesmos em direção ao piso da depressão fechada; (b) construir sistema de drenagem pluvial naquelas áreas de acúmulo de pilhas de estéreis derivados dos diferentes processos industriais já presentes no Distrito Industrial, bem como prever, antecipadamente, a instalação de sistema semelhante nas novas instalações industriais, caso se aplique; (c) adaptar/adequar o atual sistema de drenagem pluvial à real vazão de água verificada durante episódios intensos de precipitação pluviométrica, com vistas a evitar o comprometimento dos equipamentos já instalados, o que acaba por produzir considerável carga sedimentar mediante processo de

erosão remontante; (d) criar Área de Preservação Permanente na zona limítrofe do Empreendimento, cuja forma e distribuição espacial devam atender, dentre outros interesses, aquele de reduzir a alta taxa de transferência de sedimentos para o interior do piso da depressão, como mostrado na Figura 11; (e) fomentar, junto às indústrias já instaladas no Distrito Industrial, bem como naquelas futuras unidades industriais, a implantação de sistema de gestão ambiental interno, de responsabilidade do setor industrial, em que estejam presentes ações voltadas para o tratamento de resíduos quaisquer derivados dessa atividade, sejam esses sólidos ou líquidos. Essa ação se justifica pelo fato de que esses resíduos, caso dispersados no meio, acabarão, direta ou indiretamente, sendo carregados até o fundo da depressão. No caso de material particulado, acentuarão o processo de assoreamento já em curso, ao passo que, no caso daqueles materiais dissolvidos na água empregada nos diversos processos industriais, poderão promover a contaminação da água acumulada nas lagoas que ocupam o piso da depressão fechada, agravado pelo fato de que o sistema cárstico poderá transferir os elementos contaminantes para além dos limites geográficos da depressão fechada (nesse caso, ao que tudo indica, para uma das cabeceiras do Ribeirão da Mata).

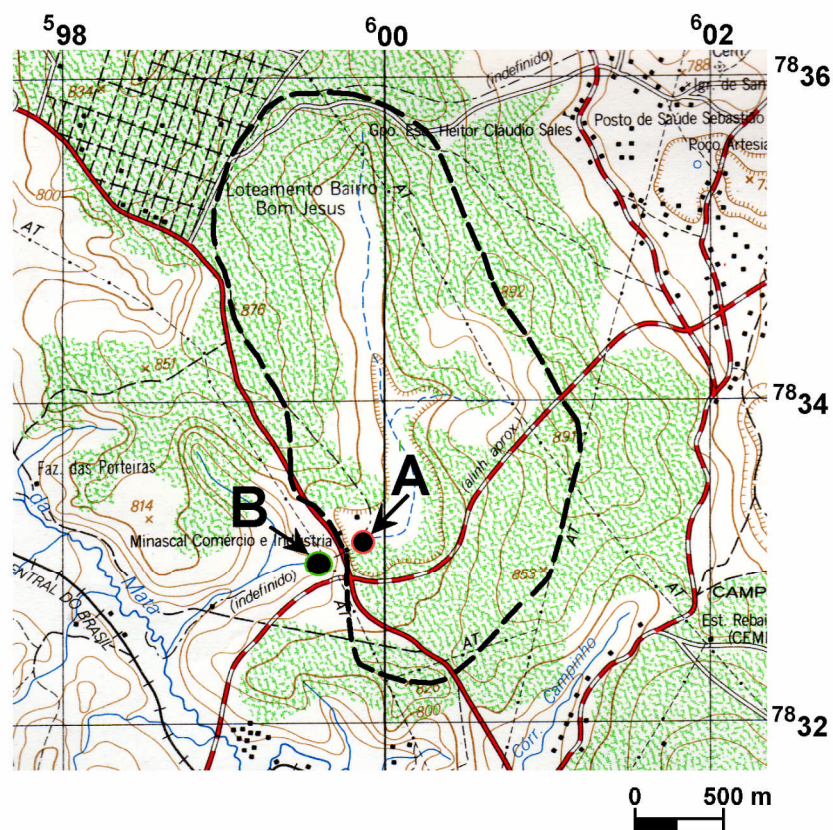


Fig. 11: Mapa topográfico que representa o limite da depressão fechada em que se localiza o Distrito Industrial de Pedro Leopoldo, mostrando a localização aproximada do sumidouro

(A) por meio do qual a água de superfície adentra o sistema cárstico subterrâneo, bem como a provável localização da zona de exfiltração (surgência) (B) em cabeceira de drenagem de afluente do Ribeirão da Mata. (Adaptado de: IBGE/IGA. Carta topográfica Pedro Leopoldo, Escala 1:50.000, 1986)



Fig. 12: Forma e distribuição espacial de Área de Preservação Permanente a ser criada com vistas a reduzir a taxa de transferência de sedimentos, material particulado e dissolvido, para o interior do piso da depressão fechada. A: Área de Preservação Permanente proposta neste estudo; B: Área do Empreendimento. (Imagem de satélite disponível [www.google.earth.com](http://www.google.earth.com). Acesso em 14/04/2008)

### Bibliografia

CPRM. Informações básicas para a gestão territorial – GATE. Projeto Vida – Viabilidade Industrial e Defesa Ambiental: Mapeamento Geológico, 2003.

IBGE/IGA. Carta topográfica Pedro Leopoldo, Escala 1:50.000, 1986.

Imagens de satélite em meio digital disponibilizadas pelo *Google Earth* ([www.google.earth.com](http://www.google.earth.com)). Acesso em 14/04/2008.

PLAMBEL - SECT - COPASA - CETEC - CEMIG. Carta topográfica Matozinhos, Escala 1:25.000, 1977.