

## INDICADORES DE POLUIÇÃO NA EXPLORAÇÃO DE CARVÃO DETECTADOS POR SENSORES REMOTOS

**Prof. M.Eng. ROQUE A. SÁNCHEZ DALOTTO**  
Doutorando Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)  
Florianópolis (SC), Brasil. E-mail: sanlotto@hotmail.com

**Prof. Dr. CARLOS LOCH**  
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)  
Florianópolis (SC), Brasil. E-mail: loch@ecv.ufsc.br

### RESUMO

No Brasil são necessários estudos para o monitoramento ambiental na Bacia Carbonífera, embora a problemática da poluição por exploração do carvão tenha passado o seu auge. Com produção de carvão mineral ainda significativa na área de Siderópolis, estado de Santa Catarina, os problemas ambientais de sua exploração estão principalmente relacionados à poluição hídrica. Os rejeitos da mineração contêm pirita, a qual na sua exposição com o oxigênio do ar e da água forma uma solução de ácido sulfúrico, tornando solúveis outros elementos como ferro, manganês, cálcio, magnésio e sódio. As águas de drenagem das mineradoras e as águas pluviais que interagem com os rejeitos levam também partículas finas, que sedimentarão a jusante formando espessas camadas de lodos com alto conteúdo de poluentes. A utilização de técnicas de Sensoriamento Remoto permitiu detectar os setores de acumulação dos lodos mediante imagens de satélite, com resultados comprovados mediante trabalhos de campo. Analisou-se a relação benefício/custo, mostrando-se conveniente a aplicação da técnica para estes tipos de estudos ambientais. As atividades foram desenvolvidas como parte da Dissertação de Mestrado “Aplicação de modelos de simulação, prognose e decisão no estudo ambiental da Região Carbonífera Catarinense”, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.

**Palavras chave:** carvão – poluentes – sensoriamento remoto – Bacia Carbonífera.

### 1. OS PROBLEMAS AMBIENTAIS DA ÁREA ESTUDADA

A área estudada encontra-se no município de Siderópolis, estado de Santa Catarina, Brasil. Está limitada aproximadamente pelas coordenadas geográficas 28°33’S e 28°39’S em latitude e 49°22’W e 49°26’W em longitude, cobrindo um setor de 6’ por 4’. Na latitude meia da área, este setor de 4’ por 6’ representa aproximadamente 9,8Km no sentido Norte-Sul por 7,4Km no sentido Leste-Oeste.

Em condições normais, as águas dos rios da área sem poluição, têm características ácidas devido à litologia local. Os rejeitos da mineração (Figura 1) contêm principalmente pirita ( $\text{FeS}_2$ ), a qual na sua exposição com o oxigênio do ar e da água forma uma solução de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). No meio com potencial Hidrogênio (pH) baixo, o ácido sulfúrico solubiliza outros elementos como ferro, manganês, cálcio, magnésio e sódio, fato pelo qual a solução resultante é ainda muito mais ácida, com pH 2,5 a 3,0 (SANTA CATARINA, 1997).



**Figura 1: REJEITOS DE CARVAO**

Fonte: Trabalhos de campo, 1999. Adaptação: Sánchez Dalotto, 1999.

As águas de drenagem das minas e lavadoras de carvão, com o pH citado, são enviadas à rede hidrográfica, alterando significativamente a neutralidade ( $\text{pH}=7$ ) de qualquer ecossistema da região. Além da ação antrópica com as águas de drenagem, as águas pluviais que interagem com os rejeitos levam partículas finas, as quais permanecem em suspensão nas águas dos rios. As enchentes destas águas ácidas com partículas estranhas aos solos sobre os terrenos acarretam consideráveis prejuízos aos proprietários rurais, depositando espessas camadas de lodos com sais e óxidos de ferro.

No que diz respeito à poluição do solo, as parcelas improdutivas pela remoção da cobertura para lavras a céu aberto, e as subsidências devido às galerias, são as alterações mais frequentes, estando estas últimas em diminuição.

A ação dos organismos federais está atualmente orientada às concessões de mineração, a cambio de recuperação de áreas degradadas, tarefas habitualmente fiscalizadas pelas mesmas unidades.

## **2. OBJETIVOS DO ESTUDO**

Os objetivos centralizaram-se em:

- a) A detecção de setores de acumulação de lodos com rejeitos poluentes produzidos pela mineração, utilizando técnicas de Sensoriamento Remoto baseadas em imagens de satélite.
- b) A análise da conveniência na aplicação da técnica para estes tipos de estudos ambientais, considerando verificações por trabalhos de campo e relações benefício/custo.

## **3. MATERIAL**

Foram disponibilizadas seis bandas Landsat TM5 em suporte digital pelo Laboratório de Fotogrametria, Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento (LFSRG) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Brasil. As imagens datadas de Novembro de 1996 foram doadas pelo Instituto

Nacional de Pesquisas Espaciais do Brasil (INPE). Correspondem às bandas TM 1, 2, 3, 4, 5 e 7.

Aplicando o esquema dedutivo da análise da paisagem, estas imagens serviram para determinar por processamento digital e interpretação direta, as unidades homogêneas (CAUVIN, 1999) da área de estudo, atingindo a identificação dos lodos com rejeitos poluentes.

#### **4. MÉTODO**

O método esteve composto de três etapas:

- a) Identificação dos lodos com rejeitos poluentes utilizando imagens de satélite;
- b) Trabalhos de campo;
- c) Análise dos resultados e relação benefício/custo da técnica utilizada.

##### **4.1. Identificação dos lodos com rejeitos poluentes utilizando imagens de satélite**

Utilizou-se a composição formada pelas 6 bandas de imagens de satélite para identificar as áreas de deposição de lodos com rejeitos poluentes. Logo após georreferenciadas, aplicou-se dos métodos de processamento de imagens: falsa cor e tratamento de imagens múltiplas, este último com duas técnicas: produto de bandas e índices de vegetação. A utilização destes métodos justifica-se na convergência dos resultados para delimitar áreas homogêneas (LILLESAND & KIEFER, 1994).

###### **4.1.1. Processamento falsa cor**

O processamento consistiu na obtenção de imagens falsa cor, combinando as bandas TM originais ou imagens derivadas, nos canais azul, verde e vermelho (sistema RGB) ou ciano, amarelo, magenta e preto (sistema CMYK) para constituir imagens compostas.

As combinações utilizadas foram escolhidas entre as padronizadas internacionalmente e outras testadas em particular.

###### **4.1.2. Processamento de imagens múltiplas**

No método de processamento por tratamento de imagens múltiplas, foram utilizadas as técnicas de multiplicação de bandas e índices de vegetação.

A multiplicação de bandas consistiu no produto dos valores digitais dos píxeis de uma banda pelos valores digitais de outra. Esta técnica, quando vincula bandas com respostas espectrais similares, permite alongar as diferenças entre elementos claros e escuros da imagem, aumentando o contraste, e freqüentemente, evidenciando unidades da paisagem.

O índice de vegetação utilizado foi o "Tasseled Cap". A utilização deste indicador, considerou as seis bandas refletivas do sensor TM ocupando três dimensões, das quais são derivadas três imagens

correspondentes:

- a) imagem de brilho, obtido a partir da soma ponderada das seis bandas, corresponde geralmente à variação da refletância dos solos;
- b) imagem de vigor, representa o contraste entre as bandas infravermelhas e visíveis. Está diretamente relacionado com a quantidade de vegetação verde presente na imagem;
- c) imagem de umidade, relaciona cultivos e umidade dos solos.

Posteriormente, todas as imagens geradas no processamento de imagens múltiplas foram utilizadas na composição de produtos falsa cor, com a finalidade de reforçar a convergência dos resultados em áreas de homogeneidade espectral.

Gerou-se a imagem na qual o canal ciano representa a umidade, o canal amarelo a banda TM4, o canal magenta o vigor e o canal preto a banda TM5, evidenciando-se as áreas de interesse.

## **4.2. Trabalhos de campo**

No projeto geral do estudo, foram realizados cinco trabalhos de campo durante dez meses. A finalidade destes trabalhos foi conhecer o meio, analisar a paisagem e obter dados para classificações orientadas ao processamento de imagens e fotointerpretações. O procedimento utilizado foi reconhecimento visual com determinação da posição geográfica mediante GPS navegador.

A distribuição temporal dos dados (DA SILVA & SOUZA., 1988) permitiu observar diferentes estados climáticos e fenológicos, cobrindo o ciclo anual das espécies vegetais da área. Foram realizadas medições adicionais de pH com fita colorimétrica, e de vazão mediante a técnica velocidade-seção (LINSLEY, KOHLER & PAULHUS, 1981). Totalizaram-se aproximadamente oitenta horas de trabalhos de campo exclusivos.

A localização espacial dos pontos visitados e de tomada de fotografias oblíquas para referência foi efetuada mediante o uso do navegador GPS, configurado para fornecer coordenadas N-E em sistema UTM fuso 22, datum Córrego Alegre. Este procedimento facilitou a identificação de pontos nas imagens e sua relação com a cartografia utilizada, minimizando o problema de desatualização tanto nas feições planimétricas quanto nas mudanças altimétricas produzidas pela mineração.

## **4.3. Análise dos resultados e relação benefício/custo da técnica utilizada**

Analisando os resultados obtidos por processamento de imagens, estabeleceu-se uma classificação supervisionada com os resultados de campo, visando determinar o grau de precisão e convergência obtido (CHRISTIANSEN, CHRIST & HANSMANN, 1997). Considerando estes resultados, o investimento monetário e horas-homem necessárias para atingir os objetivos, analisou-se a relação benefício/custo existente nas tarefas desenvolvidas.

## **5. RESULTADOS**

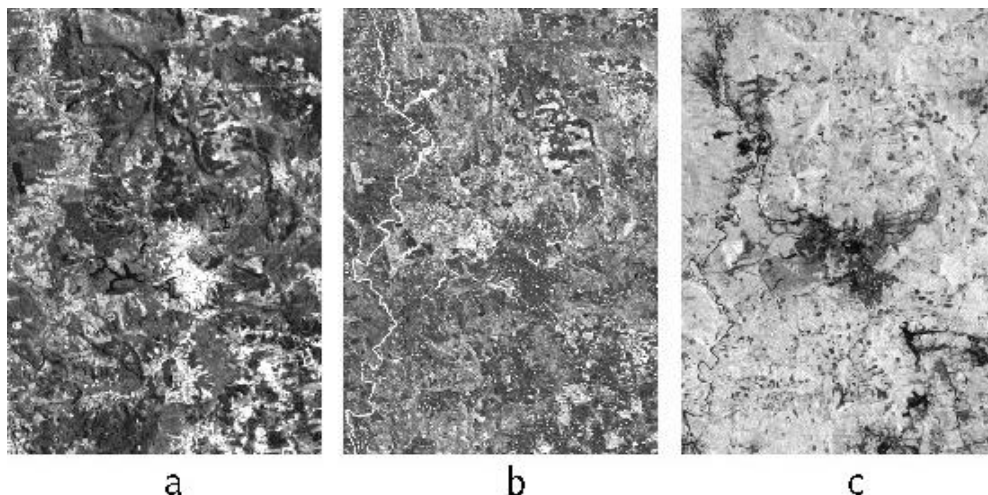
### **5.1. Identificação dos lodos com rejeitos poluentes utilizando imagens de satélite**

As imagens obtidas mediante o cômputo do indicador *tasseled cap* correspondem ao brilho, umidade e vigor.

No brilho, correspondendo geralmente à variação da refletância dos solos, visualizaram-se duas áreas características, definidas pelas manchas urbanas e pelas áreas rurais (Figura 2a).

Na imagem que representa a umidade, relacionando cultivos e umidade dos solos, destaca-se em tonalidades claras o rio Mãe Luzia à esquerda da imagem, e alguns lagos artificiais produzidos pela mineração (Figura 2b).

Na imagem que representa o vigor percebe-se o contraste entre as bandas infravermelhas e visíveis. Está relacionada com a quantidade de vegetação verde presente na imagem. Na mesma, identificaram-se zonas com carência de vegetação, concordantes com as áreas de mineração (Figura 2c).



**Figura 2: BRILHO DOS SOLOS, UMIDADE E VIGOR**

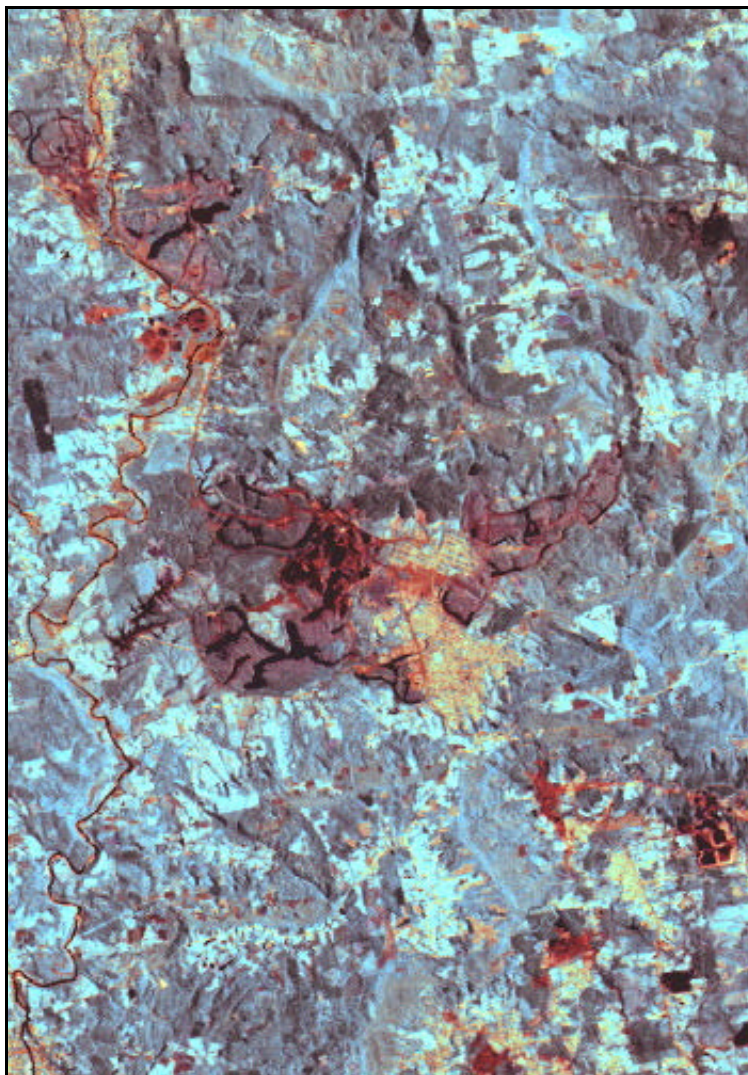
Fonte da imagem: Laboratório de Fotogrametria, Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento (UFSC), 1999  
Processamento: Sánchez Dalotto, 1999.

Para reforçar a convergência dos resultados em áreas de homogeneidade espectral, e detectar as áreas com lodos, geraram-se imagens falsa cor com os resultados das técnicas de imagens múltiplas e bandas originais.

Os resultados obtidos no processamento de uma imagem, na qual a umidade é aplicada no canal ciano, a banda TM4 é aplicada no canal amarelo, o vigor é aplicado no canal magenta e a banda TM5 é aplicada no canal preto (Figura 3), forneceu as condições ótimas de interpretação da realidade ambiental pesquisada. Nesta imagem obtida evidenciaram-se, em cor laranja, os lodos com sais e óxidos de ferro nas margens dos cursos afetados pela mineração, fato comprovado nas diversas viagens

de campo.

(28°33'S, 49°26'W)



(28°39'S, 49°22'W)

**Figura 3: EVIDÊNCIA DE SAIS E ÓXIDOS DE FERRO  
NAS MARGENS DOS CURSOS AFETADOS PELA MINERAÇÃO**

Fonte da imagem: Laboratório de Fotogrametria, Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento (UFSC), 1999  
Processamento: Sánchez Dalotto, 1999.

## 5.2. Trabalhos de campo



Foi reconhecido visual e fotograficamente o meio. Determinou-se a posição geográfica de vinte e oito pontos mediante GPS navegador, os quais serviram na identificação de áreas teste para a classificação supervisionada. Adicionalmente, foram efetuadas medições indicativas de pH nas águas dos cursos analisados, e realizaram-se cálculos empíricos de vazão mediante o procedimento velocidade-seção. Em relação ao potencial Hidrogênio, indicador básico das condições do biotopo, os valores oscilaram entre pH=6,0 nos cursos principais com escoamento livre à montante das áreas mineradas e pH=3,5 à jusante das mesmas (Figura 4); pH=4,0 nos lagos em processo de recuperação; pH=5,0 nas águas das lavras a céu aberto e pH=2,0 nas bacias de decantação com acumulação de lodos. A vazão do curso principal estudado foi determinada com finalidade orientadora, calculando-se em  $0,3\text{m}^3/\text{s}$  na data do trabalho de campo.



**Figura 4: ESTADO DOS CURSOS À JUSANTE DAS ÁREAS MINERADAS**  
Fonte: Sánchez Dalotto, 1999.

### **5.3. Análise dos resultados e relação benefício/custo da técnica utilizada**

Com os resultados da imagem de satélite e os dados de campo, foi realizada uma classificação supervisionada para isolar e identificar os setores de acumulação de lodos com rejeitos poluentes produzidos pela mineração.

Determinada a assinatura espectral dos lodos produzidos pela mineração nas imagens de brilho, umidade e vigor, aplicou-se classificação supervisionada mediante método dos paralelepípedos. O resultado apresenta-se na Figura 5. Encontrou-se alta correspondência entre estes resultados e a reambulação de campo.

Atendendo a convergência dos resultados, os investimentos realizados pela Universidade Federal de Santa Catarina durante o desenvolvimento da pesquisa, orientados principalmente a viagens

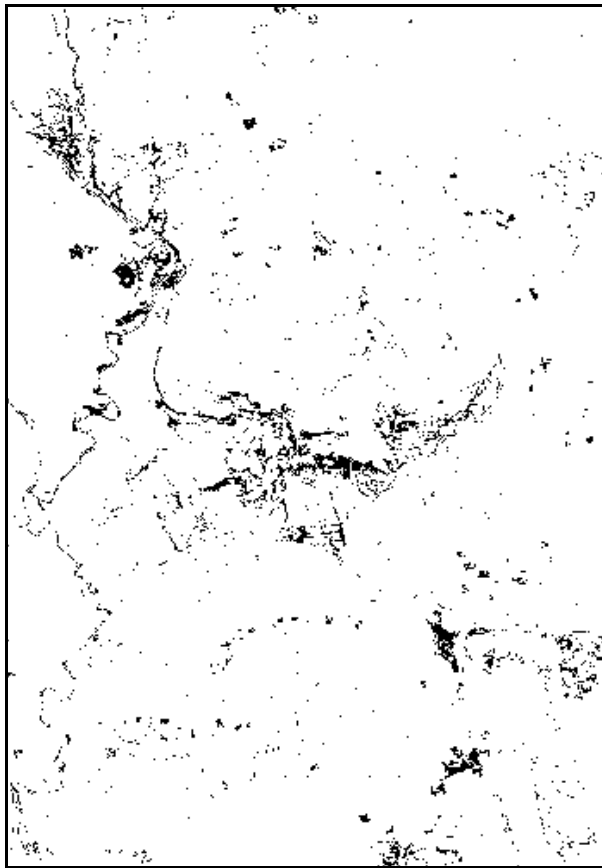
e mobilidade na área de estudo, equipamento utilizado e as horas-homem necessárias para atingir os resultados, concluiu-se que a relação benefício/custo da técnica utilizada foi ótima.

## **6. CONCLUSÕES**

Foi possível detectar neste setor da Bacia Carbonífera Catarinense, áreas de acumulação de lodos com poluentes produzidos pela mineração, utilizando técnicas de Sensoriamento Remoto baseadas em imagens de satélite.

Considerando a qualidade dos resultados obtidos e os investimentos em trabalhos de campo e horas-homem necessárias para atingir resultados, determinou-se a conveniência da aplicação desta técnica para estes tipos de estudos ambientais.

(28°33'S, 49°26'W)



(28°39'S, 49°22'W)

**Figura 5: CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA  
ÁREA DE LODOS PRODUZIDOS PELA MINERAÇÃO**

Processamento: Sánchez Dalotto, 2000.

## **7. BIBLIOGRAFIA**

CAUVIN, C. Cartographic reasoning and cartographic principles. In: BÄHR, H.; VÖGTLE, T. (Ed.) **GIS for environmental monitoring**. Chapter III Data processing and information extraction. Stuttgart, Germany : SCHWEIZERBART, 1999. 357p.

CHRISTIANSEN, T.; CHRIST, H.; HANSMANN, B. GIS in German Technical Co-operation projects: the status quo in 1996 in: MEHL, H.; MIES, E. **Aplicación de la teledetección y de los sistemas de información geográfica en la gestión de recursos naturales - Parte I: fundamentos teóricos y prácticos**.



Feldafing, Deutschland : DEUTSCHE STIFTUNG FÜR INTERNATIONALE ENTWICKLUNG (DSE). 1997, 437p.

DA SILVA, J.; SOUZA, M. **Análise ambiental**. Rio de Janeiro, Brasil : EDITORIAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE RIO DE JANEIRO. 1988. 199p.

LILLESAND, T; KIEFER, R. **Remote sensing and image interpretation**. New York, United States of America : JOHN WILEY & SONS. 3<sup>rd</sup> Edition. 1994, 750p.

LINSLEY, R.; KOHLER, M.; PAULHUS, J. **Hidrología para ingenieros**. México : McGraw-Hill, 1981. 386p.

SANTA CATARINA. Governo do Estado. Gov. Casildo Maldaner. **Diagnóstico do carvão mineral catarinense**. Florianópolis, Mar. 1997.