



## Modelo linear de mistura espectral na identificação de áreas degradadas por empréstimo de solo, Ilha Solteira - Brasil

## Linear spectral mixture model for environmental degradation in soil borrow areas, Ilha Solteira - Brasil

de Lollo, José Augusto <sup>1</sup> ✉ - Mansini Basso, Paloma <sup>2</sup> - Suman Curti, Juliano <sup>3</sup>

Recibido: 18 de Junio de 2012 • Aceptado: 07 de Abril de 2013

### Resumen

*Actividades mineras para obtención de suelos y sedimentos como materiales de construcción representan importante fuente de impactos ambientales. En la década de 1960, periodo de inicio de la construcción de la Planta Hidroeléctrica de Ilha Solteira, no había legislación que impusiera criterios ambientales en cuanto a la implantación de la obra o exigencias en cuanto a la recuperación de tales áreas. La construcción de la Hidroeléctrica ocasionó el surgimiento de varias áreas de préstamo, de entre las cuales la mayor se situó en el área de expansión urbana del municipio de Selvíria (Mato Grosso do Sul, Brasil). El área en estudio presenta porciones con diferentes niveles de degradación y de recuperación, dificultando la clasificación de sus parcelas, tanto en levantamientos de campo como vía técnicas digitales de clasificación de imágenes, justificando el uso del modelo de mezcla. Lo Modelo Lineal de Mezcla Espectral se basa en la posibilidad de clasificar píxeles con respuestas espectrales mezcladas ya que identifica la proporción de los diferentes componentes en un píxel, razón por la cual fue adoptado en el presente trabajo. La comparación entre los resultados obtenidos por esa técnica y por técnicas*

*tradicionales de clasificación digital de imágenes mostró que el Modelo Lineal de Mezcla Espectral es más eficiente en la distinción entre áreas degradadas en diferentes niveles de recuperación permitiendo la proposición de intervenciones diferenciadas para situaciones diferenciadas.*

**Palabras clave:** *Áreas de préstamo, Modelo lineal de mezcla, degradación ambiental, tratamiento digital de imágenes.*

1. Professor Titular, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP. Alameda Bahia, 550, CEP 15.385-000, Ilha Solteira - SP, Brasil.

✉ lolloja@dec.feis.unesp.br

2. Mestranda, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP. Alameda Bahia, 550, CEP 15.385-000, Ilha Solteira - SP, Brasil.

3. Aluno, Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP. Alameda Bahia, 550, CEP 15.385-000, Ilha Solteira - SP, Brasil.

## Resumo

*Atividades minerais para obtenção de solos e sedimentos como materiais de construção representam importante fonte de impactos ambientais. Na década de 1960, período de início da construção da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira, não havia legislação que impusesse critérios ambientais quanto à implantação da obra ou exigências quanto à recuperação das áreas mineradas. A construção da Usina Hidrelétrica ocasionou o surgimento de várias áreas de empréstimo, dentre as quais a maior se situou na área de expansão urbana do município de Selvíria (Mato Grosso do Sul, Brasil). A área em estudo apresenta porções com diferentes estágios de degradação e de recuperação, dificultando a classificação de seu nível de degradação, tanto em levantamentos de campo como via técnicas digitais de classificação de imagens, justificando o uso do modelo de mistura. O Modelo Linear de Mistura Espectral baseia-se na possibilidade de classificar pixels com respostas espectrais misturadas já que identifica a proporção dos diferentes componentes em um pixel, razão pela qual foi adotado no presente trabalho. A comparação entre os resultados obtidos por essa técnica e por técnicas tradicionais de classificação digital de imagens mostrou que o Modelo de Mistura é mais eficiente na distinção entre áreas degradadas em diferentes estágios de recuperação permitindo a proposição de intervenções diferenciadas para situações diferenciadas.*

**Palavras-chaves:** *Áreas de empréstimo, modelo linear de mistura, degradação ambiental, classificação digital de imagens.*

## Abstract

*Mineral exploration activities to obtain soils and sediments as building materials represent significant environmental impacts. In the 1960s, when the construction of the Hydroelectric Plant of Ilha Solteira began, there was no legislation in place to impose environmental standards regarding the implementation of the construction project, nor were there any requirements for the restoration of the areas mined. The construction of the Hydroelectric Plant resulted in the emergence of several borrowed areas, among which the biggest one was in the urban expansion area of the city of Selvíria (Mato Grosso do Sul, Brazil). The study area has parts with different stages of degradation and recovery, making it difficult to classify their degradation level in field surveys as well as by digital image classification techniques, justifying the use of the mixture model. The Linear Spectral Mixture Model is based on the possibility of classifying pixels with mixed spectral responses, as it identifies the proportion of different components in one pixel, which is why it was used in this work. The comparison between the results obtained using this technique and by traditional digital image classification techniques showed that the Mixture Model is more efficient in distinguishing between degraded areas in different recovery stages, thus allowing proposing different interventions for different situations.*

**Keywords:** *Borrow areas, Linear Spectral Mixture Model, Environmental degradation, Image digital classification.*

## INTRODUÇÃO

Apesar de ter importância decisiva para o desenvolvimento do mundo moderno a mineração deixa áreas degradadas que, na maioria das vezes, não podem ser ocupadas racionalmente (Kopezinski, 1998).

Porém, a construção de grandes empreendimentos necessita, na maioria das vezes, do empréstimo de solo de outras regiões, resultando modificações no ambiente em função da remoção da cobertura vegetal e do solo ou de rochas do substrato propiciando processos erosivos e outros impactos ambientais (Kesselring e Kesselring, 1999).

Para a obtenção de solos e sedimentos para a construção da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira na década de 60, áreas significativas do município de Selvíria (Brasil) sofreram intenso processo de degradação numa época em que não havia legislação no Brasil que impusesse critérios ambientais quanto à implantação de áreas de empréstimo ou exigências de recuperação destas áreas após exploração de recursos minerais.

No Noroeste do Estado de São Paulo, o Complexo Hidrelétrico Urubupungá foi um empreendimento importante nesse período, composto pelas Usinas Hidrelétricas de Ilha Solteira, Engenheiro Souza Dias - Jupiá e a Usina Hidrelétrica Três Irmãos em Pereira Barreto.

Por ocasião da construção da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira, o Brasil não possuía leis que estabelecessem exigências de recuperação de áreas degradadas por empréstimo de solo. Atualmente para obras que comprometem o meio ambiente são exigidos por lei a apresentação do PRAD - "Plano de Recuperação de Áreas Degradadas".

Como consequência da mineração de solos para obras de engenharia há uma considerável redução do potencial de uso das áreas impactadas, geralmente limitando-as a usos como pecuária ou turismo e, por se tratarem de áreas rurais ou de expansão urbana, tal problemática não é devidamente valorizada e sintetizada. Desta forma uma das justificativas desta pesquisa refere-se à adequação da técnica eficaz para possíveis estudos.

A classificação dos níveis de intensidade da degradação ou de recuperação e/ou regeneração das áreas deve permitir a proposição de alternativas de intervenções diferenciadas conforme a intensidade destes níveis. No entanto, a definição do estado do ambiente nestas áreas e o acompanhamento da evolução de sua recuperação, exige muitas vezes a realização de levantamentos caros que incluem investigações de campo e laboratório, havendo a necessidade de um mecanismo de avaliação mais ágil e de menor custo para acompanhamento do processo.

A partir desta constatação foi proposto o presente trabalho, que teve como principal objetivo comparar e avaliar processos diferentes de processamento digital de imagem visando à classificação de imagens de satélite. Foram realizadas classificações de cobertura vegetal com as técnicas de classificação tradicionais, com os métodos da Máxima Verossimilhança e o classificador ISOSEG (classificador por regiões para imagens segmentadas); e aplicação do Modelo Linear de Mistura Espectral.

### DEGRADAÇÃO ÁREAS DE EMPRÉSTIMO

Para Cruz (2008), uma determinada área é considerada como degradada quando ocorrem impactos ambientais negativos nesta, tais como: alterações das suas propriedades físicas (estrutura ou grau de compactidade e a perda de matéria devido à erosão), e a alteração de características químicas, devido a processos como a salinização, lixiviação, deposição ácida e a introdução de poluentes.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1989) na NBR 10703 define a ação de degradar o solo como “alteração adversa das características do solo em relação aos seus diversos usos possíveis, tanto os estabelecidos em planejamento, como os potenciais”.

Segundo Tavares (2008), a norma ao citar a expressão “alteração adversa”, sugere a aproximação com o conceito de efeito ou impacto ambiental considerado negativo.

No Manual de Recuperação de Degradação de Áreas Degradadas Pela Mineração (IBAMA, 1990), áreas degradadas são definidas como sendo determinados ambientes que foram destruídas a fauna e flora, a camada fértil de solo perdida, removida ou enterrada e a qualidade do regime de vazão do sistema hídrico foi modificada. Tornando-se uma área inviabilizada no desenvolvimento socioeconômico, devida à perda de seus físicos, químicos e biológicos naturais.

Com relação aos impactos em áreas de empréstimo de solo são considerados os ambientes que sofreram e/ou sofrem a remoção total ou parcial da cobertura vegetal para a exploração do substrato mineral. Em consequência das escavações há alterações nas taxas de infiltração e escoamento, influenciando na umidade do ambiente. Assim como é responsável pela concentração de matéria orgânica, sendo menor a intensidade em relação a áreas vegetadas.

Segundo o artigo nº 225 da Constituição Brasileira é uma obrigação legal, do autor da degradação ambiental, o ônus da recuperação ou reabilitação da área impactada. A Tabela 1 apresenta uma listagem com os impactos surgidos em consequência da utilização de áreas para empréstimos de solo definida a partir dos trabalhos de Christóforo e Nunes (1999), Pereira (1999), Kesselring e Kesselring (1999) e Faria (2005), e classificados nas categorias físico, químico, na biota, e no meio antrópico.

Segundo Corrêa e Leite (1998 em Cruz, 2008) “a erosão é o principal problema em áreas que foram mineradas e abandonadas, pois modificam toda a dinâmica de parte ou total do ecossistema. A perda de partículas acarreta aumento da compactação e diminuição da capacidade de armazenamento de água nos solos e substratos”. Consequentemente diminui as possibilidades de regeneração da área impactada sem intervenção antrópica, uma vez que além da perda de solo à perda de nutrientes.

### TRATAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Por Processamento Digital de Imagens entende-se a manipulação de uma imagem por computador de modo que a entrada e a saída do processo sejam imagens. O objetivo de se usar processamento digital de imagens é melhorar o aspecto visual de certas feições estruturais para o analista humano e fornecer outros subsídios para a sua interpretação, inclusive gerando produtos que possam ser posteriormente submetidos a outros processamentos.

As técnicas de Sensoriamento Remoto (SR) e Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) têm sido utilizados de forma conjugada em estudos de recursos terrestres, com especial atenção para o monitoramento das atividades antrópicas e seus impactos ambientais (Pinto e Lombardo, 2003). Uma destas técnicas é a classificação de imagens de satélite, que tem se mostrado de fundamental importância no auxílio à tomada de decisões de processos como o acompanhamento de recursos naturais e o mapeamento do uso do solo.

Os métodos mais comuns usam a ponderação das distâncias das médias. Para representar os pixels graficamente, utilizam-se isolinhas ou curvas de contorno no espaço de atributos, representando a densidade do conjunto de treinamento para cada região. Esses contornos representam um ajuste baseado em distribuições normais ou gaussianas dos pixels das áreas de treinamento, caso contrário, os contornos seriam totalmente irregulares, o que não seria desejável devido à dificuldade de se computá-los.

O algoritmo de classificação se baseia na distribuição estatística das classes (ex. distribuição gaussiana), onde parâmetros como vetor médio, desvio padrão e matriz de covariância são exigidos para a classificação. Algoritmos paramétricos, muito utilizados com imagens multiespectrais, são o MaxVer (máxima verossimilhança), Paralelepípedo, Mínima Distância, Distância de Mahalanobis (Isoseg) e o K-Médias (algoritmo de agrupamento pela média).

A dificuldade nestas classificações consideradas como convencionais, é que se torna comum ocorrer estimativa incorreta para algumas classes temáticas, devido à existência de pixels misturados, não representados por nenhuma das classes previamente definidas no processamento (Aguilar et al, 1999).

Tabela 1. Impactos mais comuns em áreas de empréstimo de solo.

Físicos	Químicos	Na Biota	No Meio Antrópico
- Descaracterização do relevo	- Perda das camadas férteis do solo	- Desmatamento	- Impacto visual
- Compactação	- Mudanças na Textura	- Remoção da cobertura superficial do solo	- Alterações na forma de uso dos solos
- Processos erosivos	- Salinidade nas águas	- Alterações na flora	- Menor produtividade dos ecossistemas
- Assoreamento do rio	- Mudanças no pH	- Alterações na fauna aquática e terrestre	- Perda de patrimônio
- Remoção da cobertura superficial do solo			- Presença de máquinas expõem população e operários da obra durante a execução dos serviços;
- Retenção de água			

A atual ideia de mapeamento temático presume que cada ponto na superfície possa ser categorizado por meio destes algoritmos classificadores por meio da probabilidade. Entretanto, são vários os fatores que impedem tal feito, entre estes a resolução dos sensores remotos frente à variação e complexidade dos alvos naturais e artificiais. Com isto, uma grande quantidade de dados é ignorada com representações relativamente simplificadas da paisagem.

Contudo, esta é uma situação complexa em imagens com alvos de características espectrais semelhantes, pelo fato de muitas vezes, o valor do pixel não representar o valor de apenas um alvo e sim a interação destes. Essa relação cresce de maneira inversamente proporcional à resolução espacial do sensor, ou seja, quanto mais grosseira a resolução maior a mistura espectral dos componentes presentes. Como tentativa de contornar a dificuldade da mistura espectral surgiu o Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME).

O MLME fundamenta-se no pressuposto de que a resposta de um pixel é uma combinação linear da resposta de cada alvo que ocorre em seu interior. Desta forma o cerne deste método é conhecer e representar a proporção dos diferentes componentes presentes em um pixel, a partir da decomposição do pixel em seus espectros puros, conhecidos por endmembers, ou de classes membros de referência (*Shimabukuro e Smith, 1991*).

Os espectros puros ou componentes puros são usados em geral com a finalidade de definir a reflectância espectral de materiais bem caracterizados da superfície da terra, pois estes se misturam para produzir um espectro equivalente aos pixels de interesse na imagem. Como os valores de reflectância dos componentes puros são influenciados por processos que dispersam a energia refletida da superfície dos materiais, ou outros fatores como a geometria da iluminação, o valor apresentado aqui como valor de um componente puro refere-se a sua resposta espectral captada pelo satélite incluindo todos os possíveis ruídos que possam ter afetado a captação da imagem sem que isso afete os resultados obtidos, pois se supõe que o erro que afeta a imagem seja normal por toda ela.

Para *Shimabukuro et al (1998)*, uma relação linear simula a mistura espectral dos componentes contidos em um único pixel. Deste modo, cada pixel possui as informações sobre a proporção e a resposta espectral de cada componente.

Este modelo fundamenta-se no pressuposto de que um espectro misturado (diferentes alvos no campo de visão do sensor), numa imagem qualquer pode ser modelado através de uma combinação linear de espectros puros, conhecidos por endmembers (*Roberts et al, 1998*).

Nestas condições, para qualquer imagem, e sendo as respostas espectrais dos componentes conhecidas, as proporções destes podem ser estimadas, de forma individual, por meio da geração de Imagens Fração (*Shimabukuro e Smith, 1991; Schowengerdt, 1997; Shimabukuro et al, 1998*).

## ÁREA ESTUDADA

A área estudada localiza-se na bacia hidrográfica do Rio Paraná, umas das principais bacias hidrográficas da América do Sul, em região de clima úmido e sub-úmido. Do ponto de vista geomorfológico a área encontra-se no Vale do Rio Paraná com relevo colinoso e altimetria variando de 250 a 300 m e cobertura vegetal de Savana, típica das áreas de cerrado Brasileiras. As coberturas naturais de Savana que ocorrem na área são Vegetação Natural Arbórea Densa, caracterizada como sendo

uma formação campestre com estrato denso de árvores baixas, xoromórficas, de esgalhamento profuso, providas de grandes folhas coriáceas, perenes e casca corticosa, apresentando de maneira geral estratos definidos.

Na Figura 1 é ilustrada a delimitação da área de empréstimo estudada.

Do ponto de vista geológico a área apresenta substrato rochoso constituído pelos basaltos da Formação Serra Geral da Bacia do Paraná nos fundos de vale e por arenitos de granulação fina a média, intercalados com finas camadas de siltito pertencentes à Formação Santo Anastácio nas áreas mais elevadas.

Os solos presentes na área apresentam textura arenosa fina e são em geral bastante profundos e bem drenados. Segundo *Alcântara e Lollo (1999)*, o solo é composto por 70% de quartzo, na fração areia, e 14% de hematita, 10% de gibbsita, e 5% de caulinita, na fração argila.

Segundo *Rizzo (2004)* se trata de uma areia argilosa (62% de areia, 10% de silte e 24% de argila) com baixas compacidades (massa específica de 1,69 g/cm<sup>3</sup> e índice de vazios de 0,81) e pouco plástico (LL = 26% e LP = 17%).

## MATERIAIS E MÉTODOS

Os produtos utilizados foram imagens dos sensores CCD (Couple Charged Device), sensor multiespectral com 20m de resolução espacial e HRC (High Resolution Camera) que opera na faixa espectral que cobre o visível e parte do infravermelho próximo e produz imagens monocromáticas com resolução espacial de 2,7m do satélite CBERS-2B (*INPE, 2011*). Para tratamento e classificação das imagens foi utilizado o Sistema de Informações Geográficas Spring (*Câmara et al, 1996*).

Foi realizada uma fusão entre as imagens coloridas do sensor CCD e a imagem monocromática do sensor HRC, de forma a se obter imagens multiespectrais com resolução espacial de 2,7 metros, segundo método descrito por *Namikawa (2011)*.

A área em estudo, assim como outras áreas remanescentes de uso para empréstimo de solo apresenta porções com diferentes estágios de degradação e de recuperação natural ou induzida pelo homem, o que dificulta a classificação digital dos alvos, justificando o uso de técnicas como o modelo de mistura.

O Modelo Linear de Mistura Espectral fundamenta-se no pressuposto de que a resposta de um pixel é uma combinação linear da resposta de cada alvo que ocorre em seu interior (*Shimabukuro e Smith, 1991*). A essência do método é identificar a proporção dos diferentes componentes em um pixel, a partir da decomposição do pixel em seus espectros puros, conhecidos por endmembers, ou de classes membros de referência (*Roberts et al, 1998*).

Nestas condições, para qualquer imagem, e sendo as respostas espectrais dos componentes conhecidas, as proporções destes podem ser estimadas, de forma individual, por meio da geração de Imagens Fração. Com isso os endmembers referem-se ao conjunto de espectros "puros" que serão utilizados em um modelo de mistura e que, quando combinados por regra apropriada, são capazes de reproduzir os demais espectros encontrados na imagem.

Visando simplificar a representação das classificações de forma a permitir a comparação entre os diferentes métodos e técnicas de classificação, foram consideradas apenas três classes de alvos na área em estudo (água, vegetação, e solo exposto).

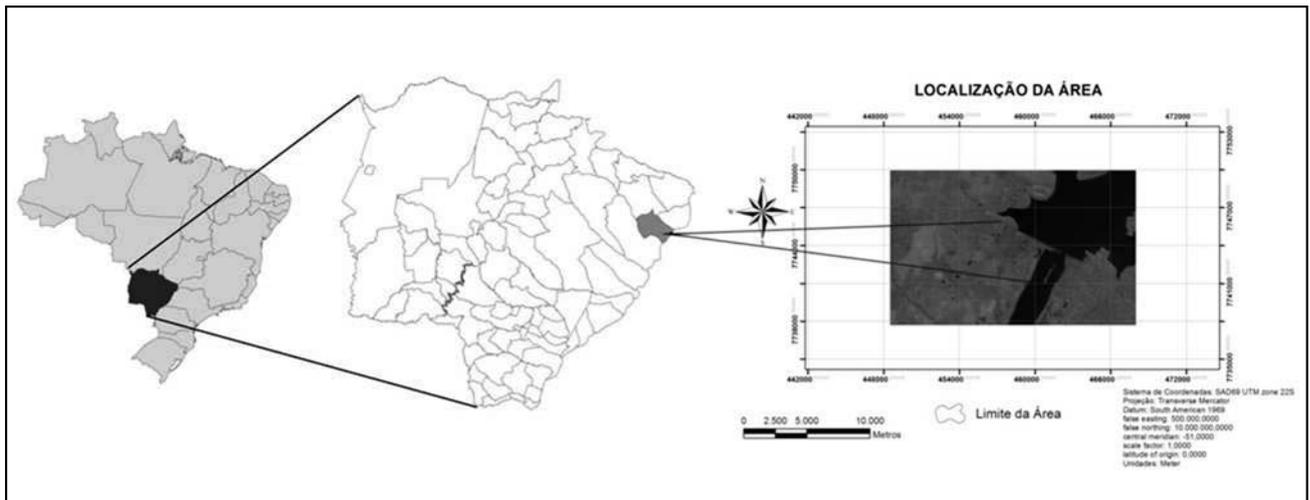


Figura 1. Localização da área de empréstimo estudada.

Tal decisão foi importante também porque excluía dos conjuntos de treinamento usados no processo de classificação áreas ou pixels cuja identificação não estivesse claramente inclusa em uma das classes.

O trabalho considerou métodos tradicionais de Classificação de Imagens como a Classificação supervisionada (pixel a pixel) a partir do Classificador de Máxima Verossimilhança (MAXVER) e a Classificação por Região com o Classificador Ioseg, aplicadas segundo sistemática padrão do SPRING.

Para o classificador de MAXVER as principais etapas para tal classificação incluem: (1) criação dos contextos de classificação e seleção de amostras para treinamento (ilustradas na Figura 2); (2) definição do padrão de classificação (nesse caso limiar de aceitação de 99,9% para o classificador MAXVER); (3) mapeamento das classes obtidas (indicação de pertinência das classes obtidas pela classificação em função dos temas definidos - solos exposto, vegetação e água).

Na classificação por região com o Classificador ISESEG as etapas foram: (1) segmentação da área com pela técnica de crescimento de regiões; (2) definição dos contextos de classificação (limiar de aceitação de 99% para o classificador ISESEG); (3) mapeamento das classes obtidas pelo processo de classificação não supervisionada.

O processo de classificação com base no MLME tem execução mais complexa e pode ser assim sumarizado: (1) seleção das bandas de interesse para aplicação da técnica (nesse caso as bandas 2, 3 e 4 do sensor CCD do Satélite CBERS 2, respec-

tivamente verde, vermelho e infravermelho próximo); (2) obtenção das imagens de erro geradas pelo processo de classificação de pixels puros; (3) seleção das imagens erro para composição do erro máximo permitido; (4) correção das classificações por banda com a aplicação do erro máximo permitido; (5) geração da imagem classificada segundo os temas previstos (solos exposto, vegetação e água).

## RESULTADOS

O resultado dos processos de classificação das imagens mostrou diferenças significativas entre as classificações obtidas pelas técnicas tradicionais e o modelo linear de mistura espectral. Nos trabalhos de campo foi possível observar que existem parcelas da área de empréstimo em variados estágios de degradação.

A existência de parcelas da área estudada em processos de recuperação induzida por ações humanas tornou difícil a diferenciação via sensoriamento remoto por imagens de satélite daquelas áreas em processo natural de recuperação no presente trabalho.

Do que se observa no campo, se pode verificar que isso se deve essencialmente ao fator escala e à forma de cultivo das espécies utilizadas, pois as áreas em processo de recuperação induzida apresentam pequenas dimensões (dezenas de metros em cada lado) e um padrão de vegetação que mistura espécies arbóreas de diferentes alturas e outras espécies de vegetação rasteira cujo padrão em imagem reproduz quase exatamente a vegetação em processo de recuperação.

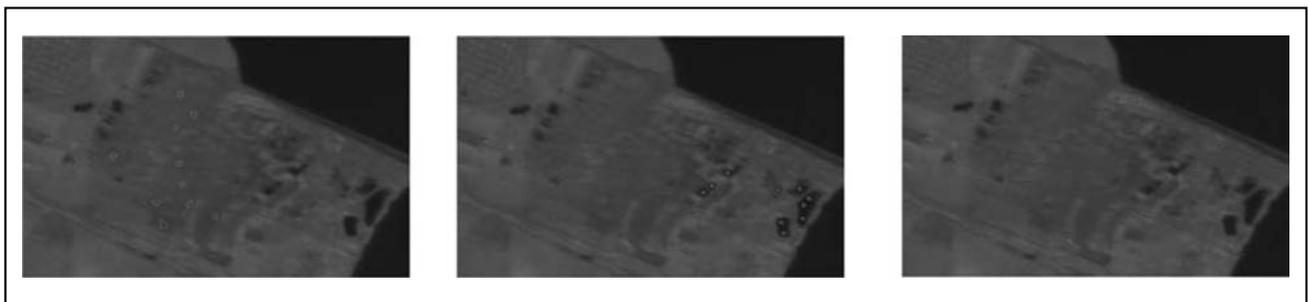


Figura 2. Ilustração das amostras usadas no treinamento (à esquerda classe solo exposto, ao centro classe água, e à direita classe vegetação).

Acredita-se que a diferença essencial entre as áreas em processo de recuperação natural e induzida (padrão regular geométrico da vegetação arbustiva cultivada) só seria identificável em grandes áreas ou pelo uso de imagens oriundas de sensores com resolução espacial ainda maior que a câmara HRC, situação comum em outros tipos de imageamento quando se pretende a identificação de padrões regulares de vegetação de pequeno a médio porte com grande porção de solo exposto entre as árvores.

A seguir podem ser observados os resultados das classificações feitas pelo método de Máxima Verossimilhança usando-se os processos de classificações por pixels (Figura 3) e por regiões (Figura 4) nas imagens não fusionadas (sensor CCD com resolução espacial de 20m).

Os resultados das duas classificações feitas com as bandas do sensor CCD com resolução espacial de 20 metros mostram diferenças marcantes com relação às classes “solo exposto” e “vegetação”. A matriz de erros apresentada na Tabela 2 ilustra esses resultados.

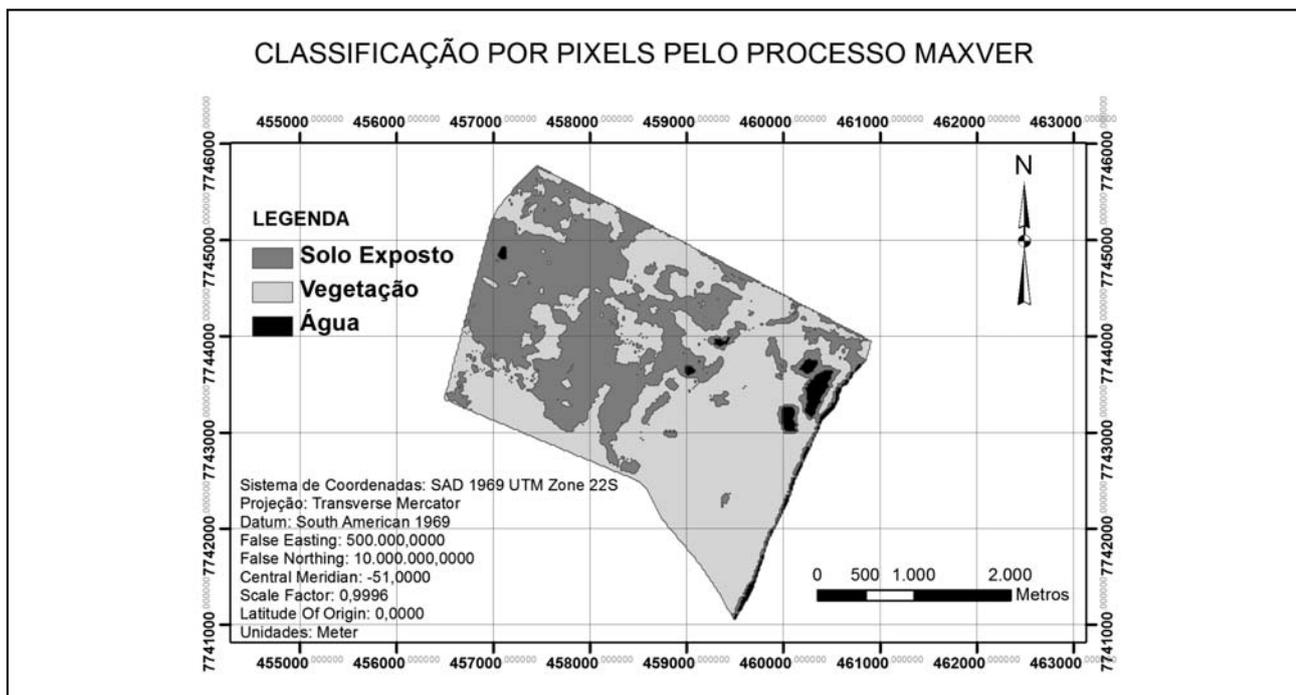


Figura 3. Classificação por pixels pelo processo MAXVER.

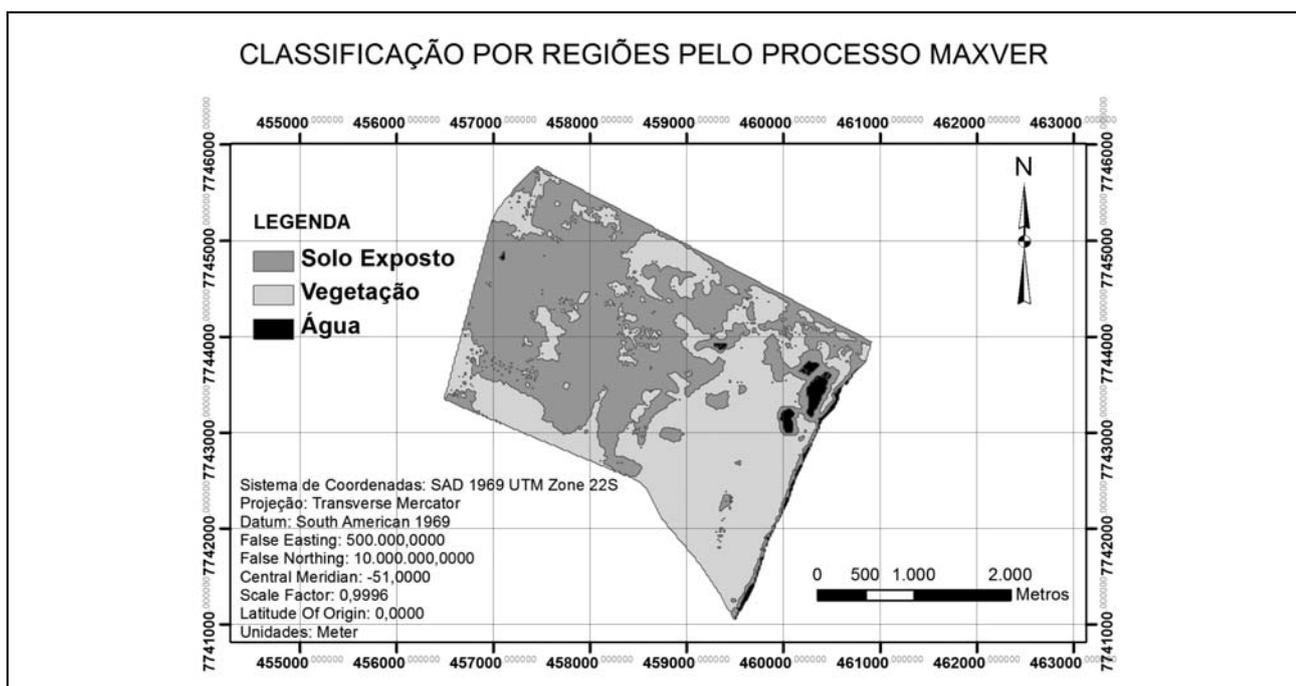


Figura 4. Classificação por regiões pelo processo MAXVER.

Observa-se que as parcelas da área classificadas como “solo exposto” apresentam área total maior quando classificadas por regiões em comparação à classificação por pixel, o que se confirma com os resultados da matriz de erros. Por outro lado, a classe “vegetação” apresenta menor área na classificação por regiões se comparada à classificação por pixel (vide matriz de erros na Tabela 2). Acredita-se que tal resultado se deva ao fato da classificação por regiões, por usar amostras com maiores áreas, apresenta maior variação nas respostas espectrais que os pixels puros.

Como já mencionado, nos trabalhos de campo foi possível observar que existem parcelas da área de empréstimo em variados estágios de degradação. Parte significativa da área foi alvo de escavações bastante profundas que removeram todo o horizonte B do solo tornando a recuperação natural inviável e que, em áreas com maiores declividades e encostas com perfil convexo o que facilitou a instalação de processos erosivos representados por extenso ravinamento e eventual desenvolvimento de voçorocas.

Existem parcelas que ainda conservam vegetação arbórea original bastante densa e que não foi alvo de escavação devido a dificuldades operacionais relacionadas ao relevo local (porções mais elevadas da área e com declividades mais acentuadas)

devido à pequena espessura de solo no perfil. Tanto no campo como nas imagens de satélite a definição dos limites entre essas duas categorias é relativamente fácil, dada a grande diferença na cobertura vegetal, o que se refletiu na continuidade das áreas classificadas como “vegetação” quando da realização desse trabalho.

O terceiro estágio de degradação de parcelas da área corresponde a parcelas em processo de recuperação (natural ou induzida), Nessas áreas parte da vegetação rasteira ou arbórea já se instalou e a distinção visual de qual condição prevalece é praticamente impossível, seja em trabalhos de campo ou de sensoriamento remoto.

A identificação das áreas em processo de recuperação é a principal dificuldade no uso de classificação de imagens para identificar áreas degradadas já que a resposta espectral mista de tais alvos faz com que às vezes os mesmos sejam identificados como áreas degradadas e outras vezes como áreas não degradadas em função das características da imagem usada e, principalmente, da densidade da vegetação e sua tonalidade em função de maior absorção de água do solo em períodos de maior precipitação pluviométrica. Por essa razão optou-se aqui por verificar o potencial de uso do MLME para a classificação das imagens (Figuras 5 e 6).

Tabela 2. Matriz de erros - MAXVER por pixel (linhas) X MAXVER por regiões (colunas).

	Água	Solo	Vegetação	Total
Água	0,82%	0,66%	0,00%	1,48%
Solo	0,11%	37,56%	1,45%	39,12%
Vegetação	0,00%	12,19%	47,21%	59,40%
Total	0,93%	50,41%	48,66%	100,00%

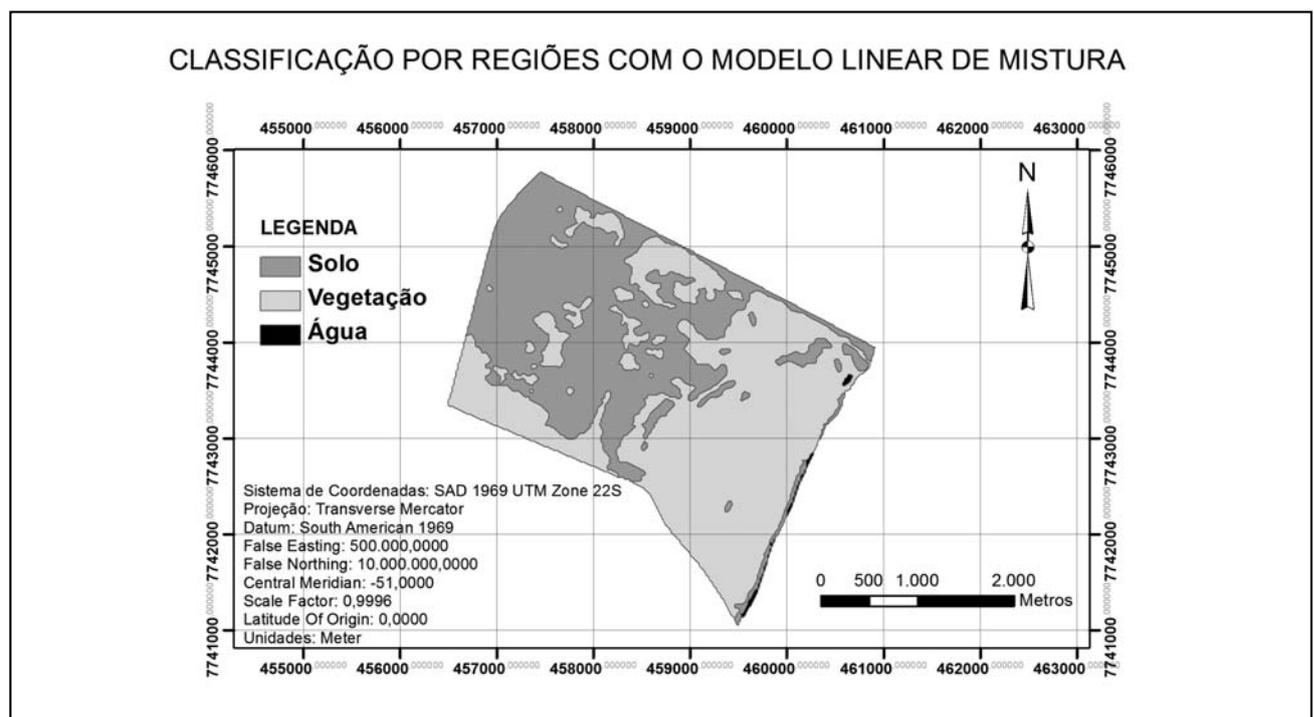


Figura 5. Classificação por regiões com o MLME.

Também nesse caso, a classificação por região gera maiores áreas que a classificação por pixel para as áreas identificadas solo exposto, ressaltando confusão pelo software na distinção entre vegetação (pixels mistos com solo) e solo exposto, como se pode observar na matriz de erros apresentada na Tabela 3.

A seguir é apresentada a classificação obtida com as imagens fusionadas com dados dos sensores CCD e HRC resultando resolução espacial de 2,7m. É possível notar melhor precisão na identificação de pequenas áreas degradadas ou em processo de degradação (Figura 6), resultado que pode ser explicado pela maior resolução espectral da imagem associada à capacidade da

técnica de tratar com pixels misturados. Tal afirmação é confirmada pela matriz de erros da Tabela 4.

Trabalhos de campo indicam uma tendência de que a combinação de MLME com imagens de maior resolução reconheça como áreas em processo de recuperação, aquelas áreas com cobertura vegetal de cerrado, especialmente se a vegetação rasteira for menos densa. Essa pode ser uma situação de difícil solução em áreas de cerrado em períodos de seca, o que pode indicar a preferência por imagens de meses chuvosos para tais análises.

Tabela 3. Matriz de erros MAXVER por pixel (linhas) X MLME por regiões (colunas).

	Água	Solo	Vegetação	Total
Água	0,43%	0,21%	0,13%	0,77%
Solo	0,12%	39,82%	1,83%	41,77%
Vegetação	0,08%	9,86%	47,52%	57,46%
Total	0,63%	49,89%	49,48%	100,00%

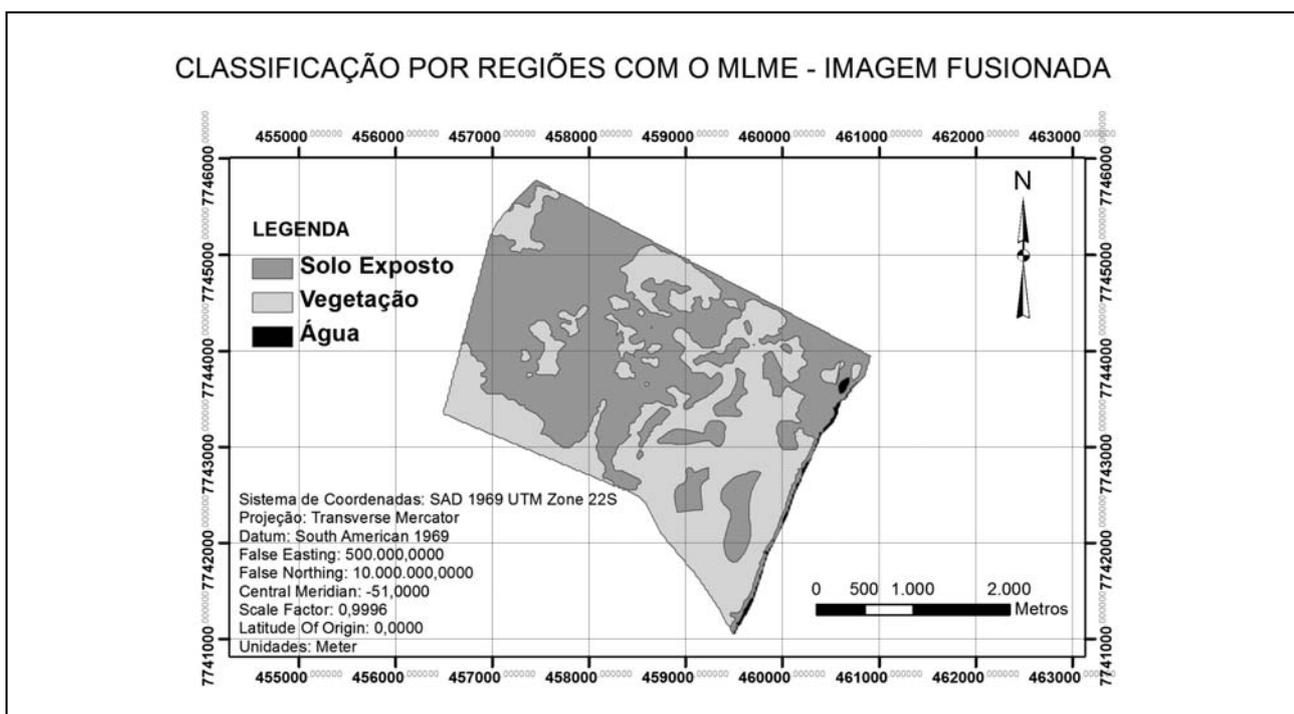


Figura 6. Classificação por regiões com o MLME com a imagem fusionada.

Tabela 4. Matriz de erros MLME - resolução 20m (linhas) X MLME - resolução 2,7m (colunas).

	Água	Solo	Vegetação	Total
Água	0,34%	0,23%	0,37%	0,94%
Solo	0,09%	45,63%	0,62%	46,34%
Vegetação	0,48%	13,21%	39,03%	52,72%
Total	0,91%	59,07%	40,02%	100,00%

Quando se observa os resultados das classificações feitas com as técnicas de máxima verossimilhança e a classificação por regiões fica evidente que as duas classificações não apresentam diferenças significativas. As parcelas da área classificadas como “solo exposto” são muito similares a menos de maior continuidade nas áreas delimitadas pela técnica de regiões o que é fato esperado e conhecido da literatura já que a amostragem de áreas maiores no conjunto de treinamento gera menor confusão na identificação de padrões visto tais áreas apresentarem mais variações nas respostas espectrais que os pixels puros.

Em geral tais classificações tendem a reduzir as parcelas da área identificadas como solo exposto uma vez que nas áreas degradadas que se encontram em processo de recuperação a presença de alguma vegetação resulta pixels com resposta espectral mais similar à vegetação que às áreas de solo exposto e os métodos tendem a classificar tais parcelas como áreas de vegetação. Isso subestima a identificação de áreas degradadas. Tal efeito pode ser observado na Figura 3.

A utilização do modelo linear de mistura espectral para permite a classificação de áreas em processo de recuperação como áreas degradadas – solo exposto ao invés de áreas vegetadas, isso é interessante porque torna possível a distinção das áreas em processo de recuperação, ou seja, que sofreram degradação no passado, daquelas não degradadas (Figura 5).

## CONCLUSÕES

Em geral, menor resolução espacial permite boa definição para classificação de pixels puros (sem mistura) podendo ser usada para identificar as condições extremas da área – com ou

sem degradação, ou seja, vegetação ou solo exposto. Nesse caso, a classificação por pixels pode ser ainda mais interessante, pois a classificação por regiões tende a apresentar um efeito generalizador, agrupando pixels similares em função dos elementos do conjunto de treinamento apresentar uma resposta espectral que corresponde à média das respostas individuais.

A utilização no modelo linear de mistura espectral para classificar imagens de menor resolução espacial (20m) tende a permitir a classificação de áreas em processo de recuperação como “áreas degradadas – solo exposto” ao invés de áreas vegetadas, isso é interessante porque torna possível a distinção das áreas em processo de recuperação, ou seja, que sofreram degradação no passado, daquelas não degradadas (Figura 5). Quando o modelo linear de mistura espectral foi aplicado para classificar as imagens fusionadas com maior resolução espacial (2,7m) ficaram mais evidentes as áreas degradadas em diferentes estágios de recuperação (Figura 6). No campo se observa que as áreas em início de processo de recuperação, que na classificação das imagens de resolução espacial de 20m passaram a serem classificadas como solo exposto, o que na realidade expressa um resultado mais próximo da condição de tais áreas (início de processo de recuperação).

Para uso em situações similares a classificação por máxima verossimilhança pode ser útil especialmente em reconhecimentos preliminares, em particular quando o objetivo for identificar as áreas preservadas da degradação ou corpos d'água contínuos. Para estudos detalhados visando identificar áreas em processo de recuperação com menores dimensões, o uso do Modelo Linear de Mistura Espectral associado a imagens com maior resolução espacial foi mais eficiente.

## TRABALHOS CITADOS NO TEXTO

- AGUIAR, A. P.D., SHIMABUKURO, Y.E., MASCARENHAS, N.D.A. 1999. Use of synthetic bands derived from mixing models in the multispectral classification of remote sensing images. *International Journal of Remote Sensing*, v. 20, p. 647-657.
- ALCÂNTARA M.A.M., LOLLO, J.A. 1999. Evaluation of mechanic performance of lime-soil mixtures under distinct exposition condition. *Journal of Nepal Geological Society, Nepal Geological Society, Kathmandu, Nepal. Special Volume - VII Asian Congress of Engineering Geology*, p. 7 -14.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1989. NBR 10.703: Degradação do solo: terminologia, Rio de Janeiro,
- CÂMARA, G., SOUZA, R.C.M., FREITAS, U.M., GARRIDO, J., LI, M.F. 1996. SPRING: integrating remote sensing and GIS with object-oriented data modeling. *Computers and Graphics*. Vol. 15, p. 13-22.
- CHRISTÓFARO I.S.I., NUNES, J.H. 1999. Reabilitação de Caixas de Empréstimo Laterais - Uma Abordagem Interdisciplinar, *In: Seminário Nacional: A Variável Ambiental em Obras Rodoviárias. Foz do Iguaçu, 1999. Anais. Editado por Edson Roberto Blanchet, Maurício Balensiefer, Nívea Ribeiro Menegazzo e Rosana Scaramella. Curitiba: FUPEF, 508 p.*
- CRUZ, S.P. 2008. Avaliação da degradação do meio físico por áreas de empréstimo usando geoindicadores e sistema de informações geográficas - Área urbana de Ilha Solteira (SP). Ilha Solteira/SP: UNESP, Dissertação de mestrado.
- FARIA, S.M. Reabilitação e Sustentabilidade Ambiental de Áreas degradadas com a Utilização de Plantas Associadas a Microrganismos Simbióticos. 2005. Disponível em: <[www.ambientebrasil.com.br](http://www.ambientebrasil.com.br)>. Acesso em 23/05/2010.
- INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Catálogo de Imagens. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/CDSRI>. Acesso em: 05/03/2011.

- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. 1990.  
Manual de recuperação de áreas degradadas pela mineração.  
*Brasília, DF, 96 p.*
- KESSELRING, A.E.B., KESSELRING, R.C.S. 1999.  
Reabilitação de Caixas de Empréstimo Laterais - Uma Abordagem Interdisciplinar,  
*In: Seminário Nacional: A Variável Ambiental em Obras Rodoviárias. Anais... Curitiba: FUPEF, 508 p.*
- KOPEZINSKI, I. 1998.  
Avaliação da degradação ambiental produzida por mineração no Município de Poços de Caldas (MG).  
*Escola de Engenharia de São Carlos / Universidade de São Paulo, 1998, 102p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia),  
Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo.*
- NAMIKAWA, L.M.  
Fusão de Imagens do Satélite CBERS-2B no SPRING.  
*Disponível em: [wiki.dpi.inpr.br\\_doku.php\\_id=fusaohrcccdceber2b\\_exemplo.pdf](http://wiki.dpi.inpr.br_doku.php_id=fusaohrcccdceber2b_exemplo.pdf). Acesso em: 21/09/2011.*
- PEREIRA, K.M.T. 1999.  
Reabilitação de Caixas de Empréstimo Laterais - Uma Abordagem Interdisciplinar,  
*In: Seminário Nacional: A Variável Ambiental em Obras Rodoviárias. Foz do Iguaçu, 1999. Anais  
Editado por Edson Roberto Blanchet, Maurício Balensiefer, Nívea Ribeiro Menegazzo e Rosana Scaramella.  
Curitiba: FUPEF, 508 p.*
- PINTO, S. A. F., LOMBARDO, M. A. 2003.  
O Uso do Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas no Mapeamento e Uso da Terra  
e Erosão do Solo.  
*In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 21, 2003, Belo Horizonte. Anais... Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira  
de Cartografia.*
- RIZZO, R.P. 2004.  
Avaliação da condutividade hidráulica em solo laterítico arenoso compactado estabilizado com cimento  
para uso como liner. 98p,  
*Dissertação (mestrado em Recursos Hídricos e tecnologias Ambientais) - Faculdade de Engenharia de Ilha  
Solteira/Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.*
- ROBERTS, D.A., GARDNER M., CHURCH, R., USTIN, S., SCHEER, G., GREEN, R.O. 1998.  
Mapping chaparral in the Santa Monica Mountains using multiple endmember spectral mixture models.  
*Remote Sensing of Environment, Vol. 65, p. 267-279.*
- SCHOWENGERDT, R.A. 1997.  
Remote sensing: models and methods for image processing.  
*New York: Academic Press, 2ª ed. 522 p.*
- SHIMABUKURO, Y.E., SMITH, J.A. 1991.  
The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data.  
*IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 29, p.16-20.*
- SHIMABUKURO, Y.E., NOVO, E.M., PONZONI, F.J. 1998.  
Índice de vegetação e modelo linear de mistura espectral no monitoramento da região do Pantanal.  
*Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 33, p. 1729-1737.*
- TAVARES, A.B. 2008.  
Avaliação da Degradação do Meio Físico por Áreas de Empréstimo Utilizando Geoindicadores e  
Sistema de Informações Geográficas - Área de Expansão Urbana de Ilha Solteira (SP).  
*Ilha Solteira, 192p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira -  
Universidade Estadual Paulista.*