

RESUMO

São vários os fatores desencadeadores de desastres, porém sabe-se que com a intensificação das chuvas estes eventos são mais constantes. Desta forma para o estudo e predição do fenômeno de movimentos de massa, itens importantes a serem considerados são os dados de chuva e umidade do solo. Este trabalho apresenta uma análise temporal que busca associar dados de pluviosidade, índices de chuva, e imagens de sensores remotos a fim de se determinar um padrão espectral que reflita a umidade do solo e que possa contribuir, desta forma, na predição da ocorrência destes fenômenos.

ABSTRACT

ManyMany factors cause disasters, although it is known that with rain intensification these events tend to be more frequent. In this way for the study and prediction of mass movement phenomenon, important itens to be considered are rain data and soil moisture. This paper shows a temporal analysis in order to associate pluviosity data, rain indexes and remote sensing images in order to obtain a spectral pattern which reflects soil moisture that can contribute, in this way, for this phenomenon prediction.

com a identificação das áreas e dos eventos são mais convenientes. Desta forma para o estudo e predição do fenômeno de movimentos de massa, importante itens a serem considerados são os dados de chuva e consequentemente umidade do solo. No Brasil algumas áreas são afetadas por movimentos de massa, até de uma forma cíclica, isto porque estes movimentos estão associados ao acúmulo de umidade no solo que ocorre predominantemente durante o período chuvoso.

O sensoriamento remoto é uma tecnologia utilizada para o estudo de desastres porque providencia uma cobertura regional e local eficaz com a vantagem adicional de atuar em áreas inacessíveis. Devido a sua visão sinóptica e variabilidade de escalas, imagens de satélite podem detectar os primeiros estágios das anomalias/eventos associados a desastres. Como as imagens são obtidas em um intervalo curto e regular de tempo (resolução temporal do sensor) isso pode ser útil na predição de desastres rápidos e lentos.

Sensores remotos que atuam no infravermelho, infravermelho termal e micro ondas trazem informações úteis para a detecção de umidade do solo e sua distribuição até mesmo para se efetuar medidas quantitativas.

Fazer uma análise temporal de imagens de sensores remotos e associar esta informação a dados de pluviosidade, dados pontuais de umidade do solo e a tendência natural de ocorrência de deslizamentos de terra em uma determinada região é uma alternativa para se determinar um padrão espectral que pode contribuir na predição da ocorrência destes fenômenos.

Este trabalho tem como principal objetivo utilizar imagens de sensoriamento remoto no estudo indireto da umidade do solo através do uso de dados do sensor Landsat TM e ETM e diferentes técnicas (Índices de Vegetação, Transformação Linear *Tasseled Cap* e Análise dos Componentes Principais) visando contribuir à predição de movimentos de massa. O estudo efetua uma análise comparativa da eficiência destas diferentes transformações espectrais para a predição da umidade do solo.

3.1. MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA

Movimentos gravitacionais de massa ocorrem em grande quantidade e em diferentes formas, dependendo do tipo de movimento (escorregamentos, queda de blocos, fluxo, *debris flow*), velocidade do movimento (mm/ano m/seg.), material envolvido (rocha, solo, lama) e mecanismo responsável (terremotos, chuva, induzido pelo homem) (VAN WESTEN, 2000).

São diversas as classificações dadas aos movimentos de massa. Elas podem se referir aos aspectos geotécnicos do material ou aos processos e geomorfologia envolvidos. Em geral as classificações baseiam-se no tipo de movimento e materiais envolvidos.

Uma classificação proposta por Leopold *et. al* (1964 *apud* Bryant, 1993) é apresentada abaixo (figura 1). Esta classificação baseia-se tanto no tipo do movimento como no material envolvido, porém sua limitação é que ela não considera o tempo envolvido no evento.

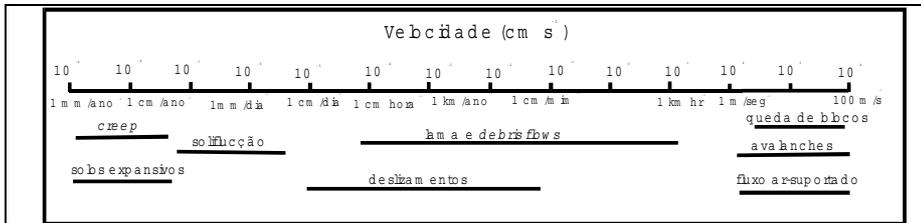


Figura 1- Classificação dos movimentos de massa segundo Leopold *et al.* (1964 *apud* Bryant, 1993)

Segundo VAN WESTEN (2000), o sensoriamento remoto pode auxiliar na prevenção de desastres naturais, especificamente movimentos de massa, a partir de duas finalidades:

- a partir da criação de um inventário;
- a partir do mapeamento dos fatores que estão associados aos movimentos tais como litologia, conjunto geomorfológico, uso da terra, estruturas, vegetação, declividade, etc.

No caso do inventário, o tamanho do deslizamento em relação à resolução espacial do sensor é muito importante e, neste caso, sensores com maior resolução espacial são os mais indicados para a análise dos elementos que compõe o movimento.

Para o mapeamento de fatores associados aos movimentos de massa, imagens multiespectrais tem sido utilizadas, como por exemplo para classificação de litologia, vegetação e uso da terra. Imagens SPOT tem sido utilizada para mapeamento geomorfológico ou classificação do terreno (VAN WESTEN, 2000).

Segundo KUFER *et al.* (1989) obter um mapa contendo as ocorrências de escorregamentos a partir de imagens orbitais, bem como dados de chuva auxilia a obtenção de um índice que associa dados de chuva aos dados de escorregamento.

Uma outra abordagem é dada por MCKEAN *et al.* (1991) que apresentaram um estudo que utiliza índices de vegetação no estudo da profundidade do solo e consequentemente na predição de movimentos de massa, mais especificamente *debris flows*. A metodologia obteve sucesso na detecção e mapeamento dos limites dos depósitos coluviais com cobertura de grama. A vantagem de tal técnica é que ela permite um rápido levantamento em extensas áreas com potencial a *debris flow*.

3.3. O USO DE SENSORIAMENTO REMOTO NA INVESTIGAÇÃO DA UMIDADE DO SOLO

A umidade do solo pode ser entendida como um parâmetro físico que apresenta, relativamente, uma variabilidade espacial e temporal (NEUSCH,1999) muito grande,

seu efeito "back scattering" que é fortemente dependente da quantidade de água presente no solo.

Nos últimos anos diversos tem sido os trabalhos que abordam a utilização de sensoriamento remoto no estudo de parâmetros hidrológicos e mais especificamente no estudo da umidade do solo. Isto porque os métodos tradicionais para medir a umidade do solo são pontuais enquanto que dados obtidos pelo sensoriamento podem ser associados a vastas áreas.

STORL (1994 *apud* NEUSCH,1999) estudou o índice de umidade (*moisture index*) desenvolvido por MUSICK & PELLETIER (1986) a partir das razões das bandas TM5 / TM7 e concluiu que as mudanças no substrato e na cobertura vegetal limitam sua validade.

KOREN & KOGAN (1995) simularam a capacidade de umidade do solo (SMC) usando o índice de vegetação NDVI com um indicador das propriedades que afetam a capacidade de umidade do solo.

CRIST & CICONE (1984) coletaram uma quantidade considerável de informação espectral de solo e vegetação e investigaram a aplicação da transformação *Tasseled Cap* inicialmente desenvolvida para Landsat MSS, utilizando principalmente análise de componentes principais.

Outros a utilizar a transformação *Tasseled Cap* foram HEJMANOWSKA & MULARZ (2000) que estudaram a umidade do solo através da fusão de dados de microondas (ERS) de diferentes períodos com imagens Landsat. Os autores também desenvolveram um método chamado de Método da Inércia Termal, que se mostrou efetivo para a avaliação da umidade do solo. Este método combina informação proveniente de bandas do visível com o infravermelho termal. Neste modelo torna-se necessário conhecer o albedo e a diferença de temperatura máxima do dia da aquisição da cena. O albedo é obtido através da Banda TM 3 e a diferença de temperatura máxima através da TM 6.

Baseado nestes estudos optou-se por aplicar no presente trabalho os métodos que utilizam índice de vegetação, a transformação *Tasseled Cap* e componentes principais entre as bandas TM5 e TM7 para o estudo indireto da umidade do solo através de sensorimento remoto.

$$\text{NDVI} = \frac{Ch_2 - Ch_1}{Ch_2 + Ch_1} \quad (2)$$

onde Ch_1 e Ch_2 correspondem respectivamente as bandas 1 e 2 do AVHRR. Atualmente estes índices são utilizados com bandas do Landsat TM e a banda Ch_1 é substituída pela banda TM4 e a banda Ch_2 pela banda TM3, respectivamente as bandas correspondentes ao infravermelho próximo e ao vermelho. Estas bandas foram escolhidas porque é exatamente nestas regiões do espectro eletromagnético que a vegetação apresenta maior diferença de reflectância (elevada reflectância no infravermelho e baixa reflectância no vermelho).

O NDVI é utilizado para acentuar outras feições, não somente a vegetação, como é observado em McKean *et al.* (1991), que utilizou este índice no estudo da determinação de áreas mais suscetíveis a movimentos de massa.

3.5. TRANSFORMAÇÃO *TASSELED CAP*

A transformação *tasseled cap* foi concebida para o estudo de regiões agrícolas nos EUA. Esta transformação, originalmente aplicada a sensores MSS do Landsat (KAUTH & THOMAS *apud* CRIST & CICONE, 1984), consiste basicamente em se obter novas bandas através de combinação linear das bandas originais. Desta forma a maioria das informações é disposta em relação a novos eixos que estão relacionados diretamente a características físicas da cena (LILLESAND & KIEFER, 1994. CRIST & CICONE (1984) desenvolveram um estudo utilizando esta transformação para o sensor TM do Landsat. Neste estudo os autores verificaram que nas seis bandas do TM há um novo componente além dos componentes brilho (*brightness*) e verde (*greenness*) já definidos pelo MSS, este novo componente corresponderia a umidade (*wetness*) e estaria relacionado ao conteúdo de umidade da vegetação e do solo, nitidamente vinculado a banda do infravermelho médio.

Segundo CHUVIECO (1990) uma das vantagens desta transformação sobre a Análise de Componentes Principais é no que diz respeito a sua interpretabilidade física, isto porque as componentes deduzidas a partir da *Tasseled Cap* se baseiam nas características das bandas espectrais em consideração.

Para o estudo desenvolvido na região de Florianópolis foram utilizadas imagens Landsat 5 bandas: 1,2,3,4,5,6 e 7 adquirida em 04/05/1990 e 18/05/1995, bem como a imagem Landsat 7 (bandas 1,2,3,4,5,6, 7) adquirida em 07/05/2000.

Foram obtidos dados diários de chuva para os meses de maio/1990, maio/1995 e maio/2000 de três estações pluviométricas: Rancho Queimado, Garcia e Lagoa do Peri, todas pertencentes a ANEEL.

Um mapa geológico da área de estudo em escala 1:500.000 do DNPM foi utilizado para se determinar as unidades geológicas onde situam-se as estações pluviométricas e as unidades onde foram coletados os dados dos pixels. Isso foi feito para diminuir o efeito das variáveis tais como litologia, tipo de solo, tipo de vegetação e declividade. Desta forma, a variação dos valores obtidos nos diversos índices reflete, da melhor forma possível, os valores de umidade do solo.

Inicialmente foi feito o recorte e seguindo os seguintes passos:

- a) Registro da imagem;
- b) correção atmosférica;
- c) Transformação dos valores dos NDs para reflectância;
- d) Aplicação dos índices: NDVI, *Tasseled Cap* e Componentes Principais entre as bandas TM5 e TM7;
- e) Análise de regressão linear entre os resultados obtidos e os dados de chuva.

4.1. REGISTRO DA IMAGEM

O registro da imagem pode ser subdividido em duas etapas. A primeira é a de transformação de coordenadas em pixels e a segunda é o *resampling*, onde se determina o valor do pixel na imagem a ser registrada. No presente trabalho utilizou-se a transformação polinomial de primeira ordem, dada pelas equações genéricas:

$$x' = a_0 + a_1x + a_2y \quad (3)$$

$$y' = d_0 + d_1x + d_2y \quad (4)$$

apresenta a ocorrência de descontinuidades geométricas da ordem de 1/2 pixel na imagem corrigida

4.2. CORREÇÃO ATMOSFÉRICA

Muito embora os efeitos da dispersão atmosférica não sejam constantes em toda a imagem, sua correção é necessária principalmente nas bandas de comprimento de onda mais curto, onde este efeito é mais notado.

Segundo Chuvieco (1990) a correção atmosférica é necessária quando se pretende realizar combinações lineares entre bandas, quando se pretende relacionar os valores dos NDs com parâmetros físicos e quando se pretende realizar estudos multitemporais.

O método utilizado para a correção atmosférica foi o descrito por Chavez (1988 *apud* Chuvieco, *op.cit*). Este método se baseia na regressão entre bandas. Inicialmente se determina na imagem as zonas de baixa radiância e se obtém os valores dos NDs de alguns pixels destas zonas. Posteriormente obtém-se os valores dos NDs destas mesmas zonas para cada uma das bandas. A partir daí faz-se uma regressão linear entre os valores obtidos entre cada banda e uma do infravermelho médio (TM7) por não ser esta afetada pela dispersão atmosférica e funcionando desta forma como "banda padrão". Esta reta de regressão deveria passar na origem dos eixos, caso contrário supõe-se que o valor onde esta reta corta o eixo com os valores de NDs da banda a ser corrigida corresponde ao deslocamento causado pela dispersão, Este valor é subtraído de todos os NDs da banda.

A tabela abaixo traz os valores subtraídos de cada banda em cada imagem para a correção atmosférica. Note que os valores maiores concentram-se nas bandas de menor comprimento de onda.

É importante ressaltar que a correção atmosférica não foi efetuada na banda TM6 por tratar-se desta de uma banda termal não necessitando desta forma de correção atmosférica. Nesta banda também não será feita a conversão dos valores dos NDs para reflectância pois não trata-se de valores associados a reflectância e sim a propriedade de emissão térmica dos objetos.

4.3. TRANSFORMAÇÃO DOS ND EM VALORES DE REFLECTÂNCIA

Como pretende-se comparar dados obtidos através de transformações espectrais como o *Tasseled Cap*, Índice de Vegetação e Componentes Principais com o parâmetro físico que é a pluviosidade então deve-se transformar os valores dos NDs para valores de reflectância.

Segundo CHUVIECO (1990) a conversão de valores de ND para reflectância tem também entre outras finalidades realizar com maior rigor a razão entre bandas e relacionar imagens adquiridas em datas distintas ou por distintos sensores.

O processo é dividido em duas fases: a primeira é o cálculo da radiância e a segunda da reflectância propriamente dita. Cabe ressaltar que este tratamento deve ser realizado após a correção atmosférica.

Para o cálculo da radiância recebida pelo sensor (em $W/m^2sr\ m$) são necessários os coeficientes de calibração de cada banda e os valores dos NDs . Esta radiância é função muito da radiação solar incidente, do tipo de material terrestre e da contribuição de radiância devida a atmosfera ou seja, é uma função da radiância proveniente do sol.

Para o cálculo da radiância do sensor foi utilizada a seguinte expressão:

$$L_{sen} = a_{0k} + a_{1k} * ND_k \quad (5)$$

onde L_{sen} corresponde a radiância em cada banda do sensor e $a_{0k} + a_{1k}$ respectivamente aos índices da tabela abaixo.

Com isto, foram geradas imagens com valores de radiância.

Assumindo que a superfície tenha um comportamento lambertiano, para o cálculo da reflectância utilizou-se a seguinte expressão.

$$\rho = K \pi L_{\text{senk}} / E_{0,k} \cos \theta \quad (6)$$

Nesta relação, θ é o ângulo zenital (obtido através de 90° - ângulo de elevação solar fornecido pelo sensor), $E_{0,k}$ é a irradiância extraterrestre para cada banda do espectro (e obtido na tabela 2) e K é o fator corretor da distância Terra - Sol, calculado como:

$$K=1+0.0167(\text{sen}\pi (2 (\text{dia}-93.5)/365))^2 \quad (7)$$

Os valores obtidos para o fator de correção da distância Sol-Terra de cada imagem são mostrados na tabela 3.

Tabela 3: Valores obtidos para o fator de correção distância Terra-Sol.

Imagem 2000	$K = 1.000001784$
Imagem 1995	$K = 1.000002984979744$
Imagem 1990	$K = 1.0000014022656$

O método empregado mostrou-se eficiente na correção atmosférica porque, ao contrário do método que prevê o ajuste de cada banda a partir do seu valor mínimo de número digital, este método utiliza uma regressão linear para estipular o valor a ser utilizado na correção, eliminando desta forma a interferência da dispersão *Rayleigh*.

como o valor de leitura correspondente ao ponto, para se levar em consideração um eventual erro decorrente do registro.

4.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS COM OS DADOS DE CHUVA ATRAVÉS DE REGRESSÃO LINEAR.

Com os dados obtidos nos índices NDVI, *Tasseled Cap* e Componentes Principais entre as bandas TM5 e TM7 foi feita uma regressão linear onde se compara o valor obtido em cada índice e o valor do índice de acumulado de chuva dos últimos três dias para cada imagem.

O índice de acumulado de chuva dos últimos 3 dias é um índice pluviométrico utilizado pela Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo e pela defesa Civil do Estado de São Paulo para a determinação dos índices de "atenção", "alerta" e "alerta máximo" a escorregamentos na região litorânea do Estado de São Paulo.

Segundo CEDEC (1996) a análise de alguns episódios de chuvas que provocaram escorregamentos no litoral de São Paulo, permitiu estabelecer que valores de chuvas acumulados em 3 dias acima de 100mm na Baixada Litorânea indicam alta possibilidade de ocorrência de escorregamento.

Neste trabalho utilizou-se o índice de acumulado de chuvas dos últimos 3 dias como referência para se comparar os dados obtidos nos diferentes índices aplicados para a detecção de umidade.

5. RESULTADOS OBTIDOS

Os valores obtidos através das transformações espectrais das imagens de satélite foram confrontados com os valores do índice pluviométrico, com o intuito de verificar se existe uma relação entre o índice pluviométrico e os dados das imagens de satélite.

Os resultados obtidos a partir do índice de vegetação NDVI não foram satisfatórios porque o que se observa é que apesar de haver uma variação nos valores de acumulado de chuvas o mesmo não se reflete no índice NDVI. Por exemplo, o

solo (CRIST & KAUTH, 1986). Um aumento no conteúdo de umidade tende a ser associado a valores mais baixos da banda BRILHO e na banda UMIDADE (CRIST & CICONE, 1984), isto porque a banda UMIDADE corresponde ao contraste entre bandas do infravermelho médio.

Observa-se que este índice varia proporcionalmente ao valor de acumulado de chuvas, como pode ser visto no gráfico da figura 2. Para o ano de 2000 na Estação Garcia, o acumulado de chuva de 3 dias foi de 22,3mm e o índice *Tasseled Cap* foi de aproximadamente -60. Já para o ano de 1995, este acumulado caiu para 0.9mm e o índice também caiu para -53.

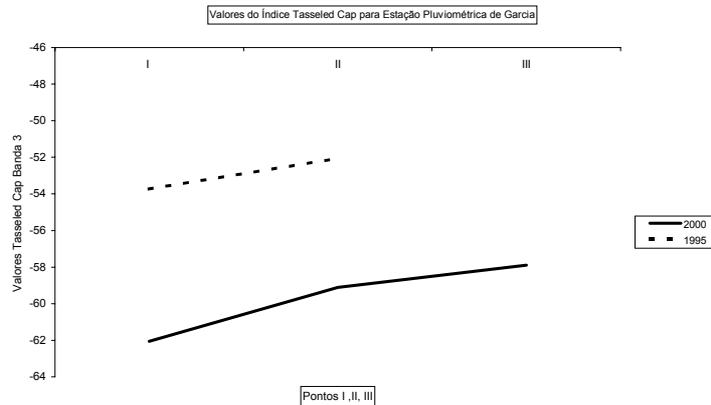


Figura 2 - Dados do índice Tasseled Cap, banda UMIDADE para os anos de 2000 e 1995 onde os índices de acumulado de chuva são respectivamente 22,3mm e 0.9mm.

referentes a três pontos distintos que correspondem, em uma análise visual, respectivamente a parte superior de uma vertente retilínea, de uma vertente convexa e de uma vertente côncava (pontos A, B e C). Isto foi feito para se analisar também se há diferença no comportamento dos valores em relação à forma da vertente e para se isolar a variável declividade.

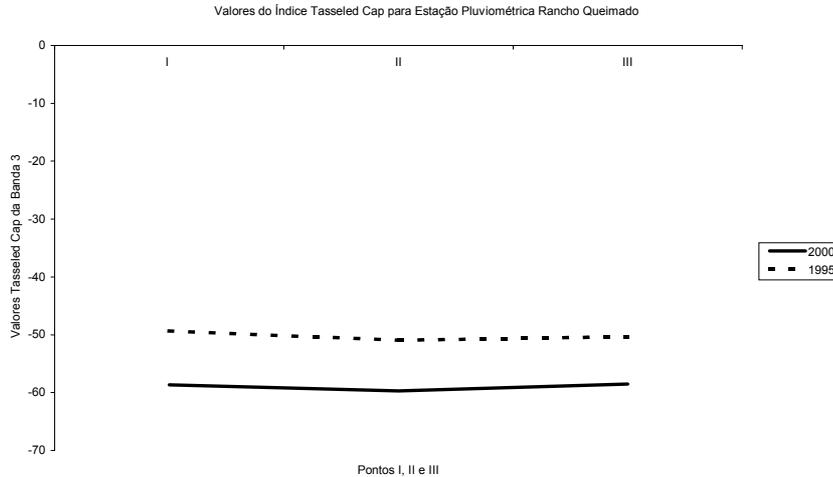


Figura 3 - Dados do índice Tasseled Cap, banda UMIDADE para os anos de 2000 e 1995 na estação pluviométrica Rancho Queimado onde os índices de acumulado de chuva são respectivamente 103,3mm e 2,8mm.

Quanto a variável litologia todos os pontos coletados nas Estações pluviométricas de Garcia e Rancho Queimado situam-se no que foi denominado

Valores do Índice Tasseled Cap para a Estação Pluviométrica Lagoa do Peri

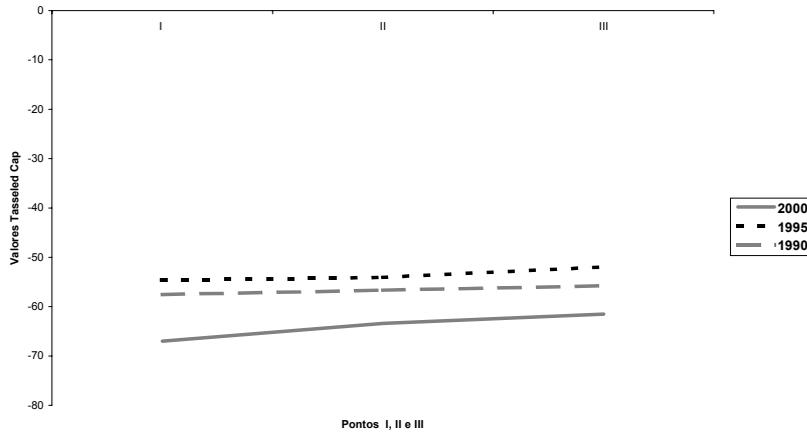


Figura 4 - Dados do índice Tasseled Cap, banda UMIDADE para os anos de 2000, 1995 e 1990 onde os índices de acumulado de chuva na Estação Lagoa do Peri é de 0mm para a imagem de 1995 e de 9,8 mm para a de 1990 .

A variável vegetação, por não dispor de um mapa de vegetação detalhado, pode ser avaliada com maior rigor, o que com certeza interferiu nos resultados obtidos no índice de vegetação NDVI e também nos componentes principais entre TM5 e TM7.

com um maior detalhamento de suas variáveis e em uma melhor idade, vegetação e tipo de solo estes dados podem mostrar-se mais favoráveis.

O estudo indireto da umidade do solo através de sensoriamento remoto pode contribuir desta forma para predição de movimentos gravitacionais de massa.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRYANT, E. A. 1993. Natural Hazards. Cambridge University Press. 294p.

CHUVIECO, E. 1990. Fundamentos de Teledetección Espacial. Ediciones Rialp, 1 ed. Madrid, 452p.

CRIST, E., CICONE, R.C. 1984. Application of the Tasseled Cap Concept to Simulated Thematic Mapper Data. In: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 50, n.3, pp. 343- 352.

CRIST. E. P., KAUTH, J. 1986. The Tasseled Cap De-Mystified. In: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 52, n.1, pp. 81-86.

DNPM. 1986. Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina. Escala 1:500.000.

HEJMANOWSKA, B., MULARZ, S.C. 2000. Integration of Multitemporal ERS2.SAR and Landsat TM data for soil moisture assessment. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. vol. XXXIII.partB7. Amsterdam. pp.511-518. (CD room).

KOREN, V., KOGAN, F.. 1995. Parameterization Of Hydrological Model Using Noaa/Avhrr Data. Proceedings Of the International Geoscience And Remote Sensing Symposium. Florença, Itália, 10-14 de julho.

NEUSCH, T. 1999. Multi-Frequency and Multi- Polarization Synthetic Aperture Radar for Modelling Hydrological Parameters. (PhD – Thesis) University of Karlsruhe. 128p.

VAN WESTEN, C. J. 2000. Remote Sensing for natural disaster management. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. vol. XXXIII,partB7. Amsterdam. pp.1609-1617. (CD rom).