

Detecção automática de estradas não pavimentadas em imagens de média resolução

Thiago Broerman Cazes¹
Raul Queiroz Feitosa^{1,2}
Heitor Luiz da Costa Coutinho³
Otávio F. M. Gomes⁴

¹Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-RJ
Rua Marquês de São Vicente 225, Gávea, Rio de Janeiro, CEP 22453-900, RJ, Brasil

²Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ
Rua São Francisco Xavier 524, Maracanã, Rio de Janeiro, CEP 20550-900, RJ, Brasil

³Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA Solos
Rua Jardim Botânico 1024, Jardim Botânico, Rio de Janeiro, CEP 22460-000, RJ, Brasil

⁴Centro Brasileiro de Tecnologia Mineral – CETEM
Av. Ipê 900, Rio de Janeiro, CEP 21941-590, RJ, Brasil

tcazes@fu2re.com.br; raul,@ele.puc-rio.br; heitor@cnpes.embrapa.br; ogomes@cetem.gov.br

Abstract: This paper presents a new automatic method to detect unpaved roads in medium to low resolution satellite images. Unpaved roads have the spectral response of bare soil. Since their spatial width is in most cases far below the pixel size, the pixels crossed by unpaved roads have different spectral responses over the scene depending on the surrounding pixels. The method tries to emulate the human ability to detect such roads in spite of that, by searching for long, narrow and smooth line segments whose spectral response are closer to the bare soil than the surrounding pixels. The method performance was evaluated on segments of Landsat scenes (bands 3, 4 and 5) of the Alcinópolis County, located in the State of South Mato Grosso in Brazil, and produced false negatives below 31%.

Palavras-chave: road detection, object recognition, remote sensing, erosion detection, detecção de estradas, reconhecimento de objetos, sensoriamento remoto, erosão.

1. Introdução

O meio oeste brasileiro, em uma grande parte, é altamente suscetível a eventos de erosão do solo. Esta pode provocar inúmeros impactos e desastres ambientais. A falta de preocupação com a sustentabilidade de algumas atividades de exploração do solo, como a abertura de estradas rurais, agrava os impactos potenciais da erosão. Devido ao empobrecimento do setor público do Brasil em conjunto com esforços governamentais para honrar a dívida externa, a maior parte das estradas rurais permanece ainda não pavimentada, com manutenção deficiente e desprovidas de cuidados com conservação de solo e água.

A habilidade de detecção automática de estradas não pavimentadas a partir de imagens de sensores remotos pode aumentar significativamente a eficiência da tarefa de planejamento ambiental e do zoneamento quanto à suscetibilidade à erosão e seus impactos.

A maioria dos métodos propostos para detecção de estradas até o momento (Duta 2000; Lin 2000; German 1996; Hui 2001; Mukherjee 1996; Rianto 1999; Rianto 2002) são aplicáveis a imagens de alta resolução, onde a largura de uma estrada é maior que a largura de um único pixel. No entanto, o uso destas imagens representa um custo muito alto para grande parte dos municípios brasileiros.

Um observador é em geral capaz de localizar estradas não pavimentadas em imagens de média e baixa resolução. Fazê-lo automaticamente não é, no entanto, trivial. Nesses casos estradas rurais têm largura inferior a 10 metros, enquanto um pixel da imagem do LANDSAT 5, por exemplo, cobre uma área de 30 por 30 metros. A aparência espectral de pixels cruzados por estradas não pavimentadas é por consequência muito mais determinada pela cobertura da vizinhança do que pela resposta espectral do solo exposto. Além disso, uma área coberta por uma cena pode compreender mais de um tipo de solo, o que diversifica o aspecto espectral de estradas não pavimentadas sobre a imagem.

Este trabalho propõe um novo método de detecção automática de estradas não pavimentadas a partir de imagens multiespectrais de sensores remotos, de baixa e média resolução. A área de estudo localiza-se no município de Alcínópolis, nordeste do Estado de Mato Grosso do Sul, região com alta susceptibilidade a erosão, que é parte da Sub-bacia do Rio Taquari, contribuinte do Pantanal e afluente do rio Paraguai. Foi utilizada uma cena do satélite LANDSAT TM da área de estudo e a validação dos resultados foi realizada com dados de campo colhidos com GPS um mês após a captura das imagens.

Este artigo apresenta na próxima seção uma descrição detalhada do modelo proposto e em seguida uma avaliação de desempenho. O texto termina com conclusões gerais e indicações de trabalhos futuros.

2. Método

O método proposto baseia-se nas seguintes hipóteses quanto a estradas não pavimentadas em imagens de média/baixa resolução:

- a) pixels cruzados por estradas não pavimentadas são espectralmente mais semelhantes a solo exposto do que seus vizinhos.
- b) estradas não pavimentadas, têm comprimento de médio para grande;
- c) estradas não pavimentadas são suaves, isto é, têm longos trechos aproximadamente retos.

Calcular comprimento (2) não apresenta dificuldade. Atributos que representam a resposta espectral de solo exposto (1) e suavidade (3) são descritos a seguir.

2.1. Relação com a refletância do solo exposto

Admite-se que a resposta espectral de um pixel cruzado por uma estrada não pavimentada e estreita é dada por uma mistura entre a resposta espectral do solo exposto e a resposta espectral média da área cruzada pela estrada. Isso é expresso pela equação (1)

$$\mathbf{p}_i = a \cdot \mathbf{p}_n + (1 - a) \cdot \mathbf{p}_b + \boldsymbol{\varepsilon}_i \quad (1)$$

onde \mathbf{p}_i , \mathbf{p}_n e \mathbf{p}_b representam respectivamente a resposta espectral de um pixel genérico, a resposta espectral média de seus vizinhos ao lado da estrada e a resposta espectral típica de solo exposto. O módulo do erro $|\boldsymbol{\varepsilon}_i|$ está associado à aderência do pixel ao modelo proposto e, portanto, às suas chances de ser cruzado por uma estrada não pavimentada. O fator de mistura a assume o valor no intervalo $[0,1]$ que minimiza o módulo do erro. Partindo deste modelo e definindo $\mathbf{p}_{ib} = \mathbf{p}_i - \mathbf{p}_b$ e $\mathbf{p}_{nb} = \mathbf{p}_n - \mathbf{p}_b$ resultam as equações (2) e (3).

$$\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_b = a \cdot (\mathbf{p}_n - \mathbf{p}_b) + \boldsymbol{\varepsilon}_i \quad (2)$$

$$\mathbf{p}_{ib} = a \cdot \mathbf{p}_{nb} + \boldsymbol{\varepsilon}_i \quad (3)$$

A figura 1 mostra a interpretação gráfica das equações de (1) a (3).

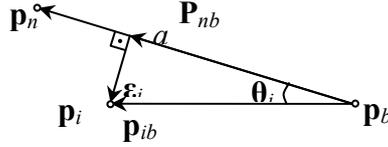


Figura 1: Interpretação geométrica do modelo espectral proposto

O valor de a que minimiza o módulo do erro na equação (3) é dado por

$$\boldsymbol{\varepsilon}_i = \mathbf{p}_{ib} - a \cdot \mathbf{p}_{nb} \quad (4)$$

$$|\boldsymbol{\varepsilon}_i|^2 = |\mathbf{p}_{ib}|^2 - 2 \cdot a \cdot |\mathbf{p}_{ib}| \cdot |\mathbf{p}_{nb}| \cdot \cos \theta_i + a^2 \cdot |\mathbf{p}_{nb}|^2 \quad (5)$$

onde θ_i é o ângulo entre \mathbf{p}_{ib} e \mathbf{p}_{nb} . Igualando derivada da magnitude do erro

$$\frac{\partial |\boldsymbol{\varepsilon}_i|^2}{\partial a} = -2 \cdot |\mathbf{p}_{ib}| \cdot |\mathbf{p}_{nb}| \cdot \cos \theta_i + 2 \cdot a \cdot |\mathbf{p}_{nb}|^2 \quad (6)$$

a zero e resolvendo para a , obtém-se:

$$\frac{\partial |\boldsymbol{\varepsilon}_i|^2}{\partial a} = 0 \Rightarrow a = \frac{|\mathbf{p}_{ib}|}{|\mathbf{p}_{nb}|} \cdot \cos \theta_i = \frac{\mathbf{p}_{ib} \cdot \mathbf{p}_{nb}}{|\mathbf{p}_{nb}|^2} \quad (7)$$

Substituindo a equação (7) em (5) e após algumas manipulações resulta:

$$|\boldsymbol{\varepsilon}_i|_{\min} = |\mathbf{p}_{ib}| \cdot \sin \theta_i \quad (8)$$

O valor absoluto do erro $|\boldsymbol{\varepsilon}_i|_{\min}$ não é, contudo, a melhor medida de quanto um determinado pixel adere ao modelo proposto. Por exemplo, a magnitude de \mathbf{p}_{ib} para estradas cruzando pastos será em geral consideravelmente menor e conseqüentemente também o valor do erro, do que para estradas cruzando florestas, uma vez que pasto já possui uma resposta espectral muito mais próxima ao solo exposto. Mais relevante para esta análise é o erro relativo aos pixels vizinhos. Dividindo o erro da equação (8) pela magnitude do vetor \mathbf{p}_{nb} obtém-se esse erro relativo.

$$|\boldsymbol{\varepsilon}_i|_n = \frac{|\mathbf{p}_{ib}|}{|\mathbf{p}_{nb}|} \cdot \sin \theta_i \quad (9)$$

O valor definido pela equação (9) é usado nesta proposta como a medida de quanto o modelo de estrada se ajusta a um pixel: quanto menor $|\boldsymbol{\varepsilon}_i|_n$, maior a possibilidade do pixel ser cruzado por uma estrada não pavimentada.

2.2 Suavidade

Uma curva Γ que representa uma estrada aparece na imagem como uma seqüência de $N+1$ pixels nas coordenadas (x_i, y_i) , onde $0 \leq i \leq N$ e cada pixel (x_i, y_i) é adjacente ao pixel (x_{i-1}, y_{i-1}) . O ângulo φ_i da tangente à estrada no pixel em (x_i, y_i) em relação à horizontal pode ser aproximado por:

$$\varphi_i = \text{atan2}(y_i - y_{i-1}, x_i - x_{i-1}) \quad (10)$$

onde atan2 é a função de arco tangente de quatro quadrantes. Dá-se o nome de *curvatura* à variação do ângulo φ_i ao longo de uma curva (Sonka, 1999; Forsyth, 2003), que pode ser aproximada por:

$$\gamma_i = \varphi_i - \varphi_{i-1} \quad (11)$$

Sendo assim, a média absoluta da curvatura ao longo de uma curva Γ pode ser calculada pela equação (12), e será alta para linhas suaves e baixa para linhas com muitas curvas.

$$\Gamma = \frac{1}{N-2} \sum_{i=2}^N |\gamma_i| \quad (12)$$

2.3. Procedimento de detecção

O procedimento de detecção envolve as seguintes etapas: a) localização preliminar das estradas, b) verificação das características espectrais, c) eliminação de ramos emergentes curtos, d) verificação do limite de comprimento, e) verificação do limite de curvatura.

2.3.1 Localização preliminar das estradas

A análise de todas as possíveis curvas na imagem é computacionalmente inviável. Por isso, procede-se a uma seleção preliminar com base na equação (9), levando em conta as seguintes condições:

- Pixel para os quais o fator de mistura a está fora do intervalo $[0,1]$ são eliminados.
- A resposta espectral do pixel tratado deverá, de qualquer forma, ser mais próxima da resposta espectral do solo exposto que a dos seus vizinhos ao lado da estrada. Assim, pixels para os quais $|\mathbf{p}_{ib}| < |\mathbf{p}_{nb}|$, são também descartados

Cabe neste ponto chamar a atenção que \mathbf{p}_n das equações (1) e (2) e os termos que dele derivam referem-se aos pixels “vizinhos ao lado da estrada”, mais especificamente aos pixels que não pertencem à estrada e estão de um mesmo lado da estrada. Como não se conhece *a priori* a direção em que se estende a estrada, esta avaliação é feita para várias direções, e, para cada direção, de ambos os lados. Retém-se para os passos subseqüentes do algoritmo a direção e o lado que melhor se ajustam ao modelo. Os detalhes do procedimento são descritos a seguir.

O valor de \mathbf{p}_i é calculado a partir da média dos pixels da estrada vizinhos ao pixel considerado e pode ser obtido através da convolução de cada banda da imagem com um banco de filtros gaussianos orientados não simétricos com a forma geral descrita nas equações de (13) a (15)

$$H(x, y, \alpha) = k \exp \left[\frac{-1}{2} \left(\frac{x'^2}{\sigma_x^2} + \frac{y'^2}{\sigma_y^2} \right) \right] \quad (13)$$

$$x'^2 = x \sin(\alpha) + y \cos(\alpha), \quad (14)$$

$$y'^2 = x \cos(\alpha) - y \sin(\alpha) \quad (15)$$

onde x' e y' representam eixos respectivamente perpendicular e paralelo à estrada, x e y são as coordenadas da imagem, σ_x , σ_y são os desvios padrões ao longo das direções x' e y' respectivamente, α é a direção da estrada que coincide com a orientação do filtro e k é uma

constante multiplicativa que assegura que a soma de todos os valores do filtro seja igual a 1. Para todas as estradas ao longo da direção y' a razão σ_y/σ_x deve ser superior a 1. Visto que o propósito é a detecção de estradas mais estreitas que a largura de um pixel, o valor de σ_x tem que ser selecionado de forma que a gaussiana tenha valores próximos a zero para pixels a uma distância superior a 1 na direção de x' .

Os valores de \mathbf{p}_n são meramente os valores de \mathbf{p}_i deslocados na direção x' para um e outro lado da estrada, restando entre estes aquele que corresponde ao menor valor de erro. O valor de \mathbf{p}_b , a resposta espectral típica do *solo exposto* para a área, é um dado de entrada do modelo que deve ser fornecido pelo usuário. A partir dos valores de \mathbf{p}_b , \mathbf{p}_i e \mathbf{p}_n calculam-se os valores do erro normalizado $|\epsilon_i|_n$.

De acordo com o modelo proposto uma representação tridimensional da matriz \mathbf{E} contendo os erros normalizados $|\epsilon_i|_n$, onde a intensidade é a terceira dimensão, revelará vales agudos nos pontos cruzados por estradas não pavimentadas. O resultado desta fase preliminar de detecção será a linha definida pelos valores mínimos ao longo destes vales. Estes correspondem aos pixels, cujos valores são menores do que seus dois vizinhos na direção perpendicular à estrada, dada por $\alpha \pm 90^\circ$. Este procedimento é conhecido como supressão de não-mínimos (Canny, 1986).

2.3.2 Verificação das características espectrais

Verificam-se para os pixels pré-selecionados na etapa anterior as três características mencionadas na seção 2. A primeira delas diz respeito às características espectrais baseando-se na matriz com os valores de erro \mathbf{E} . Adotam-se dois limiares para o módulo do erro do modelo, um limiar alto T_{SH} e um baixo T_{SL} . Partindo dos pixels com erro inferior ao limiar baixo (T_{SL}) pixels adjacentes cujo valor do erro é menor do que o limiar mais alto (T_{SH}) vão sendo agregados iterativamente até que nenhum novo pixel seja agregado entre duas iterações sucessivas. Novamente neste caso o processo é análogo ao aplicado no Detector de Arestas de Canny (Canny, 1986).

A determinação automática dos limiares altos e baixos, por si é um processo relativamente complexo que depende de muitos fatores, tais como resposta típica do solo exposto, variação da resposta do solo exposto ao longo da imagem, estado físico das estradas dentre outros. Nesse trabalho os valores dos limiares são entradas fornecidas pelo usuário ao modelo.

2.3.3 Eliminação de ramos emergentes curtos

Estradas em áreas rurais, não possuem em geral ramos emergente curtos. Por isso, aplica-se ao resultado produzido na etapa anterior o algoritmo de poda (do inglês *pruning*, vide Gonzalez (2001) para maiores detalhes) que consiste em eliminar ramos de comprimento menor do que um limiar T_B definido pelo usuário.

2.3.4 Verificação do comprimento

Com os dados obtidos anteriormente, e por um processo morfológico convencional, os segmentos cujos comprimentos forem inferiores a um limiar de comprimento T_L definido pelo usuário, são automaticamente eliminados.

2.3.5 Verificação da curvatura

Calculam-se para os segmentos resultantes da etapa anterior os valores de curvatura média, conforme a equação (12). Segmentos com curvatura média superior a um limiar dado

pelo usuário T_C são eliminados. Os segmentos que superam esta etapa compõem o resultado final do algoritmo proposto.

3 Avaliação de desempenho

Para avaliar o procedimento proposto neste artigo, construiu-se um protótipo em software utilizando o MATLAB. Esse protótipo poderá ser obtido pela Internet da url <http://lvc.ele.puc-rio.br/users/tcazes/roaddetection>. O protótipo foi aplicado a imagens LANDSAT 7 da área de Taquari, cena 224-073, localizada no nordeste do Estado do Mato Grosso do Sul. A imagem analisada foi tomada em 25 de setembro de 2004 às 13 horas e 16 minutos; somente as bandas 3, 4 e 5 foram utilizadas. A avaliação restringiu-se a 5 áreas cobrindo aproximadamente 220 mil pixels. Essas áreas foram analisadas de maneira independente, usando diferentes configurações para os parâmetros do modelo.

As principais estradas das áreas analisadas foram percorridas e suas posições registradas com uso de um GPS num trabalho de campo realizado no início de setembro de 2004. Este registro foi comparado com os resultados produzidos pelo modelo para estimar sua acurácia. Como nem todos os caminhos das áreas foram percorridos neste trabalho de campo, esta avaliação restringe-se a determinar o percentual de falsos negativos, ou seja, o percentual de pixels das estradas percorridas que não foram detectados pelo processo automático. Os melhores resultados obtidos depois de um ajuste manual de parâmetros são mostrados na Figura 2 e sumarizados na Tabela 1.

área	Resposta do <i>solo exposto</i>			Parâmetros do Modelo							Falsos Negativos (%)
	banda 3	banda 4	banda 5	T_L	$\sigma_{y'}$	$\sigma_{x'}$	T_{SH}	T_{SL}	T_B	T_C	
A	255	255	235	15	6	2	0,85	0,30	10	15	25,61
B	255	230	190	15	9	3	0,86	0,32	15	8	15,54
C	255	207	185	10	10	2	0,85	0,25	10	10	31,49
D	255	231	201	10	6	3	0,85	0,31	12	15	11,71
E	255	220	200	20	6	3	0,90	0,30	12	15	9,46

Tabela 1 – Resultados obtidos após o ajuste dos parâmetros.

3.2. Resultados obtidos

A região coberta pela cena LANDSAT analisada têm vários tipos de solo. Por isso foi necessário definir valores diferentes da resposta espectral de solo exposto para cada uma das áreas analisadas.

Determinou-se experimentalmente que um bom valor para o limiar de comprimento tanto para os segmentos de estrada (T_L) como para os segmentos emergentes (T_B) fica entre 10 e 15 pixels para a resolução utilizada. Estes valores implicam em que somente trechos de estrada entre 300m e 450m serão considerados. Na região analisada há poucas bifurcações, como é típico de áreas rurais. Nesse caso a condição quanto ao comprimento dos ramos emergentes se mostrou eficaz na eliminação falsas detecções.

O parâmetro $\sigma_{x'}$ em torno de 3 utilizado nos experimentos corresponde a estradas com largura média inferior a 1 pixel. O parâmetro $\sigma_{y'}$ assumiu valores em torno de 3 $\sigma_{x'}$.

A escolha dos valores ótimos para os limiares T_{SH} e T_{SL} não é absolutamente intuitiva. No protótipo construído estes valores derivam de um percentil do histograma da matriz de erro. O valor da tabela indicado na coluna T_{SH} igual a 0,85 significa, que 85% dos valores da matriz de erro é inferior ao valor do limiar alto escolhido no experimento.

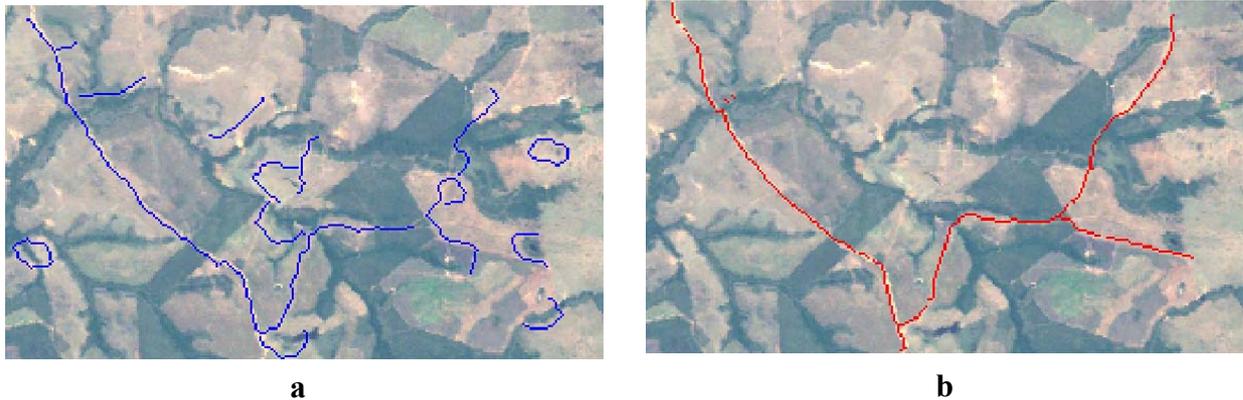


Figura 2 – a) resultado do método de detecção propostos e b) e estradas percorridas (referência)

Verificou-se nos experimentos realizados que o desempenho do algoritmo é fortemente afetado pelos valores adotados para os limiares T_{SH} e T_{SL} . Observou-se que os valores ajustados manualmente para todas as 5 áreas são muito próximos. Isto pode ser um indicio de que existe um intervalo relativamente estreito em que recai o valor ótimo para estes parâmetros, possivelmente independente da região analisada. Também eficaz na redução do número de falsas detecções foi a condição quanto à curvatura média.

Os valores de falso positivo são indicados na última coluna da tabela e estão entre 9% e 31%. Os resultados obtidos indicam que o modelo proposto é, portanto, eficaz na pesquisa de estradas não pavimentadas. A maior parte dos segmentos registrados como estradas no processo manual, ou seja, percorridos pelo GPS, foram detectados pelo protótipo. Em algumas áreas o processo se mostrou menos eficiente, porém nessas áreas a detecção visual é também bastante difícil. Em outras áreas cercas foram detectadas como estradas. Essas cercas possuem caminhos ao seu redor, construídos para facilitar a manutenção. Nesses casos, apesar de não serem estradas propriamente ditas, não deixam de ser fontes de erosão, principalmente quando não são construídas em nível topográfico.

A maior dificuldade na utilização do método proposto foi a definição correta dos parâmetros do modelo. Alguns, como os limiares relativos ao comprimento dos ramos e da curvatura são mais intuitivos. Outros, como o padrão do solo exposto, por exemplo, são de difícil configuração, visto que podem mudar de área para área. Em áreas mais homogêneas do ponto de vista da largura de estradas, da resposta espectral do solo exposto e mesmo da curvatura das estradas, o modelo apresenta melhor desempenho do que em áreas mais heterogêneas.

4. Comentários Finais

Um modelo para detecção automática de estradas não pavimentadas foi proposto e validado com dados obtidos por GPS através de uma visita a área de estudo na Bacia do rio Taquari. Esta região enfrenta o problema da ocupação desordenada do solo, principalmente para formação de pastagens para criação de gados, caracterizada pela ausência de práticas de conservação de solo e água. Neste processo de ocupação, muitas estradas não pavimentadas foram construídas sem os devidos cuidados conservacionistas, sendo motivo de preocupação quanto à erosão do solo e aporte de grandes quantidades de sedimentos para os leitos de rios, causando seu assoreamento e degradação. Por esse motivo a área foi escolhida para a validação do algoritmo proposto.

Sem dúvida os resultados produzidos pelo modelo nos experimentos realizados demandam ainda uma pós-edição manual. Contudo, o desempenho observado indica que o método proposto pode ser uma ferramenta muito útil como auxílio ao foto-intérprete na tarefa de detecção de estradas não pavimentadas em áreas rurais.

Possibilidades de trabalhos futuros incluem o desenvolvimento de um procedimento automático para a definição dos parâmetros do modelo, como a resposta espectral típica do solo exposto. Extensões futuras podem ainda incluir uma avaliação automática de vários valores para os parâmetros dos filtros espaciais. Outro aspecto que pode ser objeto de estudo na continuação do trabalho é a investigação de outras restrições quanto à forma das estradas.

Cabe ainda mencionar que o processo apresentado tem potencial para ser aplicado com algumas adaptações para detecção de outros tipos de objetos em imagens de baixa resolução, como, por exemplo, a detecção de pistas de pouso, que possuem algumas características semelhantes a estradas não pavimentadas.

Agradecimento

Os autores agradecem à CAPES e ao DAAD pelo apoio no âmbito do programa PROBRAL.

Referências

- Gonzalez, R.C., Woods, R.E., **Digital Image Processing, 2nd Ed., Prentice Hall**, 2002.
- Canny, J., A computational approach to edge detection, *IEEE Trans. Pattern Anal. And Machine Intelligence*, 1996, 8(6), p. 679-698.
- Duta, N., Road Detection in Panchromatic Spot Satellite Images, In: 15th International Conference on Pattern Recognition, 2000, **Proceedings...**, v. 4, p. 308-311.
- Lin, C., Wang, C.M., Chang, C., Application of Generalized Constrained Energy Minimization Approach to Urban Road Detection, In: Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS '00, 2000, **Proceedings...**, v. 5, p. 2080-2082.
- Forsyth, D.A., **Computer Vision – A Modern Approach**, Prentice Hall, 2003, p. 429-434.
- German, D., Jedyak B., An Active Testing Model for Tracking Roads in Satellite Images, In: *IEEE Trans. Pattern Anal. And Machine Intelligence*, 2003, 18(1), p. 1-13.
- Hui, A., Liew, S.C. Kwhoh, L.K., Extraction of Linear Features in Multispectral Imagery, Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS '01, 2001, **Proceedings...**, v. 5, p. 2310-2312.
- Mukherjee, A., Parui, S.K., Chaudhuri, D., Chaudhuri, B.B., Krishnan, R., An Efficient Algorithm for Detection of Road-Like Structures in Satellite Images. In: 13th International Conference on Pattern Recognition, 1996, v. 3, p. 875-879.
- Rianto, Y., Kondo, S, Kim, T., Detection of Roads from Satellite Image Using the Optimal Search, *Proceedings. International Conference on Image Analysis and Processing*, 1999, p. 804-809.
- Rianto, Y., Road network detection from SPOT satellite image using Hough transform and optimal search, *Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems - APCCAS '02*, 2002, v. p. 177 – 180.
- Sonka, M., Hlavac, V., Boyle, R., **Image Processing Analysis and Machine Vision**, PWS Publishing, 1999, p. 237, 244.
- Mota, G.L.A.; **Knowledge based Interpretation of Multitemporal Low Resolution Satellite Images**, 2004. Ph.D. Electrical Engineering thesis at Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brazil.