

## Correção atmosférica e topográfica de imagens de satélite em terrenos montanhosos

Brenner Stefan Gomes Silva<sup>1</sup>  
Dalton de Morisson Valeriano<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{brenner, dalton}@ltid.inpe.br

**Abstract.** Remote sensing on mountainous or rugged terrains require specific radiometric corrections because of topographic and atmospheric effects inserted. A simple method is presented in the context classification and radiometric assessment. A clean atmosphere could be described with dark objects on different highs. With the use of filters over the Digital Elevation Model a description of the geometric interference on each digital number could be used to a topographic equalization of the image. A classification enhancement and radiometric assessment of satellite images over of the Mantiqueira range, southeast Brazil.

**Palavras-chave:** remote sensing, radiometric correction, topography, atmosphere, mountain, sensoriamento remoto, correção radiométrica, topografia, atmosfera, montanha.

### 1. Introdução

Embora os mecanismos de interação com a superfície e com a atmosfera possam ser tratados em separado, uma imagem de satélite é resultado dos efeitos aditivo e multiplicativo de ambos. A correção radiométrica é utilizada para eliminação dos efeitos de interferências da atmosfera e da topografia, quando não de calibração dos sensores, sobre nos níveis digitais, tornando possível aproximar estes dados de características biofísicas dos alvos em superfície. Por razões naturais a engenharia de satélites ópticos favorece aplicações sobre superfícies planas (Schowengerdt, 1997). Entretanto terrenos irregulares proporcionam interferência radiométrica significativa.

Montanhas cobrem 25% da superfície terrestre do mundo. No Chile, por exemplo, apenas 20% da superfície é representada por planícies. No Brasil áreas de grande expressividade de montanhas formam o chamado domínio tropical atlântico (Ab'Sáber, 2003), um complexo topográfico de áreas distintas, desde os tabuleiros da zona da mata nordestina até as escarpas tropicais da Serra do Mar e Mantiqueira, rodeados por “mares de morros” outrora florestados no Brasil sudeste. O uso do sensoriamento remoto como ferramenta de monitoramento e suporte a gestão dessas áreas é imprescindível e requer um tratamento específico.

Embora menos exploradas, em relação a ecossistemas de planície, imagens de satélite em terrenos irregulares já são alvo de estudo quantitativos, ou seja, requer correção radiométrica, assim como para classificação de vegetação (Riaño et al., 2003). Uma abordagem utilizada traz a dependência única da imagem, como no caso da razão de bandas (Holben and Justice, 1981) ou transformações estatísticas por principais componentes ou técnicas de regressão. De outra maneira busca-se descrever efeitos topográficos através da modelagem da transferência radiativa na situação de atmosfera para uma dada imagem (Richter, 1997; Sjoberg and Horn, 1983). O presente trabalho segue a primeira abordagem com a utilização do Modelo Digital de Elevação (MDE) para tratamento dos efeitos de superfície. De tal forma procura-se simplificar o processo de caracterização física da atmosfera e de efeitos da superfície em que os parâmetros dependerão da imagem e do MDE em questão.

A interferência da topografia sobre a radiometria de imagens pode ser vista por duas formas: a primeira diz respeito à redução da camada atmosférica com o aumento de altitude e a segunda refere-se à disposição do terreno em relação à irradiação solar direta e, em menor porção, difusa na atmosfera.

## 2. Área de estudo

A área de estudo contempla a Serra da Mantiqueira, localizada entre os paralelos 21°50' e 23°00' sul e 44°10' e 45°55' oeste, uma região montanhosa de encostas mais íngremes florestadas e gradiente altitudinal de vegetação até alcançar os campos naturais em altitudes de até 2.800 metros. Nesta área destacam-se dois ambientes vizinhos: o vale do Paraíba ao sul-sudeste com altitudes abaixo de 700m e densamente urbano e industrializado e a norte-noroeste o planalto sul mineiro situado entre 800 e 1100m, este principalmente rural com focos de urbanização.

## 3. Materiais

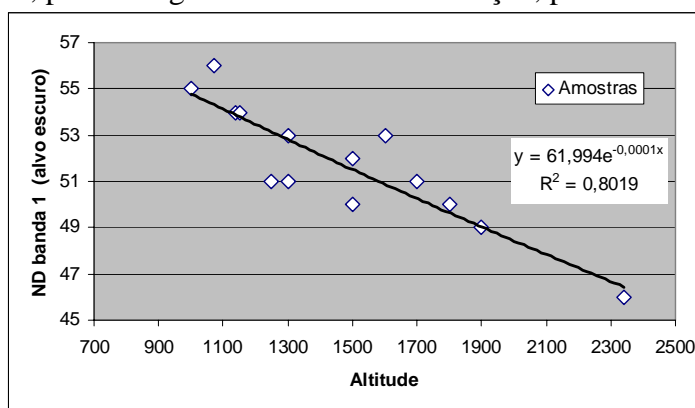
Para este trabalho utilizou-se uma imagem Landsat ETM+ de órbita ponto 218/76 e data de 27/02/2003. Flocos de nuvens densas localizadas em alguns pontos da imagem parece ser a única interferência atmosférica horizontalmente setorizada e incorrigível. Em geral a imagem se apresenta livre de nebulosidade ou massas de aerossóis concentradas em algumas regiões que não respeitem a topografia.

O modelo digital de elevação obtido pelo *Shuttle Radar Topographic Mission*, SRTM, foi reamostrado para 30 metros utilizando geoestatística (Valeriano, 2002) e apresenta boa concordância geográfica com a imagem óptica (Landsat ETM+).

A execução dos processamentos para correção topográfica foi realizada no ambiente Spring 4.1, cujos algoritmos estão escritos na linguagem de análise geográfica LEGAL.

## 4. Correção atmosférica

A altitude proporciona ainda um maior ou menor caminho pela atmosfera até que a radiação refletida seja captada pelo sensor. Na baixa troposfera ocorre normalmente um gradiente logarítmico de interferência por aerossóis, ou densidade óptica, proporcionando um aumento de 30% em irradiância de 500 para 2.000 metros de altitude, em média para uma situação de equinócio de primavera (Silva, 2004). Uma técnica comumente aplicada na correção do efeito aditivo, ou radiancia de percurso, em imagens multi-espectrais utiliza um alvo escuro, ou regiões de sombra, para calibração (Chavez, 1988). De forma relativa os modelos de espalhamento atmosférico Rayleigh (componentes gasosos) e Mie (aerossóis) são aplicados de acordo com o nível de cinza encontrado em alvos escuros. Esses alvos em diferentes altitudes podem sugerir a aplicação de modelos mais apropriados por faixas de altimetria. É o que mostra a **Figura 1**, em que uma regressão exponencial é aplicada para determinar os valores de alvo escuro e, por conseguinte o modelo de correção, para cada faixa altimétrica.



**Figura 1** - Amostras de alvos escuros encontradas em diferentes localidades e altitudes sobre a cena Landsat ETM+ 218/76 de 27/02/2003.

Um modelo de correção foi então aplicado para cada setor definido em faixas de 200m altitude dada pelo Modelo Digital de Elevação. O algoritmo de correção pixel a pixel foi escrito de forma que a altitude pudesse ser consultada para cada pixel e na instância de uma certa faixa receberia a correção adequada. De acordo com o offset (ND a ser subtraído) em cada modelo, foram definidos 11 setores considerando que a mais baixa amostra obtida estava a 1000m de altitude e a mais alta a 2340m. A banda 1 foi a única que necessitou uma correção diferenciada para cada setor subtraindo valores conforme a **Tabela 1**. As demais bandas 2,3,4,5 e 7 diferenciavam-se em 7, 5, 2, 2 e 1 valores de offset respectivamente, possibilitando a unificação de alguns setores no algoritmo.

**Tabela 1** – Obtenção do nível de correção a partir de amostras de alvos escuros para a imagem Landsat ETM+ 218/76 de 27/02/2003.

ND escuro dado pela regressão	Localização da amostra	Faixas de Altitude	Valores de Nível de cinza para subtração em cada banda para cada faixa altimétrica de acordo com o método Chavez (1988)					
			Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 7
59	Vale do Paraíba	500	43	27	21	9	10	9
58	Vale do Paraíba	700	42	27	21	9	10	9
57	Planalto sul mineiro	900	41	26	20	8	9	9
56	Vale do Paraíba	1100	40	26	20	8	9	9
54	Planalto sul mineiro	1300	39	25	20	8	9	9
53	Serra da Mantiqueira	1500	38	25	19	8	9	9
52	Serra da Mantiqueira	1700	37	24	19	8	9	9
51	Planalto sul mineiro	1900	36	24	18	8	9	9
50	Serra da Mantiqueira	2100	35	23	18	8	9	9
49	Serra da Mantiqueira	2300	34	23	18	8	9	9
48	Serra da Mantiqueira	2500	33	22	17	8	9	9
47	Serra da Mantiqueira	2700	32	21	17	8	9	9

## 5. Correção topográfica

Devido a condições geométricas irregulares, a topografia ocasiona um realce de valores aparentes na reflectância de superfície. Superfícies de mesma cobertura da terra orientadas contra o sol parecem ter valores mais altos do que quando a favor do sol, o que pode ocasionar um erro de classificação se a topografia for negligenciada. A relação geométrica entre o ângulo de incidência solar e a reflectância do terreno é utilizada na correção desses desníveis digitais ocasionados pela topografia.

### 5.2. Seguindo a lei do cosenos

Existem modelos, como o de Richter (1997), que distinguem a interferência da topografia na reflectância do pixel observado usando processamentos que envolvem modelagem atmosférica e processamentos avançados, tais como ortorretificação, cálculo de projeção de sombras e do fator de visibilidade do céu. A correção topográfica, para este caso, é uma correção radiométrica da imagem e sugere a equalização de níveis de cinza entre superfícies contra e a favor do sol. Uma abordagem que simplifica o processo de correção topográfica é apresentada por Felicíssimo e Garcia-Manteca (1990) e González et al. (2001). Neste caso são utilizados filtros 3x3 sobre o MDE e algoritmos que implementem as formulações matemáticas conhecidas para correção topográfica. Formulações como as que descrevem a “lei dos cosenos” servem de base para este processo.

A melhor forma de representar a geometria de irradiação direta, ou de iluminação, é através do ângulo de incidência ( $\theta$ ) entre a normal à superfície e o vetor solar. Descreve-se esta variação, como mostra a equação (1), em função do ângulo zenital ( $Z$ ) e azimute ( $\phi$ )

solar, azimute (a) e declividade (b) do terreno e utiliza-se a convenção do azimute partindo do norte no sentido horário.

$$\cos\theta = \cos b \cdot \cos Z + \sin b \cdot \cos Z \cdot \cos(a - \phi) \quad (1)$$

### 5.3. Uma aproximação da distribuição direcional da reflectância

Normalmente processamentos similares consideram superfícies lambertianas, que são diferentes do que se encontra normalmente em regiões florestadas (Itten and Meyer, 1993). De forma analítica é possível reconhecer o efeito direcional da reflectância em função do comprimento de onda e sobre diferentes posições (de acordo com o azimute e declividade) do terreno. Dessa forma Minnaert (1941) construiu um modelo que pode ser aplicado sobre imagens de satélite através da equação (2). Esta equação mostra como é feita a transformação dos valores de radiância (ou níveis digitais) do plano inclinado ( $L_n$ ) para o horizontal ( $L_\lambda$ ).

$$L_\lambda = L_n (\cos \theta)^{k(\lambda)} (\cos i)^{k(\lambda)-1} \quad (2)$$

onde,  $\theta$  é o ângulo de incidência solar,  $(\cos i)$  é o cosseno do ângulo entre a declividade da superfície e o sensor e  $k$  a constante de Minnaert.

A constante de Minnaert ( $k$ ) é encontrada de forma empírica, através da regressão entre  $\ln(\cos\theta \cdot \cos i)$  e  $\ln(ND \cdot \cos i)$ . Tal regressão foi obtida pela aplicação de funções logarítmicas sobre o cruzamento do MDE com a imagem conjugada e parâmetros da geometria de iluminação (elevação e azimute solar). Os valores de  $k$  foram calculados aqui sobre uma amostra da área de estudo contendo ampla variedade de iluminação e configuração do terreno e são apresentados na **Tabela 2**. Como ressalta Colby (1991) a constante  $k$  depende da variedade de ângulos de incidência encontrados na área de estudo.

**Tabela 2** – Valores da constante de Minnaert obtidos utilizando uma amostra da cena.

Banda ETM+	27/02/2003
1	0.55
2	0.75
3	0.85
4	0.76
5	0.82
7	0.82

No caso de superfície lambertiana, a radiância recebida pelo sensor é proporcional, apenas, à geometria de iluminação e  $k$  passa a valer 1. O modelo de Minnaert já foi comparado ao modelo lambertiano usando imagens TM em regiões montanhosas e há uma sensível diferença quanto a normalização e classificação dessas imagens (Colby, 1991; Itten e Meyer, 1993).

### 5.4. Correção por filtros

Trata-se do ajuste do nível digital correspondente ao ângulo de iluminação ( $\theta$ ) para cada célula da imagem. Este ângulo é obtido a partir de relações trigonométricas entre derivadas (azimute e declividade) do terreno e da posição do Sol (azimute e ângulo zenital). Tais parâmetros são calculados por meio da aplicação de filtros 3x3 sobre o MDE. A equação (3) mostra como pode ser obtida a matriz  $\rho_h$  que compensa o efeito da topografia utilizando o MDE e dados de posicionamento do Sol (González et al., 2001).

$$\rho_h = \frac{\left( \frac{1}{\sqrt{1 + p_s^2 + q_s^2}} \right)^k}{\left( \frac{1 - pp_s - qq_s}{\sqrt{(1 + p^2 + q^2)(1 + p_s^2 + q_s^2)}} \right)^k \left( \frac{1}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}} \right)^{k-1}} \quad (3)$$

Onde, p é a pendente de cada ponto (x,y) no sentido x (Leste-Oeste, ou L-O); q é a pendente de cada ponto (x,y) no sentido y (Norte-Sul, ou N-S); ps é a componente x (L-O) do vetor solar; qs é a componente y (N-S) do vetor solar;

O vetor solar é descrito neste trabalho por duas componentes relacionadas geometricamente aos valores de azimute ( $\phi$ ) e zênite ( $Z = 90 - \text{elevação}$ ) solar. Dessa forma as equações (4) e (5) são utilizadas para descrever a posição relativa do sol, ou o vetor solar.

$$ps = -\cos(\phi) \cdot \tan(Z) \quad (4)$$

$$qs = -\sin(\phi) \cdot \tan(Z) \quad (5)$$

As pendentes, ou linhas de declividade, p e q são calculadas para cada célula do MDE através do uso de filtros 3x3. Para o cálculo de p é utilizado um filtro 3x3 que inclui os vizinhos adjacentes no eixo x (L-O), **Figura 2a**. A célula central recebe o valor da diferença de cotas entre os vizinhos dividida por 180. Este valor corresponde a seis vezes a resolução espacial do MDE e é considerado ideal para a resolução de 30x30m (González et al., 2001). O mesmo cálculo é realizado no sentido y (N-S) para a obtenção de q, **Figura 2b**.

-1/180	0	1/180
-1/180	0	1/180
-1/180	0	1/180

a

1/180	1/180	1/180
0	0	0
-1/180	-1/180	-1/180

b

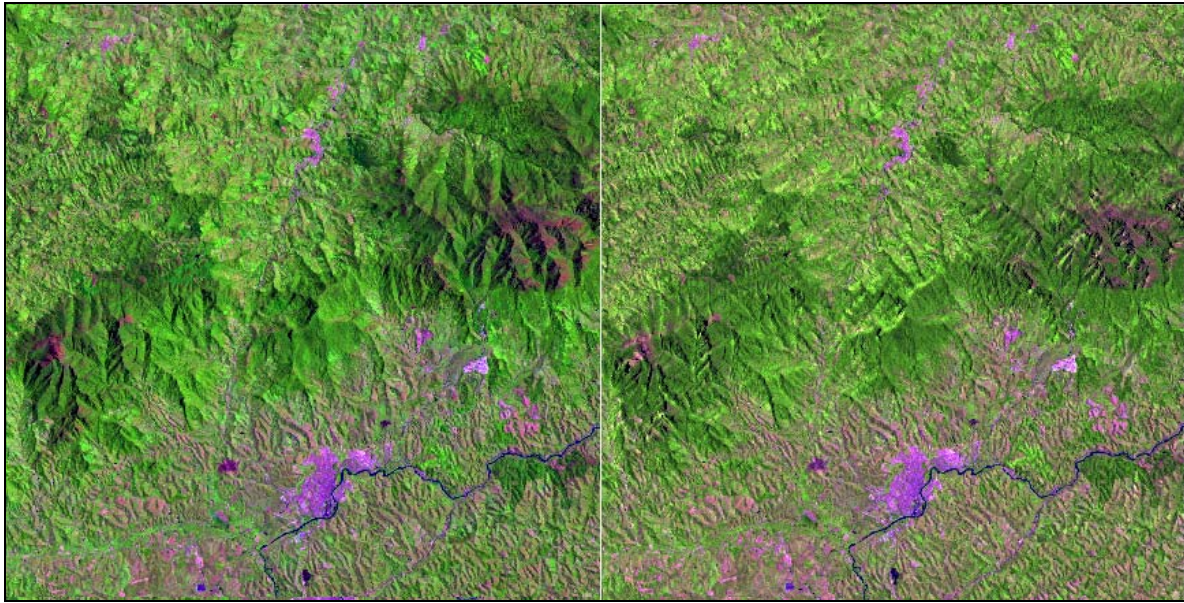
**Figura 2** - Filtros para obtenção das pendentes direcionais Leste-Oeste a; e Norte-Sul b.

As matrizes, ou grades, resultantes entram na equação (3) para obtenção de matriz  $\rho_h$ . Valores negativos indicam superfícies em sombra e neste caso  $\rho_h = 0$ . Desta forma, por uma relação simples, mostra na equação (6),  $\rho_h$  é empregada para calcular os níveis digitais para um terreno plano ( $ND_t$ ) a partir daqueles já com correção atmosférica ( $ND_i$ ).

$$ND_t = ND_i \times \rho_h \quad (6)$$

## 6. Resultados

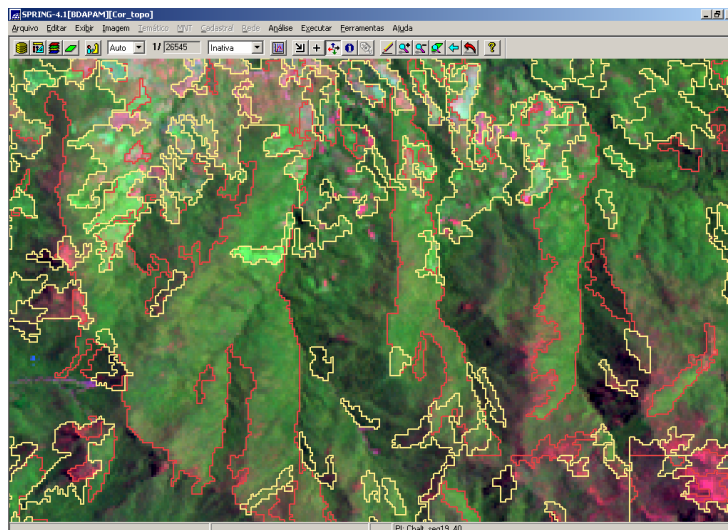
Os resultados mostraram a atenuação do efeito de orientação do relevo sobre a imagem. As feições de montanhas são eliminadas e somente as áreas de sombra permanecem escuras. Nos topos de morro, onde a vegetação é mais baixa, os níveis digitais são naturalmente mais acentuados. O mesmo ocorre em áreas muito inclinadas, porém nestes casos os cálculos das pendentes do terreno e solar devem ser tratados de forma diferenciada. **A Figura 3** mostra um trecho da imagem antes e após a correção topográfica da imagem Landsat 7 ETM+. Para localização a “Garganta do Embaú” e “Garganta do Registro” fica ao centro entre o maciço da Serra Fina (até quase 2.800m de altitude), a oeste, e os picos do Marins e Itaguaré (acima de 2200m), a leste, ao sul a área urbana de Cruzeiro, SP (550m altitude) e atravessando a serra o a região de Passa Quatro, MG (altitude 930m).



**Figura 3** - Comparação (na composição RGB:543) entre a imagens antes (esquerda) e após a correção topográfica (direita) mostra feições de montanhas minimizadas.

### 6.1. Classificação de imagens

Quanto ao aprimoramento no processo de classificação de imagens faz-se notar que a redução do efeito topográfico torna mais homogêneas áreas que em uma imagem sem correções seriam distintamente classificadas. Em um caso mais particular observou-se melhora na classificação de áreas que conflitavam entre áreas agrícolas ou pastoris e campos de altitude pelo grau de iluminação. A **Figura 4** mostra o resultado de um processo de segmentação de imagens pelo método de crescimento de regiões e utilizando os mesmos parâmetros de similaridade igual a 19 e Área (pixels) igual a 40.

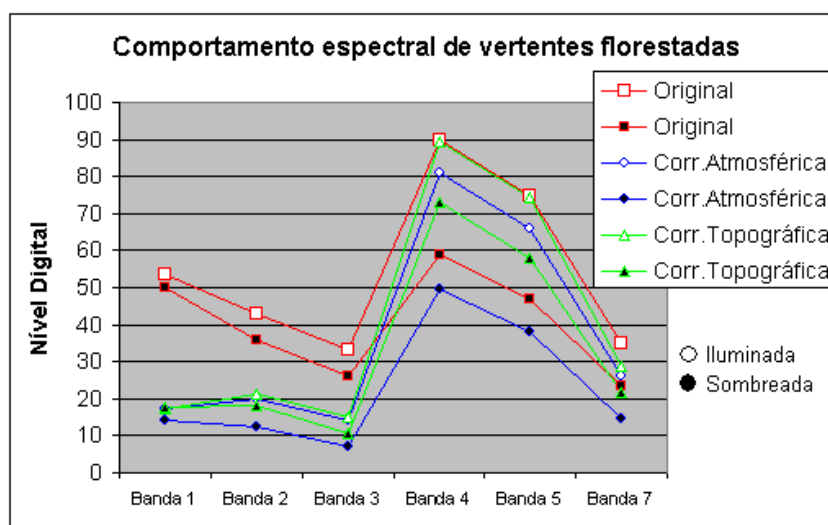


**Figura 4** - Resultado da segmentação da imagem sem correção (vermelho) e após correção (amarelo) com imagem sem correção topográfica de fundo na composição RGB742.



## 6.2. Comparações radiométricas

Do ponto de vista radiométrico, observou-se redução das diferenças entre faces iluminadas voltadas para o sol e áreas de penumbra no lado oposto ao o sol. A Figura 5 apresenta uma análise de amostras de encostas florestadas no entorno do Parque Nacional do Itatiaia, RJ antes e após a correção atmosférica e topográfica. Comportamento similar pode ser encontrado em diferentes altitudes nessa imagem. Quanto à correção atmosférica é possível notar sua efetividade, tendo em vista que o resultado se mostra coerente com o comportamento espectral esperado da vegetação. Pouca atenuação é observada em relação à correção topográfica, tendo incrementos maiores nas bandas 4 e 5.



**Figura 5** – Áreas florestadas em áreas de sombra (símbolo preenchido) e iluminadas (vazio).

## 7. Conclusões

Correções radiométricas se fazem necessárias para aplicações, como de classificação de imagens de satélite, em terrenos irregulares. Tal correção é possível e de forma simples com a aplicação de filtros e o uso do conjugado de imagem de satélite e modelo digital de elevação. Trata-se de uma aplicação possível de ser realizada em sensores de média resolução como o CBERS-2 e Landsat ETM+. A correção atmosférica se mostrou eficiente na oportunidade de correção por faixas altimétricas utilizando o método do pixel escuro. Devido à ampla variabilidade de altitude e declividade em um ambiente montanhoso foi possível explorar, também com uso de um método empírico, os efeitos de correção sobre a imagem nas mais diferentes circunstâncias do terreno. Entretanto a qualidade da aplicação ainda dependerá de outros fatores como georreferenciamento entre imagem e MDE e a resolução de ambos (30m), sensível em casos como cristas e fundos de vales e declividade maior que 45 graus. Tais observações incluem reflexos na classificação posterior. Ressalta-se também que a correção dos níveis digitais ocorre de maneira controlada e no caso de obtenção de parâmetros físicos a partir destes deve-se considerar tal transformação.

## Referências

- Ab'Sáber, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003. 159 p.
- Chavez, P. S., Jr. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 24, p. 459-479, 1988.
- Colby, J.D.; Topographic normalization in rugged terrain. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 57, n. 5, p. 531-537, 1991.
- Felicíssimo, A. M.; Garcia-Manteca, P. Corrección del efecto topográfico en las imagenes Landsat mediante el uso de un modelo digital de elevaciones. In: Reunión Científica del Grupo de Trabajo en Teledetección, 3., 1989, España. **Anais...** Madrid: Asociación Española de Teledetección, 1989. p. 209-216.
- González, C. R. ; Moreno, A. M.; Manteca, P. G.; Moradas, R. G.; Garcia, E. S. Un método sencillo para la corrección topográfica de imagenes de satélite. Aplicación a imágenes Landsat-TM de los concejos de Mieres y San Martín del Rey Aurelio (Asturias) para obtener mapas de vegetación. **Mapping Interactivo**, España, 2001. Disponível em <www.mappinginteractivo.com>. Acesso em 27 jan 2003.
- Holben, B.; Justice, C. An examination of spectral band ratioing to reduce the topographic effect on remotely sensed data. **Int.ernational Journal of Remote Sensing**, v.2, n.2, p. 115-133, Feb. 1981.
- Itten, K. I.; Meyer, P. Geometric and radiometric correction of TM data of mountainous forested areas. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 31, n. 4, p. 764-770, 1993.
- Minnaert, The reciprocity principle on lunar photometry. **Astrophysical Journal**, v. 93, p.403-410, 1941.
- Riaño, D., Chuvieco, E., Salas, J. and Aguado, I. Assessment of Different Topographic Corrections in Landsat-TM Data for Mapping Vegetation Types. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 5, may 2003
- Richter, R.; Correction of atmospheric and topographic effects for high spatial resolution satellite imagery. **Int.ernational Journal of Remote Sensing**, v. 18, n. 5, p. 1099-1111, 1997.
- Schowengerdt, R.A. **Remote sensing, models and methods for image processing**. 2<sup>nd</sup> ed. London: Academic Press, 1997. 522 p.
- Silva, B. S. G. **Seleção de parcelas permanentes em ecossistemas montanhosos**. 2004. 164 p. (No prelo). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2003.
- Sjoberg, R. W. and Horn, B. K. P. Atmospheric effects in satellite imaging of mountainous terrain. **Applied Optics**, v. 22, p. 1702-1716, 1983.
- Valeriano, M. M. **Modelos digitais de elevação de microbacias elaborados com krigagem** . São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2002. 54 p. (INPE-9364-RPQ/736).