

Estudos Quantitativos e Calibração Radiométrica de Dados Digitais do Landsat-5

SHERRY CHOU CHEN¹
RENATO HERZ²

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Caixa Postal 515, 12201, São José dos Campos, SP, Brasil, sherry@ltd.inpe.br

²Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, Pça. Oceanográfica 191, 05508-900, São Paulo

Abstract. The radiometric conversion of satellite data is one of the important pre-processing procedures for quantitative analyses of multitemporal or multiscene imageries. However, Landsat-5 has been in operation for more than one decade and the sensor's radiometric performance has to be monitored in order to transform digital numbers into reliable radiances. A literature review of several radiometric studies with field measurements confirms the degradation of TM visible bands, especially in band 1. Due to the sensor's degradation, the updated calibration coefficients should be used in radiometric conversion to transform digital numbers into reliable biophysical values.

Keywords: Análise quantitativa, calibração radiométrica, TM-Landsat.

1 - Introdução

Devido à longa experiência acumulada pela comunidade científica na área de fotointerpretação, a maioria dos estudos realizados em decorrência do lançamento do satélite Landsat foi orientada para a análise qualitativa de imagens orbitais (Price, 1987a). Entretanto, com o avanço da tecnologia em computação nas últimas décadas, a análise numérica mostrou-se mais eficaz nos estudos quantitativos de dados digitais de satélites.

As informações contidas nos dados digitais de satélites da série Landsat são representadas pelos números digitais por conveniência. Todavia, estes números digitais não representam quantitativamente as unidades físicas (i. e., radiância, reflectância ou temperatura) dos alvos na superfície terrestre mas podem ser utilizados diretamente em algumas aplicações que se baseiam nas diferenças consistentes internas de uma cena, tais como identificação, mapeamento ou classificação. Entretanto, é indispensável a conversão destes números para valores físicos quando se trata de classificações espectrais, razão de bandas ou associação de informações de satélites com as propriedades biofísicas de alvos (p. ex., biomassa, concentração de clorofila etc.) utilizando dados obtidos com datas ou locais diferentes (Robinove, 1982; Barker et al., 1984a; Price, 1987b; Chavez, 1989), pois, na quantificação destes dados, as diferenças de condições atmosféricas, de iluminação e/ou de desempenho dos sensores precisam ser levadas em consideração. Moran et al. (1992) enfatizam ainda que, para explorar a potencialidade máxima de dados de sensoriamento remoto, os números digitais têm de ser convertidos em reflectâncias que são quantidades físicas independentes de condições atmosféricas.

A conversão de números digitais para reflectâncias de campo envolve três etapas (Figura 1): (1) calibração radiométrica; (2) conversão para reflectância exoatmosférica; e (3) correção atmosférica. Tanto a calibração radiométrica como a correção atmosférica são tarefas bastante complexas. A maioria dos trabalhos encontrados na literatura sobre estes dois temas foi

realizada com o objetivo de aperfeiçoar os procedimentos destas correções a fim de transformar números digitais em valores físicos mais confiáveis.

Na recuperação do fator de reflectância a partir de dados de satélites, todas as modificações radiométricas destes dados, causadas pelas variáveis além do próprio alvo, devem ser corrigidas. Teillet (1986) dividiu as variáveis que modificam a radiância de dados em dois grupos: as relacionadas com o sensor, tais como os diferentes desempenhos radiométricos entre as bandas ou detectores, e as relacionadas com a cena imageada, tais como os efeitos atmosféricos e/ou as geometrias de irradiação solar e de visada.

Para os usuários que se interessam por comparações quantitativas radiométricas de dados Landsat, obtidas em datas ou locais diferentes, cabe uma questão inevitável que precisa ser respondida antes da iniciação dos estudos: quais são as confiabilidades das quantidades convertidas (radiâncias, reflectâncias ou temperatura), já que, desde o lançamento do Landsat-5 em março de 1984 até o presente momento, o sensor TM está em funcionamento contínuo, num período de operação muito além da sua vida útil prevista? Para responder a esta pergunta, são fundamentais os estudos de monitoramento de desempenho radiométrico do TM.

Com a intenção de verificar o desempenho radiométrico do TM e conhecer a qualidade radiométrica dos dados digitais, as medidas (de radiâncias, por exemplo) em um campo de referência devem ser coletadas. Como não se dispõe de estudos de calibração em órbita com as medidas obtidas de campo no Brasil, os coeficientes de calibração "atualizados" da literatura foram usados como indicadores do desempenho radiométrico do TM Landsat-5 aos usuários.

2 - Calibração radiométrica

A radiância total refletida por um alvo da superfície terrestre, após atravessar e interagir com a atmosfera, é

detectada pelo sensor TM, cuja resposta (sinal de saída) é transmitida à **estação de recepção terrestre**, onde é convertida em número digital (isto é, número digital original-*ND*) e arquivado em HDDTs (“High Density Digital Tapes”), sem nenhum pré-processamento. Posteriormente, estas HDDTs são enviadas para **estações de processamento de imagens**, onde a calibração radiométrica de dados é realizada, transformando os *NDs* em números digitais **calibrados** (*NDs*) e gravados em fitas magnéticas que estarão disponíveis aos usuários.

A relação entre as radiâncias incidentes ao sensor e suas respostas é denominada de calibração radiométrica absoluta do sensor (Asrar, 1989, p. 2). Slater (1985) classificou os procedimentos mais usados na calibração radiométrica absoluta dos sistemas de sensoriamento remoto em três categorias: (1) calibração de pré-lançamento - método utilizado, por exemplo, pelo DGI-INPE (Departamento de Geração de Imagens - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) ou Estação de Fucino na Itália; (2) calibração em órbita usando uma fonte de calibração a bordo de satélites (p. ex., o calibrador interno do Landsat-5) - método utilizado pela EOSAT (Earth Observation Satellite) dos EUA; e (3) calibração em órbita com as medidas coletadas em um campo de referência na superfície terrestre (p. ex., em White Sands).

2.1 - Calibração de pré-lançamento

Os *NDs* podem ser calibrados utilizando os coeficientes de pré-lançamento, cuja conversão envolve as seguintes etapas (Singh, 1985a):

1^a) *Calibração radiométrica* - Os sinais de saída dos detectores são voltagens quantificadas, representadas por *NDs*. Os valores de *NDs* podem ser convertidos em radiâncias (Rad) utilizando a seguinte equação:

$$ND = ga \times Rad + off \dots \dots \dots (1)$$

onde *ND* é o número digital original não calibrado; Rad, a radiância ($mWcm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$) recebida pelos detectores; *ga* e *off*, ganho e “offset” cujas unidades são $ND/mWcm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ e *ND*, respectivamente.

Antes do lançamento do satélite, os valores de ganho e “offset” de cada detector foram determinados em laboratório sob ambientes normais. Ou seja, os coeficientes foram definidos por análises de regressão entre os 20 níveis de radiâncias produzidos por diferentes combinações das 12 lâmpadas da Esfera Integradora¹ (EI) e seus sinais de saída correspondentes. As médias dos ganhos e “offsets” dos 16 detectores foram usadas para representar “*Ga*” e “*Off*” de cada banda espectral. Os “*Ga*” e “*Off*” do pré-lançamento do Landsat-5 são apresentados na Tabela 1.

2^a) *Reescalonamento radiométrico* - as amplitudes das radiâncias estimadas de todas as bandas espectrais são normalizadas num intervalo comum de 0~255, isto é:

$$ND = ga \times Rad + off \dots \dots \dots (2)$$

O *ND* representa a radiância quantizada (i. e., número digital calibrado). A normalização é realizada para que *ND*=0 corresponda à radiância mínima (*Lmin*), enquanto *ND*=255 corresponda à radiância máxima (*Lmax*) da banda calibrada. Dados estes limites, os valores de “*ga*” e “*off*” são calculados pelas seguintes equações:

$$ga = 255 / (Lmax - Lmin) \dots \dots \dots (3) \text{ e}$$

$$off = - ga \times Lmin \dots \dots \dots (4)$$

Os *Lmax* e *Lmin* usados pelo DGI-INPE para reescalonar os *NDs* calibrados do Landsat-5 são apresentados na Tabela 2. Todas as imagens processadas por uma estação específica usam os mesmos valores para reescalonar os *NDs* calibrados em radiâncias.

Existe ainda outra forma equivalente e freqüentemente encontrada na literatura para expressar a Equação (2), cujos coeficientes são denominados interseção (β) e declividade (α) (vide, Price, 1987b) e calculados através de sua equação linear inversa (Barker et al., 1984b, p. 136). Isto é:

$$Rad = \alpha ND + \beta \dots \dots \dots (5)$$

onde $\alpha = (Lmax - Lmin) / 255$, e $\beta = Lmin$. Os coeficientes α e β também são conhecidos como a_1 e a_0 , (vide, Hill e Sturm, 1991) e suas unidades são $mWcm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}/ND$ e $mWcm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$, respectivamente.

Entretanto, na fase de lançamento do satélite, as vibrações podem modificar o desempenho dos componentes óticos e eletrônicos. Além disso, uma vez lançado no espaço, a superfície ótica do sensor está sujeita à contaminação por gases evaporados do combustível do satélite (Slater, 1985). Também há a possibilidade de modificações nas propriedades materiais pela radiância solar ultravioleta (Price, 1987b). Todavia, as condições operacionais em órbita são difíceis de serem simuladas em laboratório. Por exemplo, em órbita, a influência do espalhamento atmosférico na radiância recebida pelo sensor é muito maior do que em testes de laboratório (Slater, 1988b). De fato, mudanças na radiometria após o lançamento do Landsat-5 foram constatadas, especialmente na banda 3, em que foi registrada uma diferença de 20% entre os valores dos ganhos dos detectores de números pares e ímpares (Singh, 1985b).

Convém salientar que na literatura, todos os parâmetros citados (*ga/off*, ga/off , $Lmax/Lmin$, α/β e a_1/a_0) são conhecidos como coeficientes de calibração; entretanto, cada conjunto de coeficientes tem uma função específica na calibração radiométrica de dados

¹Uma fonte de referência para calibrar o sensor TM.

digitais. O uso indiscriminado do termo “coeficientes de calibração” causa muitas confusões, pois ora representa os coeficientes de calibração de sensor (ga/off), ora, fatores de reescalonamento (ga/off , L_{max}/L_{min} , α/β e a_1/a_0).

2.2 - Calibração em órbita com o calibrador interno (CI) a bordo do Landsat-5

Para melhorar a exatidão radiométrica é importante a recalibração freqüente do sistema TM, através de um calibrador interno (CI) a bordo de satélite. Esta correção pós-lançamento é realizada nas seguintes etapas (Barker et al., 1984a; Singh, 1985b):

- (1) Antes do lançamento, as três lâmpadas do CI são calibradas, analisando as radiâncias registradas por cada detector e suas respostas correspondentes. Neste caso, para calibrar as radiâncias das lâmpadas do CI em radiâncias absolutas fornecidas pela EI, a EI é usada como a fonte da referência e os detectores do TM, como um instrumento de transferência.
- (2) Nesta etapa, uma das principais tarefas realizadas na estação de processamento de imagens é a de calcular os ganhos e “offsets” de cada banda espectral através de análises de regressão entre as radiâncias das lâmpadas do CI (variável independente) e os sinais de saída (ND), registrados pelos detectores (variável dependente). Uma hipótese usada na calibração em órbita, através do CI, é que as modificações radiométricas são causadas pelas mudanças dos detectores, enquanto o sistema CI se mantém constante.

Uma das limitações deste procedimento de calibração é a incerteza sobre a irradiância solar exoatmosférica. Isto porque o feixe de calibração das lâmpadas passa por uma pequena abertura do CI que dificilmente simula o sistema TM, cuja abertura de entrada é totalmente irradiada em seu modo operacional. Outra desvantagem é este método não detectar as possíveis modificações na transmitância do sistema de formação de imagens que poderão ocorrer após o lançamento (Slater, 1984, 1985). Há indícios de que as modificações radiométricas de pós-lançamento não podem ser atribuídas totalmente às mudanças dos detectores (Slater, 1984).

2.3 - Calibração em órbita com as medidas coletadas na superfície terrestre

A terceira categoria é uma calibração absoluta em órbita com o uso de uma área de referência na superfície terrestre. As medidas de reflectância e dados atmosféricos de campo foram coletados simultaneamente com as passagens do satélite. Estas medidas de campo foram empregadas para estimar as radiâncias do TM através de um modelo de transferência radiativa e comparadas, posteriormente, com as radiâncias obtidas de sensores. Esta calibração é um procedimento mais eficiente (Slater et al., 1987, Moran et al., 1992). Porém, “a logística destes experimentos é difícil e dispendiosa, além de existir

poucas áreas adequadas a serem usadas como campo de referência” (Price, 1987b).

Para eliminar as incertezas envolvidas no processo da correção atmosférica, Kieffer e Wildey (1985) sugeriram o uso da Lua para calibrar o TM. Entretanto, mesmo com a mudança do alvo, a calibração trará ainda outras desvantagens, tais como: a incerteza sobre a exatidão radiométrica da radiância lunar na região espectral de 0,4~2,5 μ m, e a necessidade da mudança de altitude de satélites etc., que dificultarão a sua operacionalização (Slater, 1988b).

No futuro satélite a ser lançado em órbita, o Landsat-7, com a intenção de melhorar o desempenho radiométrico absoluto do sensor ETM+ (“Enhanced Thematic Mapper Plus”), dois calibradores solares serão usados, além de um calibrador interno. Com o uso conjunto de um calibrador solar de abertura total e outro de abertura parcial, do calibrador interno e de calibrações periódicas de campo, a precisão radiométrica de 10%, estipulada para TM dos Landsat 4/5, pode ser melhorada para 5% (Thome et al., 1994).

3 - Correção radiométrica de dados digitais processados pelo DGI-INPE

Os produtos digitais do DGI-INPE são processados com a correção radiométrica usando os coeficientes de pré-lançamento. Estes coeficientes são utilizados para calibrar as respostas não-nominais (NDs) dos detectores, de modo que os NDs calibrados obedecem à relação linear definida pelos valores de L_{max} e L_{min} da Tabela 2 (Serra, 1995). Convém frisar que, para estudos radiométricos, produtos digitais que tenham sofrido alguns pré-processamentos usando o algoritmo de interpolação (reamostragens através da interpolação bilinear ou convolução cúbica na correção geométrica) não são indicados, pois os valores radiométricos de NDs foram modificados (Mather, 1987, p.138). Com esta restrição, o produto digital processado com o nível 6 pelo DGI-INPE é o único não adequado para esta finalidade.

4 - Degradação radiométrica do TM Landsat-5 e coeficientes de calibração atualizados

Após conhecer os procedimentos da correção radiométrica do DGI-INPE, é necessário saber até que ponto o desempenho radiométrico do TM vem sendo degradado desde o seu lançamento. Esta pergunta somente pode ser respondida por experimentos de campo. Na literatura, além dos trabalhos do grupo de Slater, no Arizona, há poucos estudos cujos dados podem ser usados como indicadores da qualidade radiométrica dos dados do Landsat-5.

Slater et al. (1986) comparou diferentes abordagens de correção radiométrica com os dados coletados em cinco datas diferentes, durante um período de 16 meses (julho de 1984 a novembro de 1985) em White Sands no estado de New Mexico, EUA. Tomando como referência as radiâncias estimadas de um modelo de transferência radiativa, a calibração de pré-lançamento apresentou maiores desvios que a calibração que usa o CI nas bandas do visível (Tabela

3). Observa-se também que a sensibilidade do TM diminuiu após seu lançamento, e a aproximação das radiâncias estimadas através do CI com as de campo.

Os resultados do monitoramento do desempenho radiométrico do TM Landsat-5, entre 1984~1993, foram documentados por Thome et al. (1994). A Tabela 4 mostra que, logo após o lançamento, uma queda acentuada na sensibilidade do sensor foi observada. Após esta mudança inicial, o desempenho do sensor manteve-se relativamente estável num período durante o qual as mudanças observadas foram compatíveis com o erro total esperado do método. Entretanto, reduções significativas, com diferenças maiores do que 10% foram observadas em bandas visíveis a partir do final de 1985. As diferenças significativas dos valores de ganho, em comparação com os de pré-lançamento, encontradas após esta data crítica, variaram de 12,09~17,62%, 10,70~17,12%, e 10,06~13,41%, para as bandas 1, 2 e 3 do TM, respectivamente. Os valores de “offset” de todos os experimentos assumiram o valor 0, não sendo, consequentemente, apresentados. Isto porque, devido às altas reflectâncias de areia em White Sands, o uso de “offset” com valores que variaram de 0 a 5 NDs não afetou a exatidão de radiância derivada (Thome, 1995). É importante observar que os ganhos da Tabela 4 foram obtidos, analisando os dados digitais originais (i. e., NDs) do TM Landsat-5.

Hill e Sturm (1991) utilizaram os coeficientes de calibração atualizados de Slater et al. (1986) na correção radiométrica de dados TM multitemporais para monitorar e classificar áreas agrícolas (Tabela 5). Observa-se que os valores de a_0/a_1 atualizados modificaram substancialmente em relação aos de pré-lançamento.

Outro trabalho, Guyot e Gu (1994) estudaram os efeitos da correção radiométrica no IVDN (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada) calculado com os dados de HRV-SPOT e TM-Landsat. Os coeficientes de calibração radiométrica usados neste estudo foram determinados por dados coletados em dois campos de referência diferentes: um no “Maricopa Agricultural Center” no estado de Arizona, EUA, no dia 12/08/89, e outro em “La Crau”, na França, coletados em 30/09/89 (Tabela 6). As similaridades dos coeficientes atualizados dos dois campos de referência diferentes nos dois continentes demonstraram a consistência do método de calibração radiométrica absoluta com informações de campo.

Face à atual degradação radiométrica do sensor TM que pode alcançar $\cong 20\%$ em relação à calibração de pré-lançamento (Moran et al., 1995), os coeficientes de calibração atualizados devem ser usados para obter radiâncias mais precisas para análises quantitativas de dados de satélites. Para os usuários que desejam utilizar os coeficientes de calibração atualizados, a proximidade das datas da passagem de satélite com a do experimento de campo devem ser verificadas. Na aplicação de coeficientes da Tabela 4 os NDs obtidos a partir dos dados digitais processados pelo DGI-INPE precisam ser transformados em NDs. A transformação de NDs em NDs é realizada invertendo o processo da calibração

radiométrica do DGI-INPE, utilizando as seguintes equações:

Baseado na Equação (1)

$Rad = (ND - off) / ga$ e substituindo-a na Equação (2), tem-se

$$ND = ND \times G + O \dots\dots\dots(6)$$

onde $G = ga / ga$, e $O = off - (ga / ga) \times off$.

Os “ga” e “off” são os valores apresentados na Tabela 1, enquanto “ga” e “off” podem ser calculados utilizando as Equações (3), (4) e os valores de reescalonamento (L_{max} e L_{min}) da Tabela 2. Após transformar os NDs em NDs, os ganhos atualizados são usados na Equação (1) para calcular suas radiâncias. Observa-se que, segundo Thome et al. (1994), os valores de “offset” assumem o valor nulo nesta equação.

Convém ressaltar a limitação da calibração radiométrica absoluta de sensores usando as medidas coletadas em campo como White Sands cuja alta reflectância ($\cong 0,50$) impede detectar, com exatidão, as modificações de “offsets”. Um campo de referência ideal para monitorar tanto as sensibilidades de “offset” como as de ganho do sensor TM fica em Salar de Uyuni, na Bolívia, cujas áreas extensas e uniformes de alta e de baixa reflectância (uma salina e uma lagoa, respectivamente) são disponíveis para calibrar o sensor (Price, 1987a).

5 - Conclusões e recomendações

Os usuários interessados em análises quantitativas, usando dados radiométricos do Landsat-5, devem ficar atentos para o problema da degradação radiométrica do TM, pois diferentes graus de deterioração radiométrica das bandas espectrais do sensor foram constatadas até o presente momento. O uso dos fatores de reescalonamento arquivados nos produtos digitais para conversão radiométrica, sem levar em consideração esta degradação, pode comprometer os dados analisados que invalidarão suas conclusões.

O Centro de Ciências Óticas da Universidade do Arizona é o único lugar onde a coleta de dados de campo (em White Sands) é realizada periodicamente, visando a calibração radiométrica absoluta e o monitoramento de sensores de vários satélites, principalmente o TM do Landsat-5. Na comparação de resultados obtidos em 15/08/1992 e 21/10/1993, com as medidas obtidas no período 1984-85 e 1988, constatou-se a degradação do TM nas bandas do visível. A degradação é mais grave em comprimentos de onda mais curtos, especialmente na banda 1. Os resultados indicam que, devido à degradação radiométrica do TM, os coeficientes de calibração atualizados devem ser utilizados na conversão radiométrica, especialmente para os dados do satélite cujas datas de aquisição foram bastante defasadas. Se a atualização dos coeficientes de calibração não for considerada, desvios significativos poderão ser obtidos nas bandas do visível em relação às medidas de campo.

Resumindo as conclusões:

- O monitoramento sistemático da calibração radiométrica absoluta de sensores durante sua vida útil permite comparações de dados orbitais coletados com datas de passagem ou sensores diferentes. A documentação histórica das mudanças nas respostas radiométricas de sensor é essencial para garantir o sucesso do uso de dados orbitais nos estudos de longo prazo de monitoramento da Terra.
- O uso dos fatores de reescalonamento arquivados nos produtos digitais do Landsat-5 não é mais recomendado para conversão radiométrica dos estudos de aplicação, onde a quantificação radiométrica confiável é desejada. O contínuo uso dos fatores de reescalonamento arquivados nos produtos para efetuar a conversão radiométrica, sem levar em consideração a degradação radiométrica do TM, podem causar grandes desvios (>10%) na exatidão radiométrica da banda 1, para os dados adquiridos a partir de 16/11/85, e da banda 2 ou 3 a partir de 27/03/87.
- Os coeficientes “atualizados” de calibração encontrados na literatura não devem ser usados indiscriminadamente para a conversão radiométrica de dados digitais processadas no Brasil, pois, para processar as imagens, os métodos de correção radiométrica usados em cada estação são diferentes.
- Os ganhos atualizados da Tabela 4 podem ser usados para obter informações radiométricas mais confiáveis a partir de CCTs do Landsat-5. Entretanto, os NDs devem ser transformados em NDs antes da conversão, através da aplicação da Equação (6).

6 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às valiosas sugestões do Eng^o Paulo R. Serra, Dra. Evelyn M.L.M. Novo, e Dr. José C.N. Epiphanyo.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Asrar, G., *Theory and applications of optical remote sensing*, John Wiley & Sons, N.Y., 1989.

Barker, J.L.; Abrams, R.B.; Ball, D.L.; Leung, K.C., Radiometric calibration and processing procedure for reflective bands on Landsat-4 protoflight Thematic Mapper, *NASA Technical Report N84-31731*, p. 40, 1984a.

Barker, J.L.; Ball, D.L.; Leung, K.C.; Walker, J.A., Pre-launch absolute radiometric calibration of Landsat-4 protoflight Thematic Mapper, *NASA Technical Report N84-31752*, p. 10, 1984b.

Caselles, V.; Lopéz García, M.J., An alternative simple approach to estimate atmospheric correction in multitemporal studies, *Int. J. Remote Sens.*, 10(6):1127-1134, 1989.

Chavez, P.C. Jr., Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral image, *Photogramm. Eng. & Remote Sens.*, 55(9):1285-1294, 1989.

Guyot, G.; Gu, X., Effect of radiometric correction on NDVI-determined from SPOT-HRV and Landsat-TM data, *Remote Sens. Environ.*, 49:169-180, 1994.

Hill, J.; Sturm, B., Radiometric correction of multitemporal Thematic Mapper data for use in agricultural land-cover classification and vegetation

monitoring, *Int. J. Remote Sens.*, 12(7):1471-1491, 1991.

Kieffer, H.H.; Wildey, R.L., Absolute calibration of Landsat instrument using the Moon, *Photogramm. Eng. & Remote Sens.*, 5(9):1391-1393, 1985.

Mather, P.M., *Computer processing of remotely-sensed images*, John Wiley & Sons, 1987.

Moran, M.S.; Jackson, R.D.; Slater, P.N.; Teillet, P.M., Evaluation of simplified procedure for retrieval of land surface reflectance factor from satellite sensor output, *Remote Sens. Environ.*, 41:169-184, 1992.

Moran, M.S.; Jackson, R.D.; Clarke, T.R.; Qi, J.; Cabot, F.; Thome, K.J.; Markham, B.L., Reflectance factor retrieval from Landsat TM and SPOT HRV data for bright and dark targets, *Remote Sens. Environ.*, 52:218-230, 1995.

Price, J.C., Radiometric calibration of satellite sensors in the visible and near infrared: history and outlook, *Remote Sens. Environ.*, 22:3-9, 1987a.

Price, J.C., Calibration of satellite radiometric and the comparison of vegetation indices, *Remote Sens. Environ.* 21:15-27, 1987b.

Robinove, C.J., Computation with physical values from Landsat digital data, *Photogramm. Eng. & Remote Sens.*, 48(5):781-784, 1982.

Serra, P.R.M., *Comunicação Pessoal*, 1995.

Singh, A., Thematic Mapper radiometric correction research and development results and performance, *Photogramm. Eng. & Remote Sens.*, 51(9):1379-1383, 1985a.

Singh, A., Postlaunch correction for Thematic Mapper 5 (TM-5) radiometry in the Thematic Mapper image processing systems (TIPS), *Photogramm. Eng. & Remote Sens.*, 51(9):1385-1390, 1985b.

Slater, P.N., The importance and attainment of accurate absolute radiometric calibration, *SPIE*, 475:34-40, 1984.

Slater, P.N., Radiometric consideration in remote sensing, *Proc. IEEE*, 73(6):997-1011, 1985.

Slater, P.N., Radiometric calibration requirements and atmospheric correction, *Proc. SPIE*, 924:144-150, 1988a.

Slater, P.N., Review of the calibration of radiometric measurements from satellite to ground level, *Proc. ISPRS 16th Congress* (“invited paper”), 1988b.

Slater, P.N.; Biggar, S.F.; Hole, R.G.; Jackson, R.D.; Mao, Y.; Moran, M.S.; Palmer, J.M.; Yuan, B., Absolute radiometric calibration of the Thematic Mapper, *SPIE*, 660:2-9, 1986.

Slater, P.N.; Biggar, S.F.; Holm, R.G.; Jackson, R.D.; Mao, Y.; Moran, M.S.; Oalmer, J.M.; Yuan, B., Reflectance and radiance-based methods for the in-flight absolute calibration of multispectral sensors, *Remote Sens. Environ.*, 22(1):11-37, 1987.

Teillet, P.M., Image correction for radiometric effects in remote sensing, *Int. J. Remote Sens.*, 7(12):1637-1651, 1986.

Thome, K.G.; Biggar, S.F.; Gellman, D.I.; Slater, P.N., Absolute-radiometric calibration of Landsat-5 Thematic Mapper and the proposed calibration of the advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer, *Proc. IGARSS*, p. 2973-2975, 1994.

Thome, K.G., *Comunicação Pessoal*, 1995

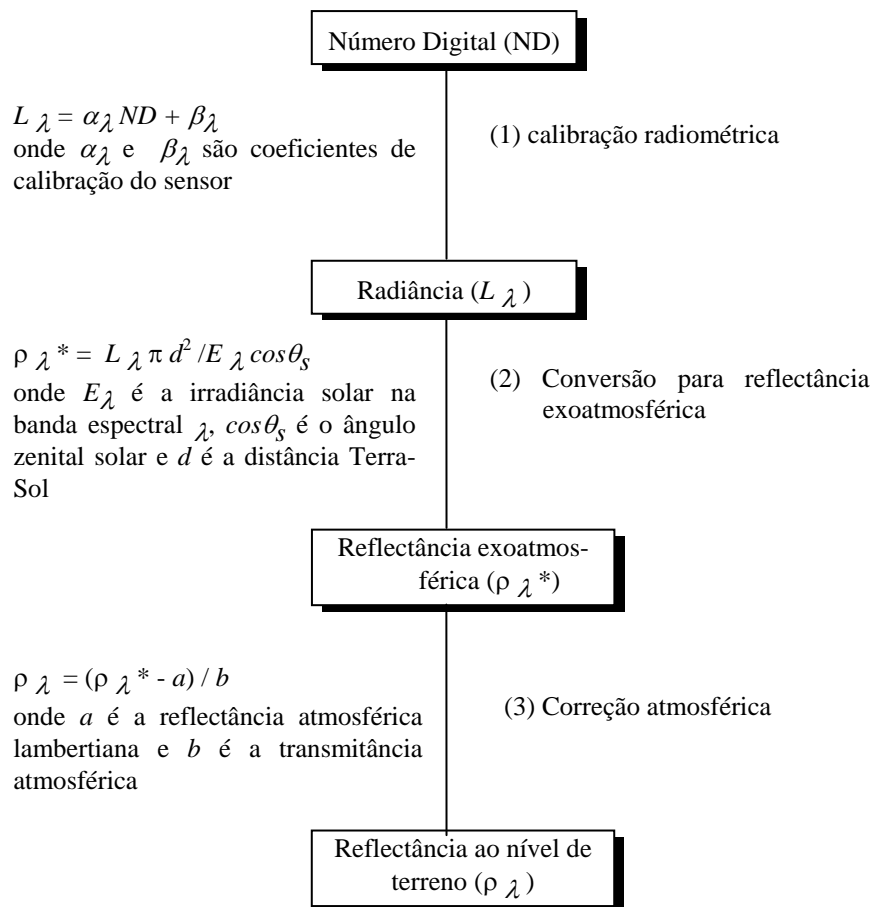


Figura 1 - Conversão de números digitais para reflectância ao nível de terreno.

(Fonte: adaptada de Caselles e López García, 1989)

Tabela 1 - Ganhos e “offsets” do pré-lançamento do TM Landsat

Banda	Ganho (<i>ga</i>)	Offset (<i>off</i>)
1	15,553	1,8331
2	7,860	1,6896
3	10,203	1,8850
4	10,821	2,2373
5	78,751	3,2893
7	147,719	3,2117

Obs: As unidades de *Ga* e *off* são $ND/mWcm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ e ND , respectivamente.

(Fonte: Slater et al., 1986)

Tabela 2 - Valores de reescalamento usados pelo DGI-INPE no processamento do TM-Landsat ($mWcm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$)

Banda	<i>Lmax</i>	<i>Lmin</i>
1	15,21	-0,15
2	29,68	-0,28
3	20,43	-0,12
4	20,62	-0,15
5	2,719	-0,037
7	1,438	-0,015

(Fonte: Serra, 1995)

Tabela 3 - Comparações das radiâncias ($\text{mWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$) obtidas com diferentes processos de calibração radiométrica absoluta do TM Landsat-5

Data	Medidas	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
08-07-84	L_1	sat.	25,959	24,261	15,617	n.d.	n.d.
	L_2	sat.	24,291	22,750	17,276	n.d.	n.d.
	L_3	sat.	26,103	24,036	17,721	n.d.	n.d.
	% (L_1-L_2/L_2)		6,9	6,6	-9,7		
	% (L_1-L_3/L_3)		-0,5	0,9	-11,9		
28-10-84	L_1	15,960	16,121	15,232	10,256	1,096	0,149
	L_2	14,200	14,695	13,574	10,854	1,260	0,157
	L_3	15,511	15,828	14,450	11,252	1,293	0,159
	% (L_1-L_2/L_2)	12,4	9,7	12,2	-5,5	-13,0	-5,0
	% (L_1-L_3/L_3)	2,9	1,9	5,4	-8,9	-15,2	-5,8
24-05-85	L_1	sat.	24,321	23,187	15,607	n.d.	n.d.
	L_2	sat.	23,008	21,277	16,591	n.d.	n.d.
	L_3	sat.	24,823	22,678	17,206	n.d.	n.d.
	% (L_1-L_2/L_2)		5,7	9,0	-5,9		
	% (L_1-L_3/L_3)		-2,0	2,2	-9,3		
28-08-85	L_1	sat.	23,777	22,284	15,302	1,865	0,263
	L_2	sat.	21,477	19,742	15,147	2,003	0,276
	L_3	sat.	23,503	21,642	15,866	2,064	0,278
	% (L_1-L_2/L_2)		10,7	12,9	1,0	-6,9	-4,9
	% (L_1-L_3/L_3)		1,2	3,0	-3,6	-9,6	-5,5
16-11-85	L_1	14,172	14,370	13,543	9,690	1,131	0,133
	L_2	12,454	12,915	12,071	9,855	1,169	0,134
	L_3	13,883	13,970	13,024	10,288	1,195	0,132
	% (L_1-L_2/L_2)	13,8	11,3	12,2	-1,7	-3,3	-0,7
	% (L_1-L_3/L_3)	2,1	2,9	4,0	-5,8	-5,4	0,7
média % (L_1-L_2/L_2)		13,1	8,9	10,6	-4,3	-7,7	-3,5
média % (L_1-L_3/L_3)		2,5	1,7	3,1	7,9	10,1	4,0

L_1 , é a radiância calculada pelo modelo de transferência radiativa usando os dados de campo (em White Sands); L_2 , radiância calculada usando os coeficientes de calibração do pré-lançamento, e L_3 , radiância calculada usando as informações fornecidas do calibrador interno, respectivamente. sat = saturada e n.d. = não disponível.

(Fonte: adaptada de Slater et al., 1986)

Tabela 4 - Os valores de ganho ($ND/mWcm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$) obtidos com as medidas de campo (em White Sands) do TM Landsat-5.

Data	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4
Pré-lanç.	15,55	7,86	10,20	10,82
08/07/84	sa.*	7,339 (-6,63)**	9,552 (-6,35)	10,55 (-2,50)
28/10/84	13,89 (-10,67)	7,318 (-6,90)	9,271 (-9,11)	10,87 (+0,46)
24/05/85	sa.	7,493 (-4,67)	9,416 (-7,69)	10,45 (-3,42)
28/08/85	sa.	7,151 (-9,02)	9,141 (-10,38)	11,21 (+3,60)
16/11/85	13,67 (-12,09)	7,161 (-8,89)	9,224 (-9,57)	10,94 (+1,11)
27/03/87	13,07 (-15,95)	7,019 (-10,70)	8,912 (-12,63)	10,48 (-3,14)
10/02/88	13,04 (-16,14)	7,213 (-8,23)	9,175 (-10,06)	10,59 (-2,13)
15/08/92	sa.	6,514 (-17,12)	8,832 (-13,41)	10,48 (-3,14)
21/10/93	12,81 (-17,62)	6,834 (-13,05)	9,236 (-9,45)	10,94 (+1,11)

*sa.=imagens saturadas.

**diferenças (%) em comparação com os valores de pré-lançamento do Landsat-5.

(Fonte: Thome et al., 1994)

Tabela 5 - Comparação entre os coeficientes de calibração do pré-lançamento do TM Landsat-5 e os obtidos com as medidas de campo (em White Sands) realizadas no período de 1984-85

Banda TM	Pré-lançamento		Atualizado (1984/85)	
	a_0	a_1	a_0	a_1
1	-0,1009	0,0636	-0,1331 (31,91)*	0,0727 (14,31)
2	-0,1919	0,1262	-0,2346 (22,25)	0,1385 (9,75)
3	-0,1682	0,0970	-0,1897 (12,78)	0,1102 (13,61)
4	-0,1819	0,0914	-0,1942 (6,76)	0,0885 (-3,17)

* Diferença (%) em comparação com os coeficientes de pré-lançamento do Landsat-5.

Obs.: As unidades são $mWcm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ e $mWcm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}/ND$ para a_0 e a_1 , respectivamente.

(Fonte: Hill e Sturm, 1991)

Tabela 6 - Comparação entre os coeficientes de calibração do TM Landsat-5, baseados nas medidas de dois campos diferentes (em White Sands e La Crau) realizadas em 1989

Banda TM	White Sands (12/08/89)		La Crau (30/09/89)
	"Offset"	Ganho	Ganho
2	2,22	6,83	6,89
3	2,37	9,09	9,19
4	2,36	10,60	10,91

Obs.: As unidades de ganho e "offset" são $ND/mWcm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ e ND, respectivamente.

(Fonte: Guyot e Gu, 1994)