

## DETERMINAÇÃO DA COR DO SOLO APARTIR DE DADOS RADIOMÉTRICOS E SUA RELAÇÃO COM TEORES DE HEMATITA

ROGÉRIO COSTA CAMPOS<sup>1</sup>  
JOSÉ ALEXANDRE MELO DEMATTÊ<sup>2</sup>  
CARLOS FERNANDO QUARTAROLI<sup>2</sup>  
ANTONIO ROBERTO FORMAGGIO<sup>1</sup>  
DANIELA ARNOLD TISOT<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>ESALQ - Universidade de São Paulo  
Caixa Postal 9 - 13418-900 - Piracicaba - SP, Brasil  
(jamemat, cfquarta, dtisot)@carpa.ciagri.esalq.br

**Abstract.** Color is widely recognized as a primary identifying parameter of soil. The physical, mineralogical, and chemical properties can be derived from assessing the subsurface color characteristics. The present research aimed to estimating the hematite content clay fraction, in laboratory, from data related to soil color obtained by using automatic devices. Fifteen subsurface soil samples from São Paulo State had their clay fraction hematite contents semiquantitatively determined by the association of chemical and physical methods and their colors evaluated in laboratory through measurements made with a spectro-radiometer. The radiometric data were used to the determination of soil color in L\*a\*b\* and Munsell systems and to the calculation of reddish indexes (RI). The RI values show functional dependence of hematite contents and the best relation is verified with RI values derived from color determined in the L\*a\*b\* system. Exponential models, developed from remote sensors, show themselves adequate in predicting the soil hematite contents.

**Keywords:** radiometric data, iron oxides, reddish index.

### 1. Introdução

É possível inferir um grande volume de informações a respeito de determinado solo com base em sua cor. A cor dos solos apresenta-se como uma propriedade pedológica passível de caracterização via sensoriamento remoto e apresenta relação com a natureza e o teor dos óxidos de ferro, compostos que exercem elevada influência na reflectância espectral dos solos (Formaggio et al., 1996). Conseqüentemente, o avermelhamento provocado pela presença da hematita em solos tem levado pesquisadores a propor índices de avermelhamento que permitam a estimativa do conteúdo desse mineral nos solos (Barrón & Torrent, 1986). Estes índices são baseados em coordenadas de sistemas de notação de cores, como o Sistema de Munsell e os espaços de cores propostos pela CIE (Commission Internationale de l'Eclairage, 1931) como o Yxy e o L\*a\*b\*, estabelecido em 1976.

Apesar de sua pouca expressão nos estudos com solos, o sistema L\*a\*b\* é utilizado por mais de 90% dos usuários de diversas áreas da ciência. Por outro lado, o sistema Munsell é o mais conhecido entre os pedólogos, estando presente nas cadernetas de campo de avaliação da cor do solo.

Os sistemas propostos pela CIE são baseados na teoria dos três componentes da visão colorida, pela qual o olho possui receptores para as três cores primárias (vermelho, verde, azul) e todas as outras cores são vistas como uma mistura dessas cores. A notação de cores nesses sistemas tem por base os valores de triestímulos que correspondem ao produto da distribuição espectral de potência da fonte de luminante pela reflectância espectral do objeto e pela resposta do olho humano às três cores primárias.

O sistema Munsell é definido pelos atributos matiz, valor (brilho) e croma (saturação). A determinação das cores nesse sistema normalmente é feita por comparação visual com uma série de padrões contidos na carta de Munsell.

O método de determinação da cor do solo proposto por Barrón & Torrent (1986), que se baseia no cálculo de valores de triestímulos, utiliza amostras secas e em pequenas quantidades, sendo relativamente simples e mais preciso, haja vista que as avaliações são realizadas por meio do uso de equipamentos, o que elimina a marcante subjetividade que caracteriza a avaliação visual da cor. Os valores obtidos por esta técnica são considerados mais precisos, uma vez que se evitam interpolações imprecisas, falta de reprodutibilidade e erros subjetivos, passíveis de ocorrer na determinação visual (Campos, 2002).

Rezende (1980), já apontava a técnica espectro-fotométrica como promissora para estimar a relação hematita/goethita em amostras de solo, uma vez que observou comportamento diferenciado dos espectros obtidos em função da referida relação para solos brasileiros. Uma feição característica da curva espectral, caracterizada por um pico de absorção em torno de 440 a 460 nm, foi identificada e relacionada com o aumento de goethita na amostra, embora o autor tenha encontrado dificuldades em mensurá-la.

Embora a cor dos óxidos já seja conhecida, ocorrem fatores que podem afetar sua expressão, e variações são observadas, com implicações diretas na cor do solo. Torrent & Schwertmann (1987) observaram, para misturas de hematitas sintéticas e caulinitas, que a cor dependia do tamanho da partícula do óxido de ferro e que o aumento deste tamanho resultava em cores mais púrpuras, o que denota diminuição da capacidade de pigmentação da hematita. Essa relação, entretanto, não foi observada em amostras naturais de sedimentos vermelhos (red beds).

Apesar de alguns trabalhos (Barrón & Torrent, 1986; Madeira Netto et al., 1997) relacionarem teores de hematita com dados de sensoriamento remoto, a determinação continua sendo feita por meio de análises de laboratório utilizando métodos convencionais que são complexos, longos, caros e não disponíveis em análises rotineiras. Portanto, faz-se necessário o desenvolvimento de técnicas mais simples menos onerosas e expeditas. Neste aspecto, o sensoriamento remoto, cujo potencial no estudo do solo é comprovado, poderia auxiliar.

A estimativa dos teores de óxidos de ferro na fração argila de amostras de solos caracteriza-se por requerer a separação da referida fração, a determinação química dos teores de Fe associados aos óxidos cristalinos e mal cristalizados nela presentes, bem como, informações relacionadas à proporção entre os teores de hematita e goethita na argila e à substituição de ferro por alumínio na estrutura dos óxidos de ferro. Essas informações, por sua vez, são obtidas por laboriosos processos que envolvem a concentração dos óxidos de ferro e a realização de análises por difratometria de raios X (Resende et al., 1987; Netto, 1996). Desse modo, o desenvolvimento de técnicas mais simples, menos onerosas e mais rápidas para a estimativa dos teores de óxidos de ferro dos solos é extremamente desejável.

O objetivo deste trabalho foi o de semiquantificar os teores de hematita por meio de modelos que permitem a utilização de dados oriundos da resposta espectral do solo.

## **1 Material e Métodos**

Foram utilizadas 15 amostras de solos de diferentes localidades do Estado de São Paulo, as quais tiveram os teores de hematita de suas frações argila semiquantificados por meio do método da alocação (Resende et al., 1987; Netto, 1996). A aquisição dos dados espectrais das amostras de solo, secas e peneiradas em tamis de 2 mm, foi realizada com o sensor do espectro-radiômetro Fieldspec, que coleta dados espectrais no intervalo de 350 a 2500 nm tomando dez medidas por segundo. Os dados foram coletados na faixa de 380 e 780 nm com

resolução espectral de 1 nm. Como fonte de iluminação foi utilizada uma lâmpada halógena de 650 W, com feixe não colimado para o plano visado. Como padrão de referência, foi utilizada uma placa de sulfato de bário. A razão entre o fluxo radiante espectral refletido pela superfície de uma amostra de solo e o fluxo radiante espectral refletido por um padrão de referência iluminados e visados sob as mesmas condições geométricas, gerou o fator de reflectância. As cores das amostras de solo foram determinadas em amostras secas a partir dos dados de reflectância espectral. Para isso, foram determinados inicialmente os valores de triestímulos XYZ definidos pela CIE em 1931, para o observador padrão CIE (1931) com 2° de campo de visão. As equações utilizadas foram as seguintes:

$$X = K \int_{380}^{780} S(\lambda)R(\lambda)\bar{x}(\lambda)d(\lambda); \quad (1)$$

$$Y = K \int_{380}^{780} S(\lambda)R(\lambda)\bar{y}(\lambda)d(\lambda); \quad (2)$$

$$Z = K \int_{380}^{780} S(\lambda)R(\lambda)\bar{z}(\lambda)d(\lambda); \quad (3)$$

$$K = \frac{100}{\int_{380}^{780} S(\lambda)\bar{y}(\lambda)d(\lambda)}; \quad (4)$$

sendo:

$\lambda$ : comprimento de onda da radiação em nm;  $S(\lambda)$ : distribuição espectral de potência relativa do iluminante. Utilizou-se o iluminante D65, padronizado pela CIE;  $R(\lambda)$ : reflectância espectral da amostra;  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$ : funções que definem, respectivamente, a resposta do olho humano às cores vermelho, verde e azul para um observador padrão com campo de visão de 2° em função do comprimento de onda ( $\lambda$ ) da radiação. Estas funções também são padronizadas pela CIE.

O fator de normalização K utilizado nas equações 1, 2 e 3 permite o cálculo dos triestímulos em relação ao triestímulo Y do iluminante, ao qual atribui-se o valor 100.

Os valores de triestímulos XYZ foram transformados nas coordenadas do sistema  $L^*a^*b^*$ , por meio das equações 5, 6 e 7:

$$L^* = 116t_2 - 16; \quad (5)$$

$$a^* = 500(t_1 - t_2); \quad (6)$$

$$b^* = 200(t_2 - t_3); \quad (7)$$

sendo:

$$t_1 = \begin{cases} \left(\frac{X}{X_n}\right)^{1/3} & \text{se } \frac{X}{X_n} > 0,008856 \\ 7,787\left(\frac{X}{X_n}\right) + \frac{16}{116} & \text{se } \frac{X}{X_n} \leq 0,008856 \end{cases} \quad (8)$$

$$t_2 = \begin{cases} \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3} & \text{se } \frac{Y}{Y_n} > 0,008856 \\ 7,787\left(\frac{Y}{Y_n}\right) + \frac{16}{116} & \text{se } \frac{Y}{Y_n} \leq 0,008856 \end{cases} \quad (9)$$

$$t_3 = \begin{cases} \left(\frac{Z}{Z_n}\right)^{1/3} & \text{se } \frac{Z}{Z_n} > 0,008856 \\ 7,787\left(\frac{Z}{Z_n}\right) + \frac{16}{116} & \text{se } \frac{Z}{Z_n} \leq 0,008856 \end{cases} \quad (10)$$

O índice de avermelhamento foi calculado a partir das equação proposta por Barrón & Torrent (1986) e é utilizada para cores expressas no sistema L\*a\*b\*

$$IAV_{Lab} = \frac{a * (a *^2 + b *^2)^{1/2} . 10^{10}}{b * L *^6} \quad (11)$$

Modelos de regressão linear foram gerados visando avaliar a possibilidade de semiquantificar os teores de hematita a partir dos índices de avermelhamento das amostras de solos. Para uma maior simplificação, os modelos, inicialmente exponenciais, foram linearizados aplicando-se logaritmo.

### 3 Resultados e discussão

Na **Tabela 1** são apresentados os valores de IAV e os teores de hematita das amostras de solos. Ao propor o índice de avermelhamento para amostras de solo (Equações 11), Barrón & Torrent (1986) estavam vários expoentes para os termos que compõem esses índices visando à obtenção da melhor associação entre o índice de avermelhamento e teor de hematita.

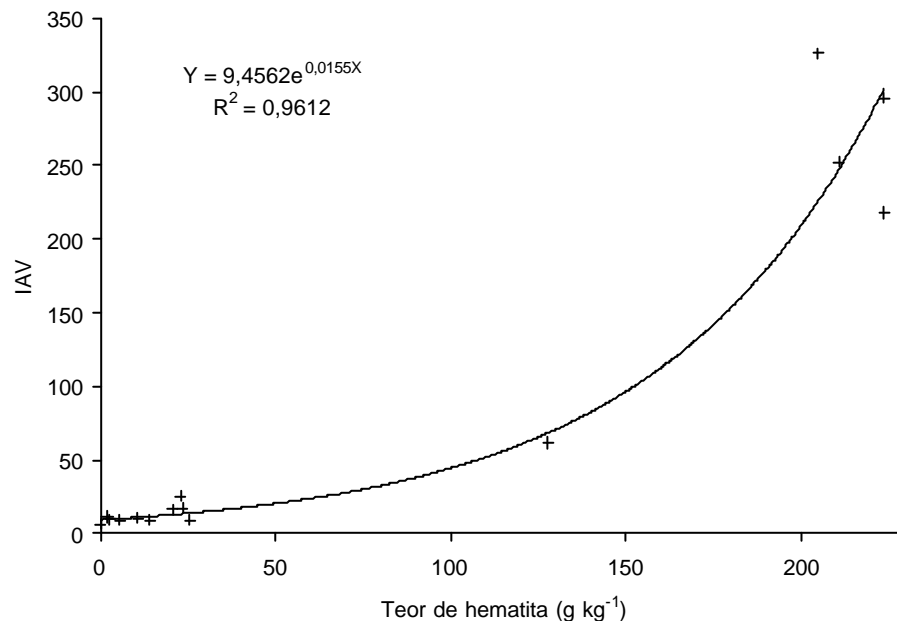
**Tabela 1.** Teores de hematita e os índices de avermelhamento (IAV) obtidos para as amostras de solo.

Solo (Embrapa, 1999)	Teor de Hematita (g kg <sup>-1</sup> )	IAV (L*a*b*) (Fator de reflectância)
Latossolo Vermelho Acriférico	223,5	217,89
Latossolo Vermelho Eutroférico	204,8	326,15
Latossolo Vermelho Distroférico	210,7	252,54
Latossolo Vermelho Acriférico	223,5	296,01
Latossolo Amarelo Ácrico	0,0	6,41
Latossolo Amarelo Ácrico	23,0	25,11
Latossolo Vermelho Distrófico	20,6	16,56
Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico	1,9	11,56
Nitossolo Vermelho Eutroférico	127,6	61,66
Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	2,7	9,84
Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	14,0	9,00
Argissolo Vermelho Eutrófico	23,4	17,40
Argissolo Vermelho Distrófico	25,5	9,48
Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico	10,6	10,67
Neossolo Quartzarênico Órtico	5,6	9,06

Utilizando modelos de regressão linear, estes pesquisadores obtiveram bons ajustes ( $R^2 > 0,995$ ) quando os teores de hematita eram inferiores a  $150 \text{ g kg}^{-1}$  em amostras de solo desferrificadas com adição de conteúdos conhecidos de hematita sintética. Quando as equações de regressão obtidas foram utilizadas em amostras de solos com teores de hematita determinados a partir de difratometria de raios X, os coeficientes de determinação foram menores: 0,67 para cores no sistema Munsell e 0,87 para cores no sistema  $L^*a^*b^*$ .

No presente trabalho, os teores de hematita das amostras variaram de 0 a  $223,5 \text{ g kg}^{-1}$  (**Tabela 1**), compreendendo uma faixa de variação mais ampla do que a das amostras de Barrón & Torrent (1986). A disposição dos dados em diagrama de dispersão mostrou tendências de relações exponenciais entre os índices de avermelhamento e os teores de hematita. Desse modo optou-se pelo uso do modelo exponencial  $Y_i = \beta_0 e^{\beta_1 X_i} \epsilon_i$  para a descrição do relacionamento entre as referidas variáveis. Antes de ser ajustado o modelo foi linearizado por meio de transformação logarítmica resultando na equação:  $Y_i' = \beta_0' + \beta_1 X_i + \epsilon_i$ , sendo  $Y_i' = \ln Y_i$ ,  $\beta_0' = \ln \beta_0$  e  $\epsilon_i' = \ln \epsilon_i$ .

As equações das retas, estimadas pelo método de mínimos quadrados, seus respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ), os intervalos de confiança estabelecidos para  $E(Y|X_0)$  e para a predição, ambos com 95% de probabilidade, são apresentados nas **Figuras 1 e 2**. Testes de hipóteses baseados nos testes F e t rejeitam da hipótese  $H_0: \beta_1 = 0$  a 5 % de probabilidade em todos os casos analisados indicando a existência de uma relação linear entre os logaritmos dos índices de avermelhamento e os teores de hematita.



**Figura 1.** Relação entre IAV e teor de hematita para índices de avermelhamento (IAV) calculados a partir das cores no sistema  $L^*a^*b^*$  obtidas a partir de dados de reflectância das amostras de solos.

Os valores de  $R^2$  obtidos mostram elevados coeficientes de determinação entre as variáveis teor de hematita e o logaritmo natural do IAV calculado a partir das cores no sistema  $L^*a^*b^*$  obtidas a partir de dados de fator de reflectância (**Figuras 1 e 2**).

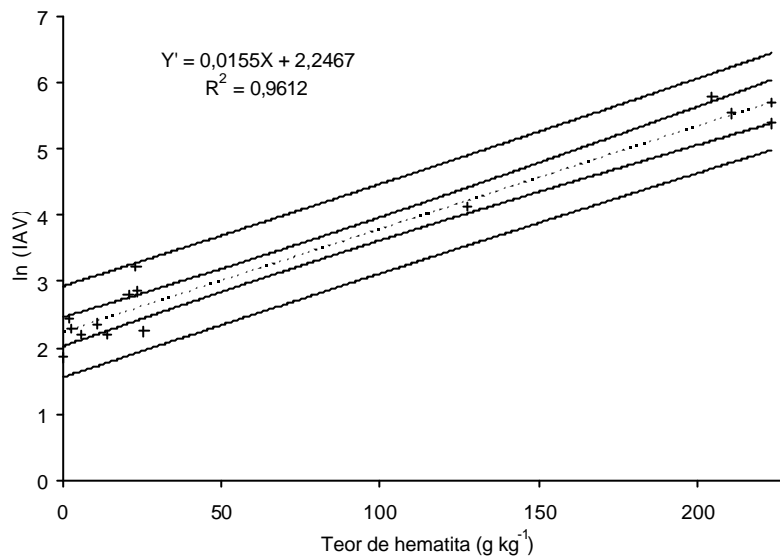
As equações de regressão obtidas no presente trabalho para as cores expressas no sistema  $L^*a^*b^*$  demonstram um bom potencial para a estimativa dos teores de hematita presentes na fração argila de solos e reiteram a utilidade da obtenção de índices colorimétricos a partir de dados de fator de reflectância na região do visível para avaliações semiquantitativas de

atributos pedológicos, a exemplo do verificado por Madeira Netto et al., 1997; Demattê & Garcia, 1999; Nanni & Demattê, 2001.

Madeira Netto et al. (1997) obtiveram elevada relação funcional ( $R^2 = 0,95$ ) entre a reflectância e teores de hematita de solos, muito similar à observada no presente trabalho ( $R^2 = 0,96$ ). Apesar das diferenças entre os métodos empregados, a base para determinação dos modelos, ou seja a reflectância, foi a mesma, o que reitera sua utilidade para a avaliação semiquantitativa de atributos do solo.

A aplicação das equações de regressão obtidas são válidas apenas quando as cores são determinadas pelo mesmo método e sob o mesmo iluminante utilizados na estimação de cada equação.

O comportamento dos modelos exponenciais são semelhantes ao comportamento dos modelos lineares para baixos valores de hematita, o que não invalida as equações de regressão obtidas por Barron & Torrent (1986).



**Figura 2.** Relação entre ln (IAV) e teor de hematita para índices de avermelhamento (IAV) calculados a partir das cores no sistema  $L^*a^*b^*$  obtidas a partir de dados de fator de reflectância das amostras de solos.

A utilização dos modelos exponenciais linearizados (**Figura 2**) torna possível o cálculo dos parâmetros  $\beta_0'$  e  $\beta_1$  das equações de regressão, além de tornar o modelo mais simples para análises e predições; entretanto os dados correspondentes à variável dependente (IAV) devem sofrer uma transformação logarítmica. Caso se queira trabalhar com os modelos na forma exponencial, basta, a partir do parâmetro  $\beta_0'$  do modelo linearizado, obter o parâmetro  $\beta_0$  através da equação  $\beta_0 = e^{\beta_0'}$ .

#### 4 Conclusões

A semiquantificação dos teores de hematita em solos pode se tornar mais rápida e menos onerosa por meio do estabelecimento de curvas de calibração, representadas por modelos exponenciais linearizados, que descrevam a associação entre índices de avermelhamento e o teor do referido óxido de ferro.

Índices de avermelhamento podem ser adequadamente calculados a partir da avaliação cor de amostras de solo nos sistemas  $L^*a^*b^*$  derivados reflectância efetuadas por meio de radiometria.

A elaboração de curvas de calibração envolvendo maior número de amostras é altamente desejável para a efetiva utilização da radiometria na semiquantificação dos teores de hematita em solos.

## Referências

- Barrón, V.; Torrent, J. Use of the Kubelka-Munk theory to study the influence of iron oxides on soil colour. *Journal of Soil Science, Oxford*, v.37, p.499-510, 1986.
- Campos, R. C. *Determinação da cor do solo e sua utilização na predição dos teores de hematita*. 2001. 59f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2001.
- Commission Internationale de l’Eclairage. Vienna, Austria. Proceedings of the eight session, Cambridge, Inglaterra.: Bureau Central de la Commission Internationale de L’Eclairage. 326p. 1931.
- Demattê, J. A. M.; Garcia, G. J. Alteration of soil properties through a weathering sequence as evaluated by spectral reflectance. *Soil Science Society of America Journal*, Madson, v. 63, p. 327-342, 1999.
- Formaggio, A. R.; Epiphanyo, J. C. N.; Valeriano, M. M.; Oliveira, J. B. Comportamento espectral (450-2.450 nm) de solos tropicais de São Paulo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 20, p. 467-474, 1996.
- Madeira Netto, J. A.; Bédidi, A.; Cervelle, B. Visible spectrometric indices of hematite (Hm) and goethite (Gt) content in lateritic soils: the application of a Thematic Mapper (TM) image for soil-mapping in Brasilia, Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, v.18, p.2835-2852, 1997.
- Nanni, M.R.; Demattê, J. A. M. Quantification and discrimination of soils developed from basalt as evaluated by terrestrial, airborne and orbital sensors. [CD-ROM]. In: X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu, PR, 21 a 26 de Abril de 2001, p.1441-1449.
- Netto, A.R. *Influência da mineralogia da fração argila sobre propriedades físico-químicas de solos brasileiros*. 1996. 144f. Dissertação (Mestrado em Solos) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1996.
- Resende, M.; Bahia Filho, A.F.C.; Braga, J.M. Mineralogia da fração argila de Latossolos estimada por alocação a partir do teor total de óxidos do ataque sulfúrico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.11, p.17-23, 1987.
- Torrent, J., Schuertmann, U. Influence of hematite on the color of red beds. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 57, p.682-686, 1987.