

Determinação da Relação Sílica - Alumina a partir dos Dados do Sensor AVIRIS (JPL/NASA), para Discretização Espacial do Grau de Intemperismo de Solos Tropicais.

GUSTAVO MACEDO DE MELLO BAPTISTA¹

JOSÉ DA SILVA MADEIRA NETTO²

PAULO ROBERTO MENESES¹

¹IG/UnB-Instituto de Geociências da Universidade de Brasília
Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, 70910-900, Brasília, DF, Brasil
gustavom@cdsid.com.br; lsrnub@guarany.unb.br

²Embrapa/CPAC-Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados
Caixa Postal 08223, BR 020, km 18, Rodovia Brasília/Fortaleza, 73301-970, Planaltina, DF, Brasil
madeira@cpac.embrapa.br

Abstract. The process of genesis of tropical soils results in advanced weathering degrees, usually associated to the removal of the SiO_2 and bases and accumulation of aluminum and iron. The ratio $[\text{SiO}_2]/[\text{Al}_2\text{O}_3]$ indicates the degree of development of those soils. This work presents the determination of this relationship, by means of the hyperspectral sensor AVIRIS (Airborne Visible/InfraRed Imaging Spectrometer) data of Jet Propulsion Laboratory/NASA. The results made possible the determination of three areas with different weathering degrees, in an apparently homogeneous area, in the visible range.

Keywords: Hyperspectral Remote Sensing, Tropical Soils, Ki Ratio, Weathering.

1 Introdução

Os solos tropicais apresentam-se muito intemperizados devido aos regimes climáticos a que estão submetidos. Os latossolos (Oxisols), que representam aproximadamente 46% da região dos Cerrados, são solos constituídos por material mineral altamente intemperizado, apresentando a fração argila formada basicamente por sesquióxidos de ferro (hematita e goethita), óxidos de alumínio (gibbsita), minerais de argila do grupo 1:1 (caulinita).

A relação molecular entre os teores de sílica e alumina ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$), ou valor Ki é usualmente utilizado como um indicador do grau de intemperismo dos solos. Para estes solos intensamente intemperizados, Ki é essencialmente uma medida das proporções de caulinita e gibbsita.

Estes minerais apresentam feições características nos espectros de reflectância e recentemente foi demonstrado que relações aritméticas obtidas a partir de certos parâmetros extraídos desses espectros guardam estreita relação com os valores de Ki (Madeira Netto et al., 1995).

Os dados obtidos pelos imageadores hiperespectrais, em especial o AVIRIS (Airborne Visible/InfraRed Imaging Spectrometer, JPL/NASA), que apresentam uma resolução espectral

relativamente estreita, mostram as feições da caulinita (2205 nm) e da gibbsita (2265 nm) discretizadas (Baptista et al., 1998) e portanto podem permitir estimar o grau de intemperismo dos solos. Este trabalho tem por objetivo a verificação desta possibilidade para os solos do município de São João D'Aliança, Goiás, Brasil.

2 Características Espectrais dos Componentes Minerais dos Solos Tropicais Utilizados para o Cálculo de Ki

As proporções dos componentes minerais caulinita e gibbsita são importantes para a classificação e implicam em propriedades que influem nas práticas de manejo dos solos. O conhecimento dos espectros de reflectância desses minerais utilizados para o cálculo de Ki é fundamental para utilização da espectrometria de imageamento em estudos de graus de intemperismo de solos.

2.1 Caulinita ($\text{Al}_2\text{SiO}_5(\text{OH})_4$)

A caulinita é o argilomineral mais freqüente encontrado nos solos tropicais. Seu espectro de reflectância possui suas feições características na região do infravermelho refletido. As suas principais feições estão associadas a vibrações moleculares das hidroxilas (OH^-) em sua rede cristalina. No infravermelho próximo as feições mais perceptíveis estão associadas às harmônicas de alongamentos de ligação (2s) em 1400 nm e as combinações envolvendo o alongamento do OH^- e as curvaturas de ligação entre Al-OH (d + s), em 2200 nm aproximadamente (Hlavay et al., 1977). A figura 1 apresenta o espectro de reflectância difusa de uma amostra de caulinita de Mesa Alta (New Mexico).

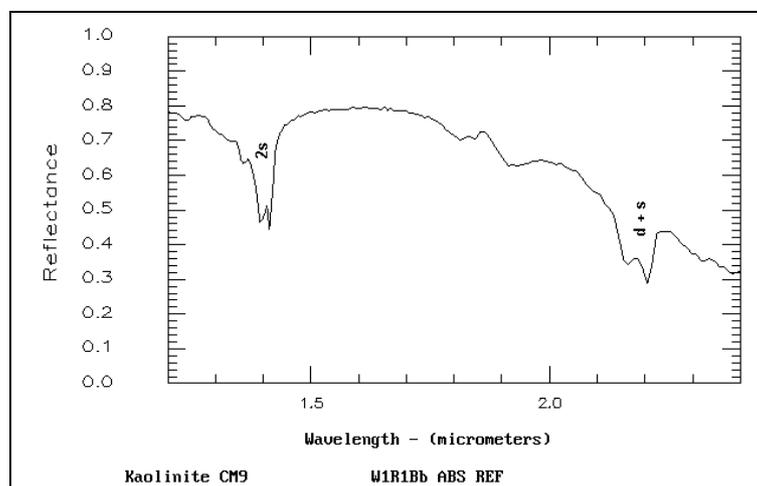


Figura 1 - Espectro de reflectância difusa da caulinita

2.2 Gibbsita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)

Solos que foram sujeitos à pronunciada alteração como os latossolos situados em antigas superfícies de erosão, sempre apresentam elevados teores de gibbsita em suas composições. Em vários casos eles representam o mineral mais importante da fração argila.

A gibbsita, assim como a caulinita, apresenta feições espectrais devido às vibrações das hidroxilas. No infravermelho próximo a gibbsita apresenta vibrações moleculares harmônicas (2s) próximas a 1550 nm e combinações do tipo d + s próximas a 2300 nm (Hunt et al., 1971). As bandas de absorção da água apresentam-se em 1400 nm (2s) e em 1900 nm (d + s). A figura 2 apresenta as feições características de uma amostra de gibbsita, proveniente do Brasil.

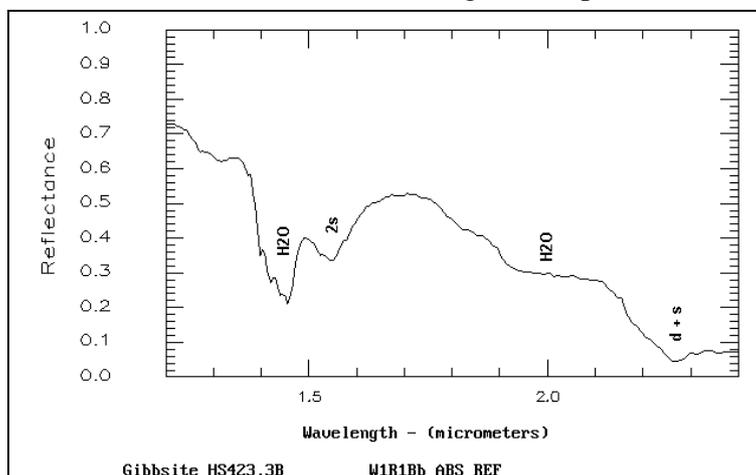


Figura 2 - Feições de absorção da gibbsita

3 Relação Sílica-Alumina

Os solos altamente intemperizados, como os latossolos, caracterizam-se pedogeneticamente pela remoção de sílica e bases do perfil e posterior acúmulo de alumínio. A relação sílica-alumina é considerada como um índice de intemperismo e é dada pela seguinte expressão (1):

$$Ki = \frac{SiO_2}{Al_2O_3} \quad (1)$$

Quanto menor for o valor de K_i , mais intemperizado será o solo, pois menor será o valor da sílica e maior o de alumina, ou seja, já houve remoção parcial e/ou total da sílica e posterior concentração do alumínio.

Para os solos altamente intemperizados a caulinita e a gibbsita são essencialmente os minerais que influem nos valores assumidos por K_i . A caulinita apresenta em sua composição química sílica e alumínio, enquanto que a gibbsita apresenta alumínio. Madeira Netto (1993) desenvolveu uma relação entre os pontos de inflexão das feições espectrais desses dois minerais, associados ao ponto de máxima reflectância situado entre as duas feições, mais especificamente a 2225 nm, conforme a figura 3.

Esse ponto de máxima reflectância entre as feições é considerado como a referência para a medição da intensidade de absorções dos dois minerais e estas são calculadas por meio das seguintes expressões:

$$I_{kaol} = R_{max} - R_{2205} \quad (2)$$

$$I_{gib} = R_{max} - R_{2265} \quad (3)$$

Onde I_{kaol} é a intensidade de absorção da caulinita, I_{gib} é a intensidade de absorção da gibbsita, R_{max} é o ponto de máxima reflectância entre as feições de absorção dos dois minerais, R_{2205} e R_{2265} são os valores da reflectância a 2205 e 2265 nm, respectivamente (Madeira Netto et al., 1995).

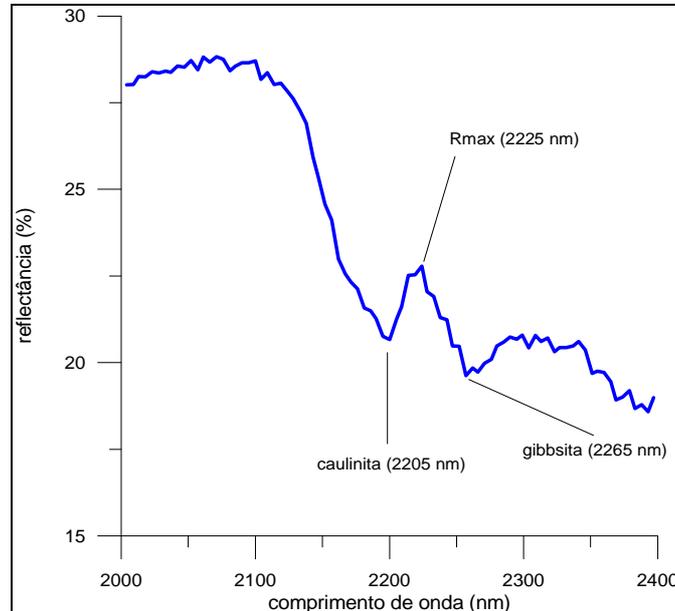


Figura 3 - Espectro de reflectância difusa (2000 a 2400 nm) de uma amostra de solo com 38% de caulinita e 30% de gibbsita. Adaptado de Madeira Netto et al. (1995).

A partir da determinação das intensidades de absorção dos dois minerais pode-se calcular um índice, IKi , que é proporcional à relação molecular Ki . Madeira Netto et al. (1995) determinaram a seguinte relação espectral para a determinação de IKi (4).

$$IKi = \frac{I_{kaol}}{(I_{kaol} + I_{gib})} \quad (4)$$

Para 53 amostras de solos com grande variabilidade de intemperismo os valores de IKi e Ki apresentaram elevada correlação ($r^2 = 0,98$) (Madeira Netto et al., 1995)

4 Descrição da Área de Estudos

A área de estudos está inserida no município de São João D'Aliança, GO e foi uma das áreas imageadas pelo sensor AVIRIS, em 1995, dentro da missão SCAR-B (Smoke, Clouds and Radiation - Brazil). Essa missão foi realizada graças ao convênio entre a Agência Espacial Brasileira (AEB), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e National Aeronautics and Space Administration (NASA), no período de agosto a setembro de 1995, nos estados de Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais e Rondônia.

A imagem adotada nesse trabalho é parte da 950816L2 (dia 16 de agosto de 1995, vôo 02) subcena 03 (figura 4).

Convém ressaltar que nesta época do ano os terrenos ainda não foram preparados para cultivo e ainda apresentam uma cobertura de restos da cultura anterior que restringe a área útil de solos nus. Mesmo assim, a subcena apresenta uma área considerável de solos expostos para a realização desse trabalho.

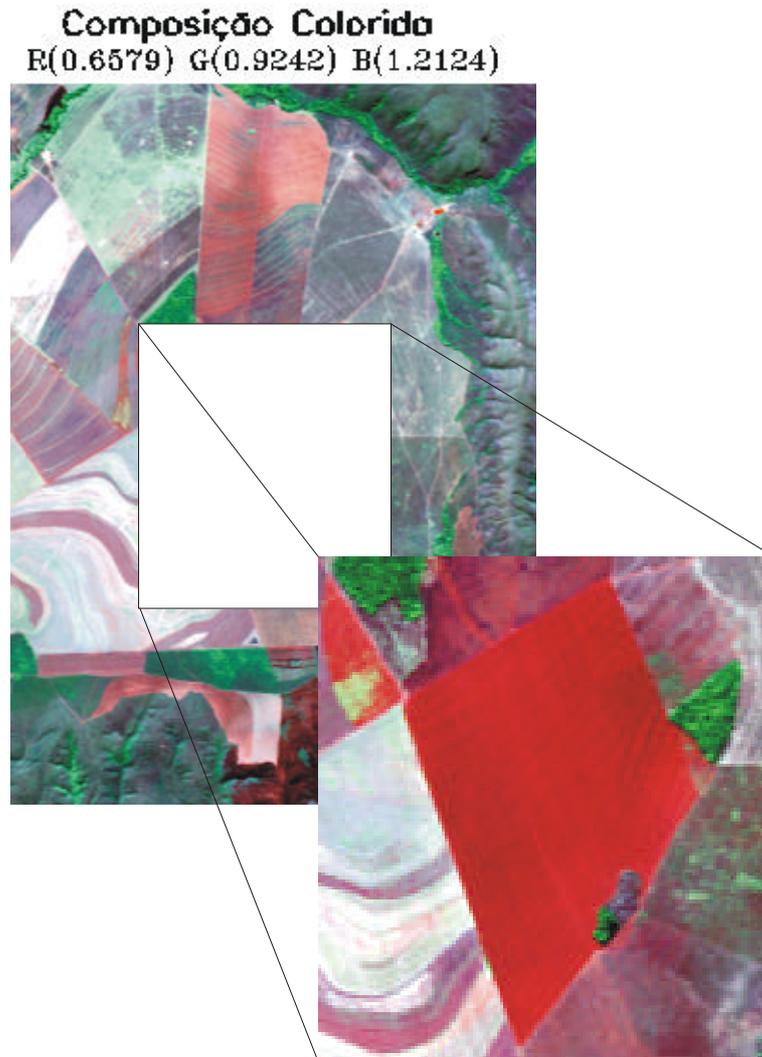


Figura 4 - Área de estudos em destaque (950816L2-03)

Um outro aspecto a ser analisado na escolha da área foi sua condição geomorfológica. Essa porção da imagem caracteriza-se geomorfológicamente como o cume de um domo, e a espacialização da relação do Ki tende a acompanhar a topografia, ou seja, nas porções mais conservadas e pouco afetadas pela erosão, os solos são mais intemperizados, enquanto que nas áreas rejuvenescidas pela erosão apresentam uma cobertura de solos menos intemperizados.

Além disso, Baptista et al. (1998) mostraram a coerência entre os espectros obtidos nos dados do AVIRIS e os obtidos no laboratório com amostras coletadas no campo, para caulinita e gibbsita, nesta mesma subcena.

5 Metodologia

O procedimento adotado baseou-se em duas etapas: correção atmosférica e redução dos dados do AVIRIS de radiância para reflectância; manipulação matemática das imagens.

5.1 Correção Atmosférica e Redução dos Dados do AVIRIS de Radiância para Reflectância

Essa etapa foi realizada no INPE, em São José dos Campos, SP, utilizando o método descrito em Green et al. (1991). Esse método baseia-se em um procedimento de calibração dos dados utilizando-se parâmetros coletados no campo, no momento de sua aquisição, e um modelo de transferência radiativa (MODTRAN).

O método é constituído por quatro etapas (Robert O. Green, com. pessoal ao autor):

1. desenvolvimento de tabelas (LUT - *look up tables*) de condições atmosféricas para a faixa imageada com o MODTRAN;
2. convolução dos espectros gerados pelo MODTRAN para as características espectrais do AVIRIS;
3. derivação das condições atmosféricas, principalmente vapor d'água, a partir dos espectros do AVIRIS e das tabelas do MODTRAN;
4. Inversão dos espectros de radiância calibrada do AVIRIS para reflectância espectral aparente da superfície.

De acordo com Clark et al. (1995) essa correção realiza um ajuste nos níveis de oxigênio, dióxido de carbono e vapor d'água para cada pixel. Como resultado, esse método elimina as bandas de absorção da água em 1400 e 1900 nm, além de reduzir os dados de radiância para reflectância, conforme pode-se notar nos espectros apresentados na figura 5, obtidos para o mesmo pixel.

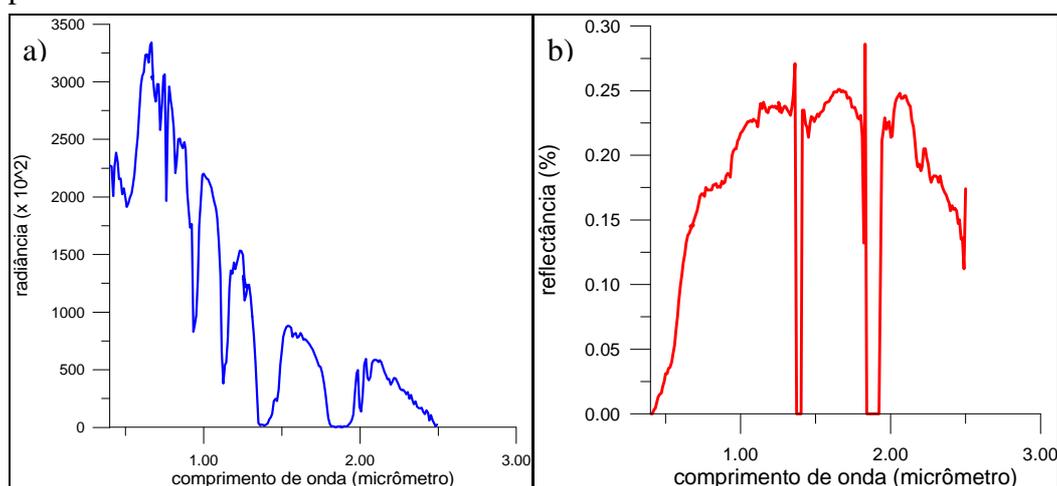


Figura 5 - Espectro obtidos a partir dos dados do AVIRIS. a) Radiância ($\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}/\text{sr}$). b) Reflectância (%) obtido após o Método de Green et al.(1991), mostrando a remoção das bandas de absorção da água em 1400 e 1900 nm.

Um dos principais problemas do método é o tempo de computação, cerca de 50 vezes superior a de outros modelos, além de forçar as primeiras bandas a zero, conforme salientam Baptista et al. (1998), o que de certa forma, compromete a determinação do cálculo de cores, por meio dos espectros.

Mesmo assim, esse modelo é considerado um dos melhores procedimentos para correção atmosférica e derivação da reflectância a partir dos dados do AVIRIS.

5.2 Manipulação Matemática das Imagens

Para a realização desse passo metodológico utilizou-se o software ENVI® Versão 2.7 (licença adquirida pela Embrapa/CPAC), nos seus módulos *band math*, para a implementação das equações 2, 3 e 4; *interactive stretching*, para realce do resultado; e *density slice*, para fatiamento do resultado e geração do produto final.

No módulo *band math* adotou-se a seguinte expressão:

$$IK_i = ((b_2 - b_1) / ((b_2 - b_1) + (b_2 - b_3))) \quad (5)$$

Onde b_1 = banda 193 (2196,8 nm); b_2 = banda 196 (2226,6 nm); e b_3 = banda 200 (2266,3 nm). Essas bandas foram adotadas por mais se aproximarem dos valores apresentados por Madeira Netto et al. (1995). É importante ressaltar que as resoluções espectrais do AVIRIS e do espectrorradiômetro utilizado por Madeira Netto et al. (1995) são diferentes, sendo o AVIRIS de pior resolução (~ 10 nm).

6 Resultados e Discussão

Adotando-se a expressão 5 por meio do módulo *band math* chegou-se a um plano de informação, que teve seu histograma expandido por equalização, visando uma melhor percepção das variações nos valores de K_i , conforme pode ser visualizado na figura 6. Nota-se na escala de cores que a variação gradual apresenta os menores valores com tonalidades mais escuras, enquanto que os maiores valores são representados por uma tonalidade mais clara.

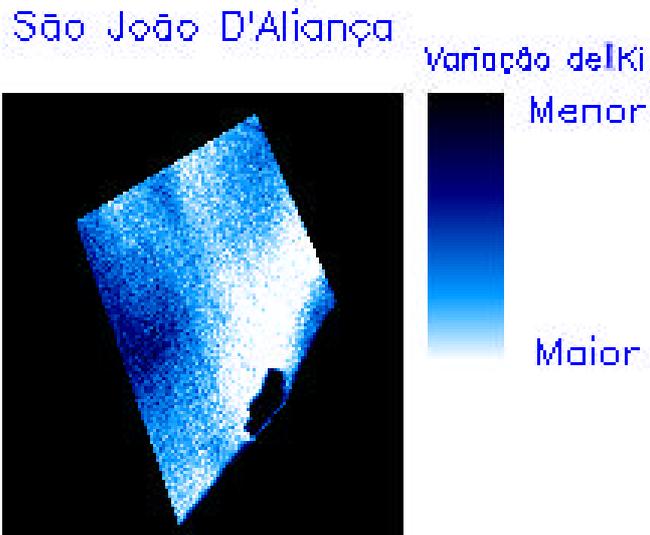


Figura 6 - Plano de informação contendo a variação de I_{Ki} para a imagem do AVIRIS

Um dos aspectos importantes nessa análise reside na diferenciação de unidades dentro de manchas de solos aparentemente homogêneas, como é o caso da grande mancha na porção central da imagem. Na composição colorida (figura 4) e no campo (figura 7) essa área apresenta-se como uma área homogênea, porém nota-se pelo menos três unidades distintas quanto ao I_{Ki} .



Figura 7 - Vista geral da área de estudos

Após a análise da variação de I_{Ki} para a subcena utilizou-se o módulo *density slice* para o fatiamento do plano apresentado na figura 6. Os valores fora da variação de I_{Ki} correspondem às áreas onde existe alguma forma de cobertura de solo, seja vegetação viva ou restos culturais. Para as áreas com solos expostos os valores de I_{Ki} variaram entre 0,10 e 0,75. Este intervalo de variação é comparável aos encontrados por Madeira Netto et al. (1995) embora os procedimentos de obtenção dos valores de reflectância tenham sido muito diferentes. Adotou-se então três

intervalos: 0,10 a 0,30; 0,30 a 0,50; e 0,50 a 0,75. A figura 8 apresenta o resultado fatiado nestes quatro intervalos.

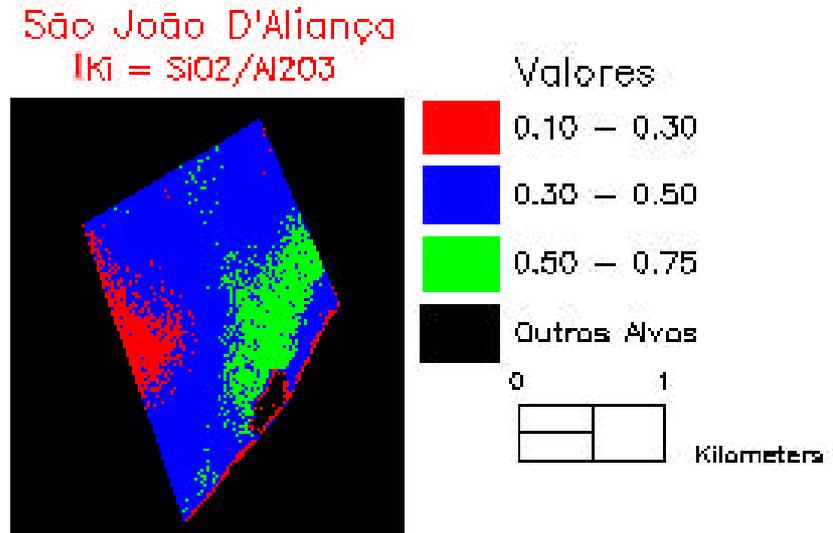


Figura 8 - Espacialização de Ki por meio de fatiamento

Os solos contidos na classe $0,10 < IKi < 0,30$ são os mais intemperizados, pois apresentam os menores valores de IKi , além de possuírem elevados teores de gibbsita, enquanto que os pertencentes à classe $0,50 < IKi < 0,75$ são os menos intemperizados. Deve-se ressaltar contudo que estes solos menos intemperizados são essencialmente caulíníticos. Já os solos pertencentes à classe $0,30 < IKi < 0,50$ apresentam um equilíbrio nos teores de caulinita e gibbsita.

Os espectros apresentados na figura 9 comprovam essas variações nas proporções de caulinita e gibbsita, para as três classes espacializadas na figura 8. Notam-se as variações proporcionais dos minerais por meio de suas intensidades de absorção. Na classe $0,10 < IKi < 0,30$ (figura 9a) percebe-se que os teores de gibbsita são elevados, tendo em vista a intensidade de sua banda de absorção em 2265 nm. Já o espectro que representa a classe $0,30 < IKi < 0,50$ (figura 9b) apresenta uma menor intensidade da banda de absorção da gibbsita, o que demonstra um certo equilíbrio entre as proporções deste mineral com a caulinita. Finalmente, o espectro representativo da classe $0,50 < IKi < 0,75$ comprova a afirmação de que esses solos são essencialmente caulíníticos, pois observa-se a ausência da feição da gibbsita neste intervalo de solos menos intemperizados.

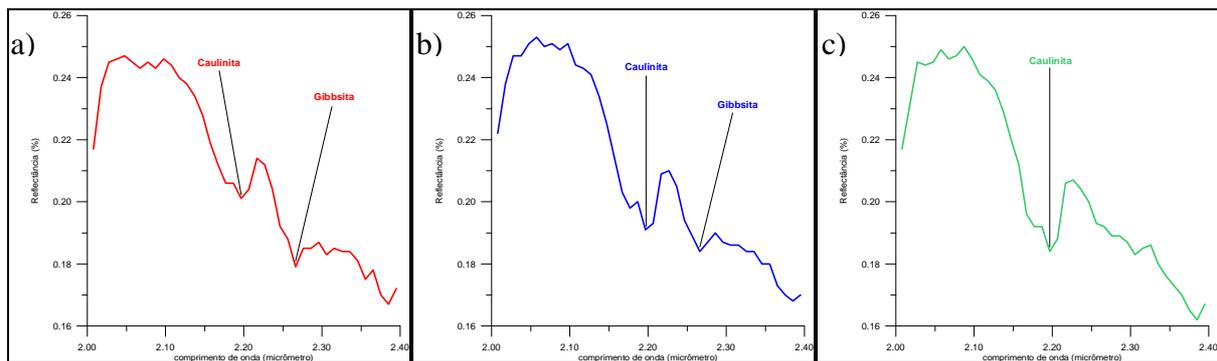


Figura 9 - Espectros obtidos nos dados do AVIRIS, representativos das classes de IKi apresentadas na figura 8. a) intervalo de $0,10 < IKi < 0,30$, apresentando altos teores de gibbsita confirmando o elevado estágio de intemperismo desses solos; b) intervalo $0,30 < IKi < 0,50$, mostrando uma equidade dos teores de caulinita e gibbsita; c) intervalo $0,50 < IKi < 0,75$, solos essencialmente caulíníticos apresentando ausência da feição espectral da gibbsita, menos intemperizados.

Essa variação de IKi pode ser explicada por uma variação suave na topografia dessa mancha adotada como área de estudos. A porção em vermelho representa a área menos afetada pelos processos erosivos, seguida da em azul que representa um plano inclinado e finalmente a porção verde representa uma sua depressão côncava na qual os processos de rejuvenescimento tendem a ocorrer com maior intensidade do que nas outras duas classes.

7 Conclusões

A adoção de manipulação matemática de espectros permitiu a identificação da relação molecular sílica-alumina, que pode ser utilizada como um índice de graus de intemperismo dos solos.

A espacialização deste parâmetro proporciona uma análise macro, associada a outros fatores, principalmente à topografia. Madeira Netto et al. (1995) concluíram que com os sistemas sensores multiespectrais existentes não se poderia aplicar essa modelagem matemática em imagens. Porém, hoje com os sistemas sensores hiperespectrais essa determinação do grau de intemperismo dos solos já é uma realidade, conforme mostra este trabalho.

Essa modelagem mostrou que, além da espacialização dos diferentes estágios de desenvolvimento dos solos, ela é um bom algoritmo para realce de manchas de solos nus, separando-os dos que possuem cobertura residual de culturas.

Pode notar também que a análise dos espectros permite derivar uma série de parâmetros dos elementos componentes da cena e que este campo é vasto e ainda muito pouco explorado. O advento da espectrometria de imageamento pode ser considerado como um novo paradigma nos estudos de sensoriamento remoto, no qual é importante a compreensão do comportamento espectral dos alvos, para garantir o avanço realmente científico desta nova fase.

Referências

- Baptista, G.M.M; Martins, E.S.; Madeira Netto, J.S.; Carvalho Jr., O.A.; Meneses, P.R. Use of AVIRIS Data for Mineralogical Mapping in Tropical Soils, in the District of São João D'Aliança, Goiás. Proceedings of the Seventh Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop, JPL Publications, 1998, (no prelo).
- Clark, R.N.; Swayze, G.A.; Heidebrecht, K.; Green, R.O.; Goetz, A.F.H. Calibration to Surface Reflectance of Terrestrial Imaging Spectrometry Data: Comparison of methods, Summaries of the Fifth Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop, JPL Publications 95-1, vol.1, 1995, pp. 41-42.
- Green, R.O.; Conel, J.E.; Margolis, J.S.; Brugge, C.J.; Hoover, G.L. An Inversion Algorithm for Retrieval of Atmospheric and Leaf Water Absorption from AVIRIS Radiance with Compensation for Atmospheric Scattering, Proceedings of the Third Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop, JPL Publications 91-28, 1991, pp. 51-61.
- Hlavay, H.; Jonas, K.; Elek, S.; Inczedy, J. Characterization of the Particle Size and Christallinity of Certain Minerals by Infrared Spectrophotometry and Other Instrumental Methods – I. Investigations on clay minerals, Clays and Clay Minerals, vol. 25, 1977, pp. 451-456.
- Hunt, G.R.; Salisbury, J.W.; Lenhoff, C.J. Visible and Near-Infrared Spectra of Minerals and Rocks: III. Oxides and hydroxides, Modern Geology, vol. 2, 1971, pp. 195-205.
- Madeira Netto, J. S. Étude Quantitative des Relations Constituants Minéralogiques – Réflectance Diffuse des Latosols Brésiliens: Application à l'utilisation pédologique des données satellitaires TM (Région de Brasilia)", Éditions de l'ORSTOM, Paris, 1993, 236p.
- Madeira Netto, J. S.; Bédidi, A.; Cervelle, B.; Flay, N. Spectral (MIR) Determination of Kaolinite and Gibbsite Contents in Lateritic Soils, C. R. Acad. Sci. Paris, t. 321, série II a, 1995, pp. 119-128.