



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS**

**IDENTIFICAÇÃO DE FITOFISIONOMIAS DO BIOMA CERRADO NO ESTADO  
DE GOIÁS, POR MEIO DE AEROGAMAESPECTROMETRIA E  
SENSORIAMENTO REMOTO ÓPTICO**

**Bruno Leonardo Gonçalves e Castro**

Brasília - DF, 30 de Abril de 2014



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS**

**IDENTIFICAÇÃO DE FITOFISIONOMIAS DO BIOMA CERRADO NO ESTADO  
DE GOIÁS, POR MEIO DE AEROGAMAESPECTROMETRIA E  
SENSORIAMENTO REMOTO ÓPTICO**

**Bruno Leonardo Gonçalves e Castro**

**Orientador:**

Prof<sup>a</sup>.Dr<sup>a</sup>. Adriana Chatack Carmelo

**Co-orientador:**

Prof.Dr. Augusto Cesar Bittencurt Pires

Brasília - DF, 30 de Abril de 2014



Aos meus pais e à  
minha mulher Juliana Silvestre



## **Agradecimentos**

À Professora Dra. Adriana Chatack Carmelo, pela orientação, dedicação e humildade para aprender e ensinar que foram fundamentais nestes quatro anos.

Ao Professor Dr. Augusto Cesar Bittencourt Pires, pela co-orientação e erudição científica essenciais à tese.

Aos Professores Dr. Edson Eyji Sano, Dra. Marilusa Pinto Coelho Lacerda e Dra. Carolyn Elinore Barnes Proença pelas contribuições na comissão de acompanhamento.

Ao Professor Dr. Geraldo Resende Boaventura e aos técnicos Fernando Cavalcante, Myller St do Laboratório de Geoquímica da UnB, pelo auxílio nas análises químicas e orientações metodológicas.

À colega Marta Henrique Jácomo, pelo tempo dedicado às medições e auxílios na metodologia gamaespectrométrica.

Aos técnicos do Laboratório de Bromatologia e Tecnologia de Alimentos UnB, em especial ao Márcio.

À Inara do DNPM, pela contribuição nas atividades de campo e coleta de solos.

Aos professores do doutorado em Geociências Aplicadas, em especial, o Professor Dr. Marco Ianniruberto por conceder o espaço do Laboratório de Geofísica (LGA) para os estudos iniciais do doutorado e contribuir com o empréstimo de computador para a sala dos alunos de pós-graduação.

À Sandra Andrade, do Laboratório de Química e ICP-OES/MS do Instituto de Geociências da USP.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa concedida.

Ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM), pela disponibilidade dos dados aerogamaespectrométricos.

Aos colegas do Instituto de Geociências da UnB, pelos cafés e conversas, em especial, o geólogo Agnel Bengala, pela força e amizade.

À Belin pelas hospedagens inesperadas.

Aos primos Marcos Eugênio, Marcela Timóteo e Eduardo, por me abrigarem em sua casa e pela amizade.

À minha família, pela força, orações e incentivos, em especial à minha mãe, exemplo de sabedoria.

À Juliana Silvestre, namorada, mulher, companheira, botânica, pelo carinho, atenção, contribuição no levantamento de campo e por mostrar e me ensinar sobre a beleza do Cerrado, meus agradecimentos não encontram palavras.

## Resumo

Desde a década de 1960, dados aerogamaespectrométricos são utilizados na prospecção mineral e em estudos geológicos, mas pouco se sabe sobre sua potencialidade para estudos da vegetação. Devido à forte ligação entre os dados radiométricos e o regolito, partiu-se do pressuposto que esses são fontes de elementos presentes no solo e contribuem para explicar a estrutura e a forma da vegetação. Sendo assim, o objetivo deste estudo foi analisar cinco fitofisionomias do Bioma Cerrado - Cerradão, Cerrado *Sensu Stricto*, Cerrado Rupestre, Campo Sujo e Campo Limpo - e, a partir de dados aerogamaespectrométricos, produtos do sensor TM/Landsat-5 e SRTM, tentar definir padrões de interpretação visual ou unidades gamaespectrométricas referentes a essas fitofisionomias. Dados remotos e análises químicas foram utilizados com o intuito de investigar as potencialidades da utilização dos radioisótopos potássio, tório e urânio e explicar a relação entre os dados aerogamaespectrométricos e a vegetação do Bioma Cerrado. Verificou-se grande potencial do uso desses dados para a diferenciação das fitofisionomias e uma relação linear positiva entre a biomassa e os radioelementos. A análise da relação solo-planta, feita por meio de estatística multivariada, resultou na separação das espécies que possuem capacidade de absorção dos radioelementos com os elementos essenciais à nutrição e identificou uma ligação com a assinatura gamaespectrométrica, que se reflete na fitofisionomia. Por fim, foi elaborado um mapa de áreas potenciais de ocorrência das fitofisionomias estudadas demonstrando a potencialidade dos canais aerogamaespectrométricos (Th e K) para o mapeamento fitofisionômico do Cerrado.

Palavras-chaves : Gamaespectrometria aérea, Landsat, Fitofisionomias do Cerrado.

## Abstract

Aerogamaspectrometric data have been used since the 1960s for mineral prospecting and geological studies, but little is known about the potential use of these data in studies of vegetation. Due to the strong connection between radiometric data and the regolith, it was assumed that this relationship derives from elements present in the soil that contribute to explain the local vegetation structure and shape. Therefore, this study aimed to analyze five phytophysionomies of the Cerrado Biome - the Cerradão (woodland savanna), the *Cerrado Sensu Stricto* (savanna), the Cerrado Rupestre (rupestrian savanna), the *Campo Sujo* (grassland savanna) and the *Campo Limpo* (grassland) - and, based on aerogamaspectrometric data of the Paleo-Neoproterozoic project from northeastern Goiás and data from the TM/Landsat5 sensor, define patterns of visual interpretation or gamaespectrometric units regarding these phytophysionomies. Remote and chemical data were used in order to investigate the potential use of potassium, thorium and uranium and explain the relationship between Aerogamaespectrometry data and Cerrado Biome vegetation. Was observed potential use of these data for the differentiation of phytophysionomies and a positive linear relation between biomass and radioelements. The analysis of soil-plant relationship, made by multivariate statistics, divided groups of species that are capable of absorbing these radioelements with the essential nutrition and identified a connection with the gammaespectrometric signature, which is reflected in phytophysionomies. Lastly, has been prepared a map of occurrence potential areas of studied vegetation demonstrating the potentiality of Aerogamaespectrometry channels (Th and K) for phytophysionomic mapping of the Cerrado.

Keywords: aerial gamma-spectrometry, Landsat, Cerrado phytophysionomies

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	- 19 -
1.1 Estrutura da Tese.....	- 21 -
1.2 Área de estudo.....	- 22 -
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	- 25 -
2.1 Geologia.....	- 25 -
2.2 Geomorfologia.....	- 29 -
2.3 Solos.....	- 32 -
2.4 Fitofisionomias do Cerrado.....	- 35 -
2.5 A vegetação da área de estudo.....	- 41 -
2.6 Sensoriamento remoto aplicado à vegetação.....	- 43 -
2.6.1 Índices de vegetação.....	- 46 -
2.7 O Método gamaespectrométrico.....	- 53 -
2.8 Aplicação da gamaespectrometria na vegetação.....	- 57 -
2.9 Absorção mineral das plantas e assimilação de radioisótopos no solo.....	- 61 -
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	- 71 -
3.1 Dados do levantamento aerogeofísico.....	- 71 -
3.2 Pré-Processamento dos dados aerogamaespectrométricos.....	- 72 -
3.3 Processamento dos dados aerogamaespectrométricos.....	- 72 -
3.4 Dados de sensoriamento remoto.....	- 73 -
3.5 Pré-Processamento da imagem TM/Landsat-5.....	- 73 -
3.5.1 Correção geométrica.....	- 74 -
3.6 Processamento da imagem TM/Landsat-5.....	- 74 -
3.7 Levantamento de campo.....	- 75 -

3.8 Coleta e análise de solos.....	- 76 -
3.9 Integração de Dados .....	- 77 -
4. RESULTADOS GERAIS.....	- 85 -
4.1 Análises iniciais e indícios da potencialidade dos dados aerogamaespectrométricos para diferenciação de fitofisionomias do Cerrado.....	- 85 -
4.2 Dispersão entre os radioelementos e os índices de vegetação.....	- 93 -
4.3 Análise da concentração de radioelementos em relevos da área de estudo.....	- 98 -
4.4 Gamaespectrômetro portátil e detecção de espécies vegetais do Cerrado.....	- 106 -
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	- 113 -
6. ARTIGO 1 - Identification of the phytophysiognomies of the Cerrado Biome based on aerogamaspectrometry and remote-sensing data.....	- 126 -
7. ARTIGO 2 - Integração de dados remotos e biogeoquímicos: uma análise da potencialidade de dados gamaespectrométricos para mapeamento de fitofisionômias do Cerrado .....	- 152 -
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	- 180 -
9. APÊNDICES .....	- 182 -

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Localização da área de pesquisa, detalhe mostrado no retângulo em amarelo na imagem aerogamaespectrométrica, composição colorida RGB/ KeTheU, do Projeto Paleoneoproterozóico .....	- 24 -
Figura 2.1 - Litologia da área de estudo. ....	- 19 -
Figura 2.2 - Compartimentação altimétrica das Superfícies Regionais de Aplainamento de Goiás. ....	- 31 -
Figura 2.3 - Exemplos de Superfícies de Aplainamentos da área de estudo. (a) Forma Tabular, (b) Hogback. ....	- 31 -
Figura 2.4- Unidades geomorfológicas da área de estudo.....	- 30 -
Figura 2.5 - Classes de solo da área de estudo. ....	- 35 -
Figura 2.6 - Fitofisionomias do Cerrado. ....	- 37 -
Figura 2.7 - Cobertura vegetal da área de estudo. ....	- 43 -
Figura 2.8 - Estrutura interna da folha.....	- 44 -
Figura 2.9 - Curva média de uma folha verde.....	- 44 -
Figura 2.10 - Distribuição de quatro dimensões.....	- 50 -
Figura 2.11 - Espectro de energia gerada pelos raios gama, com os picos das janelas da CT (contagem total), K, Th e U.....	- 57 -
Figura 3.1 - Instrumentos de medição dos radioelementos e elementos essenciais à nutrição no solo. A) Gamaespectrômetro portátil RS-230; B) Fluorescência de raios X (modelo Olympus Delta Handheld XRF Analyzers).....	- 77 -
Figura 3.2 - Medição da vegetação por gamaespectrômetro portátil GR-320.....	- 82 -
Figura 3.3 - Processos de preparação e análise química das espécies coletadas. A) Moinho de faca; B) Balança de precisão; C) Mufla; D) Adição de HNO <sub>3</sub> ; E) filtragem; F) ICP/AES; G) EAA; H) ICP/MS. ....	- 84 -
Figura 4.1 - Mapa aerogamaespectrométrico, composição colorida RGB/K,Th,U (A) e Domínios gamaespectrométricos identificados em campo (B).....	- 85 -

Figura 4.2 - Chave de interpretação das fitofisionomias estudadas e seus respectivos dados gamaespectrométricos e do Landsat5 TM. ....	- 87 -
Figura 4.3 - Modelo Digital de Elevação da relação entre a biomassa (NDVI) com as imagens TM/Landsat-5 e aerogamaespectrométrica .....	- 88 -
Figura 4.4 - Gráficos de distribuição e frequência e teste de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov das amostras de Cerradão nos canais do K, eTh e eU. ....	- 89 -
Figura 4.5 - Dispersão em 3D das amostras da classe Cerradão. ....	- 90 -
Figura 4.6 - Gráficos de distribuição e frequência e teste de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov das amostras de Cerradão nos canais eTh/eU, eU/K e eTh/K. ....	- 91 -
Figura 4.7 - Teores de Fe, Al e K por fluorescência de raios X. ....	- 92 -
Figura 4.8 - Comportamento espectral das fitofisionomias Campo Limpo, Cerradão e Cerrado Rupestre no sensor TM. ....	- 93 -
Figura 4.9 - Gráficos de dispersão entre os índices de vegetação (NDVI, SAVI, EVI) e os radioelementos (K, eTh, eU). ....	- 94 -
Figura 4.10 - Classificação supervisionada da imagem aerogamaespectrométrica RGB/K,eTh, eU com base nas áreas correspondentes às fitofisionomias Cerradão, Cerrado Rupestre e Campo Limpo. ....	- 95 -
Figura 4.11 - Gráficos de dispersão entre os índices de vegetação (NDVI, SAVI, EVI) e os radioelementos (K, eTh, eU), com base na classificação supervisionada. ....	- 96 -
Figura 4.12 - Gráficos de dispersão entre os índices de vegetação (NDVI, SAVI, EVI) e as razões dos radioelementos (eU/K, eTh/K, eTh/eU) com base na classificação supervisionada. ....	- 97 -
Figura 4.13 - Perfil topográfico da área amostral 1; Médias dos valores de concentração dos radioelementos e; Gráficos de dispersão (a-d). ....	- 99 -
Figura 4.14 - Perfil da área de coleta da fitofisionomia Cerradão. ....	- 99 -
Figura 4.15 - Perfil topográfico da área amostral 2; Médias dos valores de concentração dos radioelementos e; Gráficos de dispersão (a-d). ....	- 100 -
Figura 4.16 - Perfil da área de coleta da fitofisionomia Campo Sujo. ....	- 100 -
Figura 4.17 - Perfil da área de coleta da fitofisionomia Campo Limpo. ....	- 100 -
Figura 4.18 - Perfil topográfico da área amostral 3; Médias dos valores de concentração dos radioelementos e; Gráficos de dispersão (a-d). ....	- 101 -



Figura 4.19 - Perfil da área de coleta da fitofisionomia Cerrado sensu stricto.....	- 101 -
Figura 4.20 - Perfil topográfico da área amostral 4; Médias dos valores de concentração dos radioelementos e; Gráficos de dispersão (a-d). .....	- 102 -
Figura 4.21 - Perfil topográfico da área amostral 5; Médias dos valores de concentração dos radioelementos e; Gráficos de dispersão (a-d). .....	- 103 -
Figura 4.22 - Perfil da área de coleta da fitofisionomia Cerrado Rupestre. ....	- 103 -
Figura 4.23 - Perfil topográfico da área amostral 6; Médias dos valores de concentração dos radioelementos e; Gráficos de dispersão (a-d). .....	- 104 -
Figura 4.24 - Modelo Digital de Terreno (MDT) com sobreposição de imagem aerogamaespectrométrica composição colorida RGB/ K, eTh, eU. ....	- 105 -
Figura 4.25- Relevo da área de estudo e áreas de ocorrência das fitofisionomias abordadas. ....	- 106 -
Figura 4.26 - Localização das espécies coletadas.....	- 107 -
Figura 4.27 - Medidas de eTh por gamaespectrômetro portátil GR-320.....	- 108 -
Figura 4.28 - Medidas da concentração de K por EAA nas espécies estudadas. ....	- 110 -
Figura 4.29 - Comparação entre os valores de K e Th para as espécies (1) <i>Byrsonima rotunda</i> , (2) <i>Bauhinia sp.</i> e (3) <i>Chamaecrista orbiculata</i> . ....	- 111 -
Figura 4.30 - Medidas da concentração de eTh por aerogamaespectrometria aérea nos locais de coleta.....	- 111 -
Figura 4.31 - Levantamento aerogamaespectrométrico de K nas áreas de coleta das espécies. .-	- 112 -

## APÊNDICE

APÊNDICE A .....	182
A1. Área do levantamento aerogamaespectrométrico Paleo-Neoproterozóico do Nordeste de Goiás, canal K com destaque da área definida para pesquisa.....	182
A2. Área do levantamento aerogamaespectrométrico Paleo-Neoproterozóico do Nordeste de Goiás, canal eTh com destaque da área definida para pesquisa.182	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
A3. Área do levantamento aerogamaespectrométrico Paleo-Neoproterozóico do Nordeste de Goiás, canal eU com destaque da área definida para pesquisa. ....	183
A4. Área do levantamento aerogamaespectrométrico Paleo-Neoproterozóico do Nordeste de Goiás da razão eTh/K com destaque da área definida para pesquisa.183	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
A5. Área do levantamento aerogamaespectrométrico Paleo-Neoproterozóico do Nordeste de Goiás da razão eU/K com destaque da área definida para pesquisa. ....	184
A6. Área do levantamento aerogamaespectrométrico Paleo-Neoproterozóico do Nordeste de Goiás, eTh/U com destaque da área definida para pesquisa184	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
APÊNDICE B.....	185
B1. Mapa imagem TM Landsat-5 (RGB/b5,b4,b3) da área de estudo .....	185
APÊNDICE C.....	186
C1. Gráficos de distribuição e frequência das amostras de Cerradão para as bandas do visível e infravermelho do sensor TM/Landas5.....	187
C2. Gráficos de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov das amostras de Cerradão para as bandas do visível e infravermelho do sensor TM/Landas5. ....	187
C3. Gráficos de distribuição e frequência e teste de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov dos dados SRTM (Altitude/Declividade) para a fitofisionomia Cerradão.....	187
C4. Gráficos de distribuição e frequência e teste de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov dos dados SRTM (Altitude/Declividade) para a fitofisionomia Cerradão.....	188

C5. Gráficos de distribuição e frequência e teste de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov das amostras de Cerrado Rupestre para os canais de K eTh e U. ....	188
C6. Gráficos de distribuição e frequência e teste de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov das amostras de Cerrado Rupestre para as razões Th/U, UK e Th/K. ....	189
C7. Gráficos de distribuição e frequência das amostras de Cerrado Rupestre para as bandas do visível e infravermelho do sensor TM/Landas5.....	189
C8. Gráficos de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov das amostras de Cerrado Rupestre para as bandas do visível e infravermelho do sensor TM/Landas5.....	190
C9. Gráficos de distribuição e frequência, e teste de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov das amostras de Cerrado Rupestre para o NDVI. ....	190
C10. Gráficos de distribuição e frequência e teste de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov dos dados SRTM (Altitude/Declividade) para a fitofisionomia Cerrado Rupestre. ....	191
C11. Gráficos de distribuição e frequência e teste de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov das amostras de Cerrado Rupestre para os canais de K eTh e U. ....	191
C12. Gráficos de distribuição e frequência, e teste de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov das amostras de Campo Limpo para as razões Th/U, UK e Th/K. <b>Erro! Indicador não definido.</b>	192
C13. Gráficos de distribuição e frequência das amostras de Cmpo Limpo para as bandas do visível e infravermelho do sensor TM/Landas5.....	192
C14. Gráficos de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov das amostras de Campo Limpo para as bandas do visível e infravermelho do sensor TM/Landas5. <b>Erro! Indicador não definido.</b>	193
C15. Gráficos de distribuição e frequência, e teste de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov das amostras de Campo Limpo para o NDVI. ....	193
C16. Gráficos de distribuição e frequência e teste de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov dos dados SRTM (Altitude/Declividade) para a fitofisionomia Campo Limpo. .	194
APÊNDICE D .....	195
D1. Correlação entre os radioelementos e bandas espectrais do Landsat5 TM para a fitofisionomia Campo Limpo.....	195
D2. Correlação entre os radioelementos e bandas espectrais do Landsat5 TM para a fitofisionomia Cerradão. ....	195

D3. Correlação entre os radioelementos e bandas espectrais do Landsat5 TM para a fitofisionomia Cerrado Rupestre.....	196
APÊNDICE E.....	197
E1. Espécies vegetais presentes na área de estudo, com seus respectivos hábitos, fitofisionomias e domínios de ocorrência. s.n. = sem número (as coletas não serão depositadas no Herbário por estarem em estado vegetativo).....	197
APÊNDICE F.....	199
F1. Peso das amostras de folha para calcinação.....	199
F2. Peso das amostras de galho para calcinação.....	199
APÊNDICE G.....	200
G1. Medições de espécies do Cerrado por gamaespectrômetro portátil.....	200
APÊNDICE H.....	203
H1. Teores de K(ppm) de espécies do Cerrado medidas por Espectrofotômetro de Absorção Atômica (EAA).....	203
APÊNDICE I.....	204
I1. Medições dos teores dos radioelementos nos solos das áreas de coleta das espécies estudadas.....	204
APÊNDICE J.....	205
J1. Coeficientes de correlação de Pearson ( r ) entre os teores K, Th e U com os teores de Si; Al; para as espécies do Cerrado.....	205
J2. Coeficientes de correlação de Pearson ( r ) entre os teores K, Th e U com os teores de Si; Al; para espécies do Cerrado.....	205
J3. Coeficientes de correlação de Pearson ( r ) entre os teores K, Th e U com os teores de Ca; Mg; para espécies do Cerrado.....	205
J4. Coeficientes de correlação de Pearson ( r ) entre os teores K, Th e U com os teores de Ca; Mg;.....	206
J5. Coeficientes de correlação de Pearson ( r ) entre os teores K, Th e U com os teores de Fe; Ni; Cu; Mn; Zn; Mo para as espécies do Cerrado.....	206
J6. Coeficientes de correlação de Pearson ( r ) entre os dados aerogamaespectrométrico (K, Th e U) com os teores de ; Fe; Ni; Cu; Mn; Zn; Mo para espécies do Cerrado.....	207

J7. Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre os dados aerogamaespectrométrico (K, Th e U), NDVI , Declividade para espécies e solos coletados na área de estudo.....	198
APÊNDICE L.....	209
L1. Amostras de rocha coletadas na área de estudo: A - Monzogranito (Suite Aurumina), B - Quartizito Feldspático (Formação Arraias), C - Metasiltito (Formação Arraias). .....	209
APÊNDICE M.....	210
M1. Processos de coleta de solo: coleta de solo em trincheira(A), tradagem (B), medição de profundidade de um latossolo(C), quebra de rocha em cambissolo (D), amostras dos solos coletados (E). 210	

---

## 1. INTRODUÇÃO

O bioma Cerrado constitui um vasto mosaico de diversidade vegetal, sendo o segundo maior bioma em área do Brasil superado apenas pela Floresta Amazônica, abrangendo um total de 2.000.000 km<sup>2</sup> (Ribeiro & Walter, 2008). Apesar dessa área e da riqueza de sua biodiversidade, o Cerrado vem sofrendo transformações rápidas devido, principalmente, à ampliação do agronegócio. Mais da metade do bioma já foi transformada em pastagem e culturas anuais, entre outros usos.

De acordo com o Plano de Ação para prevenção e controle do desmatamento e das queimadas no Cerrado (MMA, 2011) estima-se que 8,24% do Cerrado encontra-se em Unidades de Conservação federais e estaduais, sendo 2,85% pertencentes à categoria de Proteção Integral e 5,39% à categoria de Uso Sustentável, sendo que as Áreas de Proteção Ambiental (APA) representam 5,19%.

Em estudo recente, Sano *et al.* (2010) verificaram, por meio de interpretação de 170 imagens do satélite Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus, ao mapear a cobertura do solo do bioma cerrado, que a cobertura natural remanescente permanece com cerca de 61% do bioma, mas em relações assimétricas, enquanto as fisionomias naturais cobrem 90% da região norte do bioma, apenas 15% estão na região sul confirmando ao final deste mapeamento, o uso intensivo do solo e consequente pressão sobre o bioma Cerrado.

A pressão antrópica sobre o bioma Cerrado vai além da ampliação dos agrossistemas. Há também a invasão de áreas urbanas que trouxeram danos ambientais de proporções consideráveis, tais como: degradação dos ecossistemas, fragmentação de habitats, extinção de espécies, invasão de espécies exóticas, erosão dos solos, poluição de aquíferos, alteração nos regimes de queimadas e desequilíbrio no ciclo de carbono (Buschbacher *et al.*, 2000).

Pesquisas que tratam o monitoramento dos biomas vêm auxiliando na tarefa de conservação dos mesmos diante à pressão antrópica. O sensoriamento remoto como ferramenta de monitoramento tem revolucionado o planejamento territorial. No caso do Brasil, pode-se evidenciar essa evolução com o projeto Radam e RadamBrasil da década de 1970, com o uso de imagens de radar aerotransportado, e do projeto PROBIO/MMA, com imagens do satélite Landsat ETM+ dos anos 2000, dos quais proporcionaram grandes avanços para este fim (Ferreira *et al.*, 2008).

Além do monitoramento da degradação dos biomas, a discriminação da vegetação e sua biomassa são úteis para as políticas de conservação da biodiversidade. Entre as diversas técnicas do sensoriamento remoto, o desenvolvimento dos índices de vegetação e as técnicas de modelo linear de mistura espectral têm proporcionado bons resultados na caracterização fitofisionômica dos biomas. Quanto ao Cerrado, destacam-se os trabalhos de Bezerra *et al.* (2007), Ferreira *et al.* (2003; 2007) e Mello *et al.* (2009). Contudo o mapeamento indireto por sensoriamento remoto orbital ainda conserva alguns limites para a diferenciação fitofisionômica, como à saturação das formações florestais nos índices de vegetação e a interferência na imagem dos períodos do ano - secos ou úmidos - que dificultam sua interpretação. Essas questões demonstram a necessidade da investigação de outras formas de mapeamento da vegetação que ampliem os estudos já desenvolvidos.

O avanço das geotecnologias desde a segunda metade do século XX vem proporcionando novas experiências com a integração de dados de diferentes fontes, contribuindo com pesquisas nos diferentes extratos da paisagem. A gamaespectrometria aérea, por exemplo, tem sido utilizada na integração de dados de sensoriamento remoto, principalmente na prospecção mineral e no mapeamento geológico. O método permite a obtenção das assinaturas radioativas dos radioelementos presentes nos minerais das rochas (IEA, 2003). Desde a década de 1960, esse método é muito difundido e aplicado na geologia, na prospecção mineral, mas em outras áreas sua aplicação é mais restrita. A partir de revisão bibliográfica, não foram encontrados estudos de gamaespectrometria aplicados para discriminação vegetacional ou fitofisionômica.

A hipótese da tese é que, os dados gamaespectrométricos, assim como a diferenciação da vegetação estão diretamente relacionados com os constituintes dos solos. Com isso, estudos gamaespectrométricos apresentam potencial para a discriminação das características vegetacionais. Experiências na integração de dados de sensores orbitais com os dados aerogamaespectrométricos têm mostrado sua eficiência para a discriminação da geologia e dos solos (Dias & Paradella, 1997), mas pouco se sabe sobre as potencialidades dessa integração para o estudo da vegetação. Acredita-se que os produtos gerados a partir de dados aerogamaespectrométricos possam contribuir no mapeamento de fitofisionomias do cerrado.

Neste sentido, esta tese teve como objetivo principal desenvolver uma metodologia para diferenciar e mapear fitofisionomias do Cerrado, a partir de dados aerogamaespectrométricos. Essa diferenciação partiu da investigação das seguintes

fitofisionomias: Cerradão, Cerrado *Sensu Stricto*, Cerrado Rupestre, Campo Sujo e Campo Limpo.

## 1.1 Estrutura da Tese

A tese foi estruturada em sete capítulos: o primeiro capítulo apresenta a introdução e as motivações para o desenvolvimento da pesquisa.

No segundo capítulo está o estudo de revisão bibliográfica, onde são descritos a paisagem da área de estudo quanto os aspectos naturais mais pertinentes para a pesquisa, geologia, solo, geomorfologia e vegetação. Também são abordadas as principais fitofisionomias do Cerrado. Foi necessário compreender os estudos remotos da vegetação aplicados ao bioma Cerrado e verificar as possibilidades de diferenciação fitofisionômica por dados orbitais. O entendimento da relação entre o comportamento da vegetação e a radiação eletromagnética deram subsídios para entender o comportamento da vegetação em uma região do espectro pouco estudada, a radiação gama (*ca.*  $10^{-14}$  a  $10^{-11}$   $\mu\text{m}$ ).

Apesar de poucos trabalhos encontrados que relacionam vegetação e dados aerogamaespectrométricos, esse tópico apresenta e sustenta a hipótese proposta a partir de informações técnicas.

Assim como os elementos essenciais à nutrição, a vegetação também absorve outros elementos como o Th e o U. Estudos de biogeoquímica e geobotânica de prospecção têm demonstrado essa capacidade para a aplicação da exploração mineral. Esses estudos abrem perspectivas para o entendimento do movimento dos radioisótopos no regolito e sua identificação por dados aerogamaespectrométricos e, conseqüente, a assinatura de características da paisagem que acompanham esse processo.

O terceiro capítulo é constituído pelo tópico Materiais e Métodos utilizados durante a pesquisa.

No quarto capítulo são apresentados os resultados gerais e os resultados que descortinaram formulações de hipóteses que foram a base para a estruturação dos artigos. Neste são mostrados os primeiros testes estatísticos realizados com os dados de sensoriamento remoto orbital e aerogamaespectrométricos a partir da análise aplicada entre os domínios gamaespectrométricos e as fitofisionomias, alvos obtidos em trabalho de campo. São descritas também a relação entre as formas de relevo e os dados



aerogamaespectrométricos. Observou-se que a mobilidade e as concentrações dos radioelementos com a altimetria variam em função das diferentes formas de relevo onde se assentam diferentes fitofisionomias. Outro resultado observado foi a realização de medidas com o uso de dois gamaespectrometros portáteis das concentrações dos radioelementos K, Th e U em algumas espécies do Cerrado. Posteriormente, esses dados foram comparados com os dados aerogamaespectrométricos e os resultados de análise química de três fitofisionomias diferentes.

No capítulo cinco está o primeiro artigo, resultado do estudo da diferenciação fitofisionômica de três fitofisionomias: Cerradão, Cerrado Rupestre e Campo Limpo associando dados aerogamaespectrométricos e índices de vegetação do sensor TM/Landsat5. Foi constatada por análise estatística a relevância dos dados aerogamaespectrométricos na diferenciação de fitofisionomias e foram identificadas correlações entre a densidade da vegetação do Cerrado e os radioelementos.

O capítulo seis apresenta a importância da relação vegetação-solo e dos radioisótopos identificados por dados aerogamaespectrométricos. Verificou-se que a vegetação possui capacidade de absorver os elementos, Th e U e que ocorre um comportamento químico de absorção muito similar desses radioelementos e os chamados elementos essenciais à nutrição dos quais foram analisados: os elementos benéficos à nutrição (Si,AL), os macronutrientes (Mg,Ca), os micronutrientes (Mo,Zn,Mn,Cu,Ni,Fe) e o radioelemento K.

Os resultados demonstram a diferenciação de cinco fitofisionomias, a análise estatística multivariada indicou a potencialidade dos dados aerogamaespectrométricos.

E no último capítulo são abordadas as considerações finais referente aos resultados da pesquisa.

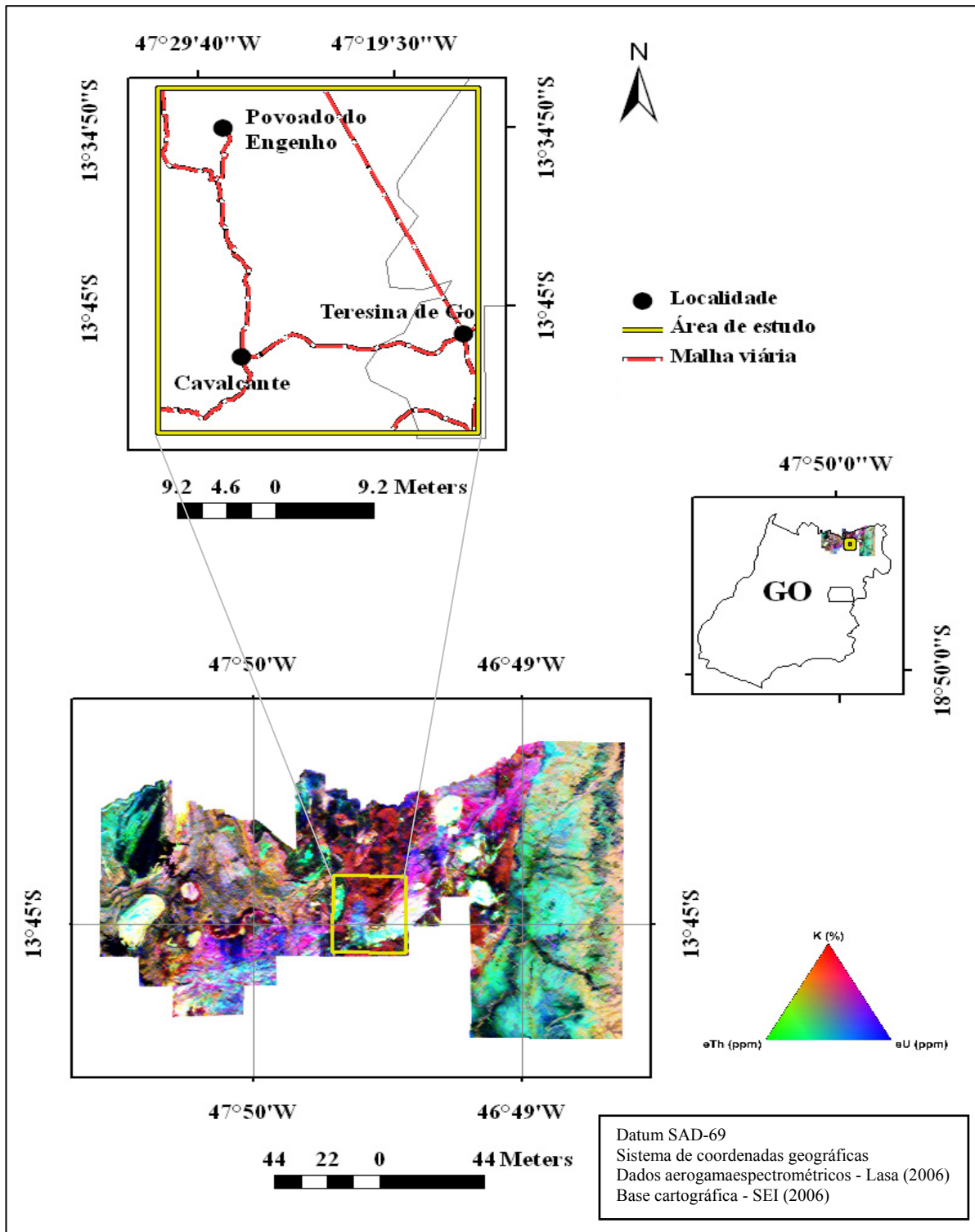
## **1.2 Área de estudo**

A área de estudo (Figura 1.1) está localizada no nordeste do do Estado de Goiás, entre as coordenadas 47°31'45.129''W-13°32'31,856''S e 47°15'19.174''W-13°52'3.78''S, abrangendo os municípios de Cavalcante e Teresina de Goiás.

A região de abrangência da pesquisa constitui área prioritária para a conservação ambiental devido à sua localização ao norte do estado de Goiás (PROBIO, 2007). Portanto, essa poderá oferecer dados para pesquisas que almejam desenvolver metodologias que

contribuam para sua conservação. Segundo o levantamento do Ministério do Meio Ambiente (2007), há pouca atenção quanto à conservação do bioma Cerrado, não sendo diferente para a região da Chapada dos Veadeiros (Felfili *et al.*, 2007), necessitando de pesquisas que analisem áreas do Cerrado pouco conhecidas e que promovam o aumento do número de áreas protegidas com o suporte técnico adequado favorecendo as demandas de pesquisa quanto a caracterização da biodiversidade deste bioma (Andrade & Silva, 2009).

A escolha da área de pesquisa teve como critérios: (1) a disponibilidade de cobertura do levantamento aerogamaespectrométrico; (2) a pouca interferência agrícola na região, para não haver alterações significantes no solo por compostos químicos e causar interferências nos dados gamaespectrométricos; e (3) localização de áreas com maior conservação do bioma Cerrado, possibilitando uma diversidade de fitofisionomias relevantes para sua diferenciação.



**Figura 1.1-** Localização da área de pesquisa, detalhe mostrado no retângulo em amarelo na imagem aerogamaespectrométrica, composição colorida RGB/ KeTheU, do Projeto Paleo Neoproterozóico.

---

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Geologia

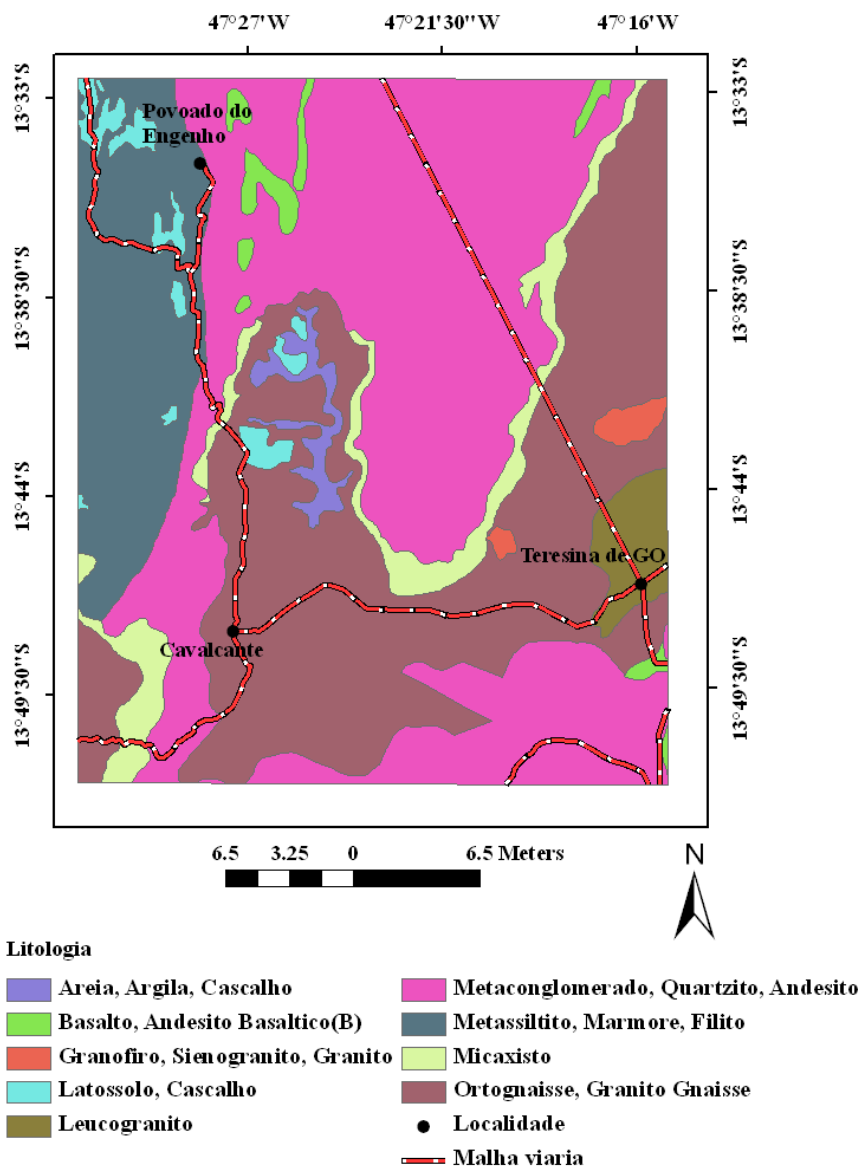
A área de estudo está inserida no contexto geológico da Província Tocantins que constitui parte do arcabouço geológico brasileiro (Almeida, 1977), localizada na região central do Brasil. A Província constitui um orógeno desenvolvido no Ciclo Brasileiro (Neoproterozóico), durante a aglutinação do Gondwana ocidental, devido à colisão de três áreas cratônicas: Cráton Amazônico (noroeste), Cráton São Francisco (leste) e Cráton do Parapanema ou Rio de La Plata (sul-sudeste), encoberto pela Bacia do Paraná (Dardenne, 2000).

A Província Tocantins é formada por três faixas neoproterozóicas dobradas: Faixa Brasília, a oeste do Cráton São Francisco, Faixa Araguaia, a leste do Cráton Amazônico e Faixa Paraguai-Araguaia, a sul do Cráton Amazônico. A área de estudo está inserida na Faixa Brasília (Dardenne, 2000).

A Faixa de Dobramentos Brasília (FDB) apresenta cerca de 1000 km de extensão na direção norte-sul, ao longo da margem oeste do Cráton São Francisco (Dardenne, 2000). Fuck *et al.* (1994; 2005) dividiram a FDB, de leste para oeste, em 4 unidades tectônicas: i) Arco Magmático de Goiás, ii) Maciço de Goiás, iii) Núcleo Metamórfico de Alto Grau, e iv) Cinturão de dobras e empurrões constituído por sequências supracrustais (grupos Bambuí, Paranoá, Ibiá, Araxá e sequências tipo *rift* representadas pelos grupos Serra da Mesa, Araí e Natividade) e pelo embasamento siálico (Complexo Granito-Gnáissico, Fm. Ticunzal, Suíte Aurumina, Sequências Vulcano-sedimentares e Granitos Tipo A da Província Estanífera de Goiás). A área de estudo está localizada nessa última unidade da Faixa Brasília.

A figura 2.1 mostra a área de estudo constituída pelos grupos Paranoá, Araí e Complexo Granito-Gnáissico (Lacerda Filho, 2000).

Lacerda Filho (2000) apresenta o Grupo Paranoá como uma seqüência deposicional de ambiente marinho, subdividida em doze litofácies com *status* de formação que representam megaciclos sedimentares (transgressivos, intermediário e regressivo) denominados de (Lacerda Filho, 2000): Unidade Conglomerática Quartzítica Rítmica Inferior, Unidade Síltico-Ardosiana, Unidade Rítmica Quartzítica Intermediária e Unidade Rítmica Pelito-Carbonatada.



**Figura 2.1** Litologia da área de estudo.  
**Fonte:** Base de dados SIEG (2006).

Campos *et al.* (2013) apresentam o Grupo Paranoá com deposição de idade mesoproterozóica baseada nas relações estratigráficas, sobre os sedimentos da fase pós-rifte do Grupo Araí e sob os pelitos do Grupo Bambuí. Os autores redefinem sua subdivisão em formações estratigráficas a partir de áreas-tipo, denominando as antigas onze unidades, da base para o topo: Ribeirão São Miguel, Córrego Cordovil, Serra da Boa Vista, Serra Almécegas, Serra do Paranã, Ribeirão Piçarrão, Ribeirão do Torto, Serra da Meia Noite, Ribeirão Contagem, Córrego do Sansão e Córrego do Barreiro.

Destes megaciclos intermediários, ocorre na área de estudo, no município de Cavalcante, a Unidade Rítmica Quartzítica Intermediária que é constituída por dois litofácies. O primeiro é formado por quartzitos finos a muito finos, feldspáticos, com ocasionais laminações síltico-argilosas, metassiltitos e metargilitos amarelos e vermelhos, com intercalações de quartzitos finos a médios, localmente grossos. Contém estruturas de contração, marcas onduladas, laminações cruzadas por ondas e estruturas tipo hummocky. O segundo litofácies é constituído por quartzitos amarelos a cinza claros, de granulação média a fina, com raros leitos de granulação grossa, existindo no topo intercalações argilosas laminares, com marcas onduladas, estratificações cruzada tabular, acanalada e espinha-de-peixe (Campos, 2004; Lacerda Filho, 2000).

O Grupo Araí está localizado em uma área muito acidentada, com cotas variando entre 300 e 1650 metros, ocupando a porção nordeste do Estado de Goiás e sudeste do estado de Tocantins, com área total de 11.000 km<sup>2</sup>. Os afloramentos ocorrem em Cavalcante, Alto Paraíso, Colinas de Goiás e região setentrional da Chapada dos Veadeiros (Botelho *et al.*, 2005; Marques, 2009).

O Grupo Araí, de idade paleoproterozóica, é constituído da base para o topo pelas formações (Fm) Arraias (Sequência Continental) e Traíras (Megasequência Transicional – Marinha) (Dardenne *et al.*, 1999; Martins, 1999). A Fm. Arraias apresenta cerca de 100 m de espessura, com presença de sedimentos psamíticos, depositados em ambiente predominantemente fluvial. A Fm. Traíras possui cerca de 1.200 m de espessura e é formada essencialmente por sedimentos psamíticos e pelito-carbonáticos, depositados em ambiente marinho (Botelho *et al.*, 2005). Na área de estudo, o Grupo ocorre em grande extensão, onde a Fm Arraias está presente nos municípios de Cavalcante, Teresina de Goiás e Nova Roma. A Formação Traíras está apenas na porção central do município de Cavalcante apresentando diversos litotipos como metaconglomerado, quartzito, andesito, metassiltito, mármore e filito (Lacerda Filho, 2000).

O Complexo Granito-Gnáissico apresentado como embasamento da Faixa Brasília (Figura 2.1), na região de Teresina de Goiás, é definido atualmente como Suíte Aurumina e Formação Ticunzal. A Suíte Aurumina é uma granitogênese peraluminosa, com idade de 2,12

a 2,17 Ga<sup>1</sup>, que ocorre na região nordeste de Goiás e sul de Tocantins (Botelho *et al.*, 2006; Marques, 2009). Essa nova classificação foi possível devido ao Trabalho Final do curso de graduação em Geologia, ano de 2005, da Universidade de Brasília, onde foram identificadas rochas graníticas peraluminosas (Botelho *et al.*, 2005).

Na área de estudo, a Suíte Aurumina aflora na região de Teresina de Goiás (Botelho *et al.*, 2005), onde são observadas relações de contato indicadoras de que os granitos da Suíte intrudem as rochas metassedimentares da Formação Ticunzal (Botelho *et al.*, 2005). A Suíte é representada por um conjunto de intrusões sin-, tardi- e pós-tectônicas com composições que variam de monzogranito a tonalito (Botelho *et al.*, 1999). Essa é composta por seis fácies: muscovita granito, biotita–muscovita granito, tonalito, biotita granito, migmatitos e turmalina–muscovita granito (Botelho *et al.*, 2006).

A Fm. Ticunzal é formada na base por biotita xistos e/ou muscovita xistos, em camadas espessas, de granulação grossa, e usualmente grafitosos, intercalados com mica xistos grafitosos. No topo a Formação é definida por quartzo-mica xistos, com mica xistos graníferos e turmalina xistos subordinados (Fernandes *et al.*, 1982). As idades dessas rochas não foram bem definidas, mas estudos indicam que são mais velhas que 2,5 Ga, pois estão intrudidas pela Suíte Aurumina (Marques, 2009). A Fm. Ticunzal aflora no município de Cavalcante, na região das serras do Ticunzal e Tombador.

A Fm. Ticunzal possui características politectônicas e polimetamórficas, apresentando as deformações que afetaram o Grupo Araí (Botelho *et al.*, 2005; Lacerda Filho, 2000).

Os Granitos Anorogênicos que compõe a Supersuíte do norte do Estado de Goiás, e que de acordo com Lacerda Filho (2000) surgiu no Paleo ao Mesoproterozóico, fazem parte da Província Estanífera de Goiás. Essa é subdividida em Subprovíncia Estanífera Parana e Subprovíncia Estanífera Tocantins. Ocorrem na área de estudo, ao sul do município de Teresina de Goiás e localmente, no município de Cavalcante.

De acordo com Lacerda Filho (2000), há duas gerações de granitos na região, a primeira de 1,77 Ga e a segunda, em torno de 1,6 Ga. As características geoquímicas, o ambiente tectônico e a contemporaneidade com o vulcanismo bimodal do Grupo Araí indicam que o magmatismo ácido, da porção norte da Província Estanífera de Goiás é tipicamente

---

<sup>1</sup> 1 Ga = 10<sup>9</sup> (um bilhão de) anos.

anorogênico, com a colocação e o resfriamento dos magmas ocorrendo em um ambiente extensional intracontinental.

A área de estudo está localizada na Subprovíncia Paranã onde afloram tanto granitos mais antigos, quanto mais jovens. Os granitos da Subprovíncia Paranã são intrusivos em rochas granito-gnáissicas miloníticas, arqueanas, constituindo altos topográficos circulares ou elípticos, que se destacam no relevo mais suave. Na região, ocorrem alguns maciços de contato tectônico com metassedimentos do Grupo Araí, que são constituídos por biotita sieno a monzogranitos com orientação mineral difusa, predominantemente porfíricos, com texturas onde se destacam mega cristais de feldspato potássico e cristais de quartzo azulado (Lacerda Filho, 2000).

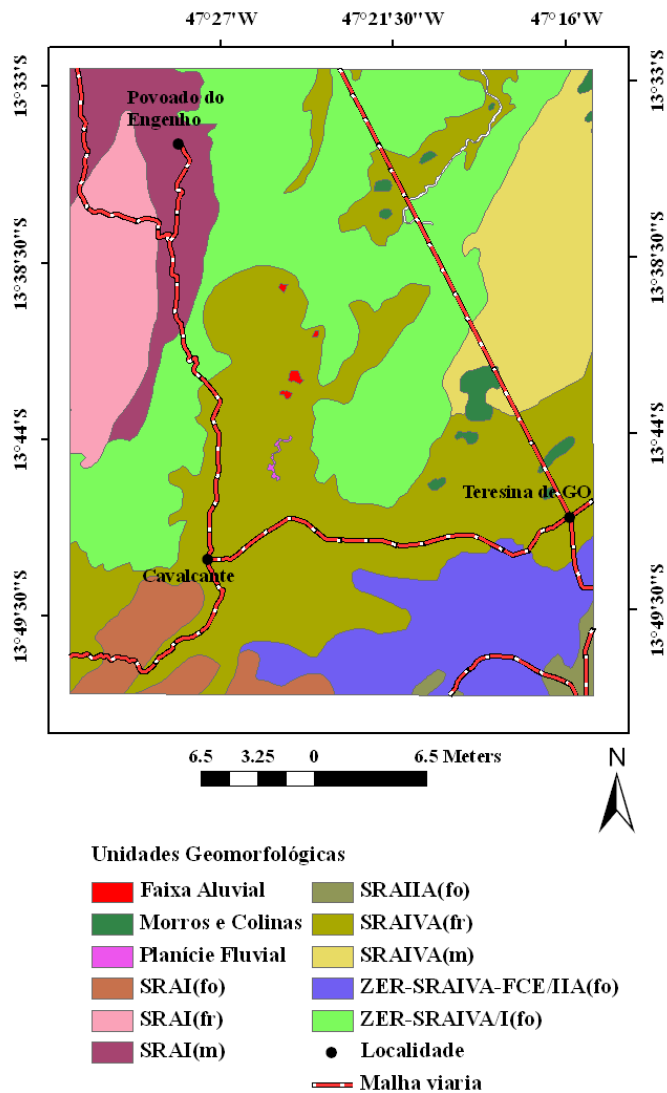
A Cobertura Quaternária constitui a Formação Superficial, que é uma unidade representada por sedimentos fluvio-lacustres arenosos e areno-argilosos, de idade terciária a quaternária, que se abrigam em zonas rebaixadas pela neotectônica ou depressões associadas aos ciclos de aplainamento geomorfológico (Lacerda Filho, 2000). Na área de estudo, a Cobertura Quaternária está distribuída, em pequenas porções nos municípios de Cavalcante e em Teresina de Goiás.

## **2.2 Geomorfologia**

O mapeamento geomorfológico do Estado de Goiás apresenta uma classificação com vários níveis, mas as categorias dominantes são os Sistemas Agradacionais e os Sistemas Denudacionais que estão por sua vez subdivididos em sete formas denudacionais associadas a Superfícies Regionais de Aplainamento (SRAs): as Zonas de Erosão Recuante; Morros e Colinas; Hogbacks; Formas Dômicas; Braquianticlinais; Pseudo-domos e Relevos Tabulares (Goiás, 2005; Carvalho e Bayer, 2008). As unidades agradacionais são quatro: Planícies Fluviais, Planícies Flúvias meandriformes, Terraços e Lacustres (GOIAS, 2005; Carvalho & Bayer, 2008).



As SRAs foram classificadas em quatro unidades (Figura 2.2), usando como critério principal a altimetria, cujas cotas variam entre 250 a 1600 metros. Na área de estudo ocorrem as SRAs com altitudes que chegam a 1200 m e dessas se destacam, Relevos Tabulares (Figura 2.3a) e Hogbacks (Figura 2.3b). Carvalho & Bayer (2008) explicam que mesmo que algumas Superfícies Regionais de Aplainamento estejam na mesma faixa altimétrica, são geomorfologicamente superfícies distintas e se diferenciam pela forma de relevo, tabuliforme ou não, e sua associação com sistemas lacustres ou morros e colinas.

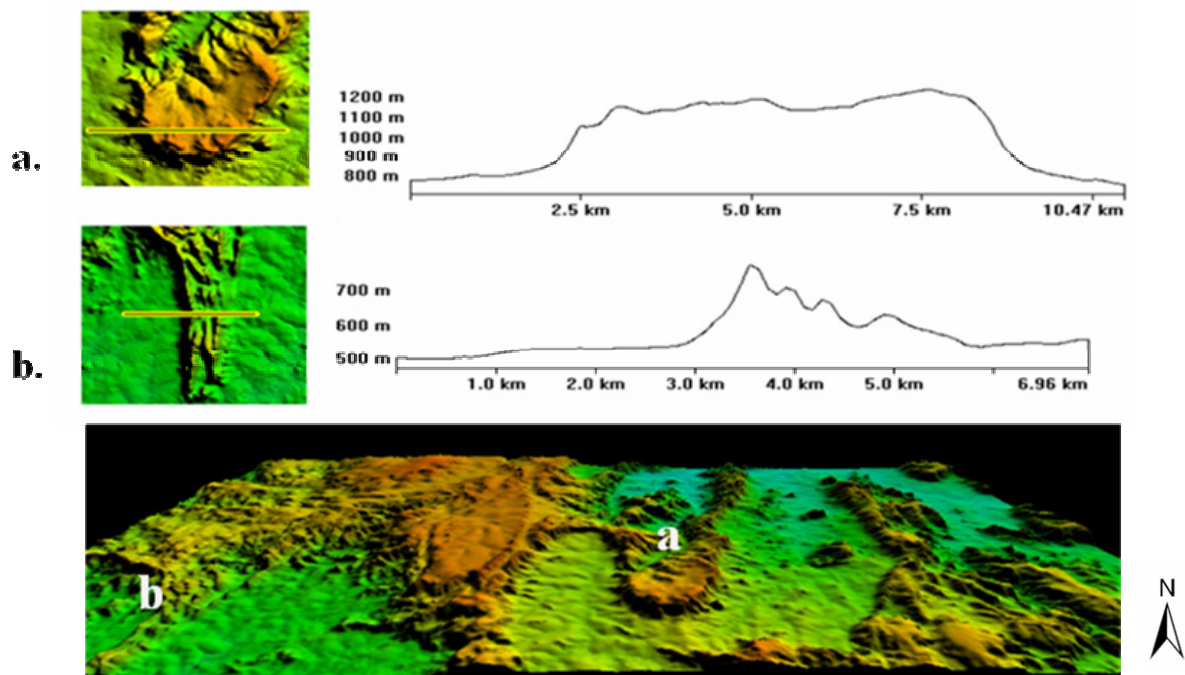


**Figura 2.4-** Unidades geomorfológicas da área de estudo.  
 Fonte: Base de dados SIEG (2006).

SRA – Superfície Regional de Aplainamento	Cotas altimétricas (m)
SRAI	1250-1600
SRAII A	900-1250
SRAII B-RT	900-1000
SRAII C	750-1000
SRAIII A	550-850
SRAIII B-RT	550-750
SRAIII C	550-750
SRAIV A	500-400
SRAIV B	500-550
SRAIV C1	250-400
SRAIV C2	250-400

**Figura 2.2** - Compartimentação altimétrica das Superfícies Regionais de Aplainamento de Goiás.

Fonte: Carvalho & Bayer (2008).



**Figura 2.3** - Exemplos de Superfícies de Aplainamentos da área de estudo. (a) Forma Tabular, (b) Hogback.

Na Chapada dos Veadeiros ocorre a Zona de Erosão Recuante que possui dissecação forte e processos erosivos na Superfície de Aplainamento Pré-Gondwânica, com cotas de 1250 m até 1600 m, e agrupamentos de morros (*inselbergs*) que atingem até 1600 m de altura ocupando uma área de 3.018 km<sup>2</sup>. Essa unidade geomorfológica é formada principalmente por rochas metassedimentares do Grupo Araí e ocorre no município de Cavalcante com presença de dissecações fluviais (Figura 2.3).

Na região norte do Estado de Goiás, a SRA IV-A se desenvolve relacionada ao escarpamento de grandes serras como a Pedra Branca e Boqueirão (Figura 2.3a) e na Chapada dos Veadeiros, mas ocorre também em outras áreas com a presença de superfícies de pedimentação (Goiás, 2005). Na área de estudo essa estrutura se estende do município de Cavalcante ao município de Nova Roma, apresentando cotas entre 1100 m e 1600 m, com dissecação média, representando a superfície mais elevada do estado. Ocorrem também nesta região a SRA IV-B, com cotas de 400 m a 550 m, com dissecação fraca desenvolvida principalmente sobre rochas pré-cambrianas (Goiás, 2005).

A Zona de Erosão Recuante com dissecação forte é uma unidade relacionada à geração da SRA IV-A, associada a essa unidade se desenvolvem processos erosivos na SRA II-A com cotas entre 900 m a 1000 m, trata-se de superfícies proterozóicas menos resistentes, compostas por ardósias, calcários e dolomitos. Na área de estudo ocorre no município de Nova Roma, mas a extensão desta unidade chega até as proximidades de Caldas Novas, ocupando uma área de 43.282 km<sup>2</sup> (Goiás, 2005).

### **2.3 Solos**

O solo é resultante de cinco variáveis interdependentes: o clima, os organismos, o material de origem, o relevo e o tempo. Contudo, para entender o comportamento e a distribuição dos solos na paisagem deve-se conhecer o ambiente que o cerca (Reatto *et al.*, 2008).

Os solos em Goiás possuem elevada fertilidade, fato que aliado a outros fatores propicia ao estado incentivo à expansão agrícola. A área de estudo apresenta menos de 1% de uso agrícola, mesmo contando com boa diversidade de solos (Sano *et al.*, 2006).

De acordo com a nova classificação dos solos do Brasil, a área de estudo possui quatro níveis categóricos<sup>2</sup> de ordem: os Neossolos, Latossolos, Plintossolos e Cambissolos (Figura 2.5) (EMBRAPA, 2006).

A classe dos Neossolos é pouco evoluída, sem horizonte B, constituída por material mineral ou por material orgânico com menos de 20 cm de espessura. Nestes solos não ocorrem alterações expressivas do material originário devido à baixa intensidade dos processos pedogenéticos e às características do próprio material de origem, como a maior resistência ao intemperismo ou a composição química (EMBRAPA, 2006). Os Neossolos são encontrados na maior parte da área de estudo e ocorrem em três subclasses: Neossolos Regolíticos Distróficos, Neossolos Regolíticos Eutróficos e Neossolos Litólicos (SIEG, 2006).

Os Neossolos Regolíticos Distróficos apresentam contato lítico, com profundidade maior que 50 cm e horizonte A sobrejacente ao horizonte C ou Cr, podendo ocorrer o horizonte Bi com menos de 10 cm de espessura. São solos que possuem saturação por bases baixa ( $V \leq 50\%$ ) e ocupam grande extensão no oeste do município de Cavalcante (EMBRAPA, 2006).

A categoria Neossolos Regolíticos Eutróficos possui as mesmas características dos regolíticos Distróficos, mas com saturação por base alta ( $V \geq 50\%$ ). E ocorrem apenas no município de Teresina de Goiás (EMBRAPA, 2006).

Os Neossolos Litólicos são solos com horizonte A estável diretamente sobre a rocha com o horizonte C ou Cr e também sobre material com 90% (por volume) ou mais de sua massa constituída por fragmentos de rocha com diâmetro maior que 2 cm (cascalhos, calhaus e matacões). Essa subclasse apresenta um contato lítico típico ou fragmentário dentro de 50 cm da superfície do solo, admite um horizonte B em início de formação (EMBRAPA, 2006) e, na a área de estudo, ocupa a região sudoeste e central do município de Cavalcante.

Os Latossolos constituem a categoria de solos de 1<sup>a</sup> ordem que apresentam evolução avançada, com intemperização intensa dos constituintes minerais primários e secundários resultantes dos processos de laterização, concentração relativa de argilominerais resistentes e/ou óxido e hidróxidos de ferro e alumínio com inexpressiva migração de argila. Os

---

<sup>2</sup> Os níveis categóricos, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, são: ordens, subordens, grandes grupos, subgrupos, famílias e séries (EMBRAPA, 2006).

Latossolos apresentam o horizonte B abaixo do horizonte A, a 200 cm do solo ou até 300 cm, se o horizonte A apresentar mais que 150 cm de espessura (EMBRAPA, 2006). Nos municípios de Cavalcante, Teresina de Goiás e Nova Roma está presente a subclasse Latossolo Vermelho Amarelo Alumínico, solo com presença de alumínio na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B, principalmente no horizonte BA (EMBRAPA, 2006).

Os Plintossolos são constituídos por solos minerais formados sob condições de restrição à percolação da água e sujeitos ao efeito temporário de excesso de umidade, são geralmente pouco ou mal drenados e caracterizados por apresentar expressiva plintização, com ou sem petroplintita, e apresentando alumínio na maior parte dos horizontes B ou C. Apresentam horizonte plíntico/litoplíntico ou concrecionário, segundo duas condições: a) iniciando dentro de 40 cm da superfície; b) iniciando nos primeiros 200 cm da superfície quando precedidos de horizontes glei, podendo ser abaixo do horizonte A ou E (EMBRAPA, 2006). Na área de estudo, ocorrem principalmente no município de Cavalcante (SIEG, 2006).

Os Cambissolos constituem uma categoria de primeira ordem e são formados por material mineral com horizonte B incipiente subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial. Exceto quando o horizonte suprajacente é o hístico ou horizonte A chernozêmico, suas características variam muito de um lugar para outro, sendo que a classe comporta solos bem a mal drenados, de rasos a profundos e de cor bruna/bruno-amarelada até vermelho escuro. Ocorre no município de Teresina de Goiás (EMBRAPA, 2006; SIEG, 2006).

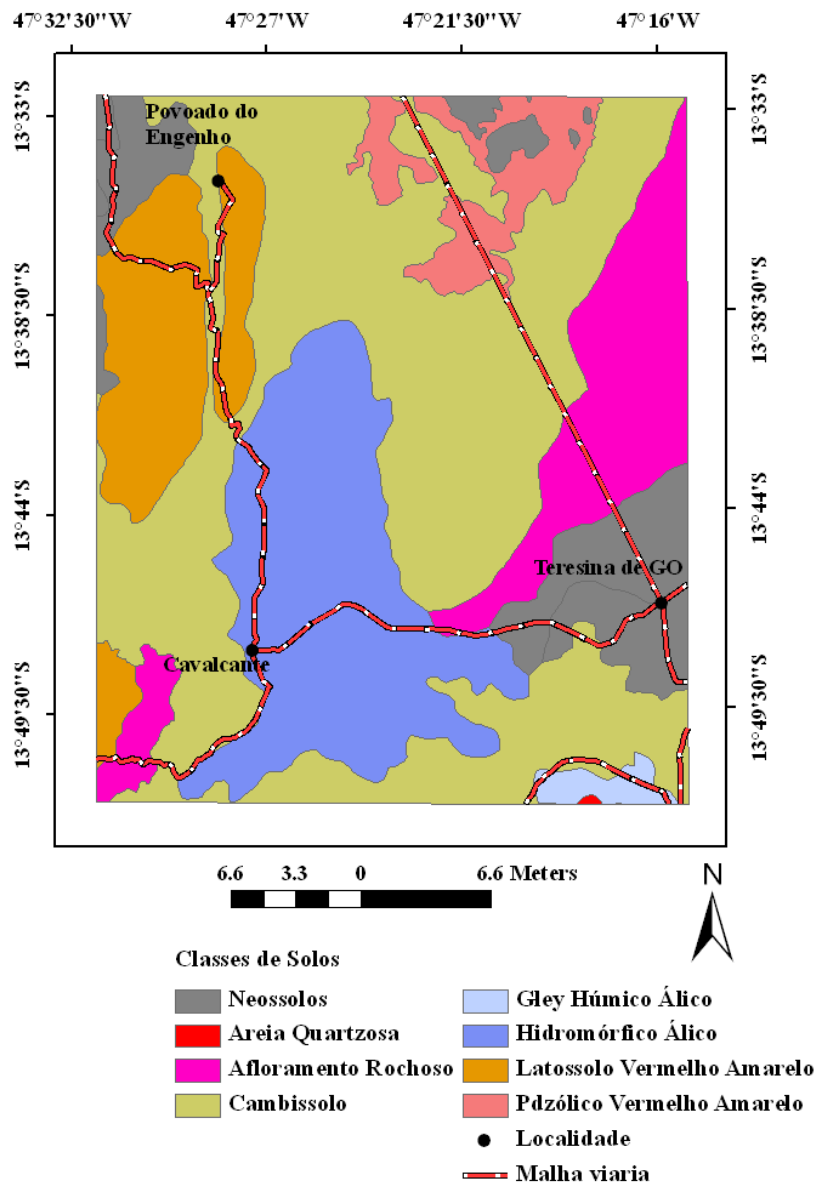


Figura 2.5 - Classes de solo da área de estudo.  
 Fonte: Base de dados SIEG (2006).

## 2.4 Fitofisionomias do Cerrado

O bioma Cerrado é comparado, ecológica e fisionomicamente, à Savana e a arvoredos mais úmidos e distróficos de outros continentes, como é o Miombo da região sul da África ou os arvoredos e Savanas de *Eucalyptus* do norte da Austrália. Sua vegetação distingue-se desse

outros biomas, por apresentar um mosaico de formações savânicas, florestais e campestres (Rizzini, 1979; Eiten, 1990).

No Brasil, o bioma Cerrado se estende em área contínua abrangendo os estados de Goiás, Tocantins, o oeste da Bahia e Distrito Federal. Além de constituir parte dos estados do Ceará, Maranhão, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Piauí, Rondônia e São Paulo e Paraná. Pode ser encontrado em áreas fragmentadas ao norte do país nos estados do Amapá, Amazonas, Pará e Roraima, e na região sul, em pequenas porções isoladas no Paraná (Ribeiro & Walter, 2008).

Segundo Mendonça *et al* (2008), o Cerrado possui a mais rica flora dentre as savanas do mundo, são mais de 12.000 espécies com alto nível de endemismo, podendo chegar até 450 espécies vasculares por hectare (Eiten, 1990). Essa riqueza também se reflete na fauna, especificamente nas espécies de aves, peixes, répteis, anfíbios e insetos (Klink & Machado, 2005). Essa biodiversidade se deve as diferenças locais de topografia, drenagem, solo, regime de fogo e precipitação sazonal (Eiten, 1990; Furley, 1999).

Os fatores que determinam a distribuição da vegetação do Cerrado ainda são descritos como objeto de controvérsia, além do fogo caracterizado como um fator determinante. Estudos paleobotânicos afirmam que as florestas e a vegetação do Cerrado mostram expansão e contração sucessivas, devido às flutuações climáticas ocorridas durante o Período Quaternário. A última expansão do Cerrado ocorreu na época do Holoceno (cerca de 0,01 milhões de anos até os dias atuais) não havendo recuperação da área original das florestas após o evento devido a ações antrópicas, principalmente, a prática de queimadas (Oliveira Filho & Ratter, 2002).

O Cerrado é o segundo maior bioma brasileiro, sendo superado em área apenas pela Floresta Amazônica. Na América do Sul, ocupa cerca de 2 milhões de km<sup>2</sup>, área equivalente à Europa Ocidental, e representa aproximadamente 22% da superfície do Brasil, além de pequenas áreas no leste da Bolívia e no noroeste do Paraguai (Oliveira Filho & Ratter, 2002).

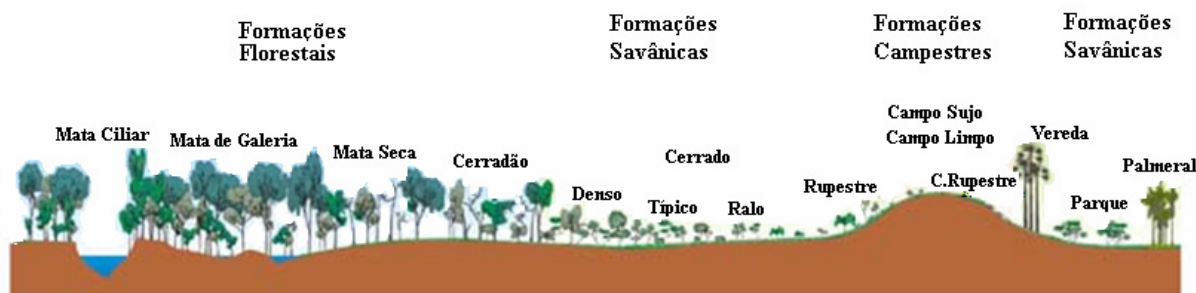
O Cerrado é considerado a última fronteira agrícola do planeta, segundo estudos de Klink & Machado (2005), com área original abaixo de 50%, onde cerca de 2% é área de reserva federal. Isto coloca o bioma em risco e exige maior atenção para evitar a perda dessa biodiversidade.

Os solos do Cerrado são profundos e o nível freático localiza-se a muitos metros da superfície, podendo ocorrer uma camada de concreção ferruginosa. Os remanescentes de

Cerrado atuais desenvolveram-se sobre solos muito antigos, intemperizados, ácidos, depauperados de nutrientes e com concentrações elevadas de alumínio nas folhas de arbustos e árvores (Rizzini, 1979).

O clima da região que abrange o Cerrado é estacional, com precipitação média anual de 1.500 mm. O período chuvoso dura de outubro a março e o período seco de abril a setembro (Klink & Machado, 2005). Segundo Reatto & Martins (2005), a média anual pode variar de 1.200 mm a 1.800 mm. Rizzini (1979) afirma que a precipitação média anual pode atingir até 2.000 mm e como o substrato é muito permeável, a maior parte dessa precipitação é infiltrada. As temperaturas são geralmente amenas ao longo do ano, ficando entre 22° C e 27° C (Rizzini, 1979).

Ribeiro & Walter (2008) diferenciaram os tipos fitofisionômicos do Cerrado pela estrutura da vegetação, pelos aspectos do ambiente e pela composição florística. Os autores descrevem as, Formações Florestais, Savânicas e Campestres, subdivididas em onze fitofisionomias para o bioma (Figura 2.6).



**Figura 2.6** - Fitofisionomias do Cerrado.  
**Fonte:** Adaptado de Ribeiro & Walter (2008).

Como o próprio termo indica, as formações florestais possuem vegetação arbórea predominante com dosséis contínuos. A Mata Ciliar é a fisionomia florestal que acompanha os rios de médio a grande porte e sem formação de galerias. Outra característica é sua ocorrência em relevos acidentados podendo haver transição para outras fitofisionomias florestais, como a Mata Seca e o Cerradão.

Os solos associados à Mata Ciliar podem ser rasos (Cambissolos, Plintossolos e Neossolos Litólicos) ou profundos (Latosolos e Argissolos, e Neossolos Flúvicos). A serrapilheira na Mata Ciliar é menor que a encontrada na Mata de Galeria. As árvores podem



medir alturas de 20 m a 30 m, com cobertura arbórea na estação seca podendo ser inferior a 50% e na estação chuvosa podendo atingir os 90% (Ribeiro & Walter, 2008).

A Mata de Galeria é a vegetação que acompanha os rios de pequeno porte e forma corredores fechados, chamados de galerias. Essa fitofisionomia está concentrada nas cabeceiras de drenagem e nos fundos de vale. No período de estação seca, não apresenta caducifolia sendo, portanto, perenifólia. A sua presença está associada a faixas de vegetação não florestal nas margens dos rios com transição brusca para as formações Savânicas e/ ou Campestres (Ribeiro & Walter, 2008).

O estrato arbóreo da Mata de Galeria varia de 20 m a 30 m, com superposição de copas e cobertura arbórea entre 70% e 95%. A umidade nas áreas é elevada durante todo o ano, mesmo em períodos secos. Em geral, esta fitofisionomia está relacionada aos Cambissolos, Plintossolos, Argissolos, Gleissolos ou Neossolos, podendo ocorrer ainda em Latossolos (Ribeiro & Walter, 2008).

A Mata de Galeria pode ser subdividida em dois subgrupos: Mata de Galeria Inundável e Mata de Galeria Não - Inundável. Essa condição resulta da topografia e das variações na altura do lençol freático ao longo do ano. Essa subdivisão pode variar ao longo dos trechos dos rios (Ribeiro & Walter, 2008).

A Mata Seca é definida como a fitofisionomia florestal que não está associada aos cursos de água com árvores que possuem altura de 15 m a 25 m. A vegetação ocorre nos interflúvios onde há mais nutrientes no solo, sendo dependente das condições físicas e químicas do solo. A Mata Seca também apresenta caducifolia durante a estação seca, contribuindo para o aumento de matéria orgânica no solo. Essa fitofisionomia pode ser subdividida em função do solo associado, da composição florística e da queda das folhas no período seco: Mata Seca-Sempre Verde, Mata Seca Semidecídua e Mata Seca Decídua (Ribeiro & Walter, 2008).

Nas áreas oriundas de rochas básicas que apresentam solos de alta fertilidade (Terra Roxa Estruturada, Brunizém ou Cambissolo) e solos de média fertilidade (Latossolos Roxo e Vermelho escuro) aparecem a Mata Seca Sempre Verde e a Mata Seca Semidecídua, por outro lado, a Mata Seca Decídua pode ocorrer em solos de origem calcária.

Mata Seca, de modo geral, possui cobertura arbórea entre 70% e 95%. Mas no período seco, a Mata Seca Sempre Verde apresenta cobertura que varia de 60% a 90%, enquanto a Mata Seca Decídua apresenta cobertura que varia de 30% a 50% (Ribeiro & Walter, 2008).

O Cerradão é uma fitofisionomia que possui um sub-bosque com presença de espécies que ocorrem no Cerrado *Sensu Stricto* e espécies de formações florestais (Mata Seca Semidecídua e Mata de Galeria Não Inundável), contudo, apesar do aspecto fisionômico de floresta, o Cerradão apresenta floristicamente mais semelhança com o Cerrado *Sensu Stricto*. Sua cobertura arbórea varia entre 50% e 90% e o estrato arbóreo possui altura de 8 m a 15 m. A luminosidade provocada pela condição do estrato arbóreo proporciona o aparecimento de espécies de estrutura arbustiva e herbácea (Ribeiro & Walter, 2008).

Os solos do Cerradão são profundos, bem drenados, de média a baixa fertilidade e pouco ácidos. Os solos comuns são os Latossolos Vermelho e Vermelho-Amarelo podendo ocorrer os Cambissolos Distróficos. Na estação seca o Cerradão deposita suas folhas no solo e é formado um horizonte superficial médio de matéria orgânica. A partir da fertilidade do solo o Cerradão subdivide-se em Distrófico, solos pobres em nutrientes, e Mesotrófico, solos com riqueza mediana (Ribeiro & Walter, 2008).

Dentre as formações Savânicas estão: o Cerrado *Sensu Stricto*, o Parque Cerrado, o Palmeiral e a Vereda.

O Cerrado *Sensu Stricto* possui árvores baixas, inclinadas e tortuosas, com indivíduos arbustivos e subarbustivos espalhados. Os troncos são lenhosos e suas cascas, na maioria dos casos, apresentam cortiças espessas, sendo suas folhas rígidas e coriáceas. Os solos mais comuns são os Latossolos Vermelho e Vermelho-Amarelo e apresentam de forte a média acidez, carência de nutrientes como o fósforo e o nitrogênio e forte presença de alumínio. Pode ocorrer a presença de Cambissolos, Neossolos Litólicos e Quartzênicos, Plintossolos Pétricos e Gleissolos (Ribeiro & Walter, 2008).

Os fatores que interferem na densidade arbórea do Cerrado *Sensu Stricto*, como as condições edáficas, o pH, a saturação do alumínio, a fertilidade, as condições hídricas e a profundidade do solo são condicionante para sua subdivisão em Cerrado Denso, Cerrado Típico e Cerrado Ralo (Ribeiro & Walter, 2008).

O Cerrado Denso possui cobertura vegetal que varia de 50% a 70% e seu estrato arbóreo constitui-se de árvores com 5 m a 8 m (Ribeiro & Walter, 2008).

O Cerrado Típico é constituído por vegetação arbóreo-arbustiva, com cobertura arbórea variando de 20% a 50% e altura entre 3 m e 6 m. Os solos desta fitofisionomia são os Latossolos Vermelho e Vermelho-Amarelo, Cambissolos, Neossolos Quartzênicos, Neossolos Litólicos e Plintossolos Pétricos (Ribeiro & Walter, 2008).

O Cerrado Ralo é caracterizado por ser uma variação do Cerrado *Sensu Stricto*, onde a vegetação arbóreo-arbustiva diferencia-se do Cerrado Típico por apresentar cobertura de 5% a 20% e média da altura entre 2 m e 3 m. O estrato arbustivo é mais destacado que nos outros subtipos do Cerrado *Sensu Stricto* (Ribeiro & Walter, 2008).

O Cerrado Rupestre, como o próprio nome indica, é a fitofisionomia arbóreo-arbustiva que ocorre em ambientes rupestres. A cobertura arbórea varia entre 5% a 20% e a altura da vegetação varia entre 2 m a 4 m. Geralmente o Cerrado Rupestre ocorre em mosaicos, mas pode ocorrer em áreas contínuas. O solo é pouco desenvolvido, com afloramentos rochosos e baixos nutrientes e matéria orgânica, o que caracteriza a presença dos Neossolos Litólicos. Outra característica peculiar é o aspecto lenhoso que depende do tipo de solo, podendo predominar paisagens mais arbustivas ou paisagens mais arbustivo-herbácea, mas sempre com presença de árvores em meio às fraturas das rochas (Ribeiro & Walter, 2008).

O Parque Cerrado, também conhecido como murundus, é caracterizado por ocorrer em ambientes de pequenas elevações do terreno, em agrupamentos de árvores que possuem altura média entre 3 m e 6 m. Possui cobertura vegetal que varia entre 5% e 70%. A altura dos murundus varia entre 0,1 m a 1,5 m e o diâmetro entre 0,2 m e 20 m. Sua origem ainda é debatida, mas as hipóteses apontam para ambientes de cupinzeiros ativos ou inativos, ou áreas resultantes de erosão diferencial onde se concentram os Gleissolos, que por sua vez, são mais drenados nos murundus que nas depressões adjacentes (Ribeiro & Walter, 2008).

As Formações Campestres do bioma Cerrado constituem três fitofisionomias: Campo Sujo, Campo Limpo e Campo Rupestre. Os Campos Sujo e Rupestre apresentam arbustos e subarbustos entremeados no estrato herbáceo, diferenciando-se pelo substrato com afloramento rochoso. No Campo Limpo, a presença de subarbustos é restrita (Ribeiro & Walter, 2008).

O Campo Sujo é encontrado em solos rasos como os Litólicos, Cambissolos ou Plintossolos Pétricos. Mas podem aparecer em solos profundos e de baixa fertilidade, como os Latossolos de textura média e as Areias Quartzosas. A profundidade do solo pode apresentar subtipos fisionômicos distintos. O Campo Sujo Seco está em solos profundos e o Campo Sujo Úmido em áreas onde o lençol freático é alto. Áreas com presença de murundus são denominadas Campo Sujo de Murundus (Ribeiro & Walter, 2008).

O Campo Rupestre ocorre em solos Litólicos ácidos, pobres em nutrientes e pode ocorrer nas fraturas das rochas. As águas pluviais escoam das áreas de Campo Rupestre

rapidamente para os rios fazendo com que sua disponibilidade seja restrita (Ribeiro & Walter, 2008).

No Campo Limpo predomina a vegetação herbácea, com poucos arbustos e ausência de árvores. A variação topográfica acompanha essa fitofisionomia podendo ocorrer variações quanto à umidade, à fertilidade e profundidade do solo. O Campo Limpo é mais comumente encontrado nas áreas circundadas por Veredas, próximo às nascentes e nas encostas das chapadas. Os solos podem ser Litólicos, Litossolos, Cambissolos ou Plintossolos Pétricos. O Campo Limpo pode ser chamado de Campo de Várzea quando ocorre em área de inundação plana e extensa próxima aos rios, em solos hidromórficos, solos aluviais ou solos orgânicos (Ribeiro & Walter, 2008). São chamados de Campo Limpo Seco quando ocorre a presença de lençol freático profundo, Campo Limpo Úmido quando o lençol freático é alto e Campo Limpo com Murundus quando há presença de murundus (Ribeiro & Walter, 2008).

As Veredas ocorrem em áreas de brejos, ocupando fundo de vales. Segundo Eiten (1990), essa fitofisionomia pode apresentar três subdivisões vegetacionais: brejo estacional, brejo permanente e faixa de buritis. Também ocorrem em áreas pouco íngremes ou planas, próximo às nascentes e nas bordas das cabeceiras das Matas de Galeria. Apresentam dois tipos de vegetação: herbáceo-graminóide, que ocupa a maior parte de sua área, e arbórea-arbustiva (Munhoz *et al.*, 2011). Os solos são hidromórficos, saturados a maior parte do ano, e o solo é o Gleissolos, glei pouco húmicos a húmicos (Munhoz *et al.*, 2011).

## **2.5 A vegetação da área de estudo**

O relatório PROBIO (2004) utilizou o Sistema Brasileiro de Classificação da Vegetação Brasileira (IBGE, 1992), que é uma classificação universal, para compor o banco de dados cartográficos do bioma Cerrado. Esse sistema de classificação é diferente da apresentada por Ribeiro & Walter (2008), que é aplicada apenas para o bioma Cerrado, e por isso é uma classificação mais específica e usual para os estudos desse bioma.

Com o intuito de identificar a vegetação da área de estudo utilizou-se a classificação do IBGE (1992) para a confecção do mapa de vegetação (Figura 2.7), já que não foi encontrada uma base de dados georreferenciados da classificação de Ribeiro & Walter (2008).

A Savana Arborizada (Figura 2.7) corresponde ao tipo fitofisionômico denominado Cerrado *Sensu Stricto* e aos subtipos Cerrado Denso e Cerrado Típico da classificação de

Ribeiro & Walter, 2008 (PROBIO, 2007). Essas fisionomias ocorrem em quase toda a área, visto que a Savana Arborizada sem floresta de galeria ocorre em maior extensão no município de Cavalcante.

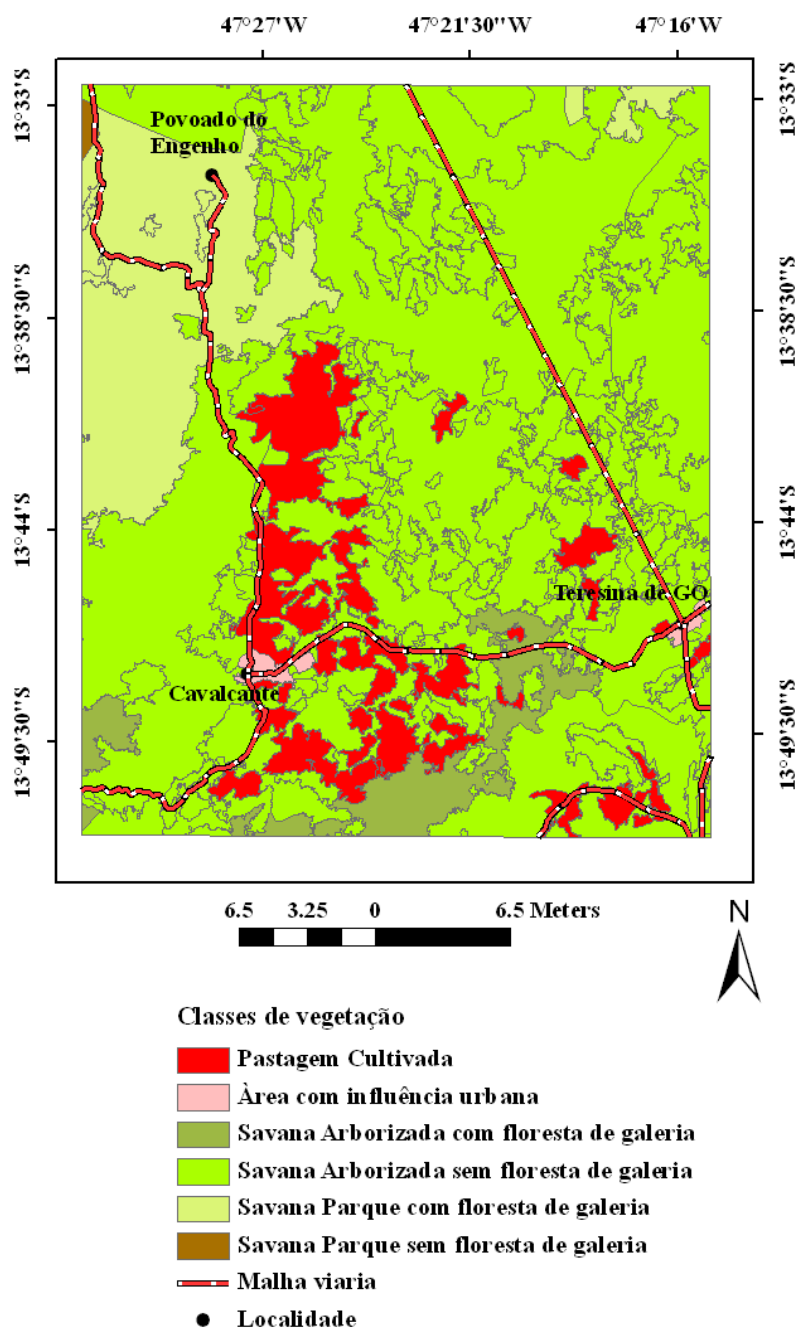


Figura 2.7 - Cobertura vegetal da área de estudo.  
 Fonte: Base de dados PROBIO (2007).

Nas áreas de terrenos drenados, a Savana Parque (IBGE, 1992) equivale aos subtipos Cerrado Ralo e Cerrado Rupestre e, às vezes, como Campo Sujo e Campo Rupestre. Nas áreas com terrenos mal drenados, a Savana Parque corresponde ao Parque Cerrado e a outras fisionomias (Vereda, Campo Sujo Úmido e Campo Sujo com Murundus) (PROBIO, 2007).

A Savana Parque sem floresta ocorre a noroeste do município de Cavalcante, enquanto a Savana com floresta de galeria é encontrada na porção central do mesmo município.

Entre Cavalcante e Teresina de Goiás, essas ocorrem próximas às áreas de pastagens cultivadas (PROBIO, 2007).

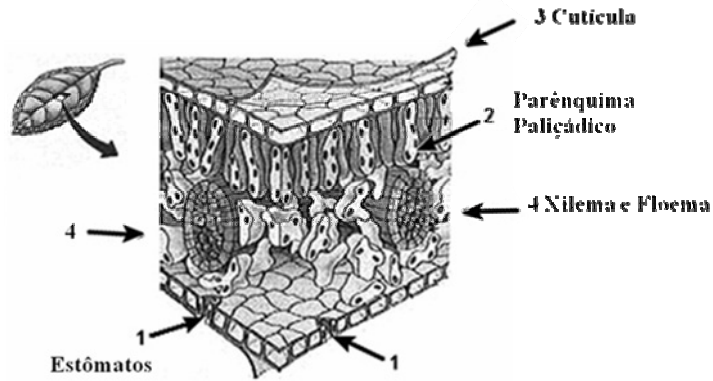
## **2.6 Sensoriamento remoto aplicado à vegetação**

A absorção da radiação eletromagnética pela vegetação implica na realização de fotossíntese. Esse processo consiste no fenômeno do qual a vegetação, para sintetizar suas moléculas orgânicas utiliza o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e a água. Na fotossíntese, há a transformação do carbono orgânico em  $\text{CO}_2$ , resultado da oxidação, fazendo com que a planta entre em processo de respiração e libere energia e calor sintetizando proteínas. Durante a fotossíntese, o oxigênio da molécula de água é oxidado e passa para o estado gasoso como  $\text{O}_2$  que é o gás atmosférico (Ricklefs, 2003).

A transformação fotoquímica da radiação eletromagnética em energia química ocorre devido à ação de organismos fotossintetizadores nos comprimentos de onda mais relevantes (Kerbaui, 2008): radiação ultravioleta (UV), radiação visível e radiação infravermelha. A maior quantidade de energia gerada nos processos fotobiológicos resulta da interação com a radiação na região do visível (0,40  $\mu\text{m}$  a 0,72  $\mu\text{m}$ ).

A estrutura foliar (Figura 2.8) permite o entendimento da interação da radiação eletromagnética com a vegetação, onde a morfologia da folha é fator relevante. A folha possui uma face ventral que recebe a maior quantidade de radiação eletromagnética e onde existe a epiderme que pode ser recoberta por diversos tipos de estruturas, como tricomas, escamas e às vezes camadas de cera, que exercem função de proteção. A epiderme é responsável por desempenhar funções específicas, como a formação de estômatos por meio de células alongadas. Na camada mais inferior, encontra-se o mesófilo paliçádico que possui células ricas em cloroplastos onde estão as organelas com os pigmentos fotossintetizantes. Na face dorsal da folha está o mesófilo esponjoso, ou parênquima esponjoso que possui lacunas entre as células preenchidas com gases oriundos dos processos de respiração e transpiração da

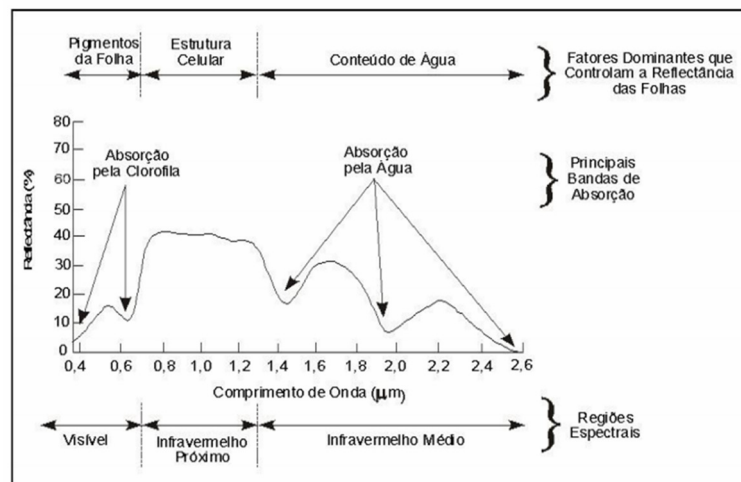
planta. A face dorsal frequentemente é a única a possuir estômatos, ou as possui em uma quantidade (Kerbaux, 2008).



**Figura 2.8** - Estrutura interna da folha.  
**Fonte:** Adaptado de Amabis & Martho (2003).

As diferentes estruturas foliares determinam as interações com a radiação eletromagnética, influenciando no comportamento do feixe que resulta em processos de reflexão, transmissão ou absorção (Ponzoni & Shimabukuro, 2010).

O comportamento espectral da vegetação sadia é analisado em três regiões do espectro eletromagnético: região do visível (0,4  $\mu\text{m}$  – 0,72  $\mu\text{m}$ ), infravermelho próximo (0,72  $\mu\text{m}$  - 1,1  $\mu\text{m}$ ) e infravermelho médio (1,1  $\mu\text{m}$  – 2,5  $\mu\text{m}$ ) (Figura 2.9), onde ocorrem os maiores picos de reflexão da radiação (Ponzoni & Shimabukuro, 2010).



**Figura 2.9** - Curva média de uma folha verde.  
**Fonte:** Novo (1992).

Na curva espectral, a região do visível (0,4  $\mu\text{m}$  – 0,72  $\mu\text{m}$ ) (Figura 2.9) mostra a interação da radiação com os seguintes pigmentos da folha: clorofila, carotenos e xantofilas. A radiação é absorvida pela clorofila que a transforma em calor ou fluorescência e a converte fotoquimicamente na forma de energia armazenada. O processo de fotossíntese promove absorção da radiação nas regiões do azul (0,45  $\mu\text{m}$ ) e do vermelho (0,65  $\mu\text{m}$ ), sendo que a clorofila presente na vegetação é responsável pela absorção da radiação na região do vermelho (Kerbaui, 2008).

Na região do infravermelho próximo, a curva espectral da vegetação apresenta baixa absorção da radiação. Na folha, ocorre espalhamento interno de radiação devido à presença de água no mesófilo. Portanto, quanto maior a quantidade de água na estrutura interna da folha maior será o espalhamento interno da radiação incidente, ocasionando maiores valores de reflectância (Ponzoni & Shimabukuro, 2010).

A curva espectral da vegetação (Figura 2.9) na região do infravermelho médio apresenta valores de reflectância com picos mais baixos, isso se deve a água presente na folha, onde absorve bastante a radiação incidente, principalmente entre as regiões de 1,3  $\mu\text{m}$  a 2,0  $\mu\text{m}$ , e mais pontualmente nos picos de 1,45  $\mu\text{m}$ , 1,95  $\mu\text{m}$  e 2,7  $\mu\text{m}$  (Ponzoni & Shimabukuro, 2010).

Além da preocupação com o comportamento espectral da estrutura da vegetação (folha e componentes internos), o estudo do sensoriamento remoto permite a compreensão dos fenômenos envolvidos aos dosséis vegetais, já que o mesmo é muito similar ao comportamento espectral da folha isolada, o que possibilita estudos da interação entre a energia eletromagnética e os diversos tipos fisionômicos da vegetação, da análise da paisagem e sua condição natural e antrópica. (Ponzoni & Shimabukuro, 2010).

De acordo com Ponzoni & Shimabukuro (2010), a reflectância de um dossel deve ser analisada a partir da sobreposição de camadas onde se podem observar dois fenômenos: o espalhamento múltiplo e a reflectância infinita. No primeiro fenômeno ocorre diminuição da radiação visível com o aumento de camadas de folhas e, de modo antagônico, na região do infravermelho próximo há o aumento da reflectância, com o aumento do número de camadas. Mas essa condição não é linear e ocorrerá outro fenômeno que é a reflectância infinita, onde a radiação do visível não apresentará aumento seqüencial com aumento apresentado pelas camadas. Na região do infravermelho também haverá diminuição dos valores de reflectância.

As imagens de satélite apresentam diversas aplicações para o estudo da vegetação. O formato matricial das imagens permite uma série de transformações algébricas a partir da



aplicação de realces espectrais e análises estatísticas que resultam em produtos. Dentre os processamentos para realçar as feições da vegetação se ressaltam os índices de vegetação e os modelos lineares de mistura espectral.

### 2.6.1 Índices de vegetação

Alguns processamentos aplicados em dados de sensoriamento remoto podem gerar novas imagens a partir de transformações radiométricas. A análise dos novos produtos pode fornecer informações relevantes como o realce do alvo investigado (Ponzoni & Shimabukuro, 2010). Ferreira *et al.* (2008) mostram que estudos da vegetação devem considerar como principais transformações espectrais, os índices de vegetação e os modelos de mistura espectral. Os índices de vegetação são muito úteis na obtenção de parâmetros biofísicos, no acompanhamento sazonal e fenológico. Os modelos de mistura espectral, ao decompor o sinal do *pixel*, contribuem no mapeamento de classes e na identificação de fitofisionomias.

Índices de vegetação podem ser desenvolvidos por razões entre a diferença e a soma, e pela combinação linear dos dados das bandas espectrais. Os índices aumentam o sinal da vegetação com a atenuação da irradiação solar e o efeito de *background* do solo. Isto ocorre pela reflexão da radiação nas regiões do vermelho e infravermelho próximo devido à atividade fotossintética da vegetação (Jackson & Huete, 1991).

Este fato decorre da densidade da cobertura vegetal que é observada nas regiões do visível e do infravermelho próximo. Quanto maior a densidade da cobertura vegetal, menor será a reflectância na região do visível, devido à maior disponibilidade de pigmentos fotossintetizantes. E na região do infravermelho próximo, quanto maior for o espalhamento múltiplo da radiação nas camadas da vegetação, maior será a reflectância (Ponzoni & Shimabukuro, 2010).

Na literatura são apresentados muitos índices de vegetação e vários são redundantes devido a sua funcionalidade e equivalência quanto ao conteúdo (Jensen, 2009). Mas é importante a revisão de alguns destes índices, pois suas contribuições são importantes em pesquisas que indiquem a cobertura de vegetação verde, o índice de área foliar (IAF), a porcentagem de cobertura verde, o teor de clorofila, a biomassa verde e a radiação fotossinteticamente absorvida.

Jackson & Huete (1991) dividem os índices em duas classes, os desenvolvidos a partir de razões e os desenvolvidos a partir de combinações lineares, os quais exploram a superfície-

dependente e/ ou o comprimento de onda-dependente das características dos dados. A razão do índice de vegetação pode ser o produto da razão simples entre dois pares de bandas espectrais qualquer. Em combinações lineares os índices são os conjuntos ortogonais de  $n$  equações lineares calculadas usando  $n$  dados de bandas espectrais.

O primeiro índice de vegetação desenvolvido consiste na razão entre a banda do infravermelho próximo pela banda do vermelho, chamado de *ratio vegetation index* (RVI). Foi utilizado por Jordan (1969) a partir da aplicação da razão das radiâncias  $0.800 \mu\text{m} / 0.675 \mu\text{m}$ , obtidos para gerar o índice de área foliar do dossel de uma floresta. O RVI pode ser representado pela seguinte equação (Eq. 1):

$$RVI = \frac{NIR}{red} \quad (1)$$

onde:

NIR= banda do infravermelho próximo

Red= banda do vermelho

O RVI para áreas densamente vegetadas, a quantidade refletida de radiação da região do vermelho é muito pequena, com isso esse índice não é muito sensível à vegetação esparsa. Deering (1978) *apud* Jackson & Huet (1991) verificou que a vegetação esparsa se tornava mais evidente pela razão entre a soma das bandas do infravermelho próximo e do vermelho por sua diferença e o RVI passou a ser denominado Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI).

Por se tratar de um índice normalizado o limite superior do NDVI é 1 (um), e o limite inferior é -1 (menos um) (Eq. 2). O limite inferior pode ser ligeiramente positivo ou negativo, dependendo das características do sensor e as unidades, das variáveis de entrada. O NDVI pode ser expresso pela seguinte equação (Eq. 2):

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} \quad (2)$$

onde:

$\rho_{NIR}$  = Infravermelho próximo  
 $\rho_{red}$  = Vermelho

Dentre os índices de vegetação, o NDVI é um dos mais utilizados, tal sucesso se deve a sua simplicidade e a sensibilidade à densidade de cobertura vegetal. Mas estudos demonstram que os produtos de dimensão global com o NDVI, derivados empiricamente por dados dos sensores AVHRR, MSS/Landsat e HRV/Spot, podem ser instáveis, variando com a cor do solo, as condições de umidade, dos efeitos da refletância bidirecional, e das condições atmosféricas (Jensen, 2009). Devido a esses problemas e a necessidade de constante calibração dos produtos foram desenvolvidos índices melhorados, com fatores de ajuste ao solo e/ ou para as condições da atmosfera. Nesse contexto surgiu o, Índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) definido pela seguinte equação (Eq. 3):

$$SAVI = \left[ \frac{\rho_{IVP} - \rho_V}{\rho_{IVP} + \rho_V + L} \right] \cdot (1 + L)$$

onde:

$\rho_{IVP}$  = Infravermelho próximo

$\rho_V$  = Vermelho

$L$  = Constante que minimiza o efeito do Solo (0 a 1)

Segundo Huete *et al.* (1988), o Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI) foi desenvolvido para minimizar o efeito do solo no seu valor final. O SAVI pode ser obtido a partir de uma constante  $L$  que pode corresponder a valores de densidades altas de vegetação,  $L = 0,25$ ; valores para vegetação de densidade média  $L = 0,5$  e  $L = 1$ , para densidades baixas de vegetação.

Para que o SAVI fosse menos sensível aos efeitos da atmosfera, devido à normalização da radiância nas regiões do visível e no infravermelho foi proposto por Kaufman & Tanré (1992), o Índice de Vegetação Resistente a Atmosfera (ARVI). Esse índice utiliza a diferença da radiância das bandas no azul e no vermelho, para corrigir a radiância da banda do vermelho

e reduzir os efeitos atmosféricos. Mas se conhecido o modelo de aerossol, o gama ( $\gamma$ ) normalmente é igual a 1,0 (Equação 4). Para minimizar os efeitos da atmosfera, podem ser usados ainda diferentes valores de gamas em áreas vegetadas continentais, marítimas ou desérticas. De acordo com Ponzoni & Shimabukuro (2010), o ARVI é quatro vezes menos sensível aos efeitos da atmosfera do que o NDVI sendo mais favorável para áreas totalmente cobertas pela vegetação. Pode-se representar o ARVI pela seguinte equação (Eq. 4):

$$ARVI = \frac{NIR + \gamma(B - R) - R}{NIR - \gamma(B - R) + R} \quad (4)$$

onde:

B= valor numérico do pixel na banda do azul

$\gamma = 1$  para minimizar os efeitos atmosféricos

R= valor numérico do pixel na banda do vermelho

Huete & Liu (1994) integraram a função  $L$  do SAVI e a normalização da banda do azul, do Índice de Vegetação Resistente a Atmosfera (ARVI), para compor o Índice de Vegetação Resistente a Atmosfera e aos Solos (SARVI). Esse índice corrige ruídos provenientes do solo como para os da atmosfera.

Como demonstrado por Huete *et al.* (1997) há diferenças e semelhanças na identificação da vegetação entre os índices de vegetação. Todos os índices mostram uma relação qualitativa, no entanto, autores demonstram que há diferenças significativas entre os índices em diferentes paisagens como o deserto, a pastagem e biomas florestais. E verificaram que o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) foi mais sensível na região do visível correspondente a banda de reflectância do vermelho, enquanto o índice de vegetação resistente ao solo e à atmosfera (SARVI), foram mais eficientes na detecção de variações no infravermelho próximo (NIR). Como resultado foi visto que o NDVI satura em áreas florestadas, enquanto o SARVI não satura o contraste com variações no infravermelho próximo. Mas o NDVI é muito mais sensível às variações do *background* do dossel que o SARVI em regiões áridas e semiáridas (Huete *et al.*, 1997).

O Índice de Vegetação Melhorado (EVI) desenvolvido pelo MODIS *Land Discipline Group*, pode ser considerado como um índice que otimiza o sinal da vegetação, principalmente em áreas com maiores densidades de biomassa a partir da redução da influência do sinal da

atmosfera e do solo. Jensen (2010) o descreve como um NDVI modificado, contendo o fator de ajuste para os solos  $L = 1$  e os coeficientes  $C_1 = 6$  e  $C_2 = 7,5$  que ajustam o efeito dos aerossóis da atmosfera, o  $G = 2,5$  e o fator de ganho (Eq. 5).

$$EVI = 2.5 \cdot \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + (6\rho_{red} - 7.5\rho_{blue}) + 1} \quad (5)$$

onde:

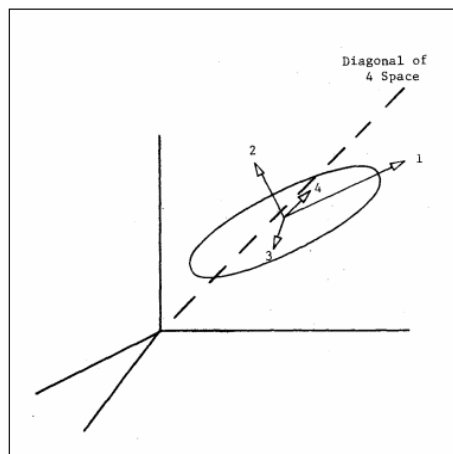
$\rho_{NIR}$  = infra vermelho próximo

$\rho_{red}$  = vermelho

$\rho_{blue}$  = azul

Além dos índices de vegetação obtidos pela razão entre as bandas podem também ser calculados a partir de combinações lineares de duas ou mais bandas espectrais outros índices de vegetação (Jackson & Huete, 1991).

Kauth e Thomas (1976) aplicaram a análise de componentes para obter um Índice Ortogonal de Combinação Linear (LCI) utilizando o sensor MSS (*Scanner Multi Espectral*) satélite LANDSAT. Os autores selecionaram grupos de píxels identificados como solo e outros como vegetação, e calcularam um novo espaço de 4 dimensões (Figura 2.10).



**Figura 2.10** - Distribuição de quatro dimensões.  
**Fonte:** Kauth & Thomas (1976).

Os quatros novos eixos são constituídos por quatro novos eixos: índice brilho do solo (*brightness*), índice verdor da vegetação (*greenness*), índice de material amarelo (*yellowness*) e alvo não específico (*nonsuch*). Essa transformação ficou conhecida como *Tasseled Cap* ou *Transformação de Kauth-Thomas*, onde o nome se deve a forma dos gráficos gerados apresentarem forma semelhante a um gorro.

O eixo *brightness* (BR) representa um vetor que descreve a magnitude da energia reflectida, particularmente estão os solos (linha do solo). O *greenness* (GN) representa um plano ortogonal contendo toda a informação da vegetação. O eixo o *yellowness* (YE) forma um plano ortogonal com os eixos que representam os solos e a vegetação. Esse eixo tem sido relacionado a interferência atmosférica e a vegetação senescente. O eixo *nonsuch* (NS) contém a maior parte do ruído dos dados.

Crist & Kauth (1986) desenvolveram a transformação *tasseled cap* para o sensor TM/Landsat por meio da derivação das bandas do visível, do infravermelho próximo e do infravermelho médio transformando-as nas variáveis, *brightness*, *greenness* e *wetness*. Crist & Cicone (1984) identificaram um terceiro componente (*wetness*) que está relacionado a feições de solo, incluindo a condição de umidade do mesmo utilizando bandas do infravermelho médio do TM/Landsat, esse eixo prevê que quanto maior o conteúdo de umidade, mais brilhante é a resposta. Além desses três eixos Crist & Kauth (1986) identificaram uma quarta componente relacionada com a névoa ou *Haze*.

Richardson & Wiegand (1977) propuzeram um índice bidimensional, com base na relação cartesiana entre as bandas do infravermelho próximo e do vermelho onde a distância perpendicular entre a reflectância de um dossel e a linha do *background* do solo é descrita por *a* e os coeficientes da linha do solo são declarados por *b* (Eq. 6):

$$PVI = \left[ \left( \frac{1}{\sqrt{a+1}} \right)^2 (\rho_{iv} - a\rho_v - b) \right] \quad (6)$$

onde:

$\rho_{iv}$  = infravermelho próximo

$\rho_v$  = vermelho

a e b = parâmetros da linha do solo

Os índices de vegetação vêm sendo gerados a partir das bandas de diversos sensores orbitais e utilizados para uma ampla aplicação nas áreas das Geociências. Destaca-se o trabalho de Ferreira *et al.* (2004) que indica as potencialidades da aplicação dos índices de vegetação NDVI e EVI, a partir de imagens do sensor orbital MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*) para discriminação do Cerrado com apresentação de diferenciações das formações florestadas, savânicas e campestres.

Bezerra *et al.* (2007) apresentam as potencialidades do CBERS-2 (Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres, *China-Brazil Earth Resources Satellite*) para discriminar classes de cobertura do uso da terra identificando também, as formações savânicas do Cerrado no Distrito Federal (arbustiva, herbácea e arbórea). Apesar de elencar outros usos da terra, os autores apresentam a importância da abordagem multitemporal de imagens CBERS-2, sensores CCD e IR-MSS, indicando que essas imagens são mais eficientes para a discriminação dos alvos do Cerrado que os dados monotemporais. Entretanto, ocorre maior dificuldade na discriminação de classes de uso da terra a partir de imagens CCD devido sua baixa resolução temporal.

Ponzoni & Shimabukuro (2010) lembram que estudos em vegetação homogênea têm obtido sucesso, quanto à classificação e estimativa de áreas, a partir do uso de sensores de resolução média. Mas o mesmo não ocorre em áreas onde a vegetação não é homogênea ou há diferentes fitofisionomias, como no bioma Cerrado, sendo que a precisão nos processos de classificação pode se tornar reduzida.

Pesquisas em Sensoriamento remoto vem utilizando os Modelos Lineares de Mistura Espectral (MLMEs) para a diferenciação da vegetação do Cerrado, principalmente no uso de dados multiespectrais. Mas a discriminação destas fitofisionomias ainda se configura um desafio entre as classes herbáceas e arbóreas, como verificado no trabalho de Ferreira *et al.*(2003) que usam os *endmembers*<sup>3</sup> para modelar as misturas espectrais existentes no Cerrado e na averiguação dos efeitos da atmosfera na aplicação do MLME, a partir do método WLS (*Weighted Last Square*). Foi identificado nessa pesquisa um realce melhor para os *endmembers* amostrados e suas correspondências nas imagens fração principalmente para o estrato herbáceo. Os autores verificaram que a composição colorida resultante do MLME

---

<sup>3</sup> Os *endmembers* são as componentes contidas no pixel (vegetação, solo e sombra/água) (PONZONI e SHIMABUKURO, 20010).

destacou quatro classes de Cerrado (Campo Limpo, Campo Cerrado, Cerrado *Sensu Strictu* e Mata de Galeria).

No Trabalho de Mello *et al.* (2009) o MLME constitui parte do método de diferenciação de fitofisionomias e sugerem, devido as características sazonais do Cerrado, que sejam considerados os *endmembers*, a vegetação seca. Os autores apresentam o comportamento espectral das fitofisionomias do Cerrado por meio de bandas espectrais e bandas sintéticas derivadas do MLMEs buscando equacionar as inter-relações espectrais entre essas fitofisionomias. Entre as fitofisionomias analisadas por Mello *et al.* (2009), (Campo Limpo, Campo Sujo, Campo Cerrado, Cerrado *Sensu Stricto* e Mata de Galeria), apenas Campo Limpo e Mata de Galeria obtiveram maior êxito quanto a sua discriminação.

A discriminação de Mello *et al.* (2009) apoiou-se no NDVI e foram propostos dois índices com base nas bandas sintéticas: Índice de Vegetação Seca Normalizado (IVSN) e Índice de Vegetação Verde Normalizado (IVVN). Esses resultaram em um produto que potencialmente pode ser utilizado na identificação das fitofisionomias Mata de Galeria e Campo Limpo (Mello *et al.*, 2009).

## 2.7 O Método gamaespectrométrico

O surgimento do interesse no levantamento radiométrico está associado à demanda de exploração dos combustíveis nucleares e na pesquisa de elementos não radioativos como o zircônio e o titânio. Além da intensa aplicação do método para o mapeamento geológico, devido às diferentes assinaturas radioativas apresentadas pelas rochas, há também na investigação de padrões gamaespectrométricos para outros elementos da paisagem como o solo e a vegetação, que tem sido abordado com crescente interesse (Travasso & Figueiredo, 1992; Travasso & Pires, 1994; Santos *et al.*, 2008).

Na natureza existem mais de cinquenta isótopos radioativos instáveis, mas devido a sua raridade, escassez ou baixa radioatividade emitida, os elementos que mais se destacam para a investigação do fenômeno são: urânio ( $^{238}\text{U}$ ), tório ( $^{232}\text{Th}$ ) e potássio ( $^{40}\text{K}$ ) (IAEA, 2003).

A radiação gama é detectada na superfície da Terra a partir do processo de desintegração de elementos radioativos ou radioelementos. A desintegração ocorre devido à instabilidade do núcleo do átomo que libera energia a partir de emissões de partículas alfa e/ou beta e radiação gama. A radiação alfa ( $\alpha$ ) é constituída por dois prótons e dois nêutrons



( $2\ ^4\text{He}_2$ ), essa emissão possui pouco poder de penetração, podendo inclusive ser absorvida por materiais pouco espessos, como uma folha de papel posicionada a alguns centímetros da fonte de radiação. A radiação beta ( $\beta^+$  ou  $\beta^-$ ) apresenta maior poder de penetração que a partícula alfa. Mas é necessário apenas um obstáculo de alumínio, com espessura milimétrica, para que ocorra interação da energia com a matéria. A radiação *gama* ( $\gamma$ ) ocorre quando um núcleo ainda permanece excitado após a emissão ou decaimento de partículas alfa ou beta, devido à busca do estado de equilíbrio do núcleo atômico. Essa radiação apresenta frequência ( $f$ ) elevada ou comprimento de onda pequeno ( $\lambda$ ) que lhe confere uma energia mais penetrante e maior interação com os materiais (Feltre & Yoshinaga, 1974; IAEA, 2003). Para a radiação gama ser barrada é necessário um obstáculo de chumbo, com espessura centimétrica.

A radiação gama presente nas rochas e solos é gerada devido a presença dos elementos potássio ( $^{40}\text{K}$ ), urânio ( $^{238}\text{U}$ ) e tório ( $^{232}\text{Th}$ ) que são formadores da química mineral. O potássio é um dos elementos formadores da crosta continental, com média crustal de 2 a 2,5%, devido a sua importância como elemento que constitui os minerais formadores de rocha (feldspatos potássicos e micas). As médias para urânio (2 a 3 ppm) e tório (8 a 12 ppm) são baixas, quando comparadas com a média do potássio, pois esses elementos constituem minerais menos abundantes na crosta (Wilford, 1997; IAEA, 2003).

Segundo Dickson & Scott (1997), com o processo de intemperismo, o K é removido dos minerais primários, fazendo com que o mesmo forme outros minerais como a illita ou podendo ser adsorvido em pequenas quantidades em outras argilas. O potássio apresenta baixa concentração ou é ausente em minerais máficos que constituem rochas ultrabásicas como dunitos e periodotitos. Entretanto, ele ocorre com alta concentração nas rochas ácidas, como os granitos, devido à presença de feldspatos potássicos.

O isótopo instável do potássio ( $^{40}\text{K}$ ) representa 0,02% do potássio natural da superfície da Terra e possui meia-vida<sup>4</sup> de  $1,3 \times 10^9$  anos. O processo de decaimento forma  $^{40}\text{Ar}_{18}$  com a emissão de raios gama com energia de 1,46 MeV, que é utilizado para estimar a presença de potássio no ambiente (Dickson & Scott, 1997; IAEA, 2003).

Os radioisótopos do urânio ocorrem como  $^{238}\text{U}$  e  $^{235}\text{U}$ , com meias-vida de  $4,46 \times 10^9$  e  $7,3 \times 10^8$ , respectivamente. As séries de decaimento destes terminam com os isótopos estáveis  $^{206}\text{Pb}$  e  $^{207}\text{Pb}$ , respectivamente (IAEA, 2003).

---

<sup>4</sup> A meia-vida é a quantidade de tempo característica de um decaimento. A quantidade de massa de um isótopo que decai possui um valor no início do processo, na meia-vida essa quantidade terá metade deste valor (FELTRE e YOSHINAGA, 1974).

O urânio na crosta terrestre pode apresentar dois estados de valência, o  $U^{4+}$  e o  $U^{6+}$ , sendo que a de forma mais reduzida é o  $U^{4+}$  é encontrada em minerais insolúveis. O  $U^{6+}$  está associado com ânions que formam espécies solúveis e apresentam mobilidade devido à adsorção de óxidos hidratados de ferro, colóides e argilominerais (Dickson & Scott, 1997).

A uraninita é um mineral de óxido de urânio com ocorrência comum em veios hidrotermais e rochas sedimentares. Pode estar como mineral formador de rocha como óxidos (uraninita) e silicatos (uranotorita). Também, ocorre como minerais acessórios como zircão, monazita, apatita, titanita e alanita, comuns em rochas ígneas e metamórficas. O zircão e monazita são os mais resistentes ao intemperismo (Dickson & Scott, 1997; IAEA, 2003).

O tório é o radioelemento que ocorre naturalmente como radioisótopo  $^{232}\text{Th}$  que resulta na série de decaimento que termina com o isótopo estável  $^{208}\text{Pb}$ . As emissões de radiação gama dos produtos filhos do  $^{232}\text{Th}$  e do  $^{238}\text{U}$ , respectivamente,  $^{208}\text{Tl}$  e  $^{214}\text{Bi}$ , são utilizadas como indicadoras da presença dos isótopos pai, a partir da detecção de suas energias em 2,614 MeV e 1,765 MeV. Em geral, cerca de 60 anos é necessário para estabelecer o equilíbrio radioativo na série de decaimento do tório (Dickson & Scott, 1997; IAEA, 2003).

O tório é um radioelemento de menor mobilidade e baixa solubilidade, exceto na presença de soluções ácidas, como em ambientes com ácidos húmicos. É um elemento actínídeo com um estado de valência de  $\text{Th}^{4+}$  em solução, possuindo condições de valência mais baixa em estado e forma compostos com os ânions fluoreto, oxalato, iodato e fosfato de insolúveis precipitados (Dickson & Scott, 1997; IAEA, 2003).

O Th pode estar presente em minerais como a alanita, monazita, xenotímio, e zircão em níveis acima de 1000 ppm. A partir da decomposição de minerais durante o intemperismo, o tório pode ser retido em óxidos e hidróxidos de Fe ou Ti e em argilas. Tal como acontece com U, pode também ser transportado, adsorvido em argilas coloidais e óxidos de ferro (Dickson & Scott, 1997).

As concentrações de K, U e Th no solo são determinadas pelas radioatividades oriundas de minerais da rocha que é a fonte formadora. Por estar presente em grande parte da superfície terrestre, o substrato rochoso é coberto pelo solo, que por sua vez emana radiação variável dependendo das condições do ambiente e por sua disposição homogênea ou heterogênea (Santos *et al.*, 2008).

Alguns fatores podem influenciar nas detecção das medidas de radiação gama, como a atenuação ou o espalhamento. Segundo Santos *et al.* (2008), para a cobertura de solo são

necessários apenas 30 cm de solo para absorver cerca de 95% da radiação. Outros fatores também influenciam como a umidade e a cobertura vegetal, que promovem o decréscimo das contagens de U e Th, podendo contribuir para a redução de até 15% do K, por este ser passível de absorção pelas plantas.

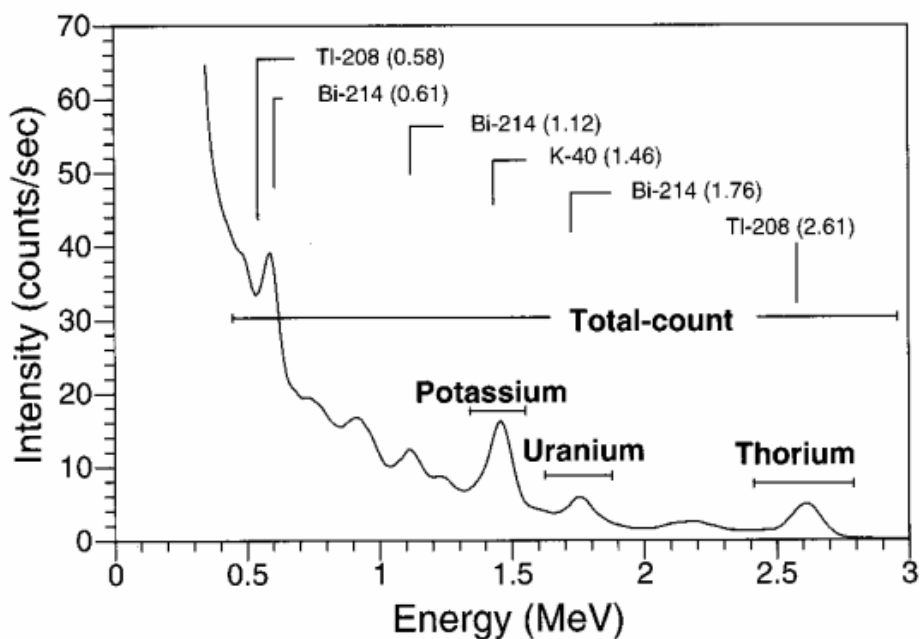
A água e suas concentrações no solo ou mesmo dentro do tecido da planta podem atunar os raios gama. No entanto, os efeitos da umidade do solo na emitância de raios-gama são complexos. A intensidade de raios gama pode aumentar ou diminuir, dependendo da condição de umidade no solo. Em geral, o aumento de umidade do solo em 20 % resultará em uma redução de 20 % de raios gama emitidos. Como a variação da radiação pode estar relacionada a diferentes condições de umidade de solo, o processo de aquisição de dados gamespectrométricos deve acontecer durante os períodos secos.

A vegetação pode atenuar a radiação gama que atinge a aeronave, isto dependerá de sua densidade. Os raios gama são atenuados por vegetação densa e volumosa com material lenhoso e água retida na copa das árvores (Wilford *et al.*,1997).

Nos ambientes tropicais, são utilizados índices de molhamento derivados de imagens processadas pelo satélite Landsat TM, para corrigir os dados de gamaespectrometria aérea para efeitos de atenuação da água e da vegetação (Wilford *et al.*,1997).

A gamaespectrometria aérea é uma técnica de sensoriamento remoto passiva. Os raios gama possuem radiação com comprimento de ondas eletromagnéticas curtas que são emitidos em diferentes picos de energia que correspondem aos decaimentos radioativos dos radioelementos presentes no solo e/ ou nas rochas (Wilford *et al.*,1997).

Convencionalmente para a aquisição e processamento dos dados gamaespectrométricos e para o monitoramento dos radioelementos presentes nos solos e rochas, utiliza-se quatro janelas espectrais 1,46 MeV ( $^{40}\text{K}$ ), 1,76 MeV ( $^{238}\text{U}$ ) e 2,62 MeV ( $^{232}\text{Th}$ ). A janela de contagem total (CT) é a medida da radioatividade total, que permite detectar a presença de fontes anômalas. As janelas do K, Th e U medem a intensidade e a energia da radiação, com posicionamento ajustado para a detecção das fontes diagnósticas dos radioelementos (Figura 2.11) (Minty, 1997).



**Figura 2.11** - Espectro de energia gerada pelos raios gama, com os picos das janelas da CT (contagem total), K, Th e U.  
**Fonte:** Minty, (1997).

## 2.8 Aplicação da gamaespectrometria na vegetação

Na literatura, não constam trabalhos que se utilizem da gamaespectrometria para a discriminação direta da vegetação. Talvez isto se deva ao emprego desse método por profissionais ligados, principalmente a geologia. Entretanto, alguns trabalhos pioneiros tem apresentado possíveis potencialidades de uso dos dados gamespectrométricos para o estudo da vegetação, como o trabalho de Travassos & Pires (1994).

A atenuação da radiação gama ocorre quando parte da energia incidente na matéria interage ou parte do feixe de radiação é “aprisionado/ transformado”. Travassos & Pires (1994) determinaram o efeito de blindagem de uma floresta utilizando fonte de radiação gama por meio de dois métodos: a *Aproximação Óptica* e o *Método de Monte Carlo*. Para estimar o efeito de blindagem de uma floresta tropical, desenvolveram a hipótese de um modelo de camadas para um meio absorvedor. A floresta estudada corresponde a uma fitomassa aérea, um modelo utilizado que pode gerar discrepâncias na estimativa do efeito de atenuação em até 20%, dependendo da altura, da distribuição das fontes e da energia dos ftons. O mesmo estudo verificou que o coeficiente de correção, do efeito de atenuação, é praticamente

independe da altura, mas depende da distância da fonte ou da interface mais próxima, que pode ser expressa em unidades de altura.

Ao utilizar o *Método de Monte Carlo* para estimar o efeito de anisotropia da biomassa aérea, verificaram que há discrepâncias de até 10% para fontes de raios maiores que 0,5 h (h = altura) (Travassos & Pires, 1994). Segundo Travassos & Figueiredo (1992), o efeito de atenuação da vegetação no estudo de florestas tropicais tem recebido pouca atenção de modo que é de grande relevância o modelo numérico desenvolvido para que novas pesquisas apliquem a gamaespectrometria no estudo da vegetação, especificamente no que se refere a medidas de biomassa.

A gamaespectrometria aérea é uma ferramenta eficaz de mapeamento geológico para diversos ambientes, a resposta de raios gama reflete a mineralogia e a geoquímica do material de origem (El-sadek, 2002). Mas a premissa que indica a possibilidade de discriminação de fitofisionomias vegetais pode ser atendida devido aos muitos estudos que apontam a propriedades do solo, como um dos fatores de sua caracterização.

O solo é formado, entre outros fatores, por parte do material de origem, ou seja, pela rocha. Os levantamentos gamaespectrométricos utilizam os primeiros 30 cm de solo para analisar a variação geoquímica dos radioelementos. Essa camada sofre os efeitos do intemperismo que faz com que haja a perda de K em todos os tipos de rochas, já que esse radioelemento é mais solúvel. A perda dos radioelementos U e Th nos solos está em torno de 20 a 30%. No processo de intemperismo físico e químico, os radioelementos se desprendem das rochas, sendo redistribuídos e incorporados ao regolito. Podem ocorrer diferenças entre a fonte dos radioelementos e o regolito, quanto às características dos radioelementos devido a reorganização textural e geoquímica que ocorrem no perfil intemperizado. Em rochas intermediárias e básicas há pouca alteração dos radioelementos durante o início do processo de intemperismo, mas a pedogênese pode constituir solos com duas ou três vezes mais de U e Th do que a encontrada na rocha mãe (Wilford *et al*, 1997).

Vegetação e solo estão intimamente relacionados, mas é difícil identificar a causa e o efeito da relação entre eles. Por exemplo, a vegetação pode agregar e proteger a superfície do solo contra a erosão hídrica e eólica, e influenciar a transferência de nutrientes para a solução do solo, especialmente os elementos ferro e alumínio, adicionando componentes orgânicos no solo. Outras características ambientais, tais como a geomorfologia, a drenagem e quantidade

de água no solo têm sido estudadas, a fim de explicar essas relações (Furley, 1996; Oliveira-Filho *et al.*, 1997).

Ruggiero *et al.* (2002) demonstram, por exemplo, a relação entre a separação da vegetação e do solo, por meio de um gradiente de três fisionomias de Cerrado e uma mancha florestal contígua sazonal. Dentre os questionamentos dos autores estão a verificação da relação entre o solo e as fitofisionomias. O estudo avalia a profundidade do solo como uma importante variável para se correlacionar com a fisionomia da vegetação. Os autores obtiveram resultados estatísticos significativos, demonstrando que os solos mais superficiais foram os que melhor apresentaram suas propriedades relacionadas com a variação da vegetação fisionômica. Os solos mais profundos, 80-100 cm, não apresentaram correlação com as diferenças fitofisionômicas. Tal correspondência, entre variação considerável de plantas e características da superfície do solo, pode ser explicada pela vegetação ser influenciada pelas características do solo nas camadas superiores, como por exemplo, a transferência de matéria orgânica através da ciclagem de nutrientes.

Os dados de gamaespectrometria apresentam relação com os materiais componentes do solo, em profundidades superficiais. Para entender a relação com a vegetação e assim discriminar fitofisionomias, Wilford (1997) relaciona os dados de gamaespectrometria aérea no mapeamento de solos, por meio de suas propriedades radiométricas, que são oriundas da porção rasa do solo entre 30 a 45 cm. A intensidade da radiação gama, emitida pela superfície, está associada à mineralogia e a química das rochas e com o processo de intemperismo incidente sobre estes materiais. O potássio é um constituinte comum de argilominerais, já o U e o Th podem ser retidos por óxidos de ferro ou por argilominerais. Seria possível então diferenciar fisionomias associadas aos argilominerais e associadas a óxido de ferro, por exemplo.

A maioria dos estudos do Cerrado e sua relação com o solo está voltada para a diferença entre as composições florísticas e as formas fisionômicas (Haridasan, 2007). A fertilidade do solo e a umidade são fatores importantes para se considerar a distribuição da vegetação de Cerrado. A maioria dos solos do bioma Cerrado é distrófica, com baixo pH, assim como a disponibilidade de cálcio e magnésio, e alto teor de alumínio, os Cerrados crescem em solos bem drenados, concentrando-se em interflúvios e evitando fundos de vales. Mas as chuvas sazonais e a baixa fertilidade do solo são insuficientes para explicar a distribuição atual da vegetação do Cerrado (Oliveira Filho & Ratter, 2002).

Ao tratar da nutrição mineral das plantas nativas do Cerrado, Haridasan (2000) aborda a questão da deficiência nutricional dos ecossistemas do Cerrado e a presença do alumínio em plantas nativas. Entre as diferentes abordagens que tratam a fertilidade, a variedade fitofisionômica é uma delas. Reatto *et al.* (2008) mostram que para se medir a fertilidade do solo é utilizada a saturação por base (V%), a capacidade de troca catiônica (T), a saturação por alumínio (m%) e o grau de acidez (pH).

Os solos do Cerrado possuem baixa fertilidade, concentram baixo teor de nutrientes nas folhas das espécies nativas em comunidades com solos distróficos. Mas nas áreas de maior fertilidade há diferenças na composição florística e maior concentração de nutrientes nas folhas. É importante ressaltar que há diferentes espécies para diferentes solos, e há espécies que são indiferentes quanto à fertilidade (Haridassan, 2000; Ratter *et al.*, 1978).

Haridasan (2000) destaca que a maneira mais eficiente de mostrar a deficiência nutricional do Cerrado é por meio da comparação da biomassa e do estoque de nutrientes. Como a diferença da nutrição é um dos fatores de diferenciação das fitofisionomias do Cerrado, pode-se deduzir que dados relacionados aos radioelementos, como o K, que é um indicador nutricional do solo, e os índices de vegetação, utilizados a partir de processamentos de imagens de satélites orbitais que indicam a densidade da biomassa vegetal, podem contribuir para essa análise.

Pode-se verificar, por exemplo, que o Cerrado e o Cerradão apresentam diferenças em suas comunidades em solos distróficos e mesotróficos. Entretanto, Haridassan (2000) verificou que com a mesma fertilidade do solo, não há diferenças significativas entre Cerrados e Cerradões em solos distróficos. Também, foi observado pelo autor que os Cerradões se estabeleceram quando o solo ainda poderia fornecer nutrientes em quantidades maiores para o estabelecimento de uma biomassa maior.

As Matas de Galeria também ocorrem em solos distróficos e mesotróficos, o que reflete nas diferenças nos nutrientes das folhas e na serrapilheira. A alta concentração de nutrientes está associada ao acúmulo de nutrientes por meio da lixiviação e transporte durante a formação da paisagem e do desenvolvimento de solos e vegetação do passado.

Outro fator positivo para a integração de dados de gamaespectrometria aérea, com a descrição do solo e a identificação fitofisionômica é apresentada por Becegato & Ferreira (2005), onde demonstram que as concentrações gamaespectrométricas de K, Th e U são maiores em ambientes com solos mais argilosos do que em solos arenosos. As características

desses solos podem indicar fitofisionomias diferenciadas como demonstrado pelo trabalho de Spera *et al.* (2005), que identificaram relações físico-hídricas entre o solo e as fitofisionomias do Cerrado, mas ponderaram que nem sempre a capacidade de água e a classe de solo estão associadas ao tipo de vegetação. A ocorrência do Cerrado *sensu stricto* pode estar associada a fatores químicos, físicos e climáticos, pois acontece em solos rasos e profundos, mas a capacidade de retenção de água é muito variada. Já o Cerradão ocorre em solos com boa capacidade de retenção de água.

## **2.9 Absorção mineral das plantas e assimilação de radioisótopos no solo**

Desde o século XIX, os estudos de análise química da vegetação vêm sendo sistematizados. Inicialmente os cientistas observaram o comportamento dos nutrientes essenciais ao crescimento das plantas, esses estudos foram evoluindo para análises das plantas como indicativo da disponibilidade de determinados nutrientes. Na primeira metade do século XX esses conhecimentos se ampliaram para o entendimento do crescimento das plantas com as concentrações elementares contidas na matéria seca da planta inteira. Esses estudos ainda são utilizados para atender as demandas de produção agrícola ao analisar as concentrações de elementos na estrutura da planta, como folhas, caules, pecíolos, frutos ou grãos, coletadas em diferentes momentos durante seu desenvolvimento (Munson, 1998). Além de estudos utilizados nessa perspectiva, a análise das plantas também tem sido uma técnica para a

prospecção biogeoquímica e geobotânica, (Akçay *et al.*, 1998; Almeida *et al.*, 2007; Cunha *et al.*, 2010, Shtangeeva, 2006).

As plantas podem viver em ambiente inorgânico, ou seja, são organismos autotróficos capazes de utilizar o CO<sub>2</sub> da atmosfera, água e nutrientes do solo. A vegetação está na base da cadeia alimentar e utiliza das substâncias do ambiente inorgânico para produzir matéria orgânica e oferecer substâncias para a organização dos seres heterotróficos (Kerbaudy, 2008). O entendimento dos processos de nutrição mineral das plantas também oferece subsídios para



compreender o desenvolvimento fisiológico e sua condição morfológica na paisagem, pois a essencialidade nutricional das plantas é um dos fatores que caracterizam sua biomassa.

Um elemento é considerado essencial para a planta quando o seu desenvolvimento não pode ser completado sem ele, não pode ser substituído por qualquer outro elemento, e desempenha uma função essencial na planta. Podemos classificá-los em macronutrientes e micronutrientes (Tabela 1) (Munson, 1998; Kerbaudy, 2008).

**Tabela 1** - Macro e Microelementos essenciais às plantas.

<b>Macroelementos</b>	<b>Microelementos</b>
Carbono (C)	Cloro (Cl)
Hidrogênio (H)	Ferro (Fe)
Oxigênio (O)	Boro (B)
Nitrogênio (N)	Manganês (Mn)
Fósforo (P)	Sódio (Na)
Enxofre (S)	Zinco (Zn)
Cálcio (Ca)	Cobre (Cu)
Magnésio (Mg)	Níquel (Ni)
Potássio (K)	Molibdênio (Mo)
	Silício (Si)

O carbono (C), o oxigênio (O), e o hidrogênio (H) estão presentes no dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) no ar, nas folhas e na água (H<sub>2</sub>O), por meio de chuva e, ou irrigação, onde são absorvidos pelas plantas a partir do solo. Os elementos minerais, nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) são conhecidos como macronutrientes. Os elementos: boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), ferro (Fe), molibdênio (Mo), e zinco (Zn) são conhecidos como micronutrientes (Munson, 1998; Kerbaudy, 2008). O sódio (Na) e silício (Si) também são considerados como elementos importantes na fixação de nutrientes para algumas plantas cultivadas (Miranda *et al.*, 2002). Esses elementos são benéficos para plantas superiores, o níquel (Ni), o cromo (Cr), o selênio (Se) e o vanádio (V), em baixas concentrações, são citados como benéficos para algumas plantas. O cobalto (Co) e o níquel são essenciais para a fixação simbiótica de N<sub>2</sub> na planta, um processo que pode influenciar drasticamente o crescimento de leguminosas cultivadas em ambientes deficientes de N<sub>2</sub> (Munson, 1998).

A vegetação do Cerrado apresenta variação de fertilidade, essa condição reflete em sua fitofisionomia, além de diferenciações na composição florística, fitossociologia, e nas áreas onde há maior fertilidade, as espécies apresentam diferenças na composição florística quanto à densidade e dominância apresentando maiores concentrações de nutrientes nas folhas. Essa variação é dependente de solos distróficos e mesotróficos. Apesar da deficiência nutricional do Cerrado constituir um dos fatores que definem sua baixa biomassa aérea se comparado a outras florestas, como a floresta tropical e a floresta secundária, o Cerrado apresenta maior biomassa subterrânea em relação a biomassa aérea.

Na camada arbórea, as fitofisionomias campestres e arbustivas também apresentam deficiências nutricionais, demonstrando uma característica desse bioma às condições de baixa fertilidade no solo, o que não significa que em condições de maior fertilidade elas também não possam responder a disponibilidade dos elementos essenciais à nutrição.

Uma das maiores dificuldades nos estudos do Cerrado é identificar diferenças ambientais responsáveis pelo mosaico fitofisionômico, mas, entre outros fatores, o estado nutricional dos solos influencia o gradiente fisionômico (Goodland e Pollard, 1973; Haridasan, 2000; Skorupa *et al.*, 2011).

A absorção de nutrientes pelas plantas depende de fatores que afetam o solo, assim como, a própria capacidade de aprisionar o nutriente. Os nutrientes em solução do solo provêm de muitas fontes tais como, a dissolução dos materiais primários, a decomposição da matéria orgânica, e até intervenções externas como a aplicação de fertilizantes (Lopez, 1985).

Uma vez em solução, o nutriente pode sofrer várias reações. Como exemplo dessa condição, os ânions de nitrato e cloro são muito solúveis sendo absorvidos pelas plantas e microorganismos. O sulfato atua de forma similar aos alcalinos e são adsorvidos nos solos ácidos. A maioria dos nutrientes forma compostos, mas os menos insolúveis tendem a manter uma concentração de equilíbrio na solução do solo. Portanto, os nutrientes da solução do solo estão em equilíbrio com os elementos adsorvidos (Lopez, 1985). Os cátions de cobre e o zinco, por exemplo, que são ácidos de Lewis, formam complexos com a matéria orgânica do solo, o ferro e o alumínio formam hidróxidos e óxidos insolúveis, o fósforo forma fostatos de ferro (Lopez, 1985).

O pH do solo é um fator determinante de solubilidade desses elementos. A solubilidade dos hidróxidos de ferro e alumínio depende dos grupos OH, e decresce quando o pH aumenta. O Cation de H compete diretamente com os outros ácidos de Lewis para ocupar

lugares mais complexos, e, por conseguinte a solubilidade do zinco e do cobre aumenta quando o pH baixa (Lopez, 1985).

As concentrações dos íons de H determinam a capacidade de troca dependente do pH e também da capacidade de troca de ânions, portanto, afetando a concentração dos cátions e ânions trocáveis. Os anions de molibdato e sulfatos adsorvidos por troca catiônica, assim como o fósforo ligado ao ferro e ao alumínio, incrementam a solubilidade quando aumenta o pH. Essa variável controla ainda, as solubilidades dos carbonatos e silicatos, e afeta algumas reações redox, influenciando a atividade de alguns microorganismos e determinando a forma química dos fosfatos e carbonatos em dissolução no solo (Lopez, 1985).

O potencial redox é um fator determinante da concentração de um nutriente na solução do solo, pois possui relação com a aeração do solo, que por sua vez, depende da respiração microbiana e da velocidade de difusão do oxigênio. Os elementos de classificação normal de potencial redox no solo podem existir em mais de um estado de oxidação. Esses elementos são: carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre, ferro, magnésio e cobre. A água do solo influencia de forma bastante direta pela a difusão do oxigênio, através dos poros cheios de água, sendo muito menor nos que os que estão cheios de ar. Outras reações mostram o limite superior da estabilidade da água, a oxidação do ferro e o processo de nitrificação e fixação do nitrogênio.

Reações com O, a redução do óxido de magnésio e desnitrificação ocorrem nos solos úmidos, mas insaturados. As outras reações requerem solos saturados. Assim, a exemplo do Arroz se aproveita do fósforo liberado quando se reduzem os óxidos férricos e liberam o ferro. As reações dependem mais dos sistemas enzimáticos dos microorganismos (Lopez, 1985).

Outros fatores como, a temperatura e a força iônica da solução podem afetar também as reações que controlam a concentração dos nutrientes na solução do solo, mas seus efeitos comparados com o pH e o potencial redox são relativamente pequenos embora possam ter grandes efeitos sobre a atividade microbiana (Lopez, 1985).

O movimento dos nutrientes na superfície da raiz depende da interceptação pelas raízes, do fluxo de massa e da difusão. Um nutriente pouco distante da raiz, dada à imobilidade da raiz da planta, de alguma forma esse nutriente deve chegar ao seu alcance, portanto é importante entender como o nutriente entra em contato com as raízes.

As raízes ocupam espaços contíguos do solo e podem absorver os nutrientes sem nenhum movimento. A interceptação dos nutrientes pelas plantas pode ser entendida pela máxima quantidade de nutrientes interceptadas pelas raízes desde que toda a superfície de contato da raiz-solo esteja em forma assimilável. O único elemento que pode ser satisfeito totalmente por este mecanismo é o cálcio, embora este processo forneça uma parte das necessidades de magnésio e zinco. A planta absorverá mais nutrientes por esse mecanismo, quanto maior for o sistema radicular e quanto maior for a concentração de nutrientes assimiláveis pelo solo (Epstein e Bloom, 2006).

A água está em contínuo movimento e leva os nutrientes do solo. Quando a planta absorve a água para substituir a água perdida pela transpiração, se produzirá também um fluxo de nutrientes, a porcentagem de nutrientes que podem ser satisfeitos por esse mecanismo depende, da necessidade da planta em relação a esse nutriente, da concentração do mesmo na solução do solo, da quantidade de água transpirada por unidade de peso de tecido e do volume efetivo de água em circulação que entra em contato com a superfície da raiz em resposta ao gradiente do potencial de água. Neste último aspecto quanto ao fluxo de massa e a alimentação da planta utiliza-se a concentração do nutriente em solução no solo e a quantidade transpirada.

O fósforo e o potássio recorrem ao processo de difusão que é a quantidade de nutriente que difunde em um determinado tempo na superfície da raiz.

Quando um nutriente é eliminado pela planta na solução do solo, este tende a substituir a partir da fase sólida. A concentração de um nutriente na solução do solo é um fator de intensidade e dos recursos da fase sólida para reequilibrar a solução, denominado fatores de capacidade. O fator de capacidade pode ser dividido em três categorias: as formas que são postas rapidamente em equilíbrio com a solução do solo, as que estão em forma mais lenta, as que estão em equilíbrio com a solução do solo e as que não ocorrem relação reversível (os nutrientes são liberados, mas não adsorvidos).

Como exemplos, as primeiras formas podem ser: o potássio, o cálcio e magnésio trocáveis, e o fósforo superficial adsorvido aos colóides. Também como exemplo há o potássio fixado e o fósforo que são difundidos para o interior dos agregados, mas eles ainda podem retornar a superfície de maneira muito lenta se o gradiente da atividade  $\mu$  for favorável. Exemplos de formas sem equilíbrio ou sem possibilidade de reabsorção podem ser

admitidos para o nitrogênio, o fósforo e o enxofre, liberados em decomposição da matéria orgânica mineral.

O processo de transformação dos elementos presentes nos minerais e na matéria orgânica do solo, para a forma de íons inorgânicos, é a principal fonte dos nutrientes essenciais às plantas. De acordo com a lei do mínimo, o crescimento de uma planta cessa se um dos elementos essenciais estiver abaixo da quantidade exigida pela natureza da espécie (Raij, 1981).

A classificação dos nutrientes pode ser entendida pelos macronutrientes que são exigidos em grandes quantidades pelas plantas e pelos os micronutrientes que são exigidos em quantidades menores. Ainda podem ser classificados os nutrientes em função de sua concentração no solo, os macroelementos que possuem concentrações maiores que  $10^{-6}$  mol L<sup>-1</sup> e microelementos com concentrações menores que  $10^{-6}$  mol L<sup>-1</sup> <sup>5</sup>.

É possível também diferenciar os nutrientes absorvidos pelas plantas do ponto de vista fisiológico que se dividem em quatro grupos:

Grupo 1 – C, O, H, N e S que são os maiores constituintes dos compostos orgânicos.

Grupo 2 – P e B que podem esterificar grupamentos OH e participar do metabolismo genético da planta.

Grupo 3 – Formado pelos cátions K<sup>+</sup>, Mg<sup>++</sup>, Ca<sup>++</sup> e Mn<sup>++</sup> e por ânion CL<sup>-</sup>, os quais exercem função importante em regulação osmótica, sinalização celular, balanceamento de cargas e manutenção do potencial elétrico das membranas.

Grupo 4- Fe, Cu, Zn, Mo e Ni que são absorvidos, principalmente na forma de quelatos e incorporados em grupos prostéticos de enzimas e, ou, em núcleos tetrapirrólicos de citocromos, onde participam do transporte de elétrons pela troca de valência.

Nos ambientes naturais as plantas retiram a maior parte dos íons necessários ao seu desenvolvimento do solo. As reações geológicas de decomposição das rochas, ou seja, o

---

<sup>5</sup> Um mol equivale aos átomos contidos em 0,012 quilograma de carbono-12.

intemperismo que tem como seu produto, o solo e a liberação de íons que se definem na água intersticial. Os minerais primários são aqueles que resultam diretamente do material originário da ação do intemperismo continuam a se decompor quimicamente e dão origem aos minerais secundários e às formas iônicas que podem ser absorvidas e utilizadas pelas plantas e outros organismos.

Felipe & Dalle (1990), compararam a diferença entre duas espécies do cerrado quanto à absorção de fósforo em seus ambientes naturais, a espécie *Bidens gardineri* do Campo sujo e a espécie *Qualea grandiflora* do Cerradão. Entre outras evidências, o estudo demonstrou a capacidade de altas concentrações de fosfato ser acumulada por dicotiledôneas.

Os nutrientes minerais são íons resultantes da progressiva hidrólise destes minerais, compostos que, se não são absorvidos rapidamente pelas plantas e microorganismos do solo, podem sofrer lixiviação sendo removidos do solo pela percolação da água da chuva. Mas, parte desses íons, ficam retidos na superfície das partículas das argilas. Os solos em estágio inicial de intemperismo apresentam uma grande quantidade de nutrientes ainda retidos nos minerais primários e na solução do solo, enquanto no estágio avançado a concentração de nutrientes é pequena em solução estando mais associada às cargas das superfícies dos minerais da fração argila.

A estabilidade geológica das paisagens tropicais, durante longos períodos na América do Sul, e o excesso de chuvas, que é comum em grande parte dos trópicos, fazendo com que os Latossolos sejam altamente intemperizados, os Argissolos e Luvisolos perfazendo cerca de 50% das áreas de terras tropicais. Latossolos e Argissolos são altamente ácidos, pobre em bases e nutrientes para as plantas, e muitas vezes dominado por  $Al^{3+}$  nos subsolos (Lathwell & Grove, 1986).

A essencialidade dos elementos para a nutrição das plantas não descarta a possibilidade de outros elementos que não sejam os convencionais já reconhecidos. Por meio de novas tecnologias, que avaliam o desenvolvimento vegetal e descrevem novas enzimas e suas rotas metabólicas, e que estão nos genes ainda desconhecidos como os recém descobertos genomas de plantas já sequenciados poderam indicar essas perspectivas da nutrição mineral das plantas (Kerbaudy, 2008).

O Alumínio geralmente restringe o crescimento das raízes, o que impede o uso eficiente de solo-água e nutrientes pelas plantas, mas no Cerrado observa-se que o Al pode ser absorvido pela vegetação (Haridassan, 2000).

Freqüentemente, uma oferta insuficiente de  $\text{Ca}^2$  também restringe o crescimento das raízes, especialmente em Latossolos. Reservas no solo de P, S e K são geralmente baixos e potencialmente limitantes (Lathwell & Grove, 1986). As classes de solos predominantes dos trópicos são caracterizadas por argilas de carga variável, e não altera o pH do solo, a capacidade de retenção de cátions e extremamente baixa.

Os isótopos são extremamente úteis para acompanhar a absorção e transporte de materiais nas plantas e para elucidar sua reação metabólica. A potencialidade do método traço foi reconhecido em 1913 e utilizado o chumbo como um indicador para determinar a solubilidade do cromato de chumbo e sulfeto em 1923 (Burriss, 1950). A limitação inicial do método traço para o rastreamento da ocorrência natural de radioisótopos foi superada pela descoberta da radioatividade induzida artificialmente por Joliot e Curie, e tornou-se possível o uso de traço isótopos estáveis por métodos de Urey de separar D, N, C, O e S. O, *Ciclotoron* e outros aceleradores de partículas, os espectrômetros de massa para a mensurar os isótopos estáveis e o contador Geiger-Müller para medir a radioatividade (Burriss, 1950).

Os radioelementos possuem a vantagem de serem medidos em grandes diluições, muito maiores que um milhão, enquanto que os isótopos estáveis são normalmente limitados para esse procedimento. Os radioelementos são mais facilmente medidos do que os isótopos estáveis exceto quando se destrói a planta e se aplica teste e análise com um espectrômetro de massa, enquanto que os isótopos que emitem radiação suficiente para ser medida através de Geinger Muller ou uma câmara de ionização em partes intactas da planta (Burriss, 1950).

Para Friedland (1989) é complexo fazer generalizações da relação entre metais pesados e a vegetação, alguns elementos são observadas como claramente prejudicial à vegetação e são geralmente excluídos da absorção pelas raízes ou folha. No entanto, outros metais pesados podem ser considerados metais traço essenciais à planta, como por exemplo, o cobre e o zinco que podem se comportar mais como elemento principal em relação às suas taxas e padrões de acumulação.

As plantas podem ser diferenciadas de acordo com a sua capacidade de absorção de elementos essenciais a sua sobrevivência (Haridasan, 2000; Kerbauy, 2008). Essa capacidade fornece a possibilidade de detectar anomalias geoquímicas com base na análise da vegetação, a partir de seus elementos químicos, que podem por sua vez, serem confrontados com os teores de solo, rocha ou água (Cunha, 2007).

Se um ecossistema possui vegetação esparsa, o solo é o primeiro interceptador da deposição de metais pesados, por meio da água, podendo ser: adsorvidos para a superfície da vegetação, absorvidos na cutícula ou folha, ou pouco afetado pela vegetação.

Silva (1992) ao investigar a distribuição de metais pesados na vegetação de uma mina em Carajás, ao verificar minerais de ferro, aborda que o fator seletivo mais crítico para esse elemento seja a alta concentração de metais pesados, acrescidos de outros como, a falta de nutrientes e a baixa capacidade de retenção de água ocorrendo uma seleção natural pelas plantas fazendo com que tenham uma capacidade de vencer condições adversas.

A capacidade que muitas plantas possuem de acumular níveis anormais de metais em seus tecidos já é conhecida. São espécies que apresentam modificações estruturais e funcionais, caracterizando-se como indicadoras de jazidas minerais. A partir da observação da distribuição de minerais pesados a vegetação pode caracterizar o substrato em que está assentada (Silva, 1992). No trabalho de Kovalevski (2001), por exemplo, ao analisarem 25.000 plantas verificou-se que o *Pinus silvestres* espécie que possui alta concentração de Ag, indicou a presença de um novo grupo de platina no leste da Sibéria.

No trabalho de Cunha *et al.*, (2009), foi verificado em espécies vegetais a presença de Elementos Terras Raras (ETR) e foi visto que a quantidade de absorção em ambiente natural pelas plantas é pequena, cerca de 1 a 45 ppm em peso de cinzas, mas existem espécies capazes de absorver altos teores apesar da baixa solubilidade desses elementos.

Alguns estudos também analisaram que na rizosfera é possível a absorção por radioelementos como, o Th e o U na vegetação (Dean, 1966; Shtangeeva *et al*, 2006; Hewamanna *et al*, 1987). A preocupação com estudos que envolvam os fenômenos associados a absorção dos radioelementos pela vegetação são entre outros, a detecção dos elementos quanto aos aspectos ambientais, o seu conhecimento quanto ao ciclo biogeoquímico que pode contribuir para a geração de energia, a contaminação de áreas de abastecimento de água, a produção agrícola, como também, a identificação de espécies indicadoras de depósitos minerais (Cunha, 2007; Shtangeeva *et al*, 2006).

No trabalho de Vargas *et al.*, (1997) foi identificada a presença dos radionuclídeos Th e U em sedimentos e plantas, situadas ao longo do rio Ortigas (Badajoz, Espanha). Foram estudadas as razões de  $U^{234}/U^{238}$  e  $Th^{228}/Th^{232}$  para compreender melhor os mecanismos de mobilização, como lixiviação e transporte destes radioisótopos e suas concentrações temporais e espaciais em uma região granítica próxima a minas de urânio. Os resultados



demonstraram que o urânio em sedimentos obteve uma elevação em função do tempo, enquanto a concentrações de tório mostrou pouca mudança em relação ao mesmo período. Esse resultado foi devido à lixiviação e transporte do urânio, como consequência de chuvas e da baixa solubilidade típica do tório. O teor de tório em sedimentos se mostrou constante entre a amostragem, embora tenha variado entre os diferentes pontos de amostragem.

Concentrações de urânio e tório em plantas foram menores após a precipitação, provavelmente devido à diluição observada na água. A incorporação de urânio nas plantas indicou ser principalmente a partir de água nos períodos de amostragem. Os resultados obtidos para o Th demonstraram que a incorporação do tório pelas plantas foi por meio dos sedimentos e da água.

O tório demonstrou ser um elemento mais resistente ao transporte por processos naturais de lixiviação e água, sua “imobilidade” no solo e absorção pelas plantas pode, portanto, indicar um padrão de fixação que pode ser acompanhado pelas plantas, ou outros elementos associados a esse radioisótopo.

No Brasil o estudo de Miekeley *et al.*, (1994) analisou dados sobre elementos terras raras e o  $\text{Th}^{232}$  em concentrações de plantas e solos no Morro do Ferro, em Minas Gerais, assim como sua relação com os ácidos húmicos na solubilização e bio-absorção desses elementos. Os autores verificaram que em testes de lixiviação é possível confirmar a importância do ácido húmico para a bio-absorção de Th e ainda mostrar que apenas uma pequena fração desses elementos no solo é lixiviado. E que o  $\text{Th}^{232}$  pode ser acumulado nas espécies analisadas em ambientes de altas concentrações, como a espécie *Solanum ciliatum*, com ocorrência em regiões do Cerrado.

Esses estudos abrem perspectiva no desenvolvimento de pesquisas que queiram utilizar dados do levantamento geofísico na complementação dos estudos geobotânicos e biogeoquímicos de prospecção, porque demonstram a capacidade de correlação entre o regolito e a absorção desses radioelementos pelas plantas. A aerogamaespectrometria dispõe de dados de levantamento do solo com resolução representativa dos movimentos desses radioisótopos, a mobilidade dos mesmos indica o movimento da vegetação na absorção desses elementos que podem ser associados à outros elementos essenciais à nutrição capazes de fornecerem dados de identificação fisionômica e geográfica da vegetação.

---

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Dados do levantamento aerogeofísico

Os dados aerogamaespectrométricos referentes aos canais potássio (K), tório (eTh), urânio (eU) e contagem total (CT) usados nesta pesquisa são do Levantamento Aerogeofísico do Estado de Goiás denominado, Paleo-Neoproterozóico do Nordeste de Goiás, que foram pré-processados e processados a partir do *software Oasis Montaj*, versão 7.1.1, *Geosoft*®.

Os dados do Projeto Paleo-Neoproterozóico do Nordeste de Goiás foram obtidos entre os períodos de 01 de maio de 2006 a 01 de setembro de 2006 pela empresa Lasa Engenharia e Prospecções S/A, a partir do uso de duas aeronaves (Lasa, 2006).

No levantamento foi utilizado o gamaespectrômetro EXPLORANIUM, modelo GR-820, de 256 canais espectrais, onde o espectro de cada um dos cristais detectores é analisado individualmente para determinação de uma maior acurácia dos fotopicos de K, eU e eTh (Lasa, 2006).

O sistema detector é constituído por três conjuntos de cristais de iodeto de sódio (NaI), sendo dois de 1024 polegadas cúbicas (plgs<sup>3</sup>) e um de 512 plgs<sup>3</sup>, totalizando um volume total de 2560 plgs<sup>3</sup>. Os detectores estão posicionados voltados para baixo (*downward looking*; dois cristais de 256 plgs<sup>3</sup> cada) e voltados para cima (*upward looking*; um cristal de 512 plgs<sup>3</sup>). Esse arranjo visa detectar a radiação oriunda da superfície, detectores voltados para baixo, e a radiação cósmica, detectores voltados para cima, a qual será eliminada dos dados por aplicação de correções (Lasa, 2006).

A calibração dos sistemas detectores aerogamaespectrométricos foi realizada em duas etapas. A primeira emprega fontes padronizadas para os teores dos três radioelementos, antes da fase de aquisição de dados. A segunda é a partir de voos a 100 m de altura sobre uma pista de calibração constituída por alvos com teores conhecidos (*dynamic calibration range*) devido ao uso de um gamaespectrômetro terrestre. Antes do processamento, os dados gamaespectrométricos foram convertidos e registrados em "contagens por segundo" (CPS) para concentração dos radioelementos (%K, ppm eU, ppm eTh e microRoentgen/h para CT).

### 3.2 Pré-Processamento dos dados aerogamaespectrométricos

Os valores do banco de dados de gamaespectrometria aérea, do Projeto Paleo-Neoproterozóico, foram ajustados segundo análise estatística dos teores de valores K, eTh, e eU, tendo como referência os teores apresentados para as rochas da crosta (Dickson & Scott, 1997). Esse procedimento foi realizado a partir do *software Oasis Montaj*, versão 7.1.1, *Geosof*®.

Após a verificação preliminar dos dados gamaespectrométricos, segundo informações das litologias que constituem a área de estudo, foi estabelecido que as concentrações dos radioelementos fora da faixa aceita seriam modificadas. Esse procedimento foi efetuado a partir da divisão dos dados por  $\frac{1}{2}$  ou  $\frac{1}{4}$  desvio-padrão, a fim de ajustar os valores reais, sem perda de informações relevantes. Após essa operação, os valores negativos que constituíam o banco de dados foi excluído como amostra, considerando-os como *dummies*.

### 3.3 Processamento dos dados aerogamaespectrométricos

Após a análise dos valores dos radioelementos foram gerados mapas e *grids* resultantes da análise estatística (Apêndice A). Foram produzidos as seguintes produtos:

- Imagens dos radioelementos K (%), eTh (ppm), eU (ppm) e CT ( $\mu\text{R/h}$ );
- Imagem ternária R (*Red*), G (*Green*), B (*Blue*): R=K, Th=G, B=U;
- Imagem ternária C (*Cyan*), M (*Magenta*), Y (*Yellow*): C=K, M=G, Y=U;
- Imagens das razões entre os radioelementos (Th/K, Th/U, U/K).

Os dados geofísicos são usualmente apresentados em forma de mapas de contorno, perfis e blocos diagrama, mas também podem ser apresentados como imagens digitais. Esses dados geofísicos em formato de imagem apresentam vantagens, em relação aos mapas de contorno, por facilitar a interpretação visual, onde os parâmetros geofísicos são apresentados em níveis de cinza ou em cores. No formato digital, é possível aplicar realce e extração automática de feições específicas, além de integrar digitalmente informações de naturezas

distintas, como dados geofísicos e de imagens multiespectrais de sensores orbitais (Dias & Paradella, 1997; Paradella *et al.*, 1998; Santos, 1999).

### **3.4 Dados de sensoriamento remoto**

A imagem do satélite Landsat-5, sensor TM, órbita/ ponto: 221/ 69, e 221/ 70 de 08 de Julho de 2011, foram adquiridas pelo catálogo de imagens do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). A escolha das cenas obtidas pelo sensor *Thematic Mapper* (TM) tiveram como critério a compatibilidade da resolução espacial com os produtos derivados dos dados gamaespectrométricos, sua disponibilidade gratuita e ausência de ruídos espúrios.

Os dados do projeto *The Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) da área de estudo foram adquiridos por meio do Projeto Brasil em Relevo (Miranda, 2005) e do Projeto Topodata (Valeriano, 2009). Os dados selecionados foram declividade e altitude, em formato *GeoTiff*.

### **3.5 Pré-Processamento da imagem TM/Landsat-5**

A atmosfera pode gerar distorções nos dados das imagens de satélites orbitais e essas degradações podem alterar radiometricamente os dados da imagem como um todo. Portanto, a correção atmosférica se faz necessária para uma imagem quantitativamente e qualitativamente melhor (Richards & Jia, 2006).

A correção atmosférica foi utilizada a partir da aplicação do módulo FLAASH do *software* ENVI 4.8®, para transformação dos valores digitais em valores de reflectância. Esse procedimento foi aplicado nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 que foram calibradas para serem convertidas em radiância do topo da atmosfera. Para a correção atmosférica são necessárias as seguintes informações: data e horário de passagem do satélite, a coordenada central da cena, o ângulo de elevação solar, a altitude média do terreno, os valores de ganho de *offset* e as condições da atmosfera no momento da passagem do satélite, de acordo com as especificações do manual ENVI (2009).

### **3.5.1 Correção geométrica**

A correção geométrica constitui no registro ou georreferenciamento das imagens, como o uso de transformações simples, normalmente emprega-se as transformações polinomiais para imagens multiespectrais que relaciona as coordenadas da imagem (linhas e colunas) com as coordenadas do sistema de referência utilizado Richards & Jia (2005). Na tese foi utilizado, o sistema Universal Transverse Mercator (UTM) de coordenadas métricas, com o Datum Horizontal SAD-69. A referência para definição dos pontos de controle utilizou-se das imagens geocover cedidas pelo INPE.

O procedimento de correção geométrica utilizou o *software* ENVI 4.8®.

### **3.5.2 Mosaic**

Após a correção geométrica, para obter o mosaico com aparência de brilho mais homogênea, foram observados os contrastes das imagens e aplicado ajustes nos histogramas das imagens TM/Landsat-5, órbita/ ponto: 221/ 69, e 221/ 70 de 08 de Julho de 2011.

## **3.6 Processamento da imagem TM/Landsat-5**

### **3.6.1 Redimensionamento dos valores de pixels da imagem TM/Landsat-5**

Para a compatibilidade dos dados gamaespectrométricos com os dados das imagens Landsat-5/ TM, os *pixels* das imagens TM foram redimensionados de 30 m para 100 m, devido ao tamanho de célula dos *grids* gamaespectrométricos ser de 100 m x 100 m. Esse procedimento foi executado por meio da ferramenta *Resize Data*, *software* ENVI 4.8®.

### **3.6.2 Recorte da imagem**

O Recorte na imagem TM/Landsat-5, se baseou nas coordenadas definidas na atividade de campo para esse procedimento também foi utilizado o *software* ENVI 4.8.

### **3.6.2.3 Índices de vegetação**

Foram gerados os seguintes índices de vegetação com as imagens do TM/Landsat-5: Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI) e o Índice de Vegetação Melhorado (EVI), a partir da ferramenta *Band Math* disponível no *software* ENVI 4.8®.

A escolha desses índices se deve ao amplo uso dos mesmos, pela simplicidade e eficiência de sua aplicabilidade. O NDVI fornece a base para outros índices de vegetação por meio de razões entre bandas, o SAVI possui potencialidade de redução do *background* do solo e o EVI apresenta melhorias, em relação aos outros dois, quanto às interferências do solo e da atmosfera sobre a resposta do dossel.

### **3.7 Levantamento de campo**

As atividades de campo foram realizadas em três fases: A primeira fase ocorreu no período de 08 a 10 de agosto de 2011 e teve como objetivo o reconhecimento da área de estudo com a comparação entre as fitofisionomias e a imagem aerogamaespectrométrica RGB/ K, eTh, eU. O segundo levantamento de campo foi realizado de 28 a 30 de outubro de 2012 com o propósito da coleta florística para análise química das espécies. A terceira fase aconteceu no período de 10 a 13 de outubro de 2013 e foi feita a coleta de solos e rochas para análise química.

#### **3.7.1 Identificação fitofisionômica e coleta florística**

Para uma primeira verificação das relações entre os dados de aerogamaespectrométricos, composição colorida RGB/ KeTheU, com as fitofisionomias do Cerrado, foram diferenciados oito domínios gamaespectrométricos, com base nas variações dos teores dos radioelementos presentes na área de estudo. Foram selecionados 40 pontos georeferenciados, sendo cinco em cada domínio, na região que abrange os municípios de Cavalcante e Teresina de Goiás. No campo foram descritas as fitofisionomias e realizadas coletas florísticas das espécies encontradas em cada domínio. Após o trabalho de campo, essas espécies foram prensadas e identificadas no Herbário do Departamento de Botânica (UB), do Instituto de Ciências Biológicas da Universidade de Brasília (IB/ UnB).

Com as espécies coletadas em campo foi gerada uma tabela (Apêndice E) que relaciona as correspondentes fitofisionomias aos oito domínios identificados na imagem gamaespectrométrica, contribuindo com a identificação e diferenciação das fitofisionomias.

### **3.7.2 Coleta de rochas**

Para verificar características geológicas da área de estudo foram coletadas amostras de rochas (Apêndice L).

### **3.8 Coleta e análise de solos**

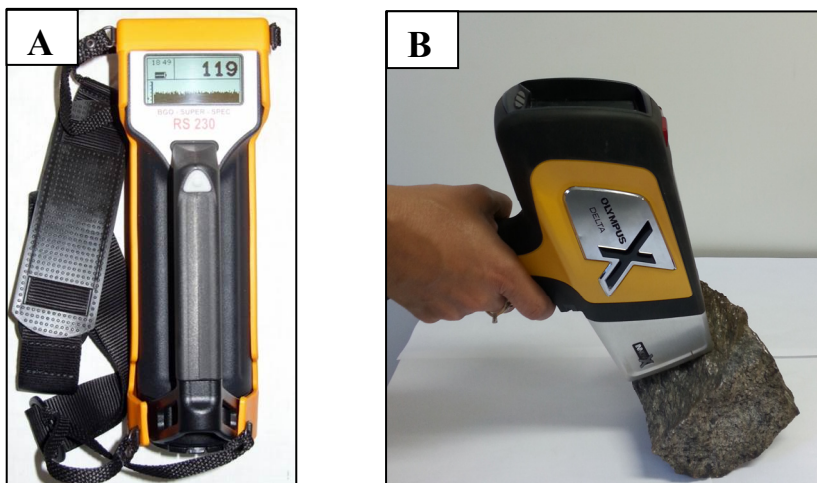
Com o intuito de fornecer dados para verificar o comportamento gamaespectrométrico e da vegetação em relação ao solo e sua biomassa foram feitas coletas de campo com profundidade de 0-20 cm e 20- 50 cm, e posteriormente as amostras foram destorroadas e passadas em peneiras de malha de 2 mm, para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA) de acordo com os procedimentos do EMBRAPA (2011).

Na coleta foram utilizados o trado holandês e o enxadão (Apêndice M). A definição dos pontos de coleta teve como base, o mapa de domínio aerogamaespectrométrico e as áreas das fitofisionomias do Cerrado em estudo.

Para analisar os radioelementos no solo, após sua homogeneização, foram medidos os teores de Th, U por gamaespectrômetro portátil, marca RS-230 (Figura 3.1A). As análises para detectar os valores de K e outros elementos essenciais à nutrição das plantas no solo foi utilizado o aparelho Olympus Delta Handheld XRF Analyzers (Figura 3.1B) Antecedendo a medida das amostras, foi realizada calibração a partir de uma moeda de aço de referência, tendo sua composição conhecida. Após a aquisição de medidas de cada amostra, os dados foram transferidos para o computador e padronizados em ppm para serem compatíveis com os dados aerogamaespectrométricos. Posteriormente, esses foram organizados em tabela (Apêndice I).

Na espectrometria por fluorescência de raios X, o processo de excitação ocorre pela irradiação da amostra por um feixe primário emanada de um tubo de raios X. É uma das técnicas analíticas mais utilizadas em geoquímica. As vantagens desse método está na simplicidade do espectro, comportamento previsível dos elementos, rapidez de execução da análise, elevada exatidão, baixo limite de sensibilidade em ppm, ampla capacidade de

detecção, grande versatilidade analítica podendo ser utilizada em amostras no estado líquido e sólido (pó), com a prerrogativa de não destruir as amostras (Dutra & Gomes, 1984).



**Figura 3.1** - Instrumentos de medição dos radioelementos e elementos essenciais à nutrição no solo. A) Gamaespectrômetro portátil RS-230; B) Fluorescência de raios X (modelo Olympus Delta Handheld XRF Analyzers).

### 3.9 Integração de Dados

Com o intuito de avaliar os dados gamaespectrométricos e de sensoriamento remoto, quanto à potencialidade da identificação das fitofisionomias do Cerrado, foi aplicada integração dos dados quantitativamente, por meio de análises estatísticas. E a análise qualitativa foi realizada por meio da integração das imagens resultantes do processamento das imagens TM e aerogamaespectrométrica.

Os dados de aerogamaespectrométricos, referentes aos canais K, eTh e eU, foram exportados no formato (\*.grd) a partir do *software Oasis Montaj*, Geosoft®, e convertidos para o formato para o formato *raster* no *software ENVI 4.8®*. Após a padronização dos dados com projeção e datum (UTM/SAD 69), esses foram manipulados para extração de regiões de interesse e análise estatística das classes fitofisionômicas estudadas.



Para analisar as relações entre a biomassa do Cerrado e os dados gamaespectrométricos foram utilizadas as imagens gamaespectrométricas e de NDVI, para então aplicar um modelo de elevação digital com essas duas.

Para um modelo digital que apresente um exagero vertical na imagem NDVI e evidenciando as áreas com variações da densidade de vegetação, foi adicionado a constante 10 aos *pixels* da imagem. Posteriormente, foi aplicada a sobreposição da imagem gamaespectrométrica, por meio da ferramenta *Topographic, software* ENVI, versão 4.8, RSI®. O mesmo procedimento foi adotado para a composição colorida TM RGB/ 543, sobrepondo-a à imagem NDVI para comparar as áreas das imagens TM e a gamaespectrométrica.

### **3.9.1 Recorte da área de estudo**

O recorte das imagens produtos do sensor TM/Landsat-5, com as imagens resultantes dos dados aerogamaespectrométricos foram realizadas a partir do *software* ENVI 4.8®, de acordo com a definição da área de estudo delineada em trabalho de campo, por meio da comparação entre as fitofisionomias e pela análise dos dados gamaespectrométricos.

### **3.9.2 Classificação**

A classificação é uma técnica de processamento em sensoriamento remoto que atribui a cada *pixel* da imagem como pertencente a uma dada classe, a fim de reconhecer padrões e objetos para mapear áreas de interesse. Existem dois procedimentos de classificação: i) Classificação Supervisionada, do qual o analista depende de amostras de treinamento e que as mesmas representem as classes analisadas na imagem, pois o analista conhece os alvos a serem classificados; ii) Classificação Não-Supervisionada é quando os *pixels* de uma imagem são atribuídos a classes espectrais, sem que o usuário tenha conhecimento prévio dessas classes, pois o algoritmo escolhido agrega os *pixels* em classes para posterior análise do intérprete (Richards & Jia, 2006).

Após a integração das imagens aerogamaespectrométrica e Landsat-5/ TM, a classificação aplicada foi a do tipo supervisionada, pelo método de Mahalanobis, que utiliza valores médios espectrais de classes distintas com base na distância euclidiana (Richards & Jia, 2006). As amostras de treinamento tiveram como base de dados, o reconhecimento em campo das fitofisionomias.

Para comprovar a eficácia dos resultados encontrados nos gráficos de dispersão foi feita uma classificação supervisionada, da imagem RGB/ KeTheU, pelo método de Mahalanobis utilizado o procedimento de extração das amostras de dispersão, para as classes Campo Limpo, Cerradão e Cerrado Rupestre.

Após o resultado da classificação, foram selecionadas novamente 100 amostras de *pixels* nas imagens gamaespectrométrica e dos índices de vegetação, com base nas áreas das classes geradas para as três fitofisionomias. A seleção foi aleatória com 5 regiões de interesse (ROI's) e 20 *pixels* para cada classe definida como sua correspondente fitofisionomia na classificação supervisionada, e foi verificado se as áreas resultantes apresentavam discriminação estatística entre as fitofisionomias.

Esse procedimento com a classificação supervisionada foi utilizado nos resultados gerais e para a discussão dos resultados do Artigo 1 (Capítulo 5).

No Artigo 2 (Capítulo 6) foram usados os resultados encontrados nas análises multivariadas a partir da imagem aerogamaespectrométrica eTh/K e dos dados de campo das fitofisionomias. Após essa investigação, foram delimitadas cinco regiões de interesse correspondentes as cinco fitofisionomias: Cerradão, Cerrado Rupestre, Cerrado *stricto sensu*, Campo Limpo e Campo Sujo e extraídas de cada região de interesse vinte *pixels* na imagem eTh/K. Dos pixels extraídos na imagem eTh/K foram extraídas as médias dos valores mínimos e máximos representativos de cada fitofisionomia e com esses intervalos foram determinados os fatiamentos para a classificação supervisionada.

### **3.9.3 Seleção de amostras das fitofisionomias e construção de gráficos de dispersão**

Para a avaliação estatística descritiva dos dados foi verificado o comportamento de 100 amostras de cada fitofisionomia por meio do *software* estatístico *Minitab*®. Os procedimentos utilizados para essa primeira análise, foram: a verificação da distribuição e frequência e o teste de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov para os produtos: i) eTh, eU e K e suas razões; ii) bandas do TM/Landsat5 (b1, b2, b3, b4, b5, b7); iii) NDVI e iv) SRTM (altitude e declividade). Também foram verificadas as correlações entre K, eTh e eU com as respectivas bandas espectrais do satélite TM/Landsat-5, pelo coeficiente de correlação de Pearson, utilizando o *software Minitab*.

Como primeira tentativa para discriminar as fitofisionomias (Cerradão, Cerrado Rupestre e Campo Limpo), foram aplicados gráficos de dispersão entre as amostras dos canais do K, eTh, eU e as amostras dos índices de vegetação (NDVI, SAVI e EVI).

Após a seleção das cinco regiões de interesse (ROI's), foram construídos gráficos de dispersão na tentativa de discriminar as fitofisionomias do Cerrado. Para a normalização e escalonamento dos valores dos radioelementos foi usada a função *standardize* do *software* Minitab®, versão 15, dividindo as variáveis pelo desvio padrão e em seguida dividindo-as novamente por 10. Esse procedimento será aplicado para as demais fitofisionomias (Campo Sujo, Cerrado *Sensu Stricto*, Mata Seca, Mata de Galeria e Vereda).

#### **3.9.4 Análise do relevo e distribuição dos radioelementos**

Para analisar as relações entre as formas de relevo e a distribuição dos radioelementos em paisagens com as fitofisionomias, Cerradão, Cerrado *Sensu Stricto*, Cerrado Rupestre, Campo limpo e Campo sujo foram analisadas seis áreas amostrais e identificadas seis Superfícies Regionais de Aplainamento (SRAs), de acordo com a classificação de Carvalho & Byer (2008) e utilizadas a imagem aerogamaespectrométrica RGB/ K eTh eU e a imagem SRTM para investigar as principais formas de relevo que ocorrem na área de estudo.

Os dados aerogamaespectrométricos foram exportados e convertidos para o formato *raster* e padronizados com projeção e datum (UTM/SAD 69), a partir do *software* ENVI 4.8,®. Após a seleção de seis regiões de interesse (ROI's), foram extraídos *pixels* e verificadas as médias das concentrações dos radioelementos e suas relações com as SRA's.

A normalização dos valores dos radioelementos foi aplicada no *software* Minitab®. Para integrar as duas informações, dados aerogamaespectrométricos e imagem SRTM, foi gerado um modelo digital de terreno. Esse procedimento foi elaborado *software* ENVI 4.8® e o *software* *Global Mapper* 9. Foram construídos perfis para identificação das formas de relevo e sua correspondente altimetria na segunda etapa. Foram confeccionados, no *software* ENVI 4.8, gráficos de dispersão para verificar a distribuição dos radioelementos na área de estudo.

### 3.9.5 Análise da vegetação por gamaespectrômetro portátil e dados aerogamaespectrométricos

Na área de estudo foram descritas as fitofisionomias e realizadas coletas florísticas das espécies de acordo com a metodologia abordada por Cunha (2007), da qual define que essas espécies tenham alta frequência e que sejam de fácil reconhecimento.

As espécies coletadas foram limpas e secadas *in natura*, posteriormente separadas em galhos e folhas, para serem armazenadas. Com as espécies já secas e separadas em galhos e folhas verificou-se com o gamaespectrômetro portátil, modelo Exploranium, GR-320 (Figura 3.2), a presença de radioelementos nas espécies. Esse gamaespectrômetro possui dois módulos, sonda e console. A sonda possui formato cilíndrico com cobertura de alumínio que contém o detector, com 0.35 L de cristais de iodeto de sódio ativado por tálio (NaI (TI)). O gamaespectrômetro GR-320 possui 256 canais de dados na faixa de energia de 0 a 3,0 MeV, sendo 4 canais correspondendo a contagem total, K, U e Th. Cada canal registra todos os raios gama absorvidos no detector com energia dentro de uma faixa de 11,7 KeV.

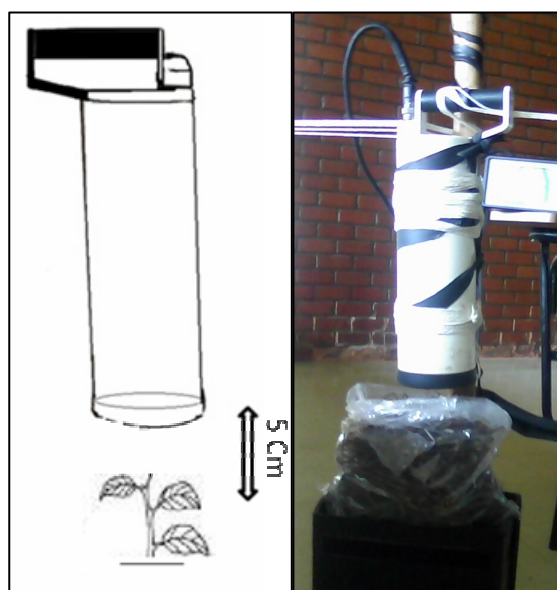
O Procedimento foi possível posicionando o gamaespectrômetro sobre as plantas a uma altura de 5 cm. As medições dos teores de K, eTh e eU foram anotados em planilha com três medições de cinco minutos para cada amostra, sendo que, antes de analisar folhas e galhos das espécies, foi medido o *background* do ambiente em três medições de cinco minutos cada.

Foi utilizado outro gamaespectrômetro portátil, com maior acurácia, o gamaespectrômetro RS-230 BGO que possui um Detector com cristal de Óxido de Germanato de Bismuto (BGO) de 6.3”3 (103cm<sup>3</sup>). Esse gamaespectrômetro possui maior sensibilidade (comparativamente 2.5X maior do que o cristal de NaI do mesmo volume) que o gamaespectrômetro GR-320.

O gamaespectrômetro RS-230 BGO foi utilizado para medir as respostas da radiação gama nas folhas das espécies após calcinação. Esse procedimento teve como intenção verificar as diferenças entre os dois gamaespectrômetros quanto a capacidade de detecção dos radioisótopos eTh, e eU nas espécies.

Feitas as medições, foi aplicado teste estatístico de significância, teste T (Zar, 2010), sobre duas populações independentes, presumindo variâncias iguais, entre as medições do *background* e as medições de galhos e folhas das espécies para identificar se os dados adquiridos pelo gamaespectrômetro portátil, detectariam, ou não, teores de K, eTh e eU. Para o teste foi considerado o nível de significância a 0,5% com base nas seguintes hipóteses:

Stat $t < 0$	Resultado do teste: unicaudal à esquerda	$-t < -t$ crítico - rejeito $H_0$ $-t > -t$ crítico - não rejeito $H_0$	$H_0: \mu_1 = \mu_2$ $H_1: \mu_1 < \mu_2$
Stat $t > 0$	Resultado do teste: unicaudal à direita	$t > t$ crítico - rejeito $H_0$ $t < t$ crítico - não rejeito $H_0$	$H_0: \mu_1 = \mu_2$ $H_1: \mu_1 > \mu_2$



**Figura 3.2** - Medição da vegetação por gamaespectrômetro portátil GR-320.

Para verificar o teor de radioelementos presentes no solo foram feitas as coletas das espécies e foram utilizados dados aerogamaespectrométricos referentes aos canais potássio (K), tório (eTh) e urânio (eU). Esses dados foram pré-processados e processados com o *software Oasis Montaj*, versão 7.1.1, *Geosoft®*.

De posse dos dados aerogamaespectrométricos, foi feito o levantamento das médias dos valores dos radioelementos nos canais do K, eTh e eU, nos pontos onde foram efetuadas as coletas de campo das espécies estudadas, para serem comparadas com os valores dos dados resultantes das medições com o gamaespectrômetro portátil Exploranium, modelo GR-320. Esse procedimento teve como intuito analisar as relações entre a presença dos radioelementos nos ambientes de coleta e a concentração dos mesmos nas espécies.

A fim de verificar a presença de K nas espécies coletadas, devido a limitação do gamaespectrômetro detectar esse radioelemento nas mesmas, foi feita a análise química por meio de um Espectrofotômetro de Absorção Atômica (EAA), da marca *Perkin Elmer*, modelo *Analyst 200*. Como fonte de excitação foi utilizada chama de ar-acetileno.

### **3.9.6 Análise biogeoquímica**

Para o processo de abertura e análise das espécies (Figura 3.3) primeiramente foram feitas coletas, de acordo com a presença dessas em cada domínio gamaespectrométrico, e sua representação quanto a ocorrência fitofisionômica. Após a coleta as espécies foram selecionadas em onze espécies e secas *in natura*. Os galhos e folhas foram triturados e moídos no Laboratório de Termobiologia Luiz Gouvêa Labouriau, vinculado ao Departamento de Botânica. No Laboratório de Bromatologia e Tecnologia de Alimentos, as espécies foram pesadas em torno de 50g e submetidas à calcinação de 500-600 °C, de acordo com os trabalhos de Akçay *et al.* (1998), Cunha (2007) e Cunha (2010).

Algumas espécies necessitaram de alteração em seu fator de diluição devido a valores muito elevados dos elementos analisados (Vide tabela em anexo) dentro do limite de detecção e do limite de quantização. As mesmas foram diluídas em: 1/10 ml, 1/500 ml ou 1/1000 ml.

Para análises químicas das plantas dos elementos essenciais à nutrição e radioisótopos, primeiramente foi feita a digestão das amostras onde foram pesadas as cinzas com 0.1 gramas e colocados em *backer*, adicionando 10 ml de HNO<sub>3</sub> e elevando a solução com água deionizada em BV de 50 ml e, posteriormente, filtradas. As espécies que apresentaram resíduos foram deixadas em banho-maria por 15 minutos entre 70 e 80 °C para que fossem diluídas totalmente.

Para identificar os elementos essenciais à nutrição: macroelementos (Ca, Mg), microelementos (Mo, Zn, Mn, Cu, Ni, Fe) e elementos benéficos (Si, Al,) foi usado um Espectrômetro de Emissão Atômica com Plasma indutivamente acoplado (ICP/AES) da marca *Perkin Elmer*, modelo Spectroflame-Fvmo3, utilizando nebulizador Meinhard no Laboratório de Geoquímica da Universidade de Brasília (LabGeq).

A análise do potássio (K) nas plantas foi feita por Espectrofotômetro de Absorção Atômica (EAA), marca *Perkin Elmer*, modelo *Analyst 200* também no LabGeq. Como fonte de excitação foi utilizada chama de ar-acetileno. O método de calibração externa considerou a curva do K entre, 0 ppm e 5 ppm.

Na identificação química dos radioelementos Th e U, nas espécies utilizou-se um Espectrômetro de Massa por Ionização Acoplada por Plasma (ICP/MS) da marca *ELAN-6100DRC* da *Perkin Elmer*, no Laboratório de Geoquímica da Universidade de São Paulo (USP). As amostras analisadas por ICP-MS tiveram como base uma amostra do padrão Nist-1573a de folha de tomate com massa de 0.1g/100g de solução; e o ii) Nist-1573a, e ataque de 0.05g/50g de solução. Os valores recomendados para o padrão Nist-1573a foram obtidos no *site* [https://www-s.nist.gov/srmors/view\\_detail.cfm?srm=1573a](https://www-s.nist.gov/srmors/view_detail.cfm?srm=1573a).



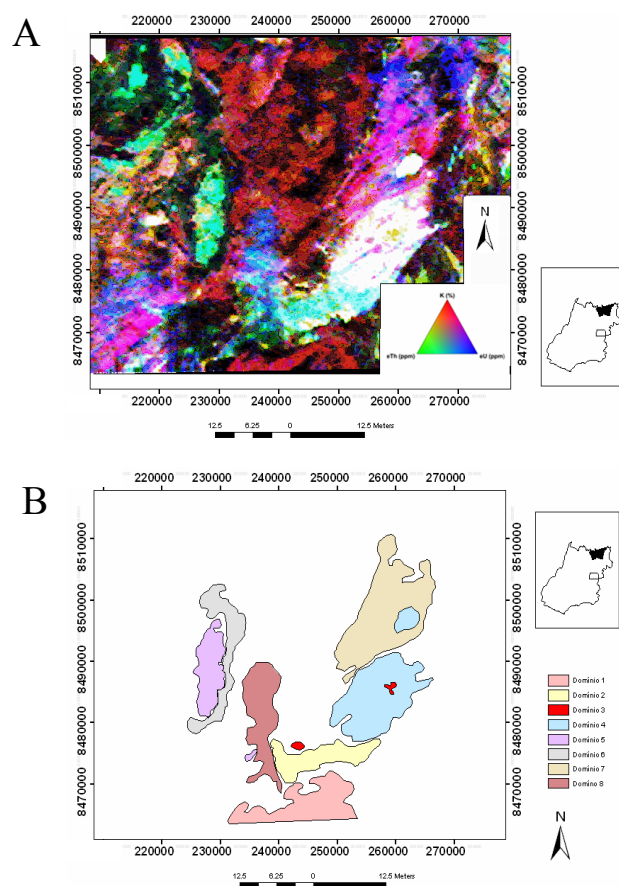
**Figura 3.3** - Processos de preparação e análise química das espécies coletadas. A) Moinho de faca; B) Balança de precisão; C) Mufla; D) Adição de HNO<sub>3</sub>; E) filtragem; F) ICP/AES; G) EAA; H) ICP/MS.



## 4. RESULTADOS GERAIS

### 4.1 Análises iniciais e indícios da potencialidade dos dados aerogamaespectrométricos para diferenciação de fitofisionomias do Cerrado

Os primeiros indícios de eficácia dos dados gamaespectrométricos para a identificação fitofisionômica do Cerrado foi confirmada com as atividades iniciais de campo e a análise estatística dos produtos gerados. Com os trabalhos desenvolvidos em campo, após a determinação dos domínios gamaespectrométricos de interesse, com base na composição colorida RGB/ KeTheU (Figura 4.1), foi possível verificar a correspondência entre as paisagens das fitofisionomias com os domínios gamaespectrométricos, como pode ser visto na chave de identificação (Figura 4.2).



**Figura 4.1** - Mapa aerogamaespectrométrico, composição colorida RGB/K,Th,U (A) e Domínios gamaespectrométricos identificados em campo (B).



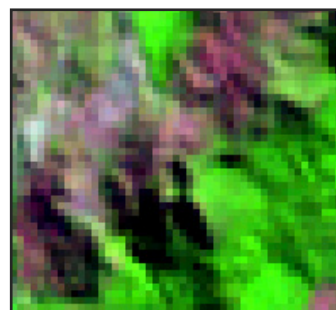
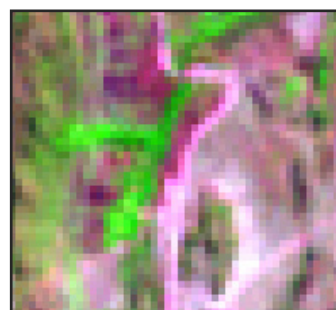
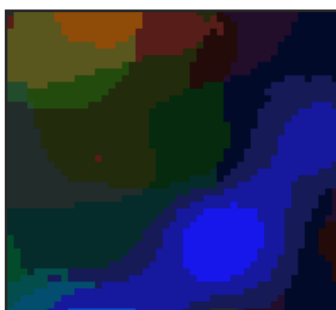
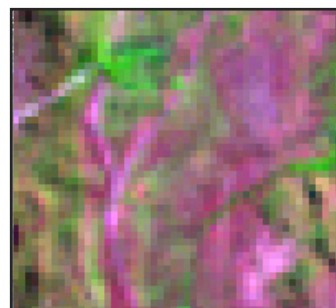
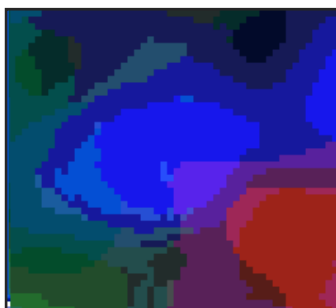
**Fitofisionomia**

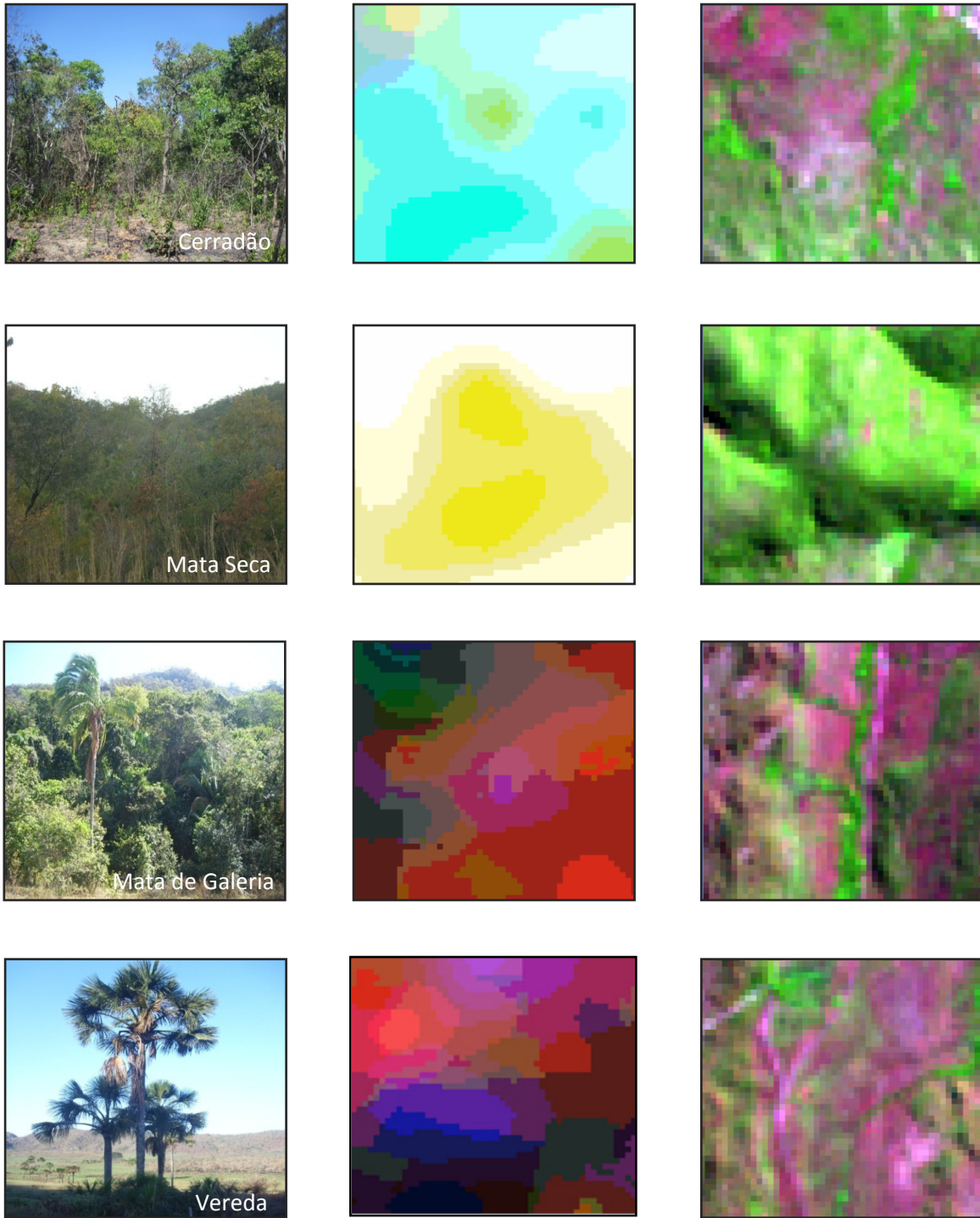
**Gamaespectrometria Aérea**

**Landsat 5 TM**

Imagem R (K) G (Th) B (U)

Imagem R (b5) G (b4) B



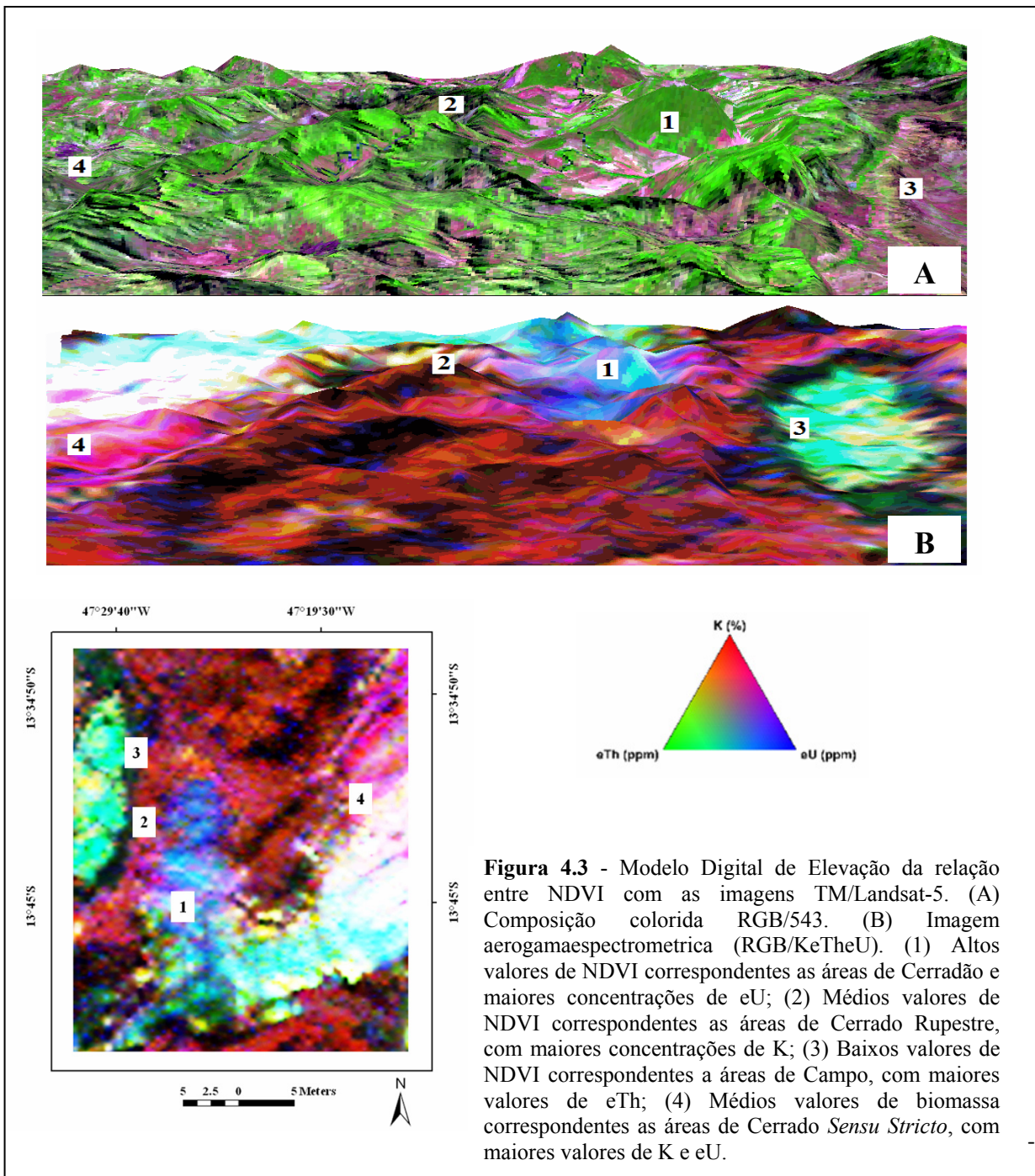


**Figura 4.2** - Chave de interpretação das fitofisionomias estudadas e seus respectivos dados gamaespectrométricos e do Landsat5 TM.



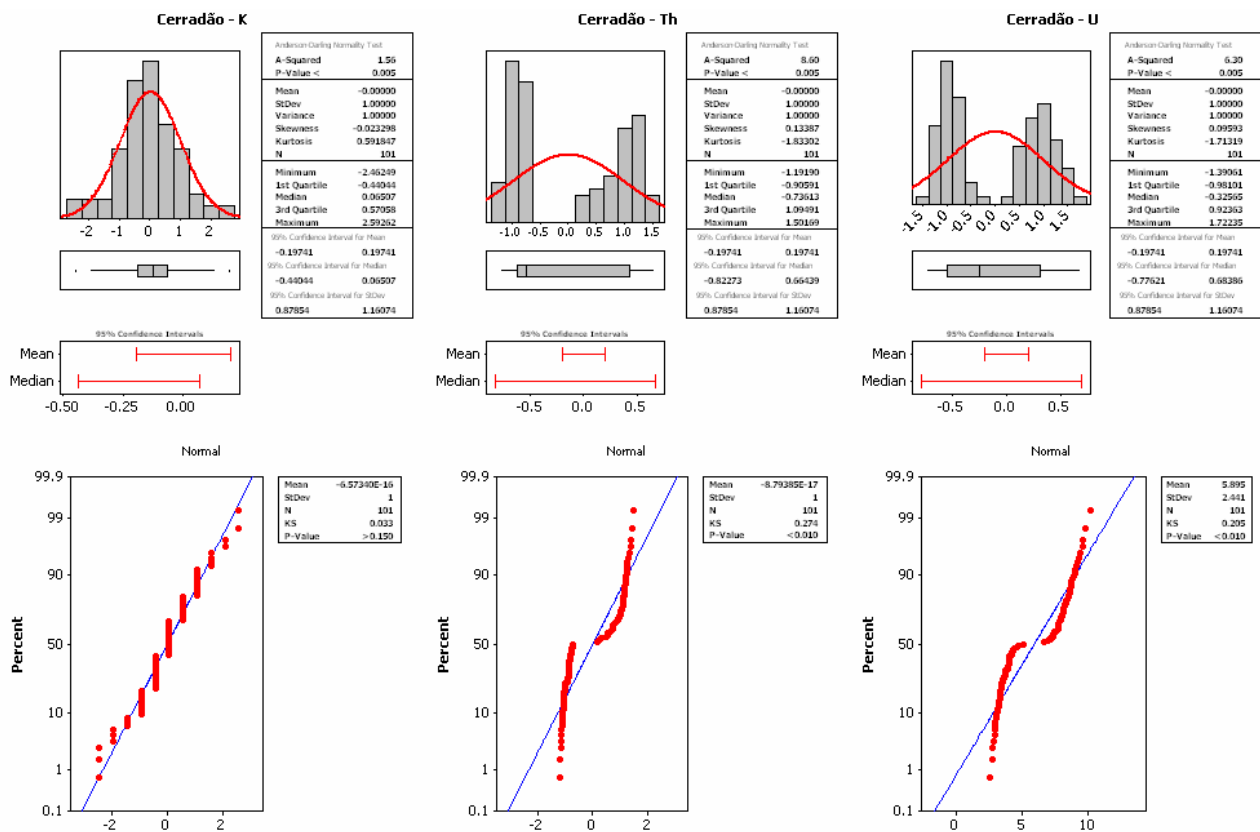
A coleta no campo e posterior identificação das espécies vegetais, também confirmaram a correlação da imagem aerogamaespectrométrica RGB/ KeTheU com as feições analisadas e as fitofisionomias de estudo.

Outra informação importante que apresenta a associação entre os domínios gamaespectrométricos e as fitofisionomias, é a integração dessas com o modelo digital de elevação (MDE). A imagem NDVI como camada de base e exagero vertical, mostra a correspondência entre os domínios gamaespectrométricos e as áreas com maior ou menor densidade da vegetação (Figura 4.3).



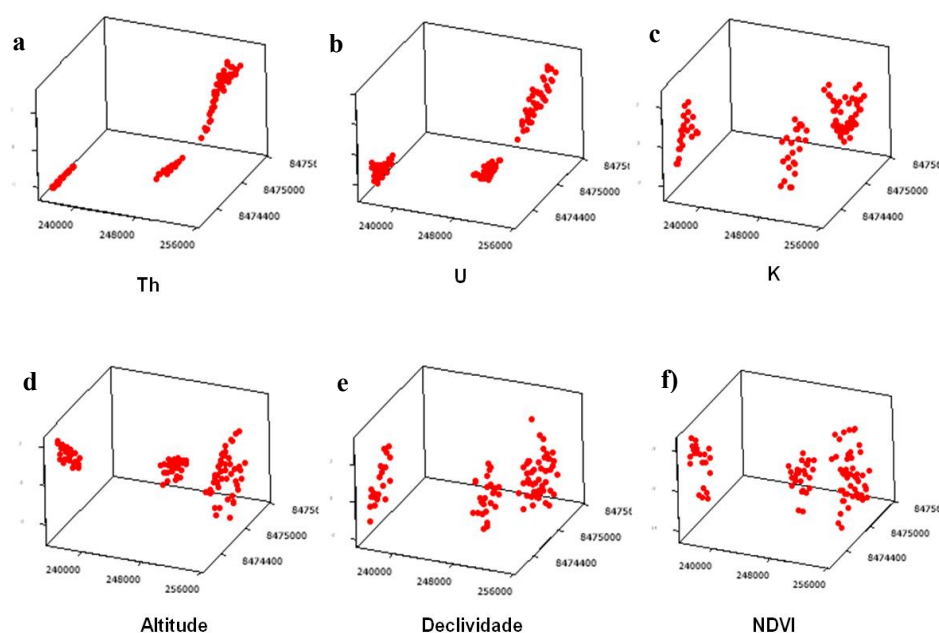
Para a identificação quantitativa das fitofisionomias do Cerrado com os dados aerogamaespectrométricos e a investigação de anomalias desses dados, foram realizadas análises de 100 amostras dos *pixels* dos produtos aerogamaespectrométricos, da imagem TM/Landsat-5 e seus produtos (bandas espectrais e NDVI) e da imagem SRTM (altimetria e declividade). A escolha das regiões de interesse foi em função da proximidade entre os pontos georreferenciados coletados em campo e os domínios gamaespectrométricos.

Após a análise estatística preliminar das amostras dos radioelementos, foi verificado que a classe Cerradão apresentou duas populações distintas para as variáveis do eTh e eU. Como demonstram os gráficos de distribuição e frequência e do teste de distribuição normal, Kolmogorov-Smirnov (Figura 4.4). Por outro lado, a variável K possui uma distribuição populacional que tende à simetria, com teste normal indicando bom ajuste à reta.



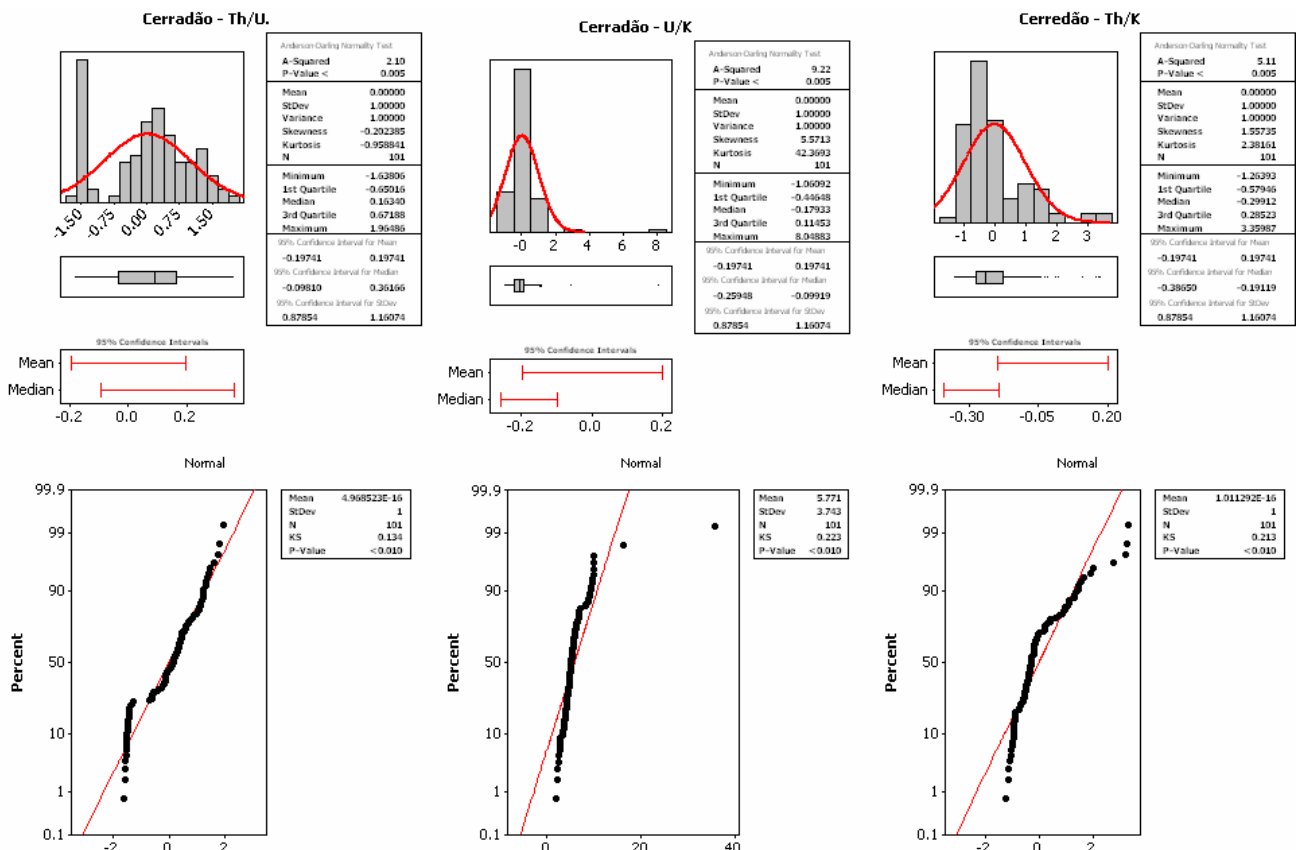
**Figura 4.4-** Gráficos de distribuição e frequência e teste de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov das amostras de Cerradão nos canais do K, eTh e eU.

A dispersão do NDVI (Figura 4.5) é maior que a apresentada pelas variáveis eTh e eU para as amostras do Cerradão, indicando que o índice de vegetação é menos eficaz também na discriminação dessas duas populações. De acordo com Wilford *et al.* (1997), eTh e eU são radioelementos de baixa mobilidade quanto às ações do intemperismo, diferente do K que possui maior solubilidade. Dessa forma, a altimetria e a declividade poderiam estar interferindo nas respostas das duas populações em questão, porém, ao analisar os dados da imagem SRTM foi verificada alta dispersão entre as variáveis, descartando a diferenciação do Cerradão por altimetria e declividade. Os dados preliminares sugerem a existência de dois tipos de Cerradão.



**Figura 4.5** - Dispersão em 3D das amostras da classe Cerradão.

A distribuição e frequência das razões dos radioelementos ( $eTh/eU$ ,  $eU/K$  e  $eTh/K$ ) para a classe Cerradão mostraram que a razão  $eTh/eU$  apresenta duas populações distintas como ocorrido nos gráficos anteriores, enquanto as demais apresentaram distribuição assimétrica negativa. O mesmo ocorreu no gráfico do teste de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov para a razão  $eTh/eU$ , cuja quebra na reta indicou duas populações de Cerradão (Figura 4.6).



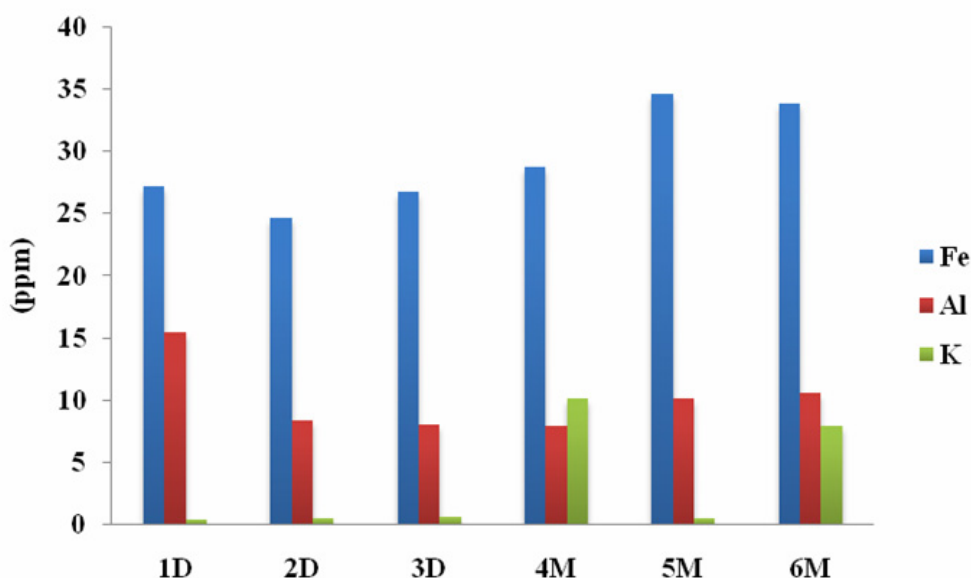
**Figura 4.6** - Gráficos de distribuição e frequência e teste de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov das amostras de Cerradão nos canais eTh/eU, eU/K e eTh/K.

Ao analisar as amostras de solo nas duas áreas de Cerradão por fluorescência de raios X, para os teores de de K, Fe e Al foi constatado que os dados também diferenciaram as duas áreas de Cerradão quanto à sua fertilidade para as amostras analisadas (Figura 4.7): mesotrófica (4M,5M e 6M) e distrófica (1D,2D e 3D). Essa análise corrobora o trabalho de Rodrigues & Araújo (2013) que apresenta em seus resultados a presença de dois tipos de Cerradão, sendo que os solos distróficos foram relacionados aos mais elevados teores de Al nas parcelas estudadas. Os solos mesotróficos foram relacionados às parcelas com maiores concentrações de K.

Outra evidência da diferenciação dos solos mesotróficos e distróficos por dados aerogamaespectrométricos é a presença da espécie *Emmotum nitens* coletada na área considerada distrófica, muito comum em solos distróficos (Ratter *et al.*, 1977; Rodrigues &

Araújo, 2013) e a espécie *Terminalia argentea* comum em Cerradão mesotrófico identificada na área considerada como mesotrófica (Silva Júnior, 2005).

A análise indica a potencialidade do método proposto na diferenciação de áreas mesotróficas e distróficas. Entretanto, neste trabalho, os dados estudados mostram esse fenômeno pontualmente, o que requer maior acurácia na análise, mas constitui uma evidência para a identificação de alterações no substrato e mostram características da paisagem e consequentemente da vegetação.



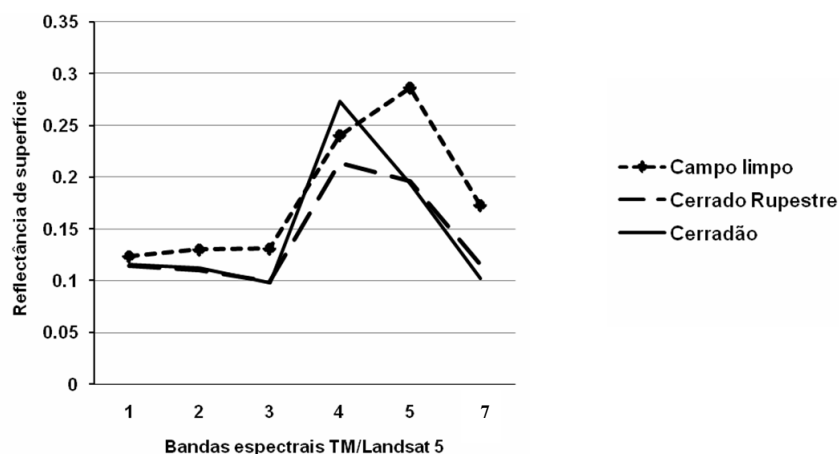
**Figura 4.7** - Teores de Fe, Al e K por fluorescência de raios X (1D, 2D, 3D = Amostras de Cerradão distrófico. 4M, 5M, 6M = Amostras de Cerradão mesotrófico).

Para as fitofisionomias Campo Limpo e Cerrado Rupestre, os gráficos de distribuição e frequência, assim como o teste de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov, demonstraram pouca variação entre as populações investigadas (Apêndices C5,C6,C13 e C14).

Ao examinar as três melhores correlações entre as bandas espectrais do TM/Landsat-5 e os canais K, eTh e eU das fitofisionomias em estudo, foi observado que apenas o Cerradão apresentou todas as correlações positivas (Apêndice D2). Mas essa característica é modificada quando aplicado a razão entre as bandas e com os índices de vegetação.

## 4.2 Dispersão entre os radioelementos e os índices de vegetação

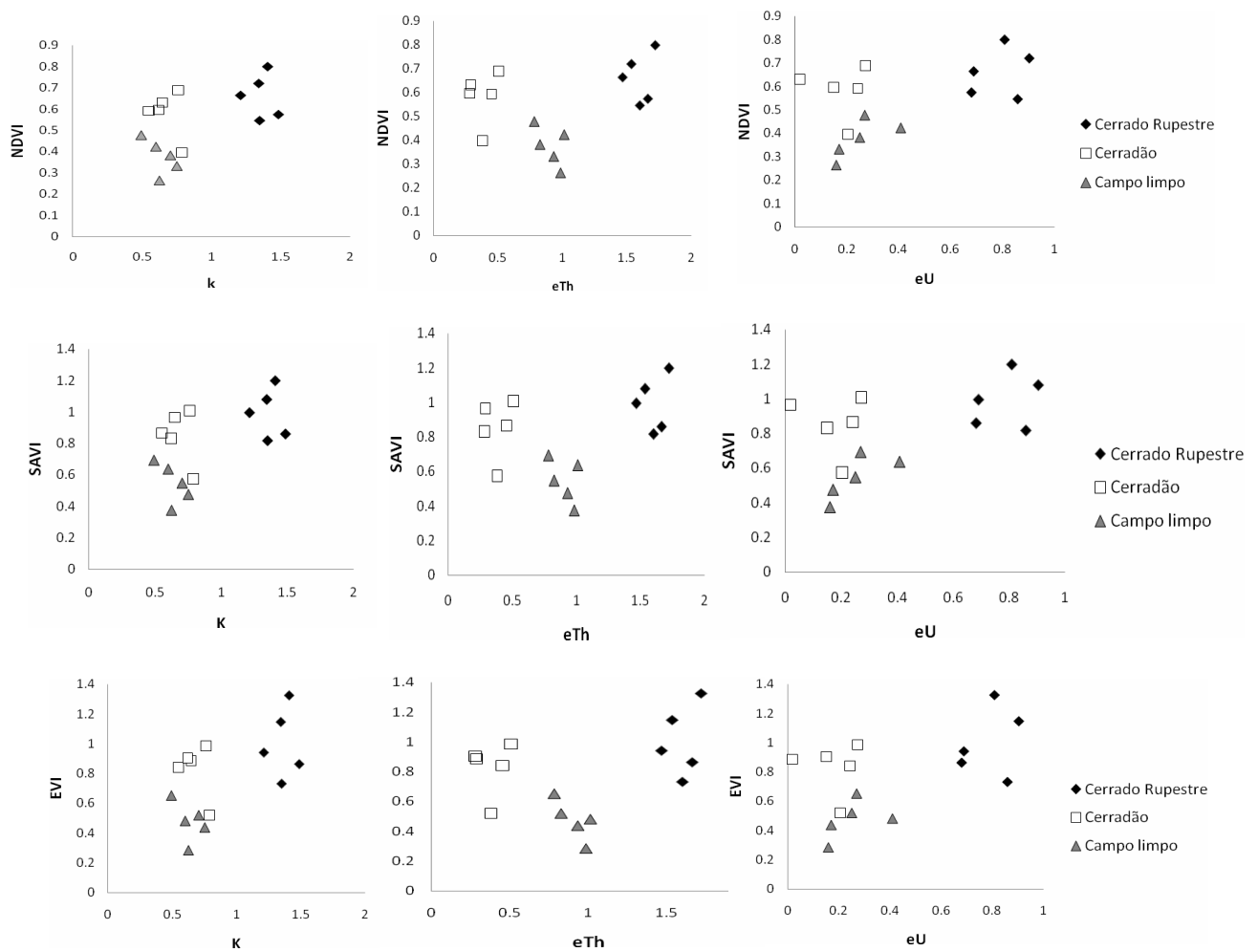
Antes da construção dos gráficos de dispersão foram analisados os comportamentos espectrais das médias das bandas do sensor TM/Landsat-5 para três fitofisionomias. Foi verificado que o Campo Limpo se distingue do Cerradão e do Cerrado Rupestre, mas essas duas últimas fitofisionomias apresentaram assinaturas espectrais muito semelhantes na banda 3, o que dificulta sua discriminação (Figura 4.8).



**Figura 4.8** - Comportamento espectral das fitofisionomias Campo Limpo, Cerradão e Cerrado Rupestre no sensor TM.

Para uma primeira investigação das possibilidades de discriminação entre as fitofisionomias, foram gerados gráficos de dispersão e confrontados os três índices de vegetação (NDVI, SAVI, EVI) com os canais de K, eTh e eU (Figura 4.9). Esse procedimento evidenciou uma boa segregação entre as formações vegetais em estudo, confirmando a possibilidade de integração dos dados gamaespectrométricos e de sensoriamento remoto orbital para a diferenciação de fitofisionomias. Os gráficos apresentam comportamento semelhantes entre os índices de vegetação, porém entre os radioelementos, o eTh mostra o melhor resultado.





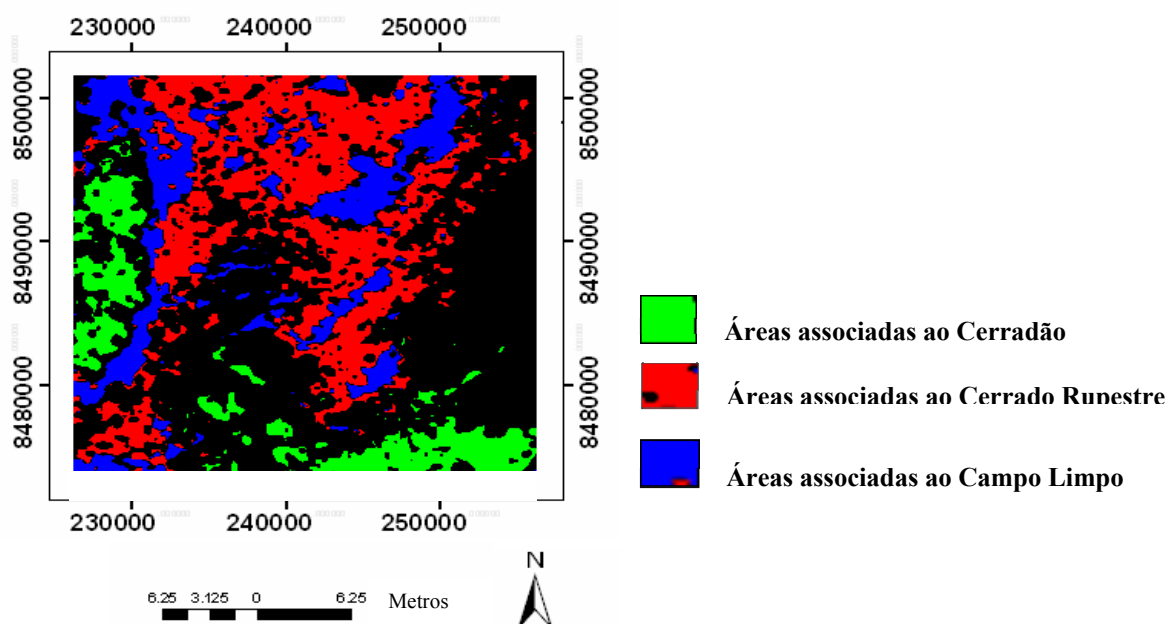
**Figura 4.9** - Gráficos de dispersão entre os índices de vegetação (NDVI, SAVI, EVI) e os radioelementos (K, eTh, eU).

Com os dados normalizados e escalonados foi observado que o Cerrado Rupestre apresentou valores médios a altos, K (1,48), eTh (1,72) e eU (0,90), enquanto o Cerradão apresentou baixos valores para os três radioelementos, K (0,78); e eTh (0,50) e eU (0,27). O Campo Limpo apresentou baixos valores de K (0,75) e de eU (0,40), e médios valores de eTh (1,01).

Quanto aos índices de vegetação, também considerando a normalização dos dados, o Cerrado Rupestre apresentou altos valores para os três índices. O Cerradão obteve valores médios para o NDVI (0,68) e altos para o SAVI (1,00) e o EVI (0,98). O Campo Limpo mostrou baixos valores nos três índices NDVI (0,47), SAVI (0,69) e EVI (0,65).

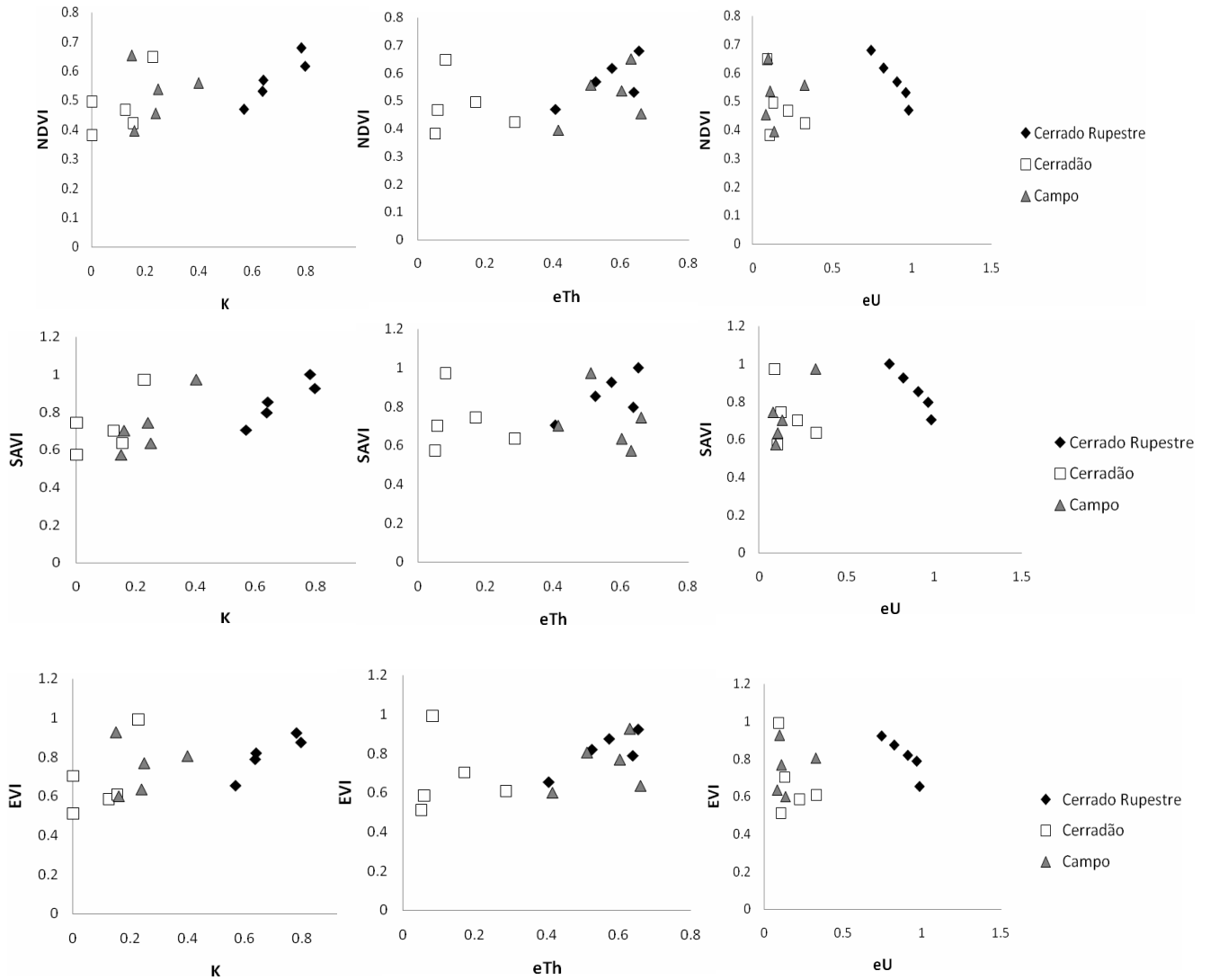
Foi aplicada uma classificação supervisionada (Figura 4.10), com base nos pontos identificados em campo e a partir da imagem aerogamaespectrométrica (RGB/KeTheU). Desse produto foram extraídos novamente os *pixels* correspondente as três fitofisionomias, sem as referências de campo, mas considerando o resultado da classificação associada a cada fitofisionomia estudada e gerados novos gráficos de dispersão para verificar a eficiência dos dados na discriminação das fitofisionomias (Figura 4.11).

A classe Cerrado Rupestre obteve boa diferenciação, quando confrontados os índices de vegetação com o K e eU. O Cerradão obteve boa discriminação quando confrontado com o eTh. Já as amostras do Campo Limpo, não obtiveram bons resultados, pois não houve separação dessas fitofisionomias.



**Figura 4.10** - Classificação supervisionada da imagem aerogamaespectrométrica RGB/K,eTh, eU com base nas áreas correspondentes às fitofisionomias Cerradão, Cerrado Rupestre e Campo Limpo.

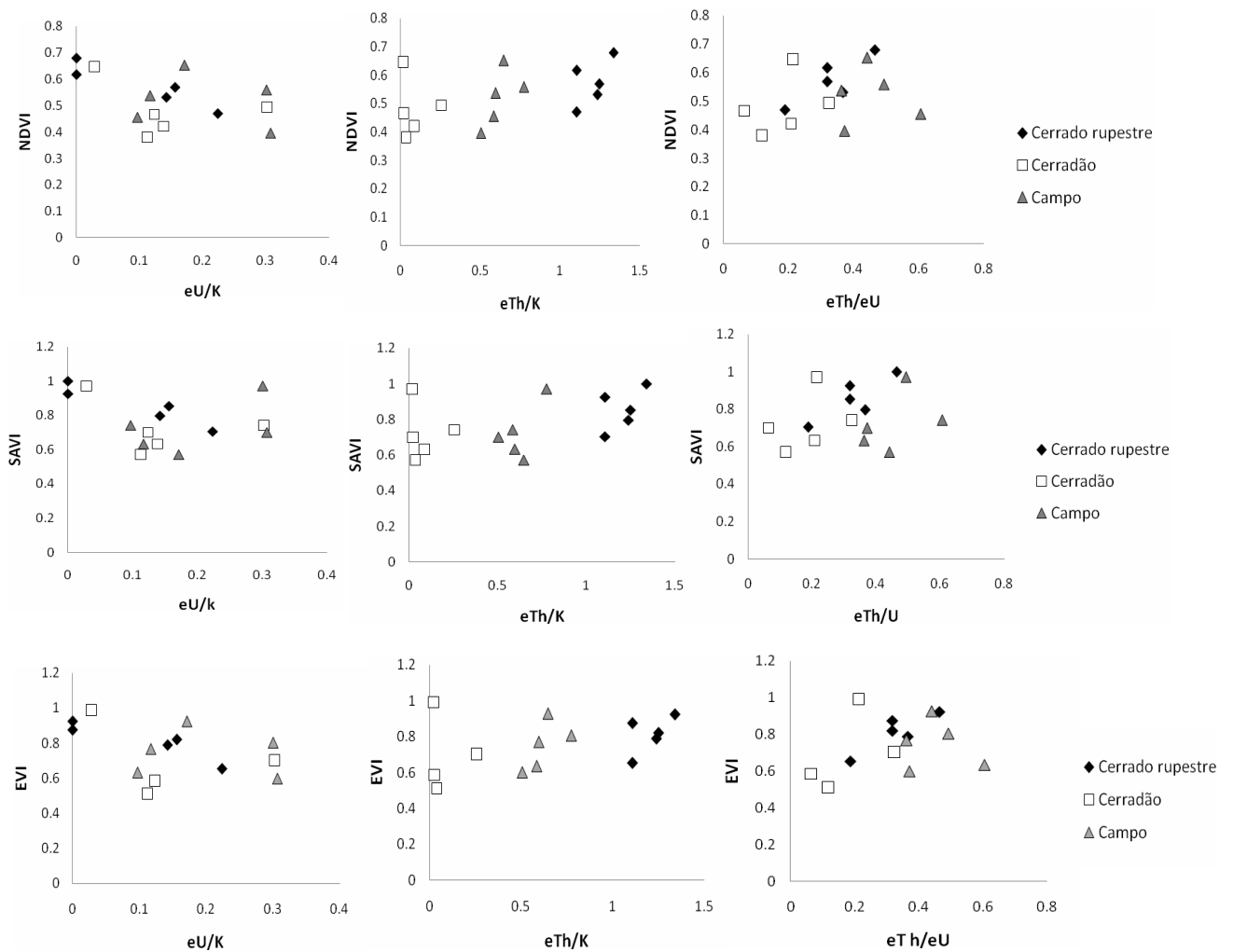
Quando analisado o gráfico dos radioelementos e os índices de vegetação, após a classificação (Figura 4.6), foi constatado que a classe Cerrado Rupestre se distinguiu em K e eU. Os dados de eTh separaram o Cerradão deixando evidente que os dois canais - eTh e K - apresentam potencialidade para separar as três fitofisionomias.



**Figura 4.11** - Gráficos de dispersão entre os índices de vegetação (NDVI, SAVI, EVI) e os radioelementos (K, eTh, eU), com base na classificação supervisionada.

A razão dos radioelementos eTh/K foi eficiente para discriminar as fitofisionomias. Foram testadas também as razões eU/K e eTh/eU, mas esses resultados indicaram a incompatibilidade para o uso dessas razões (Figura 4.12).

Portanto, foi concluído que a análise indicou alta correlação entre os dados aerogamaespectrométricos e as fitofisionomias analisadas para os canais do eTh e K.



**Figura 4.12** - Gráficos de dispersão entre os índices de vegetação (NDVI, SAVI, EVI) e as razões dos radioelementos (eU/K, eTh/K, eTh/eU) com base na classificação supervisionada.

### 4.3 Análise da concentração de radioelementos em relevos da área de estudo

Com o intuito de verificar algumas formas de relevo da área de estudo e sua relação com os radioelementos K, Th e U, a partir das imagens dos dados SRTM foi utilizado o conceito de classificação de superfície regional de aplainamento (SRA) para nortear a identificação dessas formas. Foi verificado que a mobilidade dos radioelementos apresenta relação com a altimetria, e suas concentrações variam em função das diferentes formas de relevos denudacionais em estudo.

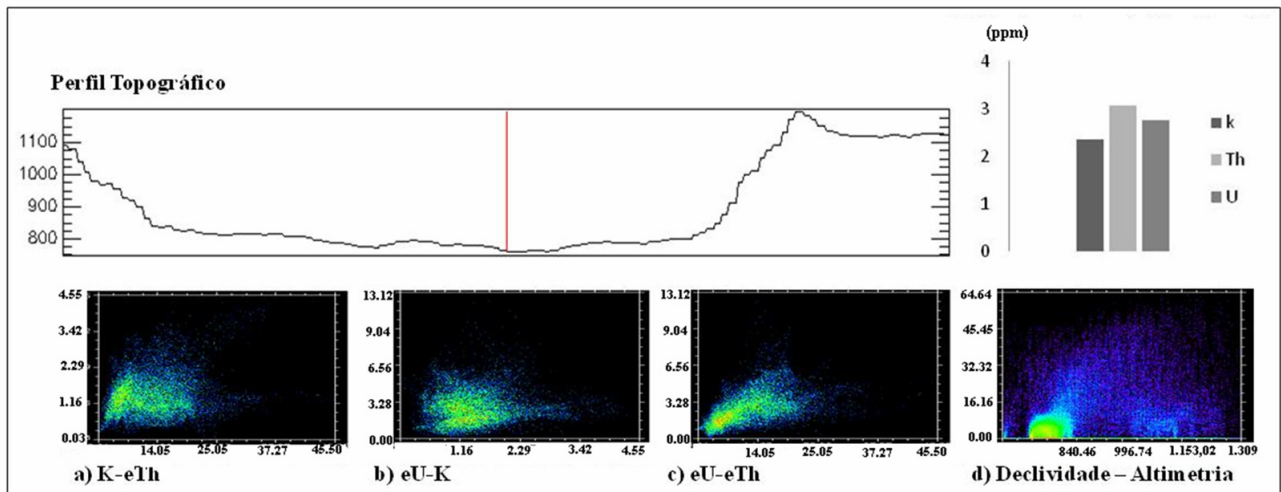
A geomorfologia e o intemperismo desempenham um papel fundamental na distribuição das concentrações de radioelementos na superfície. Variações nas concentrações de radioelementos oriundos de solos *in situ* e localizados a poucos metros acima do perfil do solo, podem variar significativamente ao longo do perfil em termos relativos e absolutos (IEA, 2006).

Como apresentado no Capítulo 2, a detecção da radiação gama ocorre na porção mais superficial do solo, nos primeiros 30 cm, onde os efeitos do intemperismo podem promover perda de potássio em todos os tipos de rochas, pois esse radioelemento é mais solúvel. Com as ações dos processos de intemperismo físico e químico, os radioelementos presentes nos minerais das rochas podem se tornar instáveis. Isto pode facilitar a redistribuição desses elementos no ambiente e, por fim, poderão ser incorporados ao regolito. Quando ocorrem diferenças entre as fontes dos radioelementos e do regolito, não será possível estabelecer relação entre esses elementos (Wilford *et al.*, 1997). As formas em diferentes tipos de relevo, podem também apresentar diferentes concentrações de potássio, tório e urânio.

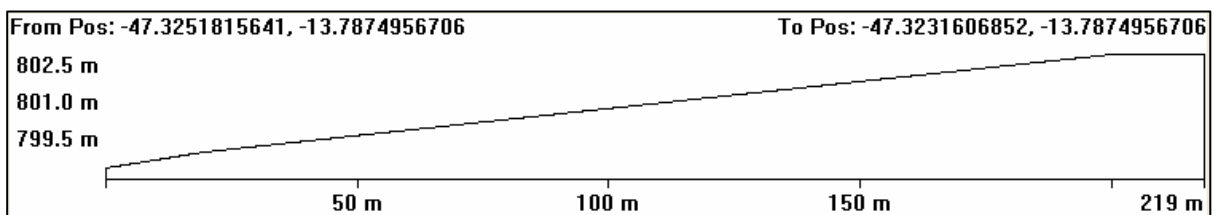
Para verificar esse comportamento, foram analisadas seis áreas amostrais e identificadas seis Superfícies Regionais de Aplainamento (SRAs), de acordo com a classificação de Carvalho & Byer (2008). Mas, quanto às formas de relevo, foram verificadas na área de pesquisa as formas: colinas, morros, formas tabulares e inselbergues. Essas formas apresentaram características distintas quanto à distribuição dos radioelementos, indicando a mobilidade dos mesmos diante dos processos de movimentação do regolito no relevo.

A área amostral 1 (Figura 4.13) é formada por colinas com maior presença de  $eTh$  (3,067 ppm) onde o relevo em análise foi identificado como SRA IIC (750 m-1000 m de altitude). Os gráficos de dispersão mostram maior dispersão entre o  $eU-K$  e o  $eTh-K$ . O gráfico  $eTh-eU$  apresentou características de comportamento linear. Foi verificada uma

população no gráfico de dispersão de Declividade-Altimetria, em um intervalo definido por amostras que concentram seus valores em torno de 800 m e declividade aproximada de 5°. A Área amostral 1 constitui características de relevo encontrada em área com presença de Cerradão (Figuras 4.14 e 4.25).

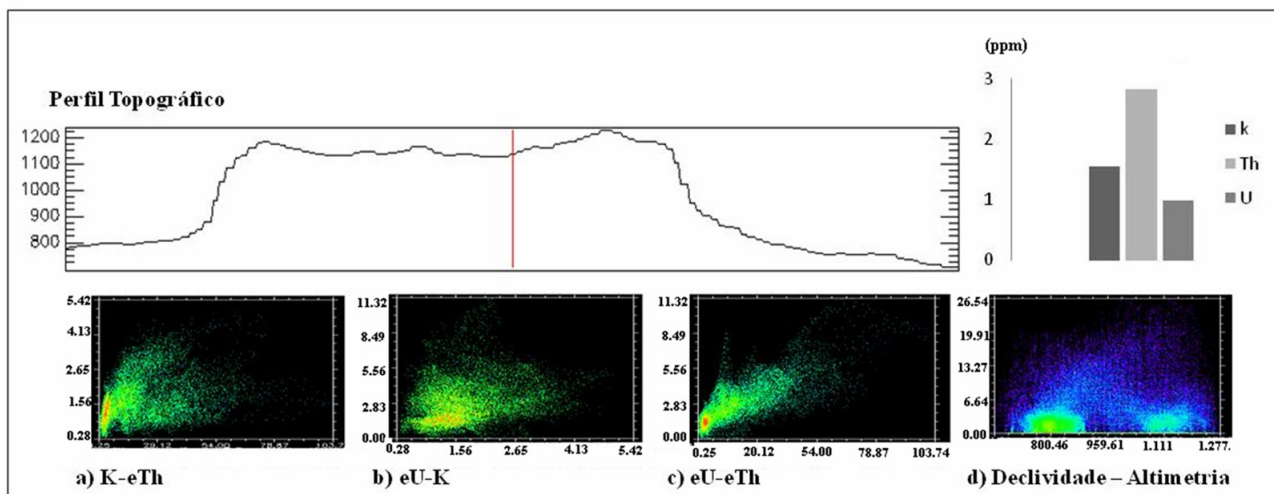


**Figura 4.13** - Perfil topográfico da área amostral 1; Médias dos valores de concentração dos radioelementos e; Gráficos de dispersão (a-d).

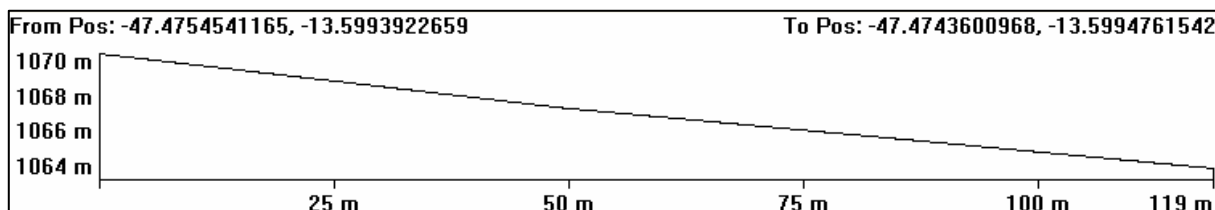


**Figura 4.14** - Perfil da área de coleta da fitofisionomia Cerradão.

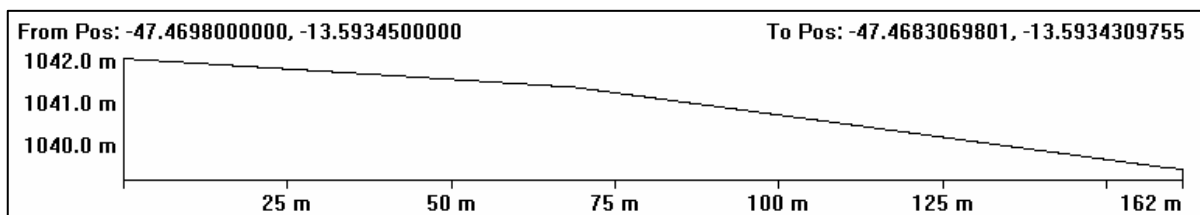
A área amostral 2 (Figura 4.15) possui formas tabulares identificada com a classe SRA IIA (900 m - 1250 m de altitude) onde é maior a concentração de  $eTh$  (2.826 ppm). O comportamento dos gráficos  $K-eTh$  e  $eU-eTh$ , são similares em sua forma e na concentração dos valores médios de potássio. As amostras do gráfico de dispersão  $eU-eTh$  tendem ao comportamento linear. O gráfico de dispersão Declividade-Altimetria apresenta duas populações com elevação de 800 m a 1100 m e declividade de 4° a 8°. Nessa área estão as fitofisionomias Campo Limpo e Campo Sujo (Figuras 4.16, 4.17 e 4.25).



**Figura 4.15** - Perfil topográfico da área amostral 2; Médias dos valores de concentração dos radioelementos e; Gráficos de dispersão (a-d).

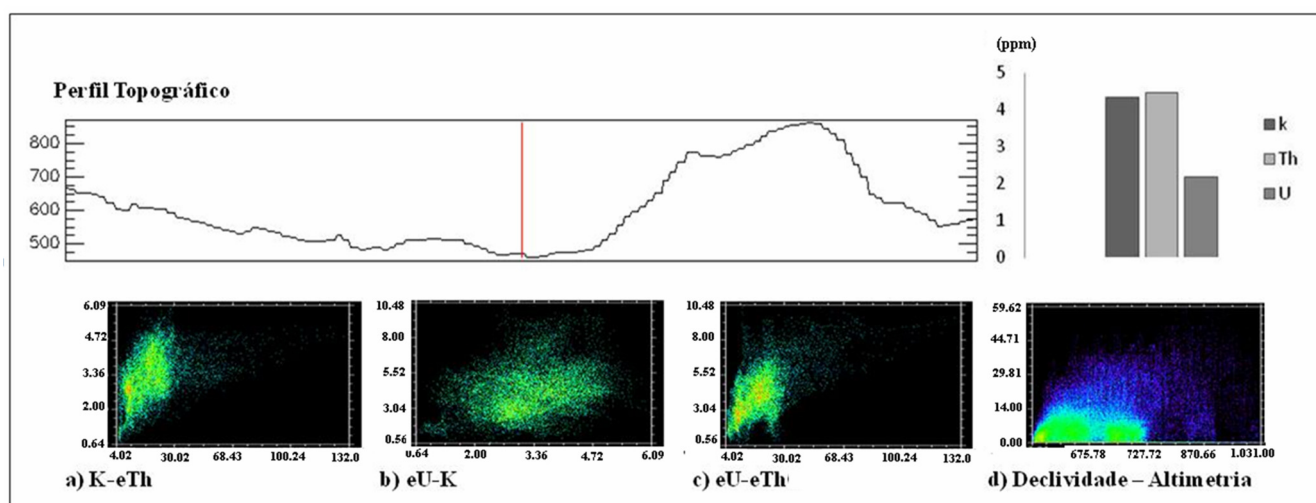


**Figura 4.16** - Perfil da área de coleta da fitofisionomia Campo Sujo.

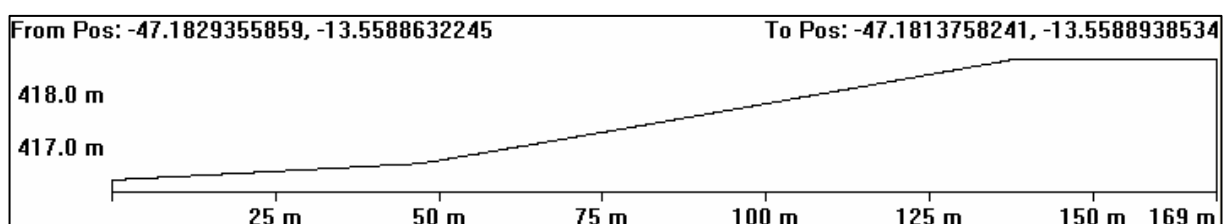


**Figura 4.17**- Perfil da área de coleta da fitofisionomia Campo Limpo.

A área amostral 3 (Figura 4.18) caracterizada também por colinas e concentrações de  $eTh$  (4,476 ppm) e K (4,352%) muito próximas de suas médias foi identificada como SRA IVA (400m - 500m de altitude). O comportamento dos gráficos de dispersão entre K- $eTh$  e  $eU$ - $eTh$  são semelhantes, tendendo para um ajuste linear. O gráfico  $eU$ -K é mais disperso. É verificado no gráfico de dispersão da Declividade - Altimetria duas populações de amostras que concentram valores entre 400 m a 700 m e declividade de 3° a 10°. Nessa área foi identificada a fitofisionomia Cerrado *sensu stricto* (Figuras 4.19 e 4.25).



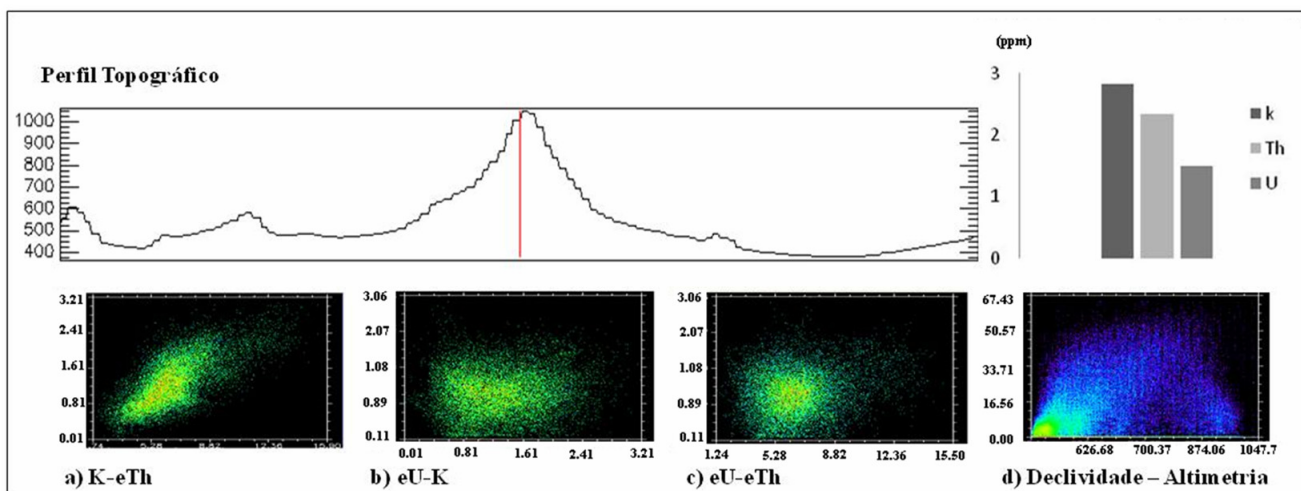
**Figura 4.18** - Perfil topográfico da área amostral 3; Médias dos valores de concentração dos radioelementos e; Gráficos de dispersão (a-d).



**Figura 4.19** - Perfil da área de coleta da fitofisionomia Cerrado *Sensu Stricto*.

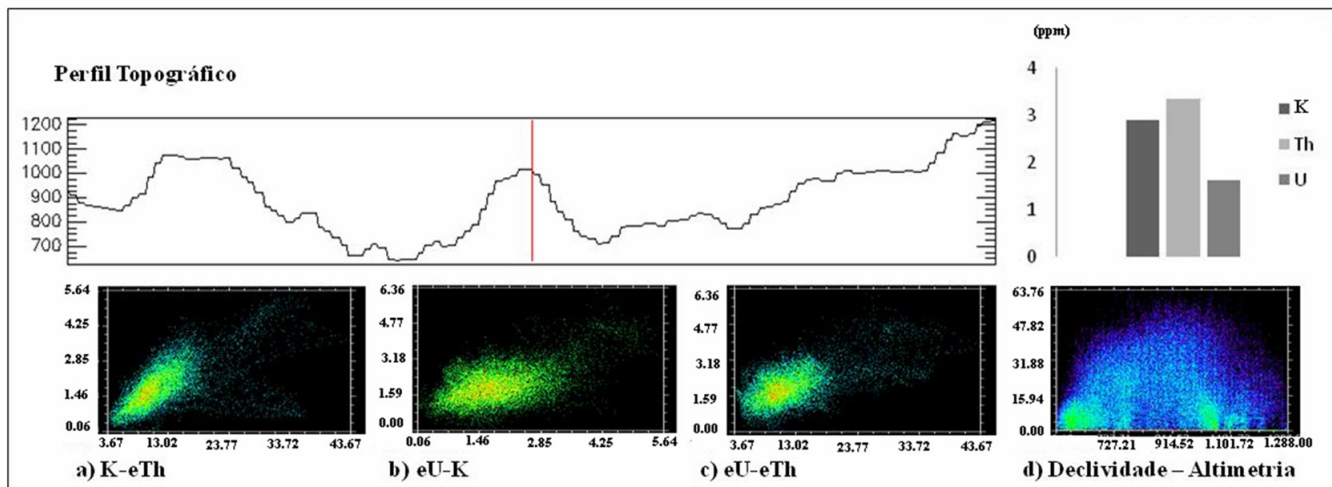
A área amostral 4 (Figura 4.20) foi identificado a forma de inselbergs com maiores concentrações de  $eTh$  (3,354 ppm) e definida como SARA IIA (900 m - 1250 m de altitude) apresentando maior dispersão das amostras  $eU$ -K e  $eU$ - $eTh$ . No gráfico K- $eTh$ , as amostras tendem a distribuição normal. O gráfico de Declividade-Altmetria concentra uma população com baixos valores de declividade (0 - 4°) e altimetria (350 m a 500 m).



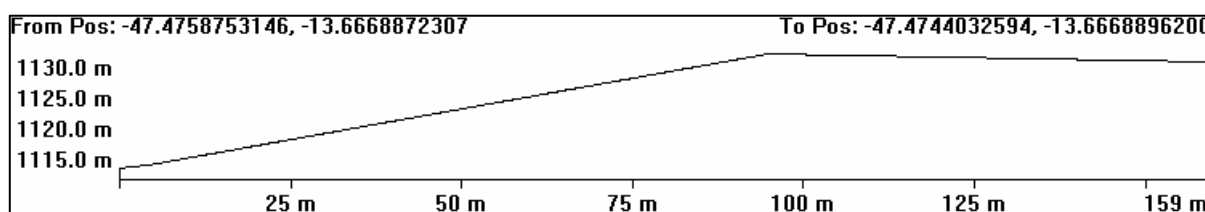


**Figura 4.20** - Perfil topográfico da área amostral 4; Médias dos valores de concentração dos radioelementos e; Gráficos de dispersão (a-d).

A área amostral 5 (Figura 4.21) apresenta relevo de morros com elevadas concentrações de K (2,838%) e foi definida como SRA IIB (900 m - 1000 m de altitude). As amostras de dispersão dos gráficos de K-eTh, eU-K e eU-eTh tendem à distribuição com maior ajuste no gráfico K-eTh. Os valores das amostras do gráfico de Declividade-Altitude apresentam dispersão de valores que varia entre 500 m a 1200 m e declividade com forte inclinação, podendo atingir até 50°. Nesta área foi identificada a fitofisionomia Cerrado Rupestre (Figura 4.22).

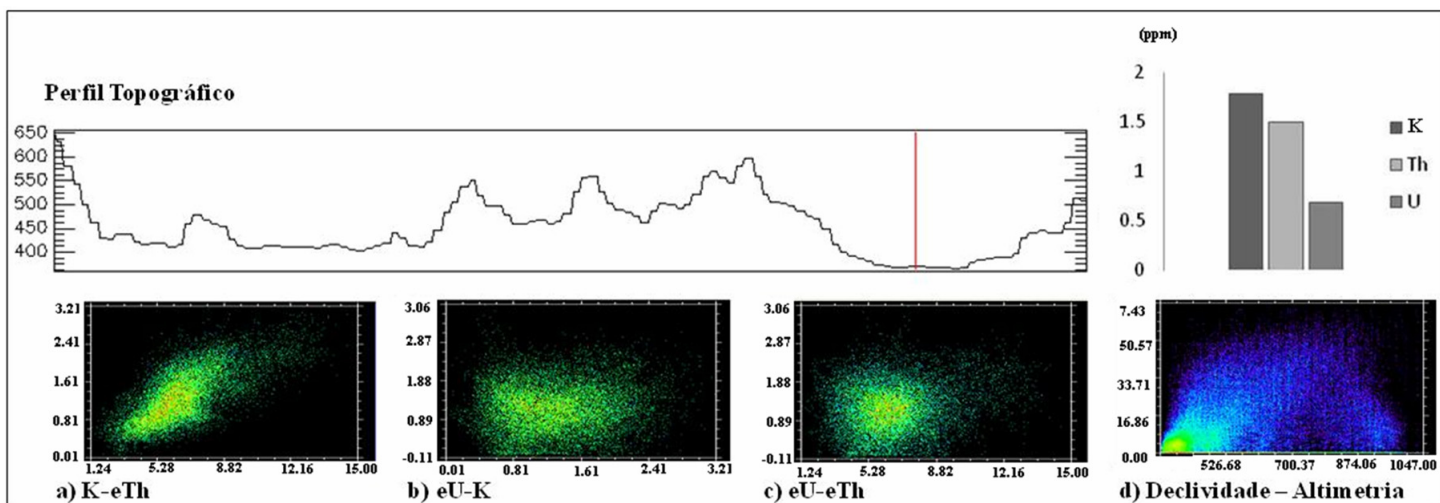


**Figura 4.21** - Perfil topográfico da área amostral 5; Médias dos valores de concentração dos radioelementos e; Gráficos de dispersão (a-d).



**Figura 4.22** - Perfil da área de coleta da fitofisionomia Cerrado Rupestre.

A área amostral 6 (Figura 4.23) possui maiores concentrações de K (1,792%), o relevo é de colinas identificadas como SRA IVC (250 m - 400 m de altitude). Quanto aos gráficos de dispersão, foi verificado que as amostras do gráfico K-eTh tendem a simetria e há maior dispersão nos gráficos de eU-K e eU-eTh. O gráfico de Declividade-Altitude possui uma população que concentra amostras com 350 m a 400 m e 0°- 4°.



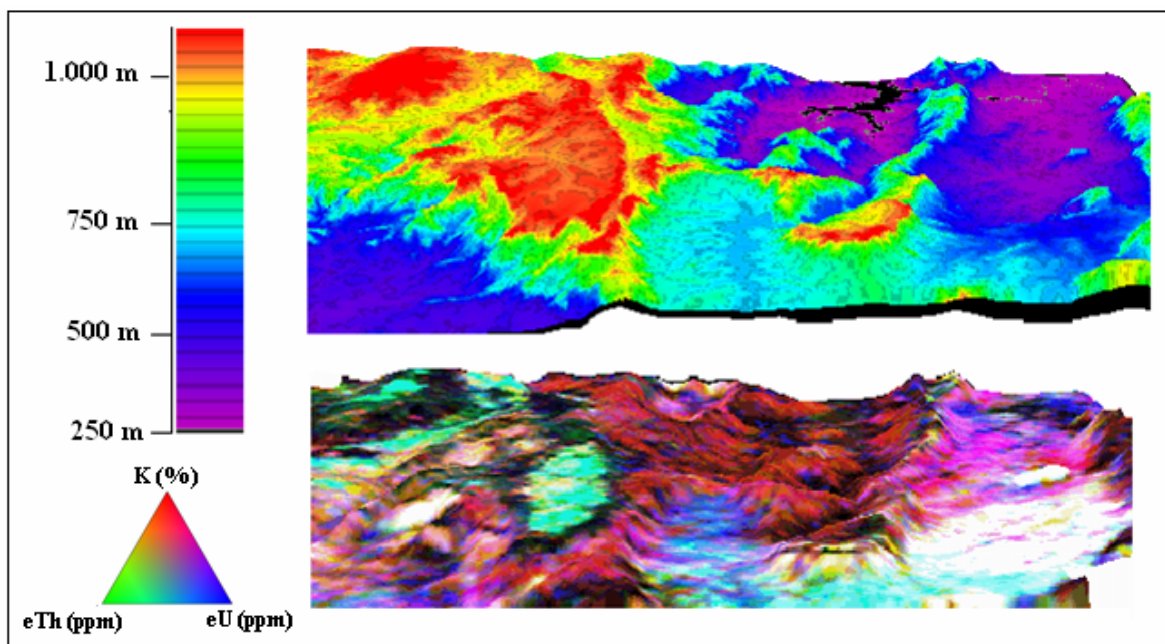
**Figura 4.23** - Perfil topográfico da área amostral 6; Médias dos valores de concentração dos radioelementos e; Gráficos de dispersão (a-d).

Foi verificado que as áreas amostrais 5 e 6 constituem relevos com morros e colinas e apresentam maiores concentrações de K. A maior concentração desse elemento está em relevos mais rebaixados (Figura 4.24). Isto é explicado devido à mobilidade do potássio em áreas com relevos mais suaves, esses formados por processos de deposição. Nessas regiões gamaespectrométricas com maiores valores de K, foram identificadas áreas com presença de Cerrado *Sensu Stricto* e Cerrado Rupestre (Figura 4.24).

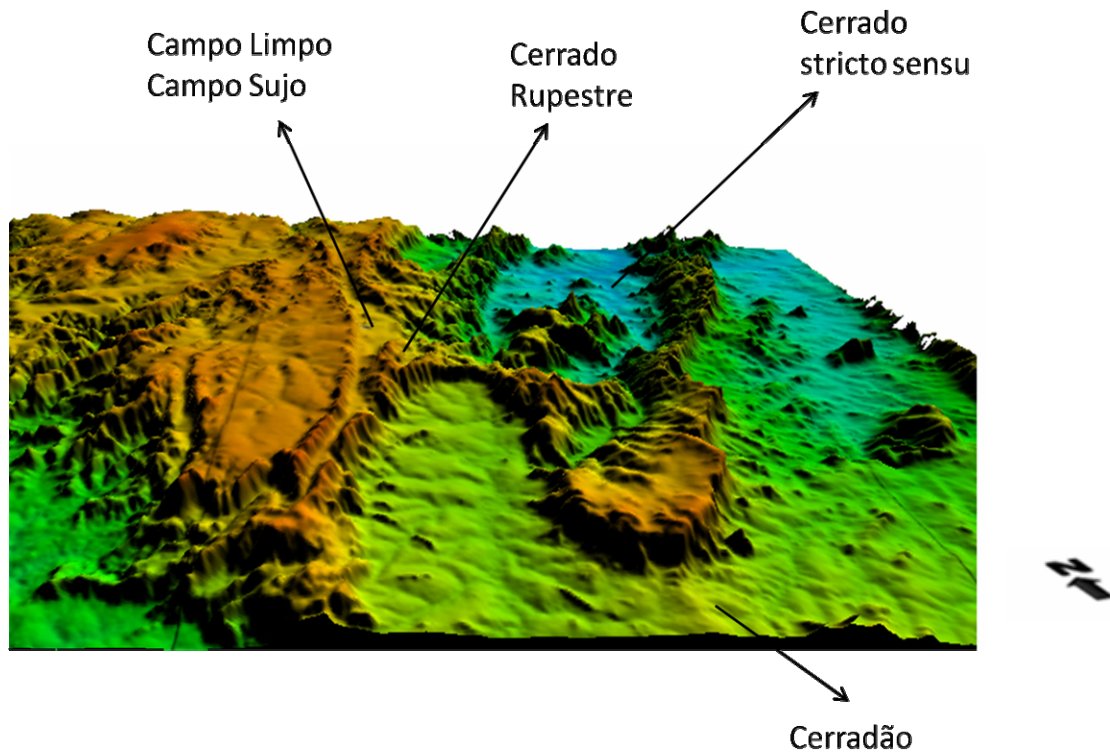
O urânio (Figura 4.24) constitui maiores concentrações na área amostral 1 no relevo identificado como colina, onde se encontra a fitofisionomia Cerradão (Figura 4.25). Em outras formas de relevo, o urânio obteve baixas concentrações. Devido a baixa mobilidade química apresentada pelo tório, a área mostra baixas concentrações desse por ser uma região bastante desgastada por processos erosivos.

O tório está presente, em maiores concentrações, nas áreas amostrais 1, 2, 3 e 4 especificamente em colinas, formas tabulares e *inselbergs*. Nas duas últimas, foi previsto a presença desse radioelemento devido a sua baixa mobilidade. Nessas regiões com maiores concentrações de Th foram encontradas as fitofisionomias Cerradão, Campo Limpo e Campo sujo (Figura 4.24). Entretanto, sua presença em áreas de colinas pode estar associada aos processos de erosão antigos, de idade Paleoproterozóica (Dardenne *et al.*, 1999; Martins, 1999).

Os relevos de baixa altimetria e baixa declividade, assim como relevos de maior altimetria e declividade, podem apresentar elevadas concentrações de  $eTh$ . Em geral, isto ocorre, em relevos mais elevados devido a sua baixa mobilidade química (Dickson & Scott, 1997). Os relevos de morros e *ineslbergs* tendem a concentrar maiores teores de K. Os radioelementos apresentam comportamento associado aos processos de mobilidade conforme a altimetria, como já verificado na literatura, mas foi observado que suas concentrações podem variar em formas de relevos denudacionais.



**Figura 4.24** - Modelo Digital de Terreno (MDT) com sobreposição de imagem aerogamaespectrométrica composição colorida RGB/ K, eTh, eU.



**Figura 4.25** - Relevo da área de estudo e áreas de ocorrência das fitofisionomias abordadas.

#### 4.4 Gamaespectrômetro portátil e detecção de espécies vegetais do Cerrado

Dados gamapespectrométricos tradicionalmente são utilizados para verificar comportamentos litológicos, a partir da radiação gama emitida dos radioelementos K, Th e U contidos nas mesmas. E devido à relação entre a rizosfera e a absorção das plantas, em condições específicas, elementos químicos contidos nos minerais das rochas podem migrar para as plantas, portanto, se tornando possível utilizar esses dados para identificá-las. A fim de verificar essa possibilidade foram utilizados dois gamaespectrometros portáteis, modelo Exploranium GR-320, e modelo RS-230 BGO, para medir o comportamento da radiação em três espécies do Cerradado. Também foram usados dados aerogamaespectrométricos para comparar com os dados das espécies avaliadas. Com a coleta de campo foram separadas as espécies *Byrsonima rotunda*, *Chamaecrista orbiculata* e *Bauhinia* sp. encontradas respectivamente nas fitofisionomias; Cerradão, Cerrado Rupestre e Campo Limpo (Figura 4.26).

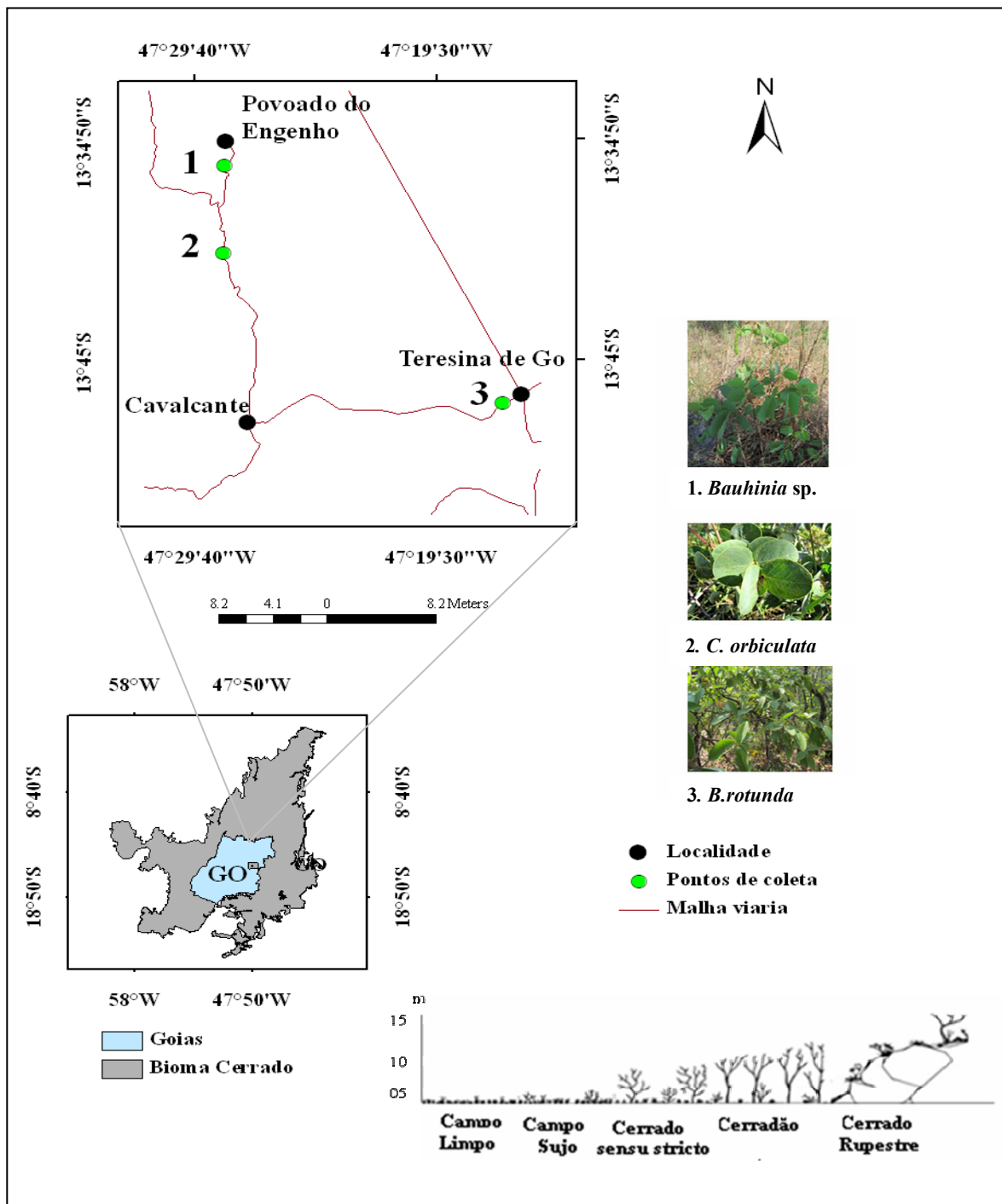


Figura 4.26 - Localização das espécies coletadas.

Foram realizadas medições dos radioelementos K,  $eTh$  e  $eU$  com gamaespectrômetro portátil para compará-las com àquelas obtidas pelo aerogamaespectrômetro e com os

resultados de análise química por meio da técnica de Espectrofotometria de Absorção Atômica (EAA) para o radioelemento K.

As medições com o gamaespectrômetro portátil Exploranium GR-320 forneceram valores muito baixos de radiação para os canais de K e U, apenas o Th obteve valores mais elevados, possibilitando observar a diferenciação da concentração desse radioelemento nas espécies. Das três espécies averiguadas, a espécie *Byrsonima rotunda* obteve maior concentração de eTh, tanto para os testes aplicados em folhas, como para os aplicados em galhos (Figura 4.27).

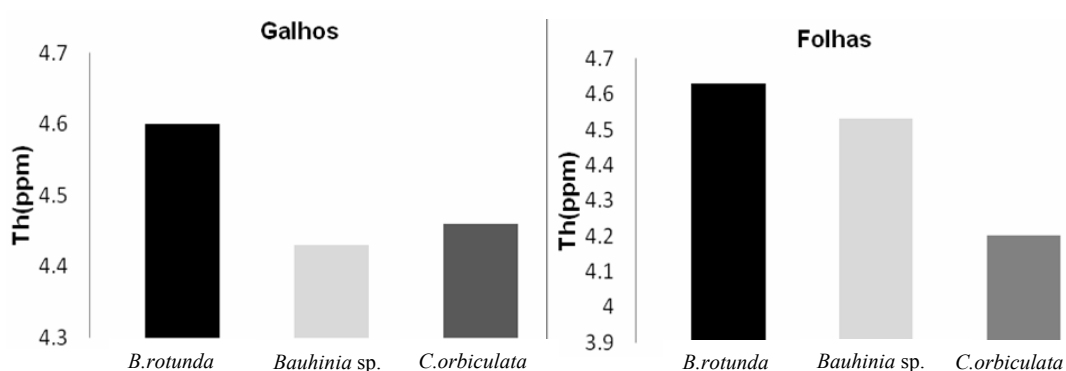


Figura 4.27 - Medidas de eTh por gamaespectrômetro portátil GR-320.

Ao aplicar o Teste *t* (Tabela 4.1) para verificar o nível de significância entre o *background* e as espécies no gamaespectrômetro portátil verificou-se que apenas a presença do Th foi significativa para a espécie *B. rotunda*. As concentrações do Th dessa espécie são altas e baixas para as espécies *Bauhinia sp.* (68,3 ppm) e *C. orbiculata* (70,5 ppm), respectivamente.



**Tabela 4.1** - Teste *t* aplicado aos valores referentes ao *background* e às espécies (folhas e galhos) por gamaespectrômetro portátil *Exploranium*, GR-320.

Espécies	Stat <i>t</i>	<i>t</i> crítico	Estatística	Resultado do teste <i>t</i>
<i>Chamaecrista orbiculata</i> /G*	0,70	2,91	Stat <i>t</i> < <i>t</i> crítico	Não rejeita H <sub>0</sub>
<i>Chamaecrista orbiculata</i> /F*	1,29	2,91	Stat <i>t</i> < <i>t</i> crítico	Não rejeita H <sub>0</sub>
<i>Byrsonima rotunda</i> /G*	-4,91	-2,91	Stat <i>t</i> < <i>t</i> crítico	Rejeita H <sub>0</sub>
<i>Byrsonima rotunda</i> /F*	-0,928	2,91	Stat <i>t</i> < <i>t</i> crítico	Não rejeita H <sub>0</sub>
<i>Bauhinia</i> sp /G*	0	2,91	Stat <i>t</i> > <i>t</i> crítico	Não rejeita H <sub>0</sub>
<i>Bauhinia</i> sp /F*	-2,82	2,91	Stat <i>t</i> < <i>t</i> crítico	Não rejeita H <sub>0</sub>

\* G = Galho, F = Folha

Como os resultados obtidos com o gamaespectrômetro modelo *Exploranium*, GR-320 foram significativos apenas para *B. rotunda*, utilizou-se um gamaespectrômetro com maior acurácia (gamaespectrômetro RS-230 BGO) para medir as respostas da radiação gama nas folhas das espécies. Nos testes com esse instrumento foram observados resultados com melhor significância novamente para *B. rotunda* no canal do Th, e no canal do U para a espécie *C. orbiculata*. A espécie *Bauhinia* sp. não foi significativa para nenhum dos dois canais analisados (Tabela 4.2).

**Tabela 4.2** - Teste *t* aplicado aos valores referentes ao *background* e às espécies (folhas) com gamaespectrômetro portátil RS-320.

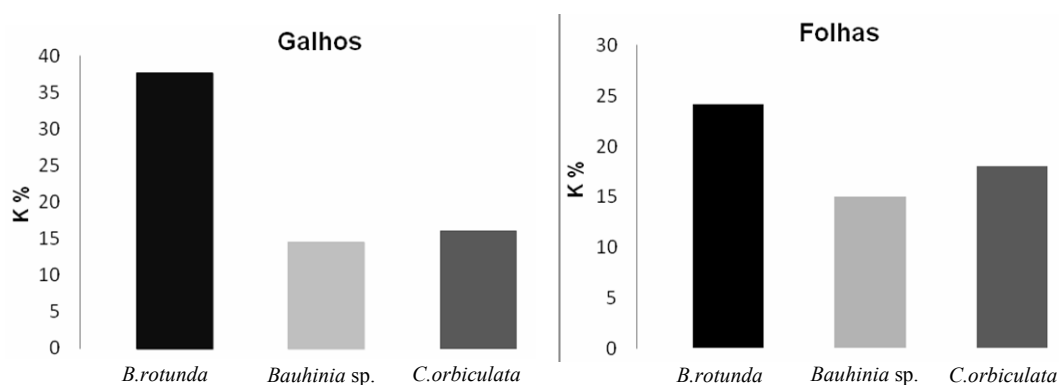
	Espécie	Stat <i>t</i>	<i>t</i> crítico	Estatística	Resultado do teste <i>t</i>
<b>Tório</b>	<i>Chamaecrista orbiculata</i>	0.33	2.91	Stat <i>t</i> < <i>t</i> crítico	Não rejeita H <sub>0</sub>
	<i>Byrsonima rotunda</i>	-3.66	-2.91	Stat <i>t</i> < <i>t</i> crítico	Rejeita H <sub>0</sub>
	<i>Bauhinia</i> sp.	0.211	2.91	Stat <i>t</i> < <i>t</i> crítico	Não rejeita H <sub>0</sub>
<b>Urânio</b>	<i>Chamaecrista orbiculata</i>	0.04	2.91	Stat <i>t</i> < <i>t</i> crítico	Rejeita H <sub>0</sub>
	<i>Byrsonima rotunda</i>	1	2.91	Stat <i>t</i> < <i>t</i> crítico	Não rejeita H <sub>0</sub>
	<i>Bauhinia</i> sp.	0.04	2.91	Stat <i>t</i> < <i>t</i> crítico	Não rejeita H <sub>0</sub>

A absorção da espécie *Byrsonima rotunda* pode ser compreendida quanto as propriedades do tório, que é um elemento actínideo com um estado de valência de Th<sup>4+</sup> em solução, podendo ocorrer estados de valência mais baixos em estado sólido. Ele forma



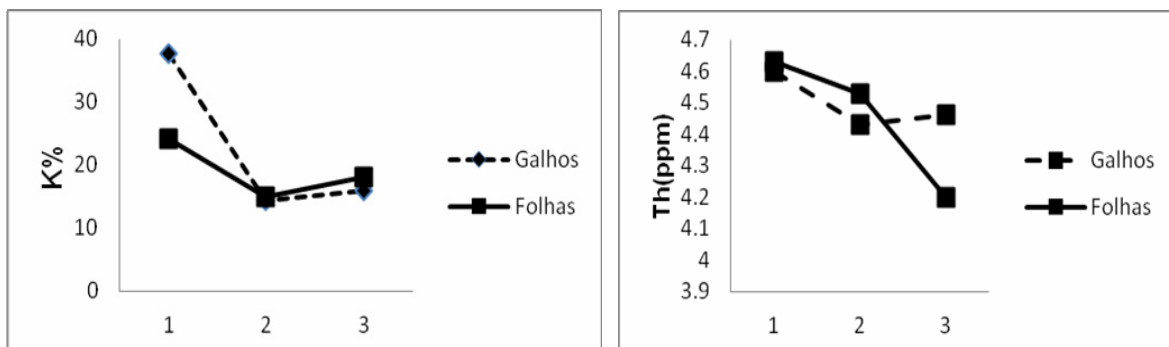
com o fluoreto anions (oxalato, fosfato e iodato) precipitados insolúveis. Mas o Th pode ser dissolvido em soluções ácidas e a sua solubilidade é aumentada por ácidos húmicos (Shtangeeva *et al.*, 2006; Hunria & Vargas, 1997). Essa condição em ambiente húmico pode ser encontrada na fitofisionomia Cerradão (Passos *et al.*, 2007).

Devido as baixas concentrações obtidas pelo gamaespectrômetro portátil para o canal do K, e o nível de significância não ser relevante para os dois gamaespectrômetros testados, foi feita uma análise química laboratorial utilizando o Espectrofotômetro de Absorção Atômica (EAA). Os resultados mostraram que a espécie *Byrsonima rotunda* também possui altas concentrações do K, evidenciando a capacidade de absorção dos radioelementos por essa espécie (Figura 4.28).



**Figura 4.28** - Medidas da concentração de K por EAA nas espécies estudadas.

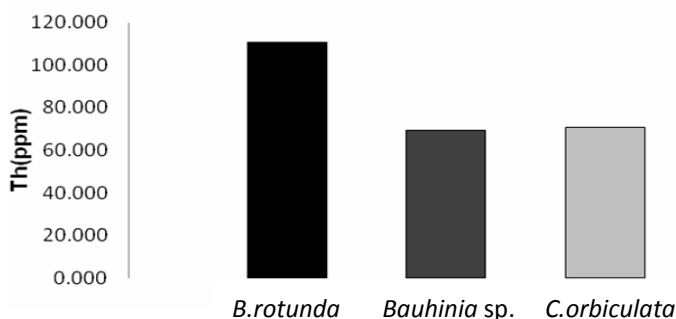
Ao comparar os dados do gamaespectrômetro portátil referente aos valores do Th, e os valores do K por EAA, os gráficos (Figura 4.29) apresentaram comportamento similar para aqueles extraídos dos galhos das espécies. O valor da correlação de Pearson entre as espécies para os dois métodos mostrou correlação positiva ( $P = 0,68$ ), onde os maiores valores são da espécie *Byrsonima rotunda*.



**Figura 4.29** - Comparação entre os valores de K e Th para as espécies (1) *Byrsonima rotunda*, (2) *Bauhinia* sp. e (3) *Chamaecrista orbiculata*.

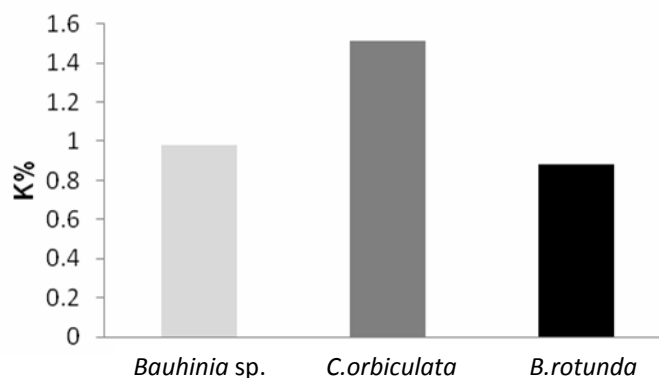
O tório enquanto elemento absorvido pelas espécies pode indicar toxicidade nutricional nas plantas, mas de acordo com Munson (1998), o nível de toxicidade também pode ser encontrado nas análises químicas das plantas com o potássio, que é um dos elementos essenciais ao desenvolvimento da planta, e tem como parâmetro aproximado de absorção excessivamente tóxica valores acima de 6,00%. Todas as espécies analisadas obtiveram valores que excedem o nível de toxicidade, a espécie *Byrsonima rotunda* obteve (37,65%), a espécie *Bauhinia* sp. obteve (14,4%) e a espécie *Chamaecrista orbiculata* (15,97%). Entretanto, a absorção do K por esse gênero pode ser comum (Martinez, 1977; Vallilo, 2007).

Os resultados dos dados da aerogamaespectrometria para o ambiente onde foram coletadas as espécies mostrou que a espécie *Byrsonima rotunda* apresenta uma alta concentração de  $eTh$  nos substratos (Figura 4.30).



**Figura 4.30** - Medidas da concentração de  $eTh$  por aerogamaespectrometria aérea nos locais de coleta.

Também, as amostras avaliadas pelo método EAA apresentam maior ocorrência do radioelemento K na área de coleta da espécie *Chamaecrista orbiculata* (Figura 4.31). Os altos valores de K para as três espécies não depende apenas da presença do radioelemento no ambiente, mas da presença da planta e de sua capacidade orgânica da planta de absorver e armazenar o elemento em solução.



**Figura 4.31** - Levantamento aerogamaespectrométrico de K nas áreas de coleta das espécies.

Essa propriedade também pode variar de acordo com a estação seca, ou, chuvosa, como apresentado no trabalho de Araújo & Haridasan, (2007) que verificaram que espécies do cerrado decíduas e brevidecíduas apresentaram maior concentração de macronutrientes foliar no início da estação chuvosa e menores concentrações desses nutrientes no final da estação seca.

A identificação da presença de radioelementos em espécies do Cerrado com gamaespectrômetro portátil indicou novamente, a possibilidade de uso dos levantamentos gamaespectrométricos para subsidiar estudos relacionados à vegetação.

---

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F.F.M. 1977. *Províncias estruturais brasileiras. In: Simpósio de Geologia do Nordeste*, 8, 1977, Campina Grande, Atas Campina Grande: SBG, p: 363-391.

ALMEIDA, T. I. R. DE; JULIANI, C.; MANTOVANI, W. ; PÉREZ-AGUILAR, A.2007.Comunidades florestais como indicadores geobotânicos: o caso da mineralização aurífera do Grupo Serra do Itaberaba. *Revista Brasileira de Geociências*, Guarulhos, São Paulo v.37, n.1, p. 37-49.

ALVARENGA, C. J. S. D. BOTELHO, N. F.; DARDENNE M. A.; LIMA, O. N. B. de; Machado M. A. Cavalcante- SD.23-V-C-V, escala 1:100.000: nota explicativa integrada com Monte Alegre de Goiás e Nova Roma. In: BRASIL.2007. C. D. P. D. R. M.-C. G. D. *Programa Geologia do Brasil: Levantamento Geológicos Básicos*. Brasília: UnB/CPRM, p. 1-79.

AMABIS, J. M.; MARTHO, G. R. 2003. *Fundamentos de Biologia Moderna*. São Paulo: Moderna.

ANDRADE, L. R. M. D.; SILVA, J. C. S. 2009. Savanas no Mundo: demandas para pesquisa. In: FALEIRO, F. G.; NETO, A. L. D. F. *Savanas: demandas para pesquisa*. Planaltina,DF: Embrapa Cerrados,.

ARAÚJO, F. de J.; HARIDASAN, M. Relação entre deciduidade e concentrações foliares de nutrientes em espécies lenhosas do cerrado. 2007.*Revista Brasileira de Botânica*, V.30, n.3, jul.-set. p.533-542,

AKÇAY, M.; LERM, A.; VAN, A. Biogeochemical exploration for massive sulphide deposits in areas of dense vegetation: an orientation survey around the Kanko'y Deposit. 1998. *Journal of Geochemical Exploration*, v., p. 63 173–187.

BECEGATO, V. A.; FERREIRA, J. F. 2005. Gamaespectrometria, resistividade elétrica e susceptibilidade magnética de solos agrícolas no noroeste do estado do Paraná. *Revista Brasileira de Geofísica*, São Paulo, 23, Oct./Dec. 371-405.

BEZERRA, H. S.; SANO, E. E.; FERREIRA, L. G. 2007. Desempenho do satélite sino-brasileiro de recursos terrestres CBERS-2 no mapeamento da cobertura da terra no Distrito Federal, Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*, São Paulo, 25, Apr./June. 171-185.

BOTELHO, N.F.; ALVARENGA, J.C.S.; MENESES, P.R.; D'EL-REY SILVA, L.J.H. 1999. Suíte Aurumina: uma suíte de granitos paleoproterozóicos, peraluminosos e sin-tectônicos na Faixa Brasília. In: SBG, *Simpósio de Geologia do centro-Oeste*, 7, Brasília, Anais p. 17.

BOTELHO, N.F.; PORTELA, J.F. 2005. *Caracterização petrográfica e geoquímica das rochas metassedimentares da Formação Ticunzal, no contexto da Suíte Granítica Aurumina, Goiás*. IX Simpósio de Geologia do Centro-Oeste, Goiânia, SBG, p. 36-38.

BOTELHO, N.F.; ALVARENGA, J.C.S.; DARDENNE, M.A. 2005. *Trabalho Final de Graduação*. Projeto Nova Roma – Porto Real. Mapeamento geológico 1:50.000 da folha Nova Roma. Universidade de Brasília. – UnB.

BOTELHO, N.F.; FUCHS, R.A.; DANTAS, E.L.; JUNGES, S.L. 2006. The Paleoproterozoic peraluminous Aurumina granite suite, Goiás and Tocantins, Brasil: Geological, whole rock geochemistry and U-Pb and Sm-Nd isotopic constraints. In: IGPC, 509, Brazil, September 9–21.

BUSCHBACHER, R. 2000. *Expansão Agrícola e Perda da Biodiversidade no Cerrado: Origens históricas e o papel do comércio internacional*. Brasília: WWF.

Burris, A. R. H., Review, S. B., & Mar, N. 2014. Isotopes as Tracers in Plants, *16*(3), 150–180.

CAMPOS, J. E. G. 2004. Hidrogeologia do Distrito Federal: bases para gestão dos recursos hídricos subterrâneos. **Revista Brasileira de Geociências**, Brasília, v. 34, n. 1, p. 41-48.

CAMPOS, J. E. G., DARDENNE, M. A., FREITAS S., F. H.; MARTINS F. M. A. C. 2013. Geologia do Grupo Paranoá na porção externa da Faixa Brasília. *Brazilian Journal of Geology*, *43*(3), 461–476.

CARMELO, A. C.; MENESES, P. R. 1996. Metodologia para Integração de Imagens Gamaespectrométricas e TM/LANDSAT-5 através do IHS. *Anais VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Salvador, 14-16.

CARVALHO, T. M. D.; BAYER, M. 2008. *Utilização dos produtos da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) no Mapeamento Geomofológico do Estado de Goiás*. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 9, n. 1, 35-41.

CRIST, E. P.; CICONE, R. C. 1984. Application of the Tasseled Cap Concept to Simulated Thematic Mapper Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, n. 50, 343-352.

CRIST, E. P. 1985. A TM tasseled cap equivalent transformation for reflectance factor data. *Remote Sensing of Environment*, 17, 301-306.

CRIST, E. P.; KAUTH,R.J.1986.The Tesseled Cap De-Mystified, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 52(1):81-86.

CUNHA, L. M. 2006. Gênese e Controle da Mineralização de Au e Ag Associada a Granitos Peraluminosos na Mina de Aurumina, Goiás. *Dissertação de Mestrado - Programa de Pós Graduação em Geociências*, UnB, Brasília.

CUNHA, Maria do Carmo Lima e. 2007. Métodos Biológicos de Prospecção Mineral Biogeoquímica e Geobotânica.In: LICHT, Otávio A.B.;MELLO,Carlos Siqueira Bandeira de;SILVA,Cássio Roberto da (Org.).*Prospecção Geoquímica de Depósitos Minerais Metálicos*.Rio de Janeiro:Sociedade Brasileira de Geoquímica – SBGq,cap.10,333-343.

CUNHA, M. DO C. L. E; PEREIRA V. P.; NETO, A. C. B., NARDI, L.V.S; FORMOSO M.L.L; MENEGOTTO E. 2009. Biogeoquímica dos elementos terras raras na Província Estanífera de Pitinga (AM). *Rev Bras Geoc* 9(3): 560-566.

CUNHA; M. DO C. L. E; NARDI, L. V. S.; FORMOSO M. L. L. 2010.Vegetais: Estudo Comparativo em Plantas Ocorrentes em Diferentes Contextos Geológicos. *Revista do Instituto de Geociências*,USP, São Paulo, v. 10, n. 1, p. 53-59.

DARDENNE, M.A., CAMPOS, J.E.G.; ALVARENGA, C.J.S.; MARTINS, F.A.L.; BOTELHO, N.F. 1999. *A sequência sedimentar do Grupo Arai na região da Chapada dos Veadeiros, Goiás*. In: Simpósio de Geologia do Centro-Oeste, 7, e Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 10, Brasília, Atas, p.10.

DARDENNE, M.A. 2000. The Fold Belt. In: U.G. Cordani, E.J. Milani, A. Thomaz Filho, D.A. Campos (eds.) *Tectonic Evolution of South America*. 31<sup>st</sup> Int. Geol. Congr., Rio de Janeiro, pp. 231-263.

DEAN. M.H. A Survey of the Uranium Content of Vegetation in Great Britain. *Journal of Ecology*, V. 54, n. 3, pp. 589-595, Nov.1966.

DEAN, B. Y. M. H. 2012. *A survey of the uranium content of vegetation in great britain*, vol. 54, no. 3, pp. 589–595.

DIAS, R. R.; PARADELLA, W. R. 1997. Integração de dados aéreos gamaes- pectrométricos com imagens TM-Landsat no mapeamento geológico da área do Pojuca, Província Mineral de Carajás. *Revista Brasileira de Geofísica*, 15, 23–33.

DICKSON, B. L.; SCOTT, K. M. 1997. Interpretation of aerial gamma-ray surveys-adding the geochemical factors. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17, n. 2,. 187-200.

DRAPER, Simon R. 1976. *Biochemical analysis in crop science*. Oxford: Oxford University Press. 130 p.

DUTRA, C. V. e Gomes C. B. 1984. A fluorescência de raios X na geologia, p. 85-120. In: Gomes C.B. *Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia*. São Paulo: Editora Edgard Blucher.

EITEN, G. 1983. *Classificação da vegetação do Brasil*. Brasília: CNpq/Coordenação Editorial, 305 p.

EITEN, G. 1990. Vegetação do Cerrado. In: NOVAES-PINTO (ORG.), M. *Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas*. Brasília: Editora UnB e SEMATEC, p. 17- 72.

EL-SADEK, M. A. 2002. Application of thorium-normalized airborne radiometric survey data of Wadi Araba area, North-eastern Desert, Egypt, as a guide to the recognition of probable subsurface petroleum accumulations. *Applied Radiation and Isotopes*, 57, 121–130.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. 2006. CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE SOLOS. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. 2011. *Manual de Métodos de Análise de Solo*. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos.

ENVI.2009. *Atmospheric Correcting Module: QUAC and FLAASH User's Guide*. [S.l.]: ITT Visual Information Solutions, 44 p.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. 2006. *Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas*. 2. ed. ix, 401 p.

FELFILI, J. M.; REZENDE, A. V.; JUNIOR, M. C. D. S. O. 2007. *Biogeografia do Bioma Cerrado: vegetação e solos da Chapada dos Veadeiros*. Brasília: Editora Universidade de Brasília.

FELLIPE, G.M.; DALLE, J.E.1990.The effects of phosphate supply on growth of plants from Brazilian Cerrado: experiments with seedlings of the annual weed, *Bibens gardneri* Baker (Compositae) and the tree, *Quaera grandiflora* (Mart.) (Vochysiaceae). *Oecologia*, v.82, p. 81–86.

FELTRE, R.; YOSHINAGA, S. 1974. *Atomística: teoria e exercícios*. São Paulo: Moderna, v. 2.

FERNANDES, P.E.C.A.; MONTES, M.L.; BRAZ, E.R.C.; MONTES, A.S.L.; SILVA, L.L.; OLIVEIRA, F.L.L.; SIGA, J.R.O.; CASTRO, H.E.F. 1982. Formação Ticunzal. In: *Projeto RADAMBRASIL*, Folha SD-23, Brasília, MME, p. 61-63.

FERREIRA, L. G.; FERREIRA, N. C.; FERREIRA, M. E. 2008. Sensoriamento remoto da vegetação: evolução e estado-da-arte. *Acta Scientiarum Biological Sciences*, Maringá, v. 30, n. n. 4, 379-390.

FERREIRA, L. G., YOSHIOKA, H., HUETE, A., SANO, E. E. 2003. Seasonal landscape and spectral vegetation index dynamics in the Brazilian Cerrado: An analysis within the Large-Scale ^ nia ( LBA ) Biosphere – Atmosphere Experiment in Amazo, 87, 534–550.

FERREIRA, L. G.; Yoshioka, H; Huete, A; Sano, E. E. 2004. Optical characterization of the Brazilian Savanna physiognomies for improved land cover monitoring of the Cerrado biome: preliminary assessments from an airborne campaign over an LBA core site. *Journal of Arid Environments* , 56,. 425–447.

FERREIRA, M. E. FERREIRA, L. G.; Sano, E. E.; Shimabukuro, Y. E. . 2007. Spectral linear mixture modelling approaches for land cover mapping of tropical savana areas in Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, 28, 413-429.

FRIEDLAND A.J. 1989. The movement of metals through soils and ecosystems. In: SHAW, Arthur Jonathan. *Heavy metal tolerance in plants: Evolutionary aspects*. Boca raton: CRC Press, 355 p.

FUCK, R.A.; PIMENTEL, M.M.; SILVA, L.J.H.D. 1994. Compartimentação tectônica ocidental da Província Tocantins. 38º Congr. Bras. Geologia, Bol. Res. Expandidos, V.1, p.215-126.

FUCK, R.A.; PIMENTEL, M.M.; SOARES, J.E.P.; DANTAS, E.L. 2005. Compartimentação da Faixa Brasília. In: *Simpósio de Geologia do Centro-Oeste*, 9, 2005, Goiânia, Anais... Goiânia: SBG, p.26-27.

FURLEY, P. A. 1996. The influence of slope on the nature and distribution of soils and plant communities in the Central Brazilian cerrado. In: ANDERSON, M. G. &. B. S. M. *Advances in Hillslope Processes*. New York: John Wiley & Sons, v. 1, p. 327-346.

FURLEY, P. A. 1999. The nature and diversity of neotropical savana vegetation with particular reference to the Brazilian Cerrados. *Global Ecology and Biogeography*, 8, 223-241.

Goodland R and Pollard R 1973 The Brazilian Cerrado vegetation: a fertility gradient *Journal of Ecology* 61 219-24.



GOIÁS. SECRETARIA DE INDÚSTRIA E COMÉRCIO. 2005. *Mapa Geomorfológico do Estado de Goiás: Relatório Final*. Goiânia: [s.n.].

HARIDASSAN, M. 2000. Nutrição mineral de plantas nativas do cerrado. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, I, n. 12, 54-64.

HARIDASSAN, M. 2006. Alumínio é um elemento tóxico para plantas nativas do cerrado? In Prado, CHBA; Casali, CA. *Fisiologia Vegetal: Práticas em relações hídricas, fotossíntese e nutrição mineral*. Barueri, editora Manole.

HARIDASAN, M. Solos. In: FELFILI, J. M.; REZENDE, A. V.; JUNIOR, M. C. D. S. O. 2007. *Biogeografia do Bioma Cerrado: vegetação e solos da Chapada dos Veadeiros*. Brasília: Editora Universidade de Brasília.

HEWAMANNA, R.; SAMARAKOON C. M.; KARUNARATNE. P. A. V. N. 1988. Concentration and chemical distribution of radium in plants from monazite-bearing soils. *Environmental and Experimental Botany*, V. 28, n. 2, p.137-143.

HEWAMANNA, R., RANAWAKE, R. A. G., & SAMARAKOON, C. M. (1987). Gamma Activity of Plants from Monazite - bearing Soils of the west Coast of Sri Lanka. *Environmental and Experimental Botany*, 27(4), 449–454.

HUETE, A. R. 1998. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Envir.* 25:295-309.

HUETE, A.R. and LIU, H.Q., 1994, An error and sensitivity analysis of the atmospheric- and soil-correcting variants of the NDVI for the MODIS-EOS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32, pp. 897–905.

HUETE, A. R.; LIU, H. Q.; BATCHILY, K.; LEEUWEN, W. van. 1997. A comparison of vegetation indices over a global set of TM Images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 59, 440-451.

HUETE, A.; RATANA, P. 2004. *Seasonal Dynamics of Native Converted Cerrado Physiologies with MODIS Data*. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium: Proceedings Science for Society Exploring and Managing a Changing Planet. [S.l.]: IGARSS.

HUNGRIA, M.; VARGAS, M. A. T. 1997. *Biologia dos solos dos cerrados*. Planaltina: EMBRAPA, p. 524,.

IAEA, INTERNACIONAL ATÔMICA ENERGY AGENCY. 2003. *Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometric data*. [S.l.]: IAEA, 179 p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 1992. Manual técnico da vegetação brasileira. Série Manuais Técnicos em Geociências, n. 1. Rio de Janeiro, RJ: IBGE, 92 p.

JACKSON, R. D.; HUETE, A. . R. 1991. Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*, Amsterdam, 11,. 185-200.

JENSEN, J. R. 2009. *Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres*. Tradução de José Carlos N. (Cord.) EPIPHANIO; Antônio R. FORMAGGIO, et al. São José dos Campos: Parêntese Editora.

JORDAN, C. F. 1969. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, n. 50, 663-666.

LASA Engenharia e Prospecções S.A. 2006. *Projeto Levantamento Aerogeofísico do Estado de Goiás – 3ª Etapa – Paleo-Neoproterozóico do Nordeste de Goiás - Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos [Airborne Geophysical Survey Project of the State of Goiás – Step 3 – Paleo-Neoproterozoic of Northeastern Goiás – Final Report of the Survey and Processing of Magnetometric and Gammaspectrometric Data]*. Rio de Janeiro: SGM/MME/CPRM e SIC/SGM/FUNMINERAL/Estado de Goiás.

LATHWEL, D.J., GROVE, T.L. 1986. Soil - Plant Relationships in the Tropics, 17, 1-16.

MELLO, M.P. de; PRADO, B.R. do; SILVA, G.B.S. da; SANO, E. E.; SHIMABUKURO, Y.E. 2009. Comportamento espectral de fitofisionomias do Cerrado e desenvolvimento de índices utilizando bandas sintéticas derivadas de Modelos Lineares de Mistura Espectral aplicados na discriminação de fitofisionomias. (pp.2839-2846). Natal: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto.

MIRANDA, J.R.P.; CARVALHO, J.G.; SANTOS, D.R.; FREIRE, A.L.O.; BERTONI, J.C.; MEL, J.R.M.; CALDAS, A.L. 2002. Siclício e Cloreto de Sódio na Nutrição Mineral e Produção de Matéria Seca de Plantas de Moringa (*Moringa oleifera* LAM.). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 26:857-965.

JUNIOR, B. H. M.; HARIDASSAN, M. 2005. Comparação da vegetação arbórea e características edáficas de um cerrado e um cerrado sensu stricto em áreas adjacentes sobre solo distrófico no leste de Mato Grosso, Brasil. *Acta Botânica Brasilica*, 19 (4), p. 913-926.

JUSTICE, C. O.; VERMOTE, E.; TOWNSHEND, J. R. G.; DEFRIES, R. 1998. The moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36, 1228-1249.

KAUFMAN, Y. J.; TANRÉ, D. 1992. Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2, n. 30, 261-270.

KAUTH, R. J.; THOMAS, G. S. 1976. The tasseled cap: A graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. In: *Proceedings of the symposium on machine processing of remotely sensed data*, West Lafayette, 41-51.

KERBAUY, G. B. 2008. *Fisiologia Vegetal*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. 2005. A conservação do Cerrado Brasileiro. *Megadiversidade*, 1, 147-155.

Kovalevskii, A. L. (2001). Biogeochemical prospecting for platinum group metals in eastern Siberia. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 1, 143–146.

LACERDA FILHO, J. V. D. 2000. *Programa Levantamentos. Geológicos Básicos do Brasil Geologia e Recursos Minerais do Estado de Goiás e do Distrito Federal. Escala 1: 500.000*. Goiânia: CPRM/METAGO/UnB.

LASA ENGENHARIA E PROSPECCÇÕES S.A. 2006. *Projeto Levantamento Aerogeofísico do Estado de Goiás – 3ª Etapa – Paleo-Neoproterozóico do Nordeste de Goiás - Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos*. Rio de Janeiro: Convênio de Cooperação Técnica entre a SGM/MME/CPRM e SIC/SGM/FUNMINERAL/Estado de Goiás, Relatório Final, v. 22. Texto e Anexos (mapas).

LOPEZ, R. J. 1985. *Diagnostico de suelos y plantas (metodos de campo y laboratorio)*. 4. ed. Madrid: Mundi-Prensa, 368 p.

MARIMON JUNIOR, B. H.; HARIDASAN, M. Comparação da vegetação arbórea e características edáficas de um cerradão e um Cerrado sensu stricto em áreas adjacentes sobre solo distrófico no leste de Mato Grosso, Brasil. *Acta Bot. Bras*, 19, n. 4, 2005. 913-926.

MARQUES, G.C. 2009. *Geologia dos grupos Araí e Serra da Mesa e seu embasamento no sul do Tocantins*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. Brasília. 122p.

MARTINEZ, H. E.; PITELLI, R. A.; HAAG, H. P. 1977. Nutrição mineral de espécies do cerrado I. Composição Química de *Byrsonima coccolobifolia* (Sp) Kunth e *Kielmeyera coriacea* (Sp) Mart. *Anais da E.S.A Luiz de Queiroz*, V. XXXIV, p.415-426.

MARTINS, F.A.L. 1999. *Análise faciológica e estratigráfica do paleo-mesoproterozóico: Sequência Araí no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros*, Goiás. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. Brasília. 137p.

MELLO, M. M. P. D.; PRADO, B. R. do; SILVA, G. B. S. da; SHIMABUKURO, Y. E.; SANO, E. E. 2009. *Comportamento espectral de fitofisionomias do Cerrado e desenvolvimento de índices utilizando bandas sintéticas derivadas de Modelos Lineares de Mistura Espectral aplicados na discriminação de fitofisionomias*. In: SIMPÓSIO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XIV. Natal: INPE, Anais, p. 25-30.

MENDONÇA, R.C., FELFILI, J.M., WALTER, B.M.T., SILVA-Jr., M.C., REZENDE, A.V., FILGUEIRAS, T.S., NOGUEIRA, P.E. & FAGG, C.W. 2008. Flora vascular do cerrado: Checklist com 12.356 espécies. In *Cerrado: ecologia e flora* (S.M. Sano, S.P. Almeida & J.F. Ribeiro, ed.). EMBRAPA-CPAC, Planaltina, p.417-1279.

MIEKELEY, N.; CASARTELLI, E.A; DO'ITO R. M. 1994. Concentration levels of rare-earth elements and thorium in plants from the Morro do Ferro Environment as an indicator for the biological availability of transuranium elements. *J Radioanal Nucl Chem* 182(1):75–89.

MMA, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, SECRETARIA DE BIODIVERSIDADE E FLORESTA. 2007. *Áreas Prioritárias para Conservação, Uso sustentável e Repartição de Benefícios da Biodiversidade Brasileira*. Brasília: MMA.

MMA, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. 2011. Plano de ação para prevenção e controle do desmatamento e das queimadas: cerrado. Brasília: MMA, 200 p.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). 2005. *Brasil em Relevo*. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite,. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 10 mar, 2014.

MIRANDA, J. R. P.; CARVALHO, J. G.; SANTOS; D. R.; FREIRE, A. L. O. ; BERTONI, J. C.; MELO, J. R. M.; A. L. CALDAS. 2002 Silício e cloreto de sódio na nutrição Mineral e produção de matéria seca de Plantas de moringa (moringa oleifera lam.). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 26, n. 4, p. 957-965.

MUNHOZ, C. R.; EUGÊNIO, C. U. O.; OLIVEIRA, R. C. 2011. *Vereda: guia de campo*. Brasília: Rede de Sementes do Cerrado.

MUNSON, R. D. 1998. Principles of Plant Analysis. In: KALRA P. YASH, editor. *Handbook of Reference Methods for Plant Analysis*, New York: Taylor & Francis Group; p. 01-24.

MYNENI, R. B.; MAGGION, S.; LAQUINTA, J.; PRIVETTE, J. L.; GOBRON, N.; KIMES, D. S.; VERSTRAETE, M. M.; WILLIAMS. 1995. Optical remote sensing of vegetation: Modeling, caveats, and algorithms. *Remote Sensing of Environment*, v. 51, n. 1, p. 169-188., January.

MINTY, B. R. S. 1997. Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. *AGSO Journal Geology & Geophysics*, v. 17, n. 2, p. 39-50.

NASCIMENTO, C. T. C. do; FERREIRA, F. J. F.; ANDRADE, L. R. M. de; GASPAR, J. C.; PIRES, A. C. B. 2008. Radiação Gama e Resistividade elétrica em solo com aplicação de carbonato e fertilizantes agrícolas no Distrito Federal. *Revista Brasileira de Geofísica*, 26(1), 21-29.

NOVO, E. M. L. D. M. 1992. *Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações*. 2. ed. São José dos Campos: Editora Edgard Blucher LTDA.

OLIVEIRA FILHO, A. T.; VILELA, E. A.; CARVALHO, D. A. & G. M. L. 1994. Effects of soils and topography on the distribution of tree species in a tropical riverine forest in south-eastern Brazil. *Journal of Tropical Ecology*, n. 10. 483-508.

OLIVEIRA FILHO, A. T.; VILELA, E. A.; GAVILANES, M. L.; CARVALHO, D. A. 1997. Effects of past disturbance and edges on tree community structure and dynamic within a fragment of tropical semideciduous forest in south-eastern Brazil over a five-year period (1987-1992). *Plant Ecology*, [S.l.], v. 131, p. 45-66.

OLIVEIRA FILHO, A. T. O.; RATTER, J. A. 2002. Vegetation Physiognomies and Woody Flora of the Cerrado Biome. *The Plant Community*, 91-120.

PARADELLA, W. R.; SANTOS A. R.; DALL'AGNOL R.; PIETSCH, R. W.; SANT'ANNA M. V. 1998. A geological investigation based on airborne (SAREX) and spaceborne (RADARSAT-1) SAR integrated products in the Central Serra dos Carajás granite area, Brasil. *Can J. Rem. Sens.*, 24:376-392.

PASSOS, R. R.; RUIZ, H. A.; MENDONÇA, E. de S.; CANTARUTTI, R. B.; SOUZA, A. P. de. Substâncias húmicas, atividade microbiana e carbono orgânico lábil em agregados de um latossolo vermelho distrófico sob duas coberturas vegetais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, p. 1119-1129, 2007.

POHL; GENDEREN, J. V. 1998. Review article Multisensor image fusion in remote sensing: Concepts, methods and applications. *International Journal of Remote Sensing*, 19, n. 5, 823-854.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. 2010. *Sensoriamento remoto no estudo da vegetação*. São José dos Campos: Parêntese.

PROBIO. 2004. *Mapeamento da Cobertura Vegetal do Bioma Cerrado*. Fundação de Apoio à Pesquisa e ao Agronegócio. Brasília, p. 94.

PROBIO. 2007. *Mapeamento de Cobertura Vegetal do Bioma Cerrado*. Fundação de Apoio à Pesquisa e ao Agronegócio. Brasília.

RAIJ, B. VAN. 1981. *Avaliação da fertilidade do solo*. Piracicaba, Instituto de Potassa & Fosfato, Instituto Internacional da Potassa. 142 p.

RATTER J.A.; RICHARDS, P.W.; ARGENT, G.; GIFFORD, D.R. 1978. Observations on the forests of some mesotrophic soils in central Brazil. *Revista Brasileira de Botânica*, v.1, p.47-58.

REATTO, A.; CORREIA, J. R.; SPERA, S. T.; MARTINS, É. DE S. 2008. Solos do Bioma Cerrado: Aspectos pedológicos. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. D.; RIBEIRO, J. F. *Cerrado: Ecologia e Flora*. Brasília: Embrapa, p. 107-149.

REATTO, A.; MARTINS, E. S. 2005. Classes de solo em relação aos controles da paisagem do bioma Cerrado. In: SCARIOT, A.; SOUSA-SILVA, J. C. & FELFILI, J. M. (org.). *Cerrado: ecologia, biodiversidade e conservação*. MMA. Brasília, DF.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. 2008. As Principais Fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. D.; RIBEIRO, J. F. *Cerrado: Ecologia e Flora*. Brasília: Embrapa, p. 156-212.

RICHARDSON, A.J.; WIEGAND, C.I. 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogramm. Eng. and Rem. Sens.* 43:1541-1552.

RICHARDS, J. A.; JIA, X. 2006. *Remote sensing digital image analysis: an introduction*. 4th. ed. Berlin: Springer.

RICKLEFS, R.E. 2003. *Economia da natureza*. 5 ed. Editora Guanabara Koogan, Rio de Janeiro.

RIZZINI, C. T. 1979. *Tratado de Fitogeografia do Brasil*. 2. ed. São Paulo: Hucitec, v. 1.

Rodrigues, R. F., & Araújo, G. M. De. 2013. Estrutura da vegetação e características edáficas de um cerradão em solo distrófico e em solo mesotrófico no triângulo mineiro, *Biosci. J.*, 2013–2029.

RUGGIERO, P. G. C. BATALHA, M. A.; PIVELLO, V. R. Meirelles, S. T. 2002. Soil-vegetation relationships in Cerrado (Brazilian savanna) and semideciduous forest, Southeastern Brazil. *Plant Ecology*, v. 160, p. 1–16.

SANO, E. E.; DAMBRÓS, L. A.; OLIVEIRA, G. C.; BRITES, R. S. 2006. Padrões de cobertura de solos do Estado de Goiás. In: FERREIRA, L. G. *Conservação da biodiversidade e uso sustentável em Goiás: Estratégias*. Goiânia: SEMARH/Agência Ambiental / Banco Mundial. Cap. 3, p. 85-100.

SANO, E. E., ROSA, R., BRITO, J. L. S., & FERREIRA, L. G. 2010. Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 166(1-4), 113–24.

SANTOS, A. C. L. D.; MENEZES, P. de T.; NASCIMENTO, C. T. C. do. 2008. Gamaespectrometria aplicada em solo agrícola no nordeste do Estado do Rio de Janeiro. *Rev. Bras. Geof.*, v. 26, 181-194.

SANTOS, C. 2007. Estatística descritiva: Manual de auto aprendizagem, Lisboa, Edições Silabo.

SANTOS S.L.C. 1999. *Integração digital de dados RADARSAT S-1 e aerogamaespectrométricos: contribuição ao estudo de corpos graníticos mineralizados da província estanífera de Rondônia*. Dissertação de Mestrado, INPE, 1962, P.

SCHETSELAR, E. M. 1998. Fusion by the IHS transform: should we use cylindrical or spherical coordinates? *International Journal of Remote Sensing*, v. 19, n. 4, p. 759-65.

SIEG, Sistema Estadual de Estatística e de Informações Geográficas de Goiás. *SIEG*, 2006. Disponível em: <[www.sieg.gov.br](http://www.sieg.gov.br)>. Acesso em: Outubro 2011.

SILVA JÚNIOR, M. C. da. *100 árvores do cerrado: guia de campo*. Brasília: Rede de Sementes do Cerrado, 2005. 278 p.

SILVA, M. F. F. 1992. Distribuição de metais pesados na vegetação. *Acta Boto Bras.*, 6(Xlii), 107–122.

SKORUPA, A. A. L., GUILHERME, L. R. G., CURI, N., SILVA, C. P. D. C., SCOLFOR, S. J. R., & MARQUES, J. J. G. de S. e M. 2012. Propriedades de Solos sob Vegetação Nativa em Minas Gerais: Distribuição por Fitofisionomia, HIDROGRAFIA E VARIABILIDADE ESPACIAL, (3), 11–22.

SPERA, S. T.; REATTO, A.; MARTINS, É. De S.; CORREIA, J. R. 2005. Atributos Físicos de Solos e Distribuição das Fitofisionomias de Cerrado na Bacia Hidrográfica do Rio Jardim. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*, Planaltina, DF. 28.

SPINOLA, C. M.; BECHARA, F. C.; BARRETTO, K. D. 2007. Uso de Sensoriamento Remoto na Identificação de Fitofisionomias do Cerrado Latu Sensu. *Revista Brasileira de Biociências*, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p. 378-380.

SHTANGEEVA, I.; LIN, X.; TUERLER, A.; RUDNEVA, E.; SURIN V.; HENKELMANN R. 2006. Thorium and uranium uptake and bioaccumulation by wheat-grass and plantain. *Forest Snow and Landscape Research*, v.80, n. 2, p. 181-190.

TRAVASSOS, J. M.; FIGUEIRO, I. 1992. Avaliação da blindagem de uma floresta à radiação gama natural emitida pelo solo. *Rev. Bras.Geof.*, v. 10 , p. 55-64.

TRAVASSOS, J. M.; PIRES, A. C. B. 1994. The screening effect of a Tropical Forest on airborne gamma-ray spectrometry. *Nucl.geophys.*

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F.; ALBUQUERQUE, P. C. G. 2009. Topodata: desenvolvimento da primeira versão do banco de dados geomorfométricos locais em cobertura nacional. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Natal, RN: INPE, p. 1-8. Anais.

VALLILO, M. I.; PASTORE, J. A.; ESTON, M. R. de; GARBELOTTI, M. L.; OLIVEIRA, E. de. 2007. Caracterização química e valor nutricional dos frutos de *Byrsonima myricifolia* Griseb (Malpighiaceae) – Alimento de aves silvestres. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 39-45.

VARGAS, J.1997. Distribution of Uranium and Thorium in Sediments and Plants from a Granitic Fluvial Area. *App. Radoat. Isot.*,48(8),1-7.

WILFORD, J. R.; BIERWIRTH, P. N.; CRAIG, M. A. 1997. Application of airborne gamma-ray spectroscopy in soil/regolith mapping and applied geomorphology. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, v. 17, n. 2, p. 201-216.

ZAR, J. H. 2010. *Biostatistical Analysis*. New Jersey :Pearson Education Ltda, p. 944.



---

## 6. ARTIGO 1 - Identification of the phytophysionomies of the Cerrado Biome based on aerogammaspectrometry and remote-sensing data<sup>6</sup>

B.L.G. Castro<sup>a\*</sup>, A.C. Carmelo<sup>a</sup>, A.C.B. Pires<sup>a</sup>, E.E. Sano<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Geosciences, University of Brasília, Brasília, 70.910-900 Brazil*

<sup>b</sup>*Brazilian Agriculture Research Organization (Embrapa Cerrados), Planaltina, 73310-970, Brazil*

E-mails: brunoleocastro@gmail.com, chatack@unb.br, acbpirez@unb.br, sano@cpac.embrapa.br

\*author for correspondence

**ABSTRACT** - Aerogammaspectrometric data have been used since the 1960s, mainly for mineral prospection and geological studies, but little is known about the potential use of these data in vegetation studies. Due to the strong connection between radiometric data and the regolith, it was assumed that this relationship derives from elements present in the soil that contribute to explain the local vegetation structure and shape. This study aimed to analyze three phytophysionomies of the Cerrado Biome—the Campo Limpo (grassland), the Cerrado Rupestre (rupestrian savanna) and the Cerradão (Savanna woodland)—based on aerogammaspectrometric data of the Paleo-Neoproterozoic project from northeastern Goiás and data from the TM/Landsat5 sensor. An aerogammaspectrometry image (RGB/K eTh eU) combined with field studies were used to define visual interpretation patterns or gamma spectrometry units referring to the three phytophysionomies addressed. A scatter plot of the relationship between the vegetation indices NDVI, SAVI and EVI and the radio-elements (K, eTh and eU) was, and a statistical test was subsequently applied to evaluate the relation's variances and confirm the association between the gammaspectrometric domains and the phytophysionomies. The results confirm the utility of aerogammaspectrometric data in identifying Cerrado phytophysionomies, and a positive linear relationship was identified between biomass and the radio-elements, where eTh showed the best results in differentiating the phytophysionomies. The final integrated products obtained from the aerogammaspectrometric data and the TM/Landsat5 sensor show potential for mapping Cerrado phytophysionomies.

Keywords: aerial gamma-spectrometry, Landsat, Cerrado phytophysionomies

---

<sup>6</sup> Artigo submetido ao periódico *International Journal of Remote Sensing*.

## 1. Introduction

The Cerrado biome is a vast mosaic of vegetation diversity and is the second-largest Brazilian biome in area, surpassed only by the Amazon, with a coverage of over 204 million hectares in the central region of Brazil (Ribeiro and Walter, 2008; Sano *et al.*, 2010). Despite the richness of its biodiversity, the Cerrado has been undergoing rapid changes, mainly due to the expansion of agribusiness. More than half of the biome has been converted into pasture and annual crops, among other uses (Felfili *et al.*, 2007). The percentage of deforested areas was 43.67% in 2002 and increased to 47.84% in 2008 (MMA, 2010). Between the years 2009 and 2010, the total deforested area was 6,469 km<sup>2</sup>, reaching an annual deforestation rate of 0.3%, the highest among the six Brazilian biomes (MMA, 2011). By interpreting 170 images from the Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus satellite to map the land cover of the Cerrado, Sano *et al.* (2010) verified that natural cover has been maintained in 61% of the biome's area but in asymmetric patches: while natural physiognomies cover 90% of the northern region of the biome, only 15% of the southern region includes natural land cover, confirming the intensive use of the land and the consequent pressure on the Cerrado biome at the time of this mapping.

Studies that address the monitoring of biomes have assisted in the task of conserving biomes under anthropogenic pressure. Remote sensing as a monitoring tool has revolutionized territorial planning for the conservation of native vegetation. In Brazil, this evolution can be observed from the Radambrasil project in the 1970s, based on airborne radar images, and the Project of Conservation and Sustainable Use of the Brazilian Biologic Diversity (*Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira - PROBIO/MMA*), based on images from the Landsat ETM+ satellite in the 2000s, which provided major advances in this field (Ferreira *et al.*, 2008).

By monitoring the degradation of biomes, discriminating vegetation types and their biomass are useful for biodiversity conservation policies. Among the various remote-sensing techniques, the development of vegetation indices and linear spectral mixed-model techniques have provided good results for characterizing the vegetation types of specific biomes. Regarding the Cerrado Biome, the studies of Bezerra *et al.* (2007), Ferreira *et al.* (2007) and Mello *et al.* (2009) stand out. However, phytophysiological differentiation based on indirect mapping by orbital remote sensing still has some limitations, such as saturation of forest formations in the vegetation indices and climate seasonality interference increases the complexity of image interpretation. These issues suggest the need to investigate other forms of vegetation mapping to expand upon previous studies.

The advance of geotechnologies during the second half of the twentieth century has been providing new opportunities for the integration of data from different sources, contributing to research on the different components of landscapes (Naveh and Liberman, 2001; Jensen, 2009). For example, aerogammaspectrometry has been used in the integration of remote-sensing data, mainly for mineral prospecting and geological mapping based on the radioactive signatures of radio-elements in rocks and soils (IAEA, 2003). Since the 1960s, the application of aerogammaspectrometry in geology has become widespread, but studies applying aerogammaspectrometry for phytophysiology discrimination are not found in the literature.

Aerogammaspectrometry data and vegetation differentiation patterns are directly related to the soil. It is due to this relationship that aerogammaspectrometry studies show potential for discrimination of vegetation types. Experiments integrating data from orbital sensors with data from aerial gammaspectrometry have shown the efficiency of aerial gammaspectrometry

for lithological and soil discrimination (Dias and Paradella, 1997), but little is known about its potential in the literature in vegetation, classification and no studies were found.

It is believed that the products generated by remote sensing during the investigation of vegetation, such as vegetation indices, can be used along with aerogammaspectrometric data to contribute to the identification of phytophysiognomies. This study aims to test the differentiation of the gammaspectrometric domains that are associated with the presence of three phytophysiognomies of the Cerrado biome: Cerradão, Cerrado Rupestre and Campo Limpo.

## **2 Materials and methods**

### **2.1 Study area**

The study area (Fig. 1) is located in the northeast of the state of Goiás, Brazil, between the coordinates 47°42'59.6"W; 13°23'50.9"S and 47°07'18.6"W; 13°48'2.6"S, covering part of the municipalities of Cavalcante and Teresina de Goiás. The research area, northeastern Goiás, is a priority conservation area according to PROBIO (2007). This fact is relevant due to the high degree of preservation of the Cerrado biome in this region. According to the MMA (2007), survey there is little attention devoted to the conservation of the Cerrado biome, and research is needed to analyze unknown areas and promote an increase in protected areas, with adequate technical support, favoring research demands regarding biodiversity characterization (Andrade and Silva, 2009).

The study area was chosen based on the following criteria: (1) the availability of aerogammaspectrometric survey coverage; (2) little agricultural interference in the region, which could cause changes in the soil due to chemical compounds and interfere with the aerogammaspectrometric data; and (3) the high phytophysognomy diversity of the Cerrado biome, to test the identification of this biome with the proposed method.

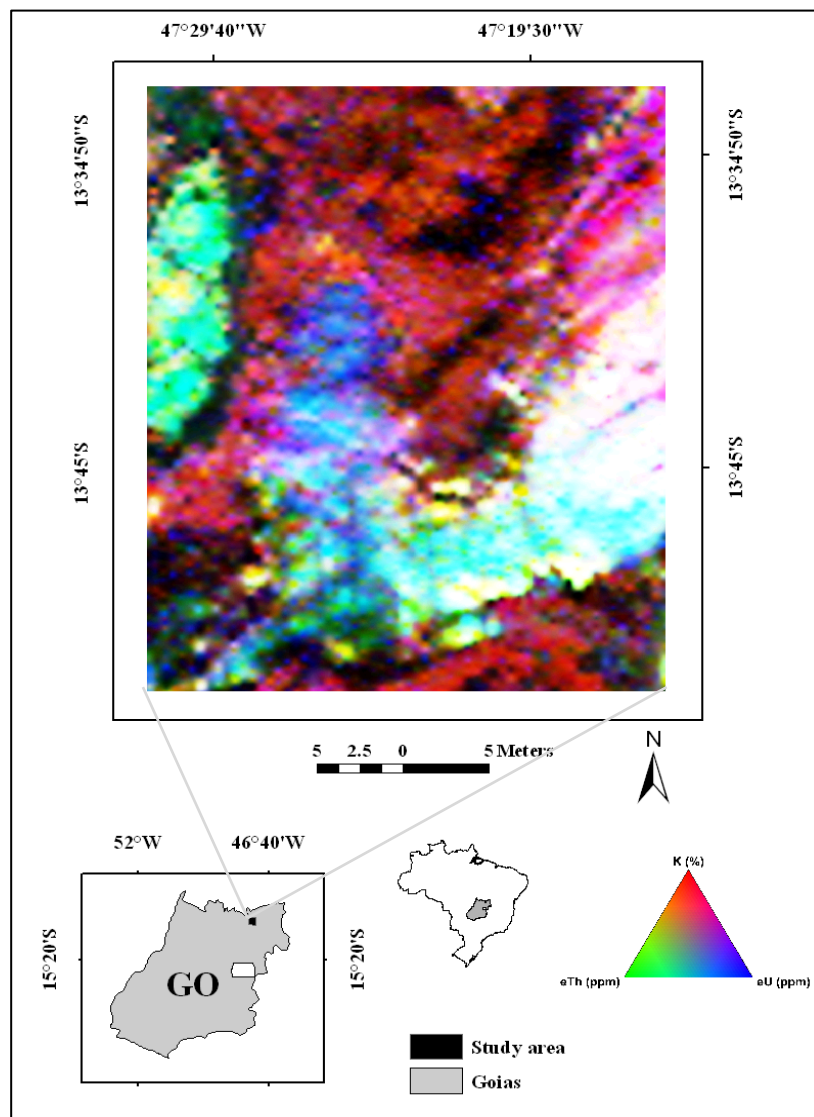


Fig. 1 Aerogammaspectrometry map of the study area, RGB color composite/K, eTh eU.

## 2.2 Aerogammaspectrometric and TM/LANDSAT-5 sensor data

The aerogammaspectrometric data used in this study were related to the potassium ( $^{40}\text{K}$ ), thorium ( $^{232}\text{Th}$ ) and uranium ( $^{238}\text{U}$ ) channels and the total count (TC) and were obtained from the Airborne Geophysical Survey of the state of Goiás, Northeastern Paleoproterozoic Goiás. These data were collected between May 1<sup>st</sup>, 2006, and September 1<sup>st</sup>, 2006, by the company LASA Engenharia e Prospecções S/A with two airplanes (LASA, 2006). In the survey, the model GR-820 gamma-ray spectrometer EXPLORANIUM was used, with 256 spectral channels. The spectrum of each crystal detector was individually analyzed to more accurately determine the photo peaks of  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$  (LASA, 2006). The natural gamma radiation from the ground was recorded in the gamma-ray spectrometer onboard the aircraft for 1 second. The records in the U, Th and K channels and the total count were recorded in counts per second (cps). Previous calibration of the system allowed the conversion of the counts to equivalent levels in the soil. K is given as a percentage (%K), and Th and U are reported in parts per million (ppm). Because of the possibility of radiative imbalance, the concentrations of U and Th are presented as equivalent concentrations (eU ppm and eTh ppm) (IAEA, 2003).

The image of the Landsat-5 satellite, Thematic Mapper (TM) sensor, orbit/point: 221/69, from July 8, 2011, was obtained from the website of the National Institute of Space Research (*Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais* - INPE). The choice of the scene obtained by the TM sensor was based on its compatibility with the spatial resolution of the products derived from the aerogammaspectrometric data, its cost-free availability and the absence of spurious noise.

## 2.3 Pre-processing of the data

The aerogammaspectrometric data values from the Paleo-Neoproterozoic project were adjusted according to statistical analysis of the K, eTh and eU concentration values, having as references the average values given for the Earth's crust rocks (Dickson and Scott, 1997). After preliminary verification of the data according to information about the lithologies that constitute the study area, it was established that the radio-element concentrations out of the accepted range for this lithology would be modified. The procedure was performed by dividing the data by  $\frac{1}{4}$  of the standard deviation to adjust the real values without loss of relevant information. After this procedure, the negative concentration values in the database were excluded from the sample.

To offset the effects of the interaction between the electromagnetic radiation and the atmosphere and to transform the pixel values of the TM/Landsat-5 images from radiance to reflectance at the top of the atmosphere, the images were calibrated to transform the digital numbers into radiance values. This procedure allowed compensation for the off-set differences from each spectral waveband; for this procedure, the image-acquisition date and solar elevation angle were used.

To transform the reflectance at the top of the atmosphere into reflectance on the ground surface, the atmospheric correction algorithm Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes (FLAASH) was used (Berk *et al.*, 2002; Felde *et al.*, 2003), available in the software ENVI 4.8, which is based on the MODTRAN radiative transfer code. The following values were defined: an average altitude of 1,000 meters, without the Kaufmann-Tanré aerosol model, visibility of 100 km and ISAACS multiple scattering model. Aiming to make the aerogammaspectrometric data compatible with the TM/Landsat-5 image data, the

pixels of the images were resized from 30 m to 100 m, adapting them to the same spatial resolution as the aerogammaspectrometric data.

## 2.4 Vegetation indices

Three vegetation indices were generated based on wavebands 3 and 4 of the TM/Landsat-5 images: the normalized difference vegetation index (NDVI), the soil-adjusted vegetation index (SAVI) and the enhanced vegetation index (EVI). The NDVI (Rouse *et al.*, 1974) (Eq. 1) is one of the most widely used indices in remote sensing vegetation studies due to its simplicity and sensitivity to the vegetation cover density:

$$\text{NDVI} = (\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{red}}) / (\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{red}}) \quad (01)$$

where  $\rho_{\text{NIR}}$  = reflectance in the near-infrared spectral waveband (waveband 4 of the Landsat TM), and  $\rho_{\text{red}}$  = reflectance in the red spectral waveband (waveband 3 of the Landsat TM).

The SAVI (Eq. 2) was developed to minimize the effects of soil on the vegetation index. In the SAVI equation, a constant  $L$  was included, which may correspond to high vegetation-density values ( $L = 0.25$ ), average vegetation-density values ( $L = 0.5$ ) or low vegetation-density values ( $L = 1$ ) (Huete *et al.*, 1988).

$$\text{SAVI} = (1 + L)(\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{red}}) / (\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{red}} + L) \quad (02)$$

where  $\rho_{\text{NIR}}$  = reflectance in the near-infrared spectral waveband,  $\rho_{\text{v}}$  = reflectance in the red spectral waveband, and  $L$  = a constant that minimizes the soil effect (0 to 1).



The EVI (Eq. 3), developed by the MODIS Land Discipline Group (Jensen, 2009), can be considered an index that optimizes the vegetation signal, especially in areas with greater biomass densities, based on the lower influence of the atmosphere and soil signals (Huete *et al.*, 1997; Jensen, 2009). This index contains an adjustment factor for soils  $L = 1$  and the coefficients  $C_1 = 6$  and  $C_2 = 7.5$  that adjust the effect of the atmosphere aerosols, and  $G = 2.5$  refers to the gain factor.

$$\text{EVI} = G * (\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{red}}) / [\rho_{\text{NIR}} + (C_1 * \rho_{\text{red}}) - (C_2 * \rho_{\text{blue}}) + L] \quad (03)$$

where  $\rho_{\text{NIR}}$  = reflectance in the near-infrared spectral waveband,  $\rho_{\text{red}}$  = reflectance in the red spectral waveband, and  $\rho_{\text{blue}}$  = reflectance in the blue spectral waveband (waveband 1 of the Landsat TM).

## **2.5 Analysis of aerogammaspectrometric data and field phytophysiology description**

With the calibration of the radio-element values, a ternary image was created, RGB/K eTh eU, in which gammaspectrometric domains were defined based on the variations of the present radio-element concentrations in the studied areas. Georeferenced points were selected in the field, with five in each gammaspectrometric-domain sampling area, in the region between the municipalities of Cavalcante and Teresina de Goiás.

In these georeferenced points, the Cerrado phytophysionomies were described. Floristic collections of the species found in each domain were conducted to determine the phytophysionomies with greater accuracy, and these species were deposited in the herbarium of the Botany Department of the University of Brasília (*Departamento de Botânica da Universidade de Brasília*).

## 2.6 Statistical methods

The aerogammaspectrometric data were converted to the raster format in the ENVI 4.8 software, and an average of twenty-five pixels were extracted from five regions of interest for each phytophysiology class. To discriminate these classes (*Cerradão*, *Cerrado Rupestre* and *Campo Limpo*), scatter plots were applied between the K, eTh and eU channel samples and the vegetation index samples (NDVI, SAVI and EVI).

The averages obtained from the radio-element images to generate the scatter plots were normalized to be compatible with the values of the vegetation index images.

After identifying the behavior of the phytophysionomies in the aerogammaspectrometric data and in the TM/Landsat-5 data based on the field data, the scatter plot of the relationships between the vegetation indices and the radio-elements was again analyzed to verify if the same behavior was observed for samples of the gammaspectrometric domains studied without the field control.

New samples were then extracted from the aerogammaspectrometry image (RGB/K, eTh and eU), and the sample average accounted for twenty-five pixels in five regions of interest for each gammaspectrometric domain corresponding to the associated phytophysionomies (*Campo Limpo* = Domain 1; *Cerrado Rupestre* = Domain 2; *Cerradão* = Domain 3) in a random manner based on the concentrations of K, Th and U.

To test the reliability of the results presented in the scatter plots, the  $F$  test was applied (Zar, 2010). The mean variances were tested between the samples identified by the field campaign and random samples based on the gammaspectrometric domains associated with the phytophysionomies. These samples were checked for the same behavior.

To ascertain whether the radio-elements present in the soil had the same behavior as the biomass of the studied phytophysiognomies, a linear regression model was applied. Three regions of interest related to the three gammaspectrometric domains analyzed were selected, and an average of fifty pixels in each of the regions of interest were extracted from the NDVI images and the K, Th and U channels.

After extracting these samples, the linear regression plots had a function of the type  $y = a + b x$ , which is a simple linear regression model. The behavior of the radio-elements (K [%], eTh [ppm] and eU [ppm]) was treated as the independent variable, and the dependent variable (X) was the NDVI.

### **3. Results and discussion**

The efficacy of the integration of the aerogammaspectrometric data and the products from the TM/Landsat-5 sensor for discriminating the phytophysiognomies was evaluated based on the information from the initial field activities and the statistical analysis of the generated products. The fieldwork was based on the aerogammaspectrometric domains obtained from the RGB/K eTh eU image. This product allowed verification of the correspondence between the phytophysiognomy landscapes with the aerogammaspectrometry domains (Figure 2).

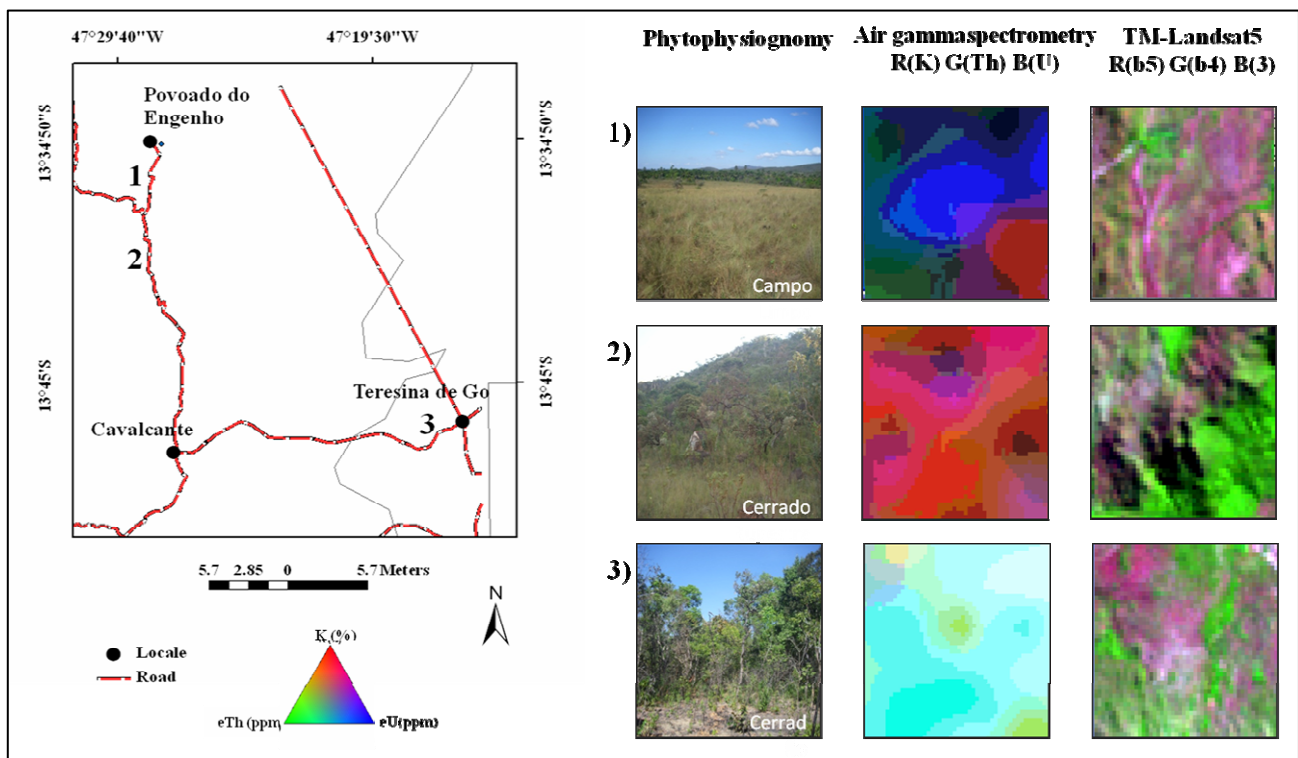


Fig 2. RGB color composite /b5b4b3 for the TM/Landsat5 data and RGB composite / K eTh eU and aerogammaspectrometric data corresponding to the identification key in the sample area domains: (1) Campo Limpo; (2) Cerrado Rupestre; and (3) Cerradão.

In Figure 2, the aerogammaspectrometric image shows the phytophysiology of *Campo Limpo* associated with gammaspectrometric domain 1, with a dark color indicating areas with high soil moisture and, consequently, a low gammaspectrometric response. The *Cerrado Rupestre* is associated with gammaspectrometric domain 2 and shows a high concentration of K, indicated by a reddish color. The *Cerradão* is identified in gamma spectrometric domain 3 and shows high concentrations of U and Th, which are represented by blue and green colors, respectively.

The field collection of the plant species of the phytophysionomies *Campo Limpo*, *Cerrado Rupestre* and *Cerradão*, with subsequent identification, confirmed their correlation with the aerogammaspectrometric image.

Before the drafting of the scatter plots, the spectral behavior of the waveband averages from the TM/Landsat 5 sensor was identified for the three phytophysionomies studied (Figure 3). *Campo Limpo* was different from the *Cerradão* and the *Cerrado Rupestre*, a spectral behavior already known among tree, shrub and grassy phytophysionomies (Ferreira *et al.*, 2004). However, the *Cerradão* and *Cerrado Rupestre* phytophysionomies showed similar spectral behavior in the visible (b3) and middle infrared (b5) wavebands, making it difficult to discriminate between the two.

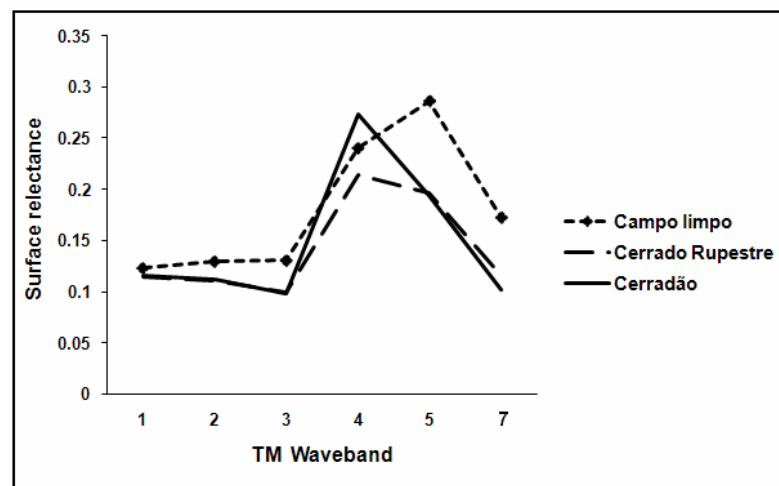


Fig. 3. Spectral behavior of the Campo Limpo, Cerradão and Cerrado Rupestre phytophysionomies on the TM sensor.

The studied phytophysionomies were discriminated through the generation of scatter plots comparing the three vegetation indices (NDVI, SAVI and EVI) and the K, eTh and eU channels (Figure 4). The procedure differentiated the vegetation types, confirming the possibility of integrating aerogammaspectrometric and remote-sensing data to discriminate the phytophysionomies, and similar sample grouping of the classes was verified in the three vegetation indices.

In the scatter plots, between the averages of the vegetation indices and the average K channel concentrations, there is no distinct separation between the *Campo Limpo* and

*Cerradão* samples. For the *Cerrado Rupestre* class, segregation can be observed in relation to the other phytophysionomies. The same behavior occurred in the scatter plots of the vegetation indices and the eU channel. In the vegetation index and eTh channel plots, the three phytophysionomies form well-defined and segregated distinct populations.

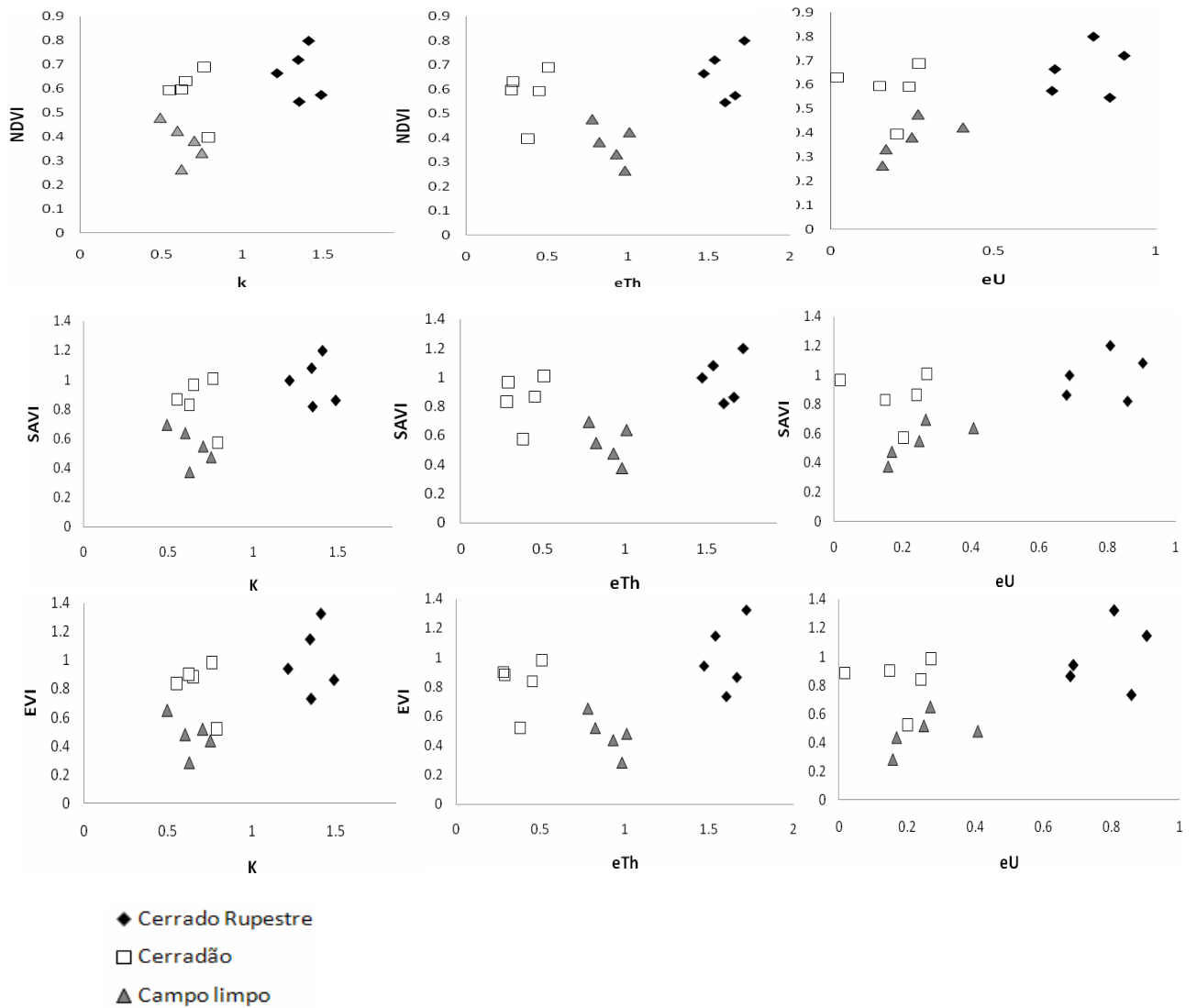


Fig. 4. Scatter plots between the vegetation indices (NDVI, SAVI and EVI) and the radio-elements (K, eTh and eU) based on field data.

The similar behavior between the vegetation indices in the graphs can be understood on the assumption that the data from remote sensors depend on the landscape variables,

interactions of the radiation with the targets and the characteristics of the sensors. These factors can mask the responses of targets, such as vegetation, and the products must be constantly calibrated to improve these indices. However, studies show that both the NDVI and the EVI can be used to easily differentiate the Cerrado phytophysionomies (Ferreira *et al.*, 2004; Jensen, 2009; Mello *et al.*, 2009).

In the scatter plots of the concentrations of radio-elements versus the vegetation indices, the best separation of the studied phytophysionomies was observed for the radio-element  $^{232}\text{Th}$ , regardless of the vegetation index. Studies of the concentrations of  $^{232}\text{Th}$  in plant species are rare, but the ability of plants to absorb this radio-element is known (Shtangeeva *et al.*, 2006; Cunha *et al.*, 2008). The literature indicates that plant communities can grow in environments with concentrations of this element in the soil.

The ability to differentiate phytophysionomies using aerogammaspectrometric data is understood based on the interaction between gamma rays, the minerals that constitute the soil and, possibly, the minerals derived from the rocks present in the soil. The average depth estimated for the response of the gammaspectrometry method is 30 cm of soil (Wilford *et al.*, 1997; El-Sadek, 2002).

Studies indicate that soil properties such as mineral nutrition are factors that characterize the Cerrado (Oliveira Filho *et al.*, 1994; Furley, 1996). Because nutrition and biomass are differentiation factors between the Cerrado phytophysionomies (Haridasan, 2000), it can be deduced that vegetation indices, indicators of the plant density, can contribute to an integrated analysis with the radio-elements. For instance, K is a nutritional indicator of the soil, along with phosphorus (P), which is associated with the U concentrations (IAEA, 2003).

In the investigated area, a relationship between the aerogammaspectrometric image (RGB/K eTh eU) and the NDVI image was observed: it was possible to identify *Cerradão* areas by their greater NDVI values (0.48 – 0.55). *Campo Limpo* exhibits low NDVI values (0.18 – 0.26), and *Cerrado Rupestre* has intermediate NDVI values (0.32 - 0.39). This relationship is directly related to the concentrations of K, eTh and eU of the substrate (Fig. 5).

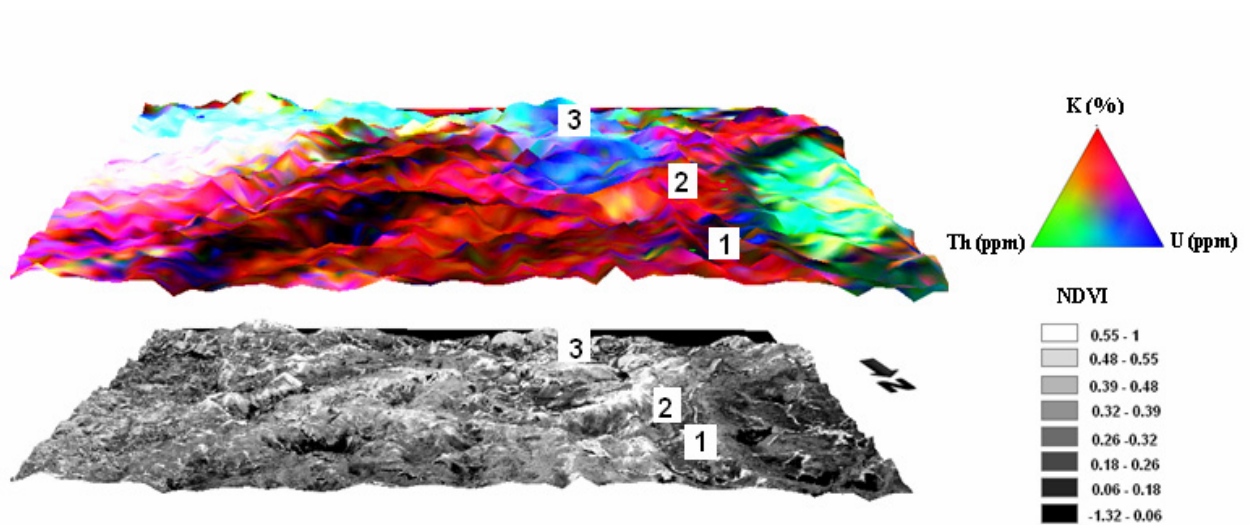


Fig. 5. Relationship between NDVI (vertical exaggeration \* 100) and the aerogammaspectrometric image (RGB/K eTh eU). (1) Low biomass values related to the Campo Limpo areas, with greater eTh values; (2) Intermediate biomass values related to the Cerrado Rupestre area, with greater K concentrations; and (3) High biomass values in the Cerradão areas, with greater eU concentrations.

Based on the linear regressions of the radio-element samples and the NDVI values (Fig. 6), a positive linear relationship was observed between the variables. The values for the coefficient of determination (R-Sq) and the adjusted coefficient of determination (R - Sq(adj)) for all the graphs were high, indicating good quality in the adjustments of their linear regressions.



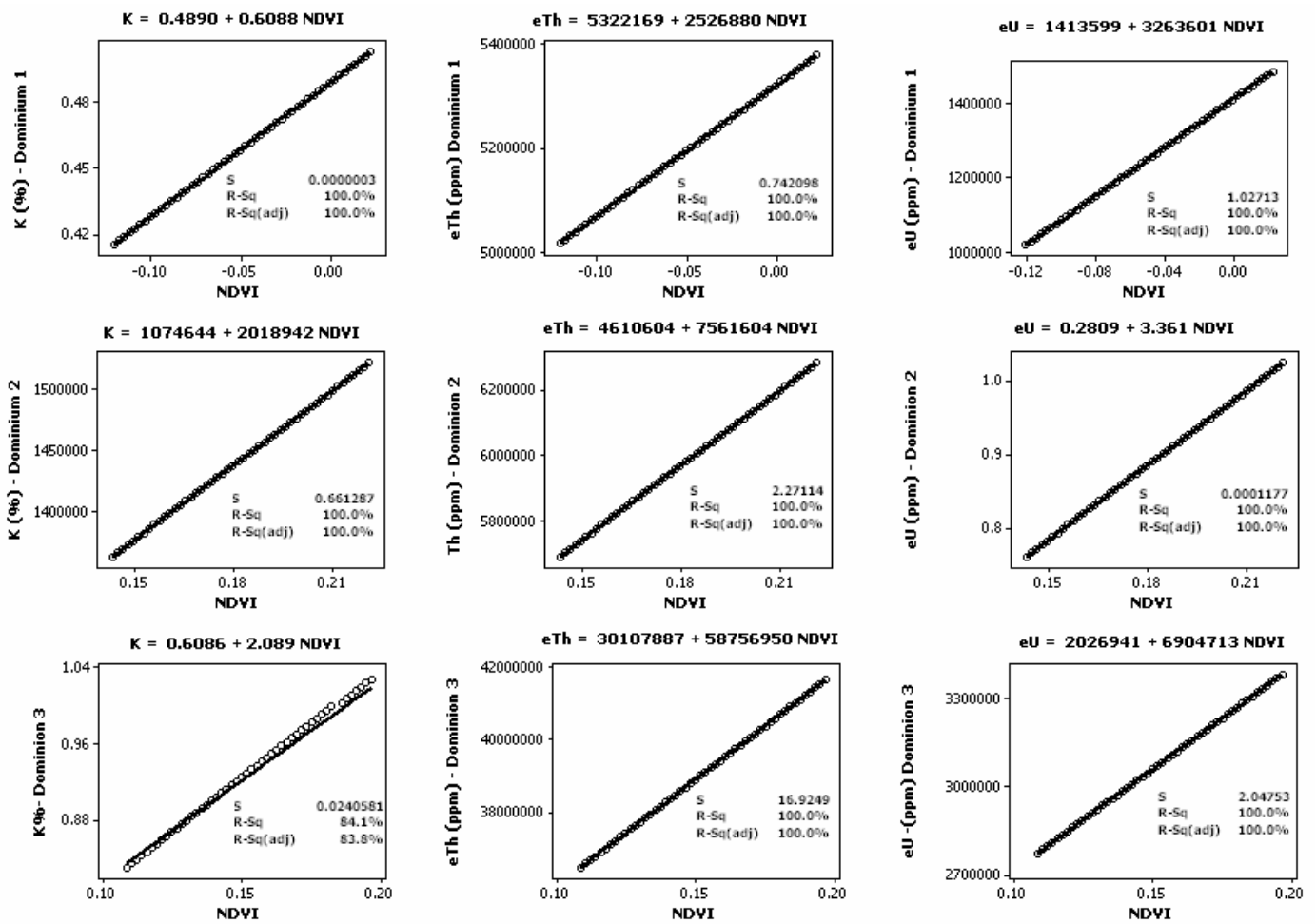


Fig. 6. Linear regression between the gamma-spectrometry domains and the NDVI.

Potassium, even with high values of R-Sq = 84.1% and R-Sq (adj) = 83.8%, had the least adjustment among the radio-elements for domain 3. This result can be attributed to the mobility of the element. Domain 3, containing the *Cerradão* phytophysognomy, also showed high concentrations of Th and U and low K concentrations.

To confirm the potential for discrimination of the gamma spectrometric domains associated with the phytophysognomies, new samples based on aerogamaspectrometric images (RGB/K eTh eU) were collected from the three associated domains without the control points of the field campaign, and new scatter plots were drafted between the radio-elements and the three vegetation indices (Figure 7). This procedure showed that the samples from the *Cerrado Rupestre* class were distinct from the others, while the *Cerradão* and

*Campo Limpo* phytophysionomies were mixed between the vegetation indices and the K and eU channels in the graphs. The *Cerradão* samples were discriminated in the graphs of the three vegetation indices and the eTh radioisotope, but the *Campo Limpo* and *Cerrado Rupestre* samples appeared mixed. The graphs of the three vegetation indices and the K and eU channels show the *Cerrado Rupestre* class to be individualized. This condition showed that the data from the K and eTh channels were more efficient for the separation of the samples.

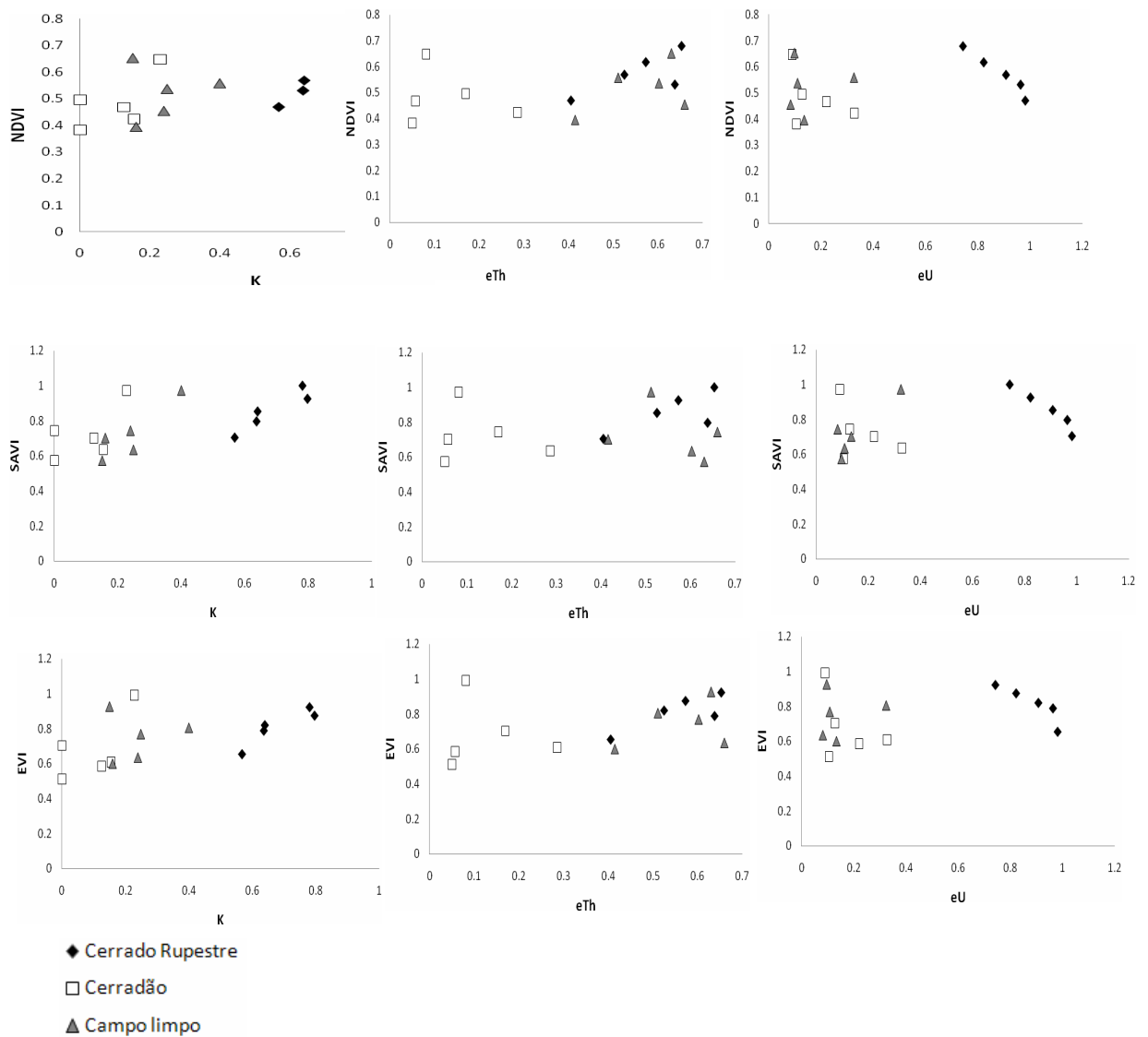


Fig. 7. Scatter plots between the vegetation indices (NDVI, SAVI and EVI) and radio-elements (K, eTh and eU) in the selected gamma-spectrometry domains.

In the scatter plots of the vegetation indices and radioisotope ratios, the plots referring to the indices and eTh/K show the three phytophysiognomies to be individualized (Fig. 8). These products attest to the discrimination of these vegetation classes as an important tool for the study of the Cerrado biome.

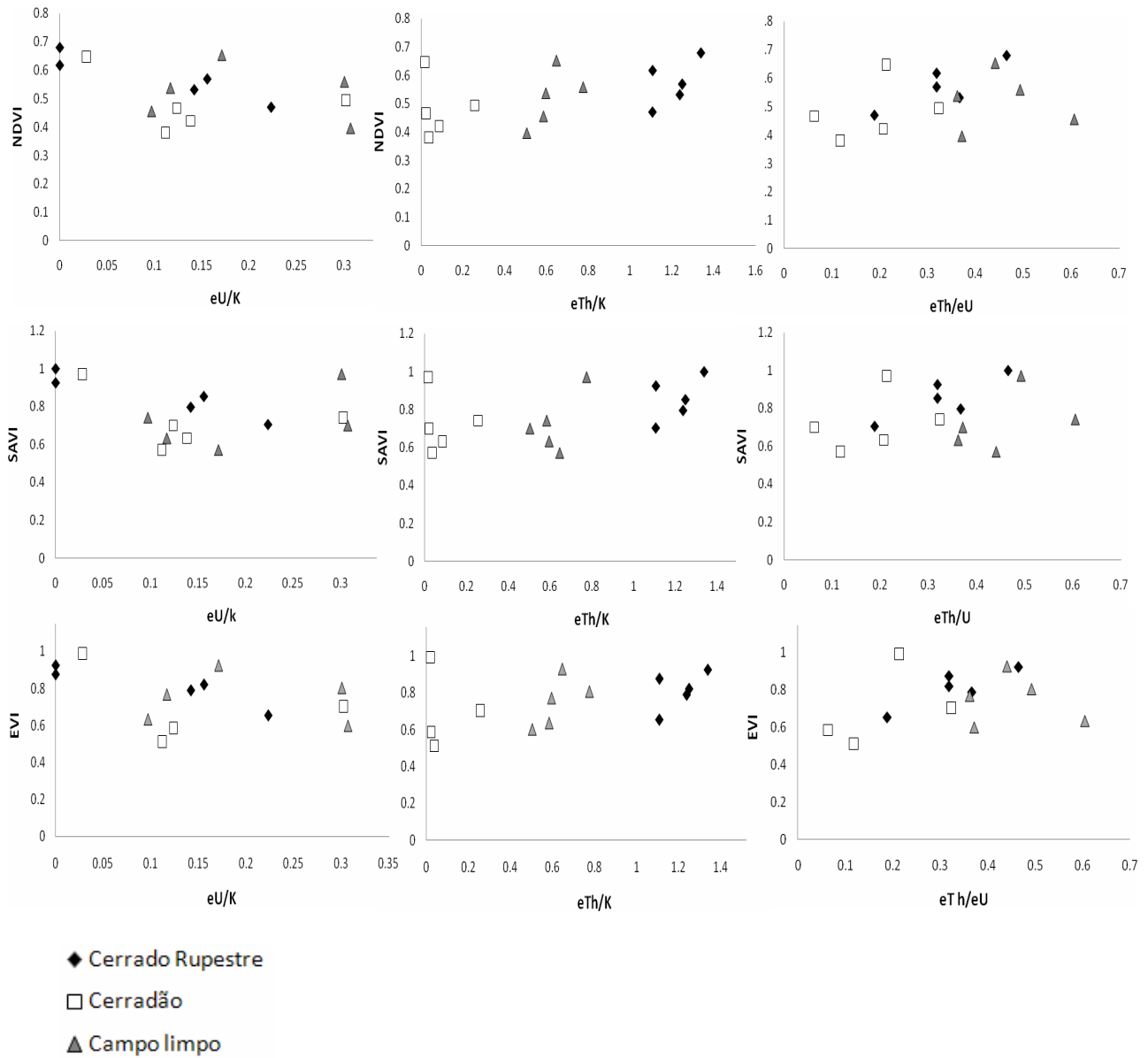


Fig. 8. Scatter plots between the vegetation indices (NDVI, SAVI and EVI) and radio-element ratios (eU/K, eTh/K and eTh/eU) in the selected aerogammaspectrometric domains.

To statistically validate the potential of the eTh and K channels to discriminate the phytophysiognomies, as shown in Figure 08, the F test was applied (Table 1) for the variance means of the samples related to the fieldwork data (eTh and K) and the data without field controls (eTh/K). The hypothesis that the means of the variances were comparable for  $\alpha = 0.05$  of significance was confirmed, with the exception of the Cerradão samples for the K channel values (Table 1).

Table 1 - F test results for the samples of K% and eTh (ppm)

<b>K%</b>						
<b>Phytophysiognomy</b>	<b>Gammaspectrometry Domain</b>	<b>F</b>	<b>Statistic</b>	<b>Critical F</b>	<b>F test result</b>	
<b>Campo Limpo</b>	1	0.599	$F \leq 1$	0.107	Does not reject $H_0$	
<b>Cerrado Rupestre</b>	2	1.457	$F > 1$	9.276	Does not reject $H_0$	
<b>Cerradão</b>	3	10.440	$F > 1$	9.276	Rejects $H_0$	
<b>eTh (ppm)</b>						
<b>Phytophysiognomy</b>	<b>Gammaspectrometry Domain</b>	<b>F</b>	<b>Statistic</b>	<b>Critical F</b>	<b>F test result</b>	
<b>Campo Limpo</b>	1	1.024	$F > 1$	9.276	Does not reject $H_0$	
<b>Cerrado Rupestre</b>	2	1.293	$F > 1$	9.276	Does not reject $H_0$	
<b>Cerradão</b>	3	6.854	$F > 1$	9.276	Does not reject $H_0$	

\* Significance level 0.05%; degree of freedom = 3.

The K samples in domain 3, which contains Cerradão, exhibited different variance among the data, which demonstrates that comparing the samples based on fieldwork and the random samples, based on the gammaspectrometric domains, the element K has the greatest mobility in the *Cerradão* phytophysiognomy. Another notable observation for this analysis is

that the gammaspectrometric domain related to this phytophysiognomy is dominated by the eTh and eU radioisotope channels (Figure 2).

#### 4. Conclusions

There was a strong relationship between the aerogammaspectrometric data (K, eTh and eU) and the *Campo Limpo*, *Cerrado Rupestre* and *Cerradão* phytophysiognomies. In the gamma-spectrometry domains, the variations of the K, eTh and eU concentrations were directly related to the landscapes where the phytophysiognomies occur.

The scatter plots between the aerogammaspectrometric data and the vegetation indices were effective in the discrimination of the studied phytophysiognomies. The NDVI, SAVI and EVI indices showed similar patterns of discrimination for the phytophysiognomies addressed, indicating the need to apply an independent method to map these phytophysiognomies.

When the radioisotopes and vegetation indices were used, the aerogammaspectrometry signature response was more effective in the discrimination of the *Cerrado Rupestre*, *Cerradão* and *Campo Limpo* phytophysiognomies.

The scatter plots of the vegetation indices with the eTh channel were more conclusive for the discrimination of phytophysiognomies than the plots with K and eU. There is no evidence in the literature of a relationship between the radioisotope eTh and the phytophysiognomies of the Cerrado biome, although the absorption capacity of this radioelement by plants is known. The low chemical mobility of this element drives its distribution and concentration in soil, which is reflected in the landscape and, consequently, in the phytophysiognomies because of the soil characteristics, related to the mineralogy of the studied area.

Therefore, the biomass and the radio-elements have a linear relationship, characterizing the proposed methodology as an effective procedure to map the *Cerradão*, *Cerrado Rupestre* and *Campo Limpo* phytophysiognomies in the region of Cavalcante, northeastern Goiás, Brazil.

## 5. References

Akçay, M., Lermi, A., & Van, A. (1998). Biogeochemical exploration for massive sulphide deposits in areas of dense vegetation: an orientation survey around the Kanköy Deposit (Trabzon, northeastern. *Journal of Geochemical Exploration*, 63(3), 173–187. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037567429800051X>

Albering, J. H., Rainer, P., Wolfgang, J., Bernard, C., & Jean, E. (1994). On the order and disorder of the transition metal ( T ) and silicon atoms in ternary thorium transition metal silicides of the compositions Th<sub>2</sub>TSi<sub>3</sub> and ThTSi, 206, 133–139.

Almeida, Isnard, T., Juliani, C., Mantovani, W., & Pérez-Aguilar, A. (2007). Comunidades florestais como indicadores geobotânicos□: o caso da mineralização aurífera do Grupo Serra do Itaberaba , Guarulhos , São, 37(1), 37–49.

Araújo, J. F. D. E., & Haridasan, M. (2007). Relação entre deciduidade e concentrações foliares de nutrientes em espécies lenhosas do cerrado, 1, 533–542.

Andrade, L.R.M.D., and J.C.S. Silva. 2009. *Savanas no Mundo: demandas para pesquisa*. In: *Savanas: demandas para pesquisa* [Savannas in the World: demands for research]. edited by F.G., Faleiro, A.L.D.F., and Neto. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados.

Berk, A.G.P., S.M. Adler-Golden, A.J. Ratkowski, G.W. Felde, G.P. Anderson, M.L. Hoke, T. Cooley, et al. 2002. Exploiting MODTRAN radiation transport atmospheric correction: the FLAASH algorithm. In: *SPIE Proceeding, Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research*, 798-803.

Bezerra, H.S., E.E. Sano, and L.G., Ferreira. 2007. Desempenho do satélite sino-brasileiro de recursos terrestres CBERS-2 no mapeamento da cobertura da terra no Distrito Federal, Brasil [Performance of the Sino-Brazilian satellite of earth resources CBERS-2 in the mapping of ground coverage at Federal District, Brazil]. *Revista Brasileira de Geofísica* 25:171-185.

Cunha, M.C., E. Lima, V.P. Pereira, E. Menegotto, A.C. Bastos Neto, L.D. Oliveirria, M.L.L. Formoso. 2008. Biogeochemical behavior of *Ampelozizyphus amazonicus* Ducke in the Pitinga mining district, Amazon, Brazil. *Environmental Geology* 55: 1355-1362.

Cunha, M. (2010). Absorção e fracionamento dos elementos terras raras por vegetais: estudo comparativo em plantas ocorrentes em diferentes contextos geológicos. *Geologia USP. Série*, 53–59.

Dias, R.R., and W.R. Paradella. 1997. Integração de dados aéreos gamaespectrométricos com imagens TM-Landsat no mapeamento geológico da área do Pojuca, Província Mineral de Carajás [Integration of aerial gamma-spectrometry data with TM-Landsat images in the geological mapping of the area of Pojuca, Mineral Province of Carajás]. *Revista Brasileira de Geofísica* 15: 23-33.

Dickson, B.L., and K.M. Scott. 1997. Interpretation of aerial gamma-ray surveys - adding the geochemical factors. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics* 17: 187-200.

El-Sadek, M.A. 2002. Application of thorium-normalized airborne radiometric survey data of Wadi Araba area, North-eastern Desert, Egypt, as a guide to the recognition of probable subsurface petroleum accumulations. *Applied Radiation and Isotopes* 57: 121-130.

Felde, G. W., G. P. Anderson, S. M. Adler-Golden, M. W. Matthew, A. Berk. 2003. Analysis of Hyperion data with the FLAASH atmospheric correction algorithm: Algorithms and technologies for multispectral, hyperspectral, and ultraspectral imagery. In Proceedings of SPIE, IX aerosense conference, Orlando, 21-25.

Felfili, J. M., A. V. Rezende, and M.C. Silva-Junior. 2007. *Biogeografia do Bioma Cerrado: vegetação e solos da Chapada dos Veadeiros* [Biogeography of the Cerrado Biome: vegetation and soils of Chapada dos Veadeiros]. Brasília: Editora UnB.

Ferreira, L. G., Ferreira, N. C., & Lobo, F. C. (2007). Base de dados espaciais para o monitoramento biofísico-ambiental do bioma Cerrado Universidade Federal de Goiás Instituto de Estudos Sócio-Ambientais – IESA Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento - LAPIG Caixa Postal 131 – 74001-940 – (pp. 5219–5224).

Ferreira, L.G., N.C. Ferreira, and M.E Ferreira. 2008. Sensoriamento remoto da vegetação: evolução e estado-da-arte [Remote sensing of vegetation: evolution and state of the art]. *Acta Scientiarum Biological Sciences* 30: 379-390.

Ferreira, L. G., Yoshioka, H., Huete, A., & Sano, E. E. (2003). Seasonal landscape and spectral vegetation index dynamics in the Brazilian Cerrado: An analysis within the Large Scale ^ nia ( LBA ) Biosphere – Atmosphere Experiment in Amazo, 87, 534–550.

Ferreira, L. G., H. Yoshioka, A. Huete, E. E. Sano. 2004. Optical characterization of the Brazilian Savanna physiognomies for improved land cover monitoring of the Cerrado biome: preliminary assessments from an airborne campaign over an LBA core site. *Journal of Arid Environments* 56: 425-447.

Ferreira, M. E., L. G. Ferreira, E. E. Sano, and Y. E. Shimabukuro. 2007. Spectral linear mixture modelling approaches for land cover mapping of tropical savanna areas in Brazil. *International Journal of Remote Sensing* 28: 413-429.

Furley, P.A. 1996. The influence of slope on the nature and distribution of soils and plant communities in the Central Brazilian cerrado. In *Advances in Hillslope Processes*, edited by M.G Anderson, and S.M. Brooks, 327-346. New York: John Wiley & Sons.

Gomes, J. B. V., Curi, N., Motta, P. E. F., Ker, J. C., Marques, J. J. G. S. M. & Schulze, D. G. (2004). SEÇÃO V - Gênese, morfologia e classificação do solo e mineralógicos de solos, 28(6), 137-153.

Haridasan, M. 2000. Nutrição mineral de plantas nativas do Cerrado [Mineral nutrition of native plants of the Cerrado]. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal* 12:54-64.

Hewamanna, R., & Botany, E. (1987). Gamma activity of plants from monazite - bearing soils of the west coast of Sri Lanka minerals occur along the Southwest, West and East Coasts of Sri Lanka. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 27(4), 449-454.

International atomic energy agency. (2003). *Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data* (p. 173). Vienna.

Huete, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI), *Sensing of Environment* 25: 295-309.

Huete, A. R. H., Q. Liu, Batchily, and W. van. K. Leeuwen. 1997. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment* 59: 440-451.

IAEA, International Atomic Energy Agency. 2003. *Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometric data*. IAEA: 179.

Jensen, J. R. 2009. *Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres [Remote Sensing in the Environment: An Earth Resource Perspective]*. São José dos Campos: Parêntese Editora.

LASA Engenharia e Prospecções S.A. 2006. *Projeto Levantamento Aerogeofísico do Estado de Goiás – 3ª Etapa – Paleo-Neoproterozóico do Nordeste de Goiás - Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos [Airborne Geophysical Survey Project of the State of Goiás – Step 3 – Paleo-Neoproterozoic of Northeastern Goiás – Final Report of the Survey and Processing of Magnetometric and Gamaspectrometric Data]*. Rio de Janeiro: SGM/MME/CPRM e SIC/SGM/FUNMINERAL/Estado de Goiás.



Cunha, M. C. L. e, Pereira, V. P., Menegotto, E., Bastos Neto, a. C., Oliveira, L. D., & Formoso, M. L. L. (2007). Biogeochemical behavior of *Ampelozizyphus amazonicus* Ducke in the Pitinga mining district, Amazon, Brazil. *Environmental Geology*, 55(6), 1355–1362. doi:10.1007/s00254-007-1086-y

Mello, M. P., B. R. Prado, G. B. S. Silva, Y. E. Shimabukuro, E. E. Sano. 2009. Comportamento espectral de fitofisionomias do Cerrado e desenvolvimento de índices utilizando bandas sintéticas derivadas de Modelos Lineares de Mistura Espectral aplicados na discriminação de fitofisionomias [Spectral behavior of the Cerrado phytophysiognomies and development of indices using synthetic wavebands derived from Spectral Mixture Linear Models applied in the discrimination of phytophysiognomies]. XIV Simpósio de Sensoriamento Remoto, Natal: 25-30.

MMA, Ministério do Meio Ambiente. 2010. *Plano de ação para prevenção e controle do desmatamento e das queimadas no cerrado-PPCerrado* [Action plan for the prevention and control of deforestation and forest fires in the Cerrado-PPCerrado]. Brasília: Ministério do Meio Ambiente.

MMA, Ministério do Meio Ambiente 2011. *Monitoramento nos biomas brasileiros por satélite. Acordo de cooperação técnica MMA/IBAMA: Monitoramento do bioma Cerrado 2009-2010* [Monitoring in the Brazilian biomes by satellite. Technical cooperation agreement MMA/IBAMA: Monitoring of the Cerrado biome 2009-2010]. Brasília: Ministério do Meio Ambiente.

MMA, Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Biodiversidade e Floresta 2007. *Áreas prioritárias para conservação, uso sustentável e repartição de benefícios da biodiversidade brasileira* [Priority areas for conservation, sustainable use and benefit sharing of Brazilian biodiversity]. Brasília: Ministério do Meio Ambiente.

Naveh, Z., and A. S. Lieberman 2001. Contribuciones significativas de la Ecología de Paisjes: ejemplos de las herramientas, los métodos y las aplicaciones [Significant contributions of Landscape Ecology: examples of tools, methods and applications]. In *Ecología de Paisajes*, edited by Z. Naveh, A. S. Lieberman, 135-285. Buenos Aires: Editorial Facultad Agronomía,

Oliveira Filho, A. T., E. A. Vilela, D. A. Carvalho, M. L. Gavilanes. 1994. Effects of soils and topography on the distribution of tree species in a tropical riverine forest in south-eastern Brazil. *Journal of Tropical Ecology* 10: 483-508.

Perez, Daniel Vidal Saldanha, Moreira Josino Costa, V. D. S. (1998). Concentração total de urânio e tório em alguns solos brasileiros. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 33, 1417–1423.

PROBIO. 2007. *Mapeamento da Cobertura Vegetal do Bioma Cerrado* [Mapping of the Vegetation Coverage of the Cerrado Biome]. Brasília: Fundação de Apoio à Pesquisa e ao Agronegócio.

Ribeiro, J. F., and B. M. T. Walter. 2008. As Principais Fitofisionomias do Bioma Cerrado [The Main Phytophysionomies of the Cerrado Biome]. In: *Cerrado: Ecologia e Flora*[Cerrado: Ecology and Flora], edited by S. M. Sano, S. P. Almeida, J. F. Ribeiro, 156-212. Brasília: Embrapa.

Rodrigues, R. F., & Araújo, G. M. De. (2013). Estrutura da vegetação e características edáficas de um cerradão em solo distrófico e em solo mesotrófico no triângulo mineiro vegetation structure and soil characteristics of a dystrophic and a mesotrophic cerradão in the triângulo mineiro, 2013–2029.

Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A. Schell, and D.W. Dreering. 1974. *Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS, Proceedings*. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Greenbelt, 3010-3017.

---

## **7. ARTIGO 2 - Integração de dados remotos e biogeoquímicos: uma análise da potencialidade de dados gamaespectrométricos para mapeamento de fitofisionômias do Cerrado**

### Resumo

A pesquisa integra dados remotos e químicos com o intuito de investigar as potencialidades da utilização dos radioisótopos K, eTh e eU no mapeamento de fitofisionomias do Cerrado. Como solo e vegetação constituem relações interdependentes, a paisagem sobre o substrato é reflexo dessa relação podendo ser identificado extratos fisionômicos que acompanham a distribuição de elementos associados ao movimento deste substrato. Os dados gamaespectrométricos tem sido utilizado principalmente para a prospecção mineral, mas neste trabalho é abordada a potencialidade destes dados para identificação vegetal. Utilizando-se de análise estatística multivariada pode-se confrontar dados referentes aos radioelementos e sua relação com a biomassa. A área do estudo se localiza no noroeste do Estado de Goiás, região com diversidade fitofisionômica conservada, propícia para estudos fitofisionômicos do Cerrado. Inicialmente foi aplicado a análise de agrupamentos definindo cinco classes de agrupamento, devido as cinco fitofisionomias estudadas: Cerradão, Cerrado Rupestre, Cerrado sensu stricto, Campo Limpo e Campo Sujo. Os dendrogramas demonstraram a similaridade positiva de absorção de algumas plantas e a disponibilidade dos radioelementos no solo entre as espécies confirmando que é possível identificar grupos com mesmo comportamento de absorção. Essa relação solo-planta divide grupos que possuem capacidade de absorção dos radioelementos com os dados aerogamaespectrométricos, e dados orbitais do sensor TM/LANDSAT5 (NDVI) e do SRTM (declividade). Mesmo considerando que cada espécie pode reagir de forma diferenciada devido a absorção e a disponibilidade dos elementos no solo, foi identificado que existe relação entre absorção e os dados remotos, e essa relação se reflete na fisionomia, o que foi confirmado com a análise discriminante multivariada. Com os resultados da estatística multivariada foram elaborados mapas com as variáveis analisadas. O resultado da análise multivariada demonstrou a potencialidade dos radioelementos eTh e K para o mapeamento fitofisionômico, o que pode ser comprovado com uma classificação mais apurada das áreas potenciais de ocorrência das fitofisionomias com a imagem aerogamaespectrométrica composta pela razão eTh/K.

Palavras-chaves : Gamaespectrometria aérea, Biogeoquímica, Fitofisionomias do Cerrado.

## 1. Introdução

O bioma cerrado apresenta grande diversidade e heterogeneidade de espécies mesmo em fisionomias homogêneas. Esta diversidade se reflete em espécies nativas, que crescem sobre condições edáficas uniformes. A distribuição das fitofisionomias do cerrado se deve as diferenças locais de topografia, drenagem, solo, regime de fogo e precipitação sazonal (Eiten, 1990; Furley, 1999, Araújo & Haridasan, 2007). O Cerrado se distribui no território do Brasil com 2.000.000 km<sup>2</sup>, o que requer mapeamento e constante monitoramento para sua conservação. (Bezerra *et al.* 2007; Ferreira *et al.* 2004; Ferreira *et al.* 2007 e Mello *et al.*, 2009).

Os solos do Cerrado são profundos e o nível freático localiza-se a muitos metros da superfície, podendo ocorrer uma camada de concreção ferruginosa. Os remanescentes de Cerrado atuais desenvolveram-se sobre solos muito antigos, intemperizados, ácidos, depauperados de nutrientes e com concentrações elevadas de alumínio nas folhas de arbustos e árvores. O solo do Cerrado está sob uma superfície geomórfica desenvolvida por múltiplos ciclos de erosão superficial e correspondem aos ciclos geomorfológicos, Sul-americano e Velhas que predominam em toda a área do Cerrado (Rizzini, 1979; Gomes, *et al.*, 2004; Ribeiro & Walter, 2008; Sano *et al.*, 2010; )

Os tipos fitofisionômicos do Cerrado caracterizam-se por sua estrutura, pelos aspectos do ambiente e pela composição florística, compondo-se de formações florestais, savânicas e campestres, subdivididas em onze fitofisionomias (Ribeiro & Walter, 2008). O entendimento dos tipos fitofisionômicos do cerrado perpassa pela compreensão do substrato do qual se assentam e das relações de absorção dos elementos que compõe sua estrutura (Haridasan, 2000). Portanto, pode-se afirmar que as plantas servem como a principal via, por meio da qual, os nutrientes passam do ambiente geofísico para o ambiente biológico dinâmico (Kerbaudy, 2008).

As plantas ao absorverem as soluções do solo refletem a mobilidade dos elementos químicos na rizosfera (Porter & Lawlor, 1991). O entendimento dos processos de nutrição mineral das plantas para compreender o seu desenvolvimento e sua condição morfológica na paisagem, portanto, se faz necessário, visto que as plantas dependem dos elementos essenciais

de nutrição: os macroelementos, microelementos e os elementos benéficos. (Munson, 1998; Kerbaudy, 2008).

Além dos elementos essenciais a nutrição, elementos químicos pesados também podem ser absorvidos pela vegetação do Cerrado (Haridasan, 2006). A interação entre a absorção desses elementos químicos pela planta se deve a características peculiares a cada espécie, de processos físico-químicos e bioquímicos das moléculas transportadoras de membranas constituídas de proteínas, e que, portanto, devem-se considerar as várias relações de estrutura e função entre os componentes de transporte e os diversos fatores endógenos e exógenos ao processo (Kerbaudy, 2008).

A inter-relação entre a pedogênese e a distribuição biogeográfica para definir padrões sobre fisionomias vegetais é complexa (Skorupa *et al.*, 2011). Mas estudos que analisaram a rizosfera, região do solo, onde o sistema radicular dos vegetais absorve os elementos químicos para a nutrição da planta, têm demonstrado que é possível essa absorção por radioelementos como o eTh e o eU na vegetação (Dean, 1966; Shtangeeva *et al.*, 2006; Hewamanna & Botany, 1987).

Há anos estudos biogeoquímicos e geobotânicos tem contribuído para a prospecção mineral, mas sabe-se que a junção da geobotânica e do sensoriamento remoto compõe uma poderosa ferramenta para esse fim (Almeida, *et al.*, 2007). Um método remoto de análise do substrato rochoso e do solo para a prospecção mineral que vem sendo utilizado pela geofísica e a geologia desde a década de 1960 é a aerogamaespectrometria. Este método é capaz de medir, a radiação com comprimento de ondas eletromagnéticas curtas que são emitidos em diferentes picos de energia, que correspondem aos decaimentos radioativos dos radioelementos presentes a aproximadamente 30 cm do solo (Wilford *et al.*, 1997).

Concentrações de K, Th e U no solo são determinados pela radioatividade da rocha que é a fonte formadora. Por estar presente em grande parte da superfície terrestre, o substrato rochoso é coberto pelo solo, que por sua vez, emana radiação variável dependendo das condições do ambiente e por sua disposição homogênea ou heterogênea (Santos *et al.*, 2008).

Como a estrutura da paisagem compõe um único sistema, solo e vegetação constituem parte integrante e interdependente dessa relação, acredita-se que a mensuração da radiação gama no solo pode ser viável à identificação de padrões de comportamento similar entre a distribuição dos radioisótopos e as fisionomias vegetais. O presente trabalho procura demonstrar as possibilidades de discriminação fitofisionômica por radioisótopos e as relações

desses com a biomassa das fitofisionomias: Cerrado stricto sensu, Cerradão, Cerrado Rupestre, Campo Limpo e Campo Sujo utilizando-se de métodos remotos e de análise química.

## 2. Metodologia

A área de estudo (Fig. 1) está localizada no nordeste do Estado de Goiás, entre as coordenadas 47°42'59.6"W; 13°23'50,9"S e 47°07'18,6"W; 13°48'2,6"S, abrangendo parte dos municípios de Cavalcante e Teresina de Goiás.

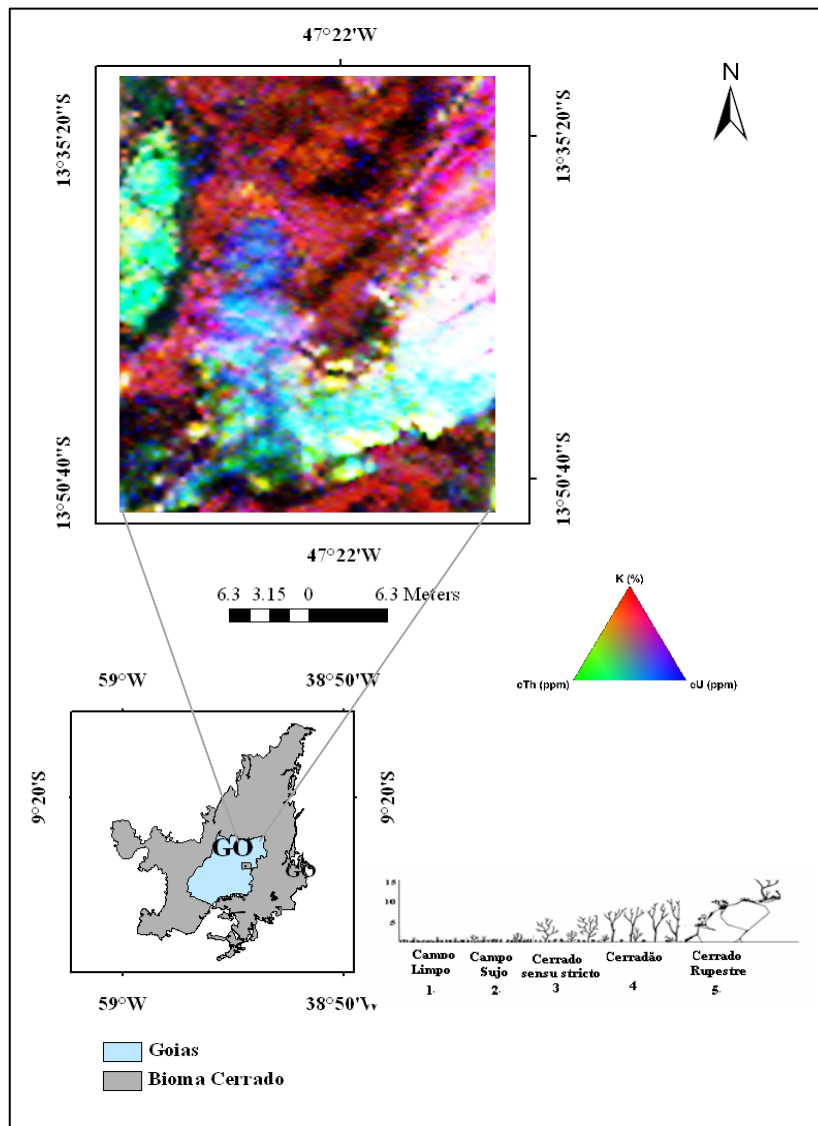


Fig.1 Localização da área de estudo e perfil das fitofisionomias abordadas na pesquisa com imagem aerogamaespectrométrica, composição colorida RGB/ K, eTh eU.

## 2.1 Análise das espécies do Cerrado

Foram coletadas espécies vegetais na área de estudo de acordo com os domínios gamaespectrométricos. Essas áreas, definidas no mapa aerogamaespectrométrico, foram delimitadas de acordo com os teores de K, eTh e eU (Fig.1). A coleta das espécies se deu também pelo critério de representação quanto à sua ocorrência nas fitofisionomias abordadas.

Após a coleta das espécies, as mesmas foram secas, trituradas e moídas, e então pesadas em torno de 50g e submetidas à calcinação de 500-600 °C (Akçay *et al.*, 1998; Cunha, 2010).

As análises químicas das plantas para os elementos essenciais à nutrição e os radioisótopos primeiramente foi feita a digestão das amostras onde foram pesadas as cinzas com 0,1 grama e colocados em backer adicionando 10 ml de HNO<sub>3</sub> e elevando a solução com água deionizada em balão volumétrico de 50ml e posteriormente filtradas.

Para identificar os elementos essenciais à nutrição: macronutrientes (Ca, Mg), micronutrientes (Mo, Zn, Mn, Cu, Ni, Fe) e elementos benéficos (Si, Al) foi utilizado um Espectrômetro de Emissão Atômica com Plasma indutivamente acoplado (ICP/AES) da marca Perkin Elmer, modelo Spectroflame-Fvmo3, utilizando nebulizador Meinhard sendo que as medições foram realizadas no Laboratório de Geoquímica da Universidade de Brasília – (LabGeq).

A análise do potássio (K) nas plantas foi feita por Espectrofotômetro de Absorção Atômica (EAA), marca Perkin Elmer, modelo Analyst 200 também no LabGeq. Como fonte de excitação foi utilizada chama de ar-acetileno. O método de calibração externa considerou a curva do K entre, 0 ppm - 5 ppm.

Para a identificação química dos radioelementos Th e U nas espécies, utilizou-se um Espectrômetro de Massa por Ionização Acoplada por Plasma (ICP/MS) da marca ELAN-6100DRC da Perkin Elmer, no laboratório de geoquímica da Universidade de São Paulo (USP).

## 2.2 Análise de solos

As amostras de solo foram coletadas nas áreas onde foram feitas as coletas da vegetação com profundidade de 20 cm a 50 cm, e posteriormente, destorroadas e passadas em peneiras de malha de 2 mm, para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). Para a análise dos elementos essenciais à nutrição foi utilizando um aparelho Olympus Delta Handheld XRF

Analyzers para medir a fluorescência de raios X e verificar a presença dos macroelementos, microelementos e elementos benéficos às plantas no solo.

Para analisar os radioelementos Th e U no solo foi utilizado um gamaespectrômetro portátil, marca RS-230.

### **2.3 Dados aerogamaespectrométrico, do sensor TM/LANDSAT-5 e SRTM**

Os dados aerogamaespectrométricos utilizados nesse estudo foram referentes aos canais potássio ( $^{40}\text{K}$ ), tório ( $^{232}\text{Th}$ ), urânio ( $^{238}\text{U}$ ) e contagem total (CT) e obtidos pelo Levantamento Aerogeofísico do Estado de Goiás, Paleo-Neoproterozóico do Nordeste de Goiás. Esses dados foram levantados entre os períodos de 01 de maio de 2006 a 01 de setembro de 2006 pela empresa Lasa Engenharia e Prospecções S/A, com duas aeronaves (Lasa, 2006). No levantamento, foi utilizado o gamaespectrômetro EXPLORANIUM, modelo GR-820, com 256 canais espectrais. O espectro de cada um dos cristais detectores é analisado individualmente para determinação de uma maior acurácia dos fotopicos de  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  (Lasa, 2006).

A radiação gama natural proveniente do solo é registrada, no gamaespectrômetro a bordo da aeronave durante 1 segundo. Os registros nos canais de urânio, tório, potássio e a contagem total são registrados em contagens por segundo ou cps. A calibração prévia do sistema permite a conversão das contagem para teores equivalentes no solo. O potássio é apresentado em percentagem (%K) e o tório e urânio em partes por milhão (ppm). Devido a possibilidade de desequilíbrio radioativo, os teores de urânio e tório são apresentados como teores equivalentes (eU ppm e eTh ppm) (IEA, 2003).

A imagem do satélite Landsat-5, sensor *Thematic Mapper* (TM), órbita/ponto: 221/69 e 221/70, de 08 de julho de 2011, foram obtidas da página eletrônica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A escolha da cena obtida pelo sensor TM teve, como critério, a compatibilidade com a resolução espacial dos produtos derivados dos dados aerogamaespectrométricos, sua disponibilidade gratuita e ausência de ruídos espúrios.

Os dados do projeto *The Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) da área de estudo foram selecionados e extraída a declividade em formato GeoTiff.



## 2.4 Pré-Processamento de dados

Os valores do banco de dados aerogamaespectrométricos do projeto Paleo-Neoproterozóico foram ajustados segundo análise estatística dos teores de valores do K, eTh e eU, tendo como referência os teores médios apresentados para as rochas da crosta terrestre (Dickson & Scott, 1997). Após a verificação preliminar desses dados, segundo informações das litologias que constituem a área de estudo, foi estabelecido que as concentrações dos radioelementos fora da faixa aceita para essa litologia seriam modificadas. O procedimento foi efetuado a partir da divisão dos dados por  $\frac{1}{4}$  do desvio-padrão, a fim de ajustar os valores reais, sem perda de informações relevantes. Após essa operação, os valores representando teores negativos que constituíam o banco de dados foram excluídos da amostra.

Com o intuito de tornar compatível o dado aerogamaespectrométricos com os dados das imagens TM/Landsat-5, os *pixels* das imagens foram redimensionados de 30 m para 100 m, adequando-os à mesma resolução espacial dos dados aerogamaespectrométricos.

Com a aquisição da imagem do projeto *The Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) da área de estudo foi extraído para a análise a declividade, em formato GeoTiff, com resolução espacial de 90 m que posteriormente foi redimensionada para 100m X 100m pixel para também ser compatível com os aerogamaespectrométricos.

## 2.5 Processamento de dados

Após a análise dos valores dos radioelementos foram gerados mapas e grids resultantes da análise estatística. Foram gerados uma imagem ternária, RGB/K eTh eU, e uma imagem da razão entre os radioelementos eTh e K (Th/K).

A partir das bandas 3 e 4 das imagens TM/Landsat-5, foi gerado o índice de vegetação: NDVI (índice de vegetação pela diferença normalizada). O NDVI (Rouse *et al.*, 1974 ) (Eq. 1).

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{red}) \quad (01)$$

Onde:

$\rho_{NIR}$  = reflectância na faixa espectral do infravermelho próximo (banda 4 do Landsat TM);

$\rho_{red}$  = reflectância na faixa espectral do vermelho (banda 3 do Landsat TM).

## 2.6 Estatística de dados multivariados

Após a aquisição dos dados foram coletados regiões de interesse nas áreas onde as espécies foram coletadas, e extraída a média dos pixels das imagens NDVI, aerogamaespectrométrica (K, eTh e eU) e imagem SRTM (Declividade). Esses dados foram então confrontados juntamente com os dados químicos das espécies e do solo referentes aos elementos essenciais a nutrição e os radioelementos.

Para a análise estatística de diferentes variáveis, remotas e químicas os valores dos dados foram normalizados e escalonados dividindo esses valores pelo desvio padrão. A normalização foi necessária para retirar o efeito de magnitude entre as variáveis como indicado por Davis, (2002) e Kent (2012).

Com os dados padronizados foram feitas observações para verificar se existiam padrões de distribuição entre os radioisótopos (K, eTh, eU) nas espécies coletadas com o NDVI e os canais aerogamaespectrométricos na imagem RGB/ K, eTh eU. Após a verificação dos padrões e assinaturas químicas em relação aos dados remotos foram elaboradas a análise estatística multivariada utilizando, a análise de agrupamento e a análise discriminante.

A análise de agrupamento constitui de várias técnicas numéricas que têm por objetivo encontrar e separar objetos em grupos com características similares, ou seja, busca a homogeneidade entre os dados para todas as variáveis medidas em cada indivíduo e todos os indivíduos submetidos às mesmas mensurações (Landim, 2011; Rogerson, 2012; Kent, 2012). Portanto, foi utilizado a análise de agrupamento para observar o comportamento das espécies quanto a absorção dos radioelementos K, eTh e eU levantados por dados remotos e dados controlados em laboratórios, ou seja, verificar se existiam padrões entre as espécies para os dados aerogamaespectrométricos, os dados TM/Landsat5 (NDVI), SRTM (Declividade) e os dados medidos por gamaespectrômetro portátil (Solo), Fluorescência de Raios X e ICP-MS, ICP-OES e EAA.

A análise de agrupamentos pode verificar a existência de homogeneidade dos grupos e contribuir para a classificação com as variáveis analisadas. O resultado da análise de agrupamento é demonstrado em dendrogramas, sendo uma síntese da informação à classificação.

O método de agrupamento utilizado foi o *Ward*, esse método tende a resultar em agrupamentos de tamanhos aproximadamente iguais devido a sua minimização de variação

interna. Em cada fusão potencial, combinam-se os dois agrupamentos que apresentarem menor aumento na soma global de quadrados dentro dos agrupamentos (Rogerson, 2012).

Para medir a similaridade entre os agrupamentos foi utilizado a Distância Euclidiana (2) em que são considerados  $n$  indivíduos que possuem valores para  $n'$  variáveis, a distância euclidiana entre eles é obtida pelo teorema de Pitágoras para um espaço multidimensional (Kent 2012). A distância euclidiana é medida por:

$$d = \sum_{j=1}^p \left\{ \frac{(X_{ij} - X_{i'j'})^2}{X_{ij}} \right\} \quad (02)$$

Onde  $d$  é a distância euclidiana entre parcelas  $i$  e  $j$ ,  $p$  é o número de espécies,  $X_{ij}$  é o valor das espécies  $j$  na parcela  $i$ , e  $X_{i'j'}$  é o valor das espécies  $i'$  na parcela  $j'$ .

Posteriormente foram definidas cinco classes no método de agrupamento para verificar a existência de relações entre as variáveis abordadas, ou seja, no dendrograma, as espécies deveriam se posicionar nos agrupamentos de suas fitofisionomias correspondentes.

Para confirmar os agrupamentos e verificar a distribuição das fitofisionomias de acordo com as variáveis utilizadas aplicou-se a Análise Discriminante separando as fitofisionomias em quatro grupos após a análise de agrupamentos: Cerrado stricto sensu, Cerradão, Campo Limpo/Sujo e Cerrado Rupestre. Para a separação desses grupos foram definidas as variáveis, NDVI, declividade, dados aerogamaespectrométricos e dados químicos dos radioisótopos K, eTh e eU para solos e plantas. Nessa técnica estatística se aplicou a função discriminante de *Fisher* capaz de separar ou discriminar os grupos de indivíduos.

Com o entendimento da capacidade dos dados aerogamaespectrométricos na diferenciação fitofisionômica e afim de entender as relações entre a distribuição desses dados com a absorção da vegetação e o comportamento fitofisionômico foi verificada a existência de padrões entre esses dados e os elementos essenciais à nutrição, para tanto foi aplicada a Correlação de Pearson e observado os níveis de correlação entre esses dados.

Verificada a potencialidade dos canais eTh e K foi produzido a imagem aerogamaespectrométrica resultante da razão entre os canais do eTh e K (eTh/K).

Com a definição das fitofisionomias em campo e, após os resultados encontrados nas análises multivariadas, foram delimitadas cinco regiões de interesse correspondentes as cinco fitofisionomias abordadas e extraídas de cada região de interesse vinte pixels na imagem

eTh/K. Dos pixels extraídos na imagem eTh/K foram extraídas as médias dos valores mínimos e máximos representativos de cada fitofisionomia e com esses intervalos foram determinados os fatiamentos para a classificação supervisionada e produzido um mapa potencial das fitofisionomias.

### 3. Resultados e Discussão

A assinatura do K para as espécies analisadas (Fig.2) demonstrou que há uma relação próxima de comportamento entre as variáveis Aerogamaespectrometria, plantas (ICP-MS) e solos (gamaespectrômetro portátil) para as espécies: *Emmotum nitens*, *Byrsonima rotunda* e *Xylopia aromatica*, pertencentes ao cerrado e para as espécies; *Vochysia thyrsoidea*, e *Chamaecrista orbiculata* da fitofisionomia, cerrado rupestre. As espécies pertencentes a formações campestres: *Malpighiaceae* sp., do campo limpo; *Qualea parviflora* do campo sujo e a espécie *Miconia stenostachya* do campo limpo.

A variável NDVI não demonstrou assinatura similar para os valores de K com as outras variáveis para a maioria das espécies, apenas para as espécies; *Emmotum nitens* e *Byrsonima rotunda*. As espécies *Vochysia thyrsoidea*, *Malpighiaceae* sp. e *Chamaecrista orbiculata* obtiveram proximidade entre as variáveis aerogamaespectrometria e os valores de solos e plantas.

É possível verificar na figura 02b que as espécies analisadas possuem proximidade entre seus valores de eTh, no solo e nas plantas, quando confrontados com os dados remotos, aerogamaespectrometria e NDVI. Mas, entre as variáveis, observa-se o comportamento similar entre, aerogamaespectrometria e plantas (ICP-MS), com exceção da espécie *Byrsonima rotunda*. A resposta dos dados químicos se diferencia para essa espécie quando comparado com o dado aéreo, para o eTh. Já o NDVI, possui uma assinatura muito próxima aos valores do solo, mensurados por gamaespectrômetro portátil.

Mesmo que a relação de absorção dos elementos no solo pela planta seja variável (Kerbaui, 2008), a correlação entre absorção da vegetação e a disponibilidade do radioisótopo Th no solo se demonstrou positiva. Ao observar as espécies foi identificado que há um padrão de absorção do solo pela vegetação, ou seja, as espécies que absorveram maiores quantidades de eTh se situam nas áreas de maior disponibilidade desse elemento no solo. E as espécies com menores quantidades de eTh estão em áreas com menores concentrações.

A espécie *Chamaecrista orbiculata*, foi a espécie que apresentou maior absorção de Th (1,28) (Plantas-ICP/MS) entre as espécies observadas. Para a variável aerogamaespectrometria, a espécie *Byrsonima rotunda* obteve o maior valor (3,57), assim como para os valores do solo (0,19). Essa espécie apresentou também um alto valor para o NDVI (0.3) entre as espécies. Esse comportamento anômalo demonstra que a área, definida como um domínio aerogamaespectrométrico do eTh possui altos teores desse elemento no substrato, sendo, portanto, maior a disponibilidade de Th para absorção da espécie. Indica também que constituiu um padrão próximo de comportamento entre disponibilidade do radioisótopo eTh no solo e a biomassa mensurada pelo NDVI.

O tório é um elemento mais resistente ao transporte por processos naturais de lixiviação e água (Vargas *et al.*, 1997) e essa resistência no solo e absorção pelas plantas pode, portanto, indicar um padrão de fixação que pode ser acompanhado pelas plantas. Estudo desenvolvido por Miekeley, Casartelli & Do'ito (1994) demonstraram ser possível a absorção desse elemento em espécies que ocorrem no Cerrado.

Há que se observar que tanto os dados de NDVI quanto os dados aerogamaespectrométricos são dados remotos de distância orbital e aérea. Os dados levantados para as plantas e solos constituem dados obtidos em laboratório e por análise química, ambos em ambientes controlados para a análise, sem grandes interferências ambientais e que padronizados e escalonados, apresentaram comportamento muito próximo ao das espécies do Cerrado para o radioisótopo eTh.

A assinatura dos valores de eU para as espécies estudadas (Fig.2c) demonstrou um distanciamento maior dos dados aerogamaespectrométricos das outras variáveis com baixa força de correlação (Tabela 1). Das espécies analisadas, o maior valor tanto para as variáveis remotas, quanto para a química, está na espécie *Byrsonima rotunda* (Aerogama=3.83) (Planta= 0.4) (Solo=0.12).

Na tabela 1 observa-se que as maiores correlações estão entre os radioelementos Th e K entre os de solos e plantas.

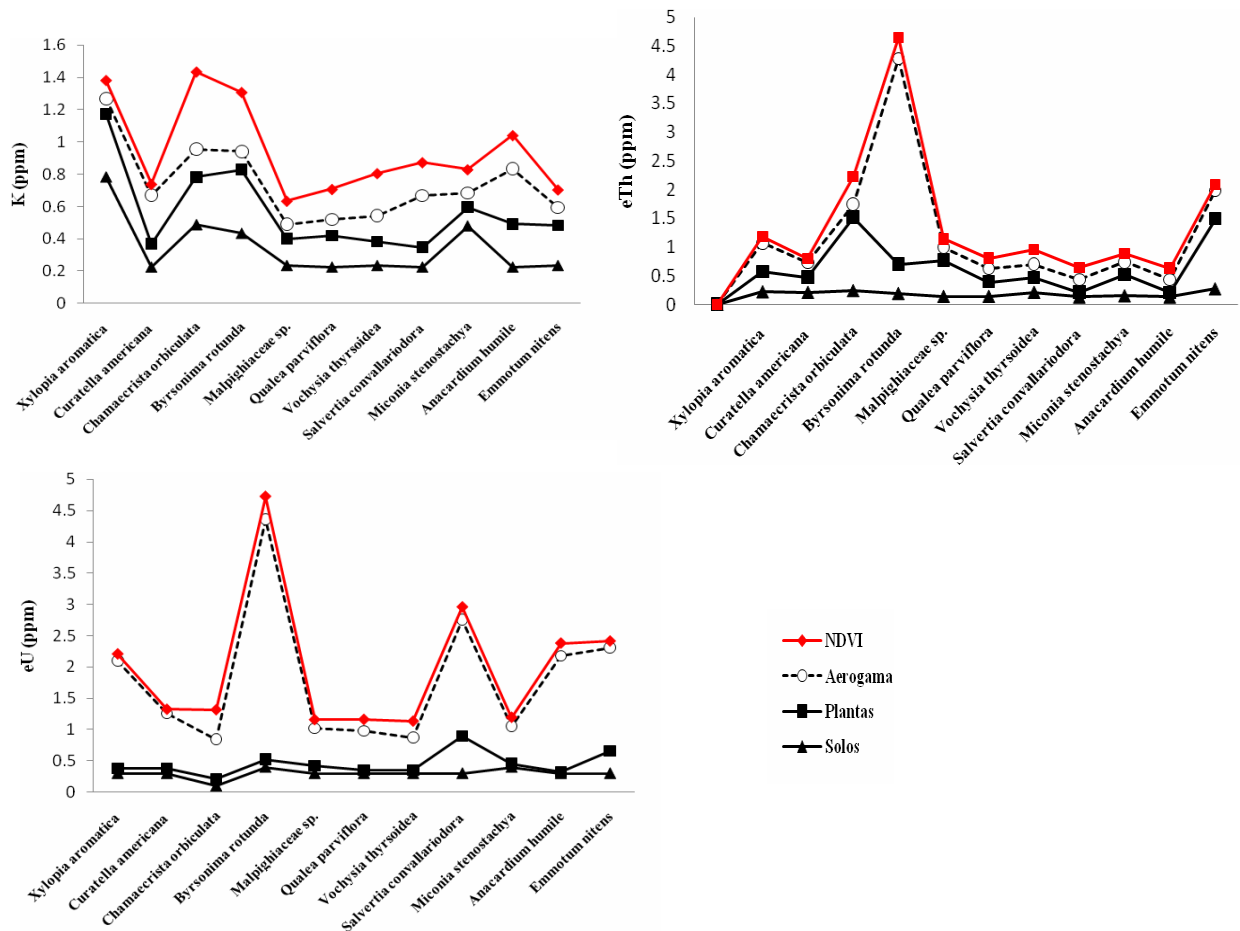


Fig.2 Distribuição das variáveis; Aerogamaespectrometria, Solos (gamaespectrômetro portátil), Plantas (ICP-MS) dos radioisótopos K, eTh e eU com os valores de NDVI nas espécies coletadas. As espécies foram ordenadas seguindo a ordem filogenética definida pelo APG III (Haston et al. 2009).

Tabela 1 - Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre os teores K, Th e U com as variáveis Planta (ICP-MS/EAA) Solo (gamaespectrometro) dados da imagem Aerogamaespectrométrica (RGB/ K, eTh Eu) e da imagem NDVI.

	Planta	Solo	Aerogama	NDVI
<b>K</b>				
Planta	0	0,620	-0,243	0,367
Solo	0,620	0	-0,423	0,149
Aerogama	-0,243	-0,423	0	-0,026
NDVI	0,367	0,149	-0,026	0
<b>Th</b>				
Planta	0	0,704	0,057	0,362
Solo	0,704	0	0,106	0,134
Aerogama	0,057	0,106	0	0,390
NDVI	0,362	0,134	0,390	0
<b>U</b>				
Planta	0	-0,032	0,254	-0,066
Solo	-0,032	0	0,410	-0,472
Aerogama	0,254	0,410	0	0,214
NDVI	-0,066	-0,472	0,214	0

\*Os valores em destaque possuem correlação de moderada positiva ( $0,5 \leq r < 0,8$ ) a forte positiva ( $0,8 \leq r < 1$ ).

Na análise de agrupamentos (Fig.3) observa-se que no dendrograma (1a), a relação solo-planta, para o K, não apresentou nenhum grupo pertencente à mesma fitofisionomia, já no gráfico (1b), as espécies *Salvertia convallariodora* (72,55), *Curatella americana* (72,55) e *Anacardium humile* (64,14) formam uma classe pertencente à fitofisionomia, Cerrado sensu stricto, constituindo maior força de agrupamento no dendrograma.

A espécie *Xylopia aromática* do cerradão se manteve em classe distinta nos dois gráficos relativos ao K permanecendo mais afastada, com similaridade (46,17). As espécies *Byrsonima rotunda* e *Chamaecrista orbiculata*, mesmo pertencendo à fitofisionomias diferentes, cerradão e cerrado rupestre, mantiveram o mesmo comportamento em relação aos dados remotos e químicos.

Dos dendrogramas correspondentes à análise do Th (Fig.3 - 2a, 2b) a similaridade de absorção das espécies *Salvertia convallariodora* e *Anacardium humile*, foi de 99,8, no dendrograma 2a, formando um grupo isolado na relação entre as variáveis, solo-planta. Essas espécies são pertencentes à mesma fitofisionomia, Cerrado sensu-stricto, mas no dendrograma (2b) elas se uniram ao comportamento similar das espécies *Qualea parviflora* e *Miconia stenostachya* (90,13) e Malpighiaceae sp. (78,77) que correspondem respectivamente ao campo sujo, campo limpo e campo limpo, fitofisionomias de formação campestre.

As espécies *Emmotum nitens* do cerradão e *Chamaecrista orbiculata* do cerrado rupestre possuem 84,20 de similaridade, e estão unidas no mesmo grupo no dendrograma (2a), já para o dendrograma (2b), essas duas espécies se encontram em classes diferentes, sendo que a espécie *Chamaecrista orbiculata* fica isolada com distância de similaridade de (37,47). A espécie *Emmotum nitens* agregou-se à espécie *Xylopia aromatica* que são pertencentes a fitofisionomia cerradão e a espécie *Curatella americana* do cerrado sensu-stricto.

O agrupamento para os dados referentes ao U em solos e plantas (Fig.3-3a) não apresentou relação de classificação de espécies com a mesma fitofisionomia, o mesmo ocorreu no dendrograma (3b), mas neste gráfico, as espécies *Vochysia thyrsoidea* e *Chamaecrista orbiculata* da fitofisionomia cerrado rupestre estão próximas quanto à similaridade (43,11), no entanto, não formaram uma mesma classe com a definição dos cinco *clusters* aplicados à metodologia.



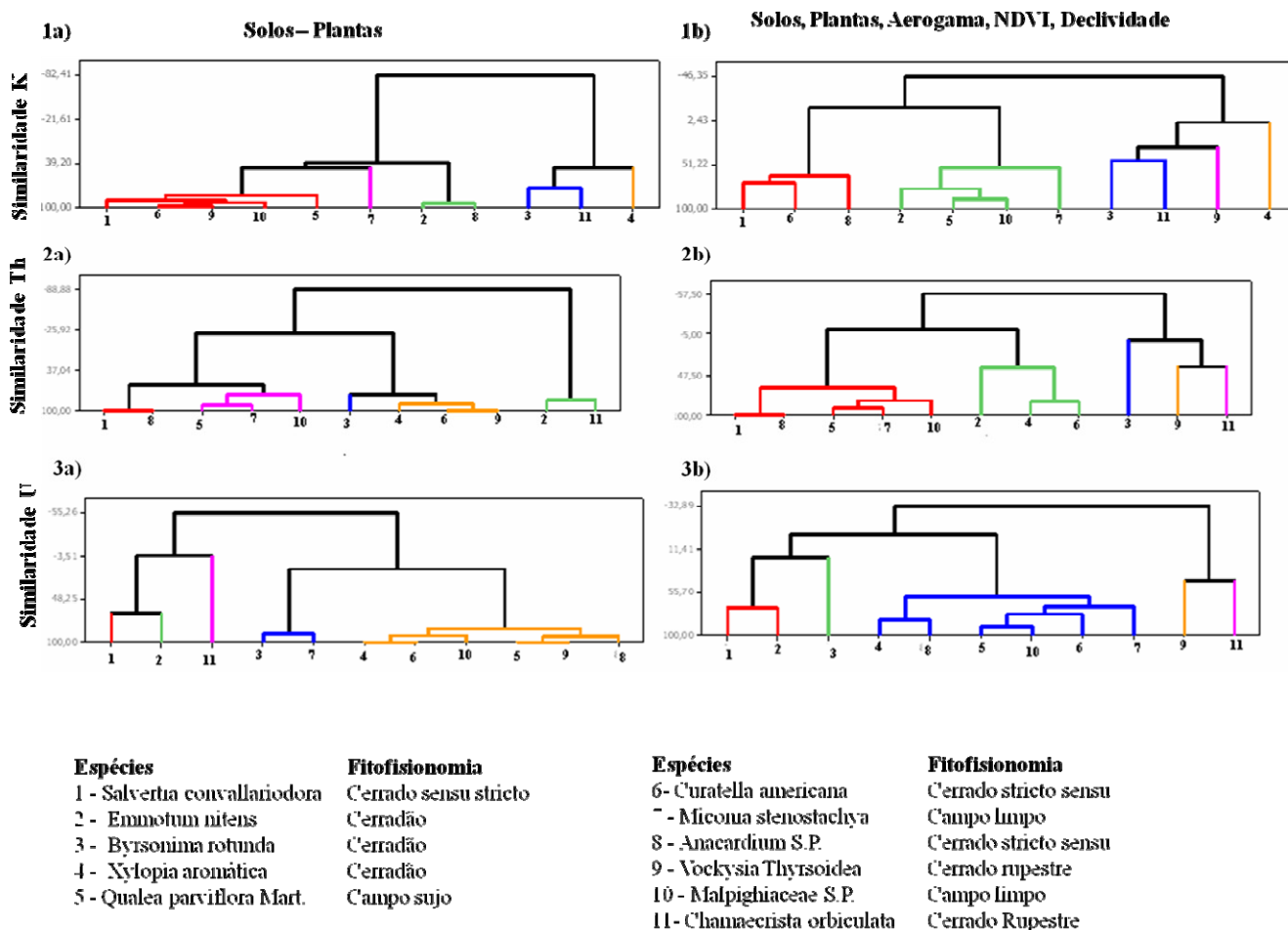


Fig.3 Dendrogramas dos valores de K (1), Th (2) e U (3) para os dados de solo - planta (A) e com os dados remotos (B), aerogamaespectrômetria, NDVI e declividade para as espécies levantadas em campo.

A análise de agrupamento das espécies para todas as variáveis, remotas e químicas (Fig.4), com os radioelementos, K, eTh e eU, demonstrou apenas uma classificação no dendrograma (A), com as espécies *Byrsonima rotunda* e *Xylopia aromática* ambas do cerradão; e no gráfico (B) a mesma fitofisionomia é classificada com as espécies *Emmotum nitens* e *Xylopia aromática*.

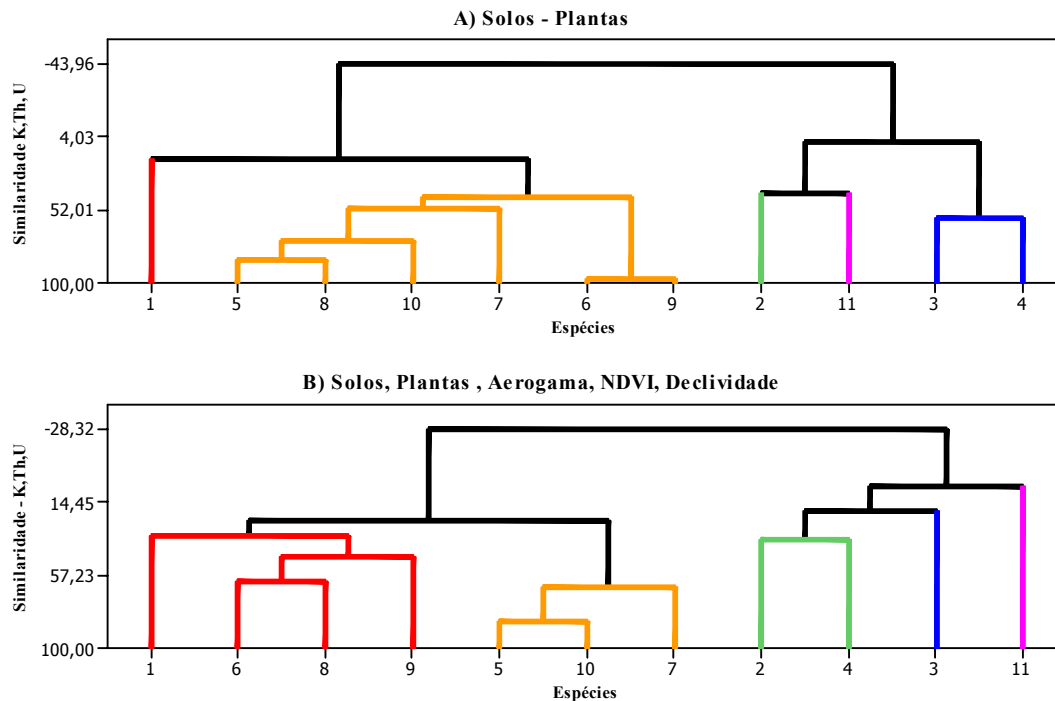


Fig.4 Dendrograma dos valores de K, Th e U para os dados de solo - planta (A) com os dados remotos (B), Aerogamaespectrômetria, NDVI e declividade.

Ao avaliar o agrupamento das variáveis (Fig.5), é possível verificar que, a relação entre os dados de Th e K são mais adequadas para verificar a absorção solos-plantas, como observado no dendrograma com similaridade de 85,21 e 80,99 constituindo grupos mais próximos com as variáveis NDVI e declividade (82,41). Esse comportamento também confirma o distanciamento das variáveis de U para diferenciar as fitofisionomias com os valores de declividade e NDVI.

Estudos têm demonstrado que a dissimilaridade fisionômica e florística entre as coberturas vegetais atribuídas à presença de alteração nas rochas do substrato, mesmo que com parâmetros iguais de altitude, direção e inclinação de encosta e sucessão florística, o componente do substrato pode definir com maior intensidade a diferenciação fisionômica (Miekeley *et al.* 1994; Vargas *et al.* 1997; Almeida *et al.*, 2007).

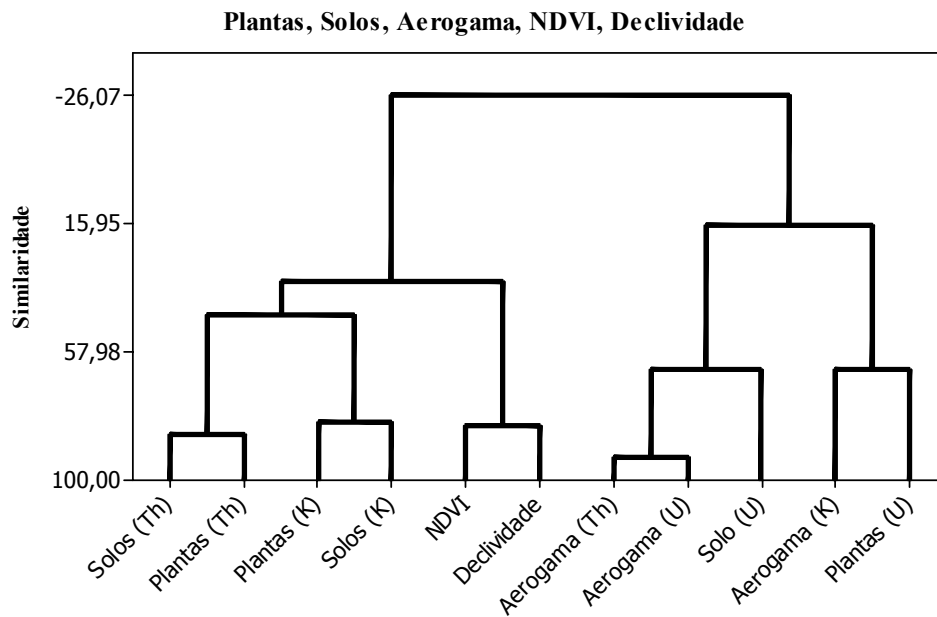


Fig.5 Dendrograma das variáveis solos, plantas, aerogamaespectrômetria, NDVI e declividade referente aos radioelementos K, Th e U.

A diferenciação das fitofisionomias dessa relação entre substrato e vegetação pode ser observada por dados remotos e a análise química nos os gráficos resultantes da análise discriminante multivariada. Os dados referentes ao K (Fig.6a) conseguiram distinguir o Cerrado Rupestre e o Cerrado stricto sensu, mas as fitofisionomias campestres e a fitofisionomia Cerradão constituíram uma mesma classe.

O eTh (Fig.6b) obteve a melhor separação das fitofisionomias, com exceção da fitofisionomia Cerrado stricto sensu, que obteve uma amostra dentro do quadrante pertencente às fitofisionomias campestres. O eU também constituiu boa segregação das fitofisionomias e apresentou comportamento parecido com o eTh, apresentando uma amostra do cerrado stricto sensu anômala, mas segregou as fitofisionomias campo limpo e campo sujo.

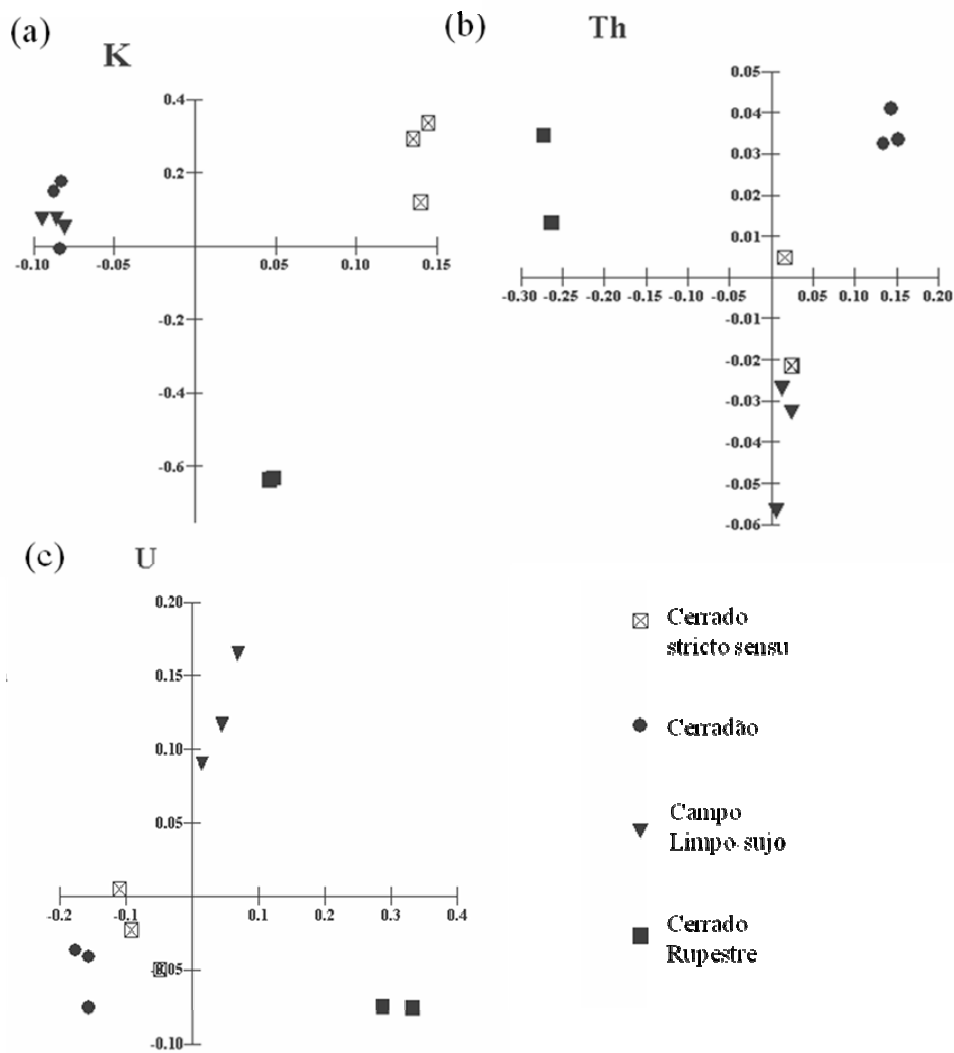


Fig.6 Análise discriminante entre as variáveis

A correlação de Pearson para os elementos benéficos a nutrição (Si e Al) com os dados Aerogamaespectrométricos (Tabela 2), foi maior para o eTh (0,612) com correlação moderada positiva, e valores negativos para o K. Mas nas plantas, a correlação dos radioelementos por análise química, o Si foi maior para o Th (0, 611) e o K (0, 574) e menor valor para o eU (0,088). Quando analisado o Al e os radioelementos nas plantas apenas o U não obteve valor negativo, mas com valor infimo positivo (0,156).

Na figura 7 é possível verificar a assinatura química próxima do Si e Al com os dados da aerogamaespectrométricos, eTh (B) e eU (C), sendo que a espécie que obteve maior diferença entre as variáveis, foi a espécie *Byrsonima rotunda*, que para os dados aerogamaespectrométricos obteve um valor elevado, diferente do apresentado para o Si e o Al que obtiveram os maiores valores com a espécie *Emmotum nitens*.

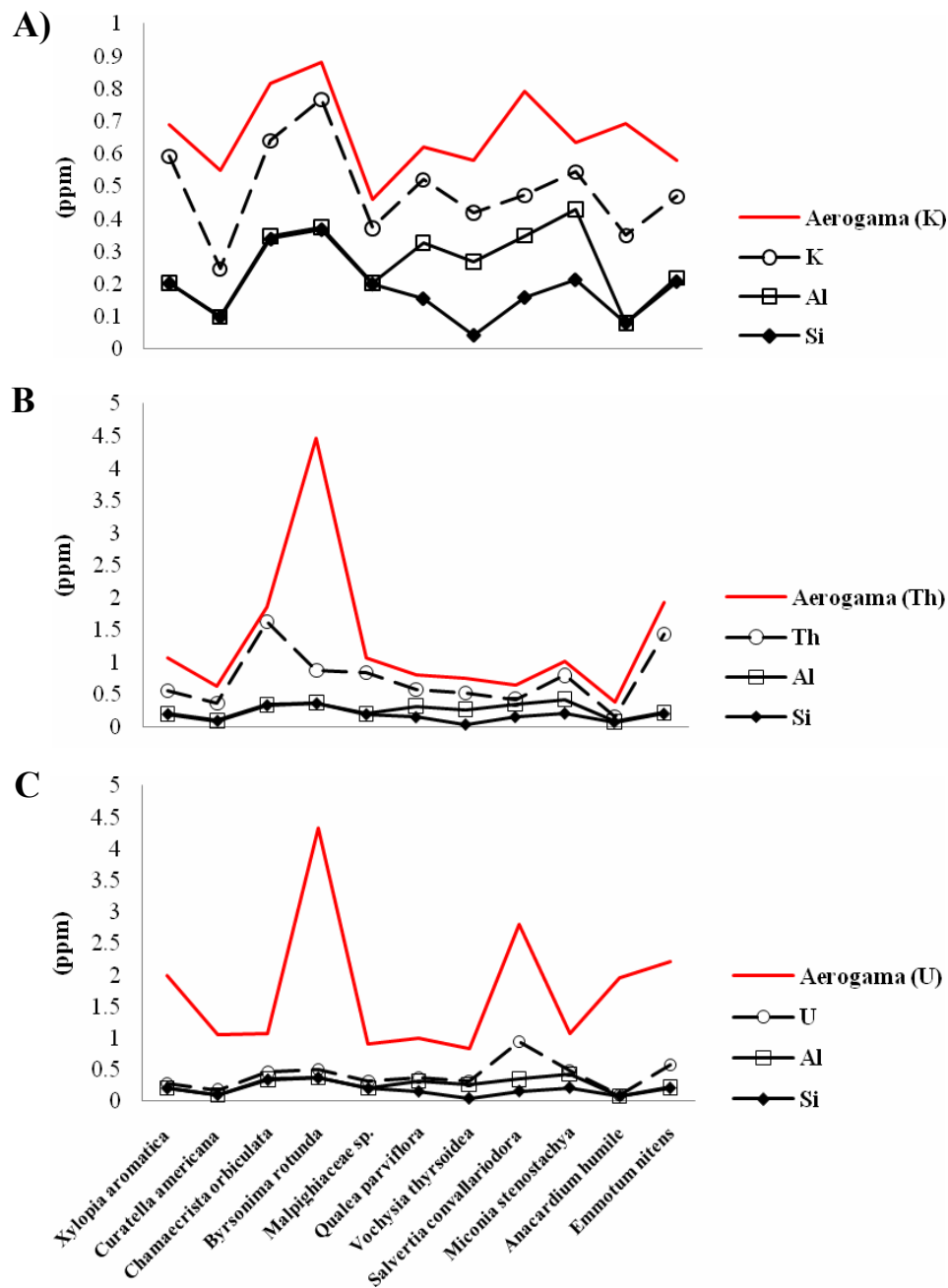


Fig.7 Padrão de distribuição das variáveis: aerogamaespectrometria, elementos benéficos à nutrição (Si, Al) e os radioelementos K (A), eTh (B) e eU (C) nas plantas. As espécies foram ordenadas seguindo a ordem filogenética definida pelo APG III (Haston et al. 2009).

O Si e o Al constituem elementos passíveis de absorção, no trabalho de Vasconcelos *et al.*, (2011) ao analisarem *Pinus caribaea* em solos do Cerrado não encontraram obstrução ou qualquer presença de corpos sílico-aluminosos nos tecidos condutores das partes das plantas

constatando a presença de Si e Al nos tecidos do xilema e do floema, tanto na parte aérea quanto nas raízes.

Scott e Dickson (1990) verificaram que as concentrações médias dos radioelementos aumentam com um aumento de sílica (SiO<sub>2</sub>). Para o tório e o urânio a elevada carga e raio do Th<sup>4+</sup> e íon de U<sup>4+</sup>, os exclui nas substituições de íons maiores na cristalização de sais minerais que formam as rochas. Albering *et al.*, (1994) demonstram as relações destes elementos e de sua proximidade química investigando vários sistemas ternários de transição do tório-metal e o silício.

Esses radioelementos são, portanto, acomodados em minerais acessórios, como o zircão, allanita e monazita. O potássio é também altamente incompatível durante a cristalização do magma (Scott e Dickson, 1990).

O comportamento entre os radioelementos (eTh e eU) e o Si justifica a maior proximidade na assinatura dos dados aerogamaespectrométricos e o Si encontrado nas espécies analisadas.

Os gráficos da relação entre os macronutrientes (Mg,Ca) e os radioelementos nas espécies com a variável aerogamaespectrometria demonstrou que a assinatura química desses dados é mais próxima do eTh e do K, o que não ocorreu com o U. Mas observa-se que para as variáveis relacionadas ao K, as espécies *Curatella americana* e *Miconia stenostachya*, ocorreram valores contrários aos da variável aerogamaespectrometria, e a espécie *Chamaecrista orbiculata*, o valor de Ca foi também contrário ao do dado aerogamaespectrométrico. Para as variáveis relacionadas ao eTh apenas a espécie *Byrsonima rotunda* não acompanhou a assinatura química do Mg e do Ca, mas fica evidente a proximidade dos macronutrientes com o eTh. As correlações com esse radioelemento nas plantas para os dados aerogamaespectrométricos foram maiores, para o Mg (0,534/0,769) .

Os macronutrientes encontram-se mais disponíveis em pH mais elevado, ou seja, em solos mais ácidos (Oliveira *et al*, 2005). Esse comportamento químico constitui um ambiente favorável para a absorção do eTh pelas plantas que em soluções ácidas, seus íons podem ser absorvidos e que de acordo com Stangeeva *et al.*, (2005), o eTh pode interferir na absorção dos macronutrientes. Daí a explicação para a assinatura similar do eTh com os macronutrientes Mg e o Ca. Inicialmente pesquisas sobre a acidez do solo nas regiões tropicais foram desenvolvidas para entender os fatores que foram prejudiciais ao crescimento das plantas, mas estudos desenvolvidos na segunda metade do século XX demonstram, por

exemplo, que em solução do solo, o  $\text{Ca}^{2+}$  é adequado para o crescimento das plantas, mesmo em solos mais ácidos (Brenes & Pearson, 1973 apud Lathwell & Grove, 1986).

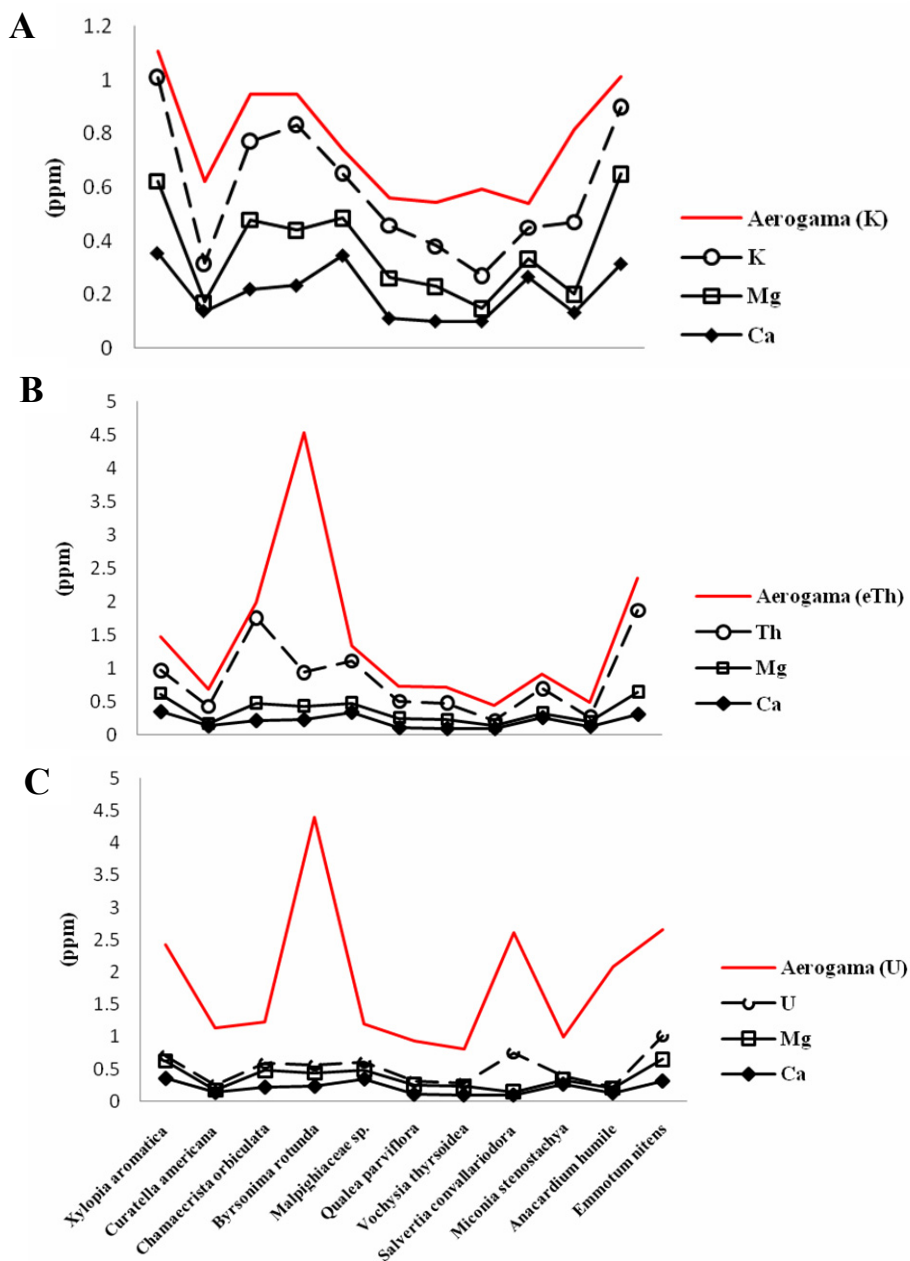


Fig.8 Padrão de distribuição das variáveis: aerogamaespectrometria, macronutrientes (Mg,Ca) e radioelementos K (A),eTh (B) e eU (C) nas plantas. As espécies foram ordenadas seguindo a ordem filogenética definida pelo APG III (Haston et al. 2009).

Os micronutrientes também demonstraram possuir boa correlação com o eTh apresentando correlações fortes com o Fe (0,875) e o Ni (0,848). A assinatura química dos

micronutrientes ficou muito próxima da variável aerogamaespectrometria e, novamente, a espécie *Byrsonima rotunda* obteve valor anômalo em relação às outras espécies. A forte correlação entre o eTh e o Fe condiz com o trabalho de Perez *et al.* (1998) que determinaram os teores totais dos elementos, urânio e tório de algumas amostras de solos e correlacionaram, entre outros parâmetros, o micronutriente Fe, onde obtiveram valores positivos para o mesmo.

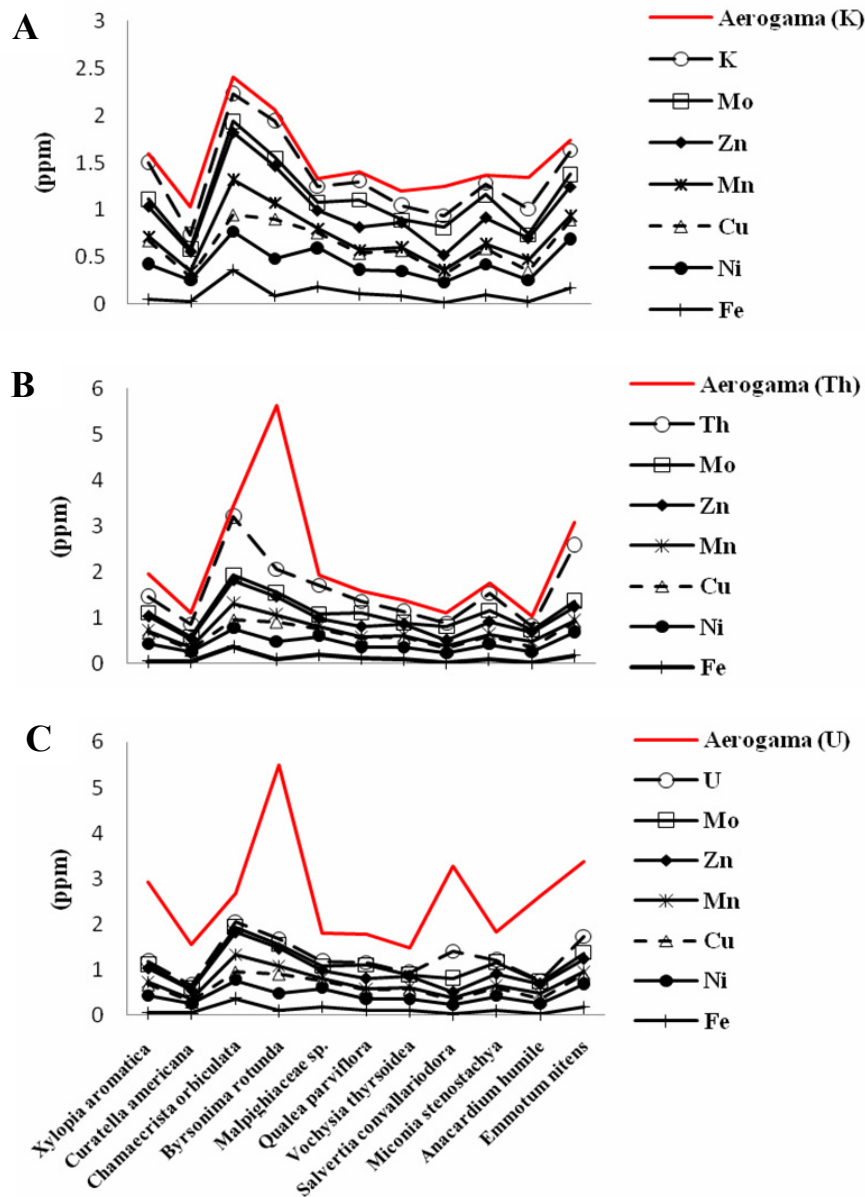


Fig.9 Padrão de distribuição das variáveis: aerogamaespectrometria, micronutrientes (Mo,Zn,Mn,Cu,Ni,Fe) e radioelementos K (A), eTh (B) e eU (C) nas plantas. As espécies foram ordenadas seguindo a ordem filogenética definida pelo APG III (Haston et al. 2009).



O resultado da análise de dados multivariados demonstrou que a Análise de agrupamentos identificou as fitofisionomias Cerrado stricto sensu e Cerrado Rupestre, sendo que o melhor ajustamento dos dados foi com a Análise discriminante, sendo perceptível a diferenciação das fitofisionomias Cerrado stricto sensu, Cerradão, Cerrado Rupestre e Campo Limpo/Sujo. Ambas as análises indicaram que os canais de eTh e K discriminaram essas fitofisionomias, o mapa potencial de fitofisionomias definido com a imagem aerogamaespectrométrica eTh/K demonstrou essa capacidade (Fig.10).

Tabela 2- Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre os teores K, Th e U e os teores dos macrossolutores, microsolutores e elementos benéficos à nutrição por levantamentos de dados Aerogamaespectrométricos, ICP-MS e EAA.

	Si	Al	Ca	Mg	Fe	Ni	Cu	Mn	Zn	Mo
<b>K (EAA)</b>	<b>0.574</b>	-	0.416	<b>0.76</b>	0.166	0.464	<b>0.685</b>	0.436	<b>0.66</b>	-
		0.645		<b>9</b>						0.358
<b>Th (ICP-MS)</b>	<b>0.611</b>	-	<b>0.534</b>	0.04	<b>0.875</b>	<b>0.848</b>	0.256	<b>0.541</b>	<b>0.691</b>	-
		0.427		<b>6</b>						0.095
<b>U (ICP-MS)</b>	0.088	0.156	-	<b>0.67</b>	-	0.083	-	-	-	0.465
			0.069	<b>4</b>	0.088		0.157	0.154	0.251	
<b>K (Aerogama)</b>	-	-0.46	-	-	-	-	-0.63	0.096	-	-
<b>Th (Aerogama)</b>	0.061		0.654	0.59	0.405	0.681			0.385	0.147
<b>U (Aerogama)</b>	-	<b>0.612</b>	0.141	0.24	-	0.28	<b>0.829</b>	0.212	0.407	-
	0.277			<b>6</b>	0.085					0.162
<b>K (Aerogama)</b>	-	0.44	0.093	0.20	-	0.169	<b>0.61</b>	0.11	0.205	-
	0.363			<b>8</b>	0.323					0.124

\* Os valores em destaque possuem correlação de moderada positivo ( $0,5 \leq r < 0,8$ ) a forte positivo ( $0,8 \leq r < 1$ ).

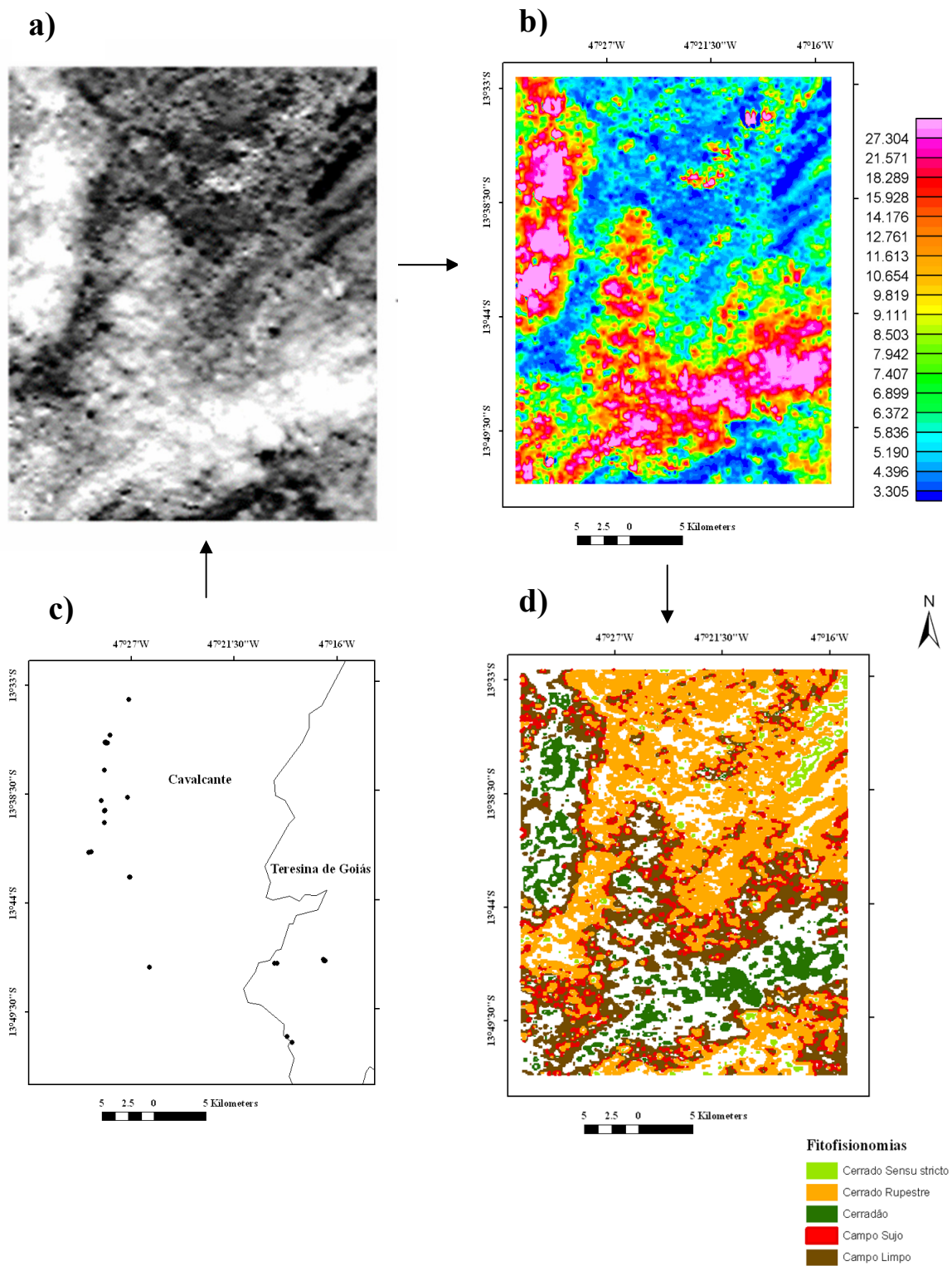


Fig.11 (a) Imagem aerogamaespectrométrica da razão  $eTh/K$ , (b) Mapa com os teores da razão  $eTh/K$ , (c) área de caminhamento de campo e identificação fitofisionômica e (d) Mapa potencial de fitofisionomias do Cerrado.

#### 4. Conclusões

A integração dos dados remotos e de laboratório apresentou capacidade de diferenciar os tipos fitofisionômicos estudados. Entre as espécies analisadas foram verificadas divergências entre as variáveis para os valores de, K, eTh e eU, isso se deve a relatividade da absorção dos radioelementos de cada espécie e seu comportamento individual com a radiação eletromagnética, e os dados gamaespectrométricos. Mas foi possível verificar que dentre os radioelementos, o eTh demonstrou possuir melhor potencial de classificação fitofisionômica. A assinatura do eTh para os dados de NDVI, aerogamaespectrometria e os valores de solos e plantas constituíram assinatura similar nos gráficos para a maioria das espécies.

Constatou-se que na análise de agrupamentos, o eTh e o K constituem características para diferenciar as fitofisionomias, considerando as variáveis abordadas. Ao juntar essas variáveis referentes aos radioelementos K, eTh e eU em um único dendrograma, apenas a fitofisionomia cerradão foi classificada demonstrando que a junção com os dados de U não apresentam bons resultados.

O eTh e o K apresentaram correlação positiva de absorção nas plantas pelo solo, o que não ocorreu com o eU, apresentando correlação negativa na maioria das espécies. O mesmo fenômeno pode ser verificado por Análise de Agrupamentos, em que as variáveis Solo e Planta estão próximos quanto a similaridade de absorção do eTh e K para as espécies.

Mesmo com escalas de análise diferentes, o comportamento de absorção dos elementos pelas plantas e a disponibilidade dos radioelementos nos solos pode ser identificado e balizar as hipóteses sobre disponibilidade e absorção de radioelementos pelas plantas e sua relação com a vegetação. Foi identificado que o eTh possui boa correlação com alguns elementos essenciais à nutrição, o que justifica sua proximidade com os valores de NDVI, assim como o K.

Os dados referentes aos solos, plantas e os dados remotos associados, não demonstraram bons resultados para a separação de todas as espécies coletadas e sua correspondência fitofisionômica, esse fato é explicado pela variação de absorção que possui cada espécie analisada, o que dificulta estabelecer um padrão fixo de absorção para diferenciação fisionômica, mas verifica-se uma proximidade entre as variáveis eTh e K, o que justificou a aplicação de uma classificação supervisionada das fitofisionomias com a imagem aerogamaespectrométrica resultante da razão entre esses dois canais (eTh/K). O produto dessa

classificação foi um mapeamento de áreas potenciais das fitofisionomias Cerradão, Cerrado sensu stricto, Cerrado Rupestre, Campo Limpo e Campo Sujo que condiz com a campanha de campo.

## 5. Referências

Akçay, M., Lermi, A., & Van, A. (1998). Biogeochemical exploration for massive sulphide deposits in areas of dense vegetation: an orientation survey around the Kanköy Deposit (Trabzon, northeastern. *Journal of Geochemical Exploration*, 63(3).

Akçay, M., Lermi, A., & Van, A. (1998). Biogeochemical exploration for massive sulphide deposits in areas of dense vegetation: an orientation survey around the Kanköy Deposit (Trabzon, northeastern. *Journal of Geochemical Exploration*, 63(3).

Albering, J. H., Rainer, P., Wolfgang, J., Bernard, C., & Jean, E. (1994). On the order and disorder of the transition metal ( T ) and silicon atoms in ternary thorium transition metal silicides of the compositions and, 206, 133–139.

Almeida, Isnard, T., Juliani, C., Mantovani, W., & Pérez-Aguilar, A. (2007). Comunidades florestais como indicadores geobotânicos: o caso da mineralização aurífera do Grupo Serra do Itaberaba , Guarulhos , São, 37(1), 37–49.

Araújo, J. F. D. E., & Haridasan, M. (2007). Relação entre deciduidade e concentrações foliares de nutrientes em espécies lenhosas do cerrado, 1, 533–542.

Bezerra, H.S., E.E. Sano, and L.G., Ferreira. 2007. Desempenho do satélite sino-brasileiro de recursos terrestres CBERS-2 no mapeamento da cobertura da terra no Distrito Federal, Brasil [Performance of the Sino-Brazilian satellite of earth resources CBERS-2 in the mapping of ground coverage at Federal District, Brazil]. *Revista Brasileira de Geofísica* 25:171-185.

Dean. M.H. (1966). A Survey of the Uranium Content of Vegetation in Great Britain. *Journal of Ecology*, V. 54, n. 3, pp. 589-595.

Cunha, M. (2010). Absorção e fracionamento dos elementos terras raras por vegetais: estudo comparativo em plantas ocorrentes em diferentes contextos geológicos. *Geologia USP. Séries*, 53–59.

Dickson, & Scott. (1997). Interpretation of aerial gamma-ray surveys-adding the geochemical factors. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17, 187–200.

Eiten, G. (1990). Vegetação do Cerrado. In: Novaes P. (ORG.), M. *Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas*. Brasília: Editora UnB e SEMATEC, p. 17- 72.

Ferreira, L. G., Ferreira, N. C., & Lobo, F. C. (2007). Base de dados espaciais para o monitoramento biofísico-ambiental do bioma Cerrado Universidade Federal de Goiás

Instituto de Estudos Sócio-Ambientais – IESA Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento - LAPIG, 5219–5224.

Ferreira, L. G., Yoshioka, H., Huete, A., & Sano, E. E. (2003). Seasonal landscape and spectral vegetation index dynamics in the Brazilian Cerrado: An analysis within the Large-Scale ^ nia ( LBA ) Biosphere – Atmosphere Experiment in Amazo, 87, 534–550.

Furley, P. A. (1999). The nature and diversity of neotropical savana vegetation with particular reference to the Brazilian Cerrados. *Global Ecology and Biogeography*, 8, 223-241.

Gomes, J. B. V., Curi, N., Motta, P. E. F., Ker, J. C., Marques, J. J. G. S. M. & Schulze, D. G. (2004). SEÇÃO V - Gênese , morfologia e classificação do solo e mineralógicos de solos, 28(6), 137–153.

Haridassan, M. (2000) . Nutrição mineral de plantas nativas do cerrado. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, I, n. 12, 54-64.

Haridassan, M. (2006). Alumínio é um elemento tóxico para plantas nativas do cerrado? In Prado, CHBA; Casali, CA. *Fisiologia Vegetal: Práticas em relações hídricas, fotossíntese e nutrição mineral*. Barueri, editora Manole.

Haston, E.; Richardson, J. E.; Stevens, P. F.; Chase, M. W.; Harris, J. D. (2009). The Linear Angiosperm Phylogeny Group (LAPG) III: a linear sequence of the families in APG IIIboj\_1000 12. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 161, 128–131.

Hewamanna, R., & Botany, E. (1987). Gammaactivity of plants from monaz ite-bearing soils of the west coast of Sri Lanka, 27(4), 449–454. International atomic energy agency. (2003). *Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data* (p. 173). Vienna.

Kerbaui, G. B. (2008). *Fisiologia Vegetal*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan.

Landim, P. M. B. (2011) *Análise de dados geológicos multivariados*. São Paulo: Oficina de Textos.

Lima e Cunha, M. C., Pereira, V. P., Menegotto, E., Bastos Neto, a. C., Oliveira, L. D., & Formoso, M. L. L. (2007). Biogeochemical behavior of *Ampelozizyphus amazonicus* Ducke in the Pitinga mining district, Amazon, Brazil. *Environmental Geology*, 55(6), 1355–1362.

Mello, M. M. P. D.; Prado, B. R. do; Silva, G. B. S. da; Shimabukuro, Y. E.; Sano, E. E. (2009). *Comportamento espectral de fitofisionomias do Cerrado e desenvolvimento de índices utilizando bandas sintéticas derivadas de Modelos Lineares de Mistura Espectral aplicados na discriminação de fitofisionomias*. In: Simpósio de sensoriamento remoto, XIV. Natal: INPE, Anais, p. 25-30.

Munson, R. D. (1998). Principles of Plant Analysis. In: KALRA P. YASH, editor. *Handbook of Reference Methods for Plant Analysis*, New York: Taylor & Francis Group; p. 01-24.

Perez, D. V. S.; Moreira J. C.; V. D. S. (1998). Concentração total de urânio e tório em alguns solos brasileiros. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 33, 1417–1423.

Ribeiro, J. F.; Walter, B. M. T. (2008). As Principais Fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: Sano, S. M.; Almeida, S. P. D.; Ribeiro, J. F. *Cerrado: Ecologia e Flora*. Brasília: Embrapa, p. 156-212.

Rizzini, C. T. (1979). *Tratado de Fitogeografia do Brasil*. 2. ed. São Paulo: Hucitec, v. 1.

Rodrigues, R. F.; Araújo, G. M. De. (2013). Estrutura da vegetação e características edáficas de um cerradão em solo distrófico e em solo mesotrófico no Triângulo Mineiro vegetation structure and soil characteristics of a dystrophic and a mesotrophic cerradão in the triângulo mineiro. *Biosci. J*, 2013–2029.

Sano, E. E., Rosa, R., Brito, J. L. S., & Ferreira, L. G. (2010). Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 166(1-4), 113–24.

Santos, A.C.L.D.; Menezes, P. de T.; Nascimento, C.T.C.do. (2008). Gamaespectrometria aplicada em solo agrícola no nordeste do Estado do Rio de Janeiro. *Rev. Bras. Geof.*, v. 26, 181-194.

Shtangeeva, I., Lin, X., Tuerler, A., Rudneva, E., Surin, V., & Henkelmann, R. (2006). Thorium and uranium uptake and bioaccumulation by wheat-grass and plantain, 190, 181–190.

Shtangeeva, I., Ayrault S., Jain, J. (2005). Thorium uptake by wheat at different stages of plant growth. *Journal of Environmental Radioactivity*, 81, 283–293.

Silva, M. F. F. (1992). Distribuição de metais pesados na vegetação. *Acta Boto Bras.*, 6(Xlii), 107–122.

Skorupa, A. A. L., Guilherme, L. R. G., Curi, N., Silva, C. P. D. C., Scolfor, S. J. R., & Marques, J. J. G. de S. e M. 2012. Propriedades de Solos sob Vegetação Nativa em Minas Gerais: Distribuição por Fitofisionomia, hidrografia e variabilidade espacial, (3), 11–22.

Vasconcelos, L. P.; Correa, G., F.; Coelho, L. (2011). Investigation of possible silicon-aluminium obstructions in the vascular bundle in *Pinus caribaea* var. *Hondurensis* related to. *Revista Árvore*, 35(3), 627–632.

Wilford, J. R., P. N. Bierwirth, and M. A. Craig. (1997). Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology. *Journal of Australian Geology and Geophysics*. 17 (2): 201-216.

Zar, J.H. 2010. *Biostatistical Analysis*. New Jersey: Pearson Education Ltda.

---

## 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de dados gamaespectrométricos para investigação de fenômenos associados à vegetação como, diferenciação fisionômica e características da biomassa foi comprovado a partir da integração de informações aerogamaespectrométricos, de medidas obtidas por gamaespectrômetros portáteis, imagens de satélite e de geoquímica.

A análise dos dados aerogamaespectrométricos pode indicar o comportamento do regolito ao se observar a distribuição das concentrações de K,  $eTh$  e  $eU$ . O movimento no regolito é acompanhado por componentes que formam a paisagem, na qual a vegetação se insere. Os processos de acomodação geológica e geomorfológica nas paisagens são fatores que promovem a redistribuição dos radioelementos no solo oriundos das rochas. Processos como, o intemperismo físico/químico, assim como a lixiviação entalham diferentes formas de relevo e esse material se acomoda na paisagem redistribuindo elementos presentes no solo e que contribuem para a ocupação da vegetação e de diferentes formas fitofisionômicas.

A integração de das informações de índices de vegetação e de dados aerogamaespectrométricos apresentaram proximidades quanto à diferenciação da biomassa. E os canais do tório e potássio indicaram que o resultado de sua razão potencializa a investigação e o mapeamento de fitofisionomias do Cerrado. A correlação de absorção entre as espécies do Cerrado analisadas apresentou uma assinatura muito próxima entre Th e K, onde o Th se comporta como alguns elementos essenciais à nutrição, justificando sua proximidade com o K. Isto indica a resposta positiva para a diferenciação de fitofisionomias a partir do uso de diferentes índices de vegetação com os dados aerogamaespectrométricos que caracterizam a biomassa, pois a determinação da diferenciação de biomassa é a condição nutricional da vegetação.

A potencialidade de uso dos dados aerogamaespectrométricos para caracterização da vegetação, a partir da distribuição dos radioelementos do solo, também constitui ferramenta para estudos de diferenciação de áreas com vegetação em solos mesotróficos e distróficos.

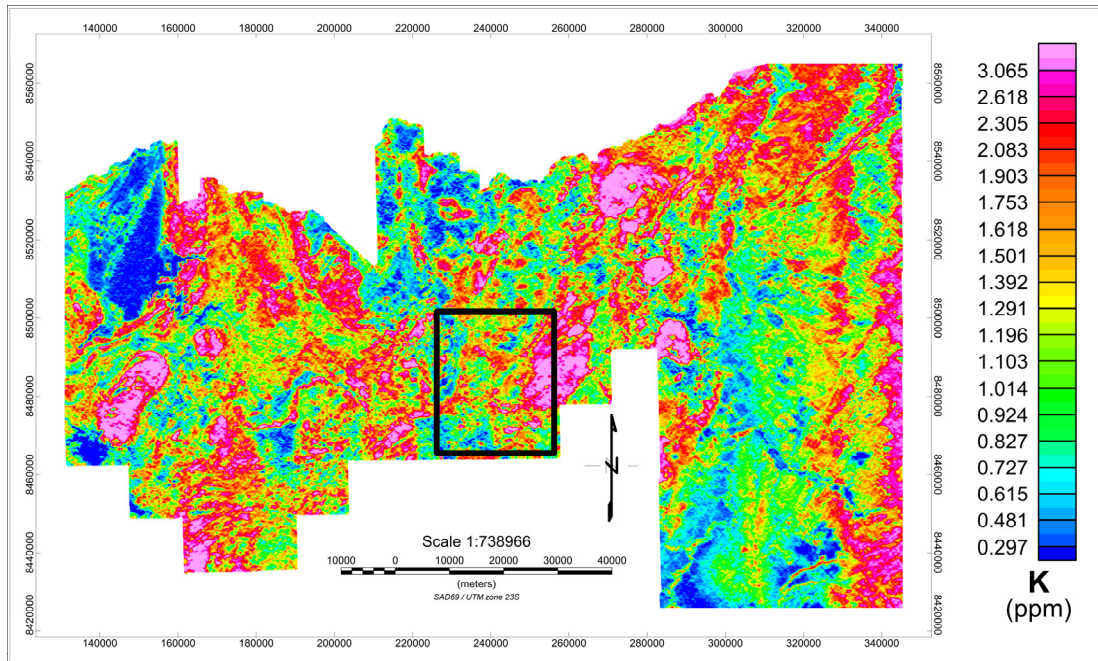
Na pesquisa foram definidas cinco fitofisionomias do bioma Cerrado que constituem características de formações vegetais distintas, podendo tal metodologia ser aplicada na investigação de outras fitofisionomias e outros biomas, para verificar padrões que caracterizem outras paisagens e promover avanços para a continuidade desse tema. A

diversidade dos biomas do Brasil e o extenso território para exploração mineral abrem perspectivas na utilização dos dados aerogamaespectrométricos não apenas para a diferenciação fisionômica e o mapeamento da vegetação, mas será importante na caracterização geobotânica e geoquímica que podem auxiliar em estudos nas áreas de exploração mineral e meio ambiente.

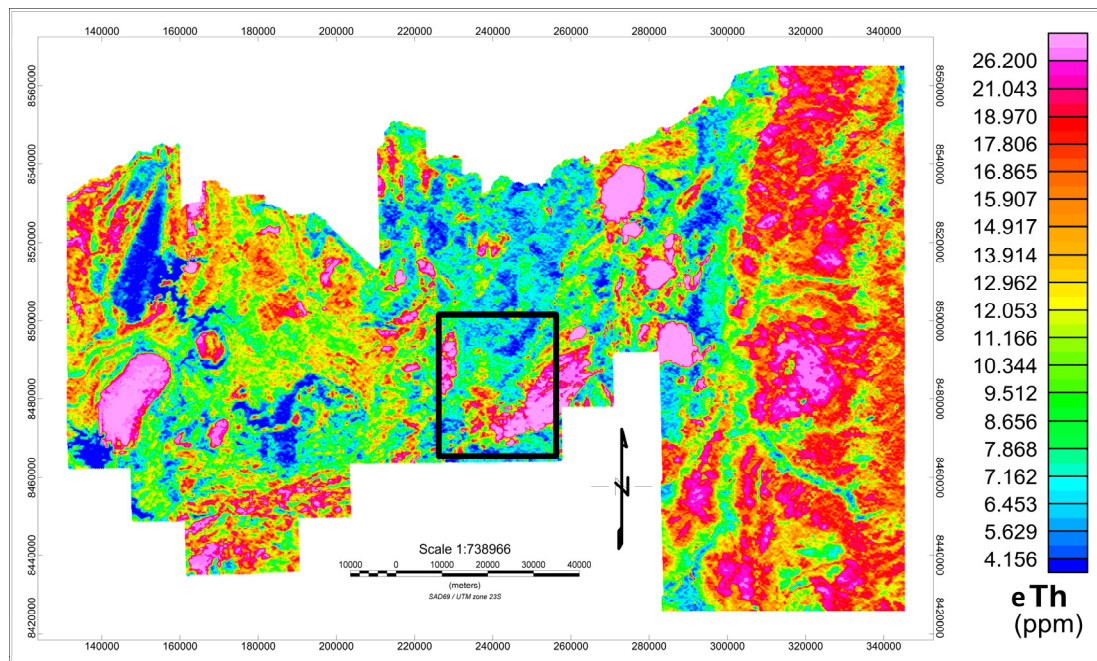


## 9. APÊNDICES

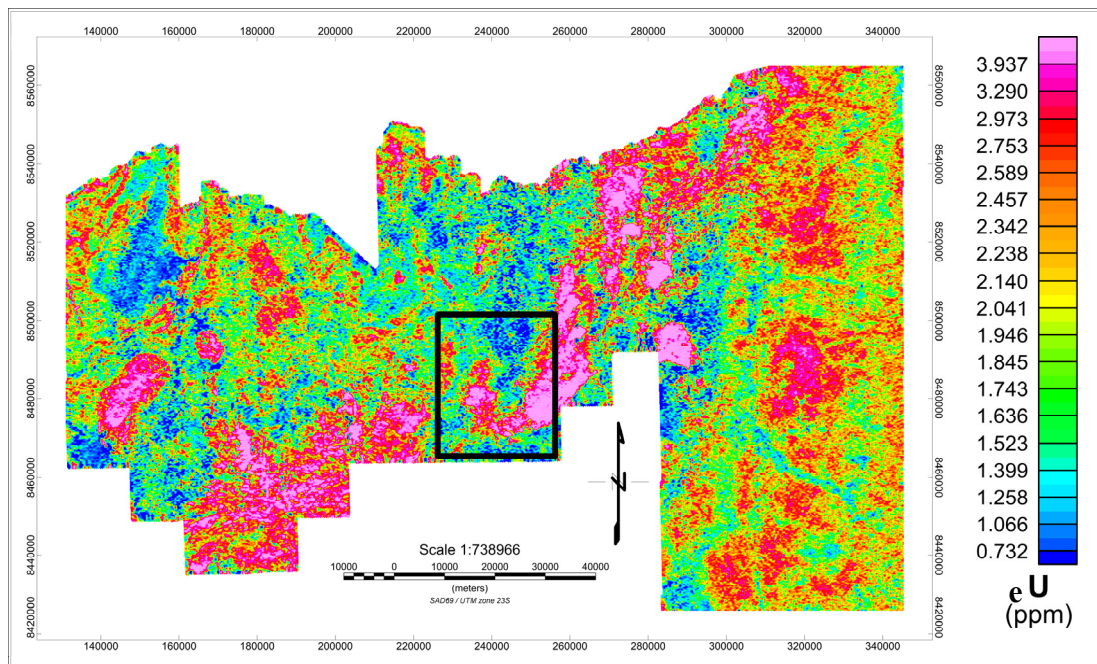
### APÊNDICE A



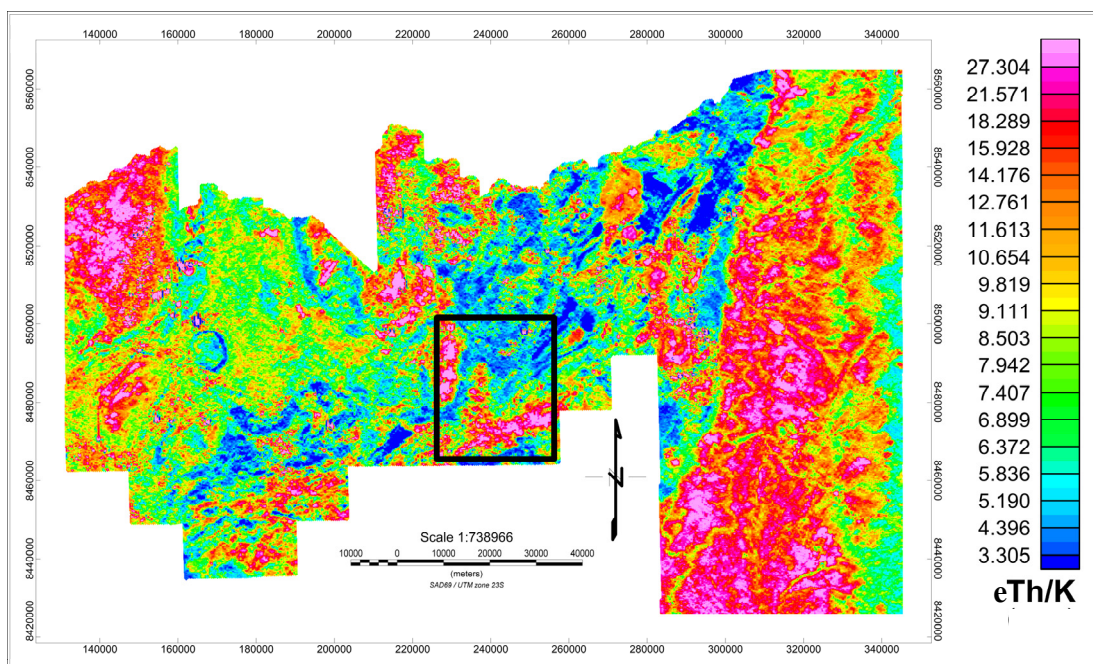
A1. Área do levantamento aerogamaespectrométrico Paleo-Neoproterozóico do Nordeste de Goiás, canal K com destaque da área definida para pesquisa.



A2. Área do levantamento aerogamaespectrométrico Paleo-Neoproterozóico do Nordeste de Goiás, canal eTh com destaque da área definida para pesquisa.

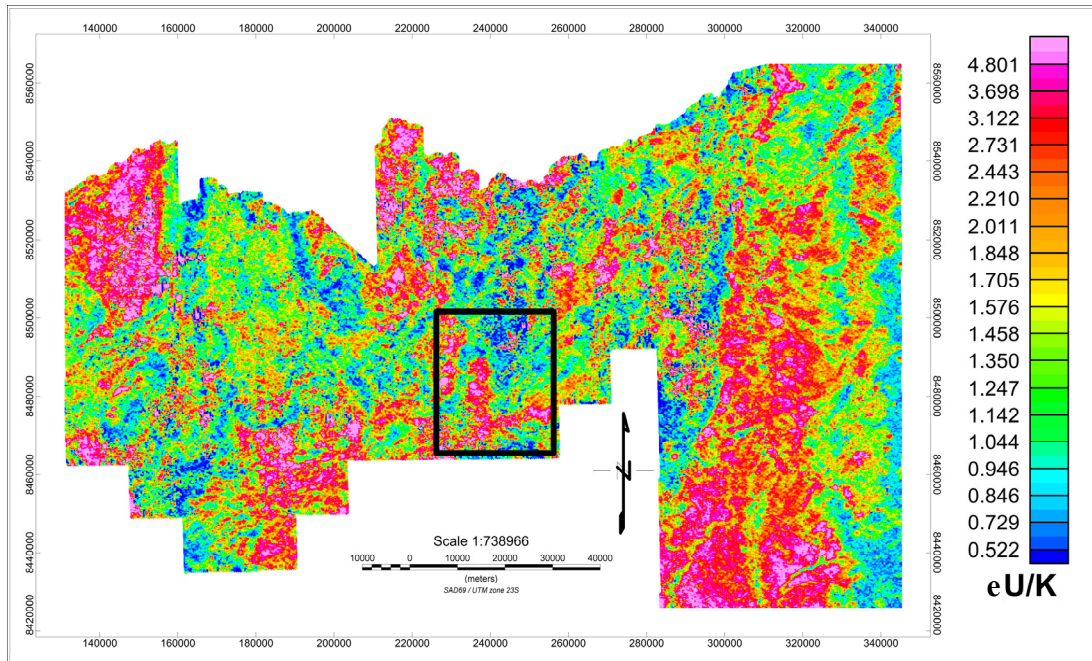


**A3.** Área do levantamento aerogamaespectrométrico Paleoproterozoico do Nordeste de Goiás, canal eU com destaque da área definida para pesquisa.

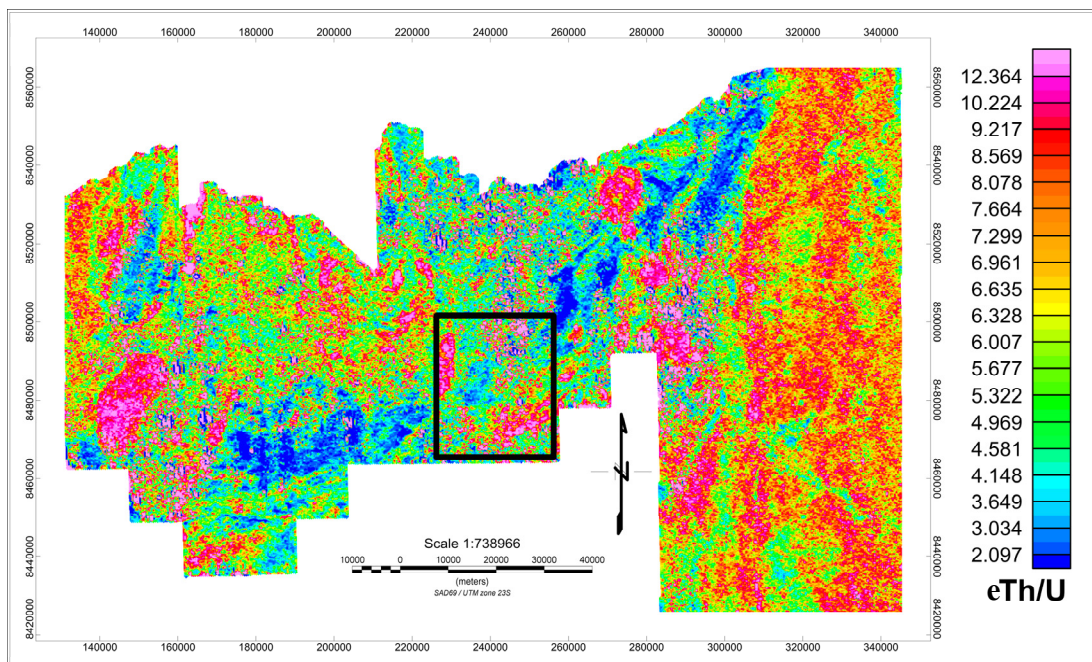


**A4.** Área do levantamento aerogamaespectrométrico Paleoproterozoico do Nordeste de Goiás da razão eTh/K com destaque da área definida para pesquisa.



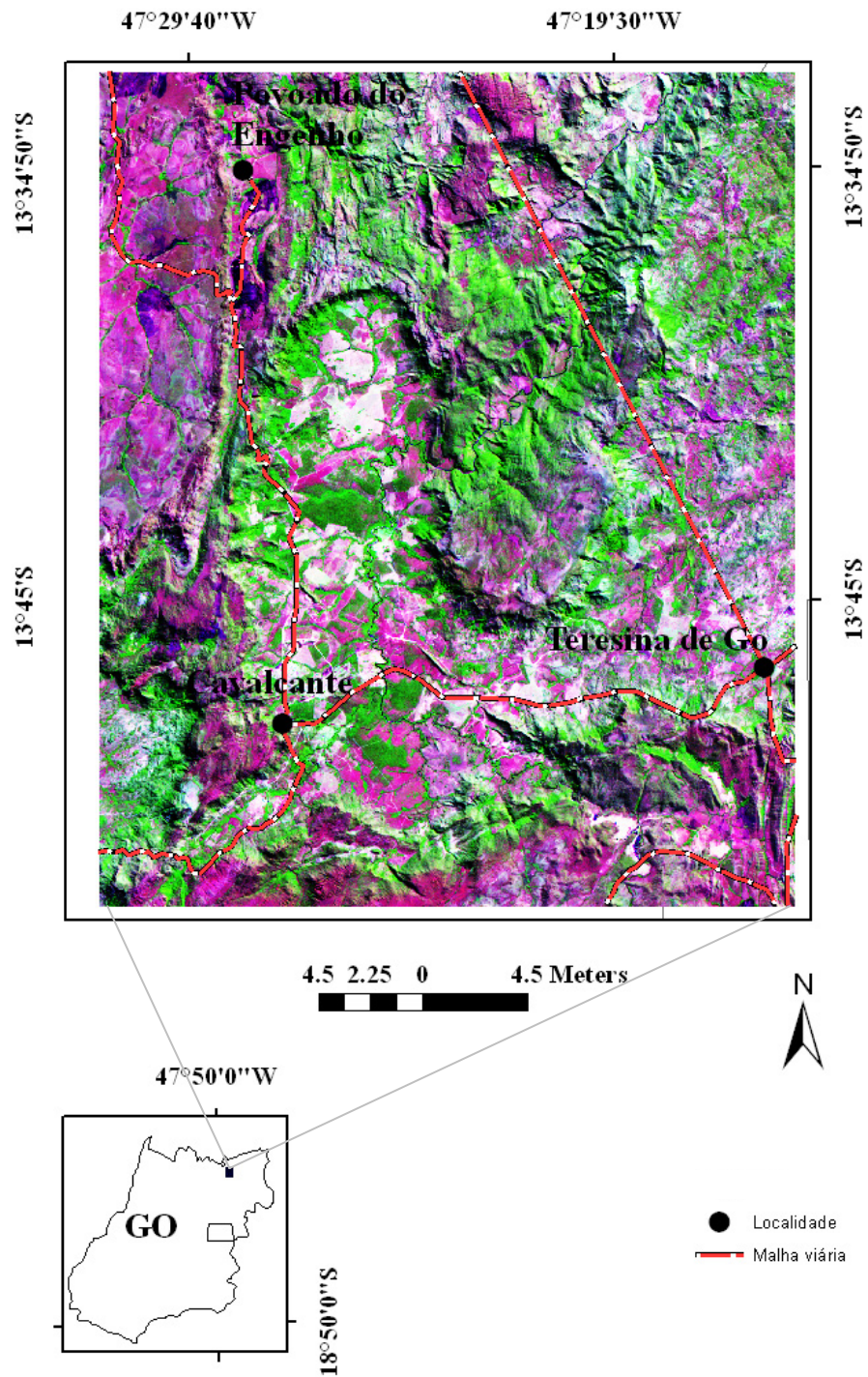


A5. Área do levantamento aerogamaespectrométrico Paleo-Neoproterozóico do Nordeste de Goiás da razão eU/K com destaque da área definida para pesquisa.



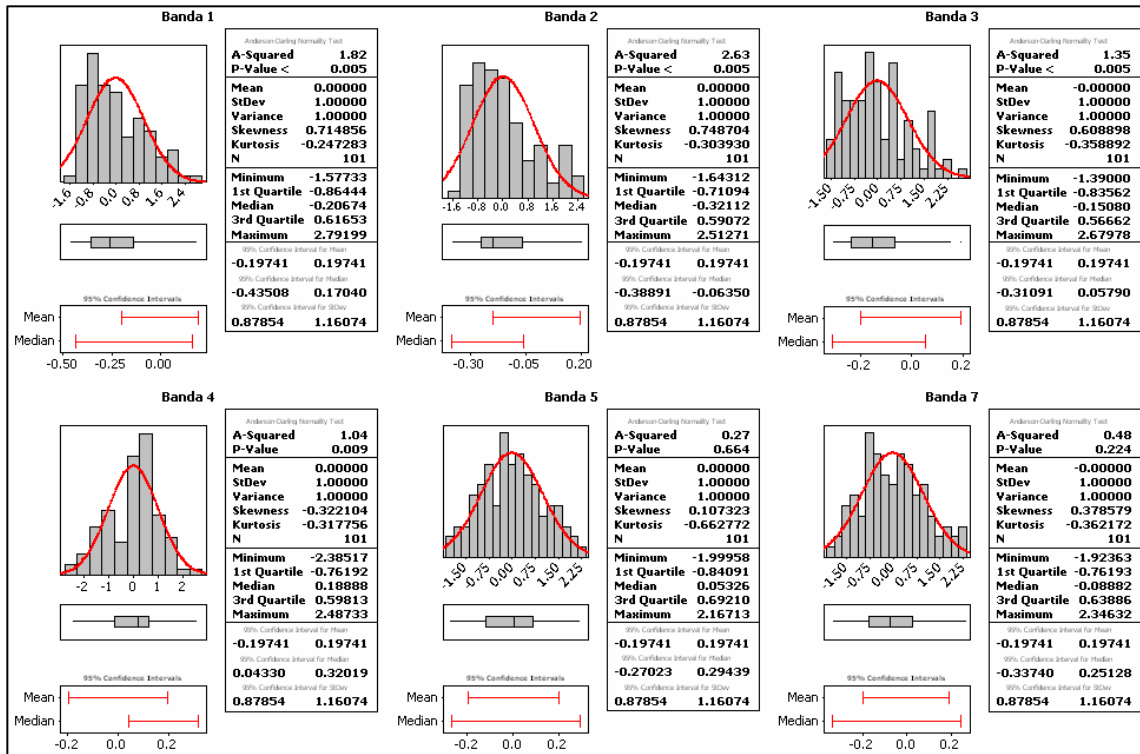
A6. Área do levantamento aerogamaespectrométrico Paleo-Neoproterozóico do Nordeste de Goiás, eTh/U com destaque da área definida para pesquisa.

## APÊNDICE B



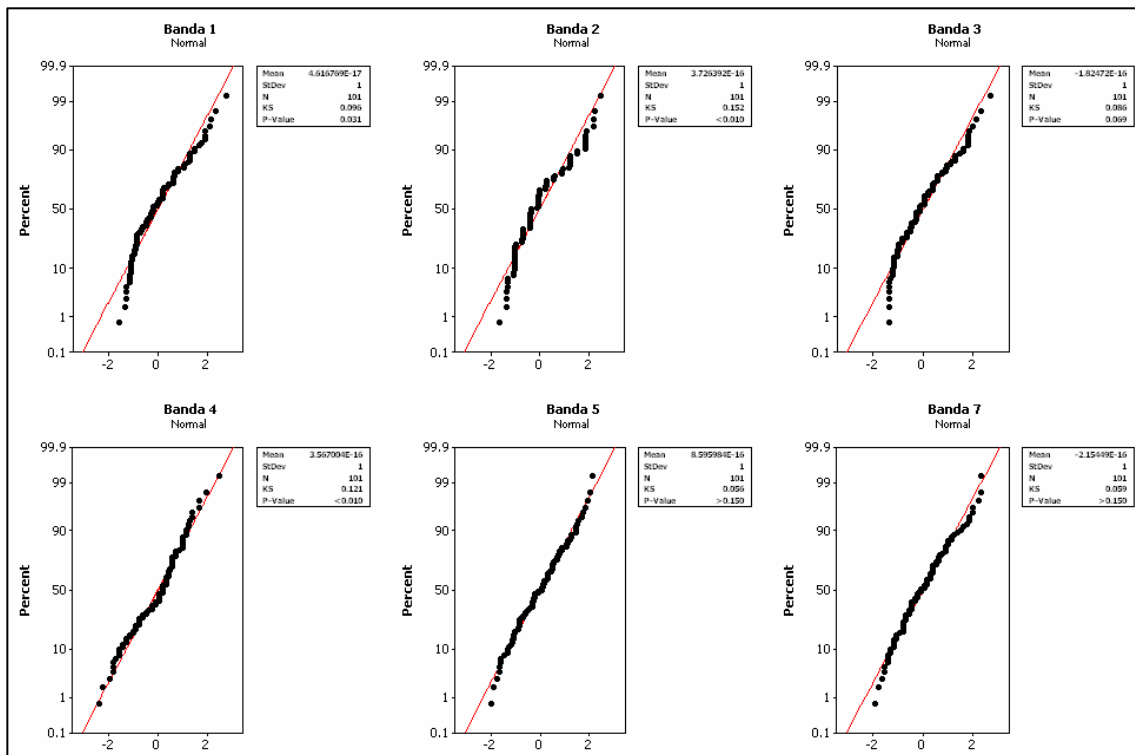
**B1.** Imagem TM Landsat-5 (RGB/b5,b4,b3) da área de estudo.

## APÊNDICE C

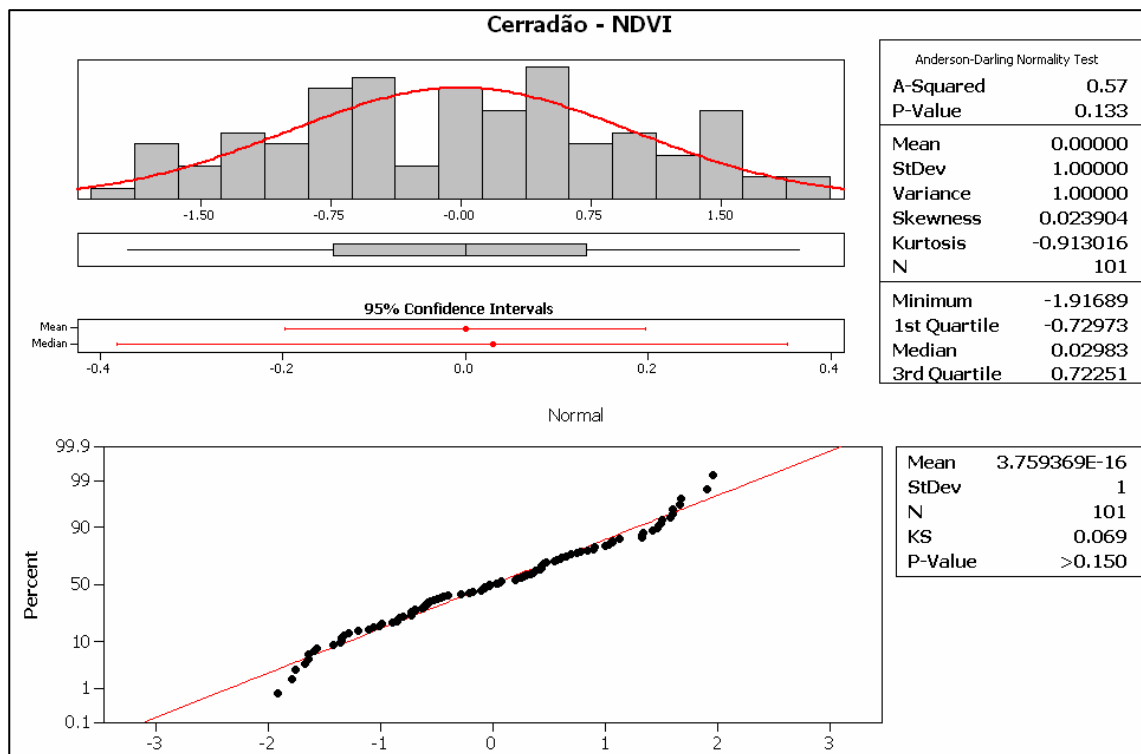


C1. Gráficos de distribuição e frequência das amostras de Cerradão para as bandas do visível e infravermelho do sensor TM/Landas5.

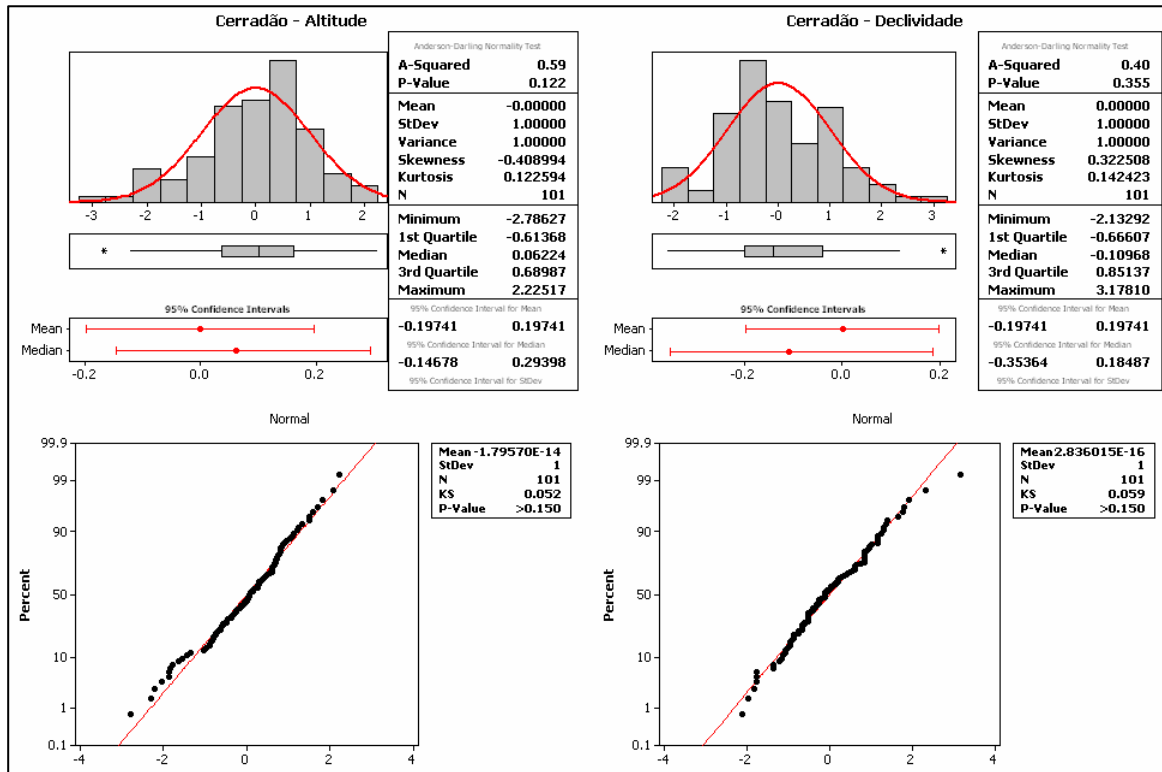




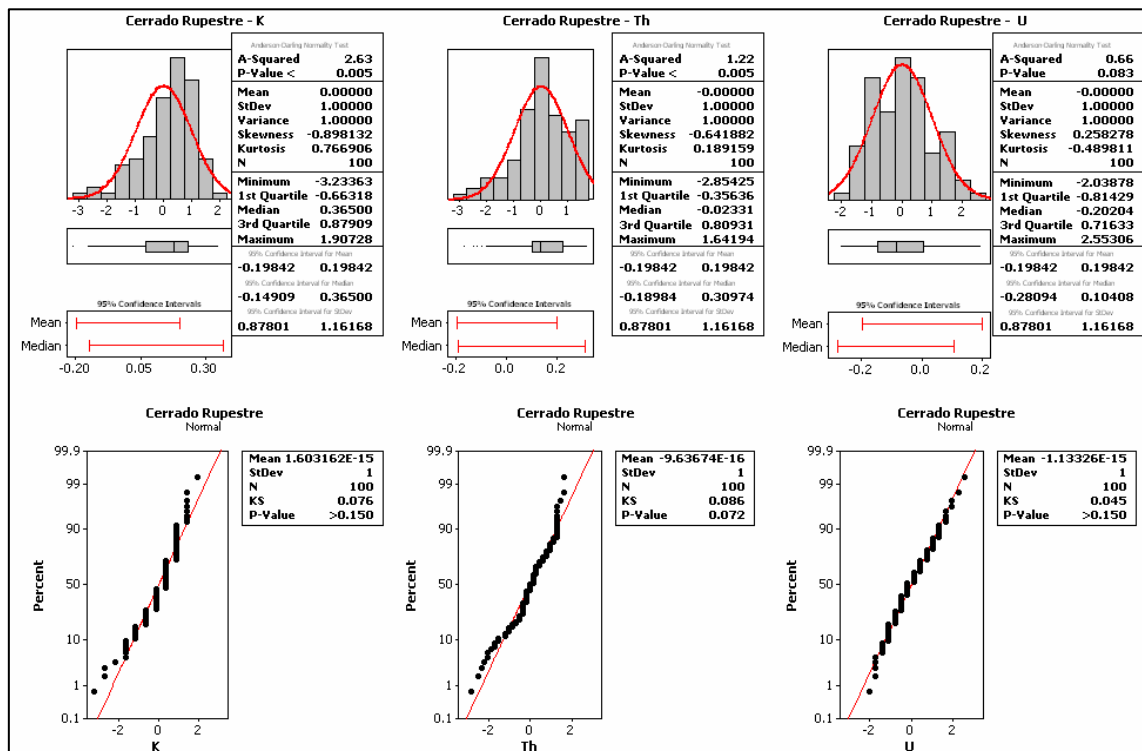
C2. Gráficos de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov das amostras de Cerradão para as bandas do visível e infravermelho do sensor TM/Landas5.



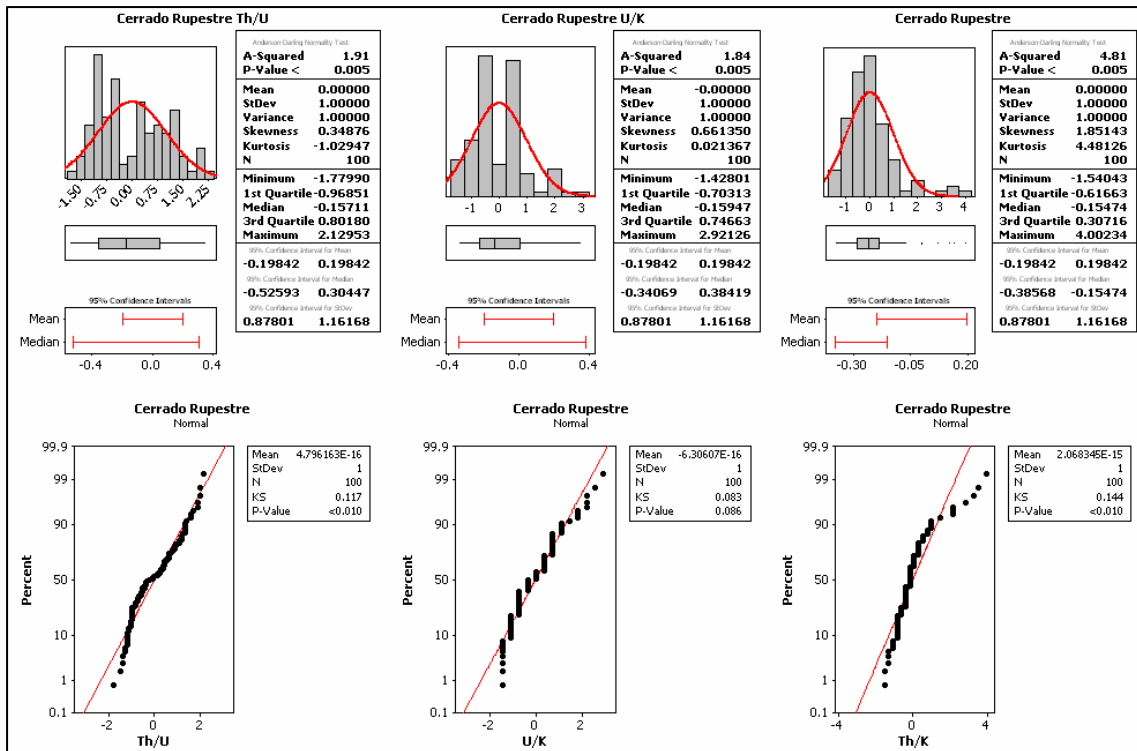
C3. Gráficos de distribuição e frequência e teste de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov dos dados SRTM (Altitude/Declividade) para a fitofisionomia Cerradão.



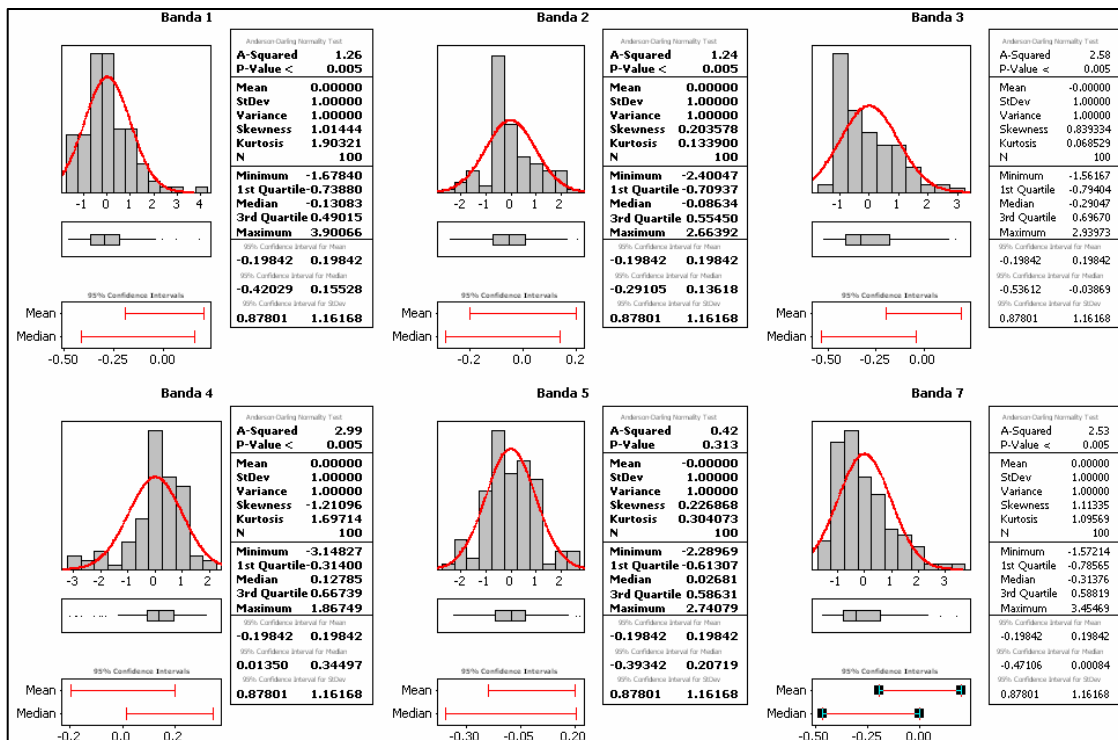
C4. Gráficos de distribuição e frequência e teste de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov dos dados SRTM (Altitude/Declividade) para a fitofisionomia Cerradão.



C5. Gráficos de distribuição e frequência e teste de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov das amostras de Cerrado Rupestre para os canais de K eTh e U.

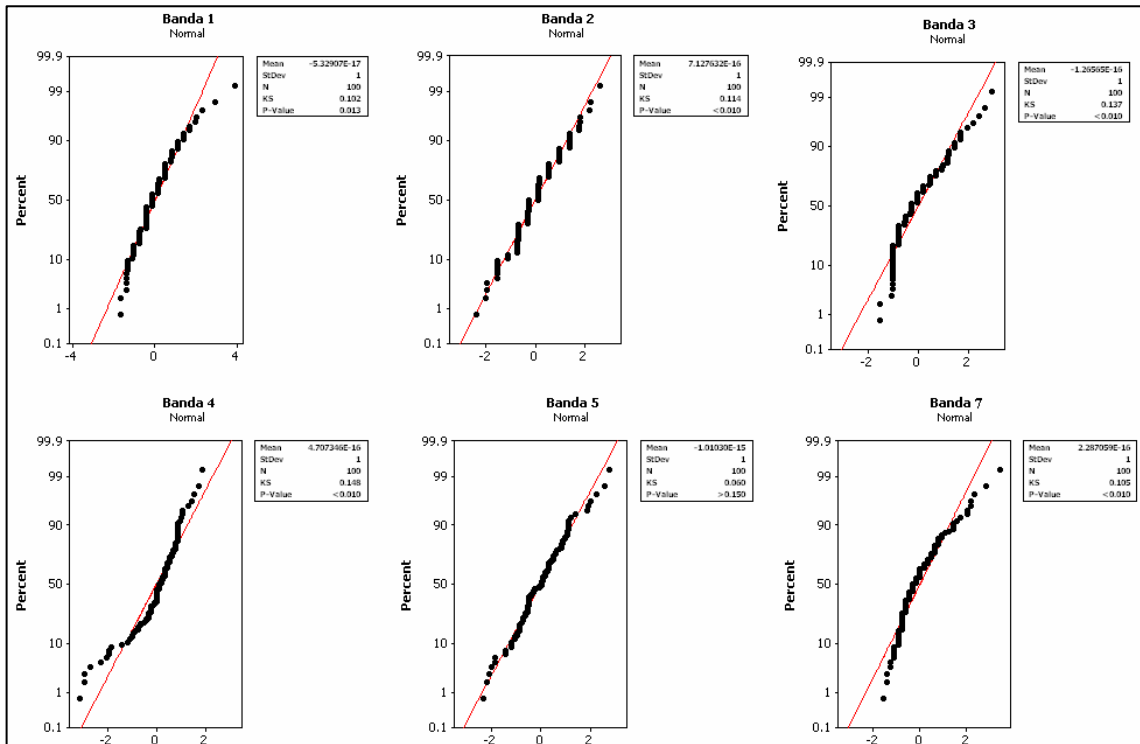


C6. Gráficos de distribuição e frequência e teste de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov das amostras de Cerrado Rupestre para as razões Th/U, UK e Th/K.

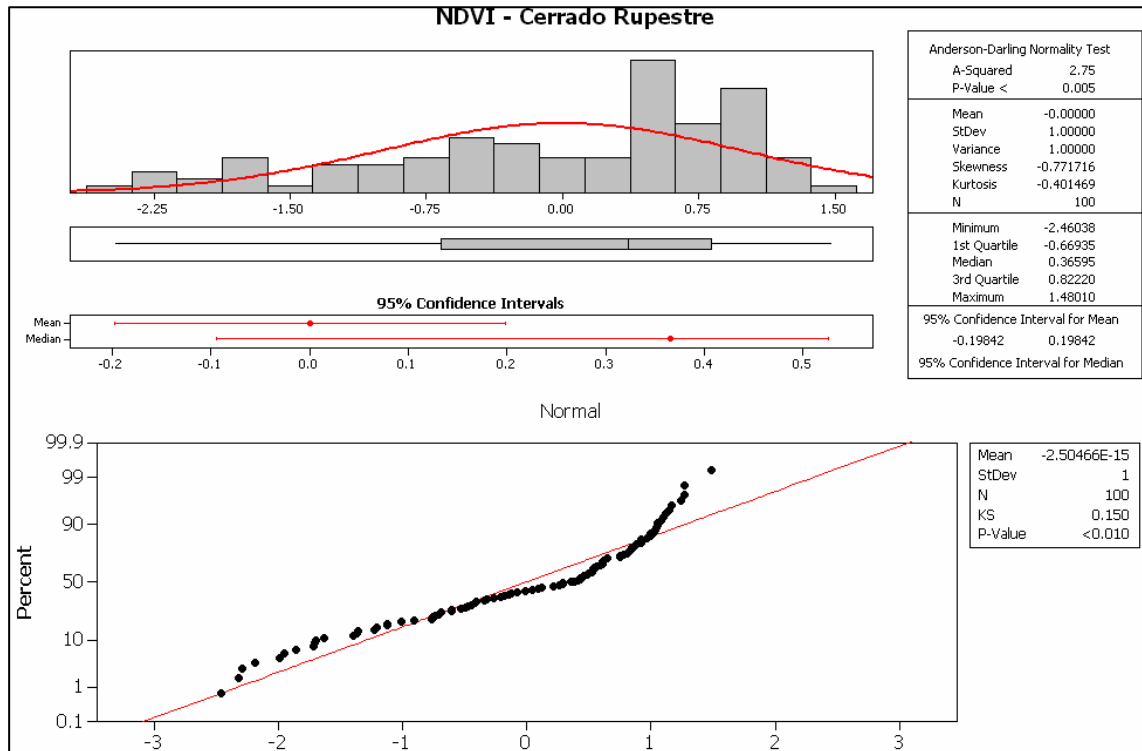


C7. Gráficos de distribuição e frequência das amostras de Cerrado Rupestre para as bandas do visível e infravermelho do sensor TM/Landas5

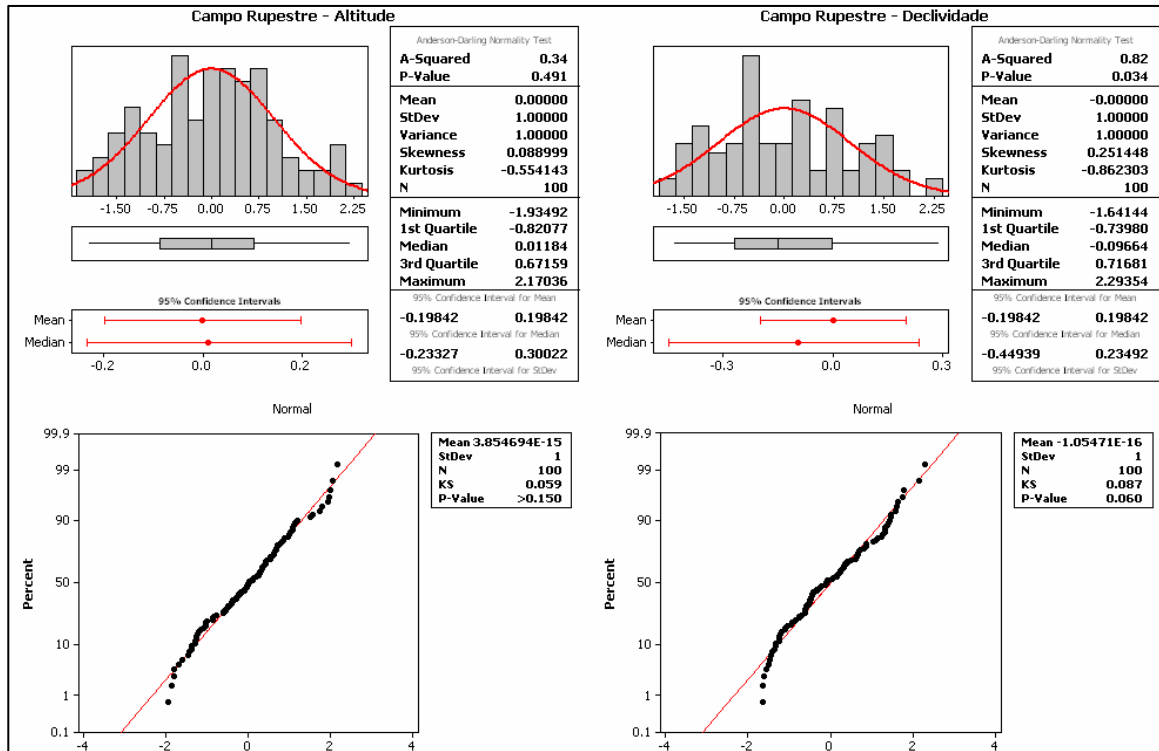




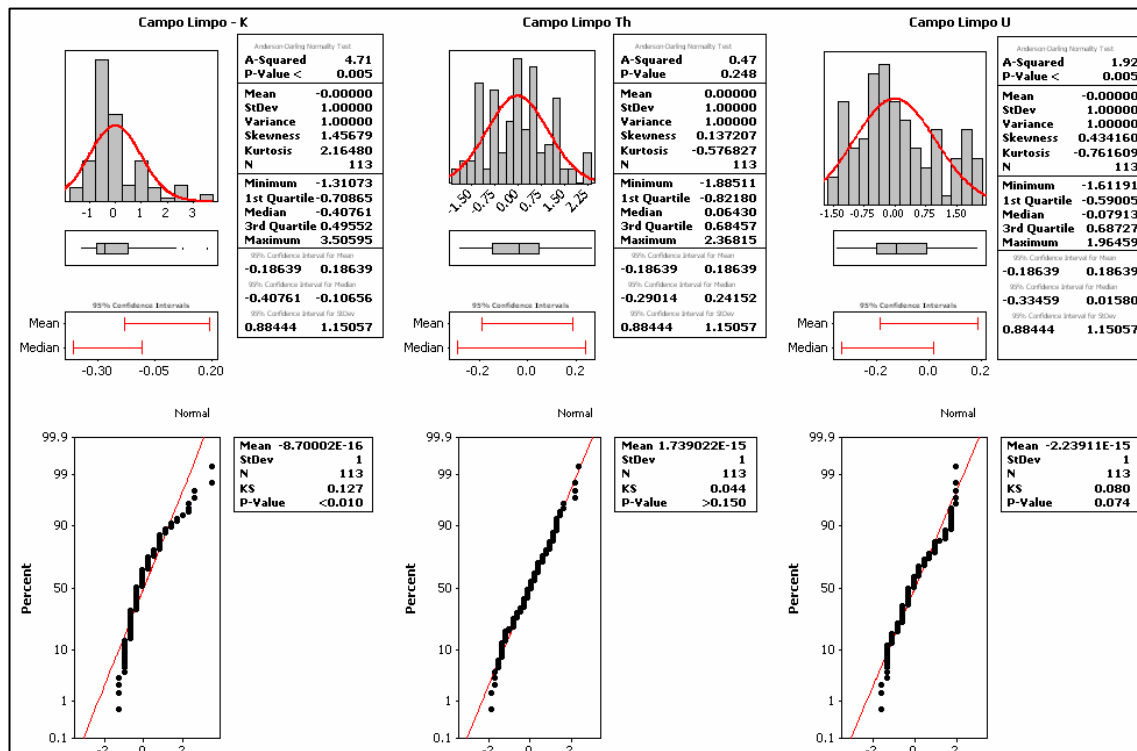
C8. Gráficos de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov das amostras de Cerrado Rupestre para as bandas do visível e infravermelho do sensor TM/Landas5.



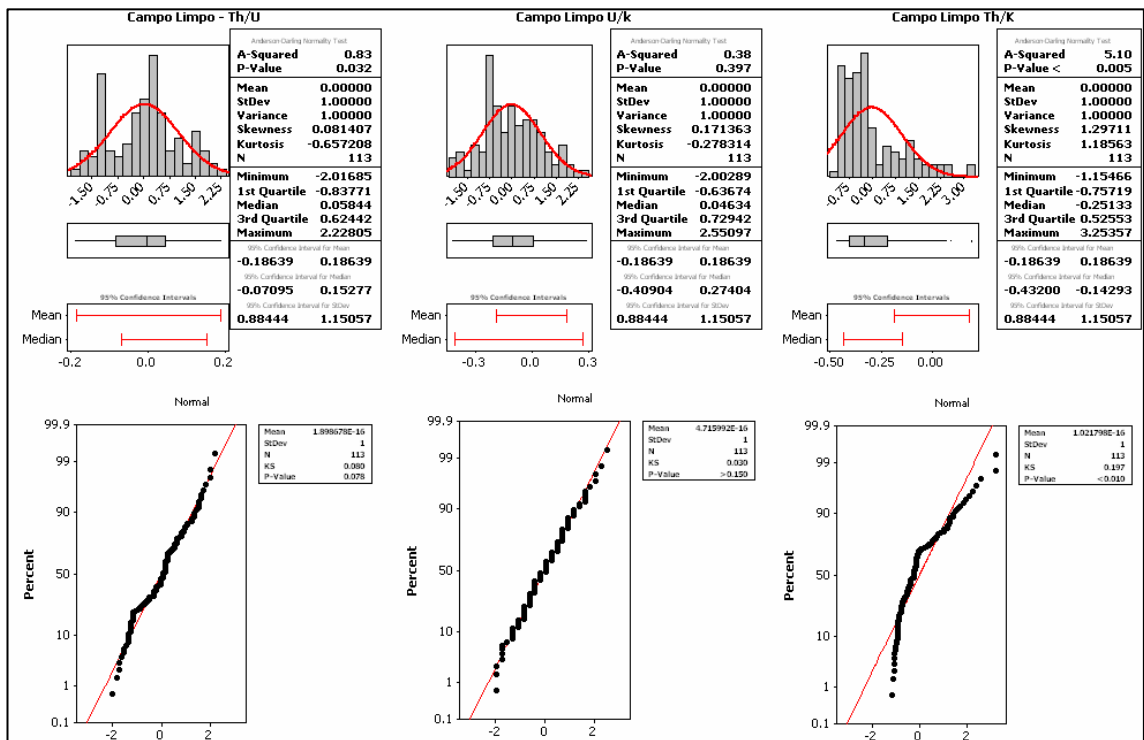
C9. Gráficos de distribuição e frequência, e teste de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov das amostras de Cerrado Rupestre para o NDVI.



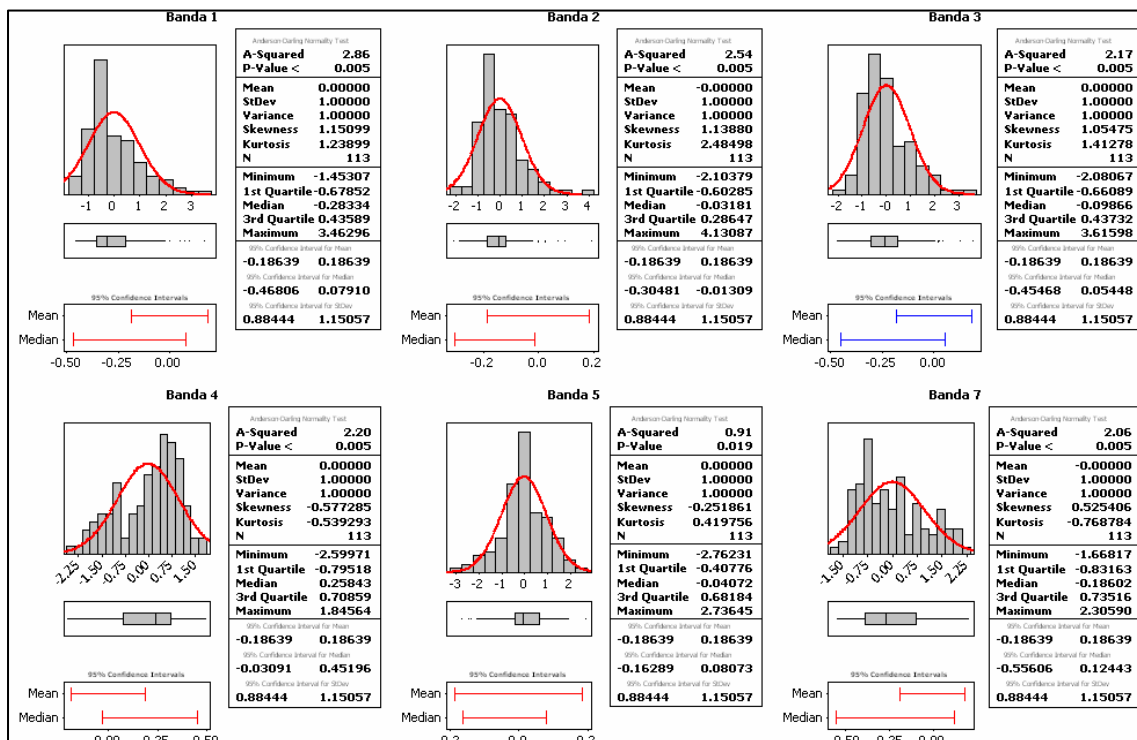
C10. Gráficos de distribuição e frequência e teste de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov dos dados SRTM (Altitude/Declividade) para a fitofisionomia Cerrado Rupestre.



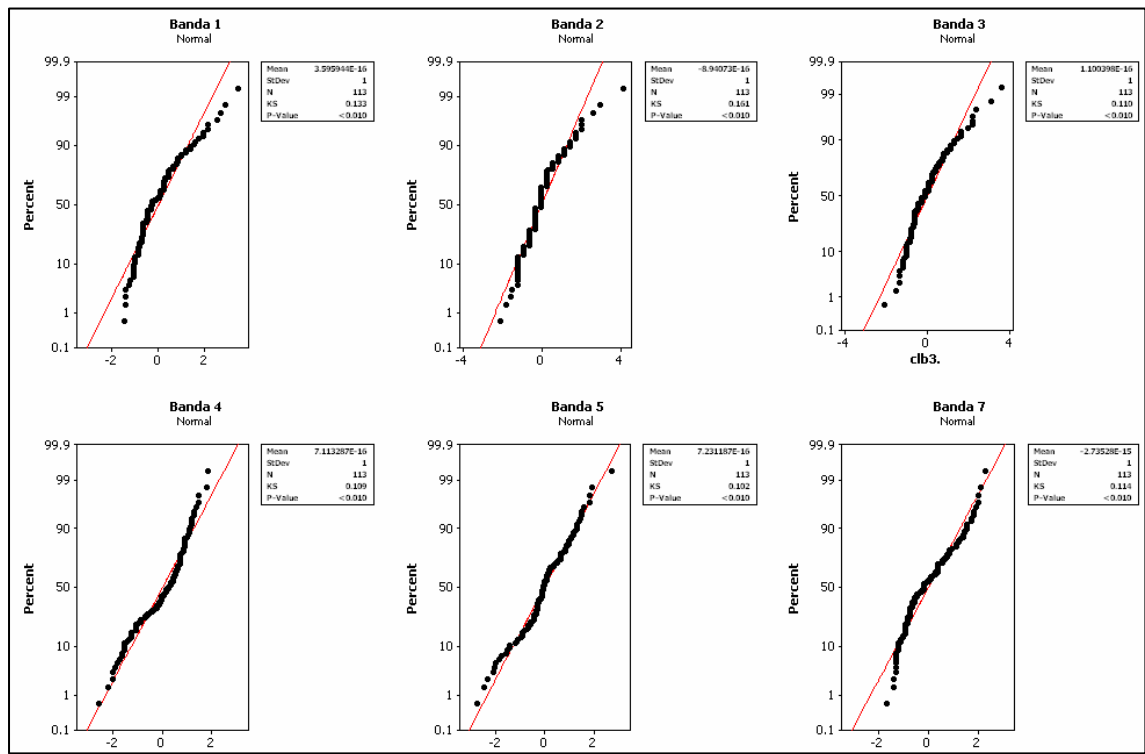
C11. Gráficos de distribuição e frequência e teste de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov das amostras de Cerrado Rupestre para os canais de K e Th e U.



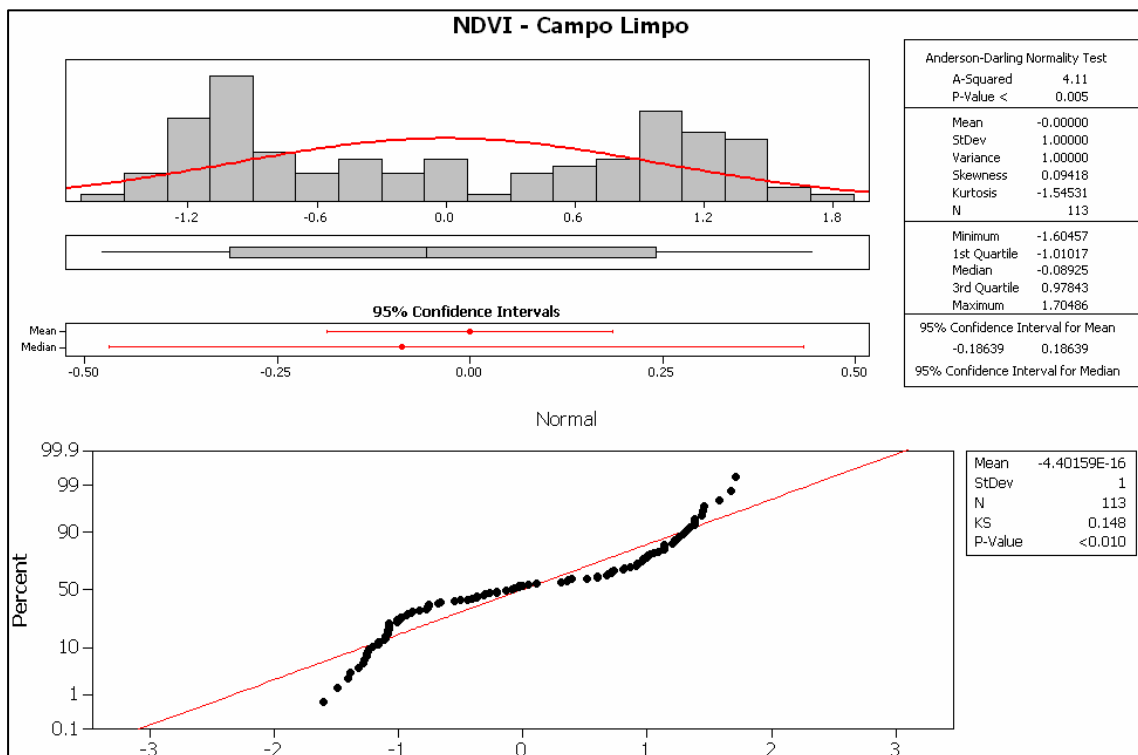
C12. Gráficos de distribuição e frequência, e teste de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov das amostras de Campo Limpo para as razões Th/U, UK e Th/K.



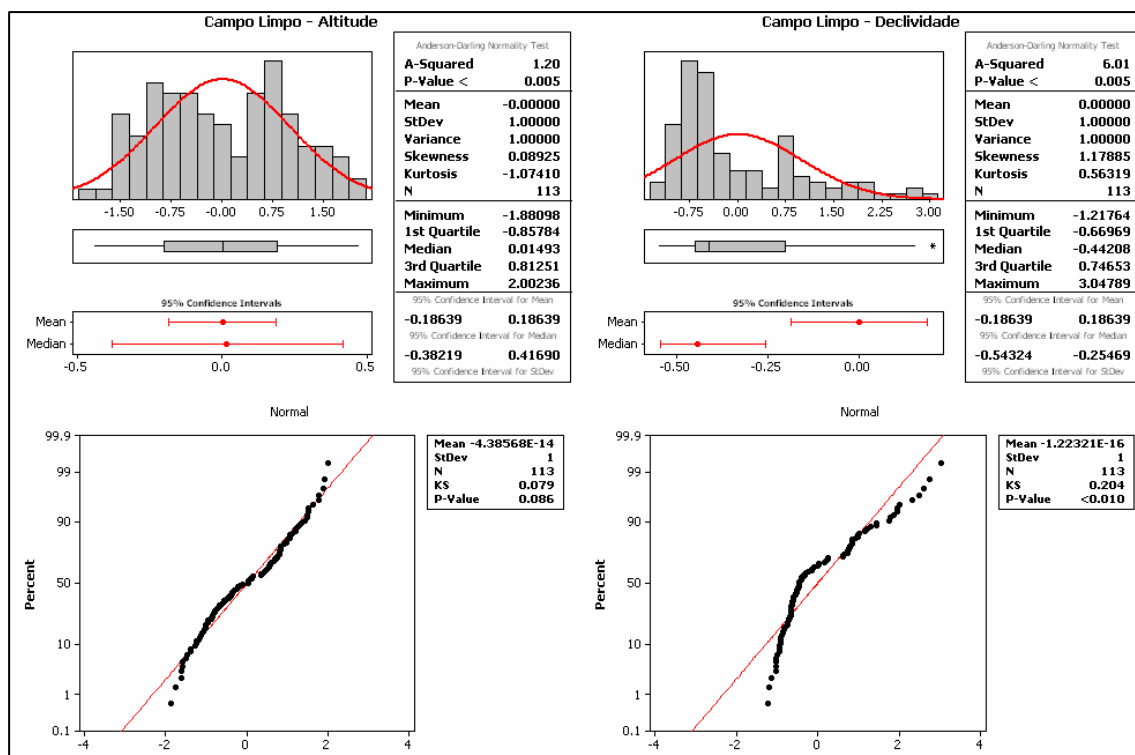
C13. Gráficos de distribuição e frequência das amostras de Cmpo Limpo para as bandas do visível e infravermelho do sensor TM/Landas5.



C14. Gráficos de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov das amostras de Campo Limpo para as bandas do visível e infravermelho do sensor TM/Landas5.



C15. Gráficos de distribuição e frequência, e teste de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov das amostras de Campo Limpo para o NDVI.



**C16.** Gráficos de distribuição e frequência e teste de distribuição normal Kolmogorov-Smirnov dos dados SRTM (Altitude/Declividade) para a fitofisionomia Campo Limpo.

## APÊNDICE D

**D1.** Correlação entre os radioelementos e bandas espectrais do Landsat5 TM para a fitofisionomia Campo Limpo.

Correlação - Campo Limpo (K,Th,U)								
	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 7	K	Th
<b>Banda 2</b>	0.91							
	0							
<b>Banda 3</b>	0.93	0.959						
	0	0						
<b>Banda 4</b>	0.128	0.384	0.262					
	0.178	0	0.005					
<b>Banda 5</b>	0.746	0.869	0.871	0.563				
	0	0	0	0				
<b>Banda 7</b>	0.869	0.845	0.903	0.01	0.789			
	0	0	0	0.916	0			
<b>K</b>	-0.081	-0.066	-0.123	0.197	-0.091	-0.228		
	0.393	0.489	0.196	0.037	0.337	0.015		
<b>Th</b>	0.127	0.056	0.118	-0.282	-0.024	0.064	0.503	
	0.18	0.556	0.214	0.002	0.801	0.5	0	
<b>U</b>	-0.312	-0.251	-0.321	0.217	-0.185	-0.344	0.668	-0.034
	0.001	0.007	0.001	0.021	0.049	0	0	0.72

**D2.** Correlação entre os radioelementos e bandas espectrais do Landsat5 TM para a fitofisionomia Cerradão.

Correlação - Cerradão (K,Th,U)								
	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 7	K	Th
<b>Banda 2</b>	0.905							
	0							
<b>Banda 3</b>	0.929	0.96						
	0	0						
<b>Banda 4</b>	0.254	0.371	0.225					
	0.01	0	0.024					
<b>Banda 5</b>	0.875	0.87	0.917	0.121				
	0	0	0	0.229				
<b>Banda 7</b>	0.859	0.864	0.917	0.05	0.97			
	0	0	0	0.621	0			
<b>K</b>	0.088	0.072	0.084	0.024	0.193	0.165		
	0.382	0.474	0.404	0.81	0.053	0.1		
<b>Th</b>	0.471	0.402	0.457	0.195	0.488	0.505	0.21	
	0	0	0	0.051	0	0	0.035	

<b>U</b>	0.493	0.429	0.464	0.23	0.516	0.532	0.311	0.961
	0	0	0	0.021	0	0	0.002	0

**D3.** Correlação entre os radioelementos e bandas espectrais do Landsat5 TM para a fitofisionomia Cerrado Rupestre.

Correlação – (Bandas 1, 2, 3, 4, 5, 7) X (K,Th,U)								
	B1	B2	B3	B4	B5	B7	k	Th
<b>B2</b>	0.855							
	0							
<b>B3</b>	0.865	0.917						
	0	0						
<b>B4</b>	0.223	0.449	0.201					
	0.026	0	0.045					
<b>B5</b>	0.839	0.924	0.895	0.494				
	0	0	0	0				
<b>B7</b>	0.861	0.879	0.937	0.208	0.927			
	0	0	0	0.038	0			
<b>k</b>	-0.121	-0.126	-0.135	-0.069	-0.139	-0.113		
	0.229	0.211	0.181	0.496	0.168	0.264		
<b>Th</b>	0.05	0.054	-0.012	0.122	0.078	0.099	0.284	
	0.622	0.597	0.905	0.225	0.44	0.328	0.004	
<b>U</b>	0.075	0.098	0.144	-0.118	0.082	0.115	-0.674	-0.51
	0.457	0.331	0.153	0.242	0.418	0.256	0	0

## APÊNDICE E

E1. Espécies vegetais presentes na área de estudo, com seus respectivos hábitos, fitofisionomias e domínios de ocorrência. s.n. = sem número (as coletas não serão depositadas no Herbário por estarem em estado vegetativo).

DOMÍNIO	COORD. UTM	FITOFISIONOMIA (MUNICÍPIO)	ESPÉCIE	HÁBITO	N.COLETA <sup>1</sup>
D01	8467305 250333	Cerrado Rupestre (Teresina de Goiás/GO)	<i>Vochysia cf. tucanorum</i>	Árvore	s.n.
	8467851 249849		<i>Casearia grandiflora</i>	Arbusto	Silva, J.S. 638
			<i>Chamaescrista orbiculata</i>	Arbusto	Silva, J.S. 639
			<i>Serjania ovalifolia</i>	Trepadeira	Silva, J.S. 640
	8499256 234576	Cerrado Rupestre (Cavalcante/GO)	<i>Terminalia argentea</i>	Árvore	Silva, J.S. 642
	8488903 232256		<i>Byrsonima rotunda</i>	Arbusto	Silva, J.S. 648
			<i>Miconia ciliata</i>	Arbusto	Silva, J.S. 649
			<i>Miconia pohliana</i>	Arbusto	Silva, J.S. 650
8490122 234466		<i>Kielmeyera rubriflora</i>	Arbusto	Silva, J.S. 652	
		<i>Mimosa clausenii</i>	Arbusto	Silva, J.S. 653	
		<i>Eremanthus glomerulatus</i>	Árvore	Silva, J.S. 654	
D02	8474910 253542	Cerradão (Cavalcante/GO)	<i>Byrsonima basiloba</i>	Arbusto	Silva, J.S. 659
	8474717 248684		<i>Banisteriopsis anisandra</i>	Trepadeira	s.n.
	8474903 253412		<i>Siparuna guianensis</i>	Árvore	Silva, J.S. 656
	8474695 248905		<i>Copaifera langsdorfii</i>	Árvore	s.n.
	8474300 236600		<i>Siparuna guianensis</i>	Árvore	Silva, J.S. 657
			<i>Terminalia argentea</i>	Subarbusto	Silva, J.S. 658
		<i>Diplusodon ramosissimus</i>			
D03	8482000 258000	Transição - Cerrado Rupestre/Cerrado sensu stricto (Cavalcante/GO)	<i>Cecropia saxatilis</i>	Árvore	s.n.
	8481007 258288		<i>Myrcia splendens</i>	Arbusto	s.n.
	8496864 263656		<i>Ruellia adenocalyx</i>	Subarbusto	Silva, J.S. 643
	8496864 263767		<i>Andira cf. paniculata</i>	Árvore	s.n.
	8496893 263792		<i>Dilodendron bipinatum</i>	Árvore	Silva, J.S. 644
D04	8500800 265158	Cerrado sensu stricto (Cavalcante/GO)	<i>Curatella americana</i>	Árvore	Silva, J.S. 645
	8500100 264800				
	8501623 265043		<i>Banisteriopsis anisandra</i>	Trepadeira	s.n.
	8502046 265156				
	8502324 265114				
D05	8474200 234500	Mata Seca (Cavalcante/GO)	<i>Campomanesia cavalcantina</i>	Subarbusto	Silva, J.S. 661
	8474600 241500		<i>Alibertia edulis</i>	Árvore	Silva, J.S. 676
	8474500 249800		<i>Bowdichia virgilioides</i>	Árvore	Silva, J.S. 677
	8484242 234052				
	8482798 234573		<i>Andira cf. vermifuga</i>	Árvore	s.n.



D06	8486801 235780	Mata Seca (Cavalcante/ GO)	<i>Annona coriacea</i>	Árvore	s.n.
	8486447 235952		<i>Pera glabrata</i>	Árvore	Silva, J.S. 669
	8482798 234573		<i>Miconia macrothyrsa</i>	Árvore	Silva, J.S. 670
	8482327 234790		<i>Myrcia sellowiana</i>	Árvore	Silva, J.S. 671
	8481461 234790		<i>Aspidosperma tomentosum</i>	Árvore	Silva, J.S. 672
			<i>Clusia burchellii</i>	Árvore	Silva, J.S. 673

D07	8485079 230995	Mata de Galeria (Cavalcante/GO)	<i>Miconia pseudonervosa</i>	Árvore	Silva, J.S. 674	
	8485012 230752		<i>Inga laurina</i>	Árvore	Silva, J.S. 675	
	8495557 225639		<i>Byrsonima intermédia</i>	Árvore	s.n.	
	8495133 225856					
	8485143 230799					
D08	8489867 228100	Mata Estacional (Cavalcante/GO)	<i>Astronium fraxinifolium</i>	Árvore	s.n.	
	8485984 259364		<i>Plenckia populnea</i>	Árvore	Silva, J.S. 646	
	8485757 259161		<i>Crotalaria unifoliolata</i>	Arbusto	Silva, J.S. 647	
	8486334 259396		<i>Oxalis physocalyx</i>	Arbusto	s.n.	
	8489629 228197		<i>Astronium fraxinifolium</i>	Arbusto	s.n.	
sem número de Domínio	8495249 232430	Campo Sujo (Cavalcante/GO)	<i>Diplusodon</i> sp.	Subarbusto	Silva, J.S. 662	
	8495925 232788		<i>Kielmeyera rubriflora</i>	Arbusto	Silva, J.S. 663	
	8495244 232333		<i>Microlicia viminalis</i>	Subarbusto	Silva, J.S. 666	
	8495193 232515		<i>Salacia crassiflora</i>	Arbusto	s.n.	

<sup>1</sup> Coletas depositadas no Herbário da Universidade de Brasília, Instituto de Botânica.

## APÊNDICE F

### F1. Peso das amostras de folha para calcinação.

<b>Espécies</b>	<b>Tara / Vasilhame g</b>	<b>Folha/g</b>	<b>Vasilhame /Cinza g</b>	<b>Cinza g</b>	<b>% Folha/ cinza</b>	<b>Coord. X</b>	<b>Coord. Y</b>
<b>Byrsonima rotunda</b>	431.06	50.05	433.25	2.19	4%	253370	8475031
<b>Chamaecrista orbiculata</b>	405.14	50.07	406.41	1.27	3%	232213	8487790
<b>Xylopia aromatica</b>	444.62	50.06	446.12	1.5	3%	234682	8482730
<b>Curatella americana</b>	415.9	50.02	420.74	4.84	10%	263809	8500049
<b>Miconia stenostachya</b>	425.15	50.06	427.21	2.06	4%	232442	8495192
<b>Vochysia thyrsoidea [1]</b>	405.44	50.03	408.36	2.92	6%	232301	8495253
<b>Salvertia convallariodora</b>	418.94	50.08	423.12	4.18	8%	264384	8501838
<b>Emmotum nitens</b>	424.16	50.08	425.11	0.95	2%	234682	8482730
<b>Bahuinia sp.</b>	418.86	50.02	419.98	1.12	2%	232301	8495253
<b>Vochysia thyrsoidea [2]</b>	425.54	50.04	427.44	1.9	4%	232307	8488924
<b>Malpighiaceae sp.</b>	419.81	50.09	420.87	1.06	2%	232442	8495192
<b>Qualea parviflora Mart.</b>	424.87	50.09	427.14	2.27	5%	232301	8495253
<b>Anacardium humile</b>	424.98	50.03	427.71	2.73	5%	264384	8501838

### F2. Peso das amostras de galho para calcinação.

<b>Espécie</b>	<b>Tara/ Vasilhame g</b>	<b>Galhos g</b>	<b>Vasilhame / Cinza g</b>	<b>Cinza g</b>	<b>% Galhos/ Cinza</b>	<b>Coord. X</b>	<b>Coord. Y</b>
<b>Byrsonima rotunda</b>	444.6	50.11	446.25	1.65	3%	253370	8475031
<b>Chamaecrista orbiculata</b>	441.17	50.15	441.85	0.68	1%	232213	8487790
<b>Xylopia aromatica</b>	698.22	50.28	699.61	1.39	3%	234682	8482730
<b>Curatella americana</b>	690.01	50.18	692.53	2.52	5%	263809	8500049
<b>Miconia stenostachya</b>	424.72	50.25	425.75	1.03	2%	232442	8495192
<b>Vochysia thyrsoidea [1]</b>	444.59	50.13	446.48	1.89	4%	232301	8495253
<b>Salvertia convallariodora</b>	415.87	50.14	420.27	4.4	9%	264384	8501838
<b>Emmotum nitens</b>	418.82	50.12	419.65	0.83	2%	234682	8482730
<b>Bahuinia sp.</b>	418.9	50.12	419.71	0.81	2%	232301	8495253
<b>Vochysia thyrsoidea [2]</b>	431.04	50.1	433.78	2.74	5%	232307	8488924
<b>Malpighiaceae sp.</b>	441.18	50.14	442.15	0.97	2%	232442	8495192
<b>Qualea parviflora Mart.</b>	424.12	50.1	426.05	1.93	4%	232301	8495253
<b>Anacardium humile</b>	424.96	17.18	425.56	0.6	3%	264384	8501838

## APÊNDICE G

### G1. Medições de espécies do Cerrado por gamaespectrômetro portátil.

<b>Cerradão - Emmotum nitens</b>									
	CT/ppm	f	K%	f	U/ppm	f	Th/ppm	f	
<b>Background 1</b>	6.3	976	0.3	152	0.9	48	4.5	52	
<b>Background 2</b>	6.3	971	0.3	159	0.8	45	4.2	48	
<b>Background 3</b>	6.3	974	0.4	167	0.7	43	4.4	50	
<b>CT= Contagem total</b>									
<b>f= Frequência</b>									
<b>Espécie -Emmotum nitens (Folha)</b>									
	CT/ppm	f	K%	f	U/ppm	f	Th/ppm	f	
<b>Amostra 1</b>	6.2	950	0.3	155	0.9	45	4		
<b>Amostra 2</b>	6.1	946	0.3	145	0.8	45	4.1		
<b>Amostra 3</b>	6.2	951	0.4	167	0.6	39	3.9		
<b>Espécie -Emmotum nitens (Galho)</b>									
	CT/ppm	f	K%	f	U/ppm	f	Th/ppm	f	
<b>Amostra 1</b>	6.3	977	0.3	151	0.8	48	5	57	
<b>Amostra 2</b>	6.3	978	0.3	161	0.7	45	4.5	52	
<b>Amostra 3</b>	6.5	996	0.3	172	0.8	50	5.1	58	
<b>Cerrado Rupestre- Vochysia</b>									
	CT/ppm	f	K%	f	U/ppm	f	Th/ppm	f	
<b>Background 1</b>	6.1	942	0.3	147	0.7	41	4.2	48	
<b>Background 2</b>	6.1	941	0.3	154	0.5	37	4.4	50	
<b>Background 3</b>	6.1	938	0.3	153	1	48	3.9	45	
<b>Espécie -Vochysia (Folha)</b>									
	CT/ppm	f	K%	f	U/ppm	f	Th/ppm	f	
<b>Amostra 1</b>	6.2	947	0.3	152	0.7	43	4.4	50	
<b>Amostra 2</b>	6.2	948	0.3	150	0.5	39	4.6	52	
<b>Amostra 3</b>	6	930	0.3	154	0.9	47	4.3	49	
<b>Espécie -Vochysia (Galho)</b>									
	CT/ppm	f	K%	f	U/ppm	f	Th/ppm	f	
<b>Amostra 1</b>	6.1	933	0.3	154	0.7	43	4.3	49	
<b>Amostra 2</b>	6.1	933	0.3	156	1	48	3.9	45	

<b>Amostra 3</b>	6	920	0.3	147	0.7	42	4.4	50
<b>Cerradão -Xylopia aromatica</b>								
	CT/ppm	f	K%	f	U/ppm	f	Th/ppm	f
<b>Background 1</b>	6.4	981	0.3	164	0.6	45	5	57
<b>Background 2</b>	6.4	992	0.3	171	0.9	50	4.5	52
<b>Background 3</b>	6.3	973	0.3	164	0.7	45	4.5	52
<b>Espécie - Xylopia aromatica (Folha)</b>								
	CT/ppm	f	K%	f	U/ppm	f	Th/ppm	f
<b>Amostra 1</b>	6.4	978	0.3	161	0.8	46	4.7	53
<b>Amostra 2</b>	6.2	962	0.4	164	0.4	36	4.4	50
<b>Amostra 3</b>	6.5	994	0.3	164	0.7	45	4.6	53
<b>Espécie - Xylopia aromatica (Galho)</b>								
	CT/ppm	f	K%	f	U/ppm	f	Th/ppm	f
<b>Amostra 1</b>	6.3	969	0.3	159	0.6	42	4.7	53
<b>Amostra 2</b>	6.3	964	0.3	167	1	46	3.7	42
<b>Amostra 3</b>	6.4	984	0.3	161	0.7	46	5	57
<b>Campo Sujo - Bauhinia sp.</b>								
	CT/ppm	f	K%	f	U/ppm	f	Th/ppm	f
<b>Background 1</b>	6.3	969	0.3	154	0.7	45	4.8	54
<b>Background 2</b>	6.2	948	0.3	158	0.6	39	4.3	49
<b>Background 3</b>	6.3	965	0.3	158	0.6	42	4.5	52
<b>Espécie - Bauhinia sp. (Folhas)</b>								
	CT/ppm	f	K%	f	U/ppm	f	Th/ppm	f
<b>Amostra 1</b>	6.1	948	0.3	157	1	49	4	46
<b>Amostra 2</b>	6.3	970	0.3	164	0.8	46	4.7	53
<b>Amostra 3</b>	6.4	978	0.3	162	0.8	48	4.9	55
<b>Espécie - Bauhinia sp.(Galhos)</b>								
	CT/ppm	f	K%	f	U/ppm	f	Th/ppm	f
<b>Amostra 1</b>	6.3	967	0.3	162	0.6	41	4.5	51
<b>Amostra 2</b>	6.4	981	0.3	163	0.9	50	4.7	54
<b>Amostra 3</b>	6.3	965	0.3	163	0.8	44	4.1	47
<b>Cerrado Rupestre - Chamaecrista orbiculata</b>								
	CT/ppm	f	K%	f	U/ppm	f	Th/ppm	f
<b>Background 1</b>	6.1	942	0.3	156	1	48	4.2	48
<b>Background 2</b>	6.3	966	0.4	166	0.6	42	4.5	51
<b>Background 3</b>	6.3	976	0.3	155	0.8	47	4.7	54

---

**Espécie- Chamaecrista orbiculata (Folhas)**

CT/ppm	f	K%	f	U/ppm	f	Th/ppm	f
6	929	0.3	161	0.8	44	4.1	47
6.2	949	0.3	166	1	47	4	46
6.4	978	0.3	168	0.8	46	4.5	51

**Espécie- Chamaecrista orbiculata (Galhos)**

CT/ppm	f	K%	f	U/ppm	f	Th/ppm	f
6.3	967	0.3	159	0.7	44	4.4	50
6.1	945	0.3	159	0.8	45	4.4	50
6.4	983	0.4	174	0.7	45	4.6	53

**Cerradão - Byrsonima rotunda**

CT/ppm	f	K%	f	U/ppm	f	Th/ppm	f	
<b>Background 1</b>	6.3	963	0.3	157	1	49	4.1	47
<b>Background 2</b>	6.3	970	0.3	159	0.8	46	4.2	48
<b>Background 3</b>	6.2	955	0.3	156	0.6	39	4.4	49

**Espécie - Byrsonima rotunda (Folhas)**

CT/ppm	f	K%	f	U/ppm	f	Th/ppm	f
6.3	963	0.3	159	1	53	4.8	55
6.2	955	0.3	157	0.8	44	4.3	49
6.5	1004	0.3	168	0.8	47	4.8	55

**Espécie - Byrsonima rotunda (Galhos)**

CT/ppm	f	K%	f	U/ppm	f	Th/ppm	f
6.5	1000	0.4	174	0.9	47	4.1	47
6.3	967	0.3	153	0.7	46	4.9	56
6.4	979	0.3	167	0.8	47	4.8	54

---

\*f=freqüência, CT=Contagem total.

## APÊNDICE H

**H1.** Teores de K(ppm) de espécies do Cerrado medidas por Espectrofotômetro de Absorção Atômica (EAA)

Espécies	K(ppm)	Fator de diluição (Análise 1)	Fator de diluição (Análise 2)	Valor real (Análise 1) *50	Valor Real (Análise 2) *500 ou *1000
<b>Salvertia convallariodora</b>	5.47	1/50	1/500	273.5	136750
<b>Miconia stenostachya</b>	3.84	1/50	1/500	192	96000
<b>Xylopia aromatica</b>	10.54	1/50	1/1000	527	527000
<b>Curatella americana</b>	4.83	1/50	1/500	241.5	120750
<b>Chamaecrista orbiculata</b>	6.39	1/50	1/500	319.5	159750
<b>Bauhinia sp. [1]</b>	5.78	1/50	1/500	289	144500
<b>Qualea parviflora</b>	9.05	1/50	1/500	452.5	226250
<b>Emmotum nitens</b>	5.96	1/50	1/500	298	149000
<b>Anacardium humile</b>	5.89	1/50	1/500	294.5	147250
<b>Bauhinia sp. [2]</b>	6.01	1/50	1/500	300.5	150250
<b>Byrsonima rotunda</b>	7.53	1/50	1/1000	376.5	376500

## APÊNDICE I

### II. Medições dos teores dos radioelementos nos solos das áreas de coleta das espécies estudadas.

<b>Espécies</b>	<b>Fitofisionomia</b>	<b>Solo</b>	<b>K (FRX)</b>	<b>Th (ppm)</b>	<b>U (ppm)</b>
<b>Salvertia convallariodora</b>	Cerrado ss	Gleissolo	21.321	1.3	0.3
<b>Emmotum nitens</b>	Cerradão	Gleissolo	15.334	2.7	0.3
<b>Byrsonima rotunda</b>	Cerradão	Gleissolo	0.4341	1.9	0.4
<b>Xylopia aromatica</b>	Cerradão	Plintossolo	0.7852	2.2	0.3
<b>Qualea parviflora</b>	Campo sujo	B textural	17.043	1.4	0.3
<b>Curatella americana</b>	Cerrado ss	B textural	24.955	2.1	0.3
<b>Miconia stenostachya</b>	Campo limpo	Gleissolo	0.4803	1.5	0.4
<b>Anacardium humile</b>	Cerrado ss	Neossolo quartizênico	10.639	1.3	0.3
<b>Vochysia thyrsoidea</b>	Cerrado rupestre	Plintossolo	21.267	2.1	0.3
<b>Malpighiaceae sp.</b>	Campo limpo	Plintossolo	23.089	1.4	0.3
<b>Chamaecrista orbiculata</b>	Cerrado Rupestre	Argissolo ou nitossolo	0.4882	2.4	0.1

## APÊNDICE J

**J1.** Coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ) entre os teores K, Th e U com os teores de Si; Al; para as espécies do Cerrado

	Si	Al	K (z/10 icp)	Th (ICP-MS)
Al	-0.368 0.266			
K (z/10 icp)	0.574 0.065	-0.645 0.032		
Th (ICP-MS)	0.611 0.046	-0.427 0.191	0.298 0.374	
U (ICP-MS)	0.088 0.796	0.156 0.647	-0.210 0.535	0.104 0.762

**J2.** Coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ) entre os teores K, Th e U com os teores de Si; Al; para espécies do Cerrado.

	Si	Al	K (aero z)
Al	-0.368		
K (aero z)	-0.460 0.155	-0.061 0.858	
Th (Aerogama)	0.612 0.045	-0.277 0.410	-0.231 0.494
U (Aerogama/z)	0.440 0.176	-0.363 0.272	0.097 0.776
U (Aerogama/z)	Th (Aerogama) 0.852 0.001		

**J3.** Coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ) entre os teores K, Th e U com os teores de Ca; Mg; para espécies do Cerrado.

	Ca	Mg	Th (Aerogama)
Mg	0.603 0.050		
Th (Aerogama)	0.141 0.679	0.246 0.465	
U (Aerogama/z)	0.093 0.786	0.208 0.540	0.852 0.001
K (aero z)	-0.654 0.029	-0.590 0.056	-0.231 0.494
K (aero z)	U (Aerogama/z) 0.097		



**J4.** Coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ) entre os teores K, Th e U com os teores de Ca; Mg;

	Ca	Mg	Th (ICP-MS)	U (ICP-MS)
Mg	0.603 0.050			
Th (ICP-MS)	0.534 0.090	0.769 0.006		
U (ICP-MS)	-0.069 0.841	0.046 0.894	0.104 0.762	
K (z/10 icp)	0.416 0.203	0.674 0.023	0.298 0.374	-0.210 0.535

**J5.** Coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ) entre os teores K, Th e U com os teores de Fe; Ni; Cu; Mn; Zn; Mo para as espécies do Cerrado.

	K (z/10 icp)	Th (ICP-MS)	U (ICP-MS)	Fe
Th (ICP-MS)	0.298 0.374			
U (ICP-MS)	-0.210 0.535	0.104 0.762		
Fe	0.166 0.626	0.875 0.000	-0.088 0.798	
Ni	0.464 0.151	0.848 0.001	0.083 0.807	0.620 0.042
Cu	0.685 0.020	0.256 0.448	-0.157 0.646	0.164 0.631
Mn	0.436 0.180	0.541 0.086	-0.154 0.651	0.701 0.016
Zn	0.660 0.027	0.691 0.019	-0.251 0.457	0.703 0.016
Mo	-0.358 0.279	-0.095 0.780	0.465 0.150	-0.008 0.981
	Ni	Cu	Mn	Zn
Cu	0.533 0.092			
Mn	0.223 0.509	0.193 0.569		
Zn	0.559 0.074	0.597 0.053	0.805 0.003	
Mo	-0.116 0.735	-0.128 0.707	-0.168	-0.181
0.622	0.594			

**J6.** Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre os dados aerogamaespectrométrico (K, Th e U) com os teores de ; Fe; Ni; Cu; Mn; Zn; Mo para espécies do Cerrado

---

	K (aero z)	Th (Aerogama)	U (Aerogama/z)
Th (Aerogama)	-0.231 0.494		
U (Aerogama/z)	0.097 0.776	0.852 0.001	
Fe	-0.405 0.217	-0.085 0.805	-0.323 0.332
Ni	-0.681 0.021	0.280 0.404	0.169 0.620
Cu	-0.630 0.038	0.829 0.002	0.610 0.046
Mn	0.096 0.779	0.212 0.531	0.110 0.748
Zn	-0.385 0.242	0.407 0.214	0.205 0.546
Mo	-0.147 0.666	-0.162 0.635	-0.124 0.716
	Fe	Ni	Cu
Ni	0.620 0.042		
Cu	0.164 0.631	0.533 0.092	
Mn	0.701 0.016	0.223 0.509	0.193 0.569
Zn	0.703 0.016	0.559 0.074	0.597 0.053
Mo	-0.008 0.981	-0.116 0.735	-0.128 0.707
	Mn	Zn	
Zn	0.805 0.003		
Mo	-0.168 0.622	-0.181 0.594	

---

**J7.** Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre os dados aerogamaespectrométrico (K, Th e U), NDVI , Declividade para espécies e solos coletados na área de estudo.

---

**Correlação: Solos ; Plantas; Aerogama ; NDVI e Declividade**

---

Plantas (Th)	Solos (Th) 0,704 0,016	Plantas (Th)	Aerogama (Th)	NDVI
Aerogama (Th)	0,106 0,757	0,057 0,868		
NDVI	0,134 0,695	0,362 0,274	0,390 0,235	
Plantas (K)	0,396 0,228	0,298 0,374	0,607 0,047	0,367 0,266
Aerogama (K)	-0,259 0,442	-0,425 0,192	-0,231 0,494	-0,026 0,940
Solos (K)	0,306 0,361	0,161 0,637	0,212 0,531	0,149 0,662
Plantas (U)	0,009 0,979	0,104 0,762	-0,029 0,933	-0,066 0,847
Aerogama (U)	0,031 0,928	-0,080 0,815	0,852 0,001	0,214 0,528
Solo (U)	-0,368 0,265	-0,526 0,097	0,433 0,184	-0,472 0,143
Declividade	0,401 0,221	0,287 0,392	-0,103 0,763	0,648 0,031
Aerogama (K)	Plantas (K) -0,243 0,471	Aerogama (K)	Solos (K)	Plantas (U)
Solos (K)	0,620 0,042	-0,423 0,194		
Plantas (U)	-0,210 0,535	0,274 0,416	-0,246 0,465	
Aerogama (U)	0,652 0,030	0,097 0,776	0,188 0,580	0,254 0,452
Solo (U)	-0,099 0,771	-0,189 0,578	-0,044 0,899	-0,032 0,926
Declividade	-0,063 0,854	0,025 0,941	-0,010 0,978	-0,251 0,456
Solo (U)	Aerogama (U) 0,410 0,211	Solo (U)		
Declividade	-0,360 0,277	-0,586 0,058		

---



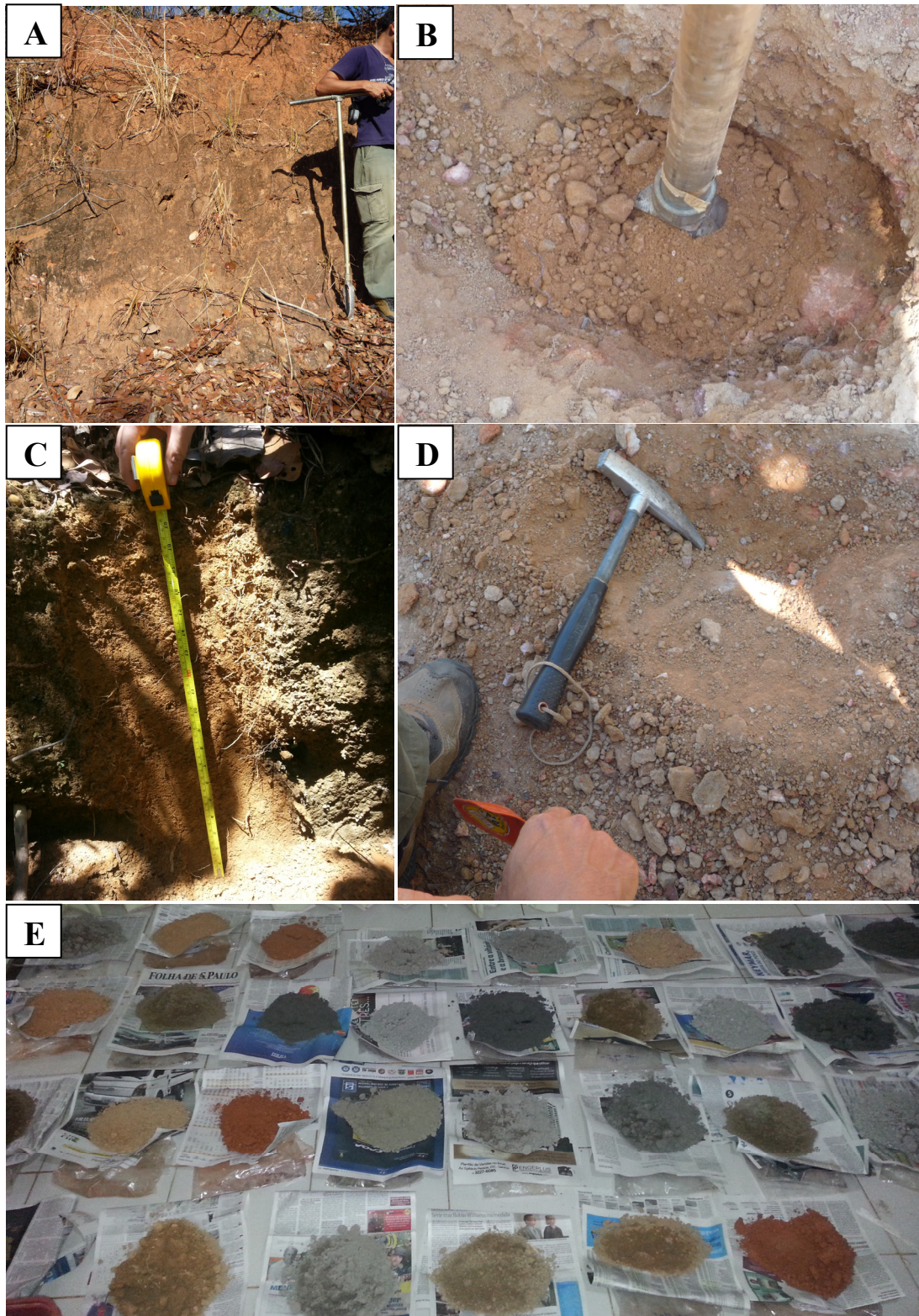
## APÊNDICE L



L1. Amostras de rocha coletadas na área de estudo: A - Monzogranito (Suite Aurumina), B - Quartzito Feldspático (Formação Arraias), C - Metasiltito (Formação Arraias).



## APÊNDICE M



**M1.** Processos de coleta de solo: (A) coleta de solo em trincheira, (B) tradagem, (C) medição de profundidade de um latossolo, (D) quebra de rocha em cambissolo, (E) amostras dos solos coletados.

