ReGeo ISSN: 2177-3246

INTEGRAÇÃO DE DADOS AEROGAMAESPECTROMÉTRICOS E ESPECTRAIS ASTER PARA A CARACTERIZAÇÃO DE LITOFÁCIES DA SUB-BACIA DE IRECÊ, BAHIA

INTEGRATION OF AIRBORNE GAMMA-RAY SPECTROMETRIC AND ASTER SPECTRAL DATA FOR LITHOFACIES CHARACTERIZATION OF THE IRECÊ SUB-BASIN, BAHIA, BRAZIL

INTEGRACIÓN DE DATOS AEROGAMMAESPECTROMÉTRICOS Y ESPECTRALES ASTER PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LITOFACIES DE LA SUBCUENCA DE IRECÊ, BAHÍA, BRASIL

https://doi.org/10.56238/revgeov17n11-148

Data de submissão: 25/10/2026 **Data de publicação:** 25/11/2026

Camila Figueredo Oliveira
Doutora em Geologia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)
E-mail: camylafigueredo@gmail.com

Aroldo Misi
Doutor em Geologia
Instituição: Universidade Federal da Bahia (UFBA)
E-mail: misi@ufba.br

Tatiana Silva Ribeiro
Doutora em Geologia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)
E-mail: tsribeiro@uefs.br

Rodrigo Nogueira de Vasconcelos
Doutor em Ecologia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)
E-mail: rnv@uefs.br

Washington de Jesus Sant'Anna da Franca Rocha
Doutor em Geologia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)
E-mail: wrocha@uefs.br

RESUMO

A gamaespectrometria aérea e o sensoriamento remoto multiespectral fornecem informações complementares sobre a composição das rochas e dos solos aflorantes e, em regiões semiáridas de vegetação esparsa, constituem ferramentas de baixo custo para refinar mapas geológicos regionais. Na Sub-bacia de Irecê (Cráton do São Francisco, Bahia), que hospeda os principais depósitos de fosfato e ocorrências de Pb-Zn da Formação Salitre, o mapa geológico disponível (escala 1:250.000) não discrimina variações litofaciológicas internas às unidades. Este trabalho integrou dados aerogamaespectrométricos do Projeto Aerogeofísico Centro Norte da Bahia (levantamento de 2012, linhas de voo espaçadas de 500 m, células de 50 m) e uma cena do sensor ASTER/Terra adquirida em

18 de setembro de 2007 para caracterizar as litofácies dos Grupos Una e Chapada Diamantina em uma área de aproximadamente 57 km × 39 km entre os municípios de América Dourada e Morro do Chapéu. Os grids de K, eTh e eU foram convertidos em mapas de razões (U/Th, Th/K e U/K), em composição ternária RGB e em um mapa de unidades gamaespectrométricas, obtido pela reclassificação dos três radioelementos em classes baixa, intermediária e alta por intervalos geométricos. A cena ASTER, corrigida para o efeito cross-talk e para os efeitos atmosféricos (FLAASH), foi processada para os índices de Sultan, de Abrams, de argila e de sílica/carbonato. O potássio delimita com clareza os diamictitos da Formação Bebedouro (K alto) e as rochas siliciclásticas do Grupo Chapada Diamantina (K baixo); eTh e eU são elevados na Formação Salitre, e as razões Th/K e U/K realçam a unidade B1, portadora das mineralizações de fosfato. Entre os índices espectrais, o de sílica/carbonato e o de argila separam os domínios carbonático e siliciclástico, enquanto os índices de Sultan e de Abrams individualizam os calcarenitos e calcissiltitos das unidades A+A1 e uma faixa de assinatura distinta que bordeja os diamictitos, compatível com os dolomitos de capa da Unidade C, não representada no mapa geológico. A integração mostra que a Formação Morro do Chapéu é melhor descrita pelos índices espectrais, enquanto a Formação Bebedouro é melhor descrita pela gamaespectrometria. A interpretação é qualitativa e não foi validada em campo, de modo que as feições identificadas constituem alvos para verificação geológica, sobretudo nas unidades de interesse metalogenético da Formação Salitre.

Palavras-chave: Gamaespectrometria Aérea. ASTER. Índices Espectrais. Grupo Una. Formação Salitre. Mapeamento Litológico.

ABSTRACT

Airborne gamma-ray spectrometry and multispectral remote sensing provide complementary information on the composition of outcropping rocks and soils and, in semiarid regions with sparse vegetation, are low-cost tools for refining regional geological maps. In the Irecê Sub-basin (São Francisco Craton, Bahia, Brazil), which hosts the main phosphate deposits and Pb-Zn occurrences of the Salitre Formation, the available geological map (1:250,000 scale) does not discriminate lithofacies variations within the mapped units. This study integrated airborne gamma-ray data from the Centro Norte da Bahia Airborne Geophysical Project (2012 survey, 500 m flight-line spacing, 50 m cells) and an ASTER/Terra scene acquired on 18 September 2007 to characterize the lithofacies of the Una and Chapada Diamantina groups in an area of approximately 57 km × 39 km between the municipalities of América Dourada and Morro do Chapéu. The K, eTh and eU grids were converted into ratio maps (U/Th, Th/K and U/K), an RGB ternary composite and a map of gamma-ray spectrometric units, obtained by reclassifying the three radioelements into low, intermediate and high classes using geometric intervals. The ASTER scene, corrected for the cross-talk effect and for atmospheric effects (FLAASH), was processed into the Sultan, Abrams, clay and silica/carbonate indices. Potassium clearly delimits the diamictites of the Bebedouro Formation (high K) and the siliciclastic rocks of the Chapada Diamantina Group (low K); eTh and eU are high over the Salitre Formation, and the Th/K and U/K ratios enhance unit B1, which hosts the phosphate mineralization. Among the spectral indices, the silica/carbonate and clay indices separate the carbonate and siliciclastic domains, whereas the Sultan and Abrams indices individualize the calcarenites and calcisiltites of units A+A1 and a belt of distinct signature bordering the diamictites, compatible with the cap dolomites of Unit C, which is not represented on the geological map. The integration shows that the Morro do Chapéu Formation is better described by the spectral indices, whereas the Bebedouro Formation is better described by gamma-ray spectrometry. The interpretation is qualitative and was not validated in the field, so the identified features constitute targets for geological verification, especially in the metallogenically relevant units of the Salitre Formation.

Keywords: Airborne Gamma-ray Spectrometry. ASTER. Spectral Indices. Una Group. Salitre Formation. Lithological Mapping.

RESUMEN
La gammaespectrometría aérea y la teledetección multiespectral proporcionan información complementaria sobre la composición de las rocas y los suelos aflorantes y, en regiones semiáridas con vegetación escasa, constituyen herramientas de bajo costo para refinar mapas geológicos regionales. En la Subcuenca de Irecê (Cratón de São Francisco, Bahía, Brasil), que alberga los principales depósitos de fosfato y ocurrencias de Pb-Zn de la Formación Salitre, el mapa geológico disponible (escala 1:250.000) no discrimina variaciones litofaciológicas internas a las unidades. Este trabajo integró datos aerogammaespectrométricos del Proyecto Aerogeofísico Centro Norte da Bahia (levantamiento de 2012, líneas de vuelo espaciadas 500 m, celdas de 50 m) y una escena del sensor ASTER/Terra adquirida el 18 de septiembre de 2007 para caracterizar las litofacies de los Grupos Una y Chapada Diamantina en un área de aproximadamente 57 km × 39 km entre los municipios de América Dourada y Morro do Chapéu. Las mallas de K, eTh y eU se convirtieron en mapas de razones (U/Th, Th/K y U/K), en una composición ternaria RGB y en un mapa de unidades gammaespectrométricas, obtenido mediante la reclasificación de los tres radioelementos en clases baja, intermedia y alta por intervalos geométricos. La escena ASTER, corregida para el efecto cross-talk y para los efectos atmosféricos (FLAASH), se procesó para obtener los índices de Sultan, de Abrams, de arcilla y de sílice/carbonato. El potasio delimita con claridad las diamictitas de la Formación Bebedouro (K alto) y las rocas siliciclásticas del Grupo Chapada Diamantina (K bajo); el eTh y el eU son elevados en la Formación Salitre, y las razones Th/K y U/K realzan la unidad B1, portadora de las mineralizaciones de fosfato. Entre los índices espectrales, el de sílice/carbonato y el de arcilla separan los dominios carbonático y siliciclástico, mientras que los índices de Sultan y de Abrams individualizan las calcarenitas y calcisiltitas de las unidades A+A1 y una franja de firma distinta que bordea las diamictitas, compatible con las dolomías de capa de la Unidad C, no representada en el mapa geológico. La integración muestra que la Formación Morro do Chapéu se describe mejor con los índices espectrales, mientras que la Formación Bebedouro se describe mejor con la gammaespectrometría. La interpretación es cualitativa y no fue validada en campo, por lo que los rasgos identificados constituyen objetivos para verificación geológica, sobre todo en las unidades de interés metalogenético de la Formación Salitre.

Palabras clave: Gammaespectrometría Aérea. ASTER. Índices Espectrales. Grupo Una. Formación Salitre. Cartografía Litológica.

1 INTRODUÇÃO

As informações do sensoriamento remoto juntamente com dados geofísicos obtidos por sensores aerotransportados estão auxiliando nos estudos geológicos, mapeamento litológico, na identificação de estruturas geológicas (dobras, falhas e fraturas). É utilizado também para o levantamento hidrogeológico, geomorfológico e na prospecção de bens minerais (ouro, cobre, ferro e fosfato, por exemplo). Nas últimas duas décadas, a integração de imagens multiespectrais com dados aerogeofísicos consolidou-se como estratégia para o mapeamento litológico preditivo, seja pela interpretação visual de produtos derivados, seja por classificadores supervisionados que combinam os dois conjuntos de dados (Schetselaar, 2000; Harris; Grunsky, 2015; Kuhn; Cracknell; Reading, 2018; Shebl *et al.*, 2021).

Os minerais possuem em sua composição, átomos e moléculas que determinam suas propriedades espectrais que, por sua vez, definem o seu comportamento ao longo do espectro eletromagnético (Crósta, 1993). Com a evolução dos equipamentos e softwares esses dados são processados, aplicando-se técnicas de mapeamento e classificação espectral, para discriminação de rochas e minerais. O sensor *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), com bandas no infravermelho de ondas curtas (SWIR) e no infravermelho termal (TIR), tornou-se o principal sensor orbital multiespectral para esse fim, pois permite discriminar carbonatos, argilominerais e rochas ricas em sílica por meio de razões de bandas simples (Abrams; Hook, 1995; Rowan; Mars, 2003; Ninomiya; Fu; Cudahy, 2005; Abrams; Yamaguchi, 2019).

A interpretação dos dados gamaespectrométricos e espectrais geram informações importantes sobre a composição das unidades litológicas de uma determinada região, assim como sobre a localização de regiões com maior ou menor concentração de um determinado elemento, o que pode ajudar a delimitar áreas de interesse para exploração mineral. Porém, esses dados têm pouco alcance em profundidade. As informações obtidas para interpretação limitam-se a contatos geológicos superficiais e/ou a afloramentos de um determinado litotipo. No caso da gamaespectrometria, a radiação registrada provém das primeiras dezenas de centímetros do solo ou da rocha, e sua interpretação litológica depende do comportamento geoquímico distinto do potássio, do tório e do urânio durante o intemperismo (Dickson; Fraser; Kinsey-Henderson, 1996; IAEA, 2003; Wilford, 2012).

Na área de estudo foram realizados alguns trabalhos utilizando dados a partir do sensoriamento remoto. Franca-Rocha (2001) desenvolveu trabalhos em modelagem metalogenética na Sub-bacia de Irecê usando métodos variados em processamento de imagens de satélite LANDSAT-TM. Franca-Rocha e Misi (2005) utilizaram sete temas com aplicação de um modelo de análise espacial, no entorno

das mineralizações de fosfato, com o método de peso das evidências. Os sete temas consistiram em: geologia, modelo digital de elevação, dados de sensoriamento remoto (LANDSAT-TM), dados radiométricos e geoquímica de solo, além de 21 ocorrências/depósitos de fósforo. Esses trabalhos basearam-se em imagens Landsat-TM, cujas bandas não permitem explorar as feições de absorção de carbonatos e argilominerais no SWIR nem as feições de emissividade de sílica e carbonatos no TIR, hoje acessíveis com o ASTER; além disso, o levantamento aerogeofísico de alta resolução do Projeto Centro Norte da Bahia só foi realizado em 2012. Permanece, portanto, a lacuna de uma caracterização litofaciológica da sub-bacia que combine esses dois conjuntos de dados.

A área de estudo apresenta bons resultados na aplicação de imagens multiespectrais. O clima semi-árido favorece o desenvolvimento de uma vegetação esparsa e de pequeno porte, permitindo a preservação dos afloramentos. É importante ressaltar que a área de trabalho hospeda litofácies associadas com os principais depósitos de fosfato, da Sub-bacia de Irecê além de ocorrências de sulfetos de Zn e Pb. Os fosforitos estromatolíticos da Formação Salitre, hospedados na unidade B1, estão entre os principais depósitos sedimentares de fosfato do Brasil, e sua gênese tem sido revisitada à luz de novos dados sedimentológicos, isotópicos e geocronológicos (Misi; Kyle, 1994; Caird *et al.*, 2017; Sanders; Grotzinger, 2021; Bedoya-Rueda *et al.*, 2024). Como a apatita concentra urânio, as mineralizações fosfáticas tendem a produzir anomalias radiométricas em relação às encaixantes carbonáticas (Ferreira; Moreira-Nordemann; Nordemann, 1992; Pufahl; Groat, 2017), o que torna a gamaespectrometria particularmente adequada a essa bacia.

O principal objetivo deste trabalho foi proceder uma análise investigativa relacionando características espectrais obtidas a partir do processamento de imagens do sensor Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), juntamente com dados gamaespectrométricos aéreos. Dessa forma, a interpretação dos dados gamaespectrométricos juntamente com dados espectrais poderá adicionar informações importantes sobre a composição das unidades litofaciológicas, assim como sobre a localização de regiões com maior ou menor concentração de elementos de interesses para a prospecção mineral. De forma específica, buscou-se:

1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

a) caracterizar a distribuição de K, eTh e eU, de suas razões e da composição ternária na área de estudo e associá-la às unidades do mapa geológico regional;
b) elaborar um mapa de unidades gamaespectrométricas a partir da reclassificação dos três radioelementos em classes de concentração baixa, intermediária e alta;

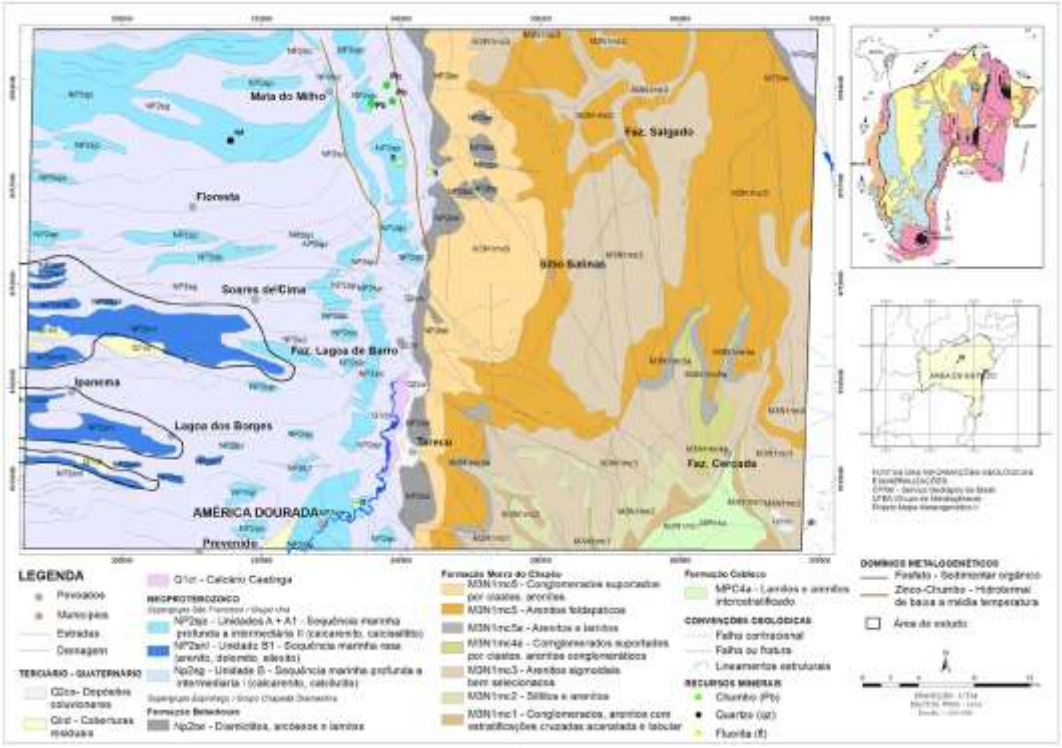
c) obter e interpretar os índices espectrais de Sultan, de Abrams, de argila e de sílica/carbonato a partir da cena ASTER;
d) comparar as assinaturas gamaespectrométricas e espectrais de cada litofácies, identificando as unidades melhor discriminadas por cada conjunto de dados e as feições não representadas no mapa geológico.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

A área de estudo está inserida no contexto geotectônico do Cráton do São Francisco e associada com sequências sedimentares dos Supergrupos São Francisco e Espinhaço. O Cráton do São Francisco foi definido por Almeida (1977) como uma entidade geotectônica consolidada entre 2,6 e 1,8 Ga, cujos limites foram posteriormente redefinidos (Alkmim; Brito Neves; Alves, 1993). Nele distinguem-se três grandes conjuntos de rochas pré-cambrianas: o Supergrupo São Francisco e o Supergrupo Espinhaço, que representam coberturas plataformais neoproterozoicas e mesoproterozoicas, respectivamente, e a Associação Pré-Espinhaço, de idade Arqueana-Paleoproterozóica, que constitui o embasamento (Dominguez, 1993, 1996; Alkmim; Martins-Neto, 2012). Apenas os dois primeiros Supergrupos ocorrem na área de estudo, mostrados na Figura 2.

Figura 1. Mapa geológico regional da área de estudo, com as unidades dos Supergrupos Espinhaço (Grupo Chapada Diamantina: formações Caboclo e Morro do Chapéu) e São Francisco (Grupo Una: formações Bebedouro e Salitre, com as unidades informais A+A1 – Np2sjc, B – Np2sg e B1 – Np2snl), as coberturas terciário-quaternárias, as ocorrências minerais e os domínios metalogenéticos.



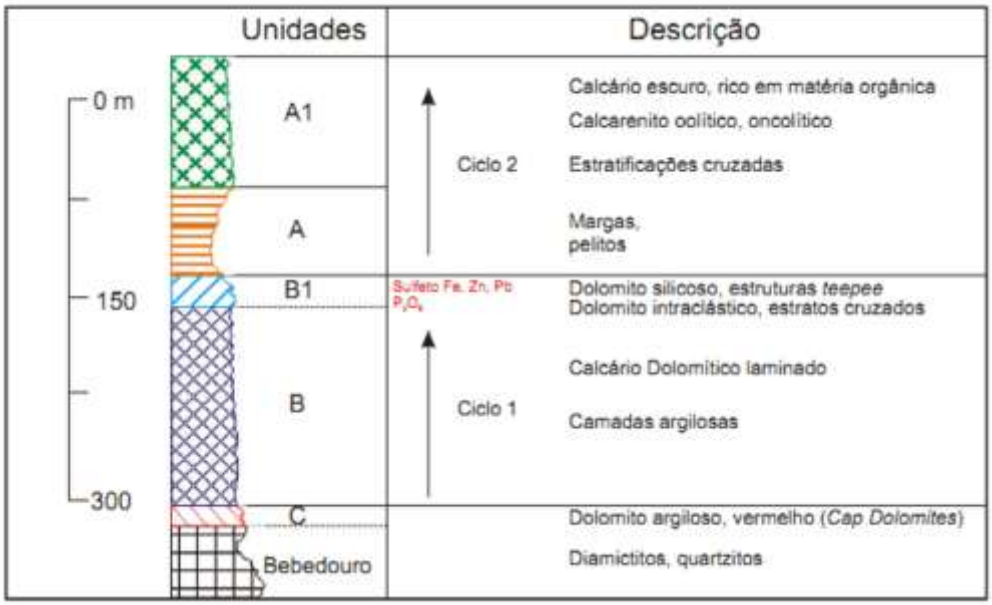
Fonte: modificado de Sampaio *et al.* (2001); bases cartográficas da CPRM e do Projeto Mapa Metalogenético II (UFBA/CBPM).

O Supergrupo Espinhaço, de idade mesoproterozoica, está presente no setor leste da área e nessa região é representado pelas formações Caboclo e Morro do Chapéu, do Grupo Chapada Diamantina (Danderfer, 1990; Pedreira, 1994). O Grupo Chapada Diamantina representa um ciclo de sedimentação, com arenito, pelito e calcário em ambientes variando de continental a marinho raso. O Supergrupo São Francisco assenta-se discordantemente sobre as rochas do Supergrupo Espinhaço e é representado na região pelo Grupo Una, formado pelas formações Bebedouro e Salitre (Misi *et al.*, 2011).

A Formação Bebedouro representa sedimentação de natureza terrígena, depositada em ambiente glácio-marinho. Os principais litotipos são diamictitos, pelitos e arenitos, sempre com pronunciada imaturidade textural e composicional, conforme as fácies descritas por Figueiredo (2008). Datações realizadas pelo método Rb-Sr em pelitos da Formação Bebedouro indicam idade em torno de 932 ± 30 Ma (episódio de glaciação) (Macedo; Bonhomme, 1984), valor que deve ser lido com cautela, pois dados mais recentes posicionam a deposição do Grupo Una no Criogeniano–Ediacarano (Misi *et al.*, 2011; Santana *et al.*, 2021; Bedoya-Rueda *et al.*, 2024).

A Formação Salitre é largamente predominante na Sub-bacia de Irecê, região oeste da área de estudo, e constitui uma espessa sucessão carbonática com intercalações siliciclásticas, que registram uma extensa plataforma marinha englobando as unidades Np2sjc, Np2snl e Np2sg (Souza *et al.*, 1993). Essa formação foi subdividida por Misi (1979) em cinco unidades informais (C, B, B1, A e A1), apresentadas na Figura 3. A unidade B1 contém as principais ocorrências de Pb-Zn e de fosfato da região. No setor central da bacia, região dos municípios de Irecê e Lapão (BA), a Formação Salitre corresponde a uma sucessão de calcilutitos, calcarenitos, calcirruditos e, subordinadamente, dolomitos, estromatólitos fosfáticos e raros sedimentos siliciclásticos, arranjados no final de um ciclo transgressivo-regressivo (Misi, 1993; Misi; Veizer, 1996). Os fosforitos ocorrem associados a estromatólitos e a dolomitos de ambiente de maré, em condições de plataforma rasa, e sua formação tem sido relacionada à dolomitização precoce e ao evento de oxigenação neoproterozoico (Misi; Kyle, 1994; Caird *et al.*, 2017; Sanders; Grotzinger, 2021; Bedoya-Rueda *et al.*, 2024). Estudos isotópicos de $^{87}Sr/^{86}Sr$ feitos por Misi e Veizer (1998) colocaram os sedimentos carbonáticos da Formação Salitre no Criogeniano (850–635 Ma). Mais recentemente, Santana (2016) revelou a presença de níveis de tufitos na porção intermediária da Unidade B, em uma seção a sul de Lapão, na Sub-bacia de Irecê, e datou zircões detríticos com idade máxima de 670 Ma (U-Pb SHRIMP), idade máxima de deposição posteriormente consolidada por Santana *et al.* (2021).

Figura 2. Coluna estratigráfica da Formação Salitre, com as unidades informais C, B, B1, A e A1, os ciclos deposicionais e a posição das mineralizações de sulfetos (Fe, Zn, Pb) e de fosfato (P_2O_5) na unidade B1.



Fonte: modificado de Misi e Silva (1996).

As coberturas fanerozoicas podem ser separadas em dois subconjuntos principais de sedimentos: (i) um subconjunto é representado por calcários (calcretes) beges, pertencentes à Formação Caatinga, de idade quaternária (Branner, 1911); e (ii) o outro subconjunto contempla os sedimentos Tércio-quaternários detríticos, inconsolidados, correlacionados à evolução das superfícies de pediplanação Sulamericana e Velhas, de King (1956) e geralmente provêm de depósitos fluviais, flúvio-lacustres e eólicos (Inda; Barbosa, 1978).

2.2 GAMAESPECTROMETRIA AÉREA NO MAPEAMENTO LITOLÓGICO

A gamaespectrometria aérea mede a radiação gama emitida pelo decaimento do ^{40}K e de nuclídeos das séries do ^{232}Th e do ^{238}U presentes nas primeiras dezenas de centímetros do terreno. Como o tório e o urânio são estimados a partir de nuclídeos-filhos (^{208}Tl e ^{214}Bi), supondo equilíbrio radioativo, suas concentrações são expressas como equivalentes (eTh e eU, em ppm), enquanto o potássio é medido diretamente (em %) (IAEA, 2003). A interpretação litológica desses dados apoia-se no fato de que os três radioelementos se concentram em minerais distintos: o potássio em feldspatos potássicos, micas e argilominerais como a illita; o tório em minerais acessórios resistatos, como monazita, zircão, alanita e xenotímio; e o urânio em minerais acessórios, em fosfatos (apatita) e em matéria orgânica, sendo o mais sensível às condições de oxirredução do ambiente (Dickson; Fraser; Kinsey-Henderson, 1996; Ulbrich *et al.*, 2009). Rochas carbonáticas puras, quartzo-arenitos e rochas máficas apresentam, em geral, baixas concentrações dos três elementos, enquanto rochas félsicas, arcóseos e pelitos tendem a concentrações mais elevadas.

Durante o intemperismo, o potássio é lixiviado dos feldspatos e das micas e retido apenas parcialmente nos argilominerais neoformados; o tório permanece nos minerais resistatos e tende a se concentrar nos solos residuais e em sedimentos aluvionares e coluvionares; e o urânio é móvel em condições oxidantes, precipitando-se em ambientes redutores ou ricos em fósforo e matéria orgânica (Dickson; Fraser; Kinsey-Henderson, 1996; Wilford, 2012). Por isso, a assinatura gamaespectrométrica de uma unidade reflete tanto a composição da rocha-mãe quanto o grau de evolução do regolito, e as razões entre os elementos (Th/K, U/K e U/Th) e as composições ternárias RGB são empregadas para normalizar diferenças de intensidade e realçar contrastes litológicos e zonas de alteração (Pires, 1995; IAEA, 2003; Ramos; Pires, 2010). O tório, em particular, é considerado um bom mapeador litológico em razão de sua baixa mobilidade superficial, ao passo que anomalias de K e de U são frequentemente associadas a alteração hidrotermal e a processos supergênicos (Pires, 1995; Ulbrich *et al.*, 2009).

Na Sub-bacia de Irecê, a radioatividade natural foi estudada por Ferreira, Moreira-Nordemann e Nordemann (1992), que mostraram que as rochas calcárias encaixantes das mineralizações fosfáticas apresentam baixos teores de radioelementos, em contraste com os níveis mineralizados, nos quais a carbonato-fluorapatita concentra urânio e tório. Esse contraste é a base do uso de levantamentos radiométricos na prospecção de fosforitos sedimentares em diversas bacias do mundo, uma vez que o urânio incorporado à estrutura da apatita produz anomalias de eU e de U/Th (Pufahl; Groat, 2017). Na própria bacia, dados radiométricos foram utilizados como um dos temas evidenciais na modelagem espacial de depósitos de fosfato (Franca-Rocha; Misi, 2005), e a seleção de alvos a partir de anomalias de U/Th no Projeto Metalogenético do Estado da Bahia levou à identificação de ocorrências com teores expressivos de fosfato (Bastos Abram; Bahiense; Almeida, 2016).

2.3 ÍNDICES ESPECTRAIS ASTER E INTEGRAÇÃO DE DADOS

O sensor ASTER, a bordo do satélite Terra, possui 14 bandas espectrais distribuídas em três subsistemas: três bandas no visível e infravermelho próximo (VNIR, 15 m), seis bandas no SWIR (30 m) e cinco bandas no TIR (90 m) (Abrams; Hook, 1995; ERSDAC, 2003). As bandas do SWIR foram posicionadas para registrar as feições de absorção de Al-OH, Mg-OH e CO_3 entre 2,1 e 2,4 μm, características de argilominerais, micas e carbonatos, enquanto as bandas do TIR permitem explorar as feições de emissividade do quartzo e dos carbonatos entre 8 e 12 μm, o que torna o sensor adequado à discriminação de rochas carbonáticas, siliciclásticas e zonas de alteração (Rowan; Mars, 2003; Ninomiya; Fu; Cudahy, 2005; Abrams; Yamaguchi, 2019).

O processamento de imagens consistiu fundamentalmente de operações aritméticas para a extração de índices espectrais. Segundo Menezes e Almeida (2012), a aritmética de bandas é uma das mais simples formas de processamento de imagens e que pode ter resultados expressivos. A facilidade para executar as operações aritméticas de soma, subtração, multiplicação e divisão é uma notável demonstração das vantagens do uso de processamento de imagens multiespectrais. É um processo que visa obter realces de toda a área de uma imagem ou de alvos específicos de interesse do analista. As operações aritméticas realizam um processamento de transformação dos dados a partir da combinação de imagens, gerando como resultado uma nova matriz de dados. O processo de transformação é executado pixel a pixel por meio de uma regra matemática pré-definida envolvendo, normalmente no mínimo duas bandas do mesmo sensor ou bandas de datas de aquisição diferentes. Assim essa metodologia é utilizada para demonstrar o contraste espectral de feições de absorção específicas.

Há vasta literatura descrevendo os resultados de pesquisas que desenvolveram e aplicaram índices que auxiliam no mapeamento espectral de unidades litológicas. O Índice de Sultan (Sultan *et*

al., 1987) utiliza razão de bandas do infravermelho de ondas curtas (SWIR) para identificar e diferenciar litologias; originalmente proposto para o Landsat TM em terrenos áridos do Egito, foi adaptado às bandas do ASTER por Kalinowski e Oliver (2004). O Índice de Abrams (Abrams; Hook, 1995) aplica a aritmética de bandas para determinar a extensão da correlação existente entre duas ou mais bandas; o foco deste índice é remover a redundância dos dados multiespectrais para mapeamento de zonas de alteração hidrotermal. Alguns processamentos de imagens através da aritmética de bandas visam não somente a discriminação litológica, mas objetivam gerar imagens com profundidade relativa das bandas de absorção. Com esse objetivo foi realizado o índice de absorção da argila (Bierwirth, 2002), pois este oferece uma melhor discriminação de áreas ricas em argilominerais. Por fim, os índices de quartzo, de carbonato e máfico, baseados nas bandas do TIR, foram propostos por Ninomiya, Fu e Cudahy (2005) e compilados, com os anteriores, no manual de processamento de índices minerais do ASTER (Kalinowski; Oliver, 2004).

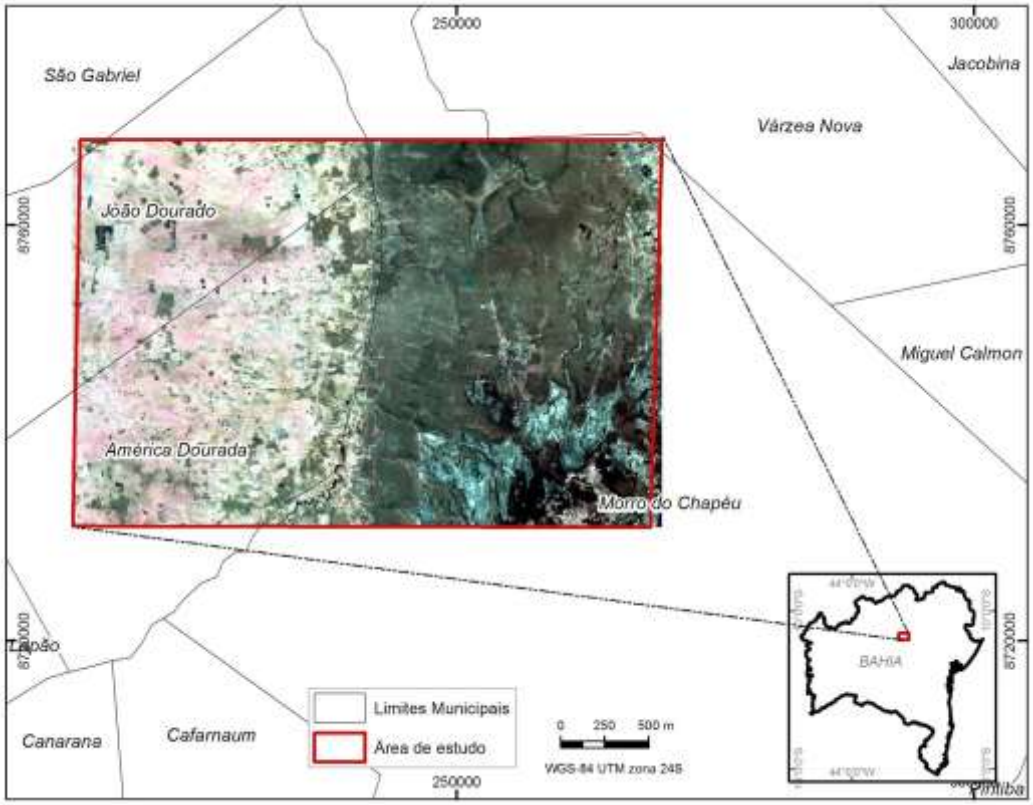
A gamaespectrometria e os índices espectrais respondem a propriedades distintas da superfície: a primeira, à geoquímica dos radioelementos no regolito; os segundos, à mineralogia dos primeiros micrômetros da superfície, incluindo solos, crostas e vegetação. Essa complementaridade explica os ganhos de acurácia obtidos quando os dois tipos de dados são integrados ao mapeamento litológico, tanto por interpretação visual (Schetselaar, 2000) quanto por classificadores como Random Forest e máquinas de vetores de suporte (Cracknell; Reading, 2014; Harris; Grunsky, 2015; Kuhn; Cracknell; Reading, 2018; Shebl *et al.*, 2021). Esses trabalhos também alertam que a cobertura de solos transportados, a vegetação e o uso agrícola do terreno podem desacoplar as assinaturas da litologia subjacente, o que exige a validação de campo das unidades interpretadas.

3 METODOLOGIA

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa foi realizada na borda leste da Sub-bacia de Irecê e na porção adjacente da Chapada Diamantina, em uma área retangular de aproximadamente 57 km × 39 km, delimitada pelas coordenadas UTM aproximadas 213.000–270.000 m E e 8.729.000–8.768.000 m N (WGS-84, zona 24S), que abrange, na porção oeste, parte dos municípios de João Dourado e América Dourada e, na porção leste, parte do município de Morro do Chapéu, conforme a Figura 1. Essa região sofre forte influência do clima semiárido, classificado como BSh na classificação de Köppen (Alvares *et al.*, 2013), com precipitação entre 250 a 500 mm, eventualmente atingindo 800 a 1.200 mm, segundo a compilação de dados do Serviço Geológico do Brasil utilizada pelos autores.

Figura 3. Localização e situação da área de estudo (retângulo vermelho) sobre composição colorida de imagem orbital, com os limites municipais e a posição no estado da Bahia (detalhe). Nota: a barra de escala do mapa principal apresenta unidade incorreta (metros); pelas coordenadas UTM, a área mede aproximadamente 57 km × 39 km.



Nota: a barra de escala do mapa principal apresenta unidade incorreta (metros); pelas coordenadas UTM, a área mede aproximadamente 57 km × 39 km.
Fonte: Elaborado pelos autores

3.2 DADOS AEROGAMAESPECTROMÉTRICOS E PROCESSAMENTO

Os dados aerogeofísicos utilizados neste estudo fazem parte do Projeto Aerogeofísico Centro Norte da Bahia, realizado em 2012 e foram cedidos pela Companhia Baiana de Pesquisa Mineral (CBPM) dentro do âmbito do Projeto Mapa Metalogenético II. A aquisição de dados foi realizada sistematicamente ao longo de perfis, nos quais foram realizadas medidas gamaespectrométricas consecutivas com intervalo de 1 s, aproximadamente 70 metros. Foram adquiridos perfis aerogamaespectrométricos de alta resolução com linhas de voo espaçadas em 500 m e orientadas na direção E-W e linhas de controle espaçadas em 10.000 m, orientadas na direção N-S. A altura de voo foi fixada em 100 m (LASA, 2012).

Os dados foram disponibilizados após serem pré-processados, que inclui a correção do tempo morto, filtragem da altura, compensação da radiação cósmica e da energia medida no canal de urânio no *upward looking*, correção do erro de paralaxe, cálculo da altura efetiva do voo, remoção do *background* da aeronave, cósmico e do radônio, correção do efeito Compton, correção altimétrica e por fim, a conversão dos dados de contagem por segundo para a concentração dos elementos

radiométricos. Essa sequência corresponde ao procedimento padrão recomendado para levantamentos aerogamaespectrométricos (IAEA, 2003). O pré-processamento realizado anterior à disponibilização dos dados aerogeofísicos não descarta uma avaliação dos dados, relacionada à análise da distribuição espacial por meio de um mapa com a distribuição das linhas de voo, analisando possíveis erros direcionais e repetição de medidas num mesmo ponto e a verificação dos valores numéricos dentro do banco de dados a fim de evitar erros devido à automatização dos processos de correções nos dados.

Posteriormente, foram escolhidos o método de interpolação dos dados para geração de uma malha regular (*grid*) e o tamanho de célula unitária para confecção deste *grid*. O método de interpolação utilizado foi o bi-direcional, que é ideal para dados orientados em linhas pois tende a fortalecer as tendências perpendiculares à direção das linhas do levantamento (Geosoft, 2001). Segundo Gunn (1998), a interpolação de dados produz interpolações realísticas se as células unitárias não ultrapassarem 20-25% do espaçamento entre as linhas unitárias, assim, foram utilizadas células unitárias de 100 metros regridadas para 50 metros.

Com base no método de interpolação e célula unitária definidas, foram gerados *grids* relacionados à distribuição do potássio (K), urânio (U) e tório (Th) da área de estudo. A partir dessas grids foram realizadas imagens isoladas dos radionuclídeos (K em %, eTh em ppm, eU em ppm), e logo após gerou-se cenas das razões U/Th, U/K e Th/K correlacionando-as com a litologia. Foi elaborado o mapa ternário, que é combinação dos três elementos em apenas uma imagem nas composições RGB, os valores relativos às cores primárias, vermelho, verde e azul, são somados de tal modo que as cores mais saturadas (esbranquiçadas) da imagem ternária refletem intensidades mais altas nos três elementos formadores. No mapa ternário utilizou-se os canais do K, do Th e do U, no canal do R(vermelho), G (verde) e B (azul) respectivamente.

A partir dos *grids* foram geradas classes de distribuição dos radioelementos para a área de estudo. Estas classes foram produzidas utilizando o método da classificação por intervalos geométricos, que consiste em intervalos de classe que possuem uma série geométrica, minimizando a soma dos quadrados do número de elementos em cada classe, o que garante que cada intervalo tenha aproximadamente o mesmo número de valores e que a mudança entre os intervalos seja bastante consistente (ESRI, 2014). As classes criadas para os grids de potássio, urânio e tório foram reclassificadas para uma escala de baixa, intermediária e alta concentração dos radioelementos para que pudessem ser facilmente relacionados aos dados de geologia, como mostra a Tabela 1. Os limites superiores da classe 3 correspondem aos valores máximos de cada *grid* na área de estudo.

Tabela 1. Classes de concentração de K, eTh e eU adotadas na análise gamaespectrométrica da área de estudo (intervalos geométricos).

Classe	K (%)	eTh (ppm)	eU (ppm)
1 – Baixa	0 – 0,243	0 – 5,189	0 – 0,334
2 – Intermediária	0,243 – 1,363	5,189 – 12,624	0,334 – 1,231
3 – Alta	1,363 – 6,531	12,624 – 23,280	1,231 – 3,645

Fonte: dados da pesquisa.

A combinação das três classes gerou o mapa de unidades gamaespectrométricas, em que cada unidade corresponde a uma associação de classes de K, eTh e eU. A interpretação da gamaespectrometria em relação às unidades geológicas foi realizada considerando a concentração do potássio, urânio e tório em conjunto para cada uma das litologias apresentadas no mapa geológico regional da área de estudo.

3.3 DADOS ASTER E ÍNDICES ESPECTRAIS

No mapeamento multiespectral, foi utilizada a cena do sensor ASTER do satélite Terra, produto de nível 1T identificado como AST_L1T_00309182007131232_20150521093844_6477, adquirida em 18 de setembro de 2007. Esta imagem apresenta 14 bandas espectrais correspondentes ao intervalo de 0,52 a 11,65 μm, ou seja, do visível (VNIR) ao infravermelho termal (TIR) do espectro eletromagnético, com resoluções espaciais de 15 m (VNIR), 30 m (SWIR) e 90 m (TIR) (ERSDAC, 2003).

Para fazer o processamento da imagem, primeiramente foi necessário fazer a correção das imagens para o efeito *cross-talk*, que atinge as bandas do SWIR. Este efeito é causado pelo efeito de dispersão (vazamento) da energia eletromagnética que incide na banda 4 do sensor (ERSDAC, 2003; Iwasaki; Tonooka, 2005). Posteriormente foi realizada a correção atmosférica que visa à diminuição dos efeitos de absorção e espalhamento da radiação existente para o sensor devido à interação de partículas e gases da atmosfera. A correção atmosférica foi realizada com auxílio do módulo FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*), do *software* ENVI 5.1, no qual foram configurados os parâmetros referentes ao sensor, como o tipo do sensor, a data e hora de varredura do sensor sobre a superfície analisada. Foram também configurados os parâmetros para o modelo de atmosfera, como o tipo de ambiente, presença de nuvens, altura média da área e o tipo de clima. Os valores adotados para esses parâmetros não foram registrados pelos autores.

Nesse estudo utilizou-se os índices de Sultan, Abrams, o de argila e o Silica Carbonato conforme indicado na Tabela 2. Os índices de Sultan e de Abrams e o de sílica/carbonato são composições coloridas RGB de três razões de bandas, enquanto o índice de argila é uma imagem de banda única. Para realizar o índice de sílica/carbonato utilizaram-se as bandas 10 a 14 do infravermelho

termal (8,1 a 11,65 µm), região em que o quartzo apresenta feições de emissividade e os carbonatos, uma feição de absorção próxima de 11,3 µm (Ninomiya; Fu; Cudahy, 2005); o índice de argila, por sua vez, explora a feição de absorção de Al-OH centrada na banda 6 (2,2 µm) do SWIR (Bierwirth, 2002).

Tabela 2. Índices espectrais calculados a partir das bandas do sensor ASTER e canais de cor das composições.

Índice	Vermelho (R)	Verde (G)	Azul (B)
Discriminação de Sultan	4/7	4/1	(2/3) × (4/3)
Discriminação de Abrams	4/7	4/3	2/1
Sílica/carbonato (índices de quartzo, carbonato e máfico)	(11 × 11)/(10 × 12)	13/14	12/13
Argila	$(5 \times 7)/6^2$ (banda única)		

Fonte: Kalinowski e Oliver (2004), com base em Sultan *et al.* (1987), Abrams e Hook (1995), Bierwirth (2002) e Ninomiya, Fu e Cudahy (2005).

3.4 INTEGRAÇÃO E INTERPRETAÇÃO

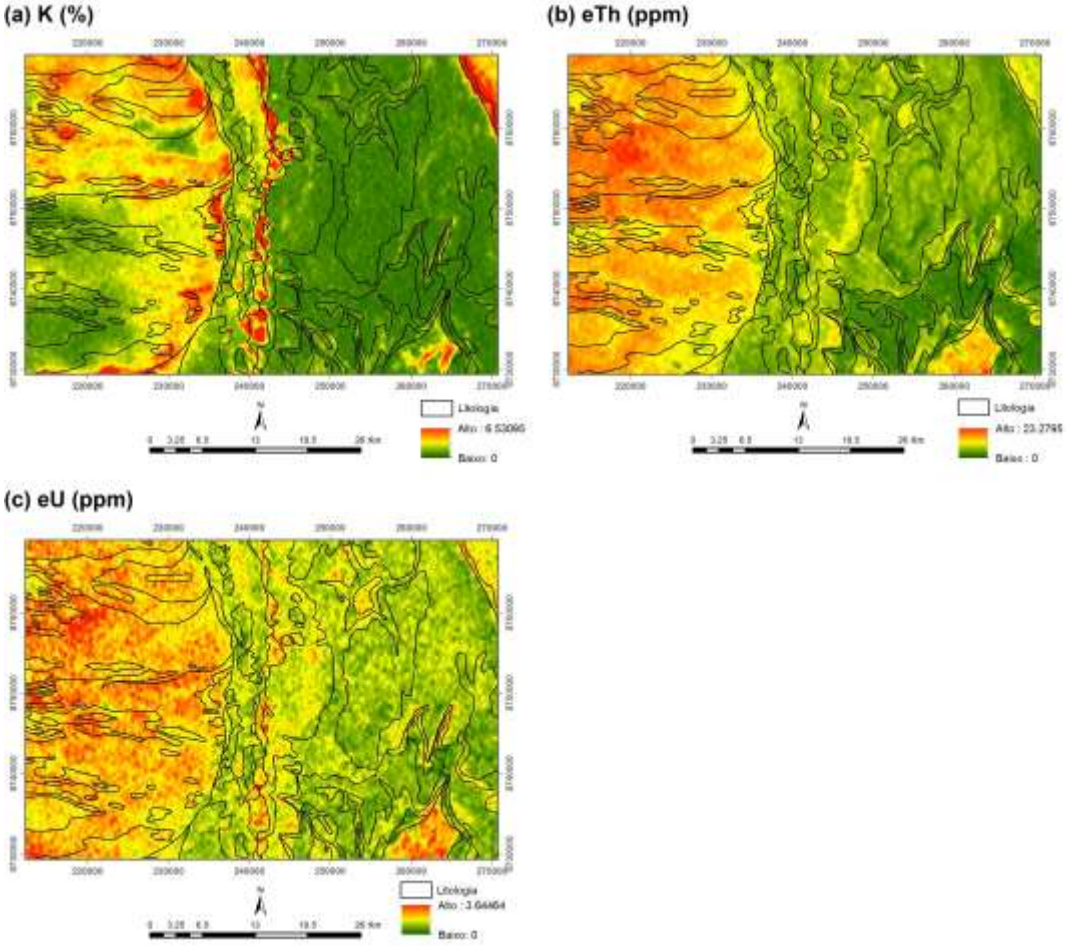
Os produtos gamaespectrométricos e espectrais foram georreferenciados no mesmo sistema de coordenadas (UTM, zona 24S) e sobrepostos aos contatos litológicos do mapa geológico regional (Figura 2) em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (ESRI, 2014). A interpretação foi qualitativa e visual: para cada unidade litoestratigráfica, descreveram-se a associação de classes de K, eTh e eU, o comportamento nas razões e no mapa ternário e os padrões de cor em cada índice espectral, destacando-se as unidades bem discriminadas por cada conjunto de dados, as variações internas às unidades e as feições não representadas no mapa geológico. Não foram realizadas classificações supervisionadas nem verificações de campo, de modo que as feições identificadas são apresentadas como hipóteses de mapeamento a serem validadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO GAMAESPECTROMÉTRICA DAS LITOFÁCIES

Os elementos radioativos estudados (K, Th e U) possuem uma abundância média na crosta superior de 2,3%, 12 ppm e 2,7 ppm respectivamente (IAEA, 2003). Pelos limites da Tabela 1, as classes 1 e 2 situam-se integralmente abaixo dessas médias, e apenas a classe 3 inclui valores superiores a elas. Os mapas dos canais de K, eTh e eU são apresentados na Figura 4.

Figura 4. Mapas de concentração dos radioelementos na área de estudo: (a) potássio (K, %); (b) tório equivalente (eTh, ppm); (c) urânio equivalente (eU, ppm). Os tons verde e amarelo significam baixa concentração do radioelemento, enquanto os tons de vermelho significam alta concentração, de acordo com o apresentado nas respectivas legendas. As linhas pretas representam o contorno litológico do mapa geológico regional. Coordenadas UTM (zona 24S).



Fonte: Elaborado pelos autores

A distribuição de K delimita muito bem os Grupos litológicos da área de estudo. Nota-se baixas concentrações desse elemento nas rochas siliciclásticas do Grupo Chapada Diamantina (parte oriental da área), na unidade B1 da Formação Salitre e na transição entre os diamictitos da Formação Bebedouro com a unidade A+A1 (calcarenitos e calcissiltitos). Por sua vez, os diamictitos são bem mapeados pelo canal de K, possuindo alta concentração deste elemento na parte central da área, ao longo da coordenada UTM 240.000E. O mesmo ocorre com a unidade B e A+A1, destacando as fácies argilosas das mesmas formando um arco em torno das coordenadas UTM 230.000E e concentrações de cores avermelhadas no quadrante noroeste da área em discussão. A resposta elevada de K nos diamictitos é coerente com a imaturidade composicional dessa unidade, rica em feldspatos e em matriz pelítica, descrita por Figueiredo (2008), enquanto os baixos valores nos arenitos do Grupo Chapada Diamantina refletem a maturidade mineralógica de rochas dominadas por quartzo, nas quais o potássio

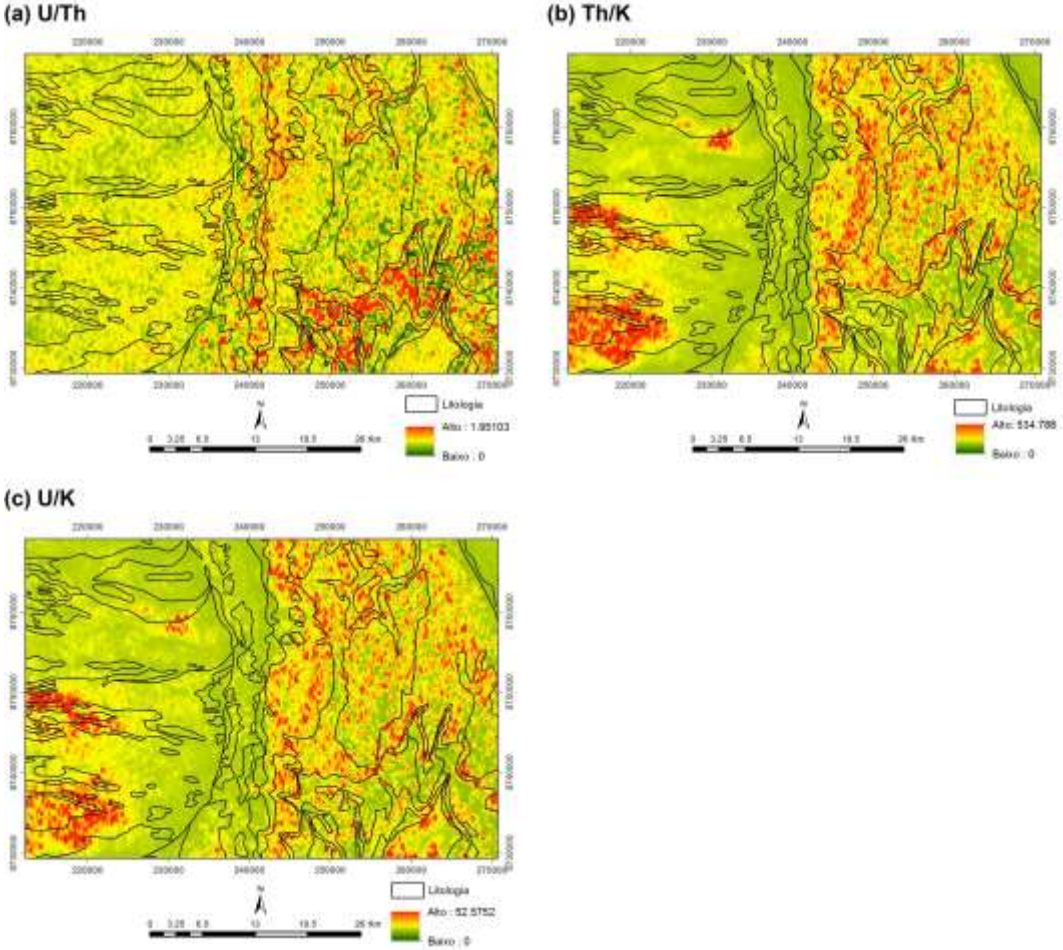
é escasso e facilmente lixiviado durante o intemperismo (Dickson; Fraser; Kinsey-Henderson, 1996; Wilford, 2012).

Quanto ao tório, a sua distribuição é alta, especialmente na Fm Salitre e baixa a intermediária nos arenitos e conglomerados do Grupo Chapada Diamantina. O tório comumente está presente na alanita, monazita, xenotímio e zirconita. Sendo estáveis no processo de intemperismo, verifica-se que a monazita e a zirconita podem acumular-se como minerais pesados em depósitos aluvionares ou coluvionares. Segundo Pires (1995), o tório é apontado como um bom mapeador litológico em função de sua pouca mobilidade no ambiente superficial. Como rochas carbonáticas puras são, em regra, pobres em radioelementos, os valores elevados de eTh sobre a Formação Salitre indicam que a resposta registrada provém, em grande parte, dos solos residuais argilosos e das coberturas que se desenvolvem sobre os carbonatos no domínio da sub-bacia, nos quais os minerais resistatos se concentram à medida que o carbonato é dissolvido; essa possibilidade precisa ser verificada em campo.

O urânio apresenta altas concentrações nas unidades da formação Salitre na parte ocidental da área e concentrações intermediárias na formação Caboclo na parte oriental da área, como pode ser visto na Figura 4c. Esse elemento pode estar presente como traço na apatita e monazita, além de compor a estrutura principal da uraninita e uranita, presentes nas unidades carbonáticas. A associação entre urânio e níveis fosfáticos é esperada na Formação Salitre, cujos fosforitos estromatolíticos da unidade B1 são compostos por carbonato-fluorapatita (Misi; Kyle, 1994; Caird *et al.*, 2017).

Tendo considerado todas estas premissas buscou-se observar o comportamento das cenas em função da razão de elementos conforme a Figura 5.

Figura 5. Mapas das razões entre radioelementos: (a) U/Th; (b) Th/K; (c) U/K. Os tons verde e amarelo significam valores baixos da razão, enquanto os tons de vermelho significam valores altos, de acordo com o apresentado nas respectivas legendas. Em preto, contorno litológico. Nota: os painéis originais não traziam o nome da razão; a identificação adotada baseia-se nos valores máximos de cada mapa (1,95; 534,8 e 52,6) e na distribuição espacial descrita no texto, devendo ser confirmada pelos autores.



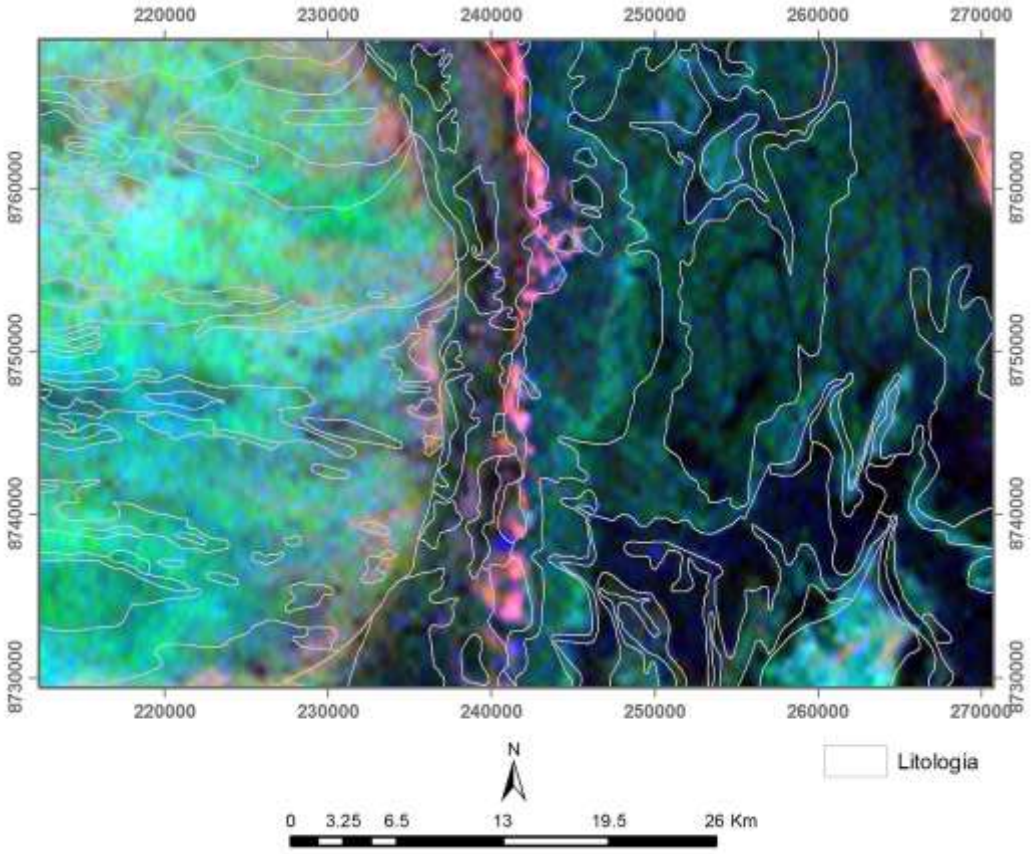
Nota: os painéis originais não traziam o nome da razão; a identificação adotada baseia-se nos valores máximos de cada mapa (1,95; 534,8 e 52,6) e na distribuição espacial descrita no texto, devendo ser confirmada pelos autores.
Fonte: Elaborado pelos autores

Apesar das rochas da formação Salitre terem apresentado altas concentrações de urânio, a baixa relação U/Th demonstra que essas rochas são mais enriquecidas em tório. O inverso ocorre com os diamictitos da formação Bebedouro e litofácies da formação Morro do Chapéu (no setor sudeste da área de estudo). As razões Th/K e U/K realçam a unidade B1 (Np2snl no quadrante sudoeste da área) e litofácies da formação Morro do Chapéu na parte oriental da área. Este comportamento é devido aos baixos teores de K destas unidades, ocupando o denominador da razão. Por essa razão, os valores extremos de Th/K e U/K (até 534,8 e 52,6, respectivamente) devem ser lidos como indicadores de empobrecimento em potássio, e não necessariamente de enriquecimento em tório ou urânio, o que é típico de quartzo-arenitos e de carbonatos (IAEA, 2003).

Segundo Ferreira, Moreira-Nordemann e Nordemann (1992), as rochas calcárias, encaixantes de mineralização fosfatada, normalmente apresentam baixos teores de elementos radioativos. Isto permitiria um contraste com as rochas mineralizadas, uma vez que a apatita (carbonato fluorapatita) geralmente possui elevado teor de U e Th. Esse fato pode ser confirmado pelas anomalias positivas destacadas nas três razões, principalmente nas relações U/K e Th/K na unidade B1. Sena (2015), durante a execução do Projeto Metalogenético do Estado da Bahia, avaliou e selecionou 15 alvos todos relacionados a anomalias de U/Th sendo um deles coincidente com anomalias de urânio em levantamento de sedimento de corrente e com valores em rocha de até 21,9% de fosfato em amostra analisada e coletada pela CPRM (Bastos Abram; Bahiense; Almeida, 2016). Esses resultados convergem com a experiência internacional de que anomalias de eU e de U/Th constituem um guia prospectivo eficiente para fosforitos sedimentares, desde que a cobertura de solos e a mobilidade supergênica do urânio sejam consideradas na interpretação (Pufahl; Groat, 2017).

O mapa ternário de radioelementos na Figura 6 demonstra a proximidade com os contatos e litofácies apresentadas no mapa geológico. Além disso, fica claro as relações citadas anteriormente, destacando novamente, maiores concentrações de urânio na unidade B1 e secundariamente Th e alto K nos diamictitos da Fm Bebedouro na parte central da área em torno da coordenada UTM 240.000E. Em contato oeste com essa litofácies nota-se uma zona distinta com K e U intermediários que não está discriminada no mapa geológico.

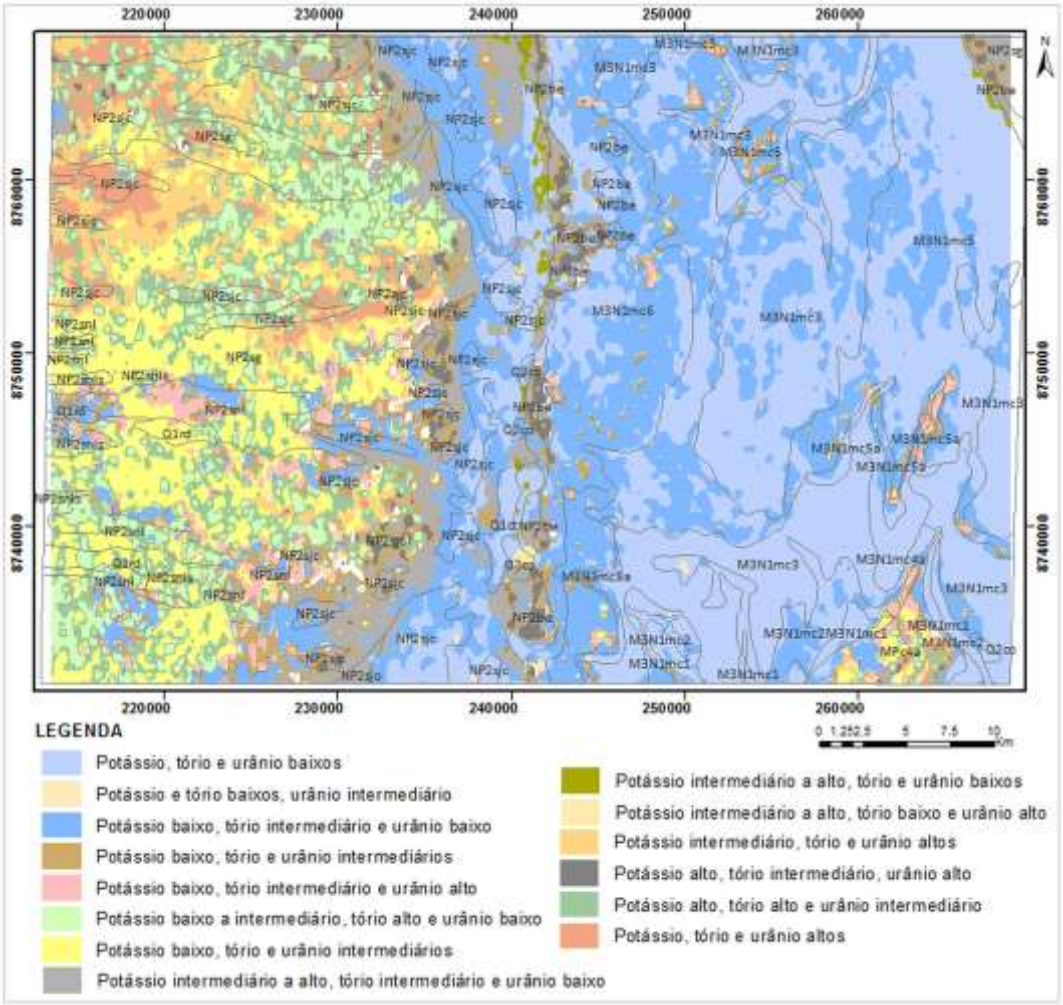
Figura 6. Mapa ternário das concentrações de K (%), eTh (ppm) e eU (ppm) composto no sistema de cores RGB, com K no canal vermelho, eTh no canal verde e eU no canal azul; tons claros indicam concentrações elevadas dos três radioelementos e tons escuros, concentrações baixas. Linhas brancas: contorno litológico do mapa geológico regional.



Fonte: Elaborado pelos autores

Dessa forma, o mapa ternário permite verificar distinções nas variações internas das grandes unidades observadas, em função das variações nas concentrações relativas dos radioelementos naturais potássio, urânio e tório. A gamaespectrometria na área de estudo é sintetizada pela Figura 7, que mostra as diferentes associações entre a concentração do potássio, urânio e tório levando em consideração as classes apresentadas pela Tabela 1.

Figura 7. Mapa de unidades gamaespectrométricas, obtido pela combinação das classes de K, eTh e eU da Tabela 1, sobreposto ao contorno litológico (em cinza) e aos códigos das unidades do mapa geológico regional (Figura 2). Coordenadas UTM (zona 24S).



Fonte: Elaborado pelos autores

Por meio da análise da Figura 7 infere-se que no Grupo Chapada Diamantina a Formação Morro do Chapéu, na parte oriental da área, é caracterizada por baixas concentrações de potássio, tório em concentrações baixas e intermediárias e urânio em concentrações baixas ou às vezes com valores mais altos. O K é extremamente móvel em ambientes de alteração hidrotermal e durante o intemperismo, os minerais constituídos por potássio tendem a ser lixiviados, influenciando também a mobilidade supérgena do tório e urânio (Ulbrich *et al.*, 2009). Altas concentrações de urânio na Formação Morro do Chapéu estão associadas a concentrações intermediárias de tório e são encontradas em pequenas proporções nas unidades, destacando-se nos arenitos feldspáticos (M3N1mc5 no mapa geológico).

A Formação Caboclo, os lamitos e arenitos interestratificados (MPc4a) que aparecem na parte sudeste da área com unidades com cores amareladas e esverdeadas se mostram com características geofísicas semelhantes aos pelitos e carbonatos das unidades neoproterozoicas. Na Formação Bebedouro, ao longo da coordenada UTM 240.000 E, a unidade é caracterizada por diamictitos,

arcóseos e lamitos com valores de potássio intermediário a alto, tório intermediário associado a alto ou baixo urânio, contudo, algumas unidades possuem características distintas, com teores baixos nos três radioelementos.

O Grupo Una, possui assinaturas gamaespectrométricas bastante diversificadas, mas possui, em sua maioria, altas concentrações de tório e urânio. O tório é considerado o elemento mais estável que permanece em minerais resistatos, já o urânio tende a ser móvel em ambientes oxidantes, depositando-se em condições mais redutoras (Ramos; Pires, 2010). As Unidades A+A1, que formam a sequência marinha profunda a intermediária II, tem um zoneamento gamaespectrométrico de leste a oeste que pode ser sucintamente descrito pela diminuição no conteúdo de potássio e aumento no conteúdo de urânio e tório, predominando teores intermediários de urânio, alto tório e baixo potássio. Distingue-se ainda altos teores dos três elementos associados principalmente aos contatos entre essas unidades e a unidade B1.

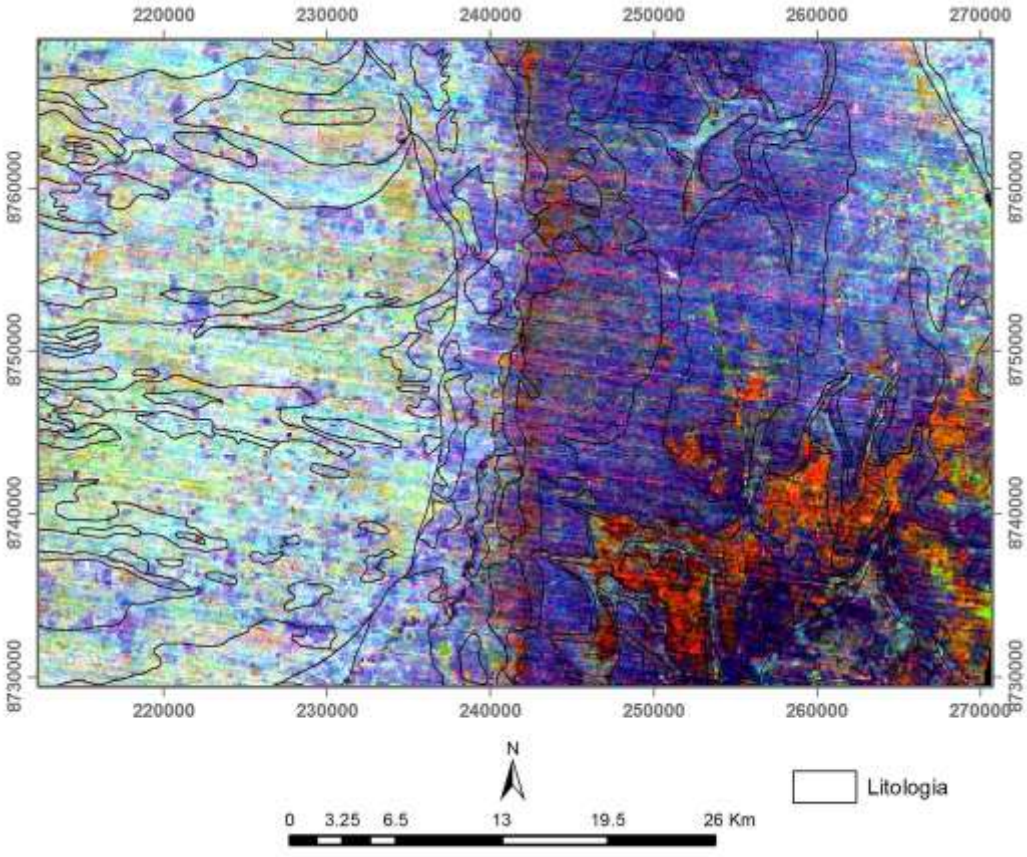
A unidade B1 possui uma notável distinção nas assinaturas gamaespectrométricas dos dolomitos e silexitos. Os dolomitos são caracterizados principalmente por altos teores de tório e urânio associados a baixos teores de potássio, podendo também ter baixas concentrações de urânio e potássio e alto tório em contato com as unidades A+A1 que possuem essas características. Os silexitos não podem ser caracterizados pela gamaespectrometria pois possui diferentes assinaturas ao longo da área de estudo. Os arenitos da unidade B1 distinguem-se por baixo teor de potássio, tório intermediário e baixo urânio, possuindo, portanto um comportamento gamaespectrométrico similar às rochas siliciclásticas e arenitos da Formação Morro do Chapéu. Levando em consideração as unidades do terciário-quaternário pode-se inferir que os depósitos coluvionares e o calcário Caatinga são caracterizados por valores baixos nos três elementos, enquanto as coberturas residuais possuem assinatura gamaespectrométrica indefinida, essas características podem ser resultados da mobilidade dos elementos na área de estudo. A assinatura indefinida das coberturas residuais é esperada, pois esses materiais herdam a geoquímica de rochas-fonte diversas e registram graus variados de lixiviação de potássio e de concentração residual de tório (Wilford, 2012).

4.2 CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DAS LITOFÁCIES

Dentre os índices espectrais testados, o índice de sílica/carbonato apresentou bons resultados para a discriminação das unidades carbonáticas na bacia de Irecê e das siliciclásticas do Grupo Chapada Diamantina (Figura 8). Na bacia de Irecê, setor oeste da área de estudo, observa-se tons em azul-esverdeado claro com menor relação sílica/carbonato. Nessa região os níveis mais arenosos são bem evidenciados em coloração azul mais escuro, similar àquele encontrado no Grupo Chapada

Diamantina, na região leste da área. Uma zona de transição entre essas duas áreas é marcada pela presença das fácies de calcarenito. Os tons em vermelho alaranjado estão associados com arenitos e siltitos da Formação Morro do Chapéu. Como o canal vermelho dessa composição corresponde ao índice de quartzo e o verde ao índice de carbonato (Tabela 2), os tons avermelhados do setor sudeste indicam superfícies ricas em sílica, e os tons esverdeados do setor oeste, superfícies carbonáticas, em acordo com as feições de emissividade descritas por Ninomiya, Fu e Cudahy (2005). O aspecto listrado da imagem decorre do ruído das bandas termais e da resolução de 90 m do subsistema TIR, o que limita o uso desse índice à escala regional.

Figura 8. Composição colorida RGB dos índices de sílica/carbonato obtidos com as bandas termais do sensor ASTER (R = índice de quartzo; G = índice de carbonato; B = índice máfico; Tabela 2), com o contorno litológico em preto. Coordenadas UTM (zona 24S).

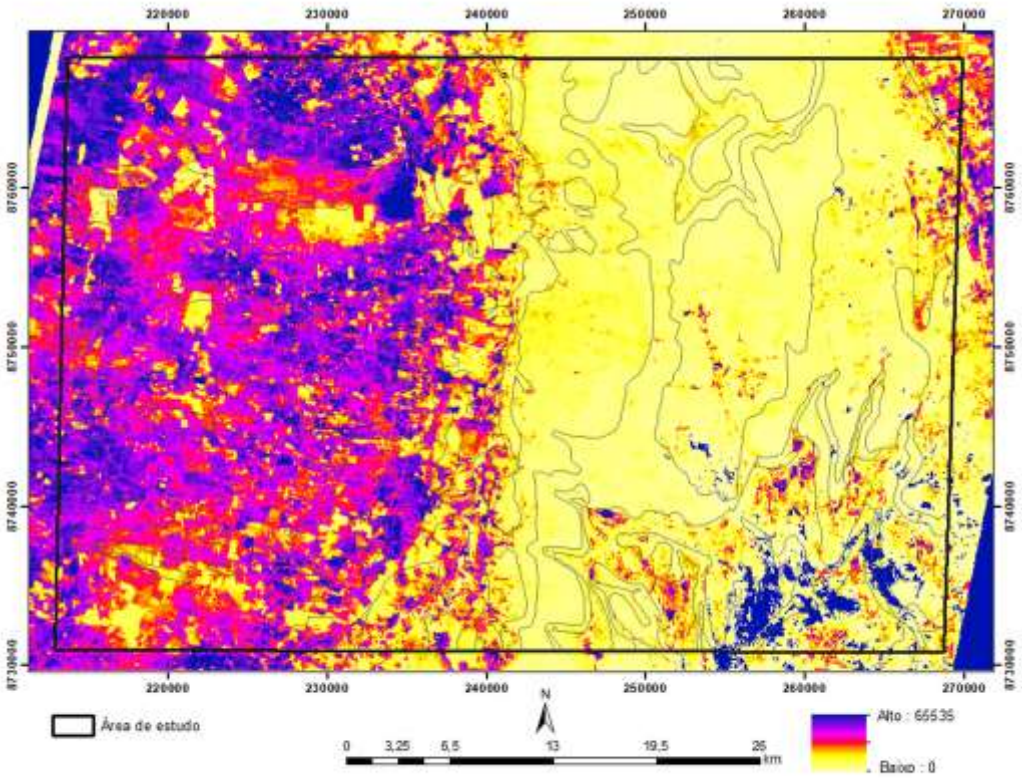


Fonte: Elaborado pelos autores

O Índice de argila (Figura 9) também separa os Grupos Una e Chapada Diamantina com bastante distinção, demonstrando que os níveis carbonáticos e siliciclásticos, respectivamente, apresentam frações argilosas na sua composição. Nota-se no Grupo Una que o contato dos diamictitos da Formação Bebedouro com a Formação Salitre é marcada pelo enriquecimento de argila (em tons azul escuro e magenta), que ocorre também no oeste superior da área de estudo, na transição entre

essas unidades. A presença de uma sequência carbonática, associada com uma variação composicional de fácies marinhas rasas a profundas e intermediárias, sendo essas últimas associadas com contribuição de níveis pelíticos, geram solos mais argilosos, como a unidade A, A1 e B de Misi (1979). A litofácies marinha de água rasa (B1) mostra tons com menor intensidade, entre amarelo, vermelho e magenta. A assinatura espectral destacada em amarelo podem demonstrar os níveis de arenito da Unidade B1.

Figura 9. Índice de argila (5 × 7)/6² obtido a partir das bandas SWIR do sensor ASTER; a legenda expressa os valores em níveis digitais (0–65535), sendo os tons azuis e magenta indicativos de maior absorção de Al-OH (superfícies mais argilosas) e os tons amarelos, de menor absorção. Linhas cinza: contorno litológico; retângulo preto: limite da área de estudo.

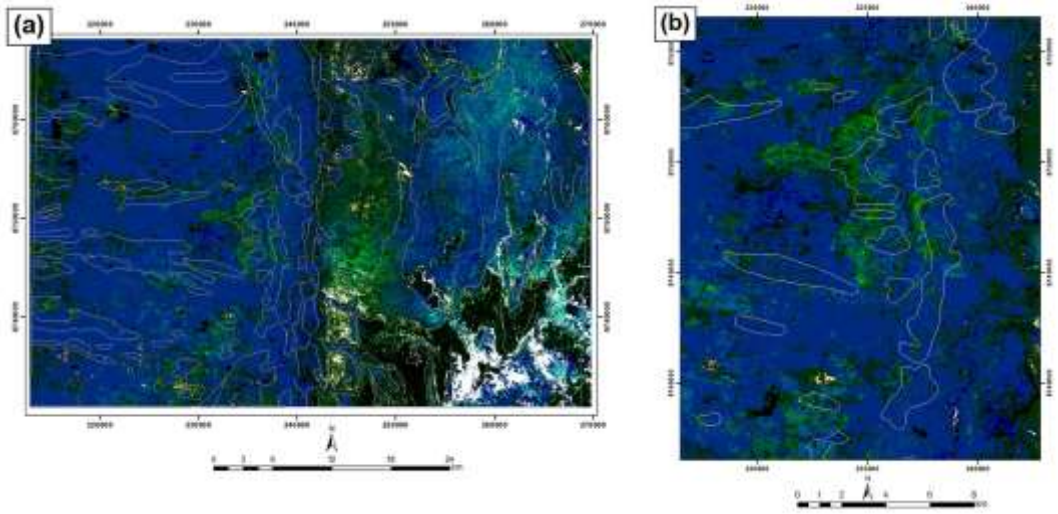


Fonte: Elaborado pelos autores

No setor leste inferior da área os arenitos impuros da Formação Morro do Chapéu apresentam tons azulados mostrando uma concentração de argila, associada principalmente à Formação Caboclo. Já as demais litologias da sequência siliciclástica mostram coloração em amarelo. Observa-se nesse setor maiores concentrações de argila em locais de drenagem. No setor oeste, os padrões retangulares visíveis na Figura 9 correspondem a talhões agrícolas, o que indica que parte da resposta do índice de argila reflete o manejo do solo e a cobertura superficial, e não apenas a litologia, limitação já apontada para índices espectrais em áreas cultivadas (Cracknell; Reading, 2014; Shebl *et al.*, 2021).

As assinaturas espectrais obtidas pelo índice de Sultan (Figura 10a), muitas vezes tem seu contorno similar ao das unidades geológicas. Na região central da área de estudo, relacionada ao Grupo Chapada Diamantina onde aflora rochas siliciclásticas como arenitos conglomeráticos da Formação Morro do Chapéu, nota-se uma coloração em tons de verde claro a verde musgo, esse tom é mais intenso onde ocorrem arenitos sigmoidais bem selecionados dessa mesma formação. Os lamitos e arenitos da Formação Caboclo apresentam coloração branca no setor sudeste da área de estudo. No Grupo Una, foi possível diferenciar os calcarenitos e calcissiltitos da sequência marinha profunda a intermediária II (unidade A+A1) das demais litofácies da Formação Salitre. Observa-se que essas unidades coincidem e muitas vezes estendem-se sempre associada com a variação de verde claro a verde musgo como mostra a Figura 10b. A sequência carbonática da Formação Salitre (Unidade B) está associada à uma coloração azul intensa. Essa coloração azulada também ocorre na Formação Morro do Chapéu relacionada à arenitos, contudo ocorre com menor intensidade.

Figura 10. Índice de Sultan (R = 4/7; G = 4/1; B = (2/3) × (4/3)) aplicado à cena ASTER: (a) área de estudo completa, na qual as rochas siliciclásticas (verde) e a sequência carbonática (azul) podem ser bem diferenciadas; (b) detalhe da borda leste da bacia (227.000–242.000 m E), mostrando a correlação dos calcarenitos e calcissiltitos das unidades A+A1 com a variação de tons verdes. As linhas em branco representam o contorno litológico.

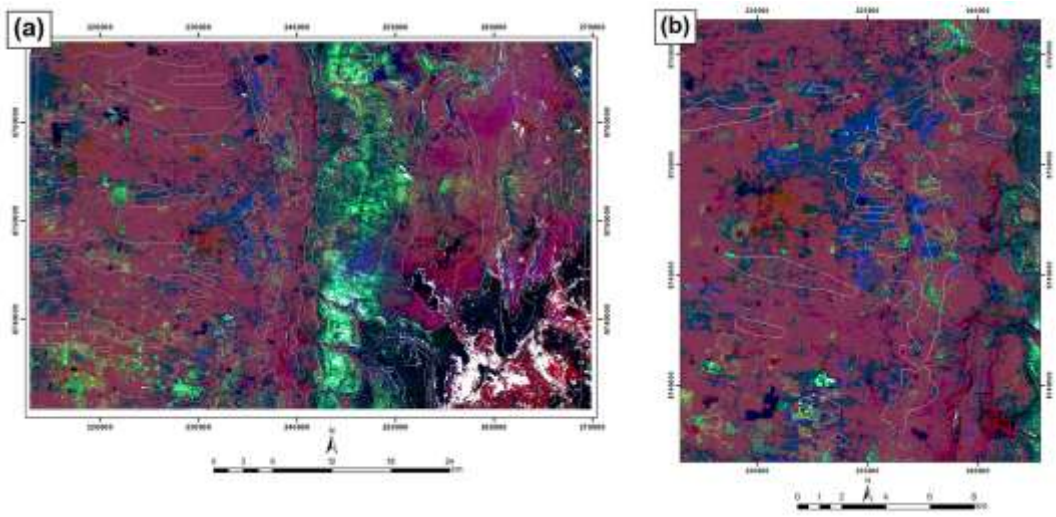


Fonte: Elaborado pelos autores

A diferenciação litológica proposta pelo índice de Abrams (Figura 11a) é muito similar ao de Sultan. Os tons de verde claro a escuro estão associados aos conglomerados e arenitos, em contraste com tons ainda mais escuros de verde que caracterizam os diamictitos da Formação Bebedouro. Bordejando os diamictitos de norte a sul na área de estudo, observa-se uma assinatura espectral distinta desses, com tons em magenta escuro. Essa é uma região interessante, onde é necessário verificações de campo, para associar ou não essa assinatura com a presença de dolomitos argilosos, vermelhos (dolomitos de capa) da Unidade C. Vale ressaltar que essa região também pode ser evidenciada no

diagrama ternário (U, Th e K). Na região da Formação Salitre relacionada às litofácies marinhas profunda a intermediária II (Unidades A+A1) nota-se alguns tons similares àquelas encontradas na Formação Morro do Chapéu. A unidade B1 possui intercalações de cores rosa claro a verde claro, enquanto os calcarenitos e calcissiltitos da sequência marinha profunda a intermediária II ocorre em tom azul a verde musgo (Figura 11b). A semelhança entre os índices de Sultan e de Abrams é esperada, pois ambos compartilham a razão 4/7, sensível às absorções de Al-OH e CO_3 na banda 7, e diferem apenas nas razões que exploram as bandas do VNIR, de modo que a convergência dos dois produtos reforça a consistência da discriminação obtida.

Figura 11. Índice de Abrams (R = 4/7; G = 4/3; B = 2/1) aplicado à cena ASTER: (a) área de estudo completa, com o contorno litológico em branco; (b) detalhe da borda leste da bacia (227.000–242.000 m E), destacando a diferenciação entre as unidades A+A1 e B1.



Fonte: Elaborado pelos autores

4.3 INTEGRAÇÃO DOS DADOS E IMPLICAÇÕES PARA O MAPEAMENTO LITOFACIOLÓGICO

O mapa gamaespectrométrico, quando analisado em conjunto com os mapas dos índices espectrais (Sultan, Abrams, argila e sílica/carbonato), fornece uma visão mais detalhada das litofácies dos Grupos Una e Chapada Diamantina. No Grupo Chapada Diamantina, a Formação Morro do Chapéu é melhor descrita pelos índices espectrais enquanto a Formação Caboclo, que foi considerada de assinatura gamaespectrométrica indefinida, quando analisada junto aos índices espectrais mostra diversas mudanças litológicas que podem estar relacionadas à distribuição dos lamitos e arenitos. Esse resultado é coerente com a natureza dos dados: em arenitos maduros, pobres nos três radioelementos, a gamaespectrometria tem pouco contraste a oferecer, ao passo que as razões do SWIR e do TIR respondem diretamente às variações de quartzo, argilominerais e cimento carbonático entre as litofácies (Rowan; Mars, 2003; Ninomiya; Fu; Cudahy, 2005).

No Grupo Una, a Formação Bebedouro é melhor descrita pela gamaespectrometria, embora também apresente uma assinatura espectral bem definida na área. Os dados obtidos no presente trabalho sugerem uma melhor compreensão do mapeamento das unidades da Formação Salitre, devido às suas assinaturas, principalmente em relação aos calcarenitos e calcissiltitos da unidade A+A1. A Unidade C foi bem discriminada tanto pelas imagens geofísicas quanto pela imagem ASTER. A presença de dolomitos de capa, bordejando os diamictitos, pode estar relacionada à assinatura espectral distinta na região. Além disso, esse local possui uma característica compatível com esses dolomitos argilosos, representado por potássio intermediário a alto, urânio e tório baixos. Essa litofácies não foi diferenciada nos mapas geológicos da CPRM (Bonfim *et al.*, 1985). A coincidência espacial entre uma faixa de assinatura magenta no índice de Abrams e uma zona de K intermediário a alto e eTh e eU baixos, ambas bordejando os diamictitos, é o exemplo mais claro de feição convergente entre os dois conjuntos de dados, e constitui o alvo prioritário para verificação de campo, dado o papel dos dolomitos de capa como marcadores do limite entre as formações Bebedouro e Salitre (Misi *et al.*, 2011).

Os dados gamaespectrométricos ainda sugerem um zoneamento nas unidades A+A1 em relação ao conteúdo de potássio, urânio e tório que não é notado nos índices espectrais, o que pode significar uma variação composicional desses elementos dentro da mesma unidade e/ou litologias. Esse zoneamento pode refletir tanto variações primárias na proporção de níveis pelíticos (portadores de K) e de carbonatos (pobres em radioelementos) dentro da sequência marinha profunda a intermediária quanto diferenças no grau de desenvolvimento dos solos residuais, e sua interpretação exigiria amostragem geoquímica e descrição de perfis em campo.

Do ponto de vista prospectivo, a convergência entre as anomalias de U/K e Th/K na unidade B1, a assinatura espectral intercalada (rosa claro a verde claro) dessa unidade nos índices de Sultan e de Abrams e a posição estratigráfica das mineralizações de fosfato e de Pb-Zn (Figura 3) indica que a integração dos dois conjuntos de dados pode auxiliar a delimitação de áreas-alvo, em linha com a abordagem de modelagem espacial já aplicada à bacia (Franca-Rocha; Misi, 2005) e com os alvos radiométricos selecionados no Projeto Metalogenético do Estado da Bahia (Bastos Abram; Bahiense; Almeida, 2016). A contribuição do trabalho é, portanto, metodológica e territorial: demonstra que produtos simples, derivados de dados públicos ou cedidos por órgãos estaduais e de uma única cena ASTER, permitem detalhar o mapa geológico regional da borda leste da Sub-bacia de Irecê e apontar feições internas às unidades que não constavam da cartografia em escala 1:250.000.

4.4 LIMITAÇÕES

Os resultados devem ser interpretados à luz de algumas limitações. A interpretação foi qualitativa e visual, sem classificação supervisionada, sem medidas de acurácia e sem verificação de campo, de modo que as correspondências entre assinaturas e litofácies permanecem como hipóteses. A gamaespectrometria registra a geoquímica das primeiras dezenas de centímetros do terreno, e na Sub-bacia de Irecê os carbonatos estão em grande parte recobertos por solos residuais e coberturas detríticas, o que pode explicar os valores elevados de eTh sobre a Formação Salitre e a assinatura indefinida das coberturas residuais; o espaçamento de 500 m entre linhas de voo, por sua vez, limita a resolução efetiva dos *grids*, e parte dos padrões alongados na direção E-W no setor oeste pode refletir a direção das linhas de voo. As classes da Tabela 1 foram definidas por intervalos geométricos, que dependem da distribuição estatística dos valores na área e não de limiares litológicos; as razões Th/K e U/K são dominadas pelo denominador, de modo que os valores extremos indicam sobretudo empobrecimento em potássio. A cena ASTER foi adquirida em setembro de 2007, mais de uma década antes da interpretação; embora a geologia não se altere nesse intervalo, o uso agrícola do setor oeste, visível nos índices espectrais, e a resolução de 90 m das bandas termais afetam a leitura litológica dos produtos. Os parâmetros do modelo atmosférico do FLAASH não foram registrados, e os painéis das razões entre radioelementos (Figura 5) não traziam identificação no material original, tendo sido rotulados a partir dos valores máximos e da distribuição espacial descrita no texto. Por fim, os contatos litológicos utilizados como referência provêm de mapas em escala 1:250.000, cuja incerteza posicional é compatível com parte das discrepâncias observadas entre assinaturas e contatos.

5 CONCLUSÃO

Com o processamento de dados aerogamaespectrométricos e de sensoriamento remoto foi possível caracterizar as diferentes litofácies da área de estudo, mostrando informações relevantes para a caracterização geológica da região. O potássio delimitou com clareza os diamictitos da Formação Bebedouro e as rochas siliciclásticas do Grupo Chapada Diamantina; o tório e o urânio, elevados sobre a Formação Salitre, e as razões Th/K e U/K realçaram a unidade B1, portadora das mineralizações de fosfato; e o mapa de unidades gamaespectrométricas sintetizou essas associações, revelando um zoneamento interno das unidades A+A1 e uma zona de K intermediário a alto que bordeja os diamictitos. Os índices de sílica/carbonato e de argila separaram os domínios carbonático e siliciclástico, e os índices de Sultan e de Abrams individualizaram os calcarenitos e calcissiltitos das unidades A+A1 e uma faixa de assinatura magenta compatível com os dolomitos de capa da Unidade C.

Tanto a gamaespectrometria quanto os índices espectrais mostram detalhes de unidades e feições que o mapa geológico não conseguiu identificar na escala mapeada. Estas feições devem ser analisadas e validadas por meio de levantamentos geológicos de campo, principalmente nas unidades da Formação Salitre que possuem interesse metalogenético. A comparação entre os dois conjuntos de dados mostrou que a Formação Morro do Chapéu é melhor descrita pelos índices espectrais e a Formação Bebedouro, pela gamaespectrometria, de modo que os métodos são complementares e não substituíveis entre si.

Conclui-se que as técnicas aplicadas neste trabalho foram adequadas, rápidas e de baixo custo, resultando em produtos de qualidade. A utilização desta metodologia para descrição litológica em escala regional resultou na obtenção de informações mais detalhadas que aquelas existentes nos mapas geológicos da área de estudo. As conclusões restringem-se, contudo, a uma interpretação qualitativa, sem validação de campo e sujeita à influência das coberturas de solo e do uso agrícola sobre as assinaturas. Como perspectivas, recomendam-se a verificação de campo das feições convergentes, em especial da faixa que bordeja os diamictitos e das anomalias da unidade B1, a aplicação de classificadores supervisionados que integrem os produtos gamaespectrométricos, espectrais e magnetométricos, e a incorporação de dados geoquímicos de solo e de rocha para quantificar a relação entre assinaturas e litofácies.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), por meio do edital CNPq/MCTI nº 441271/2023-5 – Presente, Passado e Futuro da Biodiversidade do Semiárido: Inventários, Monitoramento, Impactos das Mudanças Climáticas e Implicações para o Uso e Conservação da Flora, Fauna e Fungos. W.J.F.R. foi apoiado por bolsa de produtividade em pesquisa do CNPq (processo nº 314954/2021-0), Projeto Prospecta 4.0 – CNPq (processo nº 407907/2022-0) e pelo projeto 30202010010121001 – CTBIO – FINEP, associada ao Centro Temático de Bioeconomia do Semiárido (UEFS – CTBio-CIMATEC SERTÃO). Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estudos Interdisciplinares e Transdisciplinares em Ecologia e Evolução (INCT IN-TREE), financiado pelo CNPq (408930/2024-1), pela CAPES (88887.195651/2025-00) e pela FAPESP. Financiamento adicional foi fornecido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), por meio do programa Bioeconomia, Recursos Hídricos e Sustentabilidade Ambiental na Bahia, no âmbito da Chamada nº 38/2022, Acordo de Cooperação Técnica nº 294/2023 e Termo de Outorga nº PPF0003/2023. Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em

Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente (PPGM/UEFS) pelo apoio institucional, bem como ao SENAI CIMATEC pela contribuição no desenvolvimento científico e tecnológico voltado à inovação aplicada. R.N.V. foi apoiado pelo INCT IN-TREE e agradece a bolsa SET-G 30202010010121001 – CTBIO – FINEP, associada ao Centro Temático de Bioeconomia do Semiárido (UEFS – CTBio-CIMATEC SERTÃO), vinculado a Projetos Especiais.

REFERÊNCIAS

ABRAMS, M.; HOOK, S. J. Simulated ASTER data for geologic studies. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 33, n. 3, p. 692-699, 1995. DOI: https://doi.org/10.1109/36.387584.

ABRAMS, Michael; YAMAGUCHI, Yasushi. Twenty years of ASTER contributions to lithologic mapping and mineral exploration. Remote Sensing, v. 11, n. 11, 1394, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/rs11111394.

ALKMIM, F. F.; BRITO NEVES, B. B.; ALVES, J. A. C. Arcabouço tectônico do Cráton do São Francisco: uma revisão. In: DOMINGUEZ, J. M. L.; MISI, A. (ed.). O Cráton do São Francisco. Salvador: SBG/SGM/CNPq, 1993. p. 45-62.

ALKMIM, Fernando F.; MARTINS-NETO, Marcelo A. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil. Marine and Petroleum Geology, v. 33, n. 1, p. 127-139, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2011.08.011.

ALMEIDA, F. F. M. de. O Cráton do São Francisco. Revista Brasileira de Geociências, v. 7, n. 4, p. 349-364, 1977. DOI: https://doi.org/10.25249/0375-7536.1977349364.

ALVARES, Clayton Alcarde; STAPE, José Luiz; SENTELHAS, Paulo Cesar *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507.

BASTOS ABRAM, Maisa; BAHIENSE, Ioná Cunha; ALMEIDA, Rogério Celestino de (org.). Projeto Fosfato Brasil: parte II. Salvador: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2016. (Informe de Recursos Minerais, Série Insumos Minerais para Agricultura, 15).

BEDOYA-RUEDA, C.; AFONSO, J.; CAETANO-FILHO, S. *et al.* Stratigraphic-chemostratigraphic assessment of early dolomitization and associated phosphogenesis of the Ediacaran-Cambrian Salitre Formation, Irecê Basin, Brazil. Precambrian Research, v. 412, 107541, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.precamres.2024.107541.

BIERWIRTH, P. Evaluation of ASTER satellite data for geological applications: consultancy report to Geoscience Australia. Canberra: Geoscience Australia, 2002. (Não publicado).

BONFIM, L. F. C.; ROCHA, A. J. D.; PEDREIRA, A. J. *et al.* Projeto Bacia de Irecê: relatório final. Salvador: CPRM, 1985.

BRANNER, J. C. Aggraded limestone plains of the interior of Bahia and the climatic changes suggested by them. Geological Society of America Bulletin, v. 22, n. 1, p. 187-206, 1911. DOI: https://doi.org/10.1130/gsab-22-187.

CAIRD, R. A.; PUFAHL, P. K.; HIATT, E. E. *et al.* Ediacaran stromatolites and intertidal phosphorite of the Salitre Formation, Brazil: phosphogenesis during the Neoproterozoic Oxygenation Event. Sedimentary Geology, v. 350, p. 55-71, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2017.01.005.

CRACKNELL, Matthew J.; READING, Anya M. Geological mapping using remote sensing data: a comparison of five machine learning algorithms, their response to variations in the spatial

distribution of training data and the use of explicit spatial information. Computers & Geosciences, v. 63, p. 22-33, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.10.008.

CRÓSTA, Álvaro Penteado. Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto. Ed. rev. Campinas: IG/UNICAMP, 1993.

DANDERFER FILHO, André. Análise estrutural descritiva e cinemática do Supergrupo Espinhaço na região da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil. 1990. 99 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1990.

DICKSON, Bruce L.; FRASER, Stephen J.; KINSEY-HENDERSON, Anne. Interpreting aerial gamma-ray surveys utilising geomorphological and weathering models. Journal of Geochemical Exploration, v. 57, n. 1-3, p. 75-88, 1996. DOI: https://doi.org/10.1016/s0375-6742(96)00017-9.

DOMINGUEZ, J. M. L. As coberturas do Cráton do São Francisco: uma abordagem do ponto de vista da análise de bacias. In: DOMINGUEZ, J. M. L.; MISI, A. (ed.). O Cráton do São Francisco. Salvador: SBG/SGM/CNPq, 1993. p. 137-159.

DOMINGUEZ, J. M. L. As coberturas plataformais do Proterozóico Médio e Superior. In: BARBOSA, J. S. F.; DOMINGUEZ, J. M. L. (coord.). Geologia da Bahia: texto explicativo. Salvador: SICM/SGM, 1996. p. 105-125.

ERSDAC – Earth Remote Sensing Data Analysis Center. ASTER reference guide: version 1.0. Tóquio: ERSDAC, 2003. 61 p. Disponível em: http://www.science.aster.ersdac.or.jp/en/documnts/pdf/ASTER_Ref_V1.pdf. Acesso em: 30 abr. 2017.

ESRI – Environmental Systems Research Institute. ArcGIS Resources: ArcGIS 10.2 help. Redlands: ESRI, 2014. Disponível em: http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.2/index.html. Acesso em: 20 mar. 2017.

FERREIRA, Clemiro; MOREIRA-NORDEMANN, Lycia M.; NORDEMANN, Daniel J. R. A radioatividade natural da região de Irecê, BA. Revista Brasileira de Geociências, v. 22, n. 2, p. 167-174, 1992. DOI: https://doi.org/10.25249/0375-7536.1992167174.

FIGUEIREDO, F. T. Fácies sedimentares e proveniência da Formação Bebedouro, Neoproterozóico (BA). 2008. 121 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

FRANCA-ROCHA, W. J. S. Modelagem metalogenética na Bacia de Irecê (BA) através de Sistema de Informações Geográficas (SIG). 2001. 350 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2001.

FRANCA-ROCHA, W. J. S.; MISI, A. Spatial modelling of phosphorite deposits in the Irecê Basin, Brazil. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR MATHEMATICAL GEOLOGY, 2005, Toronto. Proceedings [...]. Kingston: IAMG, 2005. v. 1, p. 557-562.

GEOSOFT. Magmap: 2D frequency domain processing. Toronto: Geosoft, 2001. 34 p. (Technical Note).

GUNN, P. J. Interpretation of airborne magnetic and radiometric surveys. Canberra: Australian Geological Survey Organisation, 1998. 150 p.

HARRIS, J. R.; GRUNSKY, E. C. Predictive lithological mapping of Canada's North using Random Forest classification applied to geophysical and geochemical data. Computers & Geosciences, v. 80, p. 9-25, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.03.013.

IAEA – International Atomic Energy Agency. Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. Viena: IAEA, 2003. 173 p. (IAEA-TECDOC-1363).

INDA, H. A. V.; BARBOSA, J. S. F. Geologia da Bahia: texto explicativo para o mapa geológico ao milionésimo. Salvador: SICM/SGM, 1978. 137 p.

IWASAKI, A.; TONOOKA, H. Validation of a crosstalk correction algorithm for ASTER/SWIR. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 43, n. 12, p. 2747-2751, 2005. DOI: https://doi.org/10.1109/tgrs.2005.855066.

KALINOWSKI, Aleks; OLIVER, Simon. ASTER mineral index processing manual. Canberra: Geoscience Australia, Remote Sensing Applications, 2004. 37 p.

KING, L. C. A geomorfologia do Brasil Oriental. Revista Brasileira de Geografia, v. 18, n. 2, p. 147-265, 1956.

KUHN, Stephen; CRACKNELL, Matthew J.; READING, Anya M. Lithologic mapping using Random Forests applied to geophysical and remote-sensing data: a demonstration study from the Eastern Goldfields of Australia. Geophysics, v. 83, n. 4, p. B183-B193, 2018. DOI: https://doi.org/10.1190/geo2017-0590.1.

LASA. Projeto Levantamento Aerogeofísico da área Centro Norte da Bahia: relatório final. [S. l.]: Lasa Prospecções/CBPM, 2012. 258 p.

MACEDO, M. H. F.; BONHOMME, M. G. Contribuição à cronoestratigrafia das formações Caboclo, Bebedouro e Salitre na Chapada Diamantina (BA) pelos métodos Rb-Sr e K-Ar. Revista Brasileira de Geociências, v. 14, n. 3, p. 153-163, 1984. DOI: https://doi.org/10.25249/0375-7536.1984153163.

MENEZES, P. R.; ALMEIDA, T. de (org.). Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto. Brasília: UnB/CNPq, 2012. 266 p.

MISI, A. O Grupo Bambuí no Estado da Bahia. In: Geologia e recursos minerais do Estado da Bahia: textos básicos. Salvador: SME/CPM, 1979. v. 1, p. 119-154.

MISI, A. A sedimentação carbonática do Proterozóico Superior no Cráton do São Francisco: evolução diagenética e estratigrafia isotópica. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO, 2., 1993, Salvador. Anais [...]. Salvador: SBG/SGM, 1993. p. 192-193.

MISI, Aroldo; KYLE, J. Richard. Upper Proterozoic carbonate stratigraphy, diagenesis, and stromatolitic phosphorite formation, Irecê Basin, Bahia, Brazil. Journal of Sedimentary Research, v. 64, n. 2a, p. 299-310, 1994. DOI: https://doi.org/10.1306/D4267D84-2B26-11D7-8648000102C1865D.

MISI, A.; SILVA, M. G. Chapada Diamantina Oriental, Bahia: geologia e depósitos minerais. Salvador: SGM/UFBA, 1996. 194 p.

MISI, A.; VEIZER, J. Chemostratigraphy of Neoproterozoic carbonate sequences of the Una Group, Irecê Basin, Brazil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 39., 1996, Salvador. Anais [...]. Salvador: SBG, 1996. v. 5, p. 487-489.

MISI, Aroldo; VEIZER, Ján. Neoproterozoic carbonate sequences of the Una Group, Irecê Basin, Brazil: chemostratigraphy, age and correlations. Precambrian Research, v. 89, n. 1-2, p. 87-100, 1998. DOI: https://doi.org/10.1016/s0301-9268(97)00073-9.

MISI, Aroldo; KAUFMAN, Alan J.; AZMY, Karem *et al.* Neoproterozoic successions of the São Francisco Craton, Brazil: the Bambuí, Una, Vazante and Vaza Barris/Miaba groups and their glaciogenic deposits. Geological Society, London, Memoirs, v. 36, n. 1, p. 509-522, 2011. DOI: https://doi.org/10.1144/m36.48.

NINOMIYA, Yoshiki; FU, Bihong; CUDAHY, Thomas J. Detecting lithology with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared "radiance-at-sensor" data. Remote Sensing of Environment, v. 99, n. 1-2, p. 127-139, 2005. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.06.009.

PEDREIRA, A. J. O Supergrupo Espinhaço na Chapada Diamantina centro-oriental, Bahia: sedimentologia, estratigrafia e tectônica. 1994. 126 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

PIRES, Augusto César Bittencourt. Identificação geofísica de áreas de alteração hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás. Revista Brasileira de Geociências, v. 25, n. 1, p. 61-68, 1995. DOI: https://doi.org/10.25249/0375-7536.19956168.

PUFAHL, Peir K.; GROAT, Lee A. Sedimentary and igneous phosphate deposits: formation and exploration: an invited paper. Economic Geology, v. 112, n. 3, p. 483-516, 2017. DOI: https://doi.org/10.2113/econgeo.112.3.483.

RAMOS, L. N.; PIRES, A. C. B. Dados gamaespectrométricos e magnetométricos aéreos aplicados à exploração de ouro em Fazenda Nova, porção leste do Arco Magmático de Arenópolis, Goiás. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA, 4., 2010, Brasília. Anais [...]. Rio de Janeiro: SBGf, 2010.

ROWAN, Lawrence C.; MARS, John C. Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data. Remote Sensing of Environment, v. 84, n. 3, p. 350-366, 2003. DOI: https://doi.org/10.1016/s0034-4257(02)00127-x.

SAMPAIO, A. R. (org.) *et al.* Jacobina, Folha SC.24-Y-C, Estado da Bahia: escala 1:250.000. Brasília: CPRM/DIEDIG/DEPAT, 2001. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil).

SANDERS, Cecilia; GROTZINGER, John. Sedimentological and stratigraphic constraints on depositional environment for Ediacaran carbonate rocks of the São Francisco Craton: implications for phosphogenesis and paleoecology. Precambrian Research, v. 363, 106328, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.precamres.2021.106328.

SANTANA, A. V. S. Análise estratigráfica de alta resolução: exemplo em rampa carbonática dominada por microbialitos da Formação Salitre, Bacia de Irecê, BA. 2016. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

SANTANA, Ana; CHEMALE, Farid; SCHERER, Claiton *et al.* Paleogeographic constraints on source area and depositional systems in the Neoproterozoic Irecê Basin, São Francisco Craton. Journal of South American Earth Sciences, v. 109, 103330, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103330.

SCHETSELAAR, E. M. Integration of Landsat TM, gamma-ray, magnetic, and field data to discriminate lithological units in vegetated granite-gneiss terrain. Remote Sensing of Environment, v. 71, n. 1, p. 89-105, 2000. DOI: https://doi.org/10.1016/s0034-4257(99)00069-3.

SENA, F. O. Processamento de dados magnéticos e radiométricos das folhas América Dourada e Umburanas, Bahia: relatório geofísico 05. In: Projeto Metalogenético do Estado da Bahia II: banco de dados e análise metalogenética previsional da Província Nordeste do Estado da Bahia. Salvador: UFBA/CBPM, 2015. (Relatório interno).

SHEBL, Ali; ABDELLATIF, Mahmoud; HISSEN, Musa *et al.* Lithological mapping enhancement by integrating Sentinel 2 and gamma-ray data utilizing support vector machine: a case study from Egypt. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v. 105, 102619, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102619.

SOUZA, S. L. *et al.* Estratigrafia, sedimentologia e recursos minerais da Formação Salitre na Bacia de Irecê, Bahia. Salvador: CBPM, 1993. 36 p. (Série Arquivos Abertos, 2).

SULTAN, Mohamed; ARVIDSON, Raymond E.; STURCHIO, Neil C. *et al.* Lithologic mapping in arid regions with Landsat thematic mapper data: Meatiq dome, Egypt. Geological Society of America Bulletin, v. 99, n. 6, p. 748-762, 1987.

ULBRICH, Horstpeter Herberto Gustavo José; ULBRICH, Mabel Norma Costas; FERREIRA, Francisco José Fonseca *et al.* Levantamentos gamaespectrométricos em granitos diferenciados. I: revisão da metodologia e do comportamento geoquímico dos elementos K, Th e U. Geologia USP. Série Científica, v. 9, n. 1, p. 33-53, 2009. DOI: https://doi.org/10.5327/z1519-874x2009000100003.

WILFORD, John. A weathering intensity index for the Australian continent using airborne gamma-ray spectrometry and digital terrain analysis. Geoderma, v. 183-184, p. 124-142, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.022.