

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**ANÁLISE DA GEOLOGIA E DA MINERALIZAÇÃO AURÍFERA DE CASTELO DOS
SONHOS, SUDOESTE DO ESTADO DO PARÁ, UTILIZANDO SENSORIAMENTO
REMOTO E GEOPROCESSAMENTO**

Gabriel Monteiro Gutierrez

Orientador: Prof. Dr. Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida
De Acordo:

Co-Orientador: Prof. Dr. Caetano Juliani

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2017 / 19)

SÃO PAULO
2017

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida e ao Prof. Dr. Caetano Juliani pela orientação e por toda ajuda ao longo deste ano. Sem eles não haveria nenhum trabalho para ser apresentado.

Ao Eduardo Francisco Ribeiro que, ao longo deste ano, esteve presente oferecendo sempre bons conselhos para a realização deste projeto.

Aos meus pais e ao meu irmão, que estiveram sempre ao meu lado me ajudando e dando seu apoio durante todos os momentos desta graduação.

A todos da turma 56 e especialmente aos meus amigos mais próximos Aydz, Aleja, Bandida, Bambi, Bigode, Bug, Eunuco, Furunka, Murta, Garibaldo, Maria, Pikadeiro, Porca, Xica e Ympa, que estiveram comigo desde o começo da graduação e tornaram estes cinco anos muito mais agradáveis.

Um agradecimento muito especial aos membros da equipe de tênis de mesa composta por Mulan, Bigode, Capado, Seiji, Mayumi e Bárbara, que foram responsáveis por alguns dos melhores momentos desta graduação.

RESUMO

O projeto consiste no estudo do platô de Castelo dos Sonhos e sua mineralização aurífera por meio de métodos de sensoriamento remoto multi-sensor e multitemporal, tendo como objetivo discutir o conhecimento existente sobre a formação, especialmente o mapa geológico da região, utilizando dados de sensores remotos ópticos e, exclusivamente para a obtenção de modelo digital de superfície (MDS), dados em micro-ondas.

A Formação Castelo dos Sonhos constitui geomorfologicamente um platô localizado no sudoeste do estado do Pará. É formada por uma sequência metassedimentar com metarenitos na base e no topo e um metaconglomerado na porção intermediária. Essa sequência está inserida no contexto geológico do Cráton Amazônico e se localiza próximo ao limite da Província Tapajós-Parima com a Província Amazônia Central, não havendo unanimidade na literatura em qual Província se situa.

Segundo a literatura, a mineralização aurífera hospedada predominantemente em metaconglomerados é interpretada como um *paleoplacer* modificado, ou seja, um *paleoplacer* que foi afetado por eventos de alteração hidrotermal.

No projeto foram utilizadas imagens dos sensores ópticos TM, RapidEye, ASTER e Worldview 2, e do sensor de RADAR ALOS PALSAR. Às imagens dos sensores ópticos, foram aplicadas técnicas que envolvem operações aritméticas entre bandas e de análise multivariada, particularmente a análise por principais componentes (PCA). Tais processamentos foram aplicados ou com o objetivo de realçar respostas espectrais de minerais específicos ou como parte de métodos geobotânicos. Os modelos digitais de superfície (MDS) foram utilizados para a obtenção da rede de drenagem local, para a delimitação de microbacias de drenagem, que foram relacionadas à evolução dos garimpos na área com o objetivo de se delimitar possíveis áreas fonte para o ouro e para visualizar estruturas com resposta no relevo.

ABSTRACT

The project consists of the study of the Castelo dos Sonhos plateau and its gold mineralization through multi-sensor and multitemporal remote sensing methods, aiming to discuss the existing knowledge about the formation, especially the geological map of the region, using optical remote sensing data and, exclusively for obtaining the digital elevation model (DEM), data in microwaves.

The Castelo dos Sonhos Formation constitutes geomorphologically a plateau located in the southwest of the state of Pará. It is formed by a metasedimentary sequence with metarenites in the base and at the top and a metaconglomerate in the intermediate portion. This sequence is inserted in the geological context of the Amazon Craton and is located near the limit of the Tapajós-Parima Province and the Central Amazon Province, and there is no unanimity in the literature to which Province it belongs.

According to the literature, the gold mineralization dominantly located in metaconglomerates is interpreted as a modified paleoplacer, that is, a paleoplacer that was affected by hydrothermal alteration events.

In the project were used images of the optical sensors TM, RapidEye, ASTER, Worldview 2, and the RADAR sensor ALOS PALSAR. To the images of the optical sensors, were applied techniques that involve arithmetic operations between bands and multivariate analysis, particularly the Principal Component Analysis (PCA). These processes were applied either with the aim of enhancing spectral responses of specific minerals or as part of geobotanical methods. The digital elevation models (DEM) were used to obtain the local drainage network for the delimitation of drainage micro-basins, which were related to the evolution of the garimpos in the area in order to delimit possible source areas for gold, and to view structures with relief response.

SUMÁRIO

1 Introdução	5
2 Objetivos	5
3 Fundamentação Bibliográfica	6
3.1 Geologia Regional	6
3.2 Geologia Local	8
3.3 Mineralização do Tipo <i>Paleoplacer</i>	10
3.4 Sensoriamento remoto aplicado à prospecção de depósitos auríferos na Amazônia.....	11
3.5 Revisão sobre a análise por Principais Componentes	13
4 Materiais e métodos	14
4.1 Materiais	14
4.1.1 Imagens Landsat 5 TM.....	14
4.1.2 Imagens ASTER	14
4.1.3 Imagens RapidEye	15
4.1.4 Imagens Worldview 2.....	15
4.1.5 Imagens ALOS PALSAR	15
4.2 Métodos	16
5 Apresentação e discussão dos resultados	18
5.1 Resultados obtidos.....	18
5.2 Alterações nos objetivos iniciais.....	35
5.3 Dificuldades encontradas	35
6 Interpretação e discussão dos resultados e dos métodos adotados	36
6.1 Interpretação e discussão dos resultados.....	36
6.2 Discussão sobre a metodologia adotada.....	36
7 Conclusão	38
Referências bibliográficas	38

1 INTRODUÇÃO

O Platô de Castelo dos Sonhos, localizado no sudoeste do estado do Pará, hospeda importante mineralização aurífera em suas rochas metassedimentares. Ele foi originalmente descrito por Yokoi *et al.* (2001), que adotaram o modelo de *paleoplacer* para a mineralização. Posteriormente o depósito foi estudado por Queiroz (2015), Queiroz *et al.* (2015) e Klein *et al.* (2017), que o consideraram um *paleoplacer* modificado. Atualmente a empresa TriStar Gold Inc. faz o trabalho de exploração mineral na área, a partir do qual foi gerado um relatório de exploração mineral (Appleyard *et al.*, 2016) que foi utilizado como base para as informações sobre a geologia local e a mineralização.

Neste estudo foi realizado um trabalho de pesquisa mineral por meio do uso de dados de sensoriamento remoto. Deste modo, foram utilizadas imagens de diversos sensores orbitais multi-espectrais e sensores de RADAR assim como sequências temporais de imagens obtidas pelo mesmo sensor. A estas imagens foram aplicados métodos consagrados de reconhecimento de respostas espectrais de minerais, como a Técnica Crósta (Crósta *et al.*, 2003) e a técnica desfoliante (Fraser e Green, 1987) e métodos geobotânicos como o Método sistêmico (Almeida e Souza Filho, 2004) e métodos que realçam as variações das características da vegetação ao longo do tempo (geobotânica fenológica). Por fim, também foi extraído o padrão de drenagem do platô utilizando um MDS (modelo digital de superfície) e foi analisada a evolução dos garimpos na região de modo a se estimar as regiões mais mineralizadas.

Existem poucos trabalhos que aplicam técnicas de sensoriamento remoto em regiões vegetadas e, considerando a área coberta por vegetação no país e em outras regiões do planeta, associada ao potencial mineral de várias destas regiões, torna-se importante a realização de estudos deste gênero, sobretudo quando se considera que muitas destas áreas são de difícil acesso, dificultando a realização de estudos em campo.

2 OBJETIVOS

O principal objetivo da pesquisa foi a realização de um trabalho de pesquisa mineral através de dados obtidos por sensoriamento remoto e a comparação dos resultados obtidos com os disponibilizados pela empresa, baseados em mapeamento geológico, geoquímica de solos e intenso programa de sondagens, mas sem aplicação densa de sensoriamento remoto. Pretendeu-se com esta comparação demonstrar a importância do uso de sensoriamento remoto, em um trabalho de pesquisa mineral mesmo com intensa atividade em campo.

3 FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Geologia Regional

O Cráton Amazônico ocupa uma grande área no Norte do continente sul-americano. Situa-se principalmente no Brasil, ocupando também partes de outros países ao norte como Venezuela, Guiana, Suriname e o território francês Guiana. É limitado a oeste pelo cinturão andino, a leste pela faixa Araguaia e a sul pela faixa Paraguai, sendo estas duas de idade Neoproterozoica, formadas durante o ciclo Brasileiro.

Diferentes tentativas de dividir o cráton em províncias tectônicas e geocronológicas foram apresentadas ao longo do tempo. No presente trabalho será utilizada a divisão de Santos *et al.* (2000), que o dividiu em sete províncias distintas: Carajás e Imataca (3,10 a 2,53 Ga), Transamazônica (2,25 a 2,00 Ga), Tapajós – Parima (2,10 a 1,87 Ga), Amazônia Central (1,88 a 1,70 Ga), Rio Negro (1,86 a 1,52 Ga), Rondônia – Juruena (1,76 a 1,47 Ga) e Sunsás (1,33 a 0,99 Ga).

A localização da formação Castelo dos Sonhos é controversa, pois se encontra próxima ao limite entre os Domínios Iriri – Xingu, pertencente à província Amazônia Central, e Tapajós, pertencente à Província Tapajós – Parima. A falta de dados geológicos, geofísicos e isotópicos de qualidade dificultam o posicionamento do limite entre estes domínios (Klein *et al.*, 2017; Santos, 2003). Por conta disso alguns autores posicionam a Formação Castelo dos Sonhos no Domínio Iriri – Xingu (Santos, 2003; Vasquez *et al.*, 2008; Appleyard *et al.*, 2016) enquanto outros a posicionam no Domínio Tapajós (Klein *et al.*, 2017; Queiroz *et al.*, 2015). No presente projeto será considerado que a Formação Castelo dos Sonhos pertence ao Domínio Tapajós.

A Província Amazônia Central foi considerada por autores mais antigos como a região com as idades mais antigas do cráton, e também como um núcleo arqueano ao qual ocorreram orogêneses em suas bordas. Nesta província teria ocorrido um intenso magmatismo paleoproterozoico e eventos de deposição sedimentar (Tassinari, 1996; Tassinari & Macambira, 1999). Santos *et al.* (2000) em sua divisão, consideraram que as rochas arqueanas pertencem apenas às províncias Carajás e Imataca, reduzindo assim a área da Província, de modo que nela existem predominantemente rochas de idade paleoproterozoica.

O domínio a oeste da província Amazônia Central foi chamado por Tassinari (1996) de Ventuari – Tapajós. Nesta divisão, este domínio, com idades entre 1,95 e 1,80 Ga, se estenderia desde a região do Tapajós, no estado Pará, até o sul da Venezuela, nas bacias de Ventuari e Orinoco. Santos *et al.* (2000), mediante novos dados geocronológicos, constataram que a região de Ventuari possuía idades mais novas que as do que o restante do domínio, onde foram obtidas idades que variam entre 2,10 e 1,87 Ga, e isto, dentre outros motivos, os levou a retirarem a região de Ventuari da província Ventuari – Tapajós e

adicioná-la à Província Rio Negro. Estas modificações os levaram a idealizar o domínio Tapajós – Parima.

A Faixa orogênica Tapajós – Parima evoluiu pela formação de diversos arcos magmáticos (Complexo Cuiú – Cuiú, Creporizão, Arco Tropas e Parauari) de idades diferentes, sendo que o Complexo Cuiú – Cuiú e o Creporizão constituem a orogênese Mundurucus, mais antiga e os arcos Tropas e Parauari constituem uma segunda orogênese mais recente (Santos, 2003). Vasquez *et al.* (2008), por sua vez, interpretaram que este domínio foi formado pela existência de apenas um arco magmático, com magmatismo pós-colisional associado. Em adição aos arcos magmáticos, também ocorrem na Província Tapajós – Parima uma sequência Vulcanossedimentar (Grupo Jacareacanga) e as rochas pertencentes ao evento magmático Uatumã (Formação Vila Riozinho, Grupo Iriri e riolitos que não foram nomeados) (Bettencourt *et al.*, 2015)

O Domínio Tapajós, que compõe a maior área da Província Tapajós – Parima, apresenta estruturação com direção NW–SE relacionada às principais falhas e zonas de cisalhamento transcorrentes que ocorrem na região. Estas falhas controlaram a colocação da maioria das intrusões ígneas alcalinas da região (Juliani *et al.*, 2014). Na área norte da região existem estruturas dúcteis de direção E–W que alcançam grandes profundidades na crosta (Carneiro *et al.*, 2013). A Figura 1 apresenta o mapa geológico da região segundo Klein *et al.* (2017).

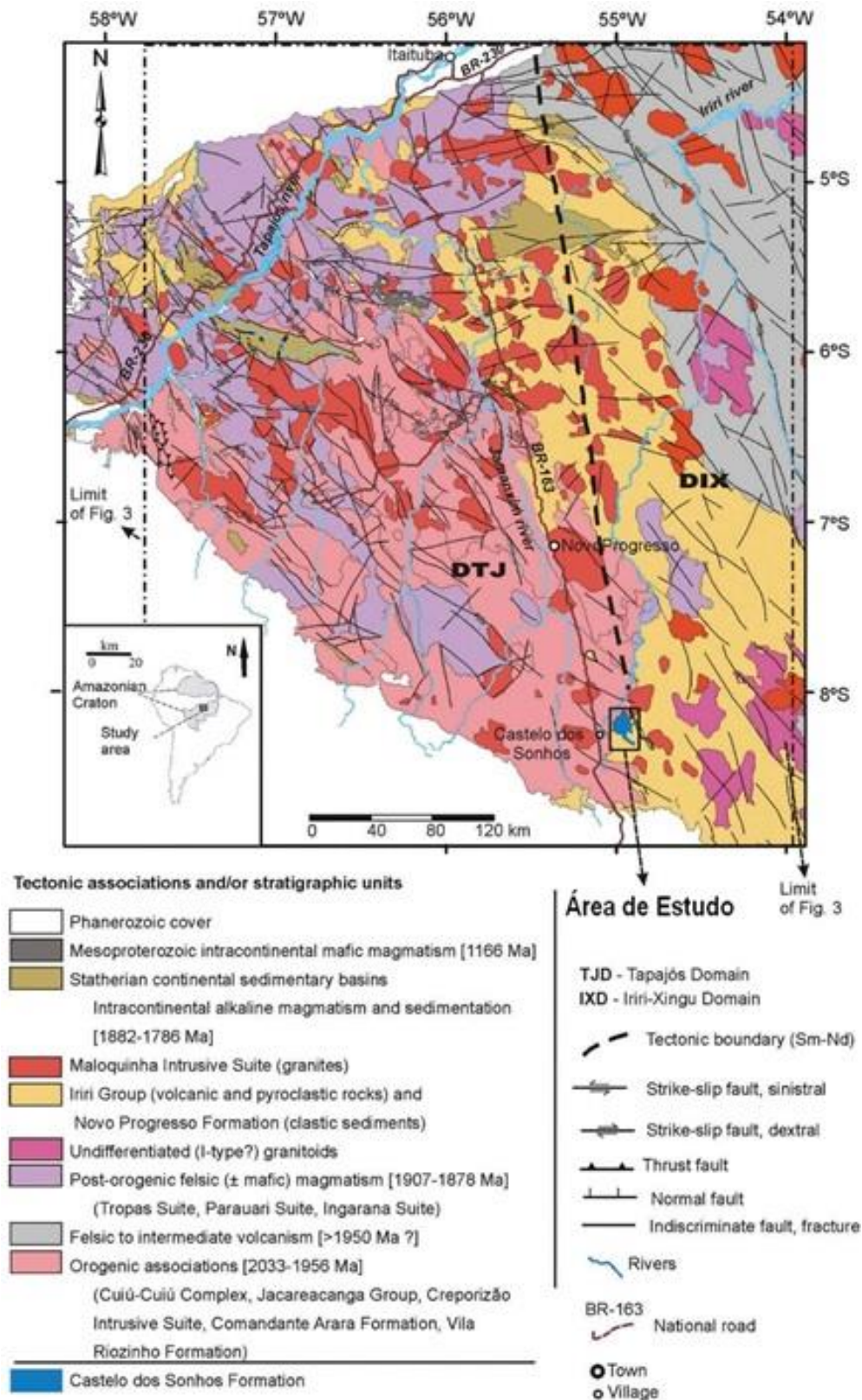


Figura 1: Mapa geológico da região na qual se encontra o platô de Castelo dos Sonhos extraído de Klein *et al.* (2017)

3.2 Geologia Local

A Formação Castelo dos Sonhos se localiza nas proximidades do limite entre os domínios Tapajós (pertencente à Província Tapajós – Parima) e Iriri – Xingu (pertencente à

Província Amazônia Central) (Santos, 2003). Ela é constituída por três unidades metassedimentares, metarenitos na base, metaconglomerados na porção intermediária e metarenitos no topo (Appleyard *et al.*, 2016). A Figura 2 apresenta o mapa geológico do platô retirado de Klein *et al.* (2017).

As camadas de arenito da base e do topo possuem características semelhantes, sendo formadas por arenitos com granulometria média a grossa com seixos dispersos e estratificações cruzadas locais (Appleyard *et al.*, 2016). As estruturas são bem preservadas, existindo nestas rochas um acamamento (S_0) ondulado. Os metarenitos se encontram fortemente silicificados, mas a presença de vênulas e veios de quartzo é rara. É também comum a ocorrência de ferruginização, que resulta em manchas de hidróxido de ferro. Estas rochas são formadas por aproximadamente 95% de quartzo, ocorrendo também muscovita, clorita, magnetita, hematita, monazita e zircão (Queiroz, 2015).

Os metaconglomerados possuem proporções variáveis de seixos, ocorrendo desde áreas com seixos dispersos a conglomerados compactos suportados por clastos. O conglomerado é polimítico, ocorrendo principalmente clastos de quartzo de veio e, em menor proporção, clastos de arenito, formação ferrífera e xistos (Appleyard *et al.*, 2016). A granulação dos clastos varia de poucos centímetros a metros e são arredondados a subangulares. A matriz da rocha se encontra fortemente silicificada e é formada principalmente por quartzo e muscovita, ocorrendo em menor proporção magnetita, hematita, clorita, turmalina, monazita e zircão (Queiroz, 2015).

Santos (2003) datou zircões detríticos desta formação, obtendo idades entre 3.105 e 2.085 Ma, indicando que a idade máxima de sedimentação desta unidade é de 2.085 Ma. Klein *et al.*, (2017) obtiveram com datações complementares idade máxima de sedimentação ao redor 2.050 Ma. Queiroz *et al.* (2015) dataram intrusões ígneas na formação, obtendo uma idade de 2.011 Ma para um dacito porfirítico, definindo assim a idade mínima de sedimentação. Deste modo conclui-se que estas rochas foram formadas entre 2.050 e 2.011 Ma (Klein *et al.*, 2017).

As rochas da formação Castelo dos Sonhos foram localmente deformadas e milonitizadas em regime dúctil em intensidade variada. Estas rochas também foram afetadas por deformação rúptil e são comuns fraturas e falhas menores multidirecionais que podem localmente cortar a foliação milonítica. Estas fraturas normalmente se encontram preenchidas por hidróxido de ferro (Queiroz, 2015).

A mineralização aurífera ocorre principalmente associada ao conglomerado e é interpretada como sendo do tipo *paleoplacer* modificado (Appleyard *et al.*, 2016)

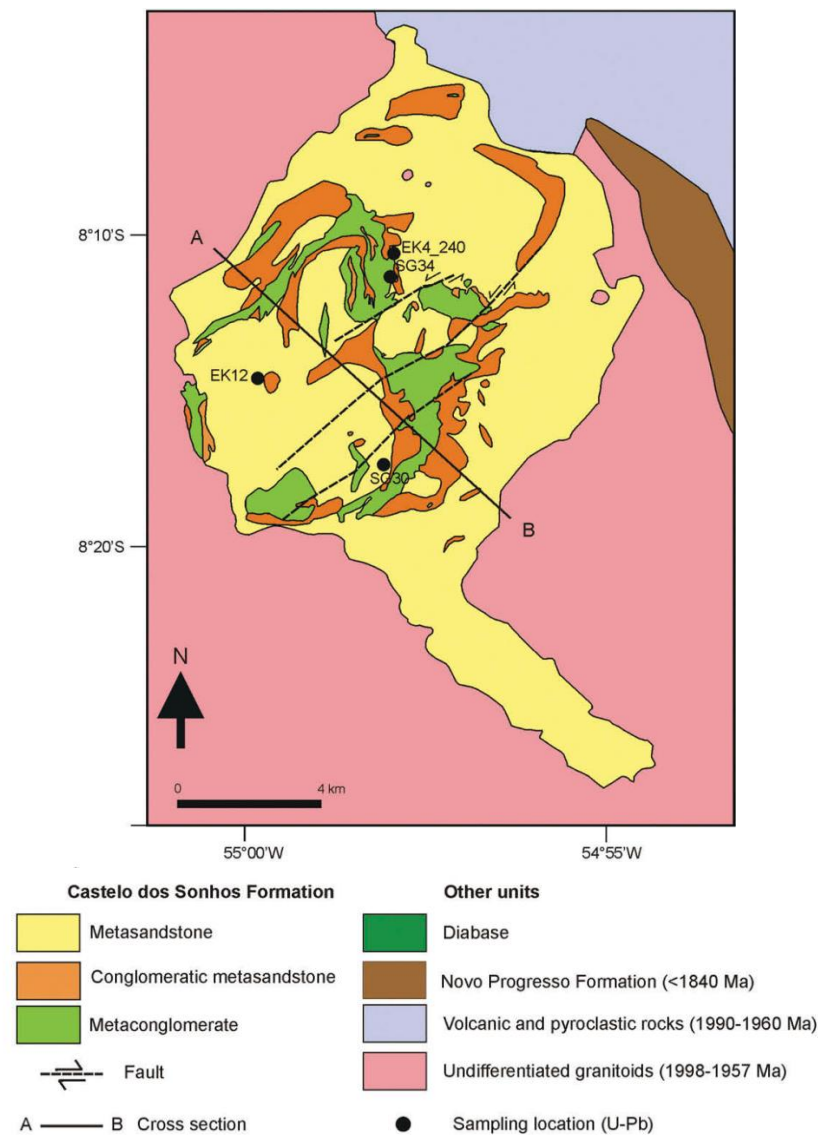


Figura 2: Mapa geológico do Platô de Castelo dos sonhos retirado de Klein *et al.* (2017)

3.3 Mineralização do tipo *Paleoplacer*

Embora os *paleoplaceres* sejam um tipo de depósito muito estudado, devido ao fato de que Witwatersrand, uma das maiores jazidas de ouro do mundo, seja deste modelo genético, ainda existe muita discussão acerca da origem do minério nestes depósitos. A evolução do conhecimento acerca deste tipo de mineralização é fortemente atrelada aos estudos realizados naquele depósito. Desde o começo dos estudos sobre este tipo de mineralização houve incerteza sobre a origem do minério, pois havia pesquisadores que defendiam uma origem puramente sedimentar para o minério enquanto outros defendiam uma origem hidrotermal (Frimmel, 2014).

Surgiu também, a partir dos estudos deste tipo de depósito, o modelo de *paleoplacer* modificado. Neste modelo existe ouro detrítico que, posteriormente, é remobilizado devido ao metamorfismo e à ação de fluidos hidrotermais, resultando em alguns casos na formação de partículas secundárias de ouro com características hidrotermais (Frimmel *et al.*, 1993, Frimmel e Gartz, 1997).

Estudos mais recentes indicam uma origem diferente para o ouro que ocorre no depósito de Witwatersrand, levantando a hipótese de que o ouro foi depositado quimicamente a partir da água sobre esteiras microbiais e, posteriormente, retrabalhado em ambiente fluvial, formando o depósito que se conhece atualmente (Horscroft *et al.*, 2011).

No caso do platô de Castelo dos Sonhos, o modelo adotado pela empresa que detém os direitos minerários (TriStar Gold Inc.) é o de um *paleoplacer* modificado, ou seja, o ouro teria sido depositado por processos sedimentares e, posteriormente, remobilizado por evento hidrotermal. Entretanto Appleyard *et al.* (2016), em Relatório Técnico da TriStar, consideram que a maior parte do minério tem origem sedimentar.

Dentre outros *paleoplaceres* conhecidos, o depósito de Castelo dos Sonhos se assemelha mais ao de Tarkwa (Appleyard *et al.*, 2016), devido à presença de hematita e magnetita e também pela falta de pirita e de matéria orgânica no conglomerado mineralizado.

Em Tarkwa e em Castelo dos Sonhos, devido à falta de material carbonoso proveniente de esteiras microbiais, o ouro não pode ter sido depositado quimicamente, indicando que a fonte do ouro deve ter sido outra.

O platô de Castelo dos sonhos se encontra na Província Aurífera do Tapajós, região em que diversos depósitos de origem hidrotermal de ouro e de outros metais foram descobertos (Juliani *et al.*, 2014; Bettencourt *et al.*, 2015). Considerando-se a presença na região do evento Uatumã (evento vulcano-plutônico intermediário a ácido do Paleo a Mesoproterozóico) ao qual se associam diversos depósitos auríferos, considerou-se a possibilidade de haver intensa influência hidrotermal no depósito de Castelo dos Sonhos.

3.4 Sensoriamento Remoto Aplicado à Prospecção de Depósitos Auríferos na Amazônia.

Há muita literatura sobre sensoriamento remoto aplicado à prospecção de depósitos auríferos de origem hidrotermal em regiões áridas e semiáridas. Já depósitos em regiões com densa cobertura vegetal são raramente abordados por sensoriamento remoto e predominam largamente métodos de aerogeofísica. Um raro trabalho é o de Carranza e Hale (2002), que cita esta dificuldade textualmente: *a detecção remota de zonas hidrotermalmente alteradas em terrenos fortemente cobertos por vegetação torna-se difícil porque a vegetação obscurece as características de reflectância do substrato subjacente. O sucesso da detecção remota convencional de alterações hidrotermais associadas a depósitos minerais depende muito da possibilidade do scanner espectral ser capaz de "ver entre as árvores"*. Caso a cobertura vegetal tenha uma área foliar importante (considerando dossel, sub-bosque e estrato herbáceo) e haja presença de muita matéria vegetal seca na serapilheira (situação comum em florestas tropicais), a possibilidade de haver minerais característicos de alteração hidrotermal detectáveis por sensoriamento remoto é

pequena a nula. Acrescente-se que a alteração intempérica, generalizada em terrenos tropicais úmidos, também dificulta a detecção remota, pois argilo-minerais dessa origem poderão obliterar a resposta daqueles de origem hidrotermal. Não por acaso, a revisão *Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: a review*, de Van der Meer *et al.* (2012), não cita aplicações em regiões florestadas, exceto a de Rowan *et al.* (2000). Naquele interessante artigo Rowan e colaboradores concluem que a análise de imagens AVIRIS em área florestada no sudeste dos Estados Unidos demonstra claramente o poder de métodos hiperespectrais em mapear certas associações de comunidades florestais e rochas. Importante observar que aqueles autores obtiveram relações vegetais próximas às encontradas por Almeida *et al.* (2007) em mineralização aurífera na serra do Itaberaba, Guarulhos, estado de São Paulo. Ambos os trabalhos estudaram comunidades florestais como indicadores geobotânicos, verificando-se tendências semelhantes entre as relações de biodiversidade (1,9 vezes mais espécies arbóreas por parcela sobre rochas não alteradas e 1,5 de espécies arbustivas e herbáceas nos EUA e, respectivamente, 1,3 e 2,1 na serra do Itaberaba). Ou seja, em ambos os casos a biodiversidade é menor nas áreas mineralizadas.

A dificuldade em utilizar métodos de processamento de imagens de sensoriamento remoto desenvolvidos para prospecção de depósitos hidrotermais em terrenos áridos em áreas florestadas é bem demonstrada pelos trabalhos de aplicação da Técnica Crósta: muito numerosos em terrenos áridos ou semi-áridos como Espanha (Chica-Olmo *et al.*, 2002), Patagônia (Crósta *et al.*, 2003; Ducart *et al.*, 2006), China (Liu *et al.*, 2011), Irã (Ranjbar *et al.*, 2004; Pour e Hashim, 2011), entre outros. Já em áreas florestadas foi encontrada apenas a aplicação, sem bons resultados, em Carranza e Hale (2002), em pesquisa realizada nas Filipinas. Outras aplicações de processamentos que incluam análise por principais componentes são ainda mais numerosos, mas seguem a mesma norma, sempre ausentes de terrenos tropicais úmidos e florestados. Entre muitos outros pode-se citar os trabalhos em regiões áridas de Moore *et al.* (2008), Tangestani e Moore (2001) e Gabr *et al.* (2010).

Há raros trabalhos em geobotânica na Amazônia com aplicação de análise por principais componentes (PCA) em imagens multiespectrais, como os de Perrotta *et al.* (2008) e Almeida *et al.* (2009). Ambos se utilizam de método desenvolvido em pesquisa para abordar a vegetação em área do Centro-Oeste brasileiro (Almeida e Souza Filho, 2004), para aplicações genéricas em geociências (Almeida, 2005) e para aplicação agrônômica (Almeida *et al.*, 2006). No mapeamento de formações ferríferas em Alvorada de Minas Zacchi *et al.* (2010) utilizaram com sucesso e conjuntamente com aerogeofísica o método desenvolvido por Almeida e Souza Filho (2004). Mais recentemente, em pesquisa voltada à fenologia da vegetação do Pantanal Matogrossense e sua relação com possíveis falhas, há o trabalho de Almeida *et al.* (2015).

Já o sensoriamento remoto óptico aplicado à prospecção de depósitos auríferos do tipo *paleoplacer* apresenta dificuldades inerentes à composição mineralógica do minério, que ocorre em sedimentos terrígenos não diferenciados dos sedimentos estéreis das encaixantes, diferenciando-se, com frequência, apenas pela granulação. Neste aspecto, mesmo em terrenos áridos, o sensoriamento remoto tem dificuldades, pois não há minerais indicadores dos processos formadores do depósito. Embora não se tenha encontrado citações a respeito, adianta-se que a geobotânica pode informar de depósitos deste tipo por pequenas diferenças na vegetação em função de possível maior disponibilidade hídrica em arenitos que em conglomerados com o mesmo grau de compactação e cimentação dos poros.

Por fim, vale acrescentar a conclusão do professor Floyd Sabins em sua revisão ***Remote sensing for mineral exploration*** publicada na *Ore Geology Reviews* (Sabins, 1999): *Detection of hydrothermally altered rocks is not possible in vegetated areas, so this environment requires other remote sensing methods. Reflectance spectra of foliage growing over mineralized areas may differ from spectra of foliage in adjacent non mineralized areas. The spectral differences, however, are variable for different plant species. Additional research and development is needed for remote detection of mineral deposits in vegetated terrain.*

3.5 Revisão sobre a análise por Principais Componentes

A análise por Principais Componentes é utilizada em uma grande variedade de áreas do conhecimento como, por exemplo, agricultura, biologia, climatologia, ecologia, geografia e geologia, entre outras (Demsar *et al.*, 2013). Esta técnica é muito útil para diminuir a dimensionalidade de um conjunto de dados com muitas variáveis e consiste em transformá-lo em um novo conjunto de variáveis chamadas de *Principal Components* (PCs) sendo que estas são sempre ordenadas de modo que as primeiras PCs possuam a maior parte da variância existente em todo conjunto de dados original (Jolliffe, 2002). Um exemplo de importante redução da dimensionalidade é encontrado em Almeida *et al.* (2015) onde as três primeiras componentes explicam 98,96% da variância de uma série temporal de 23 imagens.

Aplica-se comumente a análise por principais componentes no tratamento de dados raster onde são geradas imagens nas quais a cor do pixel depende do valor atribuído à PC correspondente. Esta aplicação é muito utilizada nas geociências e em estudos de biologia, ecologia e vegetação (Demsar *et al.*, 2013).

Quando se aplica a PCA sobre um conjunto de dados raster, a primeira PC concentra a informação redundante entre as várias imagens e as PCs subsequentes concentram a informação que difere entre as imagens (Byrne *et al.*, 1980). Isto pode ser utilizado para retirar o ruído da imagem. Neste caso são utilizadas as primeiras PCs com o

descarte das últimas PCs, nas quais se concentra o ruído. Já para analisar as diferenças entre as imagens, a primeira PC é descartada e as últimas são utilizadas.

Tendo em vista que o intuito deste projeto é um trabalho de pesquisa mineral com ênfase na utilização de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento recomenda-se, para uma discussão mais aprofundada sobre a análise por Principais Componentes, consultar Demsar *et al.* (2013), Jolliffe (2002) e as bibliografias neles citadas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

4.1.1 Imagens Landsat 5 TM

O sensor TM, portado no satélite Landsat 5, foi lançado em março de 1984 e permaneceu em atividade até novembro de 2011. As imagens foram captadas em 7 bandas do espectro eletromagnético: banda 1 (450 a 520 nm), banda 2 (520 a 600 nm), banda 3 (630 a 690 nm), banda 4 (760 a 900 nm), banda 5 (1550 a 1750 nm), banda 6 (10400 a 12500 nm) e banda 7 (2080 a 2350 nm). As bandas 1 a 3 são obtidas no espectro da luz visível, a banda 4 no infravermelho próximo, as bandas 5 e 7 no infravermelho de ondas curtas e a banda 6 no infravermelho termal, sendo que a banda termal possui 120 metros de resolução espacial e as demais bandas possuem 30 metros. A resolução temporal do sensor foi de 16 dias.

Este sensor permaneceu em atividade muito tempo, gerando uma grande biblioteca de imagens. No projeto serão utilizadas as imagens mais antigas disponíveis, obtidas em tempos em que a região ainda não havia sido desmatada e assim permitindo o estudo sem interferência notável por atividades antrópicas. Foram selecionadas duas imagens em épocas diferentes do ano de 1984, sendo uma de 21/06, época em que a estação seca está no início, e outra de 08/08, época em que a estação seca está mais próxima de sua plenitude.

4.1.2 Imagens ASTER

O sensor ASTER é portado pelo satélite TERRA, que foi lançado em dezembro de 1999. A partir de abril de 2008 o sensor passou a perder gradativamente as bandas do SWIR, diminuindo notavelmente seu uso em geologia. O sensor possui um total de 14 bandas sendo 3 delas no VNIR (*Visible and Near Infrared*), 6 delas no SWIR (*Short Wave Infrared*) e 5 delas no TIR (*Thermal Infrared*).

A sua maior resolução espectral o torna muito útil em estudos geológicos, pois as bandas do SWIR permitem o reconhecimento de minerais específicos, principalmente argilas, e isso o fez muito usado em exploração mineral. As bandas do TIR também podem ser utilizadas em análises estruturais e no reconhecimento de tectossilicatos. Estas imagens, bem como as do sensor TM, foram baixadas sem custos do *site* Earth Explorer.

4.1.3 Imagens RapidEye

As imagens RapidEye são obtidas por um conjunto de cinco satélites lançados em agosto de 2008. O sensor obtém imagens em cinco bandas do espectro eletromagnético com resolução espacial de 5 metros, quais sejam: banda 1 - azul (440 a 510 nm), banda 2 - verde (520 a 590 nm), banda 3 - vermelho (630 a 685 nm), banda 4 - *red edge* (690 a 730 nm) e banda 5 - infravermelho próximo (760 a 880 nm). O *red edge* refere-se à região espectral de transição entre o vermelho (muito absorvido pelas folhas fotossinteticamente ativas) e o infravermelho próximo (muito refletido pelas folhas íntegras).

No projeto foram utilizadas quatro imagens obtidas em 29/05/2011, 20/07/2012, 21/06/2014 e 02/07/2015, de modo que seja possível analisar variações nas características da vegetação em diferentes épocas do ano. Uma das imagens obtidas apresentou um problema de georreferenciamento (estava deslocada em relação as outras) e teve que ser corrigida para ser utilizada em conjunto com as outras. Todas estas imagens foram cedidas sem custos pelo Ministério do Meio Ambiente.

4.1.4 Imagens Worldview 2

O satélite Worldview 2 foi lançado em outubro de 2009. Ele capta imagens em 9 bandas, sendo que uma é pancromática, com resolução espacial de 46 cm em nadir e de 52cm quando obtida 20 graus em relação ao nadir, enquanto as restantes multiespectrais têm resolução de 1,86 m em nadir e de 2,4 m quando obtidas 20 graus em relação ao nadir. Estas bandas são: banda 1 - coastal (400 a 450 nm), banda 2 - azul (450 a 510 nm), banda 3 - verde (510 a 580 nm), banda 4 - amarelo (585 a 625 nm), banda 5 - vermelho (630 a 690 nm), banda 6 - *red edge* (705 a 745 nm), banda 7 - infravermelho próximo 1 (770 a 895 nm) e banda 8 - infravermelho próximo 2 (860 a 1040 nm).

Foram adquiridas duas imagens do sensor Worldview 2 para que o platô fosse integralmente coberto pelas imagens. As imagens foram cedidas gratuitamente pela *DigitalGlobe Foundation* para esta pesquisa acadêmica.

4.1.5 Imagens ALOS PALSAR

O sensor PALSAR (*Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*) foi lançado a bordo do satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite - 1*), e permaneceu em funcionamento entre os anos de 2006 e 2011. O sensor utilizava ondas L para a obtenção das imagens, e gerava imagens em uma série de modos diferentes. Neste projeto foram utilizadas imagens de alta resolução corrigidas radiometricamente, que possuem 12,5m de resolução espacial. Estas imagens foram obtidas gratuitamente através do *site* da ASF (*Alaska Satellite Facility*).

4.2 Métodos

O estudo se divide em três abordagens principais. Uma buscou respostas espectrais de minerais, especialmente argilas de origem hidrotermal, nas áreas não densamente vegetadas do platô; outra se trata de uma abordagem geobotânica; e a restante se trata da obtenção do padrão de drenagem sobre e ao redor do platô e a análise da existência de garimpos e sua evolução sobre as drenagens na tentativa de se identificar as áreas-fonte do ouro.

Antes de iniciar o geoprocessamento, foi realizado nas imagens TM e ASTER um pré-processamento do tipo correção atmosférica FLAASH (*Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Hypercubes*) ENVI, pacote de *software* de correção atmosférica baseado em MODTRAN4 desenvolvido pelo Laboratório Phillips da Força Aérea Estadunidense, Hanscom AFB e Spectral Sciences Inc. (Adler-Golden *et al.*, 1999). O processo volta-se a diminuir a influência de efeitos atmosféricos nas imagens e assim obter resultados mais confiáveis em sua análise.

Primeiro foi realizada a busca por estruturas no platô, utilizando-se as imagens TM, ASTER, RapidEye e Worldview 2, assim como o MDS ALOS PALSAR. Para realizar esta primeira análise, foram utilizadas composições coloridas e em preto e branco de cada imagem, principalmente envolvendo as bandas do NIR (*Near Infrared*) e, quando disponíveis, SWIR (*Short Wave Infrared*).

Na busca por respostas espectrais de minerais foram utilizadas imagens ASTER e TM. Esta análise consistiu principalmente na procura por argilas que possam ser de origem hidrotermal.

Duas abordagens diferentes foram testadas nesta etapa. Uma delas é a aplicação de razões de bandas, com o objetivo de realçar áreas com presença de argilas. Foram testadas tanto razões de bandas para destacar qualquer tipo de argila (imagens TM), quanto razões para destacar argilas específicas (imagens ASTER). Após a confecção das razões de bandas foi aplicada a técnica de Fraser e Green (1987) às imagens em que houve resposta espúria da vegetação. Nesta técnica, se faz uma razão de banda para realçar algum mineral e uma para realçar a vegetação e depois uma análise por principais componentes (PCA – *Principal component analysis*) sobre as duas razões. Deste modo, na primeira PC se concentra a informação redundante, que é predominantemente a resposta de vegetação (realçada em ambas as razões), e na segunda PC se concentra o restante da informação, que é a resposta mineral. Para avaliar os resultados desta análise, foram feitas composições coloridas com PC2:PC1:PC1 em RGB para avaliar em quais locais predominam as argilas e em quais locais predomina a vegetação.

A segunda abordagem consiste na aplicação da Técnica Crósta baseando-se em Crósta *et al* (2003), utilizando as imagens ASTER, para procurar por respostas minerais de

argilas comuns em sistemas magmáticos-hidrotermais, que ocorrem com frequência na região do Tapajós.

Na abordagem geobotânica, foram utilizadas as imagens TM, RapidEye e Worldview 2. Esta abordagem é baseada principalmente no método desenvolvido por Almeida e Sousa Filho (2004) e aplicado por Almeida *et al.* (2006), Perrotta *et al.* (2008), Almeida *et al.* (2009) e Zacchi *et al.* (2010). Neste método, são confeccionadas várias razões de bandas para realçar diferentes compostos da vegetação, então são selecionadas as razões nas quais foram obtidos melhores resultados e é realizada uma PCA sobre elas. Posteriormente são analisados os resultados e é feita a escolha das imagens mais representativas. A aplicação deste método inclui ainda uma PCA sobre as bandas do NIR e do SWIR da imagem, na qual a PC1 resultante é uma imagem fortemente correlacionada com o albedo, e fazer a fusão desta PC1 com as componentes obtidas a partir da PCA sobre os índices de vegetação.

Em uma abordagem modificada, Crósta *et al.* (2016) utilizaram pares de imagens obtidas em datas diferentes para analisar o comportamento da vegetação aplicando a PCA sobre a mesma banda em duas datas diferentes. Deste modo, a informação redundante se concentra na PC1 enquanto a informação que é diferente entre as duas imagens se concentra na PC2. Sobre o conjunto de PCs2 aplicaram uma PCA obtendo composições falsa-cor realçando as variações sazonais. Com o mesmo objetivo foram feitas composições de falsa cor utilizando a mesma banda em datas diferentes, sem a aplicação de razões ou PCA. Também foram feitas razões de bandas utilizando a mesma banda em pares de datas diferentes, e confeccionadas composições coloridas utilizando os resultados obtidos. Com este mesmo intuito será também feita a análise por principais componentes do conjunto de imagens como realizado por Byrne *et al.* (1980) e também sobre índices de vegetação aplicados às imagens como realizado por Ferreira e Huete (2004).

As imagens RapidEye também foram utilizadas para analisar a evolução dos vários garimpos que existem nas drenagens ao longo do tempo. Deste modo, considera-se que nas drenagens em que houve maior evolução dos garimpos, provavelmente há maior presença de ouro. Por fim, foi obtida a rede de drenagem da região a partir do modelo digital de superfície do sensor ALOS PALSAR, utilizando o *software* Arcgis, e foi realizada a extração das bacias das drenagens em que houve maior evolução dos garimpos, com o objetivo de delimitar possíveis áreas-fonte do ouro. As bacias de drenagem obtidas foram comparadas com o mapa geológico da região e com os resultados obtidos a partir da aplicação dos outros métodos,

Os dados obtidos a partir destes estudos foram comparados entre si e com as informações existentes na bibliografia, principalmente o mapa geológico do platô. Considerando a variedade dos sensores e dos procedimentos julgou-se importante apresentar um fluxograma, como apresentado na Figura 3.

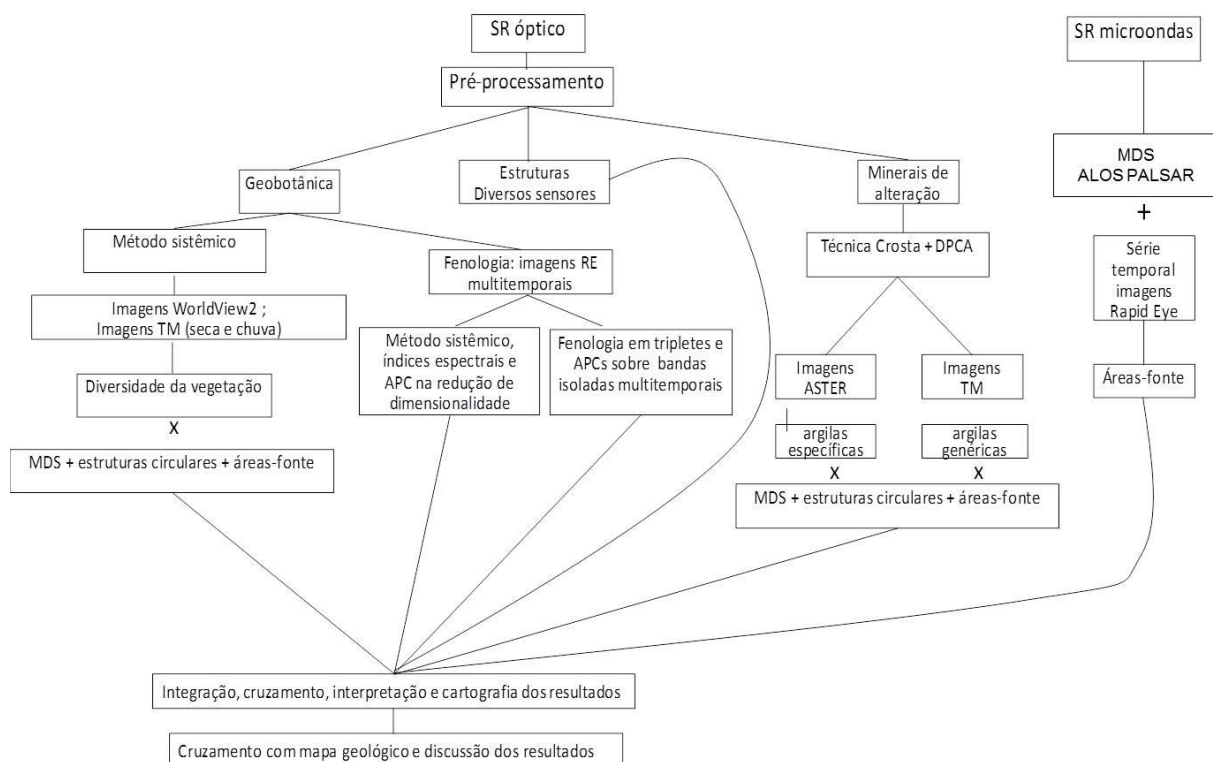


Figura 3: Fluxograma indicando os vários métodos utilizados no projeto, assim como sua sequência de aplicação e suas relações entre si.

5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Resultados Obtidos

As imagens TM permitiram as primeiras abordagens da área de estudo. Uma simples composição colorida, das bandas 4/7/2 em RGB da imagem de 21/06/1984, mostra uma divisão muito forte entre a cobertura vegetal da porção oeste e leste do platô. Nesta ocasião não havia desmatamentos na região do platô, ou seja, a vegetação era a natural. A imagem da Figura 4, com a composição acima, mostra ainda duas estruturas circulares. O mapa geológico da área, de acordo com Klein *et al.* (2017), muito semelhante ao de Appleyard *et al.* (2016), não mostra estas estruturas circulares e tão pouco a relação da vegetação com a geologia.

Com exceção da Figura 4, que possui o grid no sistema de coordenadas geográficas WGS 1984, o restante das figuras apresentadas está colocado com o grid no sistema de coordenadas projetadas UTM Datum WGS 1984 zona 21S.

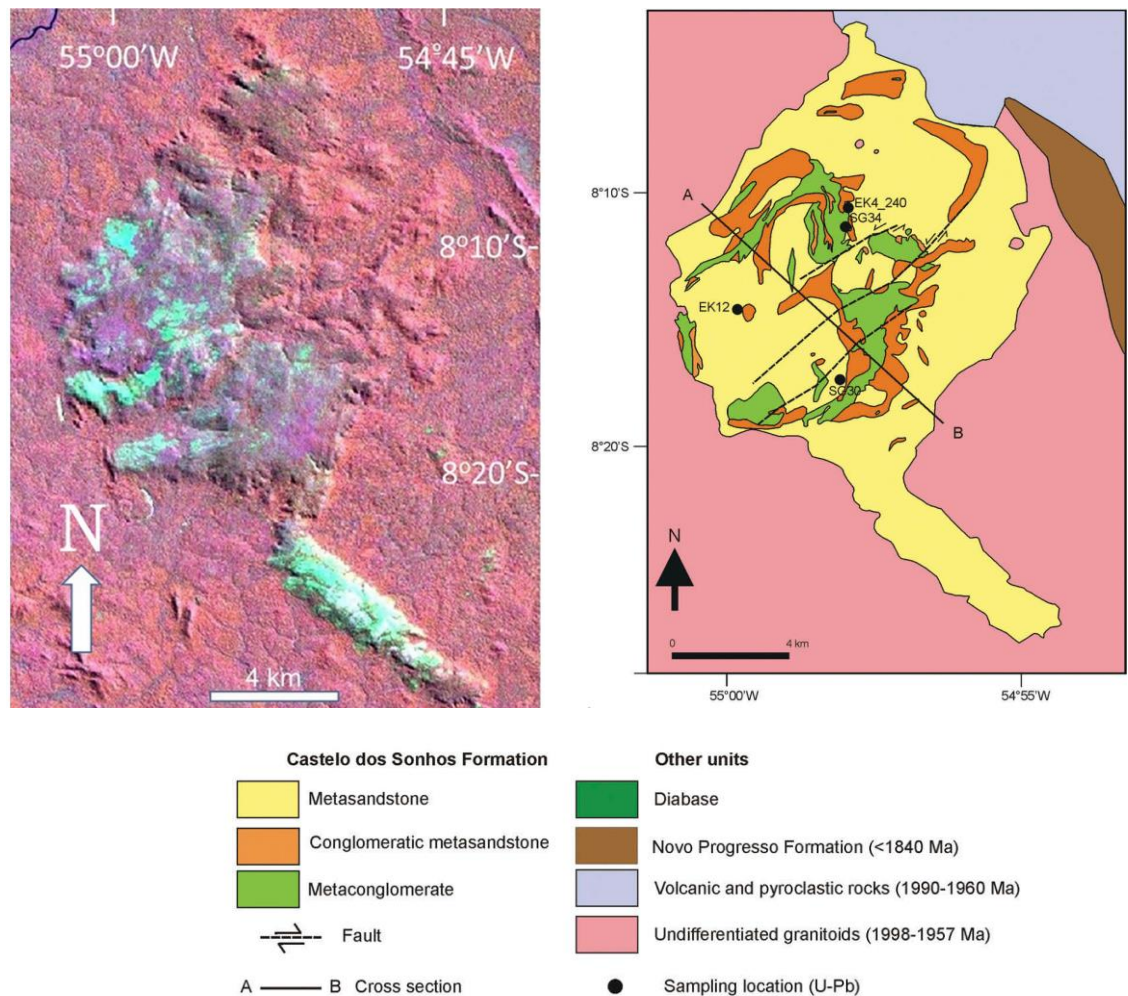


Figura 4: À esquerda segmento de composição colorida falsa-cor de imagem TM Landsat 5, obtida na data 21/06/1984, das bandas 4/7/2 em RGB e à direita Mapa Geológico da área como apresentado em Klein *et al.* (2017).

Os resultados obtidos a partir da procura por respostas espectrais minerais não foram muito positivos. Uma parte das razões de bandas gerou imagens com muito ruído e as que não estavam ruidosas em sua maioria eram compostas por respostas fortes nas regiões vegetadas do platô e respostas fracas nas regiões não vegetadas, mesmo após a aplicação da técnica desfoliante (Fraser e Green, 1987). Os resultados obtidos pela aplicação da Técnica Crósta foram semelhantes aos obtidos por meio das razões de bandas, em que alguns resultados possuíam muito ruído para serem significativos e outros possuíam respostas espúrias da vegetação e respostas fracas nas áreas não vegetadas.

A Figura 5 indica o resultado da aplicação do método de Fraser e Green (1987) e nesta imagem fica claro que toda a região leste e parte da região norte do platô são cobertas por vegetação (pixels em ciano), enquanto nas regiões oeste, central e sul a vegetação é esparsa ou não existente (pixels em negro ou vermelho). Esta separação das áreas com vegetação densa e esparsa mostrou eficiência do método, com a resposta de vegetação sendo concentrada na PC1. Nas regiões com vegetação esparsa houve indicação da presença de argila em pixels espalhados pelo platô, sendo que a área com

maior concentração é na região oeste, dentro do que aparenta ser uma estrutura circular. Observe-se que a alta proporção de quartzo nos metarenitos e metaconglomerados dificulta a aplicação do método, voltado ao realce de argilo-minerais de origem hidrotermal. Outra feição notável é a estrutura circular na região central do platô, que apesar de ser densamente vegetada apresenta um discreto contorno de resposta espectral de argilas (cor vermelha). É interessante notar que Appleyard *et al.* (2016) e Klein *et al.* (2017) consideram que a mineralização aurífera do Castelo dos Sonhos é um *paleoplacer* modificado por alterações hidrotermais e, neste caso, as estruturas circulares podem estar indicando a presença de intrusões ígneas não aflorantes que poderiam resultar nas alterações hidrotermais verificadas no depósito.

Esta imagem foi obtida no ano de 1984, época em que esta região ainda era muito pouco ocupada. Sendo assim, pode-se considerar que a vegetação de savana existente nas regiões central, oeste e sul do platô seja natural nesta região.

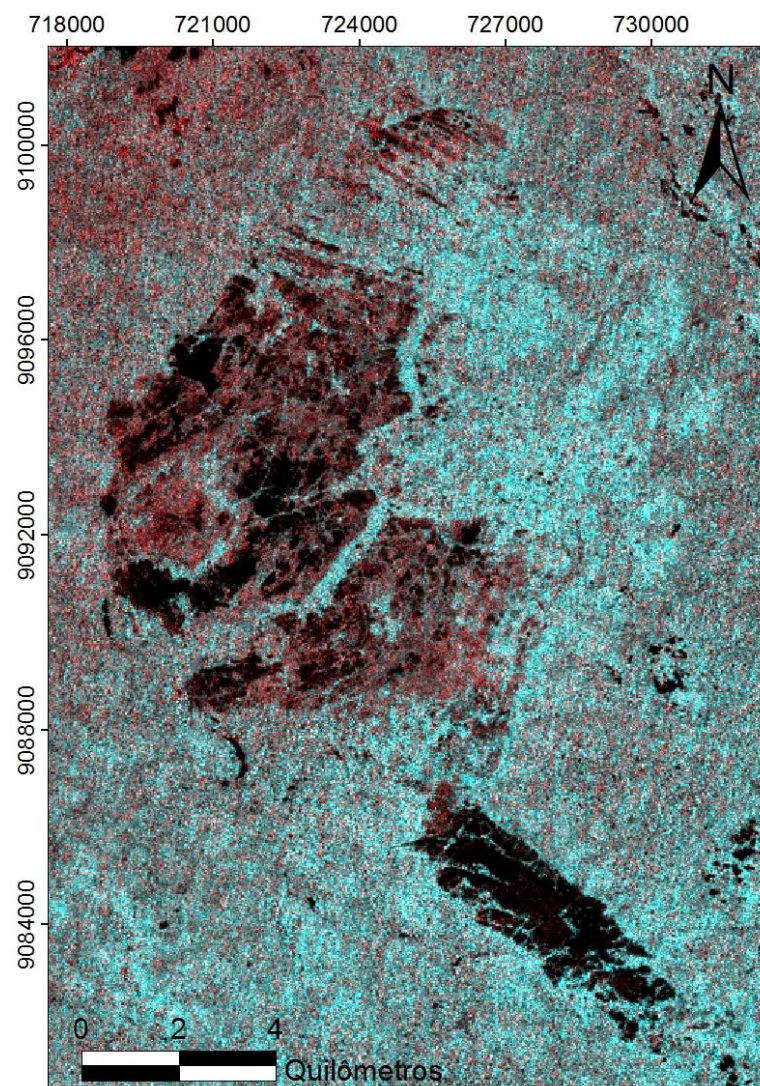


Figura 5: Composição colorida utilizando os resultados da aplicação da técnica desfoliante (Fraser e Green, 1987) na imagem obtida em 08/08/1984, com PC2:PC1:PC1 em RGB. Neste caso as áreas pretas da imagem não possuem respostas de vegetação e argilas, as áreas com cor ciano apresentam respostas apenas de vegetação, e as áreas vermelhas apresentam resposta apenas de argilas.

A análise das imagens RapidEye gerou os resultados considerados mais interessantes. Para este estudo foi corrigido o problema de georreferenciamento existente em uma das imagens, sendo possível utilizar as quatro imagens no processo. As composições em falsa cor realizadas utilizando a mesma banda em três datas diferentes, especialmente aquelas geradas utilizando as bandas 4 e 5 (*red edge* e NIR) se mostraram muito ricas em informação, inclusive nas áreas com vegetação esparsa. As composições coloridas utilizando bandas das imagens de 20/07/2012, 21/06/2014 e 02/07/2015 geraram os melhores resultados. Também foram feitas razões de bandas utilizando a mesma banda em duas datas diferentes, mas os resultados obtidos não foram significativos.

A Figura 6 mostra exemplos do que pode ser observado utilizando este método. A partir de ambas as composições é possível concluir que existem pelo menos duas zonas homólogas no platô, uma a norte e nordeste, que possui vegetação mais densa e apresenta um bandamento mais intenso, com direção NW-SE, e outra que ocorre nas partes oeste e sul do platô, onde o bandamento é interpretada como acamamento e se encontra dobrado, como mostrado em Appleyard *et al.* (2016). Nesta última ocorre vegetação esparsa e são aparentes pelo menos duas gerações de lineamentos, uma com direção ENE e outra com direção NNE. A composição utilizando a banda 4 das imagens RapidEye gerou resultados ricos em detalhes, nos quais é possível observar o flanco NW da dobra sinforma que ocorre no platô (Appleyard *et al.*, 2016), e no canto inferior direito da imagem é possível observar uma estrutura circular.

O método idealizado por Crósta *et al.* (2016) foi aplicado a pares de imagens RapidEye. O par composto pelas imagens de 29/05/2011 e 20/07/2012 foi o que apresentou os melhores resultados. A figura 7 apresenta a PC1 obtida a partir da realização da PCA sobre o conjunto de PCs 2 obtido através da comparação entre a mesma banda nas duas datas. Nesta imagem, é possível observar o bandamento que ocorre nas regiões central e oeste do platô, assim como os lineamentos que ocorrem na região norte, que se encontram fortemente realçados nesta imagem.

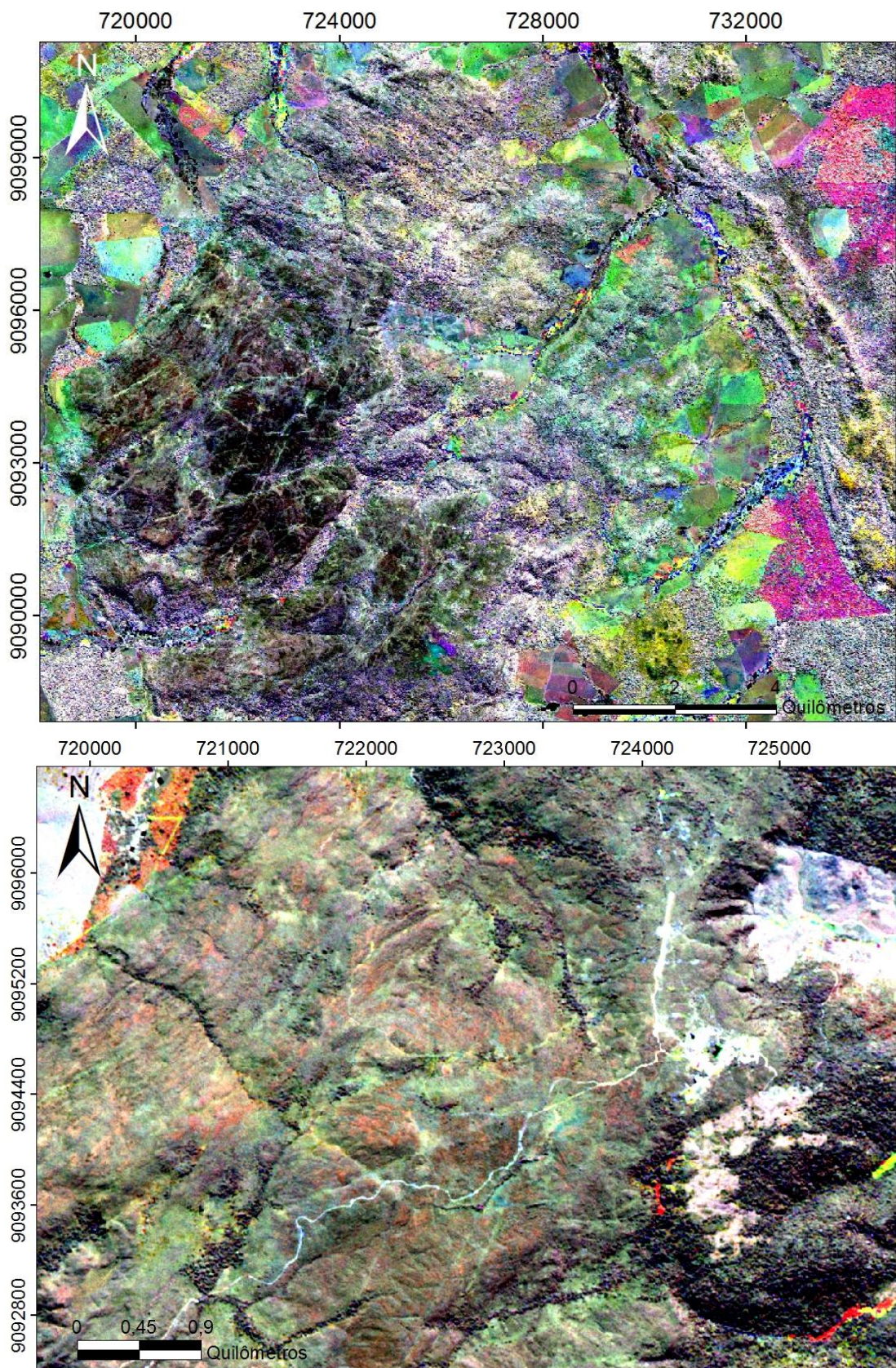


Figura 6: Acima, composição colorida utilizando a banda 5 (Infravermelho Próximo) do sensor RapidEye em três datas diferentes (02/07/2015, 21/06/2014 e 20/07/2012 em RGB). Abaixo, composição utilizando a banda 4 (*red edge*) das imagens RapidEye em três datas diferentes (02/07/2015, 21/06/2014 e 20/07/2012 em RGB). Nela é possível observar uma estrutura circular e uma série de lineamentos que condiz com o flanco NW da dobra mostrada no mapa de Appleyard *et al.* (2016). O bandamento ressaltado em cores diferentes pode referir-se ao acamamento.

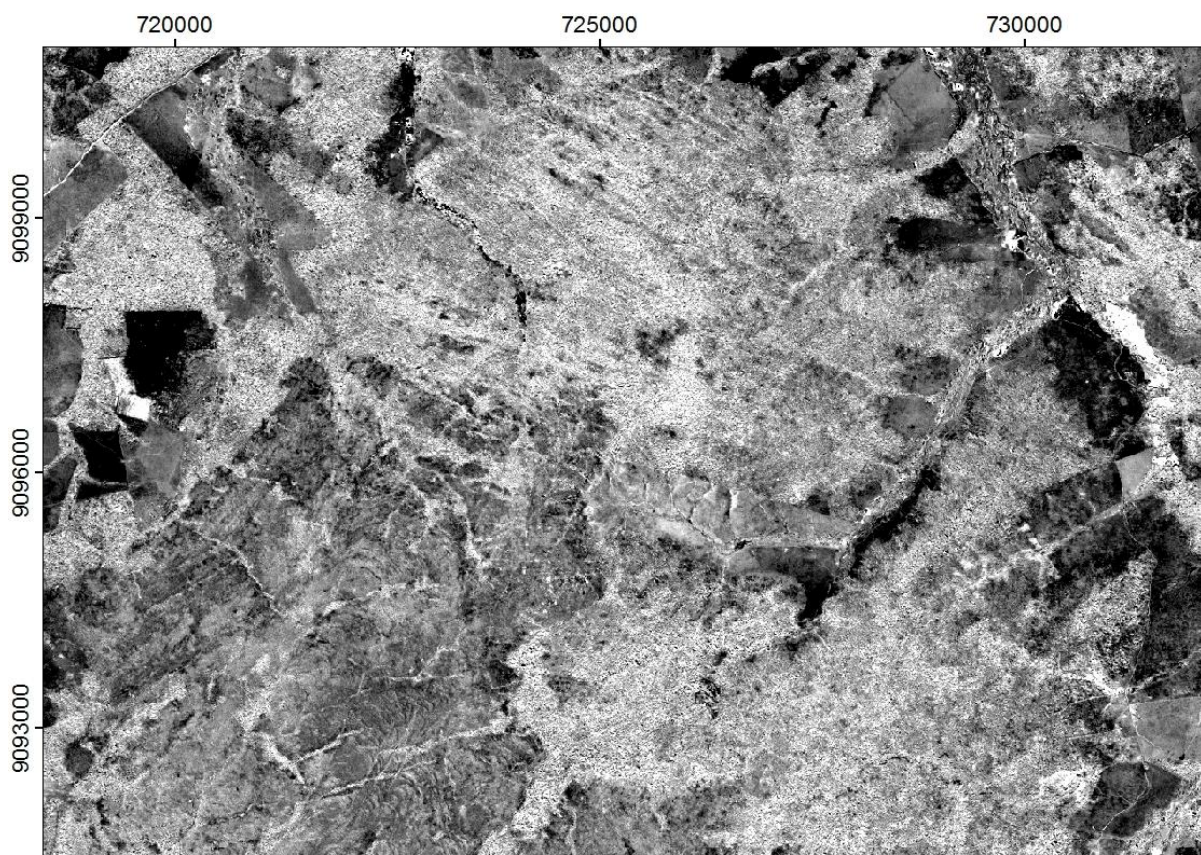


Figura 7: Imagem mostrando a PC1 obtida a partir da aplicação do método apresentado por Crósta *et al.* (2016) utilizando as imagens RapidEye obtidas em 29/05/2011 e 20/07/2012. Na imagem é possível observar o bandamento na região central e oeste e os lineamentos na região norte com clareza.

Foi realizada, utilizando todas as imagens a disposição uma análise das estruturas do platô. A Figura 8 é uma composição do índice de vegetação GNDVI (Gitelson e Merzlyak, 1998) em três datas diferentes (02/07/2015, 21/06/2014 e 20/07/2012 em RGB). Sobre a imagem foram desenhadas as estruturas interpretadas no platô.

Em vermelho estão lineamentos interpretados como falhas, que ocorrem principalmente na região central e oeste do platô. São notáveis dois sistemas de falhas, um com direção NNE e outro com direção ENE. É possível ver que há deslocamento relativo entre estas duas direções de falhas onde elas se cruzam, sendo possível interpretar que as falhas de direção NNE são mais recentes que as de direção ENE, pois as deslocam. Em azul está o interpretado como acamamento sedimentar das rochas da região mais central e oeste do platô. Estima-se que este seja o acamamento devido aos estudos feitos em campo pela TriStar e publicados na literatura. Em verde, estão os lineamentos de direção ESE que ocorrem na porção norte, que foram interpretados como foliação metamórfica ou associada a uma zona de cisalhamento. É possível notar que mais a sul eles ocorrem com direção mais ESE do que os que ocorrem mais a norte, que tem direção tendendo mais para SE, o que poderia indicar a existência de uma dobra fechada nesta região, mas não é possível confirmar esta hipótese apenas através da análise das imagens.

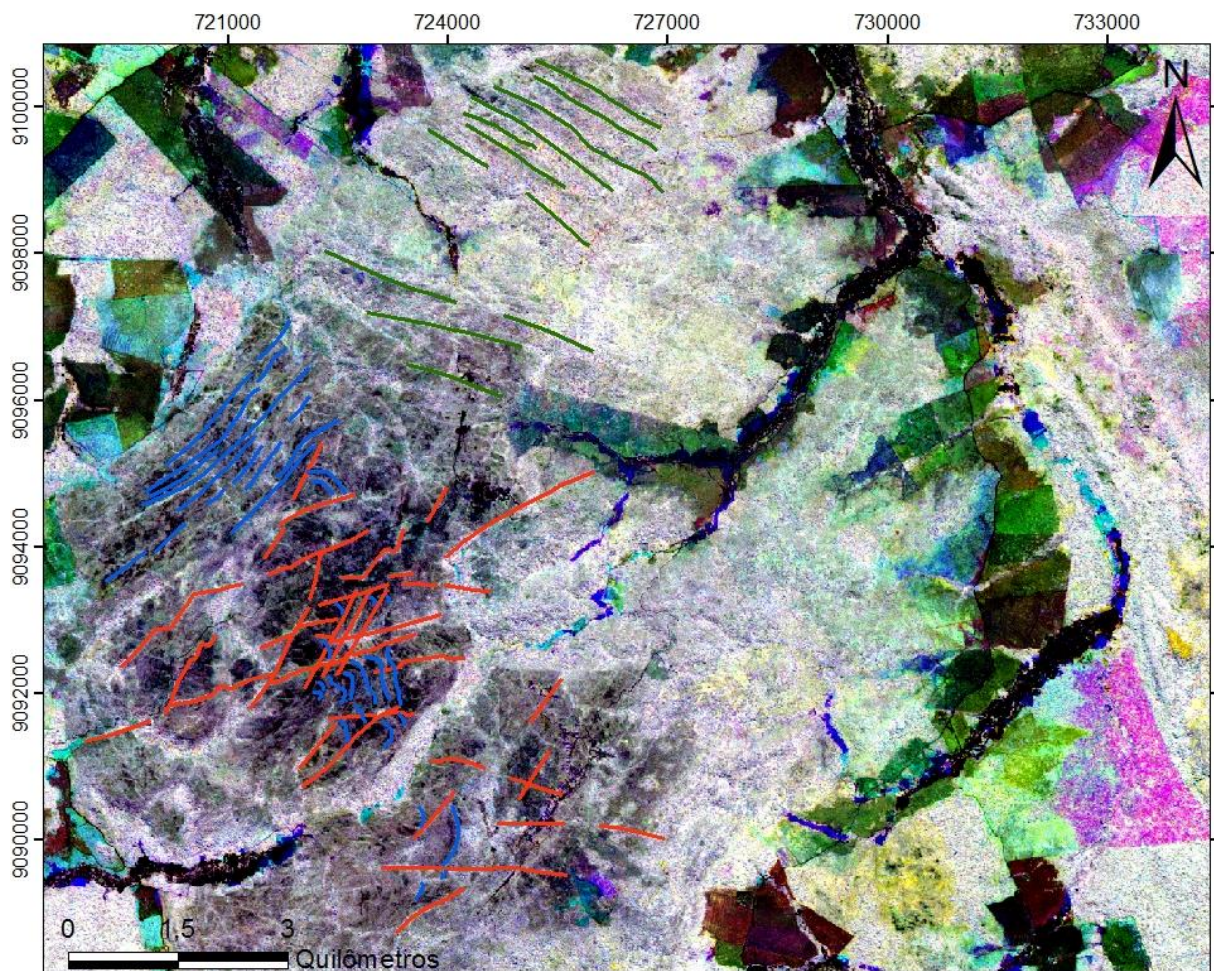


Figura 8: Imagem utilizando o índice de vegetação GNDVI em três datas diferentes (02/07/2015, 21/06/2014 e 20/07/2012 em RGB). Sobre a imagem foram adicionados os lineamentos interpretados neste estudo. Em vermelho estão lineamentos interpretados como falhas, em azul, lineamentos interpretados como acamamento e em verde estão lineamentos que ocorrem na porção norte do platô e que tem direção ESE.

As imagens Worldview 2 foram processadas pelo método sistêmico (Almeida e Souza Filho, 2004) ou utilizadas apenas com realces de contraste em composições coloridas ou em preto e branco. Na Figura 9 uma composição colorida das bandas 7/4/2 em RGB da estrutura circular do centro do platô mostra a variação da vegetação e a presença de garimpo em atividade cuja área fonte está integralmente dentro da estrutura circular. Observe-se também como mesmo na porção NE da estrutura, onde há vegetação florestal dentro e fora da estrutura, nota-se seu limite. Na figura 10, é apresentada, na mesma composição da figura 9, o limite NW da estrutura circular, no qual existe uma falha, mapeada em Appleyard *et al.* (2016). Na figura é notável a existência de uma estrutura linear que separa duas regiões de vegetações diferentes, que ocorrem na imagem com colorações diferentes em coincidência com a falha mapeada.

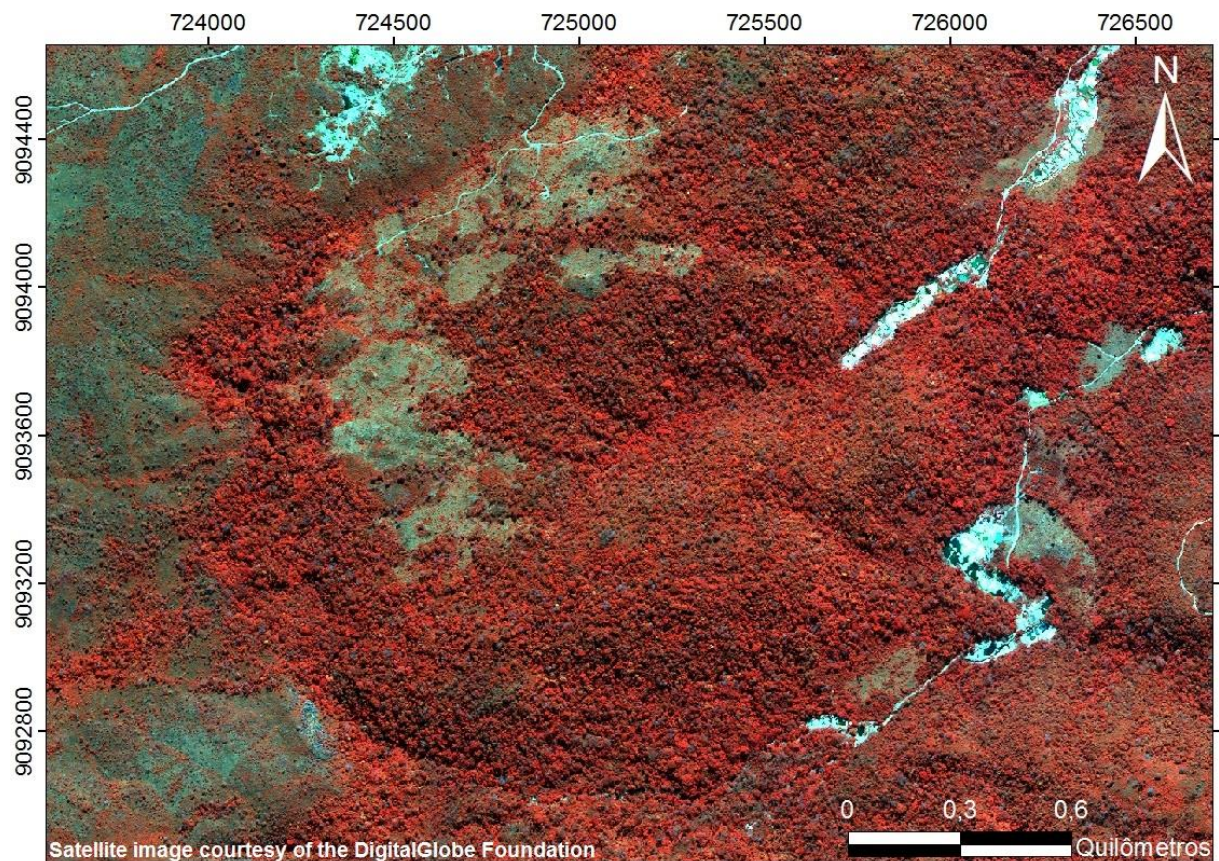


Figura 9: Composição colorida utilizando as bandas 7/4/2 em RGB da imagem Worldview 2 mostrando estrutura circular na região central do platô. Observar mudança brusca na textura do dossel da floresta em relação às regiões fora da estrutura.

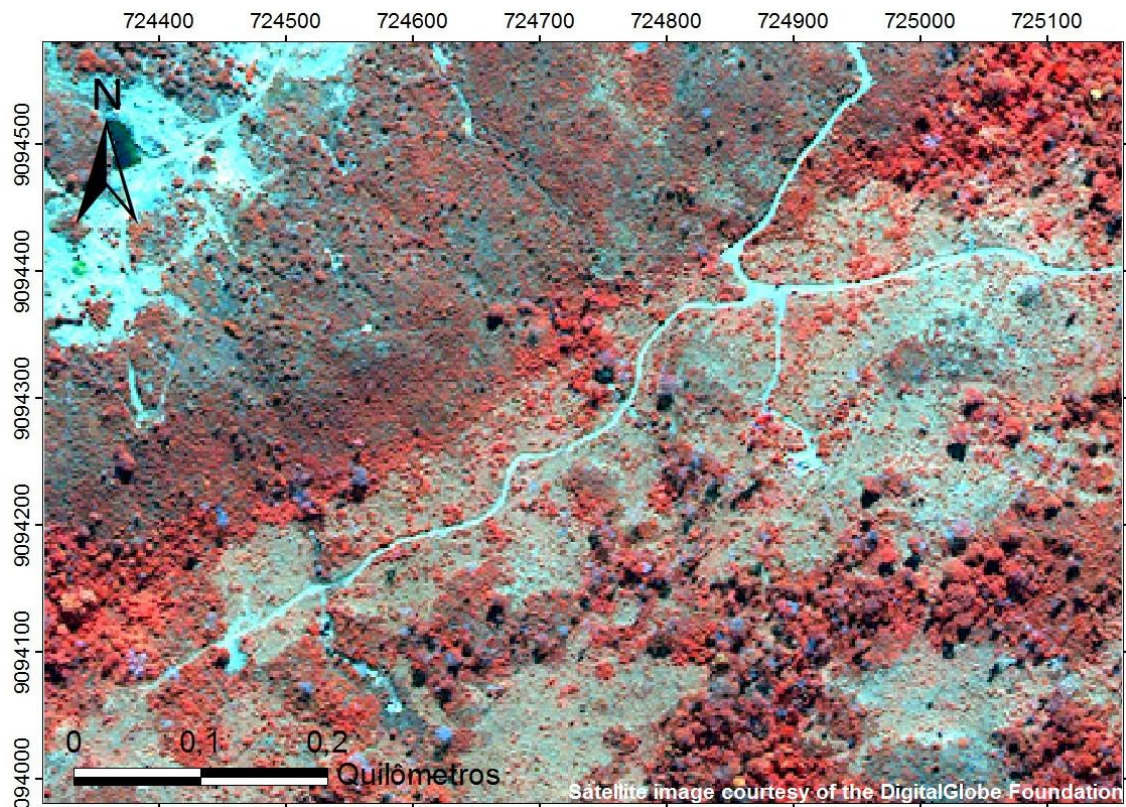


Figura 10: Detalhe da área noroeste da estrutura circular presente na Figura 9. Nesta figura é possível notar uma estrutura linear que separa duas regiões de tonalidades e vegetações diferentes. Esta estrutura corresponde a uma falha presente no mapa geológico de Appleyard *et al.*, (2016)

Observe-se que a falha anteriormente citada e outra na parte sul da estrutura, segundo o mapa de Appleyard *et al.* (2016), são estruturas fundamentais a explicar o deslocamento dos metaconglomerados mineralizados em direção NE, como se estivessem deslocados pelo que aqui foi interpretado como estrutura circular. Examinando a porção sul desta estrutura circular nas imagens Worldview 2, onde foi cartografada aquela segunda falha, não se observa evidências de sua presença tanto na porção recoberta por vegetação florestal como por savana. As figuras 9 e 11 servem de exemplo para esta afirmação, pois nelas não existem evidências da existência de tal estrutura. Apresenta-se na Figura 11 apenas um segmento da porção sul da estrutura circular na imagem pancromática, mostrando como a vegetação varia bruscamente em associação à estrutura circular. Observe-se que diferenças na iluminação solar devidas à topografia alteram tonalmente a imagem, mas a sua alta resolução permite afirmar que a vegetação arbórea é mais densa no interior da estrutura circular.

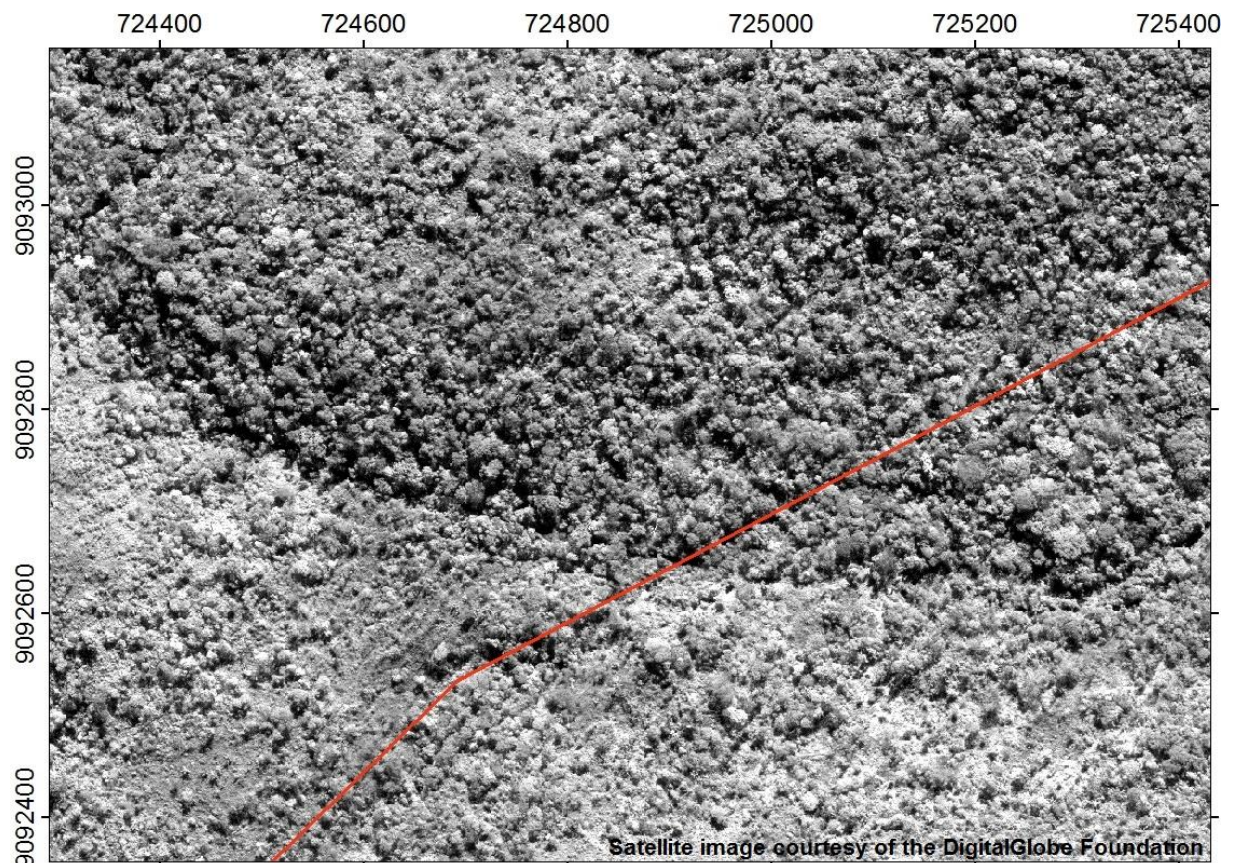


Figura 11: Imagem pancromática do sensor Worldview 2 mostrando em maior detalhe a borda sul da estrutura circular vista na Figura 6. Nesta imagem fica clara a diferença na altura vegetação dentro e fora da estrutura. Em vermelho está colocada uma falha presente no mapa geológico de Appleyard *et al.* (2016)

O Método Sistêmico (Almeida e Souza Filho, 2004) foi aplicado às imagens Worldview 2, utilizando-se os índices de vegetação SIPI (Peñuelas *et al.*, 1995), GNDVI (Gitelson e Merzlyak, 1998), MCARI (Daughtry *et al.*, 2000), Razão Vermelho:Verde (Gamon

e Surfus, 1999) e Vlg (Gitelson *et al.*, 2002). As Figuras 12 e 13 mostram as imagens correspondentes a PC5 e a PC3, respectivamente, obtidas a partir da aplicação da PCA. A Figura 12 mostra uma imagem do platô inteiro, nela ficam claras diversas estruturas, principalmente os lineamentos de direção NNE e ENE na região central do platô, a estrutura circular na porção central, assim como notáveis lineamentos de direção ESE na porção norte platô. As áreas densamente vegetadas também se encontram muito bem diferenciadas das áreas de vegetação de savana.

A figura 13 corresponde à PC3 obtida a partir do Método Sistemico (Almeida e Souza Filho, 2004), ela mostra em detalhe a região Centro-Oeste do platô, onde é possível ver o acamamento das rochas do local, sendo possível ainda estimar, utilizando a “regra dos Vs”, que as camadas mergulham para SW. É interessante observar que a ausência dessa resposta no cruzamento da foliação da porção Oeste do platô com drenagens (ver figura 6) indica maior mergulho, como mapeado em campo e apresentado em Appleyard *et al.* (2016).

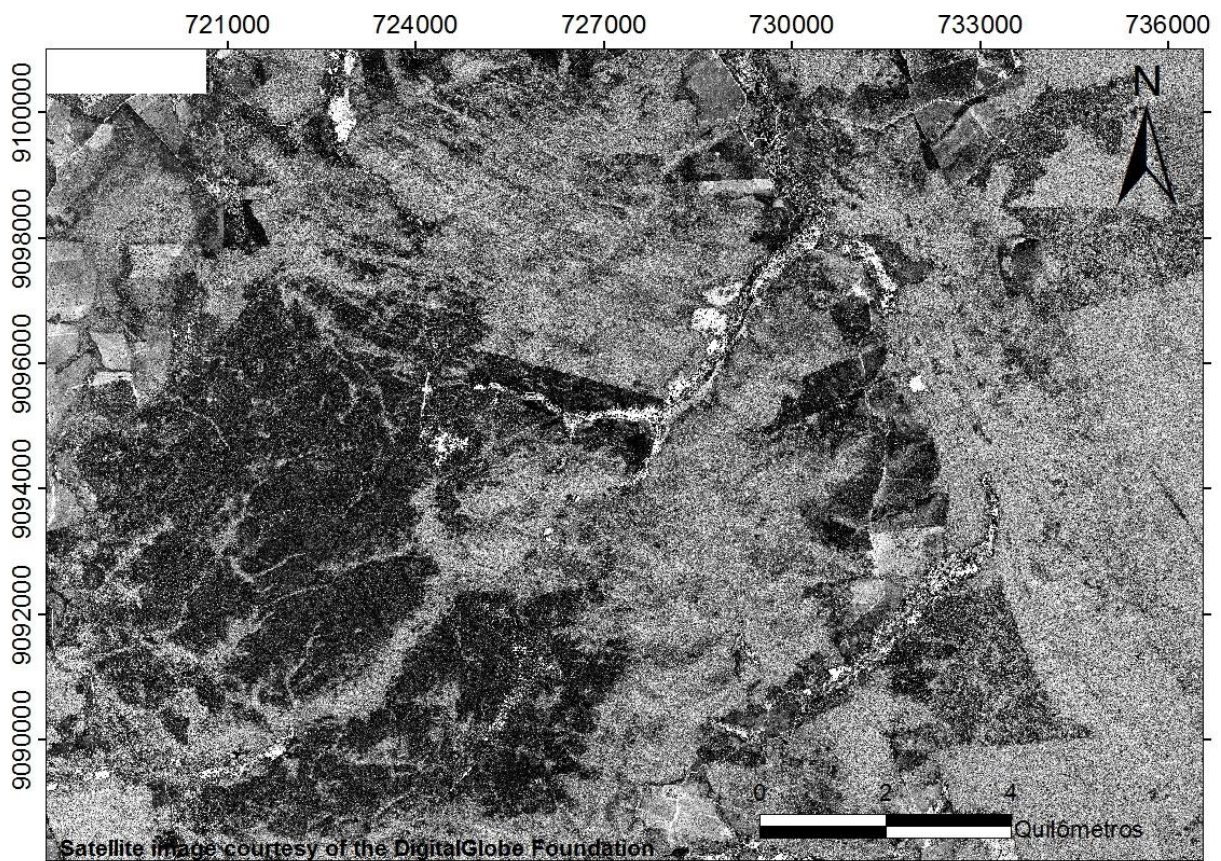


Figura 12: Imagem da PC5 obtida a partir da aplicação do Método Sistemico (Almeida e Souza Filho, 2004) sobre as imagens Worldview 2. Nela é possível observar forte contraste entre os diferentes tipos de vegetação da área (floresta tropical e savana), assim como diversos lineamentos de direção NNE e ENE na porção central do platô e de direção ESE na sua porção norte.

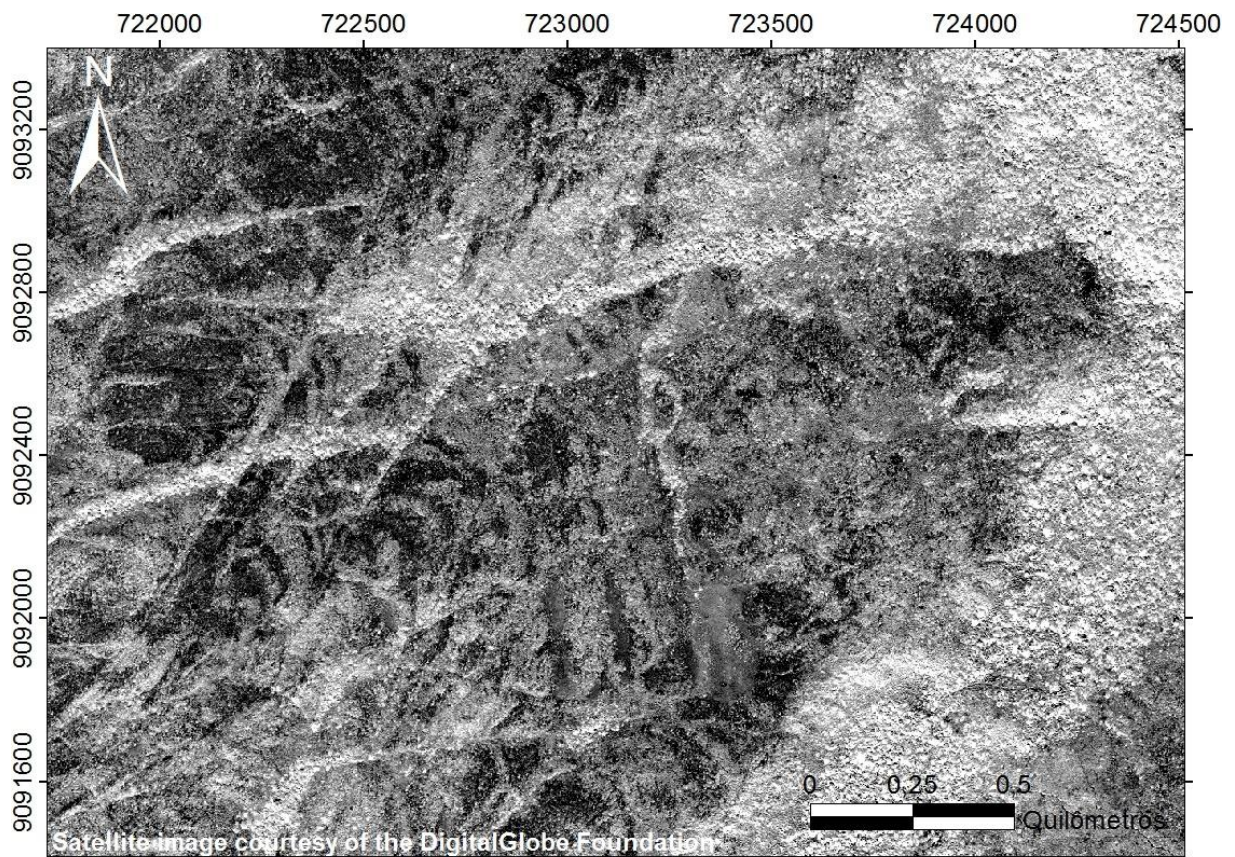


Figura 13: Detalhe da porção Centro-Oeste do platô na imagem da PC3 obtida a partir da aplicação do Método Sistemico (Almeida e Souza Filho, 2004) sobre imagens Worldview 2. Nela é possível notar um bandamento de direção geral NW, que foi interpretado como acamamento sedimentar devido à sua semelhança ao observado na região oeste que foi interpretado em Appleyard *et al.* (2016) como acamamento sedimentar. Ele se curva quando cruza drenagens e, a partir desta curvatura, pode-se estimar que as camadas mergulham na direção SW.

Os MDSs foram utilizados para a obtenção da rede de drenagem sobre o platô e para a análise de seu relevo, sendo processados com o objetivo de se realizar uma análise da geomorfologia e das estruturas que ocorrem na região. A figura 14 corresponde a uma imagem do MDS ALOS PALSAR processada com a técnica de HillShade disponível no software ArcGis 10.2.2. Ela mostra, em maior detalhe, a estrutura circular na porção central do platô, na qual é possível observar a estrutura circular inteira, sendo visível o limite nordeste da estrutura, que é coberto por vegetação e difícil de ser visualizado nas imagens ópticas. Também são notáveis diversos lineamentos de direção NE que cortam a estrutura, evidenciando que estes devem ter se formado posteriormente a ela. No canto superior esquerdo da imagem ocorrem lineamentos de direção NNE.

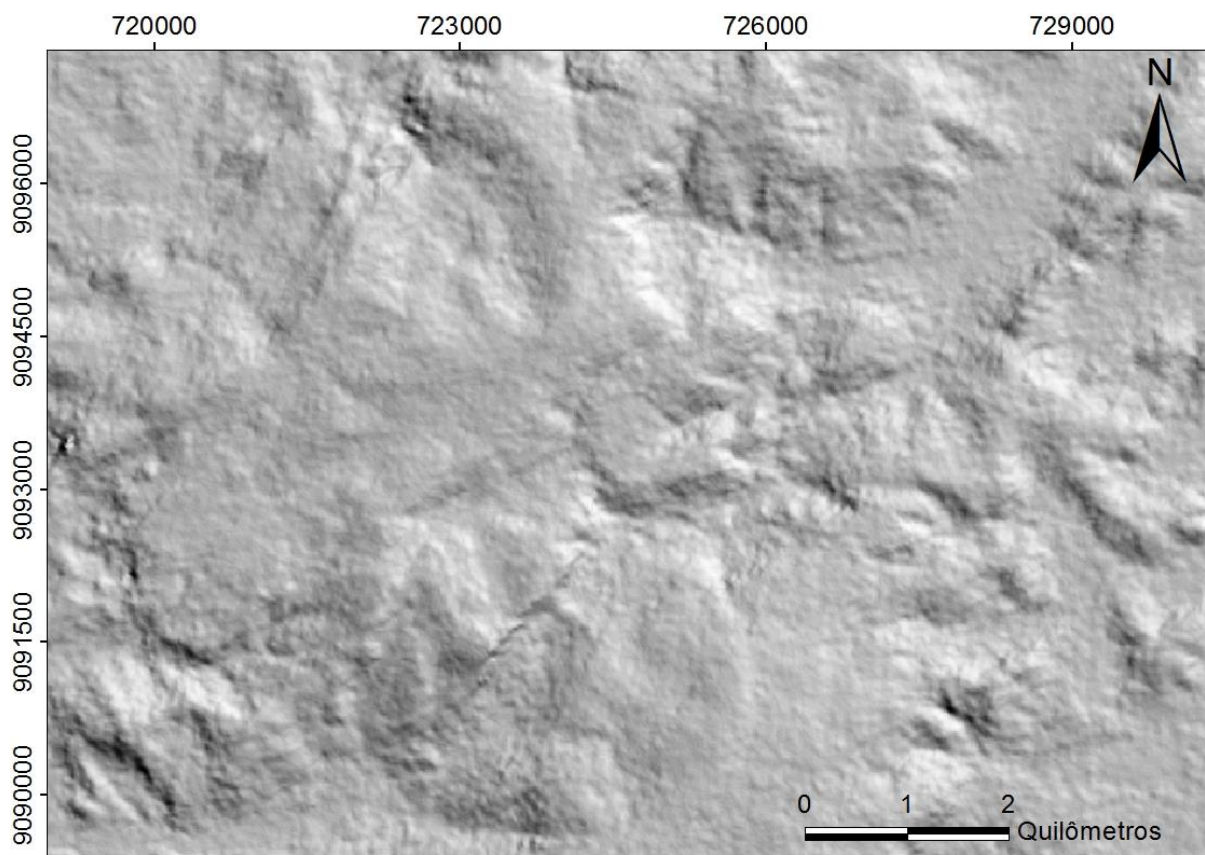


Figura 14: Imagem do MDS ALOS PALSAR, com o processamento Hillshade disponível no software ArcGis 10.2.2. A imagem mostra em detalhe a estrutura circular que ocorre na região central do platô assim como diversos lineamentos de direção ENE e NNE, alguns dos de direção ENE cortam a estrutura, indicando que foram formados posteriormente.

O mapa de teores de Au apresentado em Appleyard *et al.* (2016) foi sobreposto a algumas das imagens geradas, com o objetivo de se avaliar a distribuição espacial do Au sobre o platô.

A figura 15 mostra o mapa de teores de Au apresentado em Appleyard *et al.* (2016) sobreposto à imagem composta pela banda 4 (*Red Edge*) do sensor RapidEye em três datas diferentes (02/07/2015, 21/06/2014 e 20/07/2012 em RGB), e a figura 16 mostra, em maior detalhe, a estrutura circular na porção central do platô. Nela, são apresentadas duas imagens da estrutura circular com o mesmo mapa de teores de Au sobreposto a elas, sendo que uma corresponde a composição colorida da banda 4 (*Red Edge*) do sensor RapidEye em três datas diferentes, com as bandas de 02/07/2015, 21/06/2014 e 20/07/2012 em RGB e a outra corresponde a imagem do sensor ALOS PALSAR com o processamento HillShade do software ArcGis 10.2.2 aplicado sobre ela.

Nestas duas imagens é possível notar que o corpo conglomerático mineralizado, sobre o qual está a maior parte dos altos teores de Au não corta a estrutura circular, mas a bordeja. Considerando que o modelo adotado para a mineralização é o de um *paleoplacer modificado*, existe a possibilidade de que haja uma intrusão ígnea subjacente a esta

estrutura que seja responsável pelo hidrotermalismo presente na área. Na figura 15 é possível notar que as anomalias de Au entram na região mais a norte que possui vegetação mais densa e uma série de lineamentos de direção ESE.

A figura 16 mostra com mais detalhe as anomalias em Au circundando a estrutura circular, sugerindo que esta seja responsável pelo deslocamento do metaconglomerado para NE. Este deslocamento, no mapa de Appleyard *et al.* (2016), é explicado por duas falhas com rejeito horizontal, uma dextral (a norte) e uma sinistral (a sul), sendo que não existem evidências da ocorrência da falha mais a sul nas imagens analisadas. No texto de Appleyard *et al.* (2016) explica-se este inusual padrão estrutural como sendo resultado de um pequeno graben, sendo o deslocamento dextral e sinistral do corpo apenas um deslocamento aparente. De fato, o abatimento de uma sequência com mergulho para SW mostraria em planta um deslocamento horizontal aparente como o descrito. A geoquímica de solos confirma a interpretação de que a falha a sul não está onde foi cartografada, pois a anomalia em Au cruzaria a falha, sem deslocamento, indicando que a estrutural local, de importância na espacialização das áreas mineralizadas, mereceria ser reestudada.

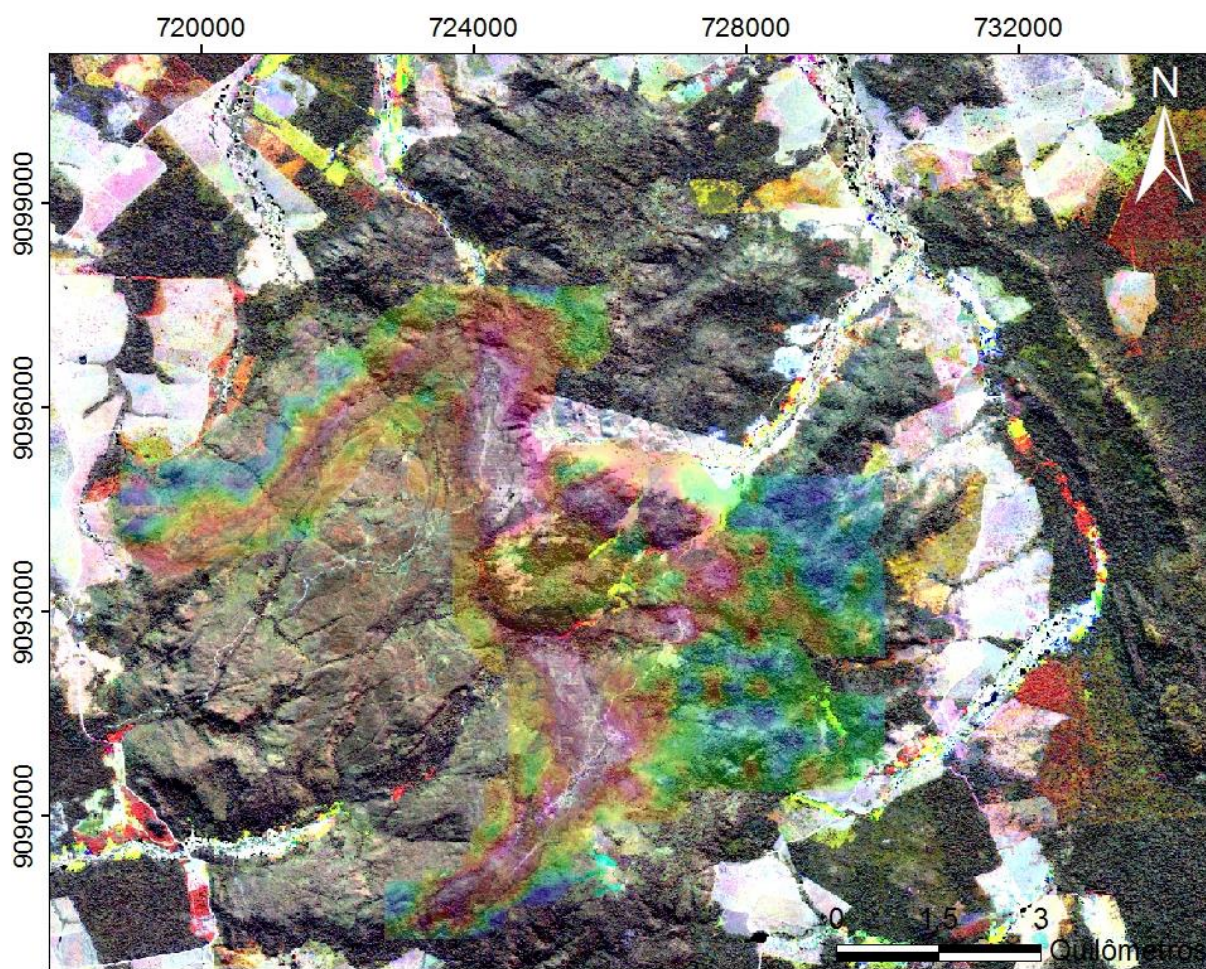


Figura 15: Imagem composta pela banda 4 (*Red Edge*) do sensor RapidEye em três datas diferentes (02/07/2015, 21/06/2014 e 20/07/2012 em RGB). Sobre ela está colocado o mapa de teores de Au presente em Appleyard *et al.* (2016).

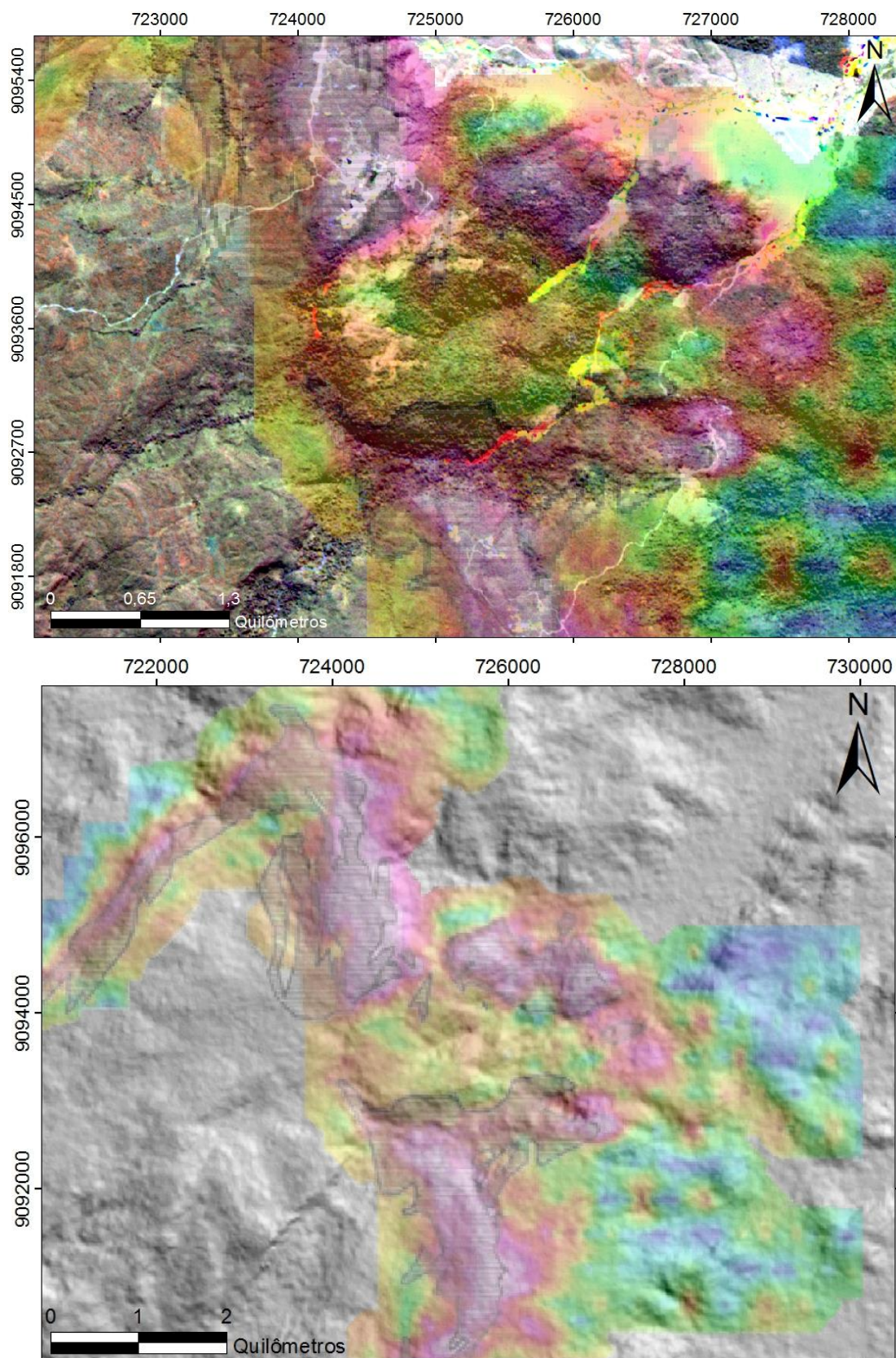


Figura 16: Acima, imagem obtida pela banda 4 (*Red Edge*) do sensor RapidEye em três datas diferentes (02/07/2015, 21/06/2014 e 20/07/2012 em RGB), mostrando em maior detalhe a estrutura circular na porção central do platô. Sobreposto a ela está o mapa de teores apresentado em Appleyard *et al.* (2016). Abaixo, Imagem do MDS ALOS PALSAR, sobre a qual foi aplicado o processamento HillShade presente no software ArcGis 10.2.2. Sobre a imagem foi colocado o mapa de teores de Au no solo apresentado em Appleyard *et al.* (2016)

A rede de drenagem ao redor e dentro do platô possui grande quantidade de garimpos. Neste estudo, a presença e a evolução dos garimpos foi utilizada de maneira semelhante a um trabalho de prospecção por sedimentos de corrente. Na prospecção por sedimentos de corrente, é considerado que os minerais pesados, que possuem o metal de interesse, são colocados na rede de drenagem devido a processos de intemperismo e erosão nas rochas fonte e os teores do metal de interesse nos sedimentos aumentam com a proximidade da área-fonte (Fletcher, 1997).

Considere-se que os garimpos migram pelas drenagens na busca de maiores teores de Au. A sua evolução, assim, indicaria as áreas-fonte do metal. A partir da análise das imagens concluiu-se que os garimpos nas regiões leste e sudeste foram os que mais avançaram ao longo do tempo. Na região sudoeste há uma drenagem de maior tamanho que possui grande quantidade de garimpos, mas sua evolução ao longo do tempo foi pequena, e na região noroeste existem duas drenagens com maior presença de garimpos, mas estes não sofreram nenhuma evolução ao longo do período estudado, sendo que uma delas aparentou diminuir em área com o tempo.

A Figura 17 é uma composição colorida da banda 4 (*Red Edge*) do sensor RapidEye em três datas diferentes sendo utilizadas as bandas obtidas em 02/07/2015, 21/06/2014 e 20/07/2012 em RGB. Sobre a imagem foram colocados os contornos das microbacias das drenagens que possuem maior número de garimpos utilizando o MDS ALLOS PALSAR. Nesta imagem é possível avaliar um pouco da evolução dos garimpos, sendo que os garimpos em branco permaneceram na mesma posição nas três datas, enquanto os garimpos em tons esverdeados ou amarelos estavam presentes em 02/07/2015 e 21/06/2014, e os garimpos em vermelho estavam presentes apenas em 02/07/2015, ou seja, evoluíram mais recentemente.

Na Figura 18 há o mapa geológico da área (Appleyard *et al.*, 2016) com as microbacias de drenagem delimitadas em preto sobre ele. Ao analisar esta imagem é possível notar que, como esperado, a maioria das microbacias cruzam partes do corpo conglomerático que hospeda a mineralização, sendo que as bacias mais centrais, que apresentaram maior evolução dos garimpos, cruzam partes extensas do conglomerado. Um detalhe curioso é o fato de que as bacias na região noroeste cruzam grandes partes do corpo conglomerático, mas não apresentaram nenhuma evolução dos garimpos no período. Isto sugere que “Esperança West” não esteja tão mineralizada, como também indicam os menores teores de Au em solo. As bacias a leste e a sul apresentaram pequena evolução dos garimpos e cruzam algumas porções do conglomerado.

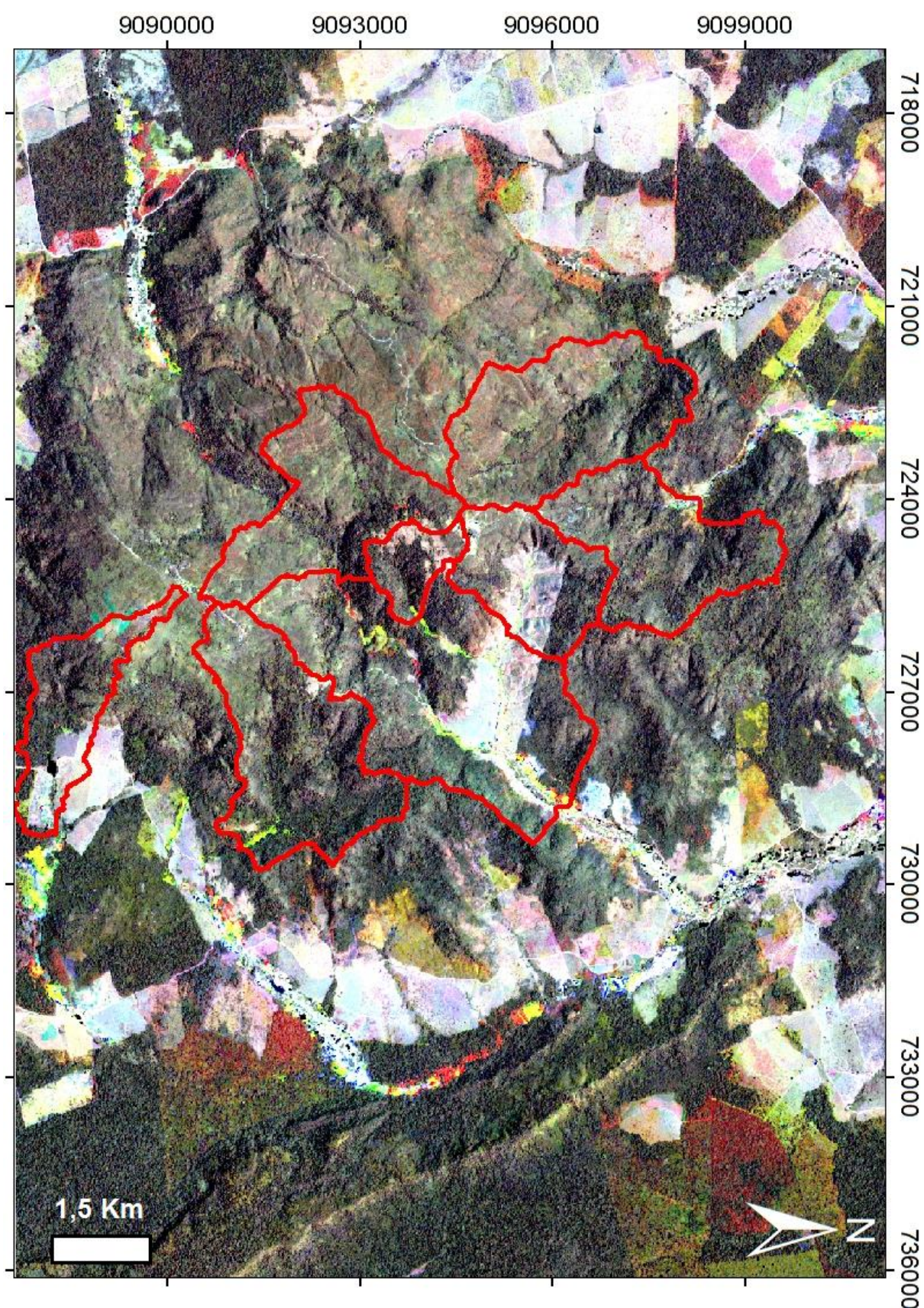


Figura 17: Composição colorida realizada utilizando a banda 4 (*Red Edge*) do sensor RapidEye em três datas diferentes 02/07/2015 (R), 21/06/2014 (G) e 20/07/2012 (B) com microbacias delimitadas em vermelho sobre a imagem.

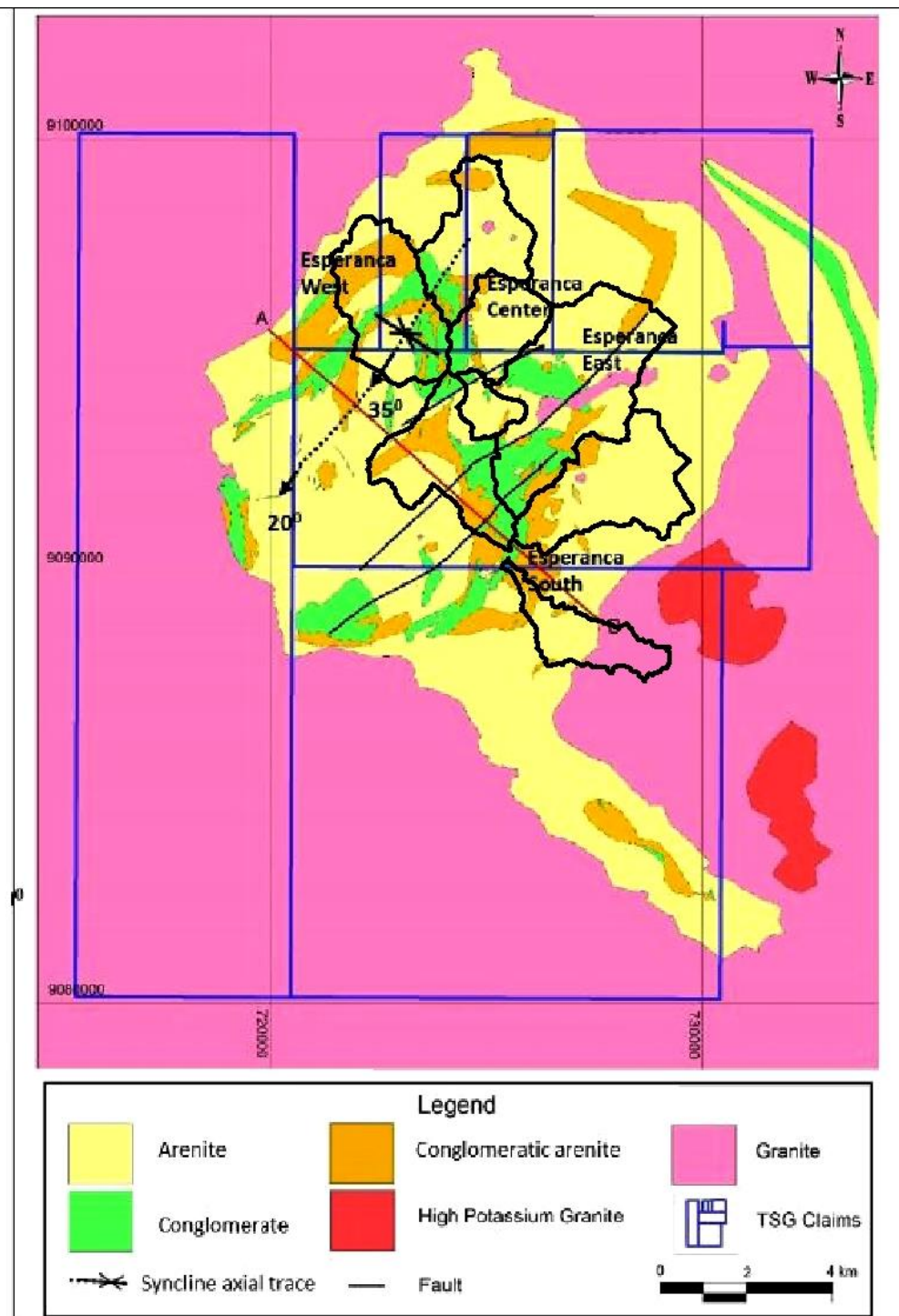


Figura 18: Mapa geológico do platô (Appleyard *et al.*, 2016) com microbacias delimitadas em preto sobrepostas à imagem.

Considere-se, por fim, que o mapa geológico da Figura 18 não cartografa importantes feições fotogeológicas claramente observadas nos produtos de sensoriamento remoto utilizados, como as estruturas circulares, a estruturação com orientação WNW-ESE na região norte do platô ou os lineamentos (provavelmente falhas, tendo em vista que há movimentação relativa entre as duas direções de lineamentos onde estes se cruzam) com direção NNE-SSW. E tão pouco com a distribuição da vegetação. Embora a geologia e a vegetação natural não necessariamente tenham correlação, o que se observa neste caso é

um grau de independência que contraria numerosos estudos presentes na literatura: não havendo variação no substrato rochoso e no relevo o que ocasionaria tal diversidade nas coberturas vegetais?

5.2 Alterações nos objetivos iniciais

Inicialmente o projeto previa uma ênfase maior na busca por respostas espectrais de minerais de alteração hidrotermal e na busca por evidências de hidrotermalismo na região. Os resultados dos métodos adotados para este objetivo não foram conclusivos. Então a pesquisa voltou-se para os métodos geobotânicos, que mostraram uma variedade de resultados muito grande e possibilitaram uma análise mais aprofundada da região.

Algumas outras técnicas que se planejava utilizar, como a aplicação de filtros às imagens e a aplicação da análise por principais componentes sobre todas as bandas de uma mesma imagem ou de conjuntos com mais de uma imagem foram testadas, mas não geraram bons resultados, ou geraram resultados semelhantes àqueles obtidos pela aplicação de outros métodos, optando-se então por não utilizá-las.

Planejava-se aplicar a correção atmosférica FLAASH sobre as imagens RapidEye, mas encontrou-se muita dificuldade para realizá-la, principalmente devido ao fato de que estas imagens, obtidas junto ao geocatálogo MMA, não possuíam os metadados necessários para a aplicação deste processamento. Também se considerou que, para os processamentos feitos naquelas imagens, a correção atmosférica não traria grandes diferenças aos resultados pois foram utilizados comprimentos de onda além do visível, onde o espalhamento de Rayleigh já não é tão intenso.

5.3 Dificuldades Encontradas

A dificuldade mais marcante deste projeto foi a realização de um trabalho de pesquisa mineral baseado apenas em dados da literatura e de sensoriamento remoto. Devido à falta de estudos em campo, foi difícil analisar a precisão dos resultados obtidos e também não houve como verificar se as hipóteses levantadas são corretas. Entretanto diversas feições geológicas, interpretadas a partir de dados remotos e ausentes do mapa geológico disponibilizado pela TriStar Inc., são dificilmente inexistentes. Entre outros considere-se a estrutura circular na região central do platô, evidenciada tanto pela vegetação como pelo relevo, em diferentes imagens ópticas e no MDS obtido por micro-ondas, bem como lineamentos bem caracterizados.

A falta de imagens de alta resolução espacial com bandas na região do SWIR dificultou alguns estudos planejados, principalmente aqueles que envolviam a busca por respostas espectrais de minerais de alteração hidrotermal, e também não permitiu a aplicação de métodos de geobotânica que envolviam análises de bioquímica e água foliar.

6 INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E DA METODOLOGIA ADOTADA

6.1 Interpretação e Discussão dos Resultados

A partir da análise das várias imagens obtidas, considera-se dividir o platô em pelo menos duas zonas homólogas, uma na região norte e nordeste, que possui densa vegetação florestal e uma marcada série de lineamentos de direção ESE, e uma nas partes central, oeste e sul, que possui uma vegetação de savana e na qual é visível o acamamento sedimentar, incluindo o flanco NW da dobra descrita em Appleyard *et al.* (2016). Devido a estas diferenças, levanta-se a hipótese de que estas duas zonas correspondam a sequências deposicionais diferentes. Esta informação é de grande importância para o trabalho de pesquisa mineral, principalmente devido à origem sedimentar da mineralização. Também se levanta a hipótese de que a zona a norte não esteja ou esteja pouco mineralizada, considerando que os garimpos nas drenagens que cruzam esta região não evoluíram durante o período abrangido pelas imagens estudadas.

Outra hipótese levantada seria, considerando a falta de continuidade das estruturas presentes dentro do platô para fora dele, ser a Formação castelo dos Sonhos um grande teto pendente sobre as rochas vulcânicas do Grupo Iriri.

Apenas a partir da análise de imagens é difícil avaliar a intensidade do hidrotermalismo que possa ter ocorrido sobre as rochas da Formação Castelo dos Sonhos, mas o modelo genético de *paleoplacer* modificado adotado pela literatura considera a existência de alguma remobilização do ouro. A existência de uma estrutura circular na região central do platô pode indicar a ocorrência de alguma intrusão ígnea subjacente, o que poderia explicar a existência de alteração hidrotermal nas rochas da formação. Ainda que não definido um modelo alternativo, considerou-se que o sistema de falhas adotado no mapa geológico de Appleyard *et al.* (2016) para explicar o deslocamento do metaconglomerado e das anomalias em solo de Au está ao menos em parte equivocado.

6.2 Discussão Sobre a Metodologia Adotada

Os métodos que tinham como objetivo a busca por respostas espectrais de argilo-minerais não demonstraram a presença de argila em associação às zonas mineralizadas indicadas pela geoquímica de solos, às fraturas ou à principal estrutura circular que corta a região mineralizada. Tanto a Técnica Crósta (Crósta *et al.*, 2003) e a técnica desfoliante (Fraser e Green, 1987), assim, geraram resultados muito ruidosos ou que não possuíam informações relevantes. O motivo para isso provavelmente deve ser a ocorrência de cobertura vegetal em grande parte do platô, mesmo nas regiões que possuíam resposta muito fraca de índices de vegetação, como o NDVI. Acrescente-se que os metarenitos que dominam o platô são altamente quartzosos segundo toda a literatura sobre a geologia local. Isto naturalmente implica em menor presença de argilo-minerais nos solos e afloramentos

rochosos, tanto por alteração intempérica como por eventual alteração hidrotermal. Em outras palavras, como a presença de minerais com resposta espectral diagnóstica deve ser escassa, a relação sinal ruído será baixa mesmo nas áreas esparsamente vegetadas, dificultando a aplicação dos métodos citados.

Os métodos geobotânicos geraram resultados mais interessantes em uma interpretação fotogeológica no senso moderno. Tanto o Método Sistemico (Almeida e Souza Filho, 2004) como a geobotânica fenológica realçaram feições geológicas importantes bem como a variabilidade das coberturas vegetais.

A abordagem fenológica da geobotânica em imagens RapidEye, extremamente simples e com bons resultados, merece ser testada em outras situações. Foi particularmente eficiente na área com vegetação esparsa, de savana. Aliando a qualidade dos resultados com a simplicidade do método, gratuidade das imagens para uso acadêmico e seu ainda escasso uso em Geologia, levou o autor e orientadores a submeterem resumo expandido ao 15º Simpósio de Geologia da Amazônia, em setembro de 2017. O trabalho foi aprovado e apresentado pelo professor Caetano Juliani (co-orientador) em sessão pôster. (Gutierrez *et al.*, 2017).

Destaca-se a importância de tomar alguns cuidados com o método de geobotânica fenológica aqui apresentado e testado. A variabilidade do ângulo de incidência solar em diferentes períodos do ano, mais intensa em latitudes mais elevadas, pode levar a respostas independentes do substrato geológico. Já a variabilidade do ângulo de incidência solar em função do relevo pode ser minimizada com a aplicação de técnicas de processamento como razões de bandas nas várias datas. Uma evolução do método pouco testada foi a de aplicar APC no realce das diferenças entre as imagens de diferentes datas.

O Método Sistemico (Almeida e Souza Filho, 2004) se mostrou capaz de realçar a variabilidade das respostas da vegetação, principalmente quando utilizado em imagens de alta resolução espacial como as do sensor Worldview 2. Neste método, a qualidade do resultado final depende dos índices de vegetação que foram escolhidos inicialmente, sendo assim, escolhendo-se índices que realcem diferentes compostos foliares podem-se obter bons resultados.

A utilização dos garimpos existentes nas drenagens da região para se buscar as áreas fonte do ouro foi uma abordagem diferente, que permitiu algumas interpretações sobre a localização das áreas fonte do ouro. O platô de Castelo dos Sonhos tem dimensões pequenas, de modo que a grande maioria das microbacias de drenagem dentro dele cruzam alguma parte do corpo mineralizado, sendo assim justificável a existência de garimpos na maioria das drenagens que saem do platô. Devido a isso, a precisão deste método não foi muito grande, mas analisando a evolução dos garimpos foi possível avaliar quais drenagens que devem possuir concentrações maiores de ouro e também fazer estimativas sobre a localização das áreas fonte mineralizadas.

7 CONCLUSÃO

O platô de Castelo dos Sonhos foi intensamente estudado por métodos diretos, de mapeamento geológico a trincheiras e numerosas sondagens com o apoio de magnetometria e gamaespectrometria (às quais este trabalho de formatura não teve acesso). Pelo relatório de Appleyard *et al.* (2016) e pelas feições geológicas de fácil visualização em diversos produtos de sensoriamento remoto e ausentes do mapa geológico, considerou-se que a técnica foi pouco utilizada. Entre as discrepâncias encontradas entre as imagens e o mapa geológico está a presença/posicionamento de fraturas/falhas, incluindo uma falha de importância na espacialização do corpo de minério, e a continuidade da Formação Castelo dos Sonhos na porção norte do platô: na porção centro-sul há ao menos dois sistemas de fraturas/falhas e a foliação (acamamento sedimentar?) está deformada em dobras complexas e tem direção geral NE na porção mais oeste. Na porção norte, intensamente vegetada, há bandamento realçado pela topografia com direção WNW a sul e NW a norte. Não se pode descartar, sem campo, serem as porções centro-sul e norte pertencentes à Formação Castelo dos Sonhos. Mas dificilmente formam um contínuo.

A presença de estruturas circulares nas imagens, inclusive uma de dimensão importante que secciona o corpo de minério, está ausente do mapa geológico, apesar de poderem estar associadas a processos de remobilização do minério, processos necessariamente existentes pela relação algo errática da mineralização com a granulometria.

Em outros aspectos as imagens naturalmente mostraram informações coincidentes com as do mapa e do perfil geológico como algumas fraturas e falhas e, incluindo, pela “regra dos vês”, o maior mergulho do acamamento da porção oeste da sequência.

A principal conclusão, assim, foi que o processamento de imagens ópticas e de micro-ondas em um momento inicial da pesquisa, em processo rápido e sem custos, a teria auxiliado notadamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adler-Golden, S. M., Matthew, M. W., Bernstein, L. S., Levine, R. Y., Berk, A., Richtsmeier, S. C., Acharya, P. K., Anderson, G. P., Felde, G., Gardner, J., Hoke, M., Jeong, L. S., Pukall, B., Mello, j., Ratkowsky, A., Burke, H. H. (1999). Atmospheric correction for short-wave spectral imagery based on MODTRAN 4. *SPIE Proceeding, Imaging Spectrometry V*, 3753, 61-69.

Almeida, T. I. R., Souza Filho, C. R. (2004). Principal component analysis applied to feature-oriented band ratios of hyperspectral data: a tool for vegetation studies. *International Journal of Remote Sensing*, 25(22), 5005-5023.

Almeida, T. I. R. (2005). Geobotânica por sensoriamento remoto em florestas tropicais e a abordagem sistêmica: uma ferramenta auxiliar no mapeamento geológico

regional e na prospecção mineral. Tese (Livre-Docência). São Paulo: Instituto de Geociências ? USP.

Almeida, T. I. R., Souza Filho, C. R., Rossetto, R. (2006). ASTER and Landsat ETM+ images applied to sugarcane yield forecast. *International Journal of Remote Sensing*, 27(19), 4057-4069.

Almeida, T. I. R., 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 Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, 37(1), 37-49.

Almeida, T. I. R., Souza Filho, C.R., Juliani, C., Branco, F.C. (2009). Application of Remote Sensing to Geobotany to Detect Hydrothermal Alteration Facies in Epithermal High Sulfidation Gold Deposits in the Amazon Region. In: Bedell R., Simmons S., Grunsky E., Crósta A. (Orgs.). *Special Publication on Remote Sensing and Spectral Geology*. New York: Society of Economic Geologists, 135-142.

Almeida, T. I. R., Penatti, N. C., Ferreira, L. G., Arantes, A. E., Do Amaral, C. H. (2015). Principal component analysis applied to a time series of MODIS images: the spatio-temporal variability of the Pantanal wetland, Brazil. *Wetlands ecology and management*, 23(4), 737-748.

Appleyard, N., Brown, A., Srivastava, M., Pereira, E., Lipson, R. (2016). Exploration Target Range for the Castelo de Sonhos Gold Project Pará State – Brasil. National Instrument 43 – 101 Technical Report.

Bettencourt, J. S., Juliani, C., Xavier, R. P., Monteiro, L. V. S., Neto, A. C. B., Klein, E. L., Assis, R. R., Leite Jr., W. B., Moreto, C. P. N., Fernandes, C. M. D., Pereira, V. P. (2015). Metallogenic systems associated with granitoid magmatism in the Amazonian Craton: An overview of the present level of understanding and exploration significance. *Journal of South American Earth Sciences*, 68, 22-49.

Byrne, G. F., Crapper, P. F., Mayo, K. K. (1980). Monitoring land-cover change by principal component analysis of multitemporal Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 10(3), 175-184.

Carranza, E. J. M., Hale, M. (2002). Mineral imaging with Landsat Thematic Mapper data for hydrothermal alteration mapping in heavily vegetated terrane. *International journal of remote sensing*, 23(22), 4827-4852.

Carneiro, C. D. C., Carreiro-Araújo, S. A., Juliani, C., Monteiro, L. V. S., Crósta, A. P., Fernandes, C. M. D. (2013). Estruturação profunda na Província Mineral do Tapajós evidenciada por magnetometria: implicações para a evolução tectônica do Cráton Amazonas. *13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF*, 672-676. Rio de Janeiro: *Society of Exploration Geophysicists and Brazilian Geophysical Society*.

Chica-Olmo, M., Abarca, F., Rigol, J. P. (2002). Development of a decision support system based on remote sensing and GIS techniques for gold-rich area identification in SE Spain. *International Journal of Remote Sensing*, 23(22), 4801-4814.

Crósta, A. P., De Souza Filho, C. R., Azevedo, F., Brodie, C. (2003). Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *International journal of Remote sensing*, 24(21), 4233-4240.

Crósta, A. P., Almeida, T. I. R., Paradella, W. R., Silva, S. M. P., Meneses, P. R. (2016). Sensoriamento Remoto em Exploração Mineral no Brasil. In: Melfi A. J., Misi A., Campos D. A., Cordani U. G. (orgs), *Recursos Minerais no Brasil Problemas e Desafios*. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências. 190-208.

Daughtry, C. S. T., Walthall, C. L., Kim, M. S., Brown de Colstoun, E., McMurtrey III, J. E. (2000). Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote sensing of Environment*, 74(2), 229-239.

Demsar, U., Harris, P., Brunsdon, C., Fotheringham, A. S., McLoone, S. (2013). Principal component analysis on spatial data: an overview. *Annals of the Association of American Geographers*, 103(1), 106-128.

Ducart, D. F., Crósta, A. P., Souza Filho, C. R., Coniglio, J. (2006). Alteration mineralogy at the Cerro La Mina epithermal prospect, Patagonia, Argentina: Field mapping, short-wave infrared spectroscopy, and ASTER images. *Economic Geology*, 101(5), 981-996.

Fraser, S. J., Green, A. A. (1987). A software defoliant for geological analysis of band ratios. *International Journal of Remote Sensing*, 8(3), 525-532.

Ferreira, L. G., Huete, A. R. (2004). Assessing the seasonal dynamics of the Brazilian Cerrado vegetation through the use of spectral vegetation indices. *International Journal of Remote Sensing*, 25(10), 1837-1860.

Fletcher, W. K. (1997). Stream sediment geochemistry in today's exploration world. *Geophysics and geochemistry at the millenium : proceedings of Exploration 97 : fourth decennial international conference on mineral exploration*, v. 97, 249-260. Toronto: Prospectors and development association of Canada.

Frimmel, H. E., Le Roex, A. P., Knight, J., Minter, W. E. L. (1993). A case study of the postdepositional alteration of the Witwatersrand Basal Reef gold placer. *Economic Geology*, 88(2), 249-265.

Frimmel, H. E., Gartz, V. H. (1997). Witwatersrand gold particle chemistry matches model of metamorphosed, hydrothermally altered placer deposits. *Mineralium Deposita*, 32(6), 523-530.

Frimmel, H. E. (2014). A giant mesoarchean crustal gold-enrichment episode: possible causes and consequences for exploration. *Society of economic geologists, Inc. Special Publication*. 18. 209 – 234.

- Gabr, S., Ghulam, A., Kusky, T. (2010). Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data. *Ore Geology Reviews*, 38(1), 59-69.
- Gamon, J. A., Surfus, J. S. (1999). Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer. *The New Phytologist*, 143(1), 105-117.
- Gitelson, A. A., Merzlyak, M. N. (1998). Remote sensing of chlorophyll concentration in higher plant leaves. *Advances in Space Research*, 22(5), 689-692.
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., Stark, R., Rundquist, D. (2002). Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote sensing of Environment*, 80(1), 76-87.
- Gutierrez, G. M., Almeida, T. I. R., Juliani, C. (2017). Geobotânica Fenológica por Sensoriamento Remoto em Castelo dos Sonhos, PA: Uma aplicação geológica de imagens do sensor RapidEye. *XV Simpósio de Geologia da Amazônia*. Belém: SBG.
- Horscroft, F. D. M., Mossman, D. J., Reimer, T. O., Hennigh, Q. (2011). Witwatersrand metallogenesis: the case for (modified) syngeneses. *SEPM Special Publication*, 101, 75-95.
- Jolliffe, I. T. (2002) Principal Component Analysis second edition. New York: Springer.
- Juliani, C., Vasquez, M. L., Klein, E. L., Villas, R. N. N., Misas, C. M. E., Santiago, É. S. B., Monteiro, L. V. S., Carneiro, C. C., Fernandes, C. M. D., Usero, G. (2014). Metalogênese da Província Tapajós. In: Silva, M. G., Neto, M. B. R., Jost, H., Kuyumjian, R. M. (orgs.) *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*, Belo Horizonte: CPRM. 229-263.
- Klein, E. L., Rodrigues, J. B., Queiroz, J. D. S., Oliveira, R. G., Guimarães, S. B., Chaves, C. L. (2017). Deposition and tectonic setting of the Palaeoproterozoic Castelo dos Sonhos metasedimentary formation, Tapajós Gold Province, Amazonian Craton, Brazil: age and isotopic constraints. *International Geology Review*, 59(7), 864-883.
- Liu, L., Zhuang, D. F., Zhou, J., Qiu, D. S. (2011). Alteration mineral mapping using masking and Crósta technique for mineral exploration in mid-vegetated areas: a case study in Areletuobie, Xinjiang (China). *International Journal of Remote Sensing*, 32(7), 1931-1944.
- Moore, F., Rastmanesh, F., Asadi, H., Modabberi, S. (2008). Mapping mineralogical alteration using principal-component analysis and matched filter processing in the Takab area, north-west Iran, from ASTER data. *International Journal of Remote Sensing*, 29(10), 2851-2867.
- Peñuelas, J., Baret, F., Filella, I. (1995). Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. *Photosynthetica*, 31(2), 221-230.
- Pour, A. B., Hashim, M. (2011). Identification of hydrothermal alteration minerals for exploring of porphyry copper deposit using ASTER data, SE Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(6), 1309-1323.

Perrotta, M. M., de Almeida, T. I. R., de Andrade, J. B. F., de Souza Filho, C. R., Rizzotto, G. J., dos Santos, M. G. M. (2008). Geobotânica por sensoriamento remoto e aerogamaespectrometria aplicados ao mapeamento geológico da Amazônia: um estudo comparativo no vale do Guaporé (MT). *Revista Brasileira de Geociências*, 38(1), 153-166.

Queiroz, J. D. S. (2015). Aspectos geológicos e metalogenéticos do depósito de ouro hospedado em metaconglomerados e metarenitos paleoproterozoicos Castelo de Sonhos, Província Tapajós, Sudoeste do Pará. Tese (Mestrado). Belém, Instituto de Geociências, UFPA.

Queiroz, J. D. S., Klein, E. L., Rodrigues, J. B. (2015). Rochas intrusivas na Formação Castelo dos Sonhos, Cráton Amazônico: petrografia, geocronologia, geoquímica e implicações para as idades de sedimentação e da mineralização no depósito aurífero Castelo de Sonhos. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*, 10(3), 341-380.

Ranjbar, H., Honarmand, M., Moezifar, Z. (2004). Application of the Crósta technique for porphyry copper alteration mapping, using ETM+ data in the southern part of the Iranian volcanic sedimentary belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(2), 237-243.

Rowan, L. C., Crowley, J. K., Schmidt, R. G., Ager, C. M., Mars, J. C. (2000). Mapping hydrothermally altered rocks by analyzing hyperspectral image (AVIRIS) data of forested areas in the Southeastern United States. *Journal of Geochemical Exploration*, 68(3), 145-166.

Sabins, F. F. (1999). Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, 14(3), 157-183.

Santos, J. O. S., Hartmann, L. A., Gaudette, H. E., Groves, D. I., Mcnaughton, N. J., Fletcher, I. R. (2000). A new understanding of the provinces of the Amazon Craton based on integration of field mapping and U-Pb and Sm-Nd geochronology. *Gondwana Research*, 3(4), 453-488.

Santos, J. D. (2003). Geotectônica dos escudos das Guianas e Brasil Central. In: Bizzi, L. A., Schobbenhaus, C., Vidotti, R. M., Gonçalves, J. H. (Eds.) *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: Texto, mapas & SIG*. Brasília: CPRM, 169-226.

Tangestani, M. H., Moore, F. (2001). Comparison of three principal component analysis techniques to porphyry copper alteration mapping: a case study, Meiduk area, Kerman, Iran. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 27(2), 176-182.

Tassinari, C. C. G. (1996). O Mapa Geocronológico do Cráton Amazônico no Brasil: revisão dos dados isotópicos. Tese (livre-docência). São Paulo: Departamento de Geologia Geral, USP.

Tassinari, C. C. G., Macambira, M. J. B. (1999). Geochronological provinces of the Amazonian Craton. *Episodes-Newsmagazine of the International Union of Geological Sciences*, 22(3), 174-182.

Vasquez, M. L., Rosa Costa, L. T., Silva, C. M. G., Klein, E. L. (2008) Compartimentação tectônica. In: Vasquez, M. L., Rosa Costa, L. T. (orgs). Geologia e recursos minerais do Estado do Pará: Sistema de informações geográficas – SIG: Texto explicativo dos mapas geológico e tectônico e de recursos minerais do Estado do Pará. Escala 1:1000000. Belém: CPRM 39 – 112

Van der Meer, F. D., Van der Werff, H. M. A., Van Ruitenbeek, F. J. A., Hecker, C. A., Bakker, W. H., Noomen, M. F., Van der Meijd, M., Carranza, E. J. M., de Smeth, J. B., Woldai, T. (2012). Multi-and hyperspectral geologic remote sensing: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 14(1), 112-128.

Yokoi, Y. O., Oliveira, A. L. A. M., Tachibana, J. (2001). General economic geology of the High Tapajós Basin (The “Cachimbo” Gráben) and its boundaries: a regional geological survey with exploratory purpose. *VII Simpósio de Geologia da Amazônia*. Belém: SBG

Zacchi, É. N. P., Silva, A. M., Rolim, V. K. (2010). Análise integrada de dados multifonte e sua aplicação no mapeamento geológico das formações ferríferas da Serra de Itapanhoacanga, Alvorada de Minas, MG. *Revista Brasileira de Geofísica*, 28(4), 643-656