

ANÁLISE DA ALTERAÇÃO DE USO E COBERTURA DO SOLO NA BACIA DO RIO GUALAXO DO NORTE-MG ATRAVÉS DA COMPARAÇÃO DE DUAS TÉCNICAS DO SENSORIAMENTO REMOTO

João Pedro dos Santos

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG
Instituto de Geociências, Belo Horizonte, MG, Brasil
joaopedrosgeo@gmail.com

Helder Lages Jardim

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG
Instituto de Geociências, Belo Horizonte, MG, Brasil
hljardim@gmail.com

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo quantificar e qualificar através do uso de diferentes ferramentas do sensoriamento remoto mudanças ocorridas na bacia do rio Gualaxo do Norte, antes e após o rompimento da barragem de rejeitos de Fundão em 2015 – MG. Foram utilizadas para o estudo imagens provenientes do satélite Landsat-8, processadas no SPRING. Duas técnicas foram inicialmente realizadas: Fusão e Análise de Componentes Principais (ACP). Posteriormente foi feita uma classificação supervisionada nos dois conjuntos de imagens obtidos a fim de que os processos realizados fossem comparados e o melhor mapeamento do uso e cobertura da terra fosse selecionado. Por todo rio Gualaxo do Norte pôde-se verificar que houve supressão da vegetação ciliar ou de outras coberturas superficiais que havia próximo aos cursos d'água atingidos pelos sedimentos oriundos do rompimento da barragem. A partir dos resultados obtidos é possível considerar que a melhoria espectral obtida com a ACP permitiu destaque às áreas diretamente afetadas pelos sedimentos vindos do rompimento. Já as imagens com 15m de resolução espacial obtidas a partir da fusão possibilitaram melhor reconhecimento de diferentes alvos em áreas menores. Assim, as classificações realizadas com imagens da fusão permitiram melhor visualização dos alvos devido à melhoria na resolução espacial.

Palavras-chave: Processamento digital de imagem. Desastre ambiental. Hidrografia. Análise de Componentes Principais. Fusão.

ANALYSIS OF ALTERATION OF LAND COVER AND USE IN THE GUALAXO DO NORTE RIVER BASIN - MG THROUGH COMPARISON OF TWO REMOTE SENSING TECHNIQUES

ABSTRACT

The main objective of this paper is quantifying and qualifying through the use of different tools of the remote sensing changes occurred in the Gualaxo do Norte river basin before and after the rupture of the Fundão dam in 2015 - MG. Images from the Landsat-8 satellite were processed in SPRING software. Two techniques were initially performed: Pan-sharpening and Principal Component Analysis (PCA). Subsequently, a supervised classification was executed in the two sets of images obtained so that the processes performed were compared and the best mapping of land cover and use was selected. Throughout the Gualaxo do Norte river it was verified suppression of the ciliary vegetation or other surface coverings that were next to the water courses affected by the sediments originating from the rupture of the dam. From the results obtained it is possible to consider that the spectral improvement obtained with the PCA allowed highlighting the areas directly affected by the sediments coming from the rupture. The images with 15m of spatial resolution obtained from the pan-sharpening allowed better recognition of different targets in smaller areas. Thus, the classifications performed with pan-sharpening images allowed better visualization of the targets due to the improvement in spatial resolution.

Keywords: Digital image processing. Environmental disaster. Hydrography. Principal Components Analyse. Pan-sharpening.

INTRODUÇÃO

O Brasil possui grande potencial minerador, representando cerca de 4% do Produto Interno Bruto (PIB). Só a produção de minério de ferro é responsável por 82% das exportações no país (PORTAL DO BRASIL, 2014). Todavia, esta atividade causa grandes impactos ao meio ambiente. Ela pode interferir no relevo, hidrografia, fauna e flora, seja pela grande movimentação de terra ou pelas explosões, rebaixamento de lençóis freáticos, emissão de poeira, retirada da vegetação, afugentamento da fauna, dentre outros impactos, dependendo do tipo de atividade.

Algumas estruturas utilizadas pela mineração apresentam grandes riscos, quando não são bem projetadas e fiscalizadas. Exemplo disso são as barragens de contenção de rejeitos útil ao beneficiamento de minérios.

Em 05 de novembro de 2015, a barragem de contenção de rejeitos de Fundão, pertencente à Samarco Mineradora, localizada em Mariana (MG) se rompeu lançando boa parte dos sedimentos para a barragem de Santarém a jusante, que por sua vez, lançou sedimentos nos cursos d'águas adjacentes. O sistema de contenção da barragem de Fundão está inserido na bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte, afluente da bacia hidrográfica do rio Doce. Quatorze dias depois os sedimentos atingiram o Oceano Atlântico no litoral do Espírito Santo. Esse rompimento é considerado um dos maiores desastres ambientais do Brasil.

Uma forma efetiva de analisar as alterações ocorridas na cobertura superficial da terra devido a desastres ambientais é por meio da utilização de recursos de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Reunindo ferramentas dispostas pelo geoprocessamento, sensoriamento remoto e cartografia digital os SIG são capazes de produzir informações sistematizadas podendo estabelecer a abrangência dos impactos a fim de que se possa buscar a melhor forma de gerenciamento dos desastres.

Da mesma forma, os recursos de processamento de imagens digitais (PDI) ganham a cada dia novas aplicabilidades e funções. Inseridos nos SIG os PDI são úteis para análises geoespaciais permitindo que sejam criados meios apurados para verificação de alterações do espaço.

Um desses processamentos é a Análise de Componentes Principais (ACP) (CRÓSTA, 1992). Esse método se mostra vantajoso, pois apresenta resultados sem necessidade de realização de correção atmosférica ou normalização radiométrica – procedimentos necessários em outras técnicas do PDI, pois a técnica elimina nos resultados as diferenças das baixas frequências, realizando automaticamente uma calibragem (CHAVEZ e MAC KINNON, 1994). A ACP possibilita a redução ou remoção de redundância espectral nas bandas das imagens orbitais através de uma transformação matemática. Cada componente principal resultante possui uma combinação linear de todas as variáveis utilizadas, porém é independente em relação aos outros componentes resultantes (RICHARDS e JIA, 2006).

Rovani et al. (2013) utilizou a ACP como técnica inicial para mapeamento do uso e cobertura da terra do município de Cotegipe (RS) com imagens Landsat-8 por meio da classificação supervisionada. O resultado se mostrou satisfatório já que as imagens obtidas pela ACP auxiliaram na realização da classificação a partir do realce espectral dos alvos.

Com o objetivo de melhorar a resolução espacial é utilizada outra técnica do PDI, a fusão de imagens. Ela consiste na geração de novas imagens a partir de múltiplas outras – fotografias aéreas, radar, multiespectrais e pancromáticas – extraindo informações espaciais e/ou espectrais. Um dos métodos de fusão transforma uma composição colorida (RGB) de imagens multiespectrais em componentes IHS – sendo Intensidade (I), matiz (H, do inglês *hue*) e Saturação (S). Posteriormente o componente “I” é eliminado sendo substituído por uma imagem pancromática com melhor resolução espacial. Esse novo esquema (Banda pancromática+H+S) gera três outras imagens com resolução espacial melhor, porém forçada (LIMA et al., 2015; COELHO, 2016).

Leite e Carvalho (2013) realizaram a fusão de imagens provenientes dos satélites CBERS e Resourcesat como etapa de pré-processamento para a realização da classificação supervisionada utilizando o programa SPRING para verificação da dinâmica do uso e cobertura da terra de 2009 e 2012. A aplicação da fusão como uma das etapas iniciais proporcionou, segundo os autores, maior exatidão às análises das imagens já que houve melhora em sua resolução espacial.

Após a realização de processamentos iniciais é possível a execução da classificação de imagens digitais para mapeamento da cobertura superficial. Nessa técnica são atribuídas classes aos pixels contidos nos *rasters*. Na execução do processamento padrões espectrais de semelhança serão

reconhecidos (NOVO, 2010). Os métodos de classificação são divididos entre não-supervisionados e supervisionados. Na classificação não-supervisionada o programa utilizado divide as classes de forma automática não tendo o usuário controle sobre a atividade. Já no método supervisionado, amostras de treinamento de classes, do tipo “água”, “agricultura” etc., são selecionadas, no conjunto de bandas que melhor atender aos objetivos buscados. As amostras do treinamento são executadas em um classificador como o Bhattacharya, MaxVer (Máxima Verossimilhança), etc. (SILVA e PEREIRA, 2007; NOVO, 2010).

Na escolha das bandas para a realização da classificação SOUZA FILHO et al. (2006), considerou a combinação do vermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio como as que apresentaram melhor contraste espectral na composição colorida para distinção de alvos como vegetação, água, formas geomorfológicas.

Os estudos mais comuns com essa técnica são realizados para verificação da expansão de áreas urbanas, assim como, supressão ou crescimento da vegetação (LORENA et al., 2001; SOARES-FILHO, 2005; OLIVEIRA et al., 2008; BARBOSA et al., 2009). Porém, este processamento é considerado útil para identificação das características de áreas degradadas. Veado et al. (1990) realizou um estudo para análise das áreas degradadas pela mineração de carvão a céu-aberto e já recuperadas na região carbonífera de Santa Catarina. Os métodos utilizados foram a classificação não supervisionada com a técnica k-médias e a classificação supervisionada com o método MaxVer (VEADO et al., 1990).

Este trabalho teve por objetivo quantificar e qualificar através do uso de diferentes ferramentas do sensoriamento remoto mudanças ocorridas na bacia do rio Gualaxo do Norte, antes e após o rompimento da barragem de rejeitos de Fundão em 2015 – MG. Utilizando imagens Landsat-8 foram realizados diferentes processamentos no programa SPRING que serviram de base para os mapeamentos do uso e cobertura da terra: análise de componentes principais (ACP), fusão e classificação supervisionada.

Este estudo pode servir aos planejadores, pesquisadores e moradores das áreas atingidas para planejamento nos reparos e recuperação dos danos advindos.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Caracterização da área de estudos

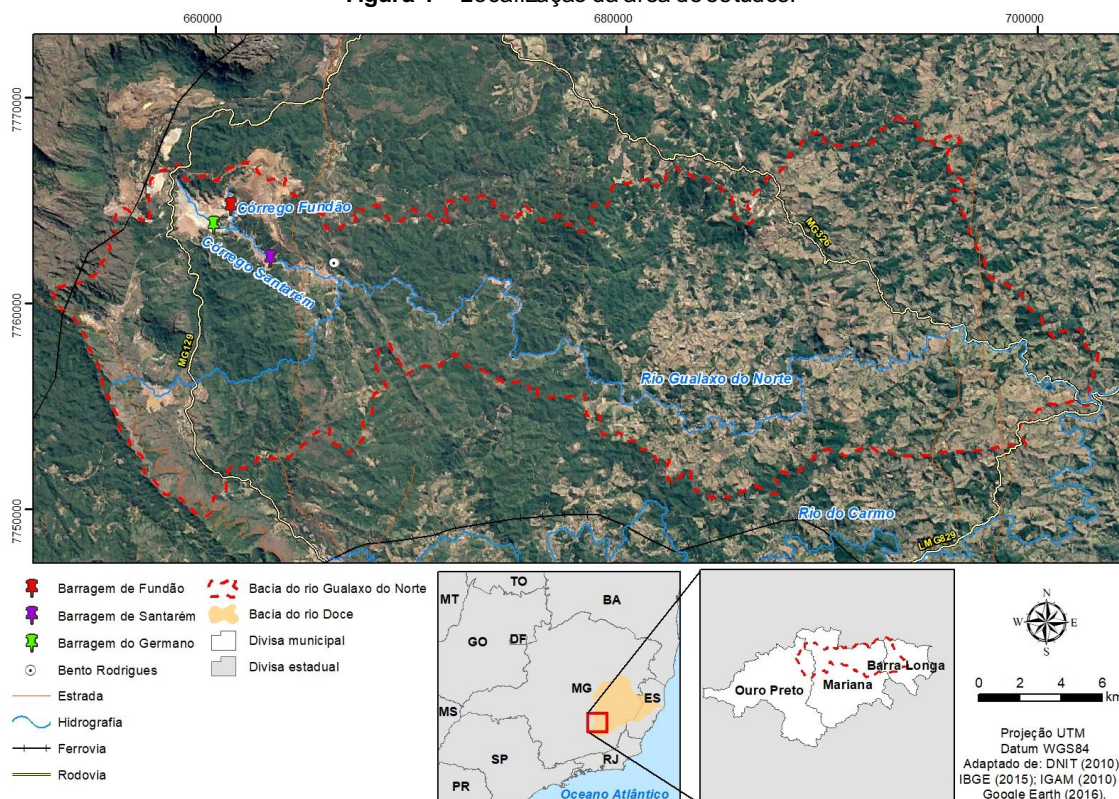
A área de estudo é a bacia do rio Gualaxo do Norte que pertence ao domínio hidrológico da bacia do rio Doce que nasce em Minas Gerais e deságua no litoral do Espírito Santo. A bacia em estudo está inserida nos municípios de Ouro Preto (montante da bacia na porção nordeste do município), Mariana (compreende a maior parte da bacia na porção norte do município) e Barra Longa (jusante da bacia na porção noroeste do município), como mostra a Figura 1. A bacia é cortada pela rodovia MG-129 à montante e a rodovia MG-326 à jusante. Ambas permitem escoamento das produções da região, principalmente a mineral, no sentido sul em direção a São Paulo e a oeste em direção ao litoral tanto pelas rodovias quanto pelas ferrovias presentes próximas à mineração.

O rompimento da barragem de Fundão ocorreu no córrego Fundão que fez com que o sistema de contenção de barragens de Santarém, à jusante, extrapolasse sua capacidade de armazenamento de rejeito provocando o despejo de sedimentos no córrego Santarém que é afluente do rio Gualaxo do Norte. Apesar de esse estudo ter intenção de focar nas alterações ocorridas na calha desses cursos d’água o recorte por bacia se dá pela visão sistêmica e integrada do ambiente implicado às bacias hidrográficas (BOTELHO e SILVA, 2004).

A cobertura litológica é constituída na maior parte da bacia por xistos. Nas áreas a montante são encontradas feições quartzíticas, assim como dolomitos, itabiritos e filitos representantes da unidade de topo do Supergrupo Minas e da Formação Santo Antônio do Grupo Itacolomi (CPRM, 2014). Essa região possui grande amplitude nas cotas altimétricas. O valor mais alto chega a aproximadamente 2000m de altitude enquanto que os mais baixos ficam em torno de 750m. O relevo se apresenta mais dissecado, principalmente a montante da bacia. Nas regiões mais baixas são encontradas formações como opdalito, norito, enderbito e metagrauvaca (CPRM, 2014). Em predominância as unidades geomorfológicas encontradas nessa porção mais inferior da bacia são

de relevos de morrarias declivosas e colinas que contornam vales estreitos (SAADI e CAMPOS, 2015).

Figura 1 – Localização da área de estudos.



Fonte – Elaborado pelo autor.

Relacionado principalmente à altimetria e sua localização latitudinal a divisão climática de Köppen desta área é a Cwa que corresponde ao clima temperado úmido com invernos secos e verões quentes. Segundo as Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990 a área de estudo se localiza na porção do país que possui pluviosidade anual média entre 220 e 260mm (INMET, 2016).

A maior parte da bacia possui Latossolo Vermelho-Amarelo como cobertura pedológica. Encontramos nesta região Mata Atlântica principalmente pela fitofisionomia da Mata Semidecidual Estacional de Montana como cobertura vegetal, da mesma forma, algumas áreas possuem forte presença de silvicultura. A montante da bacia é onde se encontra a maior parte das atividades de extrativismo mineral. Nela é identificada a presença de Cambissolos e Afloramentos Rochosos. Nesta porção, ainda, encontramos como vegetação predominante os campos rupestres ou campos de altitude (UFV, 2010).

Coleta de dados e materiais

As imagens utilizadas neste trabalho são provenientes do satélite Landsat-8 e foram obtidas no acervo de imagens digitais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). As imagens possuem resolução espacial de 30m nas bandas multiespectrais e de 15m na pancromática. Sua resolução radiométrica é de 16 bits e seu período de revisita é de 16 dias. O tamanho aproximado de sua cena é de 170 km no sentido norte-sul (direção de passagem do satélite) por 183 km de largura. A plataforma Landsat-8 opera com dois instrumentos imageadores: *Operational Land Imager* (OLI) – com 8 bandas multiespectrais (1 a 7 e a banda 9) e uma pancromática (banda 8), além do sensor infravermelho termal – *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) (USGS, 2015).

As imagens pertencem à órbita-ponto 217-74. Para este trabalho as bandas utilizadas foram: Banda 4 (visível), Banda 5 (infravermelho próximo), Banda 6 (infravermelho médio) e Banda 8

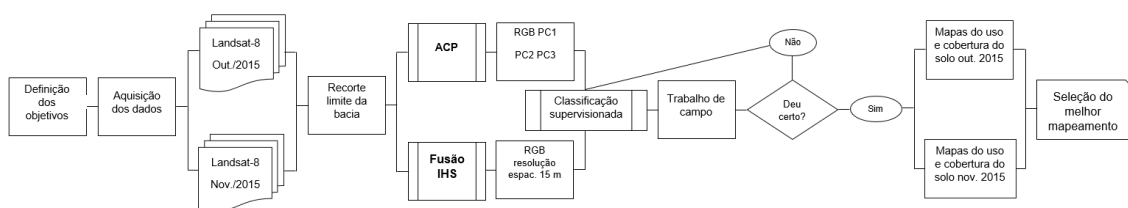
(pancromática). O primeiro conjunto teve passagem em 11/10/2015 (um mês antes do rompimento de fundão) e a outra de um mês depois – 12/11/2015.

Também foi utilizado um GPS portátil eTrex 10 Garmin para coleta dos dados em campo que foram utilizados para conferência do PDI.

Método

Para facilitar a visualização do caminho percorrido para contemplação dos objetivos foi elaborado um fluxograma das atividades que pode ser visto na Figura 2. Todas as etapas foram acompanhadas por revisões bibliográficas contendo experiências práticas e empíricas relacionadas à temática.

Figura 2 – Fluxograma de atividades.



Fonte – Elaborado pelo autor.

Análise de componentes principais

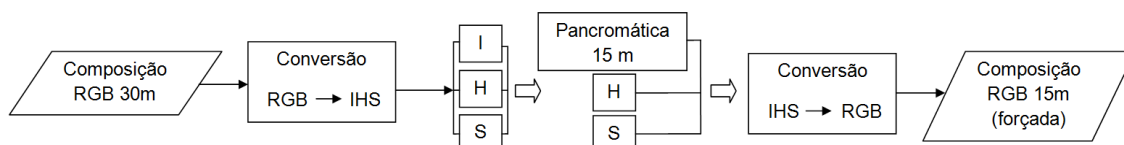
Com as imagens digitais brutas do satélite Landsat-8 foi executada a análise dos componentes principais (ACP) em um banco de dados e projeto pré-definido no programa SPRING na versão 4.1, considerada a melhor versão para realização de processamentos como esse após testes com versões mais recentes (foi utilizada a projeção UTM e DATUM WGS84). Foram selecionadas as bandas 4, 5 e 6 (vermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio). A função transformou um conjunto de imagens em outro conjunto de imagens – CP1, CP2 e CP3. Com o resultado foram elaboradas duas composições coloridas – RGB-CP1, CP2 e CP3 (de outubro e novembro) para a realização da classificação supervisionada.

Fusão

As imagens multiespectrais do Landsat-8/OLI possuem 30m de resolução espacial. Ou seja, o menor objeto passível de identificação precisa ocupar uma área de no mínimo 900m². Para que se obtenha uma reamostragem da resolução espacial nas imagens Landsat adquiridas foi aplicado o método de fusão de imagens do programa SPRING na versão 4.1. A técnica foi realizada entre as bandas multiespectrais selecionadas – 4, 5 e 6 que possuem 30m de resolução espacial, e da pancromática (banda 8), que possui 15m de resolução espacial. Essa técnica também é realizada quando se quer melhorar a resolução espectral das imagens pancromáticas. O esquema da técnica de fusão utilizado está apresentado na Figura 3.

A fusão executada consistiu na reunião da composição colorida de cada conjunto de bandas obtido. Posteriormente essas bandas foram convertidas para intensidade (I), matiz (H) e saturação (S). Assim, a imagem “I” foi substituída pela pancromática, que possui 15m de resolução espacial. O novo conjunto composto pela pancromática+H+S foi convertido para RGB novamente. Como resultado, obtiveram-se imagens com resolução espacial reamostrada de 15m.

Figura 3 – Técnica de fusão utilizada.



Fonte – Elaborado pelo autor.

Para identificação dos dejetos nos cursos d'água, oriundos do rompimento da barragem de Fundão, e próximo dele fez-se necessário a procura por melhoria na resolução espacial das imagens. Dessa forma, as imagens resultantes da fusão foram reunidas na composição colorida RGB456 para a realização da classificação supervisionada para outubro e novembro de 2015.

Classificação supervisionada

Posteriormente à aplicação da ACP e da fusão, as composições coloridas obtidas foram classificadas através do método supervisionado MaxVer (máxima verossimilhança) em que amostras de pixels são colhidas para extrair os parâmetros de cada classe de interesse. Nesse método de classificação são consideradas as distâncias ponderadas das amostras de cada classe verificando seus níveis digitais.

No treinamento das classificações supervisionadas foram designadas as seguintes classes: agropecuária, corpo hídrico, sedimento, solo exposto, vegetação arbórea e vegetação rasteira. Com as classificações finalizadas foi aplicado sobre os resultados o método de pós-classificação.

Para validação das classificações foi aplicado o índice *Kappa*. Esse coeficiente utiliza todos os valores das amostras coletadas no treinamento apresentando como resultado uma razão que quanto mais próxima de 1 maior concordância há entre os valores utilizados. Os valores mencionados foram obtidos pela matriz de confusão gerada pelo SPRING para cada classificação.

A classificação do valor obtido pelo índice *Kappa* é dividido entre: ruim, razoável, bom, muito bom e excelente, segundo classificação de Landis e Koch (1977). A tabela 1 a seguir mostra a classificação.

Tabela 1 – Classificação do índice *Kappa*.

Índice <i>Kappa</i>	Qualidade	Índice <i>Kappa</i>	Qualidade
0,2 <= 0,4	Razoável	0,6 <= 0,8	Muito Bom
0,4 <= 0,6	Bom	>= 0,8	Excelente

Fonte – Adaptado de Landis e Koch (1977).

Os mapeamentos do uso e cobertura da terra obtidos foram adicionados ao programa ArcGis 10.2 e as áreas das classes foram quantificadas. Nessa etapa houve a verificação do valor das áreas ocupadas em cada classe que posteriormente foram comparadas entre outubro e novembro. Após isso os mapas de uso e cobertura da terra foram elaborados.

Trabalho de campo

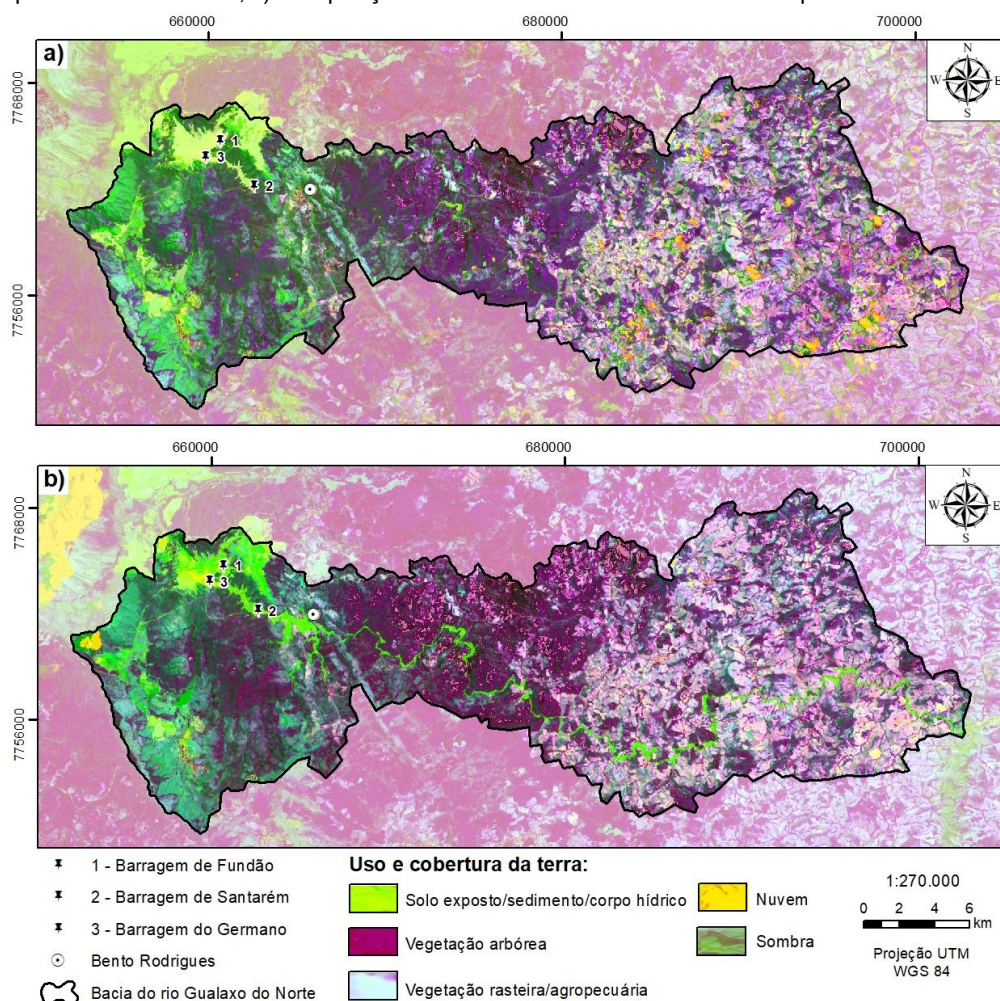
Dos dias 30 de outubro a 05 de novembro de 2016 foi realizada uma expedição pela bacia do rio Gualaxo do Norte com objetivo de análise do espaço estudado. Nesta expedição foi realizada uma análise *in situ* em alguns pontos da bacia. Foram colhidos pontos no GPS que foram inseridos no banco de dados em uso. Os pontos plotados junto às descrições feitas sobre as áreas serviram para conferência das classificações.

Finalmente, com os dados obtidos em campo, as classificações realizadas foram conferidas e verificadas levando em conta a aproximação com a realidade identificada em campo. Após este passo, foi discutida a diferença entre os resultados obtidos pelas classificações supervisionadas oriundas da fusão e da ACP e, assim, foi selecionado o conjunto de classificação para outubro e novembro de 2015 que melhor atendesse aos objetivos propostos.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o recorte das imagens, os processamentos foram realizados. Com a aplicação da ACP nas imagens Landsat-8/OLI utilizando as bandas 456, foram obtidas as imagens apresentadas na Figura 4. As imagens resultantes foram reunidas numa composição colorida falsa cor que proporcionou maior destaque as áreas de mineração – RGB CP1 CP2 CP3 – para outubro de 2015 (Figura 4a) e novembro de 2015 (Figura 4b).

Figura 4 – Imagens resultantes da aplicação da técnica ACP: a) Composição colorida falsa cor RGB CP1 CP2 CP3 para outubro de 2015; b) Composição colorida falsa cor RGB CP1 CP2 CP3 para novembro de 2015.



Fonte – Elaborado pelo autor.

Para os dois conjuntos de imagens observou-se que há grande saturação na resposta espectral. Isso é mais nítido na cor verde, que foi o canal designado ao segundo componente principal (CP2). Segundo Maldonado (1999) o segundo componente apresenta as características com as informações menos redundantes do conjunto de bandas selecionado, diferente do primeiro componente (CP1), que apresenta as informações mais redundantes do conjunto. O terceiro componente (CP3) apresenta as informações menos relevantes como os ruídos presentes em imagens digitais. Com isso, o segundo componente (CP2) possui, nesse caso, as informações mais diferenciadas do conjunto selecionado (bandas 456). Assim sendo, o caminho dos sedimentos oriundos do rompimento pelos cursos d'água é identificado pela cor verde na Figura 4b.

Pelas imagens é possível perceber que a força que impulsionou os sedimentos oriundos do rompimento da barragem de Fundão criou refluxos para além da calha e da superfície de alagamento em vários cursos d'água da bacia, principalmente aqueles mais próximos do córrego Santarém e do rio Gualaxo do Norte. Isto pode ser associado não só ao montante de sedimentos dispostos no momento do rompimento (Figura 4a), mas também à grande variação do gradiente altimétrico.

Para as duas imagens da Figura 4 a diferença mais marcante está na porção norte à montante da bacia. Foi nessa parte que ocorreu o rompimento da barragem. A barragem de Santarém, que teve sua capacidade de retenção de sedimento extrapolada, é vista na cor verde nas duas figuras (Figura 4b). Nessa região são encontradas atividades de mineração devido aos afloramentos

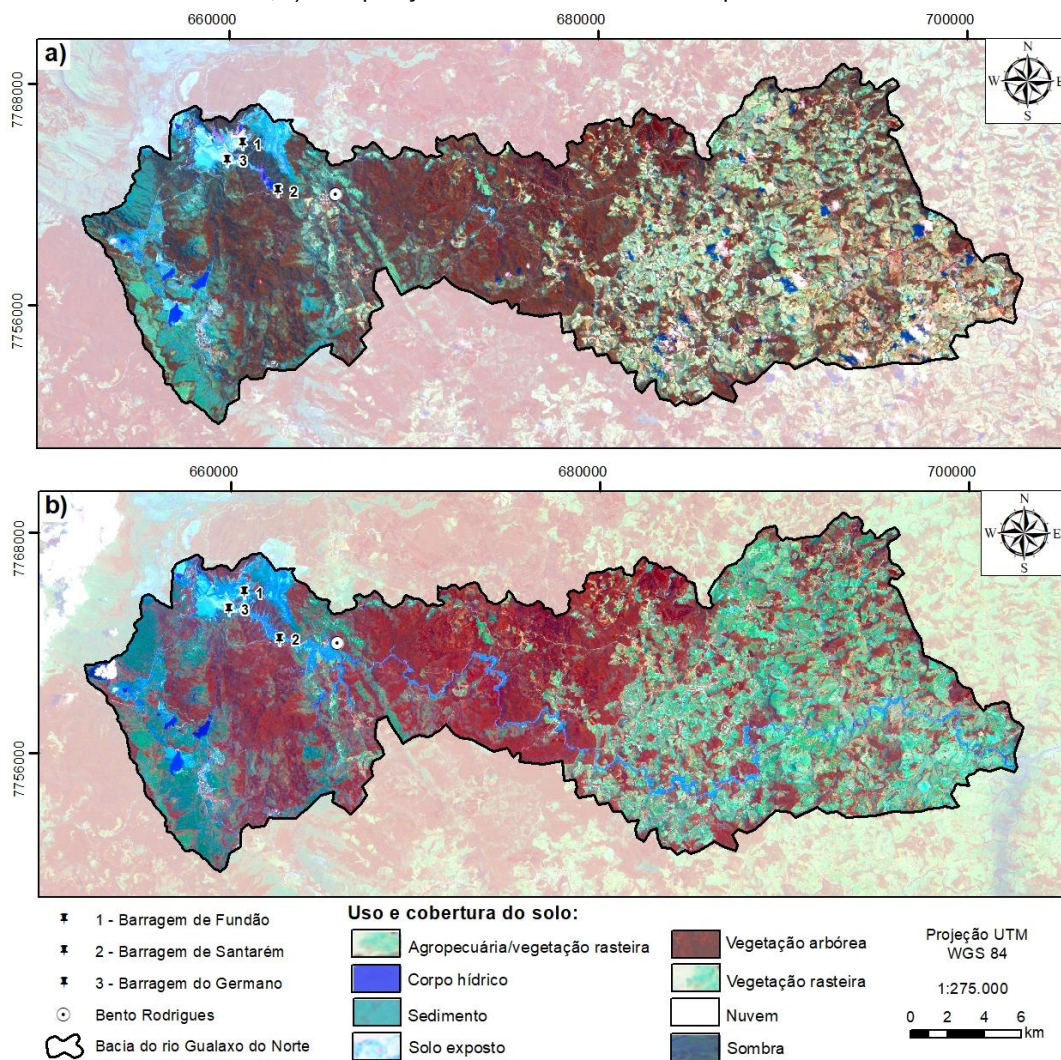
rochosos e a incidência de alguns minerais como aqueles ricos em ferro. A água contida nas cavas de outras mineradoras também é identificada pela cor verde. Mesmo com a resolução espacial de 30m a ACP permitiu a visualização dos limites atingidos pelos sedimentos oriundos do rompimento de Fundão na cor verde, bem identificadas por meandros convexos.

Identificam-se ainda pontos com cores destoantes da cena, como amarelo e verde. Esses pontos correspondem à presença de nuvem e sombra, respectivamente. Mesmo tendo escolhido as cenas com a menor incidência de nuvens para a época é possível identificá-las nesta cena. No geral são pontos isolados que não comprometem a análise proposta pelo objetivo.

Na porção mais à jusante da bacia são possíveis que sejam identificados diferentes tipos de vegetação. Por ser a parte mais baixa da bacia essa área possui relevo menos dissecado o que permite a realização de atividades como pecuária, agricultura, pastagem. Essas áreas são diferenciadas pela cor verde acinzentada que são associadas à vegetação mais rasteira. Da mesma forma, é possível afirmar que as cores mais escuras são associadas à vegetação mais arbórea.

Para a realização da fusão, outra técnica selecionada para a análise espacial da bacia, utilizou-se as imagens brutas do Landsat-8 (bandas 456). A primeira fusão foi realizada com os *rasters* de outubro de 2015 e posteriormente com as imagens de novembro de 2015. Para visualização do resultado foi elaborada uma composição colorida falsa cor que pode ser vista na Figura 5.

Figura 5 – Imagens resultantes da aplicação da técnica fusão: a) Composição colorida falsa cor RGB456 para outubro de 2015; b) Composição colorida falsa cor RGB456 para novembro de 2015.



Fonte – Elaborado pelo autor.

O canal do vermelho foi associado ao infravermelho próximo, dessa forma, percebe-se nas imagens resultantes que as cores avermelhadas correspondem às áreas de vegetação com dossel mais sadio, característica sensível a essa banda. Já o canal do verde foi associado à região do vermelho no espectro do visível, assim sendo, os tons de verde são vistos nas áreas de vegetação de menor porte. As lagoas nas áreas de mineração a montante da bacia foram identificadas pela cor azul, que foi a cor associada à banda do infravermelho médio, sendo essa banda sensível à quantidade de água dos alvos (PONZONI e SHIMABUKURO, 2007).

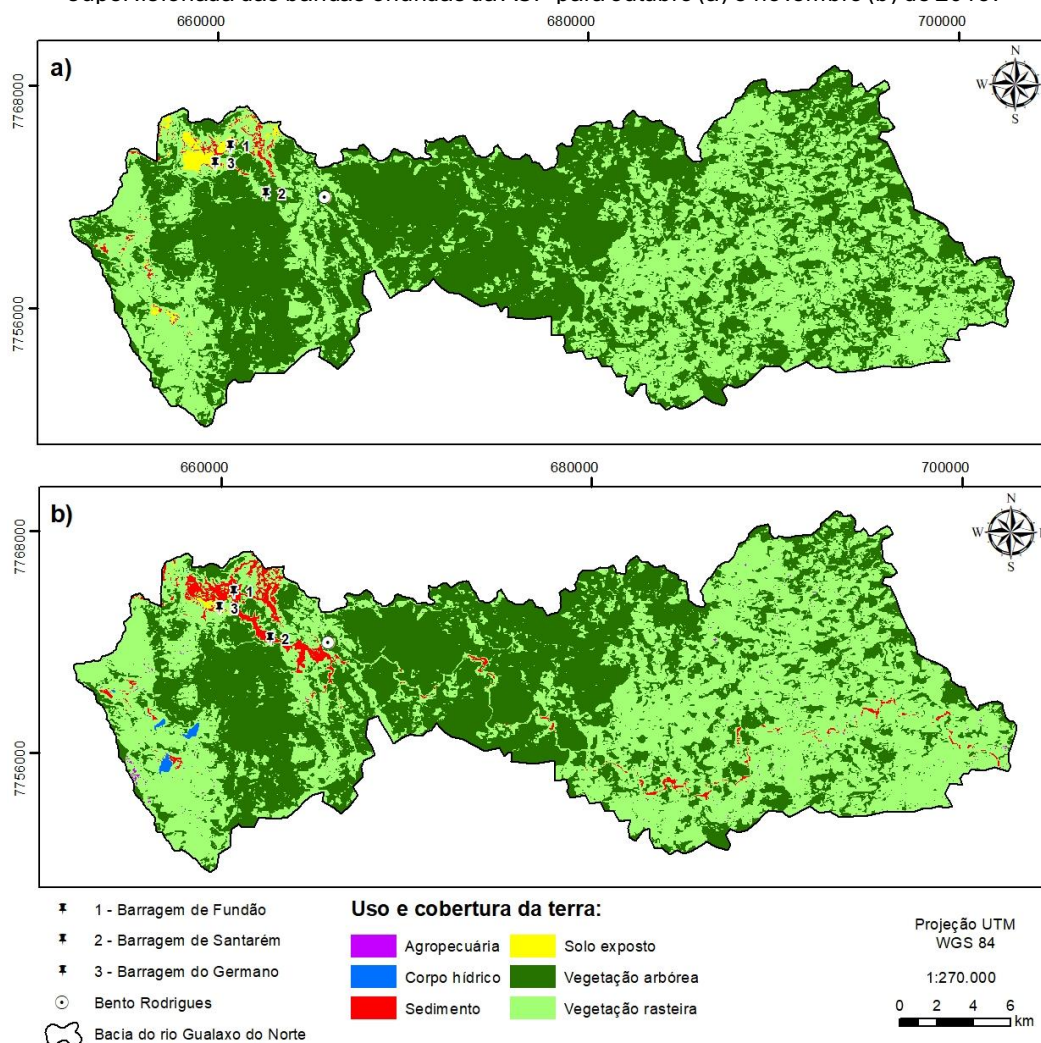
Na fusão de novembro (Figura 5b) verifica-se que o caminho dos sedimentos oriundos do rompimento da barragem pelas diferentes tonalidades do azul. Com isso, verificamos que esses sedimentos ainda se encontravam úmidos no momento de captura da imagem.

Nas bacias de contenção à montante da bacia – que compreendem as bacias de Fundão e Germano – é possível constatar alguns pontos em branco que podem ser associados aos sedimentos secos que possui alta reflexão da radiação que neles incidem (Figura 5a).

Mesmo com a realização da reamostragem das imagens para 15m de resolução espacial é difícil identificar os afluentes do rio Gualaxo do Norte que também receberam sedimentos oriundos do rompimento. Isso se deve à escala utilizada na imagem, mas também a permanência de baixa resolução espacial.

A partir da análise dessas composições foi possível a realização da classificação supervisionada. Os resultados foram mapas de uso e cobertura da terra que podem ser verificados nas Figuras 6 e 7. Os primeiros mapas de uso e cobertura da terra obtidos foram realizados com a composição colorida das imagens oriundas da ACP de outubro e novembro de 2015 (Figura 6).

Figura 6 – Uso e cobertura da terra da bacia do rio Gualaxo do Norte obtido pela classificação supervisionada das bandas oriundas da ACP para outubro (a) e novembro (b) de 2015.



Fonte – Elaborado pelo autor.

Como ocorreu com o trabalho de Rovani et al. (2013), diferentes usos e coberturas puderam ser identificados a partir dessa metodologia utilizada tendo a aplicação da ACP contribuído para análise e coleta das amostras. Na Figura 6 constata-se que os corpos hídricos só foram identificados nas barragens das áreas de mineração apenas na classificação com imagens de novembro (Figura 6b). Mesmo tendo utilizado as mesmas amostras para ambas as classificações diferenças ocorreram no resultado. Isso se deve a diferentes características no momento de captura das imagens além de outros fatores. Consoante, a classe “corpo hídrico” não foi identificada nos canais fluviais da bacia. Isso se deve à baixa resolução espacial das imagens multiespectrais do satélite-sensor Landsat-8/OLI, que é de 30m, sendo que a maior parte da drenagem encontrada nessa bacia não apresenta espessura suficiente para identificação.

Na maior parte da bacia é verificada a presença da classe “vegetação arbórea” seguida de “vegetação rasteira” e “agropecuária”. A “vegetação arbórea” engloba diferentes tipos de vegetação como matas ciliares e florestas estacionais semidecíduais, assim como, diversos tipos de silvicultura. A “vegetação rasteira” corresponde às áreas de vegetação de porte mais baixo encontradas nas partes mais altas das serras. Já a “agropecuária” abrangeu áreas de matas mais arbustivas alteradas antropicamente como pastos, jardins e diferentes tipos de cultivos.

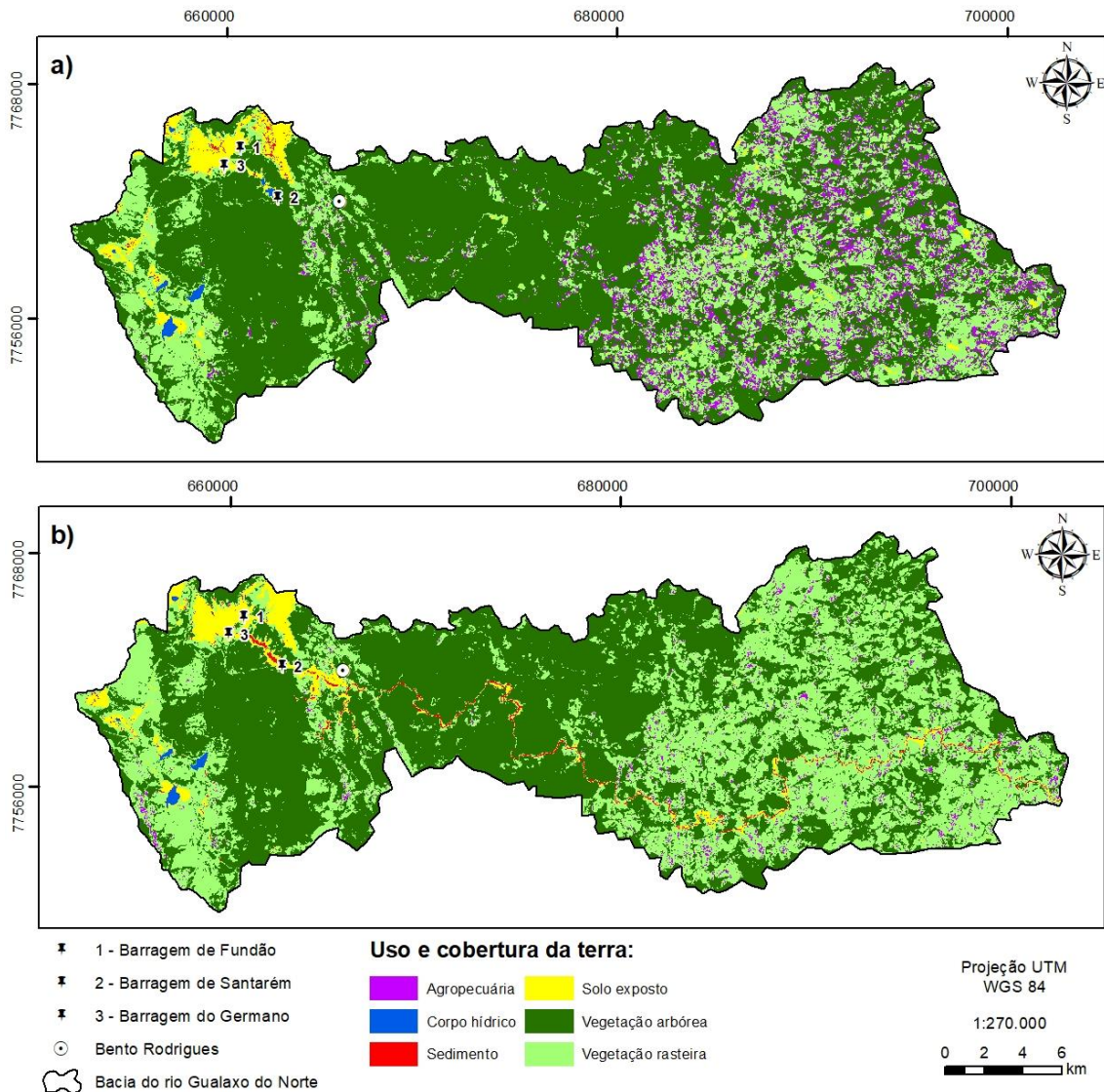
Na classificação supervisionada elaborada com as imagens ACP de novembro (Figura 6b) verificamos ainda a predominância das classes “vegetação arbórea” e “vegetação rasteira”, mas ocorreram algumas mudanças nessa classificação em relação a realizada com imagens de outubro.

Devido ao rompimento da barragem a classe “sedimento” é identificada de forma espalhada pela região onde se encontra o distrito de Bento Rodrigues na Figura 6b. A movimentação desse sedimento na porção das bacias de contenção à montante promoveu a substituição de classe dessa área que de “solo exposto” na classificação de outubro, passou a ser identificada como “sedimento” na classificação de novembro. Segundo Schaefer et al. (2016) o material depositado é uma mistura de areia, silte e argila sendo pobre em nutrientes e com forte desagregação (SCHAEFER et al., 2016). Com isso, essa classe pode apresentar resposta espectral semelhante a outros alvos como solo exposto.

O desempenho geral da classificação de outubro de 2015 foi de 96,64% e a confusão média 3,36% e o desempenho geral para a segunda classificação, com as imagens de novembro de 2015, foi de 97,57% sendo a confusão média de 2,43%. O valor do índice *Kappa* conferida as ambas as classificações foi de 0,99, sendo de excelente qualidade conforme classificação de Landis e Koch (1977).

A partir da análise das imagens obtidas pela fusão foi possível a realização da classificação supervisionada para os *rasters* de outubro e novembro de 2015 utilizando as bandas 456 do satélite Landsat-8. Os resultados foram mapas do uso e cobertura da terra que podem ser vistos na Figura 7. Na classificação de outubro (Figura 7a) averigua-se a predominância da classe “vegetação arbórea”, que compreende matas ciliares, matas semidecíduais e diversos tipos de silvicultura, e da classe “vegetação rasteira”, que compreende fitofisionomias mais arbustivas. Além dessas classes há, do mesmo modo, “solo exposto” em áreas de mineração e “corpos hídricos” nas lagoas, também em áreas de mineração. A classe “sedimento” ficou restrita às bacias de contenção de rejeitos a montante da bacia. Na porção baixa da bacia nota-se maior presença da classe “agropecuária”. Essa classe abrange campos, pastagens e diferentes culturas.

Figura 7 – Uso e cobertura da terra da bacia do rio Gualaxo do Norte obtido pela classificação supervisionada das bandas oriundas da fusão para outubro (a) e novembro (b) de 2015.



Fonte – Elaborado pelo autor.

No mapa de uso e cobertura da terra para novembro (Figura 7b), visualiza-se que houve diminuição da classe “agropecuária” muito presente na classificação de outubro (Figura 7a). Não foi uma mudança real da cobertura, mas pode ter acontecido pelas diferenças atmosféricas no momento de captação das imagens nas diferentes datas, assim como pela confusão devido à semelhante resposta espectral dos alvos, uma vez que foram utilizadas as mesmas amostras de treinamento para essas classificações. Outra alteração identificada foi nas áreas de “sedimento” e “solo exposto” que agora são identificadas no vale onde se encontrava o distrito de Bento Rodrigues e em outros trechos do rio Gualaxo do Norte.

É possível identificar na segunda classificação (Figura 7b) uma área de solo exposto na extremidade esquerda da imagem, mas isso não ocorre na primeira classificação em que são apresentadas áreas de vegetação (Figura 7a). Isso corresponde na verdade a áreas de nuvem.

A classificação de outubro obteve o valor de 99,56% de desempenho geral e 0,44% de confusão média. O valor do índice *Kappa* para essa classificação foi de 0,83, sendo qualificada como muito bom segundo classificação de Landis e Koch (1977).

Para explicitar as diferenças das abrangências das classes em todas as classificações realizadas foram tabulados os dados de cada classe de ocupação e cobertura da terra em relação à área total da bacia. Esses dados podem ser conferidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Percentual do uso e cobertura da terra na bacia do rio Gualaxo do Norte em outubro e novembro de 2015 pelas classificações das bandas oriundas da ACP e fusão.

Classes	ACP		Fusão	
	Out. (%)	Nov. (%)	Out. (%)	Nov. (%)
Agropecuária	0,0002	0,0003	7,8053	1,8769
Corpo hídrico	0,0019	0,0018	0,2713	0,2047
Sedimento	0,4304	0,4321	0,1499	0,7460
Solo exposto	0,6421	0,6403	2,5952	3,1607
Vegetação arbórea	55,1579	55,1579	60,8479	54,7368
Vegetação rasteira	43,7675	43,7675	28,3149	39,2696

Fonte – Elaborado pelo autor.

Pela Tabela 2 é possível perceber que as classificações se diferenciam enormemente dependendo da técnica de processamento de imagens de utilizada. Como era de se esperar houve aumento na ocorrência da classe “sedimento”. Porém na classificação de imagens da Fusão essa classe apresentou maior abrangência. Enquanto que na classificação com ACP o aumento foi de 0,4304% para 0,4321%, na classificação com fusão foi de 0,1499% para 0,746%. Isso pode estar relacionado à melhoria na resolução espacial que pôde proporcionar maior diferenciação entre alvos.

A diminuição da classe “corpo hídrico” nas classificações pode ser correspondida ao rompimento da barragem. Nas classificações com as imagens da fusão a classe “corpo hídrico” pode ser identificada próxima das áreas da expansão dos sedimentos. Essa identificação se deve à melhoria da resolução espacial proporcionada pela fusão.

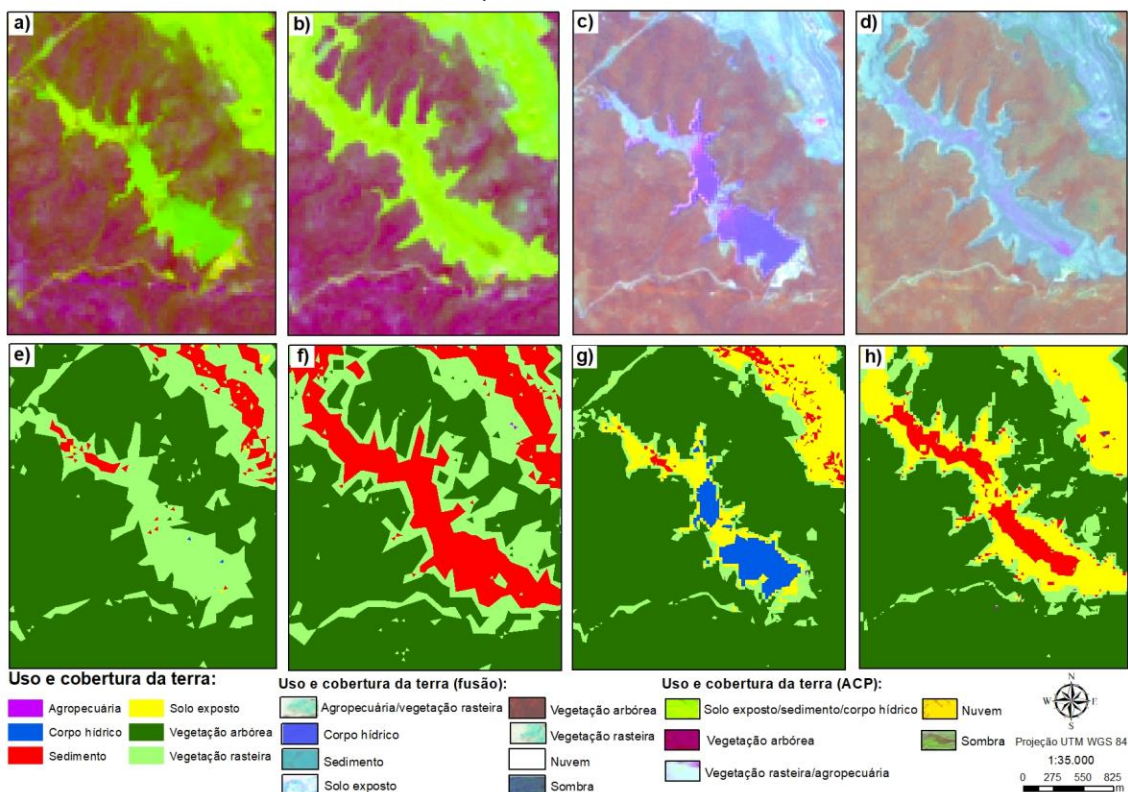
A classe “solo exposto” também se mostrou com valores diferentes em relação à sua ocupação na bacia. Para as imagens da ACP o resultado foi de 0,6421% para outubro e 0,6403% para novembro. Já para as imagens da fusão essa classe apresentou como cobertura 2,59% em outubro e 3,16% em novembro.

Para a classificação da ACP como “agropecuária”, “corpo hídrico”, “vegetação arbórea” e “vegetação rasteira” houve baixa variação. Entretanto, essas mesmas classes apresentaram variação não condizente com a alteração do uso e cobertura da terra já que essas classes dificilmente sofreriam alteração com intervalo de apenas um mês.

Com os dados coletados nas atividades de campo pôde-se verificar alta correspondência entre os resultados obtidos pelos processamentos e a realidade verificada *in situ*. Afim de que a comparação dos PDI fosse facilitada foi gerada uma figura com recorte da área da barragem de Santarém e parte da barragem de Fundão com as imagens da ACP, fusão e suas respectivas classificações supervisionadas (Figura 8). Com esse comparativo identifica-se que o contraste dado ao segundo componente na ACP facilitou na diferenciação de alguns alvos, no caso, a barragem de Santarém e a vegetação arbórea em seu entorno (Figura 8 a e b). Entretanto observa-se melhor distinção das bordas dos alvos com as imagens obtidas pela classificação (Figura 8 c e d). O mesmo resultado foi obtido para as classificações supervisionadas realizadas com as imagens da fusão nas quais apresentaram maior diferenciação de classes como “corpo hídrico”, “sedimento” e “solo exposto” na área da barragem (Figura 8 g e h). Nas classificações executadas com os *rasters* resultantes da ACP essa área foi mais generalizada apresentando as classes de maior frequência como “vegetação rasteira” e “vegetação arbórea”, assim como, as classes “solo exposto” e “sedimento” (Figura 8e e 8f).

A melhoria da resolução espectral e da resolução espacial permitiu maior precisão na coleta de amostras. Todavia, a partir das verificações visuais e da análise dos valores numéricos pode-se concluir que os mapas de uso e cobertura da terra que utilizaram imagens da fusão apresentaram melhor distinção de alvos sendo mais úteis para mapeamentos como esse devido à melhoria na visualização espacial dos alvos o que facilitou a coleta de amostras para a realização da classificação supervisionada, concordando com os resultados obtidos por Leite e Carvalho (2013).

Figura 8 – Composição colorida falsa cor com as imagens oriundas (a) da ACP RGBCP1CP2CP3 para outubro; (b) da ACP RGBCP1CP2CP3 para novembro; (c) da fusão RGB456 para outubro; (d) da fusão RGB456 para novembro; Uso e cobertura da terra obtido pela classificação supervisionada com bandas oriundas: (e) da ACP para outubro; (f) da ACP para novembro; (g) da fusão para outubro e (h) da fusão para novembro.



Fonte – Elaborado pelo autor.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pelas imagens oriundas dos processamentos realizados verifica-se que por todo rio Gualaxo do Norte houve substituição da cobertura superficial, com destaque para as áreas adjacentes ao rio principal, ocupadas por sedimentos devido ao rompimento da barragem de Fundão. A supressão da vegetação ciliar ocorrida associada à disposição deste novo material pode acarretar diversas consequências como o aumento de susceptibilidade à erosão podendo aumentar o processo de assoreamento dos rios, além da mortandade da fauna.

Em relação às técnicas do sensoriamento remoto utilizadas é possível considerar que a melhoria espectral obtida com a ACP permitiu destaque às áreas diretamente afetadas pelos sedimentos vindos do rompimento. Já as imagens com 15m de resolução espacial obtidas a partir da fusão possibilitaram melhor reconhecimento de diferentes alvos em áreas menores.

Tanto o uso da técnica de ACP quanto à fusão permitiram a realização de classificações supervisionadas sendo que os resultados obtidos contemplaram assertividade aos objetivos propostos. Porém, as classificações feitas com imagens oriundas da fusão conseguiram diferenciar melhor os alvos dispostos nas áreas trabalhadas.

Mesmo com a realização da reamostragem das imagens pela técnica da fusão o estudo se mostrou limitante no reconhecimento de alguns alvos importantes como tipos de cobertura específicos próximos à calha dos cursos de água. Há nessas áreas diferentes usos como culturas, pastagem, construções, etc.

Para solução dos problemas encontrados sugere-se a utilização de imagens com resolução espacial mais fina, para que assim, sejam possíveis mais diferenciações em alvos menores. Além disso, o uso de sensores com melhor resolução temporal seria útil para que fossem aumentadas as chances de se obter imagens com menor ocorrência de nuvens.

Estudos como esse são importantes para que mais trabalhos discutam acerca do acontecido e que novas ferramentas para planejamento e gestão sejam fornecidas e aprimoradas.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela concessão da bolsa de mestrado ao autor João Pedro dos Santos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA, I. S.; ANDRADE, L. A.; ALMEIDA, J. A. P. **Evolução da cobertura vegetal e uso agrícola do solo no município de Lagoa Seca, PB.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, n.5, p.614–622, 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v13n5/v13n05a15.pdf>>. Acesso em 29 de maio de 2017. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000500015>

BOTELHO, R. G. M.; DA SILVA, A. S. **Bacia hidrográfica e qualidade ambiental.** In: VITTE, A. C.; GUERRA, A. J. T. Reflexões sobre a geografia física no Brasil. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004.

CHAVEZ Jr, P.S.; MAC KINNON, D.J. **Automatic detection of vegetation changes in South United States using remotely sensed images.** *Photogrametric Engineering & Remote Sensing*, v.60, n.5, p.571-583, 1994.

COELHO, F. N. **Aplicação de técnica de fusão em imagens Landsat 8/ TIRS para o mapeamento de temperatura de superfície em perímetros urbanos, no município de Várzea Grande, Mato Grosso.** In: Anais 6º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Cuiabá, MT, 22 a 26 de outubro 2016 Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p. 57-66. Disponível em <<https://www.geopantanal.cnptia.embrapa.br/cd/pdf/p16.pdf>>. Acesso em 15 de maio de 2016.

CPRM. Litologia. **Mapas de Geodiversidade Estaduais.** Escala 1:1.000.000. Rio de Janeiro: Serviço Geológico do Brasil, 2014. Disponível em <<http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Geodiversidade/Mapas-de-Geodiversidade-Estaduais-1339.html>>. Acesso em 01 de maio de 2017.

CRÓSTA, A. P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto.** Campinas: IG/UNICAMP, 1992. 170 p.

INMET. **Normais climatológicas do Brasil 1961-1990.** Instituto Nacional de Meteorologia: Brasília, 2016. Disponível em

<<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>>. Acesso em 25 de junho de 2016.

LANDIS, J.; KOCH, G. G. **The measurements of agreement for categorical data**. *Biometrics*, v.33, n.3, p.159-179, 1977. <https://doi.org/10.2307/2529310>

LEITE, E. F.; CARVALHO, E. M. de. **Mapeamento do uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do riobairão São João, Porto Nacional Tocantins**. Jataí: Geoambiente On-Line, 2013, n. 20. Disponível em <<https://www.revistas.ufg.br/geoambiente/article/view/26086/15034>>. Acesso em 07 de junho de 2017. <https://doi.org/10.5216/geoambie.v0i20.26086>

LIMA, D. et al. **Comparação entre os métodos de fusão ihs, principal Components e gram-schmidt aplicados à imagem do Satélite landsat 8 sensores OLI**. *Anais Semana de Geografia*. vol. 1, N° 1. Ponta Grossa: UEPG, 2015. Disponível em <http://www.pitangui.uepg.br/eventos/semanadageografia/_PDFs/20151/LIMA,%20PEREIRA,%20RIBEIRO.pdf>. Acesso em 15 de maio de 2017.

LORENA, R. B.; SANTOS, J. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; SANT'ANNA, H. M.; SANT'ANNA, H. S. S.; MENEZES, R. S. **Dados multitemporais de sensoriamento remoto para a análise da dinâmica do uso e da cobertura da terra na região do Peixoto (AC)**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10., 2001, Foz do Iguaçu. [Anais eletrônicos...]. Foz do Iguaçu: INPE, 2001. p. 1653-1656. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/lise/2001/09.24.10.20/doc/1653.1656.079.pdf>>. Acesso em 29 de maio de 2017.

MALDONADO, F. D. **Análise por componentes principais (ACP) na caracterização da dinâmica do uso da terra em área do semi-árido brasileiro: Quixaba-PE**. 1999 (Dissertação de Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999. Disponível em <<http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/deise/1999/10.20.17.19/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em 15 de maio de 2017.

NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 3. Ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2010.

OLIVEIRA, P. E. de; GOMES, A. R.; SANCHES, R. C.; SAAD, A. R. **Análise da evolução da paisagem no entorno da represa dos rios Jaguari e Jacareí, estado de São Paulo, com base em sensoriamento remoto e SIG**. São Paulo, UNESP, 2008, v. 27, n. 4, p. 527-539. Disponível em: <<http://pgegeo.igc.usp.br/pdf/geosp/v27n4/v27n4a08.pdf>>. Acesso em 29 de maio de 2017.

PONZONI, Fávio Jorge; SHIMABUKURO, Yosio E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2007.

PORTAL DO BRASIL. **Setor mineral representa 4% do PIB brasileiro**. Brasília, 2014. Brasília, 2014. Disponível em <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2014/12/setor-mineral-representa-4-porcento-do-pib-brasileiro>>. Acesso em 28 de março de 2016.

RICHARDS, J.A.; JIA, X. **Remote sensing digital image analysis: an introduction**. 3.ed. New York: Springer: Verlag Berlin Heidelberg, 2006.

ROVANI, F. F. M. et al. **Aplicação da análise por componentes principais para o mapeamento do uso e ocupação da terra no município de Barão de Cotegipe – RS**. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 2013, Anais, Foz do Iguaçu, INPE. p. 8091-8097. Disponível em <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p0198.pdf>>. Acesso em 15 de maio de 2017.

SAADI, A.; CAMPOS, J. C. F. **Geomorfologia do caminho da lama: contexto e consequências da ruptura da Barragem do Fundão (novembro 2015, Mariana–MG)**. Belo Horizonte: Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico, v. 24, n.1/2, 2015. Disponível em <<https://www.ufmg.br/mhnbj/wpcontent/uploads/2017/02/Vol24n1.pdf>>. Acesso em 01 de maio de 2017.

SCHAEFER, C. E. G. R.; SANTOS, E. E. dos.; FILHO, E. I. F.; ASSIS, I. R. de. **Paisagens de Lama: Os Tecossolos para recuperação ambiental de áreas afetadas pelo desastre da barragem do Fundão, em Mariana**. Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 42, n. 1, p. 18-23. 2016.

SILVA, M. L. M.; PEREIRA, G. P. M. **Avaliação de algoritmos de classificação supervisionada para imagens do Cbers-2 da Região do Parque Estadual do rio Doce-MG**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13., 2007, Florianópolis. Anais... São José dos Campos, INPE, 2007. p. 6223-6228. Disponível em <<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.20.25/doc/62236228.pdf>>. Acesso em 19 de abril de 2017.

SOUZA FILHO, P W. M. E et al. **Sensoriamento remoto e recursos naturais da amazônia**. São Paulo: Ciência e Cultura. Vol. 58 nº. 3, 2006. Disponível em <http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S000967252006000300016>. Acesso em 15 de maio de 2016.

SOARES-FILHO, Britaldo S. **Análise das mudanças de cobertura do solo no Norte do Mato Grosso, Brasil**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. [Anais eletrônicos...]. Goiânia: INPE, 2005. p. 3357-3364. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/10.27.15.15/doc/3357.pdf>>. Acesso em 29 de maio de 2017.

UFV. **Mapa de solos do estado de Minas Gerais**. Escala 1:650.000. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2010. Disponível em <http://www.dps.ufv.br/?page_id=742>. Acesso em 01 de maio de 2017.

USGS. **Landsat Missions: Using the USGS Landsat8 Product**. U.S. Department of the Interior; U.S. Geological Survey – NASA, 2015. Disponível em <http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php>. Acesso em 28 de maio de 2016.

VEADO, R. W. A. et al. **Expansão e recuperação das áreas de mineração de carvão a céu aberto e dos sítios de rejeitos na região carbonífera de Santa Catarina**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 6., Manaus, 24-29 jun. 1990. Anais: São José dos Campos, INPE, p.619-626.

Recebido em: 07/02/2018

Aceito para publicação em: 20/08/2018