



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
GEOLOGIA**



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

MAPEAMENTO GEOLÓGICO COM APLICAÇÃO DO BGS DIGITAL WORKFLOW E MODELAGEM IMPLÍCITA

AUTOR: Allan Büchi

ORIENTAÇÃO: Tiago Amâncio Novo

Nº184

BELO HORIZONTE
DATA (_23_/03_/2018_)

Allan Büchi

MAPEAMENTO GEOLÓGICO COM APLICAÇÃO DO BGS DIGITAL WORKFLOW E MODELAGEM IMPLÍCITA

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito para obtenção do título de mestre em Geologia

Área de Concentração: Geologia Regional e Geotecnologias
Orientador: Prof. Tiago Amâncio Novo

Comissão Examinadora:

Prof. Tiago Amâncio Novo (UFMG)

Prof. Joachim Karfunkel (UFMG)

Prof. Friedrich Ewald Renger (UFMG)

Prof. Matheus Henrique Kuchenbecker do Amaral (UFVJM) - suplente

Prof. Fabrício, de Andrade Caxito (UFMG) - suplente

Belo Horizonte
Instituto de Geociências da UFMG
Março de 2018

B921m Büchi, Allan.

2018 Mapeamento geológico com aplicação do BGS digital workflow e modelagem implícita [manuscrito] / Allan Büchi – 2018.
58 f., enc. (principalmente color.)

Orientador: Tiago Amâncio Novo.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2018.

Área de concentração: Geologia Regional e Geotecnologias.

Bibliografia: f. 52-56.

Inclui anexos.

1. Mapeamento geológico – Teses. 2. Sistemas de informação geográfica – Teses. 3. Realidade virtual – Teses. 4. Mapeamento digital – Teses. 5. Quadrilátero ferrífero (MG) – Teses. I. Novo, Tiago Amâncio. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 551(815.1)

Agradecimentos

O autor agradece as pessoas que inspiraram na construção do conhecimento geológico científico ao longo dos anos.

Ao meu avô, James Büchi (*in memoriam*), geólogo que abriu as portas do conhecimento desta ciência e na formação humana e ética para execução da mesma.

Ao Prof. Heinz Charles Kohler (*in memoriam*), que me convenceu de migrar da Geografia para Geologia, ampliando minha formação na Geociências.

Ao Prof. Joachim Karfunkel, que me orientou durante todo período da graduação em Geologia, me moldando como profissional na indústria e na academia.

Aos amigos Ricardo Pagung e Bruce Napier, que acompanharam, apoiaram e executaram em conjunto parte das etapas do referente projeto.

Aos amigos e companheiros de trabalhos Daniel Gradim e Paulo Dias, pelo apoio em diversas fases do trabalho.

Ao meu orientador Prof. Tiago Amâncio Novo, pelas risadas, discussões e paciência.

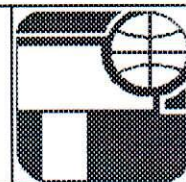
Aos colegas e amigos que fizeram parte das discussões, interpretações que direcionaram a execução deste trabalho; Cainho, John Ford, Patrícia Calazans, Hebert Oliveira, Jonas Costa, Rafael Albuquerque, Issamu Endo, Pablo Mafra, Paulo Orlandi, Luiz Schuchter Bem-Te-Vi e Geraldo Guimarães.

Aos familiares que apoiaram e estiveram ao lado em especial Cristina, Barbara, Monica, Andreas e meu Pai, Marcos.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA



FOLHA DE APROVAÇÃO

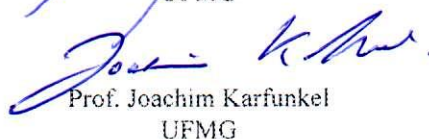
MAPEAMENTO GEOLÓGICO COM APLICAÇÃO DO BGS DIGITAL WORKFLOW
E MODELAGEM IMPLÍCITA

ALLAN BÜCHI

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOLOGIA, área de concentração GEOLOGIA REGIONAL.

Aprovada em 23 de março de 2018, pela banca constituída pelos membros:


Prof. Tiago Amâncio Novo - Orientador
UFMG


Prof. Joachim Karfunkel
UFMG


Prof. Friedrich Ewald Renger
UFMG

Belo Horizonte, 23 de março de 2018.

SUMÁRIO

1.0 - INTRODUÇÃO	4
2.0 - ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	6
3.0 - OBJETIVOS	6
4.0 - LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO	8
5.0 - ARTIGO I - Mapeamento Geológico na Exploração Mineral com Aplicação de SIG e Realidade Virtual: Estudos Metodológicos.....	9
6.0 - ARTIGO II - " <i>Mapeamento Geológico com aplicação do BGS Digital Workflow e Modelagem Implícita: Estudo de Caso da Serra da Moeda - MG, Brasil</i> "	35
7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52
8.0 - ANEXO I - Carta de Colaboração entre o Autor e o BGS (Serviço Geológico Britânico)	57
9.0 - ANEXO II - Comprovação de submissão do Artigo	58

RESUMO

O mapeamento geológico, uma das atividades da pesquisa geológica, está associado a riscos e investimentos, a metodologia de sua execução se orienta para o desenvolvimento de soluções que garantam a confiabilidade na interpretação e apresentação de dados. Das geotecnologias aplicadas ao processo, a que tem se mostrado mais decisiva é a dos SIG – Sistemas de Informações Geográficas, que viabiliza maior integração de dados e informações e maior objetividade na identificação de valor. Considerando também que a geologia precisa ser compreendida em toda a complexidade tridimensional de suas formas, a geovisualização se tornaria mais eficaz se ela se desse em três dimensões (3D), com a associação de imagens realísticas, configurando uma representação em realidade virtual – RV. A associação entre SIG e RV pode proporcionar um aperfeiçoamento às atividades de mapeamento geológico, na aquisição de dados e nas campanhas de campo e na análise, discussão e geovisualização dos resultados, o que vem sendo aplicado pelo BGS (Serviço Geológico Britânico). Neste sentido, o objetivo dos trabalhos aqui reportados é identificar as instâncias do processo que podem ser aprimoradas com a aplicação das geotecnologias, e da modelagem implícita, já que desde do século XIV, os resultados do mapeamento são apresentados em 2D (Mapas e Perfis). Este trabalho contemplou uma avaliação pragmática do mapeamento geológico, e a identificação das atividades passíveis de aprimoramento, a partir de uma discussão metodológica e aplicação da metodologia em um estudo de caso.

Palavras-chave: Mapeamento Geológico, Geotecnologias, Realidade Virtual, Mapeamento Digital, Modelagem Implícita.

ABSTRACT

Geological Mapping, one of the mineral geological activities, is associated with risks and investments, the methodology applied must guarantee the reliability of interpretation and presentation of the data. GIS – Geographic Information Systems have proven to be one of the most decisive of the technologies involved in the process, which ensures the integration of data and information and greater objectivity in identifying value. Considering that the geology needs to be understood in the entire three-dimensional complexity of their shapes, geovisualization would be more effective if it were conducted in three dimensions (3D) with the association of realistic images, providing a representation in virtual reality – VR. The association between GIS and VR will lead to a new benchmark in geological mapping research activities, in the acquisition of field data and in the analysis, discussion and visualization of results, which has been applied by the British Geological Survey (BGS). As such, the objective of this article is to identify the parts of the process, which can be improved using a geotechnological approach, and implicit modelling, because since the XIV century, the results of the geological mapping are presented in 2D (Maps and Sections). The work includes a pragmatic assessment of geological mapping activities and the identification of the activities that could be improved, starting from a methodological discussion and application of the methodology in a case study.

Keywords: Geological Mapping, Geotechnologies, Virtual Reality, Digital Mapping, Implicit Modeling

O uso de tecnologias não é uma novidade nos trabalhos de mapeamento geológico. O suporte digital em ambientes 2D e 3D está bem difundido no meio acadêmico e industrial, relacionado às diversas áreas das geociências. A presente dissertação de mestrado traz a aplicação de uma metodologia contextualizada em diversas geotecnologias associadas ao mapeamento geológico e interpretação estrutural.

As atividades de mapeamento e pesquisa geológica demandam grandes investimentos, em relação a se associarem a um médio a alto grau de incerteza em seus resultados. Diversos estudos/pesquisas vêm sendo empreendidos com o objetivo de otimizar, qualificar as interpretações, e melhorar a eficácia das atividades relacionadas. Neste sentido, o aprimoramento da aquisição e análise de dados, com suporte de novas tecnologias, se torna essencial, pois não apenas diminui custos e aumenta a confiabilidade na avaliação geológica, como também, reduz riscos e amplia a qualidade da informação analisada.

As geotecnologias vêm sendo cada vez mais empregadas nas várias áreas da geologia, diversas instituições vêm gerando uma gama de dados digitais de qualidade para o auxílio em tais pesquisas. Os levantamentos aerofotogramétricos, modelos digitais de terreno – MDT, imagens de satélite e dados geofísicos, são exemplos de dados envolvidos no mapeamento geológico, que auxiliam as interpretações e investigações de campo. A problemática da utilização de dados multivariados, é em relação a plataforma de integração dos mesmos, o que torna essencial o emprego de ferramentas unificadoras, através de *softwares* e plataformas 3D.

A aplicação destas ferramentas no mapeamento geológico permite a geração de inúmeros cenários de integração de dados e informações, gerando possibilidades de variação da perspectiva interpretativa dos resultados de campo. A visualização dos dados em ambiente em 3D permite que vários elementos multidisciplinares possam ser integrados e validados, gerando possibilidades de aprimoramentos e readequamentos dos dados. WESTHEAD *et al.* (2013) observam que a perspectiva 3D dos dados de sub superfície apura a análise e viabiliza percepções acerca das evidências geométricas que caracterizam os aspectos geológicos, aprimorando a interpretação de elementos estruturais como falhas, dobras e da reconstrução dos ambientes passados de formação da geologia atual. Na etapa de campo, ARRUDA JÚNIOR *et al.* (2010), descrevem a utilização de um sistema SIG 2D integrado com GPS para mapeamento geológico, melhorando a exatidão do levantamento de dados em campo. Os autores WESTHEAD *et al.* (2013) e WHITMEYER *et al.* (2010) descrevem progressos na interpretação

de dados em dispositivos móveis, gerando possibilidades variadas para a coleta de dados em campo e análises dos mesmos em 3D.

A aplicação de novas metodologias, abre novas oportunidades para uma mudança cultural relacionada ao mapeamento de campo. O paradigma no uso do papel para o display digital, não é uma transformação metodológica, pois as técnicas e ações de campo basicamente se mantem inalteradas, sendo apenas potencializadas pelo uso da geotecnologia. CALAZANS *et al.* (2016) descreve este processo de transformação, que promoveu a migração da base material, representada por mapas em papel, fotografias aéreas e overlays sobre mesas de luz, para a base digital, configurada pelos especialistas CAD e GIS, com o uso de imagens digitais de satélite.

Em vista dos resultados apresentados pelos trabalhos citados, percebeu-se a oportunidade de produzir ainda mais melhorias através da adição de novas tecnologias, em especial com aplicação da geovisualização em ambiente 3D/RV (Realidade Virtual), através do *BGS Digital Workflow* (fluxo de trabalho aplicado ao mapeamento geologia pelo Serviço Geológico Britânico) e a modelagem implícita.

Para tanto, foi escolhida uma área que apresentasse condições adequadas para a realização dos objetivos deste projeto, ou seja que contemplasse a necessidade de existência de dados digitais de qualidade e variados, apresentasse características históricas e atuais de complexidade geológica, que poderia ser desenvolvida com aplicação e suporte das geotecnologias. A região do Quadrilátero Ferrífero, no caso a Serra da Moeda, apresenta toda base necessária a aplicação da metodologia, possuindo uma diversidade de dados multivariados, multidisciplinares, diversos mapeamentos geológicos e de áreas afim, como os mapeamentos realizados pelo USGS nas décadas de 50 e 60, levantamentos básicos da CPRM na década de 90 e das folhas produzidas pelo projeto de integração e correção cartográfica do Quadrilátero Ferrífero pela CODEMIG (Companhia Mineradora do Estado de Minas Gerais). Além de base digital fotogramétrica consistente, desde imagens aéreas a satelitais e levantamentos aerogeofísicos (magnetometria/gamaespectrometria) da CODEMIG.

Este projeto foi elaborado, através de uma parceria com o BGS (Serviço Geológico Britânico), através de um acordo de cooperação (Anexo I). O BGS, cedeu as geotecnologias e laboratórios para execução da pesquisa.

2.0 – ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está estruturada em capítulos que focam apresentar o contexto do trabalho, desde da metodologia proposta a aplicação da mesma em uma área de estudo. Estes estão descritos sucintamente a seguir;

- Objetivos: relação dos principais focos da pesquisa, abordando o contexto e visão geral da temática abordada, tais como as geotecnologias relacionadas.
- Localização e Vias de Acesso: apresenta a localização e contexto da área de aplicação da metodologia proposta.
- Artigo I: Submetido na Revista Brasileira de Cartografia (ISSN 0560-4612), intitulado; “*Mapeamento Geológico na Exploração Mineral com Aplicação de SIG e Realidade Virtual: Estudos Metodológicos*”. Este artigo é apresenta uma discussão e análise da metodologia proposta nesta dissertação, através de pesquisa bibliográfica, objetivando a compreensão da evolução dos métodos e técnicas relacionadas ao mapeamento geológico no âmbito da pesquisa mineral.
- Artigo II: A ser submetido, intitulado: “*Mapeamento Geológico com aplicação do BGS Digital Workflow e Modelagem Implícita: Estudo de Caso da Serra da Moeda – MG, Brasil*”. Este artigo apresenta a aplicação da metodologia, discutida no artigo anterior, na área relacionada ao capítulo 4 (Localização e Vias de Acesso) e os resultados alcançados.
- Referências Bibliográficas: relação de toda a bibliografia utilizada nesta dissertação, incluindo as citadas nos artigos.

3.0 – OBJETIVOS

Este estudo propõe a aplicação de geotecnologias no levantamento litológico e estrutural, objetivando o entendimento da transformação metodológica e os resultados e benefícios que a aplicação de novas tecnologias, podem trazer à pesquisa/mapeamento na geologia.

Para este objetivo foi realizada uma avaliação crítica para contextualização e adaptação do *BGS Digital Workflow* (fluxo de trabalho aplicado ao mapeamento geologia pelo Serviço Geológico Britânico), enfatizando o processo do mapeamento geológico, etapas de Pré-campo, Campo e Pós-campo, com aplicação de *softwares* para o auxílio destas. Em relação a estes, basicamente se fundamenta no emprego de três principais: GeoVisionary, ArcGIS e o aplicativo SIGMA Mobile. Como uma variável nesta metodologia, foi introduzido a modelagem implícita, através do *software* Leapfrog, para construção de um modelo geológico/estrutural 3D, regional (etapa de Pré-Campo e local etapa de Pós-Campo). Este modelamento foi objetivado para

apresentação de resultados do mapeamento em 3D, e não apenas através de mapas e seções geológicas no âmbito 2D, como usualmente acontece.

O GeoVisionary (NAPIER, 2011) é um programa desenvolvido pela empresa inglesa Virtualis, em parceria com o BGS, que comporta a visualização em tempo real de grandes extensões geográficas/geológicas em MDT (Modelo Digital de Terreno) e imagens satelitais. Este software, permite a visualização 3D de camadas articuladas de informação SIG, propiciando a integração de dados de campo e de escritório, podendo ser utilizado para fotointerpretação, correlação de dados de diferentes áreas e integração dos mesmos. No que se refere ao sistema de geoinformação (SIG) foi adotada a plataforma do *software* ArcGIS, que constitui a base da produção de informações geoesferenciadas, para a geração de dados vetoriais e de suporte às atividades de campo. Em relação ao aplicativo SIGMA Mobile, o mesmo foi desenvolvido pelo BGS através do conceito SIGMA (*System of Integrated for Geoscience Mapping* – Sistema Integrado para Mapeamento em Geociências), sendo utilizado como uma plataforma conectada ao ArcGIS, para coleta e armazenamento de dados, através de equipamentos móveis (tablets, toughbooks e outros). O Leapfrog é um *software* de modelamento geológico, que permite a integração mapa de campo e perfis geológicos, possibilitando a criação de blocos diagramas e diversas interpretações para os resultados do levantamento geológico, o mesmo pode ser integrado ao GeoVisionary.

Estes conceitos foram aplicados no mapeamento geológico na Serra da Moeda – MG, objetivando através da metodologia apresentada, entender a relação do contexto litológico e estrutural com as nascentes d'águas ao longo da serra.

4.0 - LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

A área de estudo, se localiza na Serra da Moeda -MG, em sua porção central. A região de mapeamento está determinada por um polígono de direção aproximada N/S, com limites aproximados; Norte – Mina de Pau Branco e Sul – Mina de Várzea dos Lopes, com alongamento E/W, por regiões próximas ao sopé da Serra da Moeda a oeste e na região de encosta a leste da mesma (Figura 1).

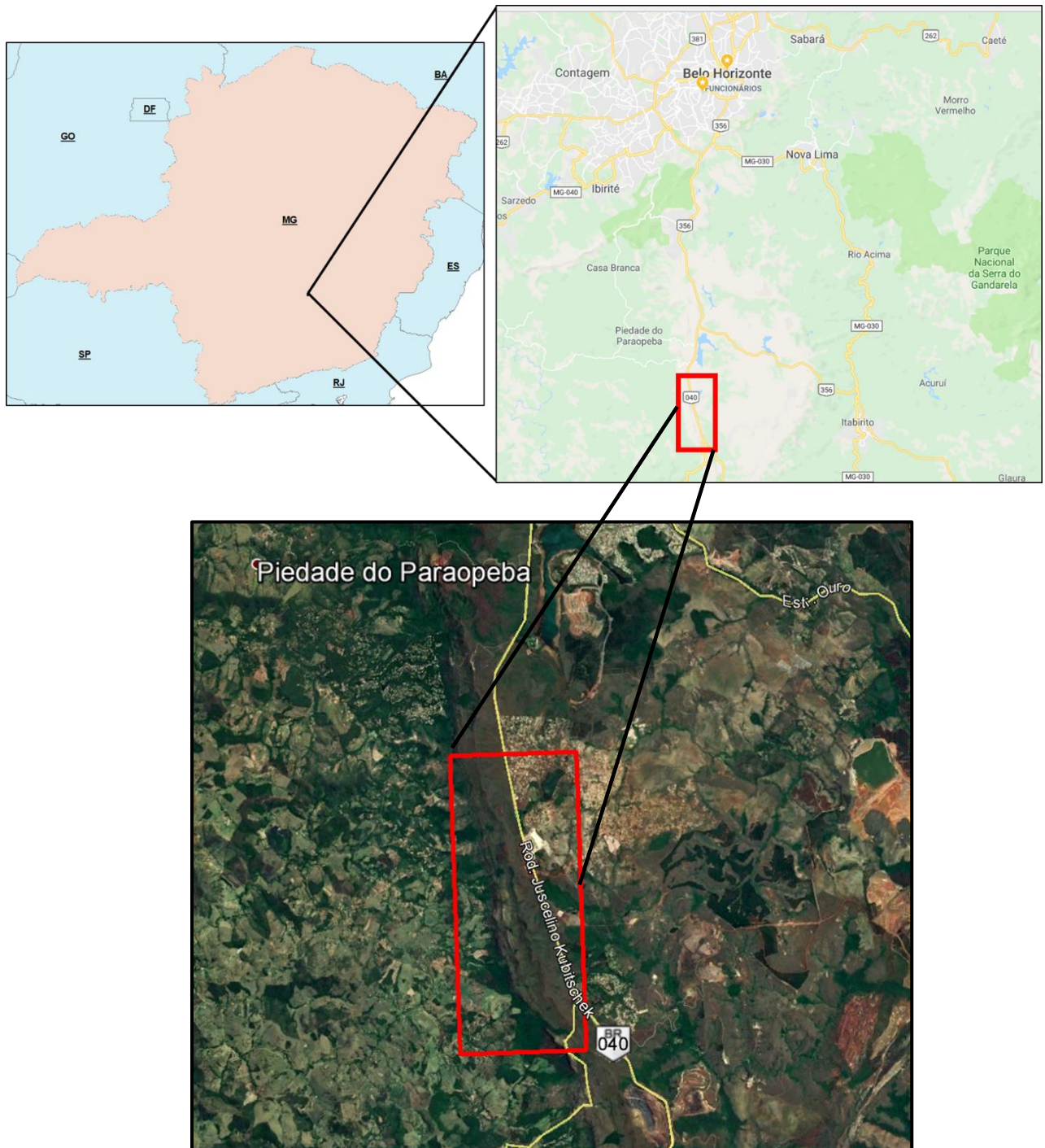


Figura 1 - Imagem exibindo a localização da área de estudo, marcada pelo polígono vermelho

. Fonte: *Google Earth*, acessada em 12/03/18.

5.0 - ARTIGO I - Mapeamento Geológico na Exploração Mineral com Aplicação de SIG e Realidade Virtual: Estudos Metodológicos

Este artigo é resultado de uma extensa pesquisa bibliográfica objetivando a compreensão da evolução metodológica e tecnológica do âmbito da pesquisa mineral. Com foco na evolução das geotecnologias relacionadas ao mapeamento geológico, e análise crítica de novas técnicas relacionadas as geotecnologias e geovisualização. Apresenta discussões sobre a aplicação do *BGS Digital Workflow*, com a introdução da modelagem implícita, como uma variável nesta metodologia. Este artigo foi submetido na Revista Brasileira de Cartografia (ISSN 0560-4612), em fevereiro deste ano e ainda em avaliação pelo editor, conforme o Anexo II (comprovação de submissão).

MAPEAMENTO GEOLÓGICO NA EXPLORAÇÃO MINERAL COM USO DE SIG E REALIDADE VIRTUAL: ESTUDOS METODOLÓGICOS

*Geological Mapping in Mineral Exploration using SIG and Virtual Reality:
Methodological Studies*

Allan Büchi^{1,2}

Tiago Amâncio Novo¹

Patrícia Moreira Procópio Calazans³

José Carlos Sícoli Seoane⁴

Bruce Napier⁵

Luiz Henrique Guimarães Castiglione⁶

¹Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

Departamento de Geologia – Instituto de Geociências

Av. Antônio Carlos, 6627- Pampulha - CEP 31270-901 - Belo Horizonte – MG, Brasil

allanbuchi@gmail.com

tiagonovo@gmail.com

²Outcrop-BR Consultoria em Geologia Ltda

Rua Luiz de Mello Mattos, 74/203 - CEP 31730315-710 – Belo Horizonte - MG, Brasil

outcropbr@gmail.com

³Moreira e Procópio Consultoria e Empreendimentos Ltda

Rua Dr. Astolfo Vieira de Resende, 16/304 - CEP 30315-510 – Belo Horizonte - MG, Brasil

patricia@moreiraprocopio.com.br

⁴Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Departamento de Geologia – Instituto de Geociências

Av. Athos da Silveira, 274, bloco G.- Campus Ilha do Fundão. CEP 21.949-900 - Rio de Janeiro – RJ, Brasil

cainho@geologia.ufrj.br

⁵British Geological Survey

Environmental Science Centre

Keyworth, NG12 5GG United Kingdom.

brn@bgs.ac.uk

⁶Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

Departamento de Engenharia Cartográfica – Faculdade de Engenharia

Rua São Francisco Xavier, 524 - CEP 20550-900 - Rio de Janeiro - RJ, Brasil

castiglione.luiz@gmail.com

RESUMO

O mapeamento geológico, uma das atividades da exploração mineral, está associado a riscos e investimentos e é fundamental para a criação de valor na mineração. A metodologia de sua execução se orienta para o desenvolvimento de soluções que garantam a confiabilidade dos recursos e reservas. Das geotecnologias aplicadas ao processo, a que tem se mostrado mais decisiva é a dos SIG – Sistemas de Informações Geográficas, que viabiliza maior integração de dados e informações e maior objetividade na identificação de valor. Considerando também que os corpos minerais precisam ser apreendidos em toda a complexidade tridimensional de suas formas, a geovisualização se tornaria mais eficaz se ela se desse em três dimensões (3D), com a associação de imagens realísticas, configurando uma representação em realidade virtual – RV. A associação entre SIG e RV pode proporcionar um aperfeiçoamento às atividades de mapeamento geológico, na aquisição de dados e nas campanhas de campo e na análise, discussão e geovisualização dos resultados do processo. Neste sentido, o objetivo dos trabalhos aqui reportados é identificar as instâncias do processo que podem ser aprimoradas com a aplicação das geotecnologias. Este trabalho contemplou uma avaliação pragmática da exploração mineral e da pesquisa geológica, uma identificação das atividades passíveis de aprimoramento, no caso as relacionadas com o mapeamento

geológico, e sua representação de resultados, que poderiam passar de 2D para 3D, com aplicação da modelagem implícita.

Palavras chaves: Mapeamento geológico, realidade virtual, geovisualização, SIG, exploração mineral.

ABSTRACT

Geological Mapping, one of the mineral exploration activities, is associated with risks and investments and is vital to the creation of value in mining. Solutions, which guarantee the reliability of resources and reserves, are in constant development. GIS – Geographic Information Systems have proven to be one of the most decisive of the technologies involved in the process, which ensures the integration of data and information and greater objectivity in identifying value. Considering that ore bodies need to be considered in the entire three-dimensional complexity of their shapes, geovisualization would be more effective if it were conducted in three dimensions (3D) with the association of realistic images, providing a representation in virtual reality – VR. The association between GIS and VR will lead to a new benchmark in mineral exploration geological research activities, in the acquisition of field data and in the analysis, discussion and visualization of exploration results. As such, the objective of this article is to identify the parts of the process, which can be improved using a geotechnological approach, and includes a pragmatic assessment of mineral exploration, of the activities to be improved and the planning, providing an insight into the practical effects of such improvements, as the geological mapping, which could be changed from 2D to 3D the representation of the results, with implicit modeling.

Keywords: Geological mapping, virtual reality, geovisualization, GIS, mining exploration.

1. INTRODUÇÃO

As atividades relacionadas a pesquisa mineral, dependem de grandes investimentos, e conseqüentemente envolvem altos riscos, sendo fundamentais para a criação de valor nos empreendimentos relacionados (CALAZANS *et al.*, 2016). As diretrizes metodológicas de sua execução se orientam para o desenvolvimento de soluções que garantam a confiabilidade da aferição quantitativa e qualitativa dos recursos e reservas. Um de seus objetivos principais se constitui pela busca de uma maior exatidão na modelagem dos corpos minerais de interesse, com a maior otimização possível de processos e de tempo. Neste contexto, se torna muito importante avaliar o uso das geotecnologias, ou seja, das tecnologias que permitem uma aquisição mais qualificada dos dados do espaço físico e uma visualização mais rica dos aspectos geoespaciais importantes ao processo de exploração mineral.

Em termos das geotecnologias, a que tem se mostrado mais decisiva é a dos SIG – Sistemas de Informações Geográficas, que tem demonstrado viabilizar uma maior integração de dados e informações, uma maior objetividade na identificação de valor e análise, no que diz respeito à correlação entre os diversos parâmetros envolvidos no processo. Ao longo das duas últimas décadas, estes sistemas vêm possibilitando novos desenvolvimentos metodológicos da exploração mineral (ATHEY *et al.*, 2008, ARRUDA JUNIOR *et al.*, 2010, WHITMEYER *et al.*, 2010, NAPIER 2011,

TERRINGTON *et al.*, 2015, CALAZANS *et al.*, 2016, JORDAN & NAPIER 2016), no caso o mapeamento geológico, mas sem alterar, no entanto, de forma expressiva, a questão da visualização dos resultados, que continuaram sendo realizadas e apresentadas em mapas bidimensionais (2D).

A partir da premissa anterior, constata-se que os resultados da atividade de mapeamento geológico (mapas e perfis), precisam ser compreendidos em toda a sua complexidade tridimensional (3D). Neste sentido, a geovisualização se torna essencial, já que se trata da relação dos 3 eixos espaciais no qual as informações foram organizadas, sendo a visualização uma indução ao pensamento visual (MENEGUETTE, 2013, figura 01). Em teoria o poder analítico do intérprete teria uma melhoria considerável, avaliando que a análise da superfície é um elemento importante, e se estendendo a subsuperfície, permitiria uma imersão mais qualitativa na análise do que uma imagem em 2D. Neste sentido, a realidade virtual (RV) e os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) se tornam ferramentas essenciais das atividades de aquisição e interpretação de dados, sendo executáveis em todas as etapas constituintes do mapeamento geológico, pré-campo, campo e pós-Campo. Esta sequência de atividades apresenta impactos positivos em relação as geotecnologias, com o aprimoramento do planejamento (pré-campo), em um ambiente com integração de dados multidisciplinares e visualização 3D, mapeamento digital com dados integrados e precisão (campo). O pós-campo em ambiente

RV permite uma intensa interpretação dos dados adquiridos *in loco*, e correlação com os dados terceiros (WESTHEAD, 2013).

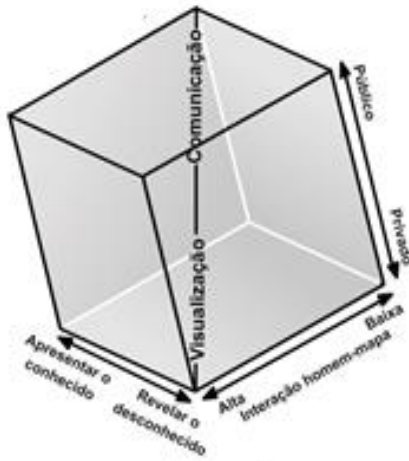


Fig. 01 – Representação do espaço 3D no contexto da Geovisualização. Fonte: MacEACHREN (1994) *in* MENEGUETTE (2014).

Estas considerações iniciais sinalizam que a associação entre o SIG e as geovisualizações em RV pode proporcionar um relevante aperfeiçoamento às atividades de exploração mineral, no caso específico o mapeamento geológico, tanto na ponta da aquisição de dados e das campanhas exploratórias em campo, quanto na ponta da análise, discussão e geovisualização dos resultados intermediários e finais do processo.

Estes aprimoramentos poderiam ser meramente especulativos, entretanto observa-se o crescimento de pesquisas evidenciando os resultados aportados à atividade de mapeamento geológico. No caso, o British Geological Survey – BGS (Serviço Geológico Britânico), apresentou inúmeros aprimoramentos metodológicos a esta atividade com base no uso associado destas geotecnologias. O BGS vem desenvolvendo pesquisas aplicando e aprimorando sua metodologia denominada SIGMA – System for Integrated Geoscience Mapping (JORDAN 2009), nos trabalhos de mapeamento, visando a redução do tempo e do risco na execução de atividades, bem como, a otimização e o aperfeiçoamento na qualidade da coleta e interpretação dos dados. Ou seja, identificar as instâncias do processo de mapeamento geológico que podem ser aprimoradas com o

uso das geotecnologias, com ênfase em SIG e RV.

2.A EXPLORAÇÃO MINERAL E A EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA

A exploração mineral se fundamenta na execução de pesquisa cuja finalidade principal é a localização do minério de interesse para indústria. Neste sentido, envolve um conjunto grande de atividades, que se orientam praticamente todas no sentido da prospecção do corpo mineral de interesse, com o fito da determinação da sua extensão volumétrica, densidade, teor médio e de seu valor. Como atividade intelectual, a exploração mineral envolve um trabalho de equipe cujo resultado decorre da articulação de análises individuais de diversos geólogos. As análises individuais são inevitavelmente subjetivas, e o resultado final depende, em parte, dos esforços intelectuais de conciliação e integração destas.

COE *et al.* (2010) destacam que alguns dos principais desafios intelectuais da pesquisa geológica contemplam o processo de tomada de decisão sobre os dados que devem ser coletados e o registro dos mesmos. Neste contexto, as diversas perspectivas subjetivas devem se dar ao nível de dados básicos, ou seja, quanto mais consistentes e descritivos forem estes dados, na etapa de aquisição e discussão, maiores serão as chances de convergência do modelo e resultado. De uma perspectiva histórica mais ampla, acerca dos dados coletados e da produção de informações como resultado da pesquisa geológica, WHITMEYER (2010) observa que a apresentação dos produtos da pesquisa geológica na forma de mapas e de perfis basicamente se inicia na França com CUVIER e BRONGNIART (1808), e no Reino Unido, em 1815, com o mapa geológico da Inglaterra e de Gales, com Smith (WINCHESTER, 2002), qual é um padrão que perdura até os dias atuais.

A representação do conhecimento e dados geológicos, sintetizada em formas que permitam a percepção da sua distribuição espacial, entretanto, tem se transformado intensamente nas duas últimas décadas, desde a digitalização das informações geográficas até a utilização de plataformas 3D. Se desde Cuvier, Brongniart e Smith a informação

geográfica se apresentava essencialmente da mesma forma, em mapas e perfis, hoje as possibilidades de apresentação geoinformacional se diversificaram muito, em formatos que incorporam diferentes formas de visualização, ou de geovisualização de dados e informações. Mapas, imagens, bases vetoriais, modelos digitais de elevação e outros elementos de constituição bidimensionais (2D) ou tridimensionais (3D) são exemplos de diferentes formatações dessas geoinformações (Figura 02). Neste contexto, CASTIGLIONE & CALAZANS (2011), observam que um conjunto de informações sobre a geologia de uma determinada área pode ser geograficamente consistente, se estiver contida numa base estruturada de informações, com uma representação, geoespacial e geoinformacional adequada à construção do conhecimento. A questão se sintetizaria então na pergunta: Como se deve constituir uma base de dados geográficos capaz de adequadamente contextualizar a construção do conhecimento sobre o fenômeno geológico de interesse, em especial no âmbito da exploração mineral? As respostas, no estágio atual das tecnologias, são muitas, em face dos desenvolvimentos decorrentes da aplicação massiva dos processos computacionais à produção e aquisição de dados por posicionamento global por satélites – GPS, do modelamento tridimensional pelo sensoriamento ativo – laser e radar e da farta produção de imagens digitais de altíssima resolução, por sensoriamento remoto.

ATHEY *et al.* (2008), ao tratar da questão do mapeamento geológico, observam que uma das vantagens do ambiente digital na produção de geoinformações é decorrente da possibilidade dos geólogos envolvidos no mapeamento de intercambiar diariamente os dados de seus levantamentos de campo, viabilizando uma maior sinergia e articulação entre as análises. Esta integração de dados vem sendo viabilizada pela condição digital dos dados e informações e pelo compartilhamento de plataformas comuns de tratamento e processamento destes (SHUFELDT 2012).

Estas transformações vêm se intensificando à medida que a tecnologia se desenvolve, ampliando ainda mais a visão de importância dos dados básicos e das informações produzidas ao longo do processo da exploração mineral. Desde as décadas de

1980 e 1990, aumentaram as aplicações digitais no tratamento de dados e na produção de geoinformações (GOETZ *et al.*, 1983, BONHAM-CARTER 1994, GUIMARÃES-FILHO 1994) com o crescimento das chamadas geotecnologias, ou seja, das tecnologias especialmente orientadas para a produção de dados geográficos e geoinformações. Nesta época, já se vislumbrava os aprimoramentos que estas geotecnologias poderiam aportar a pesquisa geológica. Em 1994, quando os sistemas para tratamento da informação geoespacial ainda eram uma novidade em desenvolvimento, com aplicação ainda muito incipiente nos ambientes de trabalho, GUIMARÃES-FILHO (1994) já observava que dados e informações de qualidade são indispensáveis ao sucesso do empreendimento exploratório, diminuindo a margem de erro na avaliação e permitindo que o geólogo tenha mais assertividade na avaliação do potencial metalogenético de uma área. O autor destaca ainda que a qualidade dos dados e o processamento decorrente para geração das geoinformações de interesse precisam se dar segundo sistemas que organizem e integrem os dados e permitam a produção sistêmica de informações, ao longo do processo. Esta visão, ao longo das últimas décadas, evidencia não apenas o papel estruturante e decisivo dos dados e informações como também traz para o centro do processo exploratório o uso do SIG. Neste sentido, e considerando os argumentos anteriores acerca do compartilhamento de análises pelas equipes envolvidas na exploração, o SIG se coloca como uma ferramenta indispensável, desde a estruturação dos dados preexistentes até o resultado final da síntese analítica do processo, cumprindo ainda, durante o processo exploratório, o papel fundamental de integrador e articulador das diversas visões e análises produzidas, individualmente, por cada equipe envolvida no processo.

Estas mudanças metodológicas não ocorrem de forma idêntica nos processos da exploração mineral; como WHITMEYER (2010) observa, os avanços dos meios de transporte que apoiam as atividades de campo foram da montaria de animais aos veículos automotores, enquanto que a metodologia básica de aquisição e apresentação de dados de campo permanece basicamente a mesma. Este

mesmo autor destaca que o mapeamento geológico permanece demandando inúmeras horas de trabalho de campo, na classificação, medição, catalogação e interpolação de unidades geológicas, nas mais variadas escalas de análise, o que de fato se constata ao analisar os procedimentos operacionais acadêmicos e

profissionais das várias equipes de geólogos da exploração mineral. Neste caso, às possibilidades criadas pelas novas geotecnologias disponíveis, são inúmeras em questão da redução de tempo e melhorias na

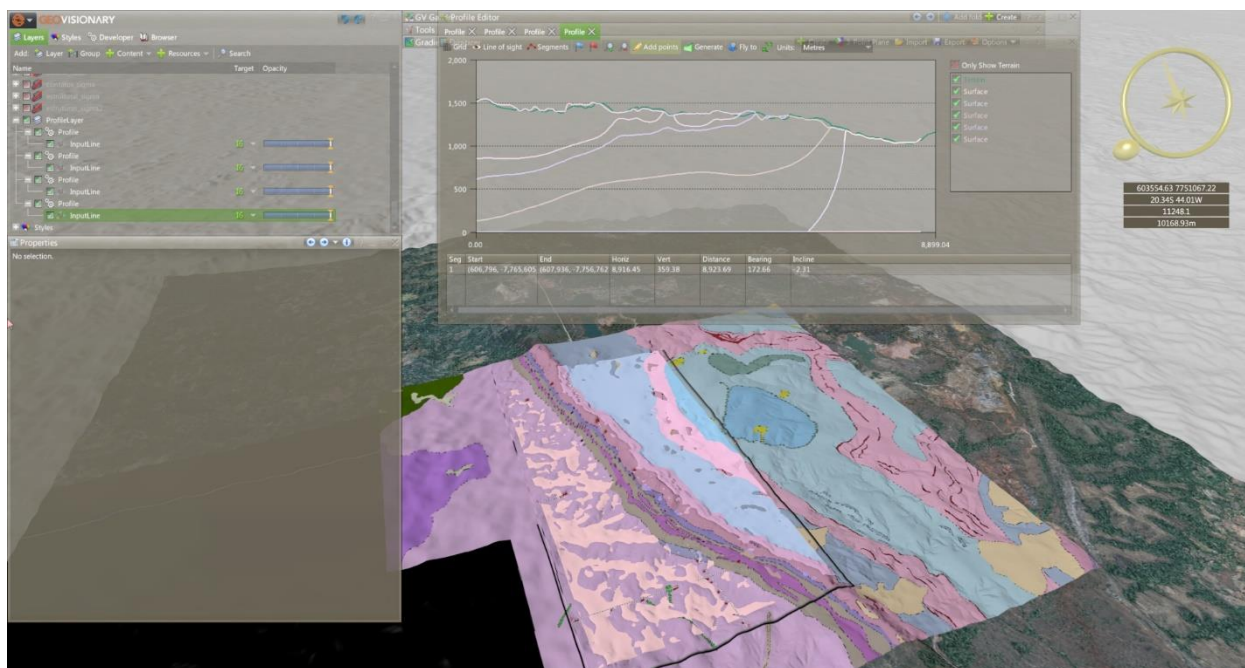


Fig. 02 – Integração de dados em diferentes formatos (2D e 3D) em ambiente de realidade virtual (RV). A interabilidade do ambiente permite uma visualização em várias perspectivas, aumentando o poder de análise e comunicação interdisciplinar.

aquisição e interpretação de dados, entretanto o método tradicional e analítico se mantém em sua base. Ou seja, os aprimoramentos observados com o uso de geotecnologias são mais potencializações do que transformações, a metodologia se mantém em sua maneira clássica de atuação, mas com melhorias aplicadas aos processos dessa atividade.

No caso do SIG sua importância como sistema está na estruturação de dados e informações (SOUZA FILHO & CRÓSTA, 2003). No caso dos estudos geológicos, este valor se reafirma, porque a maioria dos dados envolvidos tem natureza geoespacial. Neste sentido, a evolução das geotecnologias torna cada vez mais decisiva a tomada de posição sobre a formatação (imagética, vetorial, modelos digitais de terreno) e as especificações de exatidão (qualidade da representação) dos dados, inclusive na transformação metodológica da pesquisa mineral. Estas transformações demonstram que, o papel das informações geográficas na transmissão de conhecimento tem se tornado

essencial, e que, portanto, uma avaliação criteriosa das especificações precisaria redefinir que soluções geotecnológicas adotar no suporte às pesquisas da exploração mineral. Faz sentido, portanto, analisar os mecanismos de aquisição, tratamento e representação de dados e a sua adequação aos trabalhos e estudos na pesquisa geológica. Há ainda que se considerar que as análises e planejamentos necessitam de bases de dados geográficos consistente que atenda as demandas de integração e acurácia das informações, para que a mesma possa ser utilizada de forma multidisciplinar e com representatividade e exatidão.

Diversos são os fatores que indicam um crescimento nas demandas de exatidão e representatividade. Os novos ambientes computacionais para os trabalhos de análise e planejamento, impulsionados pelo SIG estão viabilizando uma integração mais precisa de dados de diversas fontes, tornando exequíveis as análises mais apuradas. Estas análises, por sua vez, acabam por aumentar a demanda por

dados de mais qualidade, exercendo influências no desenvolvimento na área das geotecnologias.

Em termos históricos, este processo de aprimoramento na produção de dados e informações mais qualificadas para reduzir a margem de incerteza do processo analítico, tem sido contínuo segundo SANTOS & RIBEIRO FILHO (1989). Estes autores observam ao tratar da evolução da exploração mineral ao longo do século passado, que os principais avanços no campo da geofísica se deram no período de 1945 a 1955, com a aeromagnetometria de campo total, a eletromagnetometria aérea, a espectrometria de raios gama e a polarização induzida. De uma forma geral, as evoluções dos equipamentos geofísicos tornaram a sua aplicação cada vez mais rentável. Os autores destacam ainda que, na década de 50, a utilização sistemática dos levantamentos aerogeofísicos se constituiu num dos fatores mais decisivos para impulso às atividades de investigação mineral, o mesmo ocorrendo nas duas últimas décadas com o aprimoramento de sensores e técnicas geofísicas, tais como gradiometria, GPR, sísmica (BRAGA *et al.*, 2010). Os autores SIEGEL (1985), SANTOS & RIBEIRO FILHO (1989) observam que as principais tendências da exploração mineral, à época, davam conta de que a aplicação de técnicas exigiria “determinações mineralógicas quantitativas, análises dos constituintes maiores e menores das rochas, caracterização dos padrões de dispersão dos elementos em superfície e na rocha-mãe, registro de elementos multiespectrais em maior número de faixas etc.”. SIEGEL (1985) basicamente centra sua previsão na extensão da capacidade de investigação do geólogo através do chamado Sensoriamento Remoto. Esta, de fato, parece ser uma condição em que um aprimoramento ocorre, porque grande parte da capacidade da análise geológica atualmente, decorre do uso de extensores da capacidade (geotecnologias) de observar e avaliar os objetos de pesquisa. As técnicas de sensoriamento remoto têm sido muito importantes na exploração mineral, exemplificando a aerogeofísica a qual rompe as barreiras naturais da observação geológica, (SOUZA FILHO e CRÓSTA 2003, SEOANE *et al.*, 2003, SANTOS *et al.*, 2010).

Analisando comparativamente o uso de imagens de sensoriamento remoto nas análises geológicas, pode-se observar que a principal transformação que irá marcar e caracterizar as geoinformações começa a ganhar maior desenvoltura na década de 1920, com a fotogrametria (GOETZ *et al.*, 1983). Esta transformação caracteriza-se pela utilização de diversos tipos de imagens na geração de geoinformações, consolidando, na medida em que as geotecnologias se desenvolvem, uma tendência pela adoção de representações imagéticas em lugar daquelas de natureza semiótica (mapas). Nesse contexto, a representação de elementos de interesse a pesquisa mineral está cada vez mais dominada pelas imagens de altíssima resolução, tanto fotogramétricas digitais quanto satelitais e multi-espectrais.

As geotecnologias viabilizaram outro tipo de levantamento por sensoriamento remoto, que antes da década de 1990 era virtualmente impraticável, e que atualmente, torna-se cada vez mais importante à pesquisa geológica, trata-se do sensoriamento ativo, que diz respeito à modelagem volumétrica precisa de objetos tridimensionais. Este tipo de levantamento se tornou mais usual no século XXI com os equipamentos de varredura laser, produção de nuvens de pontos 2D e 3D, capaz de caracterizar com precisão paisagens e formas, que antes apresentavam dificuldades de detalhamento e precisão pelas soluções antes existentes (WHITMEYER 2010).

Os ambientes de visualização e de análises mais precisas e de qualidades demandam dados qualificados em termos de exatidão e representatividade. Ou seja, nas atividades de produção de dados e geração de informação as geotecnologias existentes como a utilização de SIG em campo (mapeamento digital), ampliaram bastante as possibilidades de se produzir bases geoinformacionais de maior qualidade. Isso pode ser observado tanto no que tange à caracterização da geometria da representação (exatidão) quanto em termos dos aspectos representacionais. A representação da paisagem de interesse do analista melhorou muito com a utilização de imagens de altíssima resolução, com as representações vetoriais com intensa integração de dados e com as modelagens tridimensionais mais minuciosas, dentre outros produtos geoinformacionais.

O estudo amplo da exploração mineral, entretanto, não poderia prescindir de uma análise crítica das questões conceituais que subsidiam processos atuais, em específico o mapeamento geológico. Para este fim, buscou-se empreender uma avaliação do fluxograma de tais atividades apresentado pelo BGS, que já havia consolidado novas tecnologias, de forma a que esta metodologia servisse como referência para a avaliação dos processos atuais relacionados ao mapeamento geológico (JORDAN 2009 e NAPIER 2015, JORDAN & NAPIER 2016). Nesta análise, foram identificadas e avaliadas as possibilidades teóricas e práticas que a aplicação das geotecnologias de SIG e RV pode aportar na melhoria do mapeamento e produtos associados na pesquisa geológica. Com as análises práticas resultantes da revisão geral dos conceitos dos macroprocessos aos subprocessos, e com as análises conceituais observadas, foi estruturada uma avaliação teórico-prática das possibilidades de inserção das geotecnologias a pesquisa geológica, no sentido de aprimorar ou potencializar a geração de dados e informações. Estes ensaios de reestruturação foram levados à discussão multidisciplinar de sua viabilidade prática e sobre a pertinência das transformações propostas, instruindo um constante aprimoramento de sua estrutura conceitual. Os resultados são apresentados como uma proposta metodológica do processo de mapeamento, com a incorporação das mudanças que vêm sendo analisadas e redesenhadas, como observado em diversos trabalhos, tais como; JORDAN (2009), JORDAN *et al.*, (2009) WESTEAHEAD *et al.*, (2012, 2013), TERRINGTON *et al.*, (2015), CALAZANS *et al.*, (2016).

3.APLICAÇÃO DE SIG E RV NO MAPEAMENTO GEOLÓGICO

A análise crítica da metodologia atual da exploração mineral e a identificação de instâncias deste processo que poderiam ser aperfeiçoadas com a aplicação do estado da arte das geotecnologias pode ser o primeiro passo para o projeto de processos de exploração mais eficazes, no futuro.

Neste sentido, este estudo tem seu foco na exploração mineral, com ênfase no mapeamento geológico. A principal motivação

vincula-se ao estudo das possibilidades de aperfeiçoamento dos resultados com a aplicação de modernas técnicas de aquisição, tratamento, geovisualização e interpretação de dados geológicos e dados auxiliares, em ambientes de SIG e RV. Não se trata apenas de uma melhora da geovisualização de dados, mas sim de uma transformação metodológica que poderá ser aportada por estas novas geotecnologias, aprimorando as análises geológicas, desde as etapas de coleta de dados para a avaliação inicial da área, reconhecimento geológico, mapeamento geológico e planejamento de sondagem, conseqüentemente, os resultados finais alcançados pelo processo, em especial na questão da avaliação de recursos e reservas. Há desdobramentos econômicos importantes nesta transformação, mas, apesar disso, há ainda alguma dificuldade em se trabalhar nesta linha, por conta dos vultosos investimentos que precisam ser feitos para a implantação de ambientes de RV, assim como no aporte de ferramentas de suporte às atividades de campo, como *hardware* (tais como *notebooks*, *toughbooks* e *tablets*) e *softwares* de última geração. Além disso, há também as questões de mudança cultural que se associam a todas as grandes transformações no cotidiano das atividades de pesquisa e exploração.

Com base nestas premissas e considerando o papel e a importância da exploração mineral na cadeia de valor da mineração, a elaboração da metodologia para identificar os aprimoramentos possíveis deve não apenas explorar possibilidades teóricas, mas, acima de tudo, experimentar na metodologia atual estes novos métodos, de forma a colocar efetivamente em prova estas transformações conceituais e operacionais. Por estas razões, analisou-se a metodologia convencional atualmente utilizada e, sobre esta articulação de atividades, foram idealizadas todas as aplicações possíveis do estado-da-arte das geotecnologias, de forma a potencializar o processo de mapeamento e a sua produção de resultados.

O principal desafio enfrentado na elaboração da metodologia está relacionado com a necessidade de comprovar as melhorias que a associação entre ambientes de SIG e RV pode trazer para a exploração mineral, no caso o mapeamento geológico, e qual instrumentação seria usada. A partir dessa

premissa, foram destacadas a geotecnologias utilizadas pelo BGS, no caso software GeoVisionary e o aplicativo SIGMA Mobile, com integração em ambiente SIG.

O GeoVisionary é um *software* que permite operacionalização ampla do processamento de dados, produção de geoinformações e geovisualização em contexto de realidade virtual. Permite a visualização em tempo real de grandes extensões geográficas, representadas por modelos digitais de elevação e imagens, permitindo a visualização 3D do território de interesse, articulada com camadas de informação SIG e dados de sub superfície. O sistema oferece também recursos de integração de dados de campo e de escritório, podendo ser utilizada para fotointerpretação, correlação de dados de diferentes áreas e integração dos mesmos. Em relação ao SIG, a solução adotada foi a plataforma ArcGIS, desenvolvida pela ESRI, quase que um padrão para geração de informações na pesquisa geológica. Para apoiar as atividades de campo, neste novo contexto de utilização ampla de soluções digitais, a opção foi pelo *software* SIGMA Mobile, que é um aplicativo desenvolvido pelo BGS, através do conceito SIGMA. Desde sua concepção, como observado em SCHEIB (2005) foi idealizado como uma plataforma digital de coleta de dados em campo, através de equipamentos móveis, o que faz dele uma ferramenta muito adequada às operações de campo, especificamente voltadas para o mapeamento geológico.

Outro ponto de destaque, relacionado a necessidade de criação de representação 3D, seria a alocação de um *software* de modelamento, nas etapas do mapeamento geológico. A metodologia usual, consiste na

representação de um modelo geológico, a partir do mapa geológico final e associado a outros de dados de aferição, no caso furos de sondagem, o que estaria fora do cronograma de atividade de campo. Para tanto observou-se a necessidade de utilizar um *software* que promovesse agilidade no modelamento geológico, neste caso a modelagem implícita, dinamiza este processo, e o programa Leapfrog, é o sistema que melhor representa a necessidade deste novo processo, como tratado em COWAN *et al.*, (2004).

Esta solução metodológica foi estruturada de forma que permitisse uma avaliação mais precisa dos aprimoramentos possíveis, e se iniciaram pela divisão dos serviços em três etapas, que seguem uma ordem cronológica típica da atividade de mapeamento geológico.

3.1 Pré-Campo

Nesta etapa inicial, ocorre o planejamento e a interpretação da área de mapeamento definida. É montado um banco de dados SIG (*shapes*, imagens de alta resolução, mapas geológicos, modelo digital de terreno). Estes dados devem ser integrados no ambiente de Realidade Virtual através do *software* GeoVisionary, onde são analisados com técnicas de fotointerpretação e análise multidisciplinar de dados, para identificação de características geológicas e para estabelecimento das estratégias e atividades que nortearão as campanhas de campo (Figura 03). Os resultados destas análises (*shapes*, descrições e etc.) são exportados para uma plataforma de aquisição de dados em campo, constituída por um *toughbook*, processando o

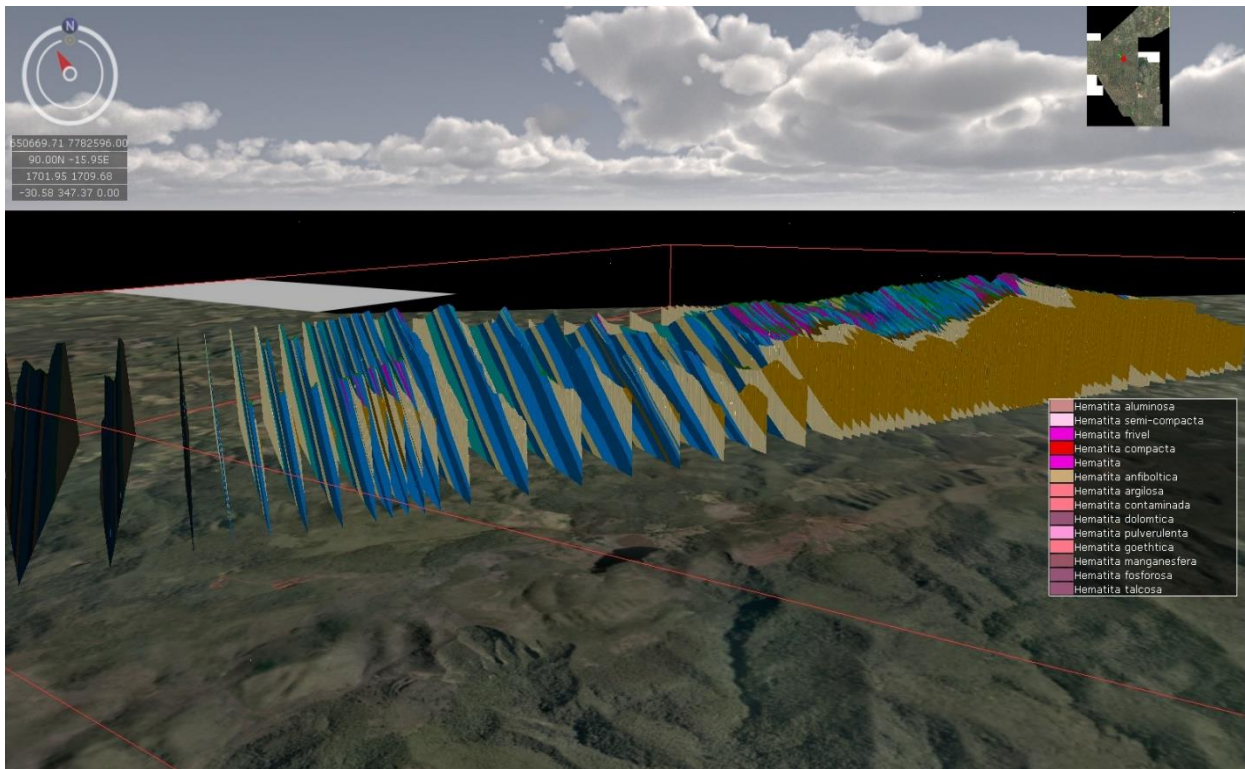


Fig. 03 – Ambiente de realidade virtual, mostrando a integração de dados de seções geológicas com modelo geofísico, integrados no *software* GeoVisionary.

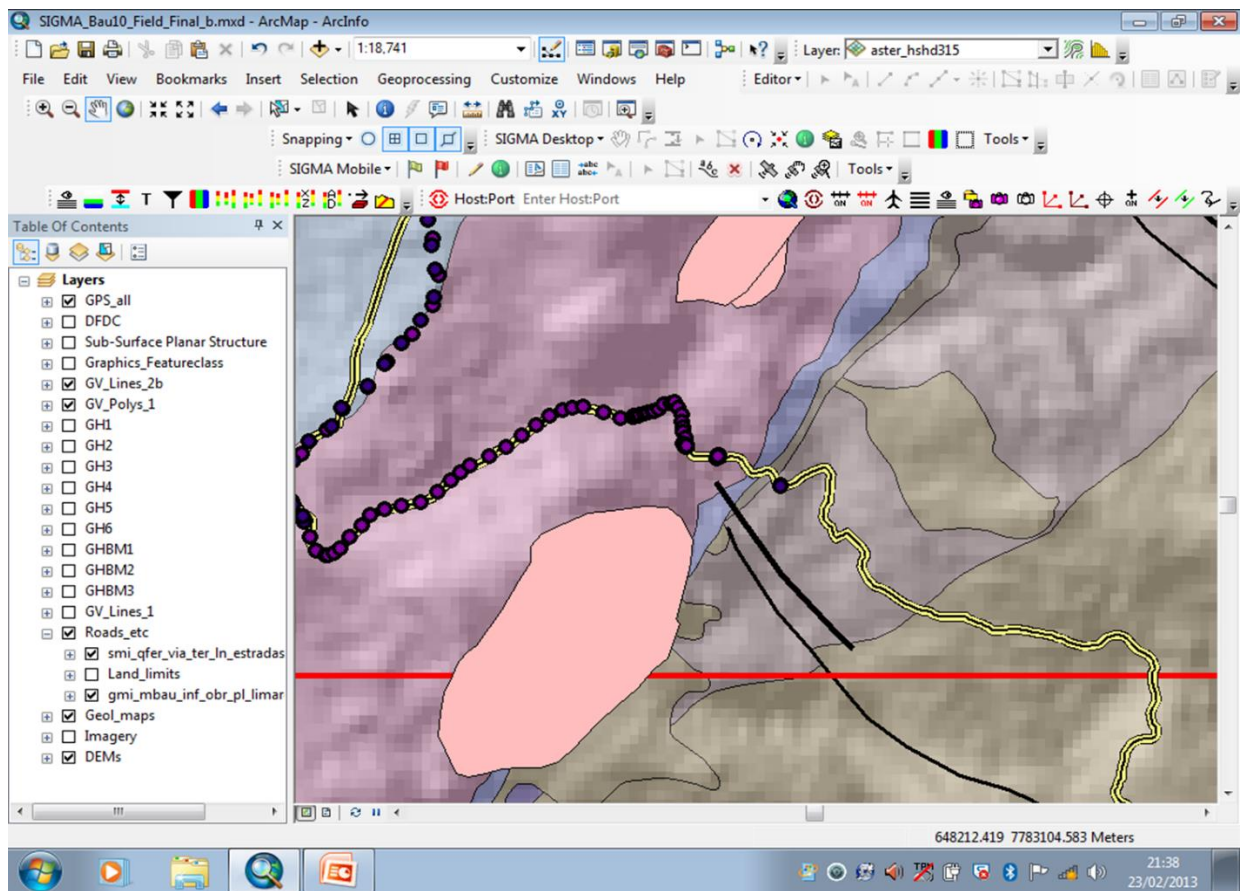


Fig.04 – Dados interpretados em ambiente de realidade virtual e exportados para o *thoughtbook*, para serem utilizados na etapa de campo; nota-se as linhas ponteadas demonstrando o caminho percorrido pelo geólogo de campo, a partir do GPS integrado ao dispositivo móvel.

software ArcGIS juntamente com o aplicativo SIGMA Mobile, observado em CALAZANS *et al.* (2016), este dispositivo apresenta um GPS integrado como apresentado na Figura 04. Nesta etapa, é gerado um modelo geológico 3D (no *software* Leapfrog) a partir de um banco de dados regional ou local. Este modelo será a base geológica tridimensional, para aferição e acurácia da foto interpretação e planejamento de campo. A importância desta etapa pode ser aferida pelo que estabelece por WESTHEAD *et al.* (2013), ao reportar que a interpretação prévia no ambiente de RV permite aos geólogos a execução de levantamento virtual prévio, antes de efetivamente iniciar o levantamento real. Isso permite aos geólogos a construção preliminar de certo conhecimento do terreno e de seus aspectos geológicos mais aparentes, devido ao poder de simular em ambiente RV, a realidade do campo, estabelecendo projeções de perfis, áreas de interesse, assim como possíveis afloramentos, tudo isso com mais exatidão, seja em conhecimento geológico até em relação a topografia do terreno. Estas premissas trazem mais confiança ao geólogo de campo, já que o conhecimento sobre a área de estudo, mesmo eu virtual, não deixa de corroborar com a realidade do campo, WHITMEYER & DE PAOR 2014).

3.2 Campo

No campo, a premissa mais importante considera que o profissional envolvido detém uma base de dados consistente para execução dos trabalhos e toda pré-interpretação efetuada na etapa anterior. Esta base de dados se encontra na plataforma ArcGIS, em um computador portátil (*thoughtbook*) com câmera e receptor GPS integrados (Figura 05).

A aquisição de dados (pontos de descrição e interpretações) ocorre através do aplicativo SIGMA Mobile, que funciona como uma caderneta digital de campo, possibilitando o armazenamento de informações geológicas de forma organizada e precisa. Com a integração do SIGMA Mobile ao ambiente ArcGIS, torna-se possível a visualização em tempo real da localização na área de estudo, bem como a

consulta e interpretação de informações digitais diversas, a qualquer instante em que elas se façam necessárias. Os produtos desta etapa seriam pontos geológicos organizados em uma estrutura de dados, *shapes* de interpretação e fotografias/imagens interpretadas, bem como mapas e relatórios de campo confeccionados durante o trabalho.



Fig. 05 – Thoughtbooks, para mapeamento digital, com sistema SIG (ArcGIS e SIGMA Mobile).

Para o desenvolvimento metodológico desta etapa, WESTHEAD *et al.* (2013) observam que os progressos na visualização de geoinformações em dispositivos portáteis, do tipo *tablets/toughbooks*, pode ensejar progressos, por conta das possibilidades criadas para coleta e análise de dados em campo. É ainda perceptível a possibilidade de tratamento e intercâmbio de informações pelos profissionais envolvidos, de forma organizada e objetiva, permitindo a discussão de perspectivas individuais para o trato coletivo do conhecimento das análises em campo. Com a utilização de uma plataforma digital no caso o aplicativo SIGMA Mobile conectado ao ArcGIS, a geovisualização dos dados em campo tem uma nova transformação, já que o profissional pode acessar uma gama de dados, de forma precisa, aprimorando a análise geológica em campo. A produção de dados de forma organizada possibilita a criação de um banco de dados adaptado a diferentes plataformas de armazenamento e tratamento, ampliando a confiança na aquisição e interpretação e posteriormente discussão das informações. Estas premissas foram facilitadas principalmente pela integração SIG/GPS, em um dispositivo móvel, e como reportado por ARRUDA

JUNIOR *et al.* (2011), traz uma economia temporal e consequentemente financeira. A navegação precisa em cima dos dados (mapas e fotointerpretação), traz acurácia na aquisição de dados e confiabilidade ao executor da atividade, quanto a tomada de decisão em campo, seja os melhores pontos de interesse, assim como as melhores direções a serem seguidas.

As motivações para o estabelecimento de inúmeras tentativas de aprimoramentos nos serviços de campo vieram ainda de outras referências, também reportadas por WHITMEYER (2010), dando conta de que muitos avanços nos estudos de campo para o mapeamento geológico têm sido estabelecidos por programas de pesquisa interessados no desenvolvimento de novas tecnologias (KNOOP & VAN DER PLUIJIM 2006; WHITMEYER *et al.*, 2009, ARRUDA JUNIOR *et al.*, 2011). Mesmo, que a experimentação conduzida por alguns autores tem trazido bons desenvolvimentos e mostrado o potencial de aplicação destas novas tecnologias nos estudos de campo (Kramer, 2000; McCaffrey *et al.*, 2005), estas experimentações necessitam de mais estudos práticos, como descritos por CALAZANS *et al.* (2016).

3.3 Pós-Campo

Após os trabalhos de campo, prevê-se uma reorganização dos dados, de modo que os mesmos possam ser integrados em uma plataforma 3D, no caso específico aqui tratado o *software* GeoVisionary, em ambiente de realidade virtual, antes de serem armazenados no banco de dados do projeto. Os dados produzidos construiriam uma plataforma, de modo que possam ser consultados e reutilizados em campanhas de campo posteriores. A associação entre SIG e RV se faz mais intensa nesta fase, aprimorando esta etapa, no que se aproxima da revolução na visualização de dados e informações geográficas, como estabeleceu WESTHEAD (2013), pelo fato do GeoVisionary permitir a geovisualização integrada de *terabytes* de dados, de mapeamentos geológicos digitais, de ortoimagens de alta resolução, croquis de campo (*field-slips*), mapas topográficos

antigos, superfície de modelagem topográfica em 3D, modelos geológicos de subsuperfície, seções transversais de investigações de campo e perfis de furos de sondagem geológica, dentre outros dados (NAPIER, 2011). No caso a aferição de resultados em subsuperfície será relacionada ao modelo geológico 3D (Leapfrog), em comparação com os resultados de campo, gerando um novo modelo 3D. Ou seja os produtos de campo, não seriam mais apenas, uma representação 2D (mapa geológico) e sim organizados em 3D, através da criação de um modelo implícito no *software* Leapfrog.

Neste contexto, a integração entre os ambientes de SIG e RV estabelece-se pela interface muito funcional entre o ArcGIS e o GeoVisionary, que instrumentaliza o ambiente de RV. Ressalta-se que os modelos gerados pelo *software* Leapfrog, podem ser facilmente integrados no GeoVisionary. Este sistema potencializa e mesmo estimula a exploração dos diversos cenários de integração de dados e informações possíveis (Figura 06 e 07). As possibilidades imensas de articulação de cenários em 3D, com a possibilidade de variação criativa da perspectiva de visualização dos dados, motivam a reflexão e a descoberta científicas, permitindo, inclusive que sejam melhores exploradas e postas à prova as modelagens geológicas anteriores aos serviços de campo, que agora podem ser aprimoradas ou readequadas, em função dos estudos *in loco*. Como bem observa WESTHEAD (2013), a perspectiva 3D dos dados de subsuperfície apura a análise e viabiliza percepções acerca das evidências geométricas que caracterizam a geomorfologia da Terra, aprimorando a interpretação de elementos estruturais como falhas, dobras e da reconstrução dos ambientes passados de formação da geologia atual (TERRINGTON *et al.* 2015). A estratégia geral que instruiu a elaboração da metodologia pode ser sinteticamente observada na figura 08, proposta pelo BGS, na integração de diferentes *softwares*, para as etapas de pré-campo, campo e pós-campo, com inclusão da modelagem implícita, a representação de produtos em 3D, relacionados ao mapeamento geológico.

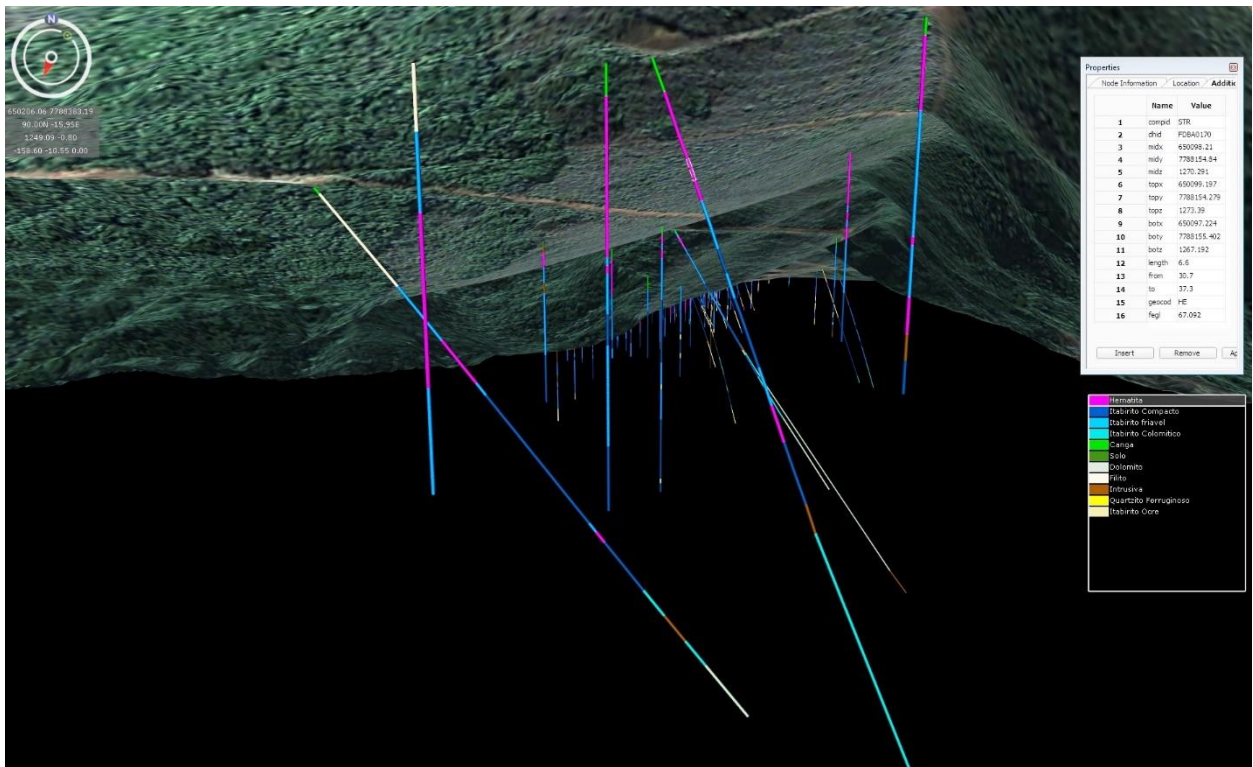


Fig.06 – Perspectiva em subsuperfície dos furos de sonda, etapa de pós-campo, em ambiente de realidade virtual, no *software* GeoVisionary.

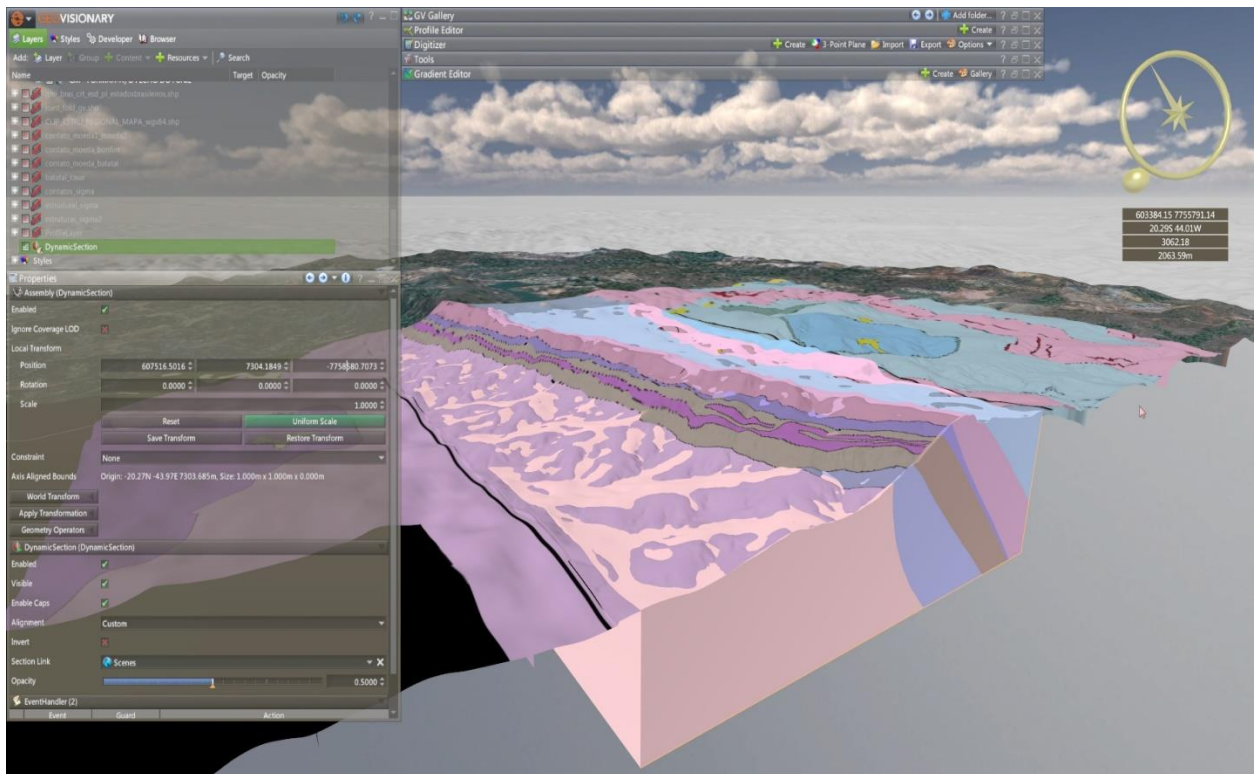


Fig.07 – Cruzamento de modelo geológico implícito com mapa geológico de campo, etapa de pós-campo, em ambiente de realidade virtual, no *software* GeoVisionary.

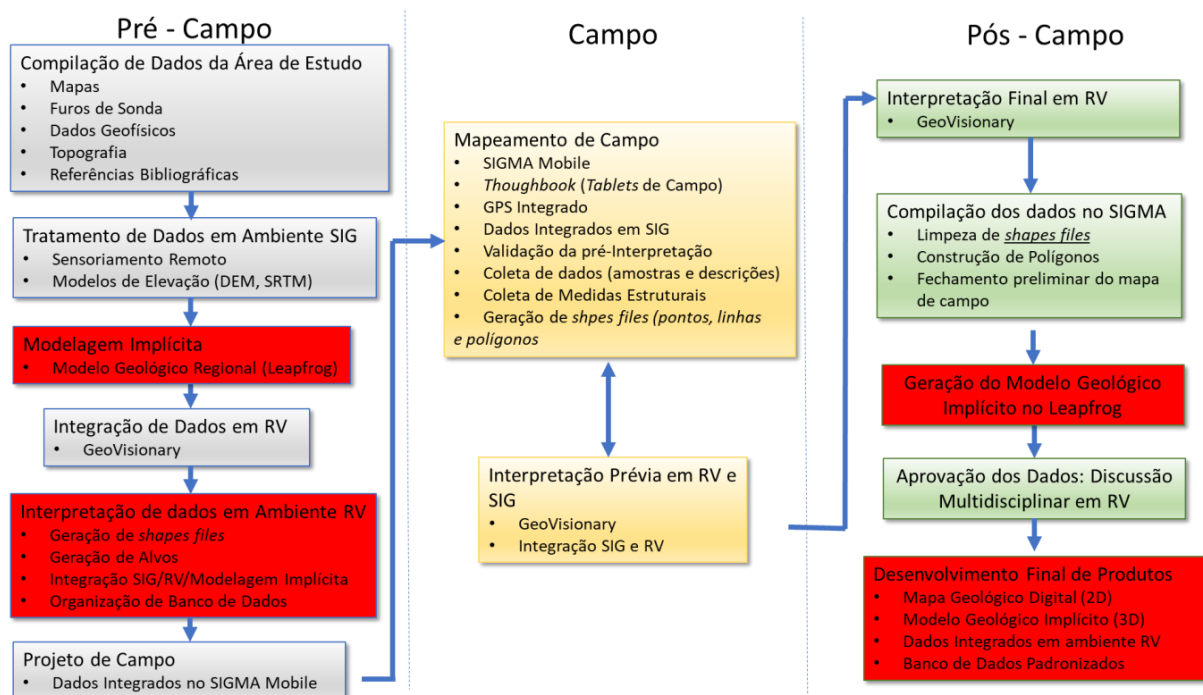


Fig. 08 – A estratégia geral da metodologia, proposta pelo BGS, modificada (em vermelho), com a inclusão da modelagem implícita através do *software* Leapfrog, nas etapas de Pré-Campo e Pós-Campo. Fonte: Arquivos internos cedidos pelo BGS.

4.DISCUSSÃO

Os estudos metodológicos aqui reportados, demonstram que no contexto atual do mapeamento geológico, existe uma demanda crescente por melhorar e quantificar os dados de campo de forma precisa e em outras perspectivas de visualização. Cada vez mais, a precisão desta apuração impacta e se torna importante, não apenas para a apreciação do valor dos ativos das empresas e de dados de pesquisa, mas também para uma maior eficiência dos processos extrativos e divulgação de resultados, em face dos custos crescentes e da automação destes processos relacionados a pesquisa geológica.

Nas transformações aportadas pelas novas geotecnologias, em relação à produção de dados, se destacam os sensores remotos de diversos tipos, tais como os de aerogeofísica, os imageadores de altíssima resolução e os sensores ativos de varredura laser, que geram modelos tridimensionais. Não menos importante, entretanto, são os ambientes de integração de dados e produção de análises e informações caracterizadas pelos SIG e RV, que se constituem num dos principais vetores de transformação tecnológica. A integração total de dados nos ambientes SIG ensejou

ainda a unificação dos sistemas de georreferenciamento e a crescente preocupação com a qualidade (exatidão) dos dados.

Pode-se observar que a quantidade de geodados descritivos disponíveis acerca dos objetos de conhecimento ampliou-se bastante nos últimos tempos, aprimorando muito a base sobre a qual o geólogo pode operar. Um dos aspectos mais interessantes desta percepção das geotecnologias dá conta da possibilidade de representação da dinâmica dos fenômenos. Estas mudanças paradigmáticas muito importantes se associam sinais de outra mudança. Trata-se da possibilidade de o usuário movimentar o ponto de vista a partir do qual ele observa, num processo similar à situação em que o observador se posiciona em frente a uma maquete tridimensional concreta. Se a isto se associam dados temporais, serão criadas as condições para se tratar as questões numa perspectiva quadridimensional, compondo espaço e tempo (TERRINGTON *et al.* 2015).

A estas considerações conceituais, associam-se aspectos de poder representacional trazidos pelas geotecnologias, que se articulam às questões da prática analítica da Geologia, para destacar quatro

questões importantes à constituição das bases de dados, do ponto de vista da Geovisualização, ou seja na relação da visualização e integração de informações (MENEGUETTI, 2013).

A primeira questão trata da representação do território, importante às associações que fazem as análises geológicas entre os fenômenos em estudo e as evidências delas deixadas à mostra no terreno. Há aqui uma ênfase na solução imagética de alta resolução, tanto a produzida através de plataformas satelitais, quanto a produzida por sensores aerotransportados.

A segunda reporta-se ao modelo tridimensional do terreno, que é base para todo o georreferenciamento, em especial à superfície, dos dados de outros levantamentos importantes à caracterização do fenômeno geológico. Esse é o caso das investigações geológico-geotécnicas e geofísicas. Há aqui uma ênfase nas soluções de sensoriamento ativo.

Estas duas questões reportadas, até a pouco tempo se embasavam inicialmente em análises de mapas em meio físico, sobrepostos em mesas de luz para as avaliações correlativas, e na fotointerpretação geológico-estrutural, através de pares estereoscópicos de fotografias, atividades que hoje em dia são feitas de forma mais eficaz, com base no emprego amplo das modernas tecnologias, relacionados aos ambientes SIG e RV. Agregado a isso, os modernos equipamentos móveis (*thoughtbooks* e *tablets* de campo) hoje disponíveis, permitem levar todas essas informações aos estudos de campo, com poderes de avaliação e revisão imediatos, inclusive acessando remotamente a base de dados do escritório (WHITMEYER *et al.* 2010). No passado, essa atividade somente era possível após o retorno ao escritório dos mapas e cadernetas em papel contendo as anotações verificadas em campo. Acresce-se a isso o fato importante de que os SIG associados a estes dispositivos possibilitam uma integração total de dados diversos, que tornam as análises de mais precisas e dinâmicas, conforme observado por ATHEY *et al.* (2008).

Para além da questão da importância da geovisualização 3D para a Geologia, deve-se destacar que a camada superficial da Terra é

a georreferência para a ancoragem de todos os tipos de levantamentos subterrâneos, desde investigações geológico-geotécnicas até diversas formas de sensoriamento remoto geofísico. Neste contexto, um desenvolvimento geotecnológico que permita a geração de modelos digitais de terreno mais precisos, mais representativos da real conformação da superfície, melhora a qualidade da representação dos levantamentos subterrâneos. Na evidência disso se pode recorrer a BRAGA *et al.* (2010), quando ele estabelece que, em aerolevantamentos geofísicos, os cálculos para remover o efeito do terreno demandam uma modelagem precisa da superfície topográfica local. O autor estabelece ainda que a comparação entre processamentos de dados geofísicos feitos com base em modelos digitais detalhados, obtidos através de perfilamento laser, e processamentos feitos com base em modelos mais generalizados, como o SRTM, evidenciaram a importância de um MDT preciso e representativo, no processo de correção dos dados de aerogradiometria gravimétrica 3D-FTG (*Full Tensor Gradiometry*).

Esta associação da modelagem de terreno com base no laser e a do processamento de dados de aerogeofísica enfatiza outro aspecto importante da evolução das geotecnologias, isto é a interação entre dados multidisciplinares nos meios geoinformacionais. No caso da constituição da base de dados geográficos para apoio às atividades geológicas identifica-se uma crescente opção pela representação tridimensional. A adoção desta solução foi orientada pela convicção de que a precisão dos dados de modelagem tridimensional do terreno, como identificada por BRAGA *et al.* (2010), traria ganhos expressivos para os levantamentos geofísicos e geológicos, que utilizam este modelo como referência. Esta solução viabiliza que, em sistemas computacionais especialistas, se faça de forma muito mais rica a geração de blocos-diagrama virtuais, modelos tridimensionais e dinâmicos, muito mais substanciais e poderosos do que seus antecessores históricos.

A terceira questão está conectada aos *softwares* relacionados ao mapeamento geológico (SIG, RV), convém uma referência

a LONGLEY *et al.* (2001), que já haviam destacado que os ambientes digitais de representação da geoinformação melhoraram a interpretação de informações que, nas bases convencionais dos mapas, eram impraticáveis. Operar atividades de interpretação como extrair medidas, superpor, combinar e comparar mapas e fazer variar a escala, dentre outras ações, eram tarefas cuja execução era muito trabalhosa no mapa convencional, exigindo até certa habilidade ou experiência prévia para seu desempenho. Nesta mesma argumentação, BONHAM-CARTER (1994) chama a atenção para o fato de que os SIG têm o potencial de liberar seus usuários de atividades técnicas, lentas e trabalhosas de manipulação de dados, deixando mais tempo para as criativas análises e interpretações das informações.

Os sistemas SIG e RV, aplicados a Geologia, neste caso, destacam-se pelo grande poder integrador e analítico que disponibilizaram ao trabalho cotidiano da análise, planejamento, modelagem, etc. No caso específico da modelagem geológica para melhor entendimento da subsuperfície, estimativa de corpos de minério, a integração e a análise de dados de diversas origens em ambientes geoinformacionais, com visualização mais sofisticada. Diversas são as indicações de que este processo de potencialização à análise e à exploração mineral encontra um reconhecimento científico e tecnológico. Como observado em WESTHEAD *et al.* (2012), WHITMEYER *et al.* (2010) e TERRINGTON *et al.* (2015), existe uma crescente demanda pela qualidade das representações, orientada pela necessidade de melhor detalhar e embasar as análises, para otimizar e tornar mais preciso o mapeamento geológico e a pesquisa mineral.

A possibilidade de análise das informações em ambiente RV enriquece-se ainda mais, porque a capacidade de articulação e composição dos dados apresentados nos SIG, inclusive pela inter-relação entre diferentes tipos de imagens e dados, é muito maior do que aquela em plataforma 2D.

A quarta questão está relacionada com a apresentação dos dados da atividade de mapeamento geológico, geralmente condicionada a mapas e perfis (seções geológicas), em representação 2D. Com o

crescente desenvolvimento de *softwares* de modelagem e ambiente RV, para apresentação e integração de dados, observa-se a necessidade de adequação dos produtos gerados em campo (mapas e perfis) à nova perspectiva das geotecnologias. A modelagem geológica está amplamente divulgada na indústria mineral, mas com intuito de aferição de teores e volumes dos corpos minerais, e não a representação do ambiente geológico. A metodologia mais comum para a modelagem é a explícita, que ocorre por digitação de contatos e construção de corpos de forma manual (COWAN *et al.* 2003), ou seja, na triangulação de objetos para representação da geometria do corpo, também conhecido como o “método das seções”. Este método demanda tempo, e conforme discussões propostas por COWAN *et al.* 2003 e 2004), apresenta imprecisões, e dependente de outras informações de subsuperfície tais como testemunhos de sondagem. Os mesmos autores apresentam a modelagem implícita como um meio de diminuir a imprecisão e tempo, na modelagem geológica. Tratando-se de um mapa geológico, e na preposição proposta aqui neste trabalho, esta metodologia de modelagem implícita traria benefícios para a de geovisualização de dados geológicos de campo. Ou seja, os modelos geológicos 3D podem ser criados a partir de mapas geológicos, de forma rápida e precisa, contanto que os dados de campo tenham a mesma qualidade e sejam organizados em plataforma digital acessível ao *software* de modelagem (COWAN *et al.* 2004). A transformação metodológica nesta questão está ligada ao fato de uma nova perspectiva na representação dos dados de campo, passando da forma 2D para uma forma 3D, mais rica em detalhes e ampliando a geovisualização dos dados. Este aprimoramento estaria relacionado nas etapas de pré-campo, com a construção de um modelo geológico implícito a partir do mapa geológico regional, contribuindo para uma visão 3D pelo geólogo de campo em sua preparação para o mapeamento. Na etapa de pós-campo, onde são criados os produtos do mapeamento geológico, resultaria também na forma de um bloco diagrama tridimensional (modelo geológico).

A metodologia do BGS, incorpora muitas dessas discussões, entretanto sem

apresentar a modelagem implícita como um fator no mapeamento geológico e pesquisas associadas (Figura 08).

O crescimento constante da base de dados juntamente com o avanço das geotecnologias, impõe como necessárias especificações metodológicas para organização e normatização de dados para o ambiente SIG/RV. Ou seja, a organização do banco de dados e das geoinformações devem possuir regras para controle de inserção, modificação e criação, CALAZANS (2015). Como observado por essa autora, essa normatização se mostra cada vez mais necessária, na medida em que a crescente adição e demanda de dados se torna mais complexa, para estruturação, tratamento e produção de geoinformações. A integração de dados em ambiente RV depende desta organização; um exemplo seria a unificação de referenciais geodésicos, sistema de coordenadas geográficas. Estes diferentes ambientes de geovizualização podem causar distorção e incongruências nos dados, tornando assim uma normatização de informações essencial.

CALAZANS (2015), discute que os ambientes de geovizualização estão em franco desenvolvimento, e deixa evidente a importância estratégica da associação SIG/RV. A autora propõe comparações da metodologia usual com a nova metodologia em desenvolvimento, sinalizando que os processos relacionados ao mapeamento geológico, poderão ter mudanças significativas. Esses pontos críticos foram sintetizados em uma tabela (Tabela 01), com os possíveis aprimoramentos da utilização de novas técnicas. A mesma autora, em outro trabalho (CALAZANS *et al.* 2016), sinaliza que a metodologia necessita de adequações, e continua em progresso, com o surgimento de novas geotecnologias. Este ponto é abordado aqui e representado na Tabela 01, com a introdução da modelagem implícita nas etapas de pré-campo e pós-campo.

A análise comparativa das metodologias, sinaliza que está em curso uma

mudança de paradigma em relação ao trabalho de análise geológica, de ambientes 2D para o 3D. Os ambientes futuros de trabalho poderão ser bem diferentes dos de hoje, permitindo ao usuário ter uma maior perspectiva e precisão nas análises geológicas nas etapas de mapeamento, permitindo a otimização e eficácia dos resultados, viabilizando a redução de tempo com e o planejamento mais preciso das atividades de campo. Da perspectiva da interatividade, parece sensato considerar que a representação pode melhorar a intermediação deste com o fenômeno estudado, e que assim, a transformação das representações 2D (estáticas) e estáticas em 3D (dinâmicas) levaria à percepção do usuário sobre a realidade prevista em campo. Não se trata de uma visão de tirar o geólogo do campo; não é este o objetivo. Trata-se, sim, de prolongar pela representação em realidade virtual a sua experiência de campo.

Em termos do mapeamento geológico, seria, natural que os dados fossem representados em 3D, o que não é, entretanto, uma prática comum. Neste sentido, o foco dos desenvolvimentos em curso na geovisualização de dados geológicos está orientado em disseminar o uso dos ambientes tridimensionais. É importante considerar, também, que tanto para a mineração como para questões ambientais o tempo é um condicionante essencial, e pode facilmente ser necessário implementar o 4D, ou seja, incorporar a quarta dimensão, o tempo, às discussões da representação de dados geográficos no contexto geológico, como observado por CALAZANS (2015). O tempo é uma variável importante no planejamento do mapeamento, e dados cada vez mais complexos e de qualidade são necessários para a análise temporal. A demanda crescente por imagens em alta e altíssima resolução, coletadas em diversas épocas, formando uma série temporal de imagens, parece ser um sinal claro desta valorização da relação espaço – tempo no contexto da análise e do planejamento (BÜCHI *et al.* 2006).

TABELA 01 – Comparação dos métodos; tradicional, usualmente praticado, e a nova metodologia baseada nas tendências relacionadas a geotecnologia, com a adoção da modelagem implícita nas etapas de pré-campo e pós-campo (destacada em vermelho). Na coluna “Aprimoramentos”, está descrita uma sintetização dos resultados sobre a adoção de novas

técnicas de geovisualização e ferramentas associadas as novas geotecnologias. Modificado de CALAZANS (2015).

Etapa	Metodologia Tradicional	Metodologia Proposta	Aprimoramentos
PRÉ-CAMPO			
Identificação de Área de Pesquisa	Salas de reuniões e mapas (2D) eram utilizados para definição das áreas prioritárias de pesquisa	Salas ou computadores com visualização de dados integrados em ambiente RV (3D),	Fácil visualização das áreas focos de pesquisa e participação de equipe multidisciplinar
Preparação dos Dados	Dados preparados para ambiente 2D e impressos	Dados preparados e normalizados para utilização em ambiente 3D e 2D	Utilização de um banco de dados normalizados para utilização em múltiplos ambientes 2D(ARCGIS) e 3D (Geovisionary) e exportação dinâmica para o software de campo (SIGMA Mobile)
Modelamento Geológico Prévio	Não existe	Preparação de um modelo geológico regional implícito, a partir de dados da bibliografia e acervo interno	Aumento da percepção do espaço e ambiente geológico, com a perspectiva 3D
Integração de Dados	Integração parcial em ambiente ARCGIS	Integrados em ambiente RV (3D)	Visualização de uma enorme gama de dados em altíssima resolução
Interpretação de Dados	Ambiente 2D, sem fotointerpretação	Interpretação em ambiente RV(3D) com dados multidisciplinares integrados. Fotointerpretação de imagens e dados multidisciplinares, geração de dados e exportação direta para o SIGMA Mobile.	Participação de equipe multidisciplinar, fotointerpretação de altíssima qualidade gráfica. Dados interpretados gerados de forma eficiente e de fácil manipulação, com exportação dinâmica para o software de campo.
CAMPO			
Material de Campo	Caderneta, Bussola, Martelo, câmera fotográfica, GPS, mapas impressos em alguns casos ocorre a utilização do ARCPAD e Laptop.	Martelo, Bússola e tablet.	Menor gama de equipamentos, facilitando a condução dos trabalhos de campo de forma dinâmica e eficiente. Possibilidade de não utilização de mapas impressos.
Visualização dos Dados	Mapas Topográficos, Geológicos, Imagens Aeras ou Satélites, impressos em papel de tamanho variável	No tablet, mapas multidisciplinares e imagens integrados	Dados multidisciplinares integrados prontos para consulta em campo, facilitando a interpretação e discussão na condução dos trabalhos.
Aquisição dos Dados	Anotação em caderneta ou arcpad, marcação de pontos em GPS, utilização de câmera fotográfica para registro de imagem do ponto.	No tablet, o mesmo possui planilha de dados para registro de pontos topológicos, geológicos, estruturais, câmera integrada com possibilidade de interpretação gráfica da imagem, GPS integrado com visualização em tempo real nas imagens e mapas	Rapidez e eficiência na aquisição de dados, diminuição do erro devido a integração GPS/Tablet/Mapa. O mapa é gerado em campo, juntamente com outras interpretações.
Trabalho em escritório (Durante a Campanha de Campo)	Em laptop, download dos dados do GPS, fotos da câmera, digitação das anotações da caderneta de campo. Integração dos dados baixados e anotados, e interpretação dos registros de campo no computador.	Os dados de campo são revisados no próprio tablet, as interpretações de campo, ocorrem durante esta atividade. Os pontos podem ser exportados em planilhas e diretamente utilizados para criação de stereogramas. Relatórios de campo podem ser gerados com apenas um click (automático), resultando em um documento com planilhas, fotos, descrição e etc.	Revisão e correção dos dados de campo no mesmo software e hardware de trabalho. Aquisição de dados digitais em ambiente integrados (GPS/GIS/Câmera) evita erro de digitação, e garante ganho de tempo e eficiência/qualidade na geração de resultados.
PÓS - CAMPO			
Visualização de Resultados	Os resultados do campo são impressos em mapas (2D), relatórios e planilhas.	Os resultados de campo são visualizados em ambiente 3D, com integração dos mesmos	Participação de equipe multidisciplinar, fácil visualização e manipulação dos dados totalmente integrados
Modelamento Geológico Final	Não existe	Execução de um modelo geológico da área mapeada, a partir de dados de campo	Apresentação dos resultados de campo em 3D, saindo do convencional, apenas mapas e perfis em perspectiva 2D
Discussão de Resultados	Discussão em salas de reuniões e possíveis alterações a mão, para serem revisadas posteriormente.	Em ambiente 3D, com dados integrados de fácil visualização de uma equipe multidisciplinar.	Discussão mais sólidas e ricas de informação devido a integração dos dados de campo e utilização do ambiente RV.

Ainda com base no uso futuro previsto dos ambientes de RV, vale trazer à discussão questões como a importância destes ambientes na avaliação de impactos e desdobramentos das intervenções ambientais projetadas, que devem se tornar cada vez mais realistas, permitindo a idealização de empreendimentos mais sustentáveis; e ainda, melhorias das análises de riscos, planos de ação de segurança e estudos geológicos e ambientais, dentre outros, que sinalizam tornar-se mais efetivos, inclusive pelo maior compartilhamento interdisciplinar de conhecimento.

Há, portanto, diversas transformações em curso na relação entre a geologia e as representações geoinformacionais. A própria geologia, nas expectativas em relação às análises e na evolução natural de seu conhecimento específico vive um novo tempo. Parece pertinente observar, neste contexto, que as representações gráficas que são importantes como geoinformações à geologia “revelam mais do que feições geológicas, elas são produtos de uma circunstância histórica, portanto são imagens tanto do estado da arte da geologia como da própria cartografia geológica” (MACHADO *et al.* 2010). Neste sentido observa-se uma construção conceitual da Geologia.

WESTHEAD *et al.* (2013) sintetiza bem as mudanças em curso na análise geológica, ao observar que, no futuro, provavelmente não muito distante, os analistas serão capazes de fatiar um modelo geológico, não apenas para gerar um mapa da geologia de superfície, mas sim para caracterizar modelos em qualquer profundidade especificada, até quilômetros abaixo da superfície, conforme a demanda de seu interesse.

Com relação às questões mais específicas aqui apresentadas, vale destacar para desenvolvimentos futuros, os seguintes aspectos a considerar:

- A decisão pela escolha dos *softwares* envolvidos é estratégica, por conta do importante papel de sistema operacional que eles cumprem em todas as fases do trabalho, do pré-campo ao pós-campo. SIGMA Mobile, ArcGIS, GeoVisionary e Leapfrog foram os que mais se destacaram na proposta de desenvolvimento;

- O investimento na interpretação de dados antes, durante e após os trabalhos de campo não apenas amplia a qualidade das

análises, como também leva a uma tendência pela melhor qualidade das atividades de campo, maximizando o tempo destas inspeções *in loco* e evitando as revisitas para esclarecimento de dúvidas;

- As possibilidades crescentes de aquisição e articulação de grandes quantidades de dados e de produção de informações pressupõe uma padronização destes dados e informações. A natureza dinâmica da base de dados impõe como necessária uma gestão que a mantenha estruturada e eficiente;

- As geotecnologias estão em desenvolvimento acelerado, o que gera a necessidade de estar sempre atento as inovações relacionadas a geociências;

- A complexidade das transformações é bastante grande, e neste sentido, as parcerias com outras instituições, acadêmicas e da indústria, são muito importantes à manutenção de um ritmo significativo de evolução.

- Não se deve perder de vista que as mudanças metodológicas na exploração mineral e mapeamento geológico implicam em certa mudança cultural nos ambientes de trabalho tradicionais da exploração mineral. Programas de treinamento, divulgação e conscientização acerca das novas tecnologias são muito importantes à superação das resistências naturais às mudanças operacionais.

.5. CONCLUSÕES

As discussões e análises aqui reportadas, demonstram que as geotecnologias, atreladas a geovizualização, conduzem a melhorias significativas nos processos associados a exploração mineral, em especial pela utilização de ambiente SIG e RV. As melhorias metodológicas destacadas, são relevantes e perfeitamente aplicáveis. Uma das etapas mais importantes do trabalho de pesquisa geológica, que são as investigações de campo, é otimizada pelas mudanças previstas na interpretação, aquisição e representação de dados.

A aplicação destes aperfeiçoamentos metodológicos na pesquisa geológica vem sendo testada em trabalhos pontuais e periódicos, principalmente no exterior, sendo de extrema necessidade aplicação destes novos métodos no país.

As atividades de mapeamento geológico e exploração mineral têm se tornado complexas nestes ambientes geotecnológicos. Isso parece reafirmar a mudança de paradigma de 2D para 3D e 4D nas geoinformações como um todo e nas análises geológicas em geral, reforçando a importância de preparar as equipes de trabalho para mudanças futuras de seus ambientes de análise, estudos, projetos e tomadas de decisão, principalmente pela associação entre o SIG e RV. Além disso, as atividades relacionadas a exploração mineral estão lidando cada vez mais com restrições ambientais, fato que gera demanda crescente por representações mais ricas e sofisticadas do seu território de intervenção. Investimentos em ambientes sofisticados de geovisualização deverão criar condições para melhorar as análises, em termos de precisão, e tornar os planos de ação e a implantação de projetos cada vez mais bem ajustados à realidade no terreno

Esta mudança de paradigma (2D a 3D) não é, no entanto, uma coisa simples. Há uma série de desafios a considerar, nos aspectos tecnológico, cultural, operacional, financeiro e outros. A maneira para ir à busca das soluções possíveis e dos caminhos de especificação de processos parece ser o da experimentação tão extensa quanto possível, a fim de identificar o contexto mais adequado de trabalho para estas novas realidades. Entretanto, como observado por WHITMEYER *et al.* (2009), existem desvantagens para o mapeamento digital e os métodos de apresentação de mapas geológicos aqui discutidos. Com o desenvolvimento rápido das geotecnologias, é necessário tempo para que o usuário se sinta confortável com os novos *hardwares* e *softwares* das etapas da pesquisa mineral, sendo necessário *backups* contínuos dos dados coletados e por sinal até cópias impressas dos resultados. A falta de padronização e normatização de dados impede a transferência rápida entre os ambientes de geovisualização. A solução seria criar processos integradores, ou até scripts mais atualizados, para cumprir com essa demanda.

Os dispositivos móveis de campo, além do alto custo do equipamento, não apresentam ainda duração de bateria suficiente para um dia completo de trabalho, sendo necessário ter sempre uma reserva para os trabalhos de campo. Os *softwares* relacionados

a RV, ainda são dispendiosos em termos financeiros, assim como os *hardwares* e equipamentos atrelados (monitores 3D, projetores 3D, mouses 3D). Entretanto os métodos aqui apresentados não são mais um luxo, e sim constituem uma ferramenta necessária para o contínuo desenvolvimento da geovisualização aplicada a geologia.

Este trabalho teve a intenção de contribuir para uma melhor compreensão da relação entre as análises geológicas e as geotecnologias que as apoiam. Sua finalidade esteve orientada para a evidência das melhorias que as geotecnologias têm trazido à produção do conhecimento em Geologia, de forma a não apenas contribuir para um aprimoramento da especificação dos dados geográficos a produzir para essas atividades, mas também para explorar e discutir as novas contribuições possíveis das diferentes geotecnologias no contexto dos estudos geológicos.

As geotecnologias estão em franco desenvolvimento, sinalizam claramente que o processo de desenvolvimento da exploração mineral e mapeamento geológico está longe de seu esgotamento. Em pleno curso, a evolução das tecnologias sinalizam, contrariamente, que as representações geoinformacionais e as análises quadridimensionais, conciliando espaço tridimensional e tempo, estão ainda num estágio inicial de um processo de franca evolução.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a equipe do BGS pelas discussões técnicas relativas ao tema proposto e parceria acadêmica e a FAPEMIG por ceder recursos na forma de bolsa de pesquisa para este trabalho.

BIBLIOGRAFIA

ARRUDA JUNIOR, E. R.; SEOANE, J. C. S.; MENEZES, P. M. L., L. **Geotecnologias Portáteis e Produtos Gratuitos ou de Baixo Custo no Auxílio ao Mapeamento**. Revista Brasileira de Cartografia, v. 62, p. 269-276, 2010.

ATHEY, J. E.; FREEMAN, L. K.; WOODS, K., A. **The Transition from Traditional to**

- Digital Mapping: Maintaining Data Quality While Increasing Geologic Mapping Efficiency in Alaska.** Alaska GeoSurvey News. Vol. 11, No. 2. 2008.
- BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic Information Systems for Geoscientists: Modeling with GIS.** Pergamon/Elsevier Science Publications. 0-08-042420-1. 1994.
- BRAGA, M. A.; CARLOS, D., U.; SOUSA, R., R.; GALBIATTI, H.; ALMEIDA, T. **Correção de terreno para dados de aerogradiometria gravimétrica 3D-FTG no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil.** Revista Brasileira de Geofísica, 28 (4), pag 703-722. 2010.
- BÜCHI, A.; KARFUNKEL, J.; HOFMANN, M.; PIMENTA, F.; PAGUNG, R.; HOPPE, A.; FREITAS, C. R. **Análise Multi-Temporal dos Georecursos ao norte de Belo Horizonte (MG): Estudo de Caso do Aluvião do Ribeirão da Mata.** In: XLIII Congresso Brasileiro de Geologia, 2006, Aracaju -SE. 2006.
- CALAZANS, P. M. P. **Geovisualização em Ambientes de Realidade Virtual: Mudança de paradigma na Exploração Mineral de Ferrosos.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geologia. 371 f. 2015.
- CALAZANS, P. M. P.; CASTIGLIONE, L. H.; BÜCHI, A.; SEOANE, J. C. S. NAPIER B.; FORD, J. **Geovisualização em Ambientes de Realidade Virtual e sua Aplicação na Exploração Mineral.** Revista Brasileira de Cartografia. 68/1: 43-61. 2016.
- CASTIGLIONE, L. H. G.; CALAZANS, P. M. P. **A constituição de uma base de dados geográficos para apoio a estudos geológicos: aspectos epistemológicos e práticos.** In: SBSR – Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15, 2011, Curitiba. Anais eletrônicos. Curitiba: INPE, 2011
- COE, A. L.; ARGLES, T. W.; ROTHERY, D. A. & SPICER, R. A. (eds) 2010. **Geological Field Techniques.** xii 323pp. Wiley-Blackwell/Open University.2010.
- COWAN E. J.; BEASTON, R.K.; ROSS, H.J.; FRIGTH, W.R.; MCLENNAN, T.J.; EVANS, T.R.; CARR, J.C.; LANE, R.G.; BRIGHT, D.V.; GILLMAN, A.J.; OSCHURT, P.A. & TITLEY, M. **Practical Implicit Geological Modelling,** 5th International Mining Geology Conference Proceedings, AusIMM Publication Series 8/2003, 89-99. 2003.
- COWAN, E. J.; LANE, R. G.; ROSS, H. J. 2004. **Leapfrog's implicit drawing tool: a new way of drawing geological objects of any shape rapidly in 3D,** in Mining Geology 2004 Workshop (eds: M.J. Berry and M.L. Quigley), Australian Institute of Geoscientists Bulletin, 41: 23–25.
- CUVIER, G.; BRONGNIART, A. **Essai sur la Géographie Minéralogique des Environs de Paris, avec une Carte Géognostique, et des Coupes de Terrain:** Paris, Baudouin, 1808. 278 p.
- GOETZ, A. F.; ROCK, B. N.; ROWAN, L.C. **Remote Sensing for exploration: an overview.** Economic Geology, v.78. p. 570-73. 1983.
- GUIMARAES FILHO, H. A. **Metodologias para intercâmbio de dados entre programas de CADD, SGBD, PDI e SGI em projetos de exploração mineral.** Campinas: Instituto de Geociências, 1994. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 1994. 118p.
- JÉBRAK, M. **Innovation in mineral exploration: successes and challenges.** SEG Newsletter 86, 12–13. 2011.
- JORDAN, C. **SIGMA mobile: the BGS digital field mapping system in action: in the United Arab Emirates.** In: Digital Mapping Techniques 09, West Virginia, USA, 10-13 May 2009. British Geological Survey. (Unpublished)(<http://nora.nerc.ac.uk/7482/>)
- JORDAN, C.; BATESON, L.; BOW, J.; NEWELL, A.; NAPIER, B.; SABINE, R, J. **GeoVisionary™ software for 3D**

- visualisation and petroleum exploration in southern Tajikistan.** In: RSPSoc.2009: New Dimensions in Earth Observation, Leicester, UK, 8-11 Sept 2009. (Unpublished) (<http://nora.nerc.ac.uk/8854/>).
- JORDAN, C, & NAPIER, B. **Developing digital fieldwork technologies at the British Geological Survey.** In: Bowman, M.; JORDAN, C.J., (eds.) The value of outcrop studies in reducing subsurface uncertainty and risk in hydrocarbon exploration and production. London, UK, Geological Society of London, 219-229. (Geological Society Special Publication, 436). 2016.
- KNOOP, P.A. & VAN DER PLUIJIM, B. **GeoPad: Tablet PC-enabled Field Science Education.** In: "The Impact of Pen-based Technology of Education: Vignettes, Evaluations, and Future Directions", eds., D. Berque, J. Prey, and R. Reed. Purdue University Press, 103-114. (133) 2006.
- KRAMER, J. H. **Digital Mapping Systems for Field Data, in Soller, D.R.,** editor, Digital Mapping Techniques '00 – Workshop proceedings: U.S. Geological Survey Open-file Report 00-325, p. 13-19. 2000.
- LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J. & RHIND, D. W. **Geographic Information Systems and Science.** Chichester: Wiley. .2001
- MACHADO, M. M. M.; RENGER F. E.; RUCHYS, U, A. **Estruturas Dobradas do Quadrilátero Ferrífero em Perfis Geológicos do Século.** Geonomos, Belo Horizonte, v. 18, n. 2, p. 73-77, 2010.
- McCAFFREY, K. J. W.; JONES, R. R.; HOLDSWORTH, R. E.; WILSON, R. W.; CLEGG, P.; IMBER, J.; HOLLIMAN, N.; TRINKS, I. **Unlocking the Spatial Dimension - Digital Technologies and the Future of Geoscience Fieldwork:** Journal of the Geological Society, v. 162, p. 927-938. 2005.
- MENEGUETTE, A. A. C. A. **Cartografia no século 21: revisitando conceitos e definições.** Revista Geografia e Pesquisa, v. 6, p. 6-32, 2013. 2013.
- MENEGUETTE, A. A. C. **Geovisualização: exercícios práticos em sala de aula.** Revista Brasileira de Cartografia (Impresso), v. 63, p. 831-841, 2014.
- NAPIER, B. **GeoVisionary: virtual fieldwork for real geologists.** V1 Magazine (<http://nora.nerc.ac.uk/13558/>).2011.
- SANTOS, J.F.; RIBEIRO FILHO, E. **Estratégia de Prospeção Mineral.** Bol. IG-USP, Série. didática. N.º.2 São Paulo abr. 1989.
- SANTOS, T. C. C.; ANTUNES, M. A. H.; SEOANE, J. C. S.; SOUSA, G. M. **Comparison of Atmospheric Correction Models for Worldview-2 Image.** RBC. REVISTA BRASILEIRA DE CARTOGRAFIA (ONLINE), v. 69, p. 229-240, 2017.
- SCHEIB, A, J. **G-BASE trials of SIGMA digital field data capture: feedback and recommendations.** British Geological Survey, 21pp. (IR/05/015) 2005. (Unpublished)
- SEOANE, J. C. S.; OSAKO, L. S. ; SILVA FILHO, A. F. . **Prospeção de rochas ornamentais auxiliada por sistema de informação geo-referenciada.** Revista Brasileira de Geociências, v. 33, n.2, p. 73-82, 2003.
- SHUFELDT, O.; WHITMEYER, S.J.; & BAILEY, C.M. **The New Frontier of Interactive, Digital Geologic Maps: Google Earth-Based Multi-Level Maps of Virginia Geology.** In Whitmeyer, S.J., De Paor, D.G., Bailey, J., and Ornduff, T. (eds) Google Earth and Virtual Visualizations in Geoscience Education and Research, GSA Special Paper 492, p. 147-164, doi: 10.1130/2012.2492(11). 2012.
- SIGEL, H.O. **Exploration.** Mining Annual Review, Jun. 185:9-12. 1985.

SOUZA FILHO, C. R. & CROSTA, A.P. **Geotecnologias aplicadas a Geologia**. Rev. Bras. Geoc., 33(2-Suplemento): 1–4. 2003.

TERRINGTON, R.; NAPIER, B.; BÜCHI, A.; PROCÓPIO, P, M. **Managing the mining cycle using GeoVisionary**. In: Aachen International 5th Mining Symposia, Aachen, Germany, 27-28 May 2015.

WESTHEAD, R.K.; SMITH, M.; SHELLEY, W.A.; PEDLEY, R.C.; NAPIER, B. **Mapping the geological space beneath your feet: the journey from 2D paper to 3D digital spatial data**. In: Information Society (i-society): 2012 International Conference, London, UK, 25-28 June 2012. IEEE, 99-102.2012.

WESTHEAD, R.K., SMITH, M.; SHELLEY, W.A., PEDLEY, R.C., FORD, J., NAPIER, B. **Mobile spatial mapping and augmented reality applications for nvironmental geoscience**. *Journal of Internet Technology and Secured Transactions*, 2 (1-4). 185-190.2013.

WHITMEYER, S. J.; NICOLETTI, J.; DE PAOR, D.G. **The digital revolution in geologic mapping: GSA Today**, v. 20, no. 4/5, p. 4–10, doi:10.1130/GSATG70A.1. 2010.

WHITMEYER, S.J. **Community Mapping in Geology Education and Research: How**

Digital Field Methods Empower Student Creation of Accurate Geologic Maps. In Kastens, K.A., and Manduca, C.A. (eds) *Earth and Mind II: A Synthesis of Research on Thinking and Learning in the Geosciences*, GSA Special Paper 486, p. 171-174, doi: 10.1130/2012.2486(27). 2012.

6.0 - ARTIGO II - "Mapeamento Geológico com aplicação do BGS Digital Workflow e Modelagem Implícita: Estudo de Caso da Serra da Moeda - MG, Brasil".

Este artigo engloba os resultados da aplicação da metodologia proposta, em uma área de estudo localizada na Serra da Moeda – MG. Apresenta uma análise e discussão das etapas relacionadas ao mapeamento geológico. Sendo o Pré-Campo e Pós-Campo realizado na plataforma de realidade virtual, nas dependências do BGS (Serviço Geológico Britânico) em Keyworth, NG UK, e o campo realizado na área especificada neste volume. O artigo não foi submetido, pois ainda será revisto pelos autores incluídos no mesmo e devido a problemas relacionados a licença do *software* de modelagem implícita (leapfrog), que expirou (contrato com o IGC, voltando ainda este semestre), e paralisou o modelamento estrutural da área mapeada. Este modelo é parte essencial da aplicação metodológica e da contextualização das relações entre as nascentes da Serra da Moeda e o arcabouço litoestrutural.

Mapeamento Geológico com aplicação do BGS Digital Workflow e Modelagem

Implícita: Estudo de Caso da Serra da Moeda – MG, Brasil.

Allan Büchi¹

Ricardo Pagung²

Tiago Amâncio Novo¹

Bruce Napier³

Hebert Lopes Oliveira⁴

José Carlos Sícoli Soeane⁵

(1) Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG - Departamento de Geologia – Instituto de Geociências. Av. Antônio Carlos, 6627- Pampulha - CEP 31270-901 - Belo Horizonte/MG
allanbuchi@gmail.com / tiagonovo@gmail.com

(2) Universidade de Belo Horizonte - UNI-BH – IET – Instituto de engenharia e tecnologia Campus Buritis – CEP 30575-180 - Belo Horizonte/MG
ricardo.pagung@prof.unibh.br

(3) 3D Visualization Systems Team Leader –British Geological Survey - BGS -
Keyworth, NG12 5GG United Kingdom.
brn@bgs.ac.uk

(4) Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS - Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais. Campus do Vale - CEP 91501-970 - Porto Alegre/RS
hebertlo@gmail.com

(5) Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ Departamento de Geologia – Instituto de Geociências. Campus Ilha do Fundão. CEP 21949-900 - Rio de Janeiro/RJ, Brasil
cainho@geologia.ufrj.br

Resumo

O mapeamento geológico é uma das principais atividades da pesquisa geológica, a metodologia de sua execução se orienta para o desenvolvimento de produtos em 2D (Mapas e Perfis), o que limita a visualização e interpretação de dados. Em vista de apresentar uma nova perspectiva para o desenvolvimento de produtos em 3D, relacionados ao mapeamento geológico, o trabalho aqui reportado apresenta a aplicação da metodologia proposta pelo BGS (Serviço Geológico Britânico), com base na associação SIG (Sistemas de Informação Geográfica) e RV (Realidade Virtual), denominada BGS *Digital Workflow*. Esta metodologia vem sendo testada por diversos autores, entretanto sem apresentar um produto em 3D. Como tentativa de aperfeiçoar estes processos metodológicos foram aplicadas técnicas de modelamento geológico, no caso a modelagem implícita através do software Leapfrog, para criação de um produto em três dimensões. Para aplicação desta nova metodologia, foi escolhida a Serra da Moeda – MG, que no caso, está apresentando diminuição da vazão de algumas nascentes, foi estabelecido a execução de mapeamento geológico que proporcionaria a relação entre as litologias e as estruturas geológicas para formação das nascentes. Este trabalho contemplou uma avaliação pragmática do mapeamento geológico, e a identificação dos possíveis aprimoramentos, a partir de uma discussão e aplicação da metodologia em um estudo de caso.

1. Introdução

O uso de geotecnologias na pesquisa geológica está cada vez mais presente. A procura por soluções que garantam confiabilidade e facilidade, na aquisição, análise e representação de dados está em plena ascensão, em vista do alto grau de investimento no setor (Calazans *et al.* 2016). O mapeamento geológico é uma das principais atividades da pesquisa geológica, da qual os resultados são apresentados em 2D (Mapas e Perfis), limitando a visualização do pesquisador, para interpretação e análise dos resultados de campo. Em vista desta abordagem o BGS (British Geological Survey), desenvolveu uma metodologia para o mapeamento geológico, baseada em 2 pontos-chaves; Realidade Virtual (RV) e Mapeamento Digital, ambos integrados em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica). Esta metodologia vem sendo testada em vários trabalhos pelo BGS e outros pesquisadores (McCaffrey *et al.* 2005, Scheib 2005, Arruda Junior *et al.* 2006, Jordan 2009, Whitmeyer *et al.* 2010, Terrington *et al.* 2015, Jordan & Napier 2016), entretanto o estudo aqui apresentado, propõe uma variável nesta metodologia, com a introdução da modelagem implícita nas etapas de Pré-Campo e Pós-Campo, que precedem e sucedem, a etapa de campo (Büchi *et al.* 2018).

A empresa FEMSA (Coca-Cola) possui uma fábrica na base Serra da Moeda, na porção W desta estrutura, nas margens da BR-040 km. O abastecimento de água se dá por meio da captação subterrânea por poços de bombeamento, os quais se encontram instalados nas imediações da fábrica. A Serra da Moeda é caracterizada pela ocorrência de várias nascentes de água, algumas destas apresentaram redução nas vazões, sendo que foi referida uma possível relação com os poços de bombeamento de água. Um dos objetivos deste trabalho foi entender a relação entre a ocorrência das nascentes com as estruturas e unidades geológicas, para o entendimento da dinâmica da água subterrânea e seus aspectos hidrogeológicos. Para construção deste modelo, foi observado a importância da realização de um mapeamento geológico, no qual foi aplicado o *BGS Digital Workflow* com a modelagem implícita.

2. Contexto Geológico

O Quadrilátero Ferrífero é uma das áreas mais bem estudadas do Brasil, com aproximadamente 7000 km², localizada a sul de Belo Horizonte, capital do Estado de Minas Gerais. Conhecido desde o início do século XVIII o Quadrilátero Ferrífero é considerado uma das áreas clássicas da geologia pré-cambriana do Brasil devido a ocorrência de diversos recursos minerais descobertos durante o período colonial. Os primeiros estudos geológicos na região foram executados no século XIX, posteriormente, nas décadas de 50 e 60, através do convênio USGS/DNPM. Neste período foi realizado mapeamento sistemático de todo o Quadrilátero Ferrífero na escala 1:25.000 (Dorr 1969), justificado pela ocorrência de inúmeros recursos minerais na região, como BIF's (Banded Iron Formation). Em 2005, um convênio entre a UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais) e CODEMIG (Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais), foi realizada uma integração e correção cartográfica em SIG (Lobato *et al.* 2005).

O Quadrilátero Ferrífero apresenta quatro principais unidades litoestratigráficas: o Embasamento Cristalino formado pelos terrenos gnáissico-migmatíticos, o Supergrupo Rio das Velhas, o Supergrupo Minas e o Grupo Itacolomi. Mais restritamente ocorrem as Coberturas Sedimentares Fanerozóicas. O Supergrupo Minas, foco dos estudos deste trabalho (relacionado as ocorrências das principais nascentes na Serra da Moeda), representa uma sequência metassedimentar de idade paleoproterozóica constituída por filitos, xistos, quartzitos, dolomitos e itabiritos, assentada discordantemente sobre rochas do embasamento ou do Supergrupo Rio das Velhas. O SG Minas é subdividido em três grupos, da base para o topo; Caraça, Itabira e Piracicaba. O Grupo Itabira, unidade estratigráfica relacionada às formações ferríferas, constitui a sequência química intermediária, sendo também dividido em duas formações: Cauê e Gandarela. A Formação Cauê

está na base do grupo e é formada quase que exclusivamente por itabiritos e mineralizações ricas em hematita, sendo explotada como minério de ferro. Estes itabiritos podem ser diferenciados pela mineralogia, granulometria e composição química. Acima e em contato gradacional está a Formação Gandarela constituída por dolomito, formação ferrífera, marga, filitodolomítico e filito.

O arcabouço estrutural do Quadrilátero Ferrífero é constituído, em sua essência, por dobras de várias gerações associadas às diferentes fases e eventos tectônicos que atuaram na região, do arqueano ao paleoproterozóico. A região foco deste estudo denomina-se Sinclinal Moeda, mais precisamente no flanco W dessa estrutura (Figura 01).

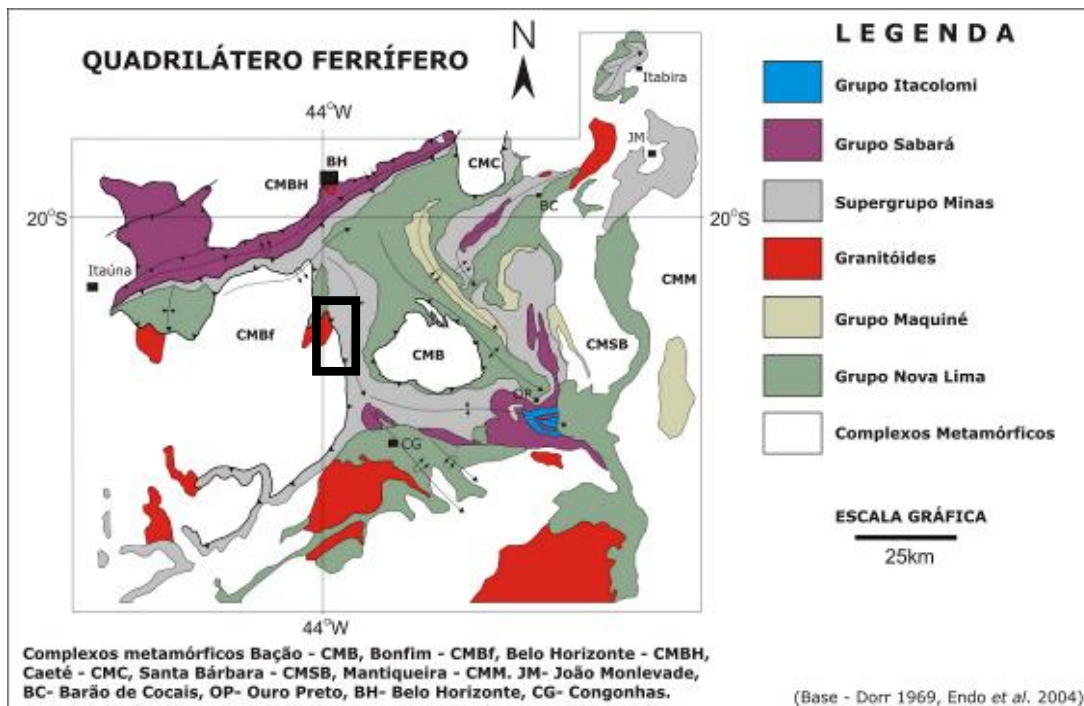


Figura 1 - Mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero. O retângulo representa aproximadamente a área de estudo. Fonte: Dorr 1969 in Endo et al 2004.

3. Materiais e Métodos

A metodologia para execução do trabalho tem como base os métodos aplicados BGS, no que se refere a aquisição de dados e apresentação dos mesmos, com a aplicação da modelagem implícita, para representação de resultados (Büchi *et al.* 2018).

Esta metodologia utiliza-se de plataformas SIG e RV como ambientes de trabalho nas etapas do mapeamento geológico, com base em ferramentas tecnológicas. O *software* GeoVisionary (Napier 2011), é um programa desenvolvido pela empresa Virtualis, em parceria com o BGS, que unifica em ambiente RV, grandes quantidades de dados em ampla extensão territorial, articulada em informação SIG com visualização 3D. Este *software* possui integração com o ArcGIS (ESRI, 2008), que é utilizado tanto em escritório (etapas Pré-Campo e Pós-Campo), e em campo, instalado no dispositivo móvel (*toughbook*). O *SIGMA Mobile* é um aplicativo desenvolvido pelo BGS, como uma caderneta digital de campo, para coleta e interpretação de dados (pontos geológicos, estruturas, litologias, fotos e croquis), este sistema está integrado ao ArcGIS.

A modelagem implícita, aplicada as etapas de Pré-Campo e Pós-Campo, é realizada através do *software* Leapfrog. O conceito da modelagem explícita diferentemente da modelagem implícita, diminui tempo e imprecisões, já que a construção do modelo geológico ocorre a partir do mapa geológico de forma semiautomática (Cowan *et al.* 2003).

Esta plataforma tecnológica e metodológica, forneceu as bases e diretrizes para execução do estudo de caso, em três etapas distintas; Pré-campo, Campo e Pós-campo, como observado na figura 2.

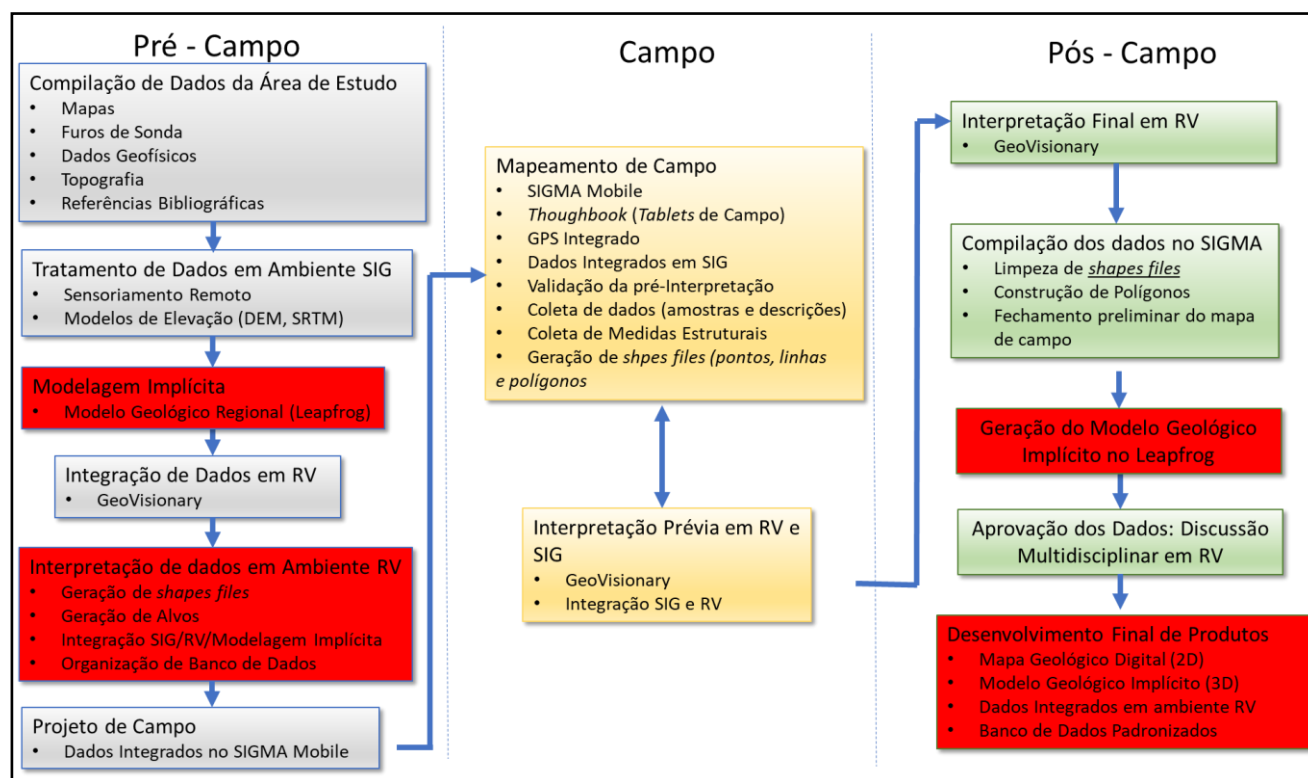


Figura 2 - Metodologia proposta pelo BGS Digital Workflow, com modificações, proposta pela a inclusão da modelagem implícita através do software Leapfrog, nas etapas de Pré-Campo e Pós-Campo (marcada em vermelho). Fonte: Büchi et al 2018.

3.1 Pré-campo

Nesta etapa inicial, ocorre a integração de informações georreferenciadas em ambiente RV, através do software GeoVisionary, para definição da área de mapeamento e planejamento das atividades relacionando diferentes formatos ne extensões de dados. Neste caso, os dados relacionados foram de domínio público, como os fornecidos pelo IBGE (malha hidrográfica, topografia, malha rodoviária e urbana), CODEMIG (Projeto SIG - Lobato *et al.* 2005), USGS (Dorr 1969) e imagem satelital do *google earth* (Figura 3).

Estes dados integrados são analisados com técnicas de fotointerpretação, para identificação de características geológicas e para estabelecimento de áreas alvos e atividades que nortearão as campanhas de campo. Para configuração de uma representação tridimensional da geologia da área de estudo, foi criado um modelo geológico 3D a partir do mapa geológico regional (Projeto SIG - Lobato *et al.* 2005), através da modelagem implícita (software Leapfrog), visando melhorar a aferição e interpretação do contexto geológico-estrutural da área.

Esta etapa possibilitou o entendimento do empacotamento estratigráfica, assim como a estruturação local, o que viabilizou o levantamento de áreas críticas, exemplo do contexto regional das nascentes d'água. Foram interpretados contatos geológicos, estruturas geológicas (traços de falhas e lineamentos) e pontos de checagem de campo, no caso, as regiões chaves para entender a relação das nascentes com a geologia local. Os resultados desta etapa (*shapes files*, descrições e etc.), são exportados para a plataforma SIG (*software* ArcGIS), em um dispositivo móvel (*toughbook*), juntamente com o aplicativo SIGMA Mobile, para aplicação na etapa posterior.

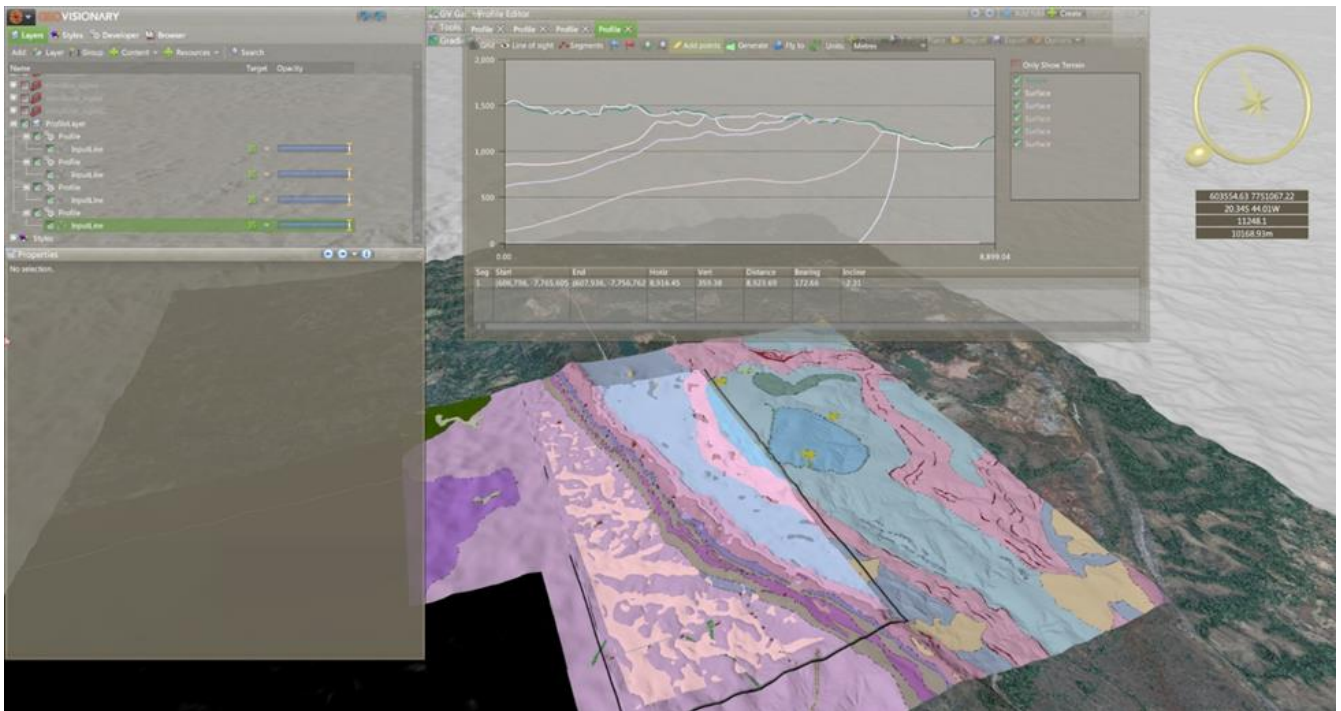


Figura 3 - Integração de dados em diferentes formatos (2D e 3D) em ambiente de RV (software GeoVisionary). A integralidade do ambiente permite uma visualização em várias perspectivas, aumentando o poder de análise e comunicação interdisciplinar. Fonte: Büchi et al 2018.

3.2 Campo

Os dados gerados na etapa anterior, são dispostos em um *Toughbook* com GPS/câmera integradas ao ArcGIS e o aplicativo SIGMA Mobile. Esta plataforma digital, em campo, possibilita trabalhar com os dados gerados na etapa Pré-Campo e nesta etapa.

A aquisição de dados (pontos de descrição e interpretações) ocorre através do aplicativo SIGMA Mobile, que funciona como uma caderneta digital de campo, possibilitando o armazenamento de informações geológicas de forma organizada e precisa. O aplicativo permite a inserção do usuário criando um banco de dados para aquisição em campo de informações, de forma que a estruturação permite a entrada de outros usuários sem afetar o sistema de aquisição (Figura 4). Esta característica permite acesso aos dados criados em etapas de campo anteriores, e organiza os dados da etapa atual para consultas futuras de outros usuários. Com a integração do SIGMA Mobile ao ambiente ArcGIS, torna-se possível a visualização em tempo real da localização na área de estudo, bem como a consulta e interpretação de informações digitais diversas, a qualquer instante em que elas se façam necessárias (Büchi et al. 2018). Os dados (pontos geológicos e interpretações geológicas, tais como contatos estratigráficos e lineamentos estruturais), são criados em forma de *shape files*, e organizados em forma de banco de dados e base SIG, e integrados automaticamente ao mapa geológico com layout previamente definido. Por se tratar de um computador portátil, outros softwares podem ser utilizados nesta plataforma, como no caso do *stereonet*, que possibilita a geração de estereogramas para quantificar e melhorar a visualização das estruturas mapeadas em campo.

Os produtos desta etapa são pontos geológicos organizados em uma estrutura de dados, *shapes files* de interpretação e fotografias/imagens interpretadas, bem como mapas e relatórios de campo confeccionados durante o trabalho, gerados de forma automática no sistema *Microsoft Word Office*.

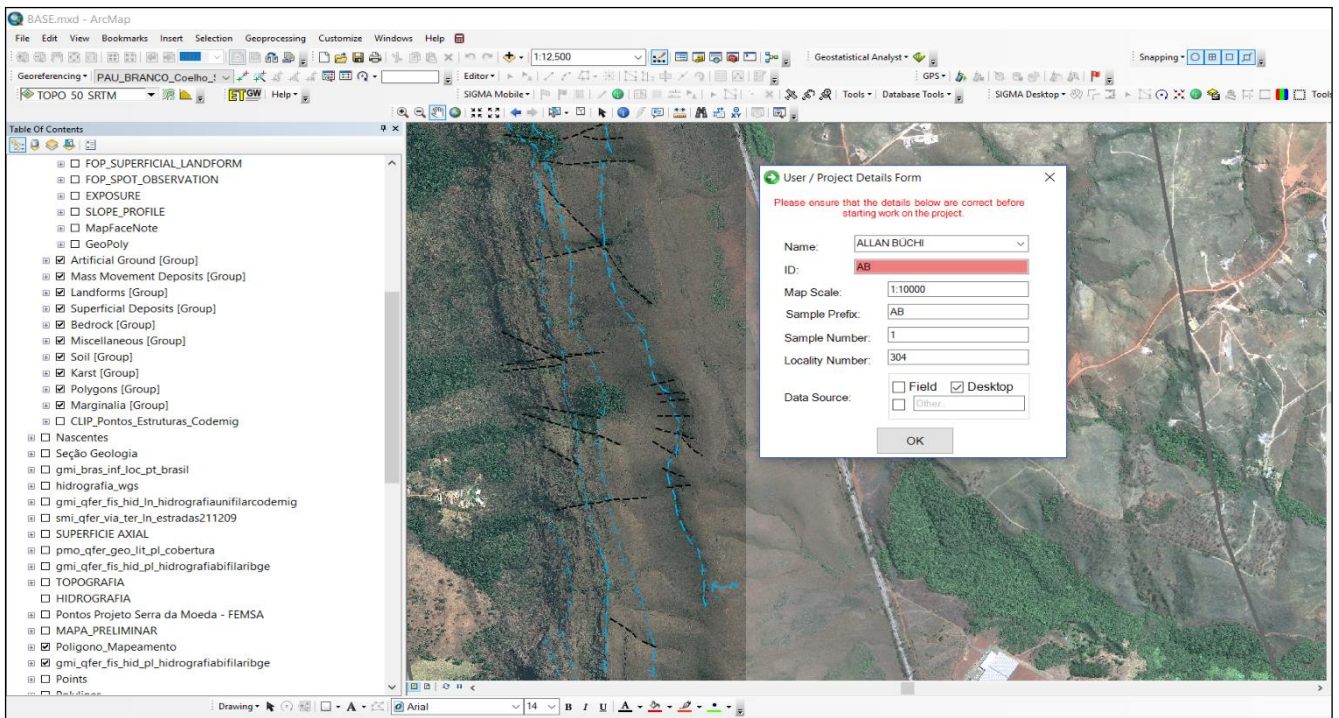


Figura 4 - Tela do toughbook em campo com o aplicativo SIGMA Mobile, caracterizando o início das atividades com a criação do projeto, com a entrada do usuário e organizando o banco de dados para a coleta de informações.

3.3 Pós-Campo

Após os trabalhos de campo os dados coletados são reintegrados na plataforma RV (*software* GoeVisionary), para validação das informações. Os produtos da campanha de campo, como mapa, pontos e linhas de estruturas e contatos, são organizados em diferentes cenários 3D, com informações de superfície e subsuperfície e comparados com os dados da etapa de Pré-Campo, para definição do mapa final.

O produto mapa geológico é remodelado no *software* Leapfrog para construção de um modelo local a partir do mapa de campo, assim como a análise correlativa dos dois modelos geológicos, como ilustra a figura 5. Esta etapa, define os produtos do mapeamento; mapa geológico, seções geológicas e modelo geológico 3D, integrados em um mesmo ambiente, no caso a RV, estes dados são armazenados, de forma que possam ser consultados e reutilizados na mesma plataforma, por outros usuários e campanhas posteriores.

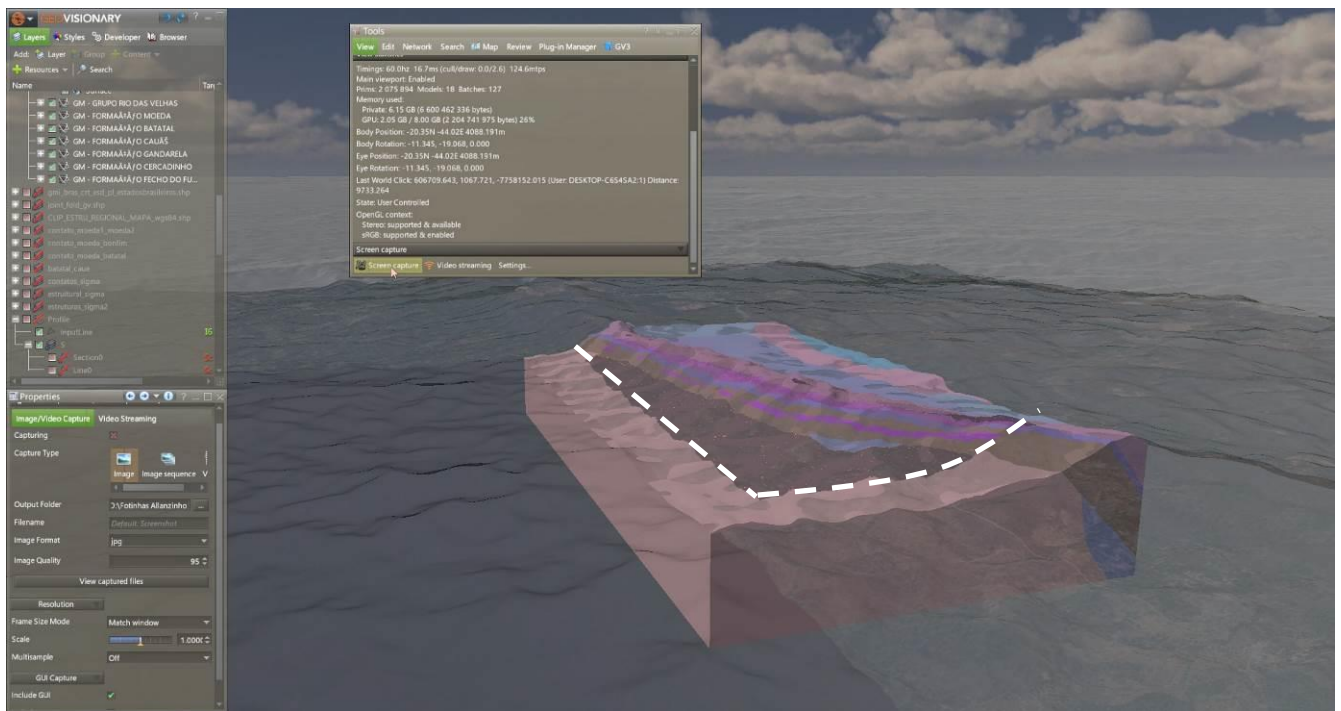


Figura 5 - Etapa de Pós-Campo, integração dos dois modelos geológicos, criados no software Leapfrog, em ambiente de RV (software GeoVisionary), para efeito de validação de dados. A linha branca tracejada, separa os modelos, sendo o interno o modelo local, e o externo o modelo regional.

4. Resultados e Discussão

A aplicação do BGS Digital Workflow em conjunto com a modelagem implícita, sugeriu diversas mudanças na interpretação da geologia da área de estudo. A aplicação destes conceitos relacionados as geotecnologias, permitiu abrir muitas possibilidades de aprimoramento na visualização, interpretação e análise dos dados, referentes as etapas do mapeamento geológico. A integração de diferentes ambientes de geovisualização, RV e SIG (3D e 2D), promoveu uma otimização das atividades estabelecendo novas interfaces de funcionalidade relacionadas a modernização de técnicas de interpretação, aquisição e produção de dados. A criação de modelos 3D, no caso o regional (etapa de Pré-Campo) e o local (etapa de Pós-Campo), estimulou a produção de inúmeros cenários com possibilidades variadas de perspectivas, para análise e confirmação das informações. A observação de dados geológicos em 3D, em subsuperfície, apura a análise e viabiliza a percepções sobre as evidências geométricas que caracterizam geomorfologia da área de estudo, aprimorando a interpretação de elementos estruturais como falhas e reconstrução dos ambientes da interpretação geológica Westhead (2013).

Em relação a etapa de campo, devido ao planejamento em ambiente RV, tornou o campo mais objetivo com a simulação da realidade na etapa pré-campo. A utilização do dispositivo móvel gerou possibilidades variadas na interpretação dos dados, devido a carregamento de uma vasta gama de informações in loco e o intercambio facilitador para diferentes plataformas de visualização de dados.

As novas interpretações são evidenciadas pelo emprego das geotecnologias e organizadas de acordo com a temporalidade do trabalho executado, ou seja, etapas de pré-campo, campo e pós-campo como observado na metodologia (figura 2). Os resultados, relacionados as nascentes, um dos objetivos deste estudo, foram trabalhados em um subcapítulo posterior, como forma de diferenciar os aprimoramentos relacionados a metodologia aqui apresentada sobre o mapeamento geológico e as implicações nos estudos das nascentes.

4.1 Pré-Campo

A integração de dados em ambiente RV e cruzamento de diferentes classes de informações, possibilitou a construção de inúmeros cenários em 3D para auxiliar na fotointerpretação. Foi possível a realização de uma simulação do ambiente de campo na plataforma RV, permitindo um melhor planejamento do trabalho de mapeamento. Como reportado por Westhead *et al.* (2013), a interpretação prévia no ambiente de RV permite a execução de levantamento virtual prévio, antes de efetivamente iniciar o levantamento real. Isso permite a construção preliminar de certo conhecimento do terreno e de seus aspectos geológicos mais aparentes, estabelecendo projeções de perfis, áreas de interesse, assim como possíveis afloramentos, dependendo da qualidade da imagem e topografia base.

Durante a fotointerpretação, com o cruzamento do mapa geológico regional com a topografia, foi possível observar incongruências em diversos contatos litológicos (Figura 6), considerando a utilização da plataforma 3D no *software* GeoVisionary, como integrador de dados. A modelagem implícita foi executada na criação de um modelo geológico regional 3D, como uma plataforma além da bidimensional para auxílio, compreensão e interpretação das condicionantes geológicas da área mapeada.

A utilização da RV nesta etapa está relacionada as diversas possibilidades de análises criadas neste ambiente. A integração de dados multidisciplinares em uma mesma plataforma, simulando a realidade física da área de pesquisa, permite a construção de um conhecimento prévio, sobre as condições do campo e suas características fisiográficas, para definição de alvos e do planejamento de campo. Estas premissas trazem mais confiança ao geólogo de campo, já que o conhecimento sobre a área de estudo, mesmo virtual, não deixa de corroborar com a realidade do campo.

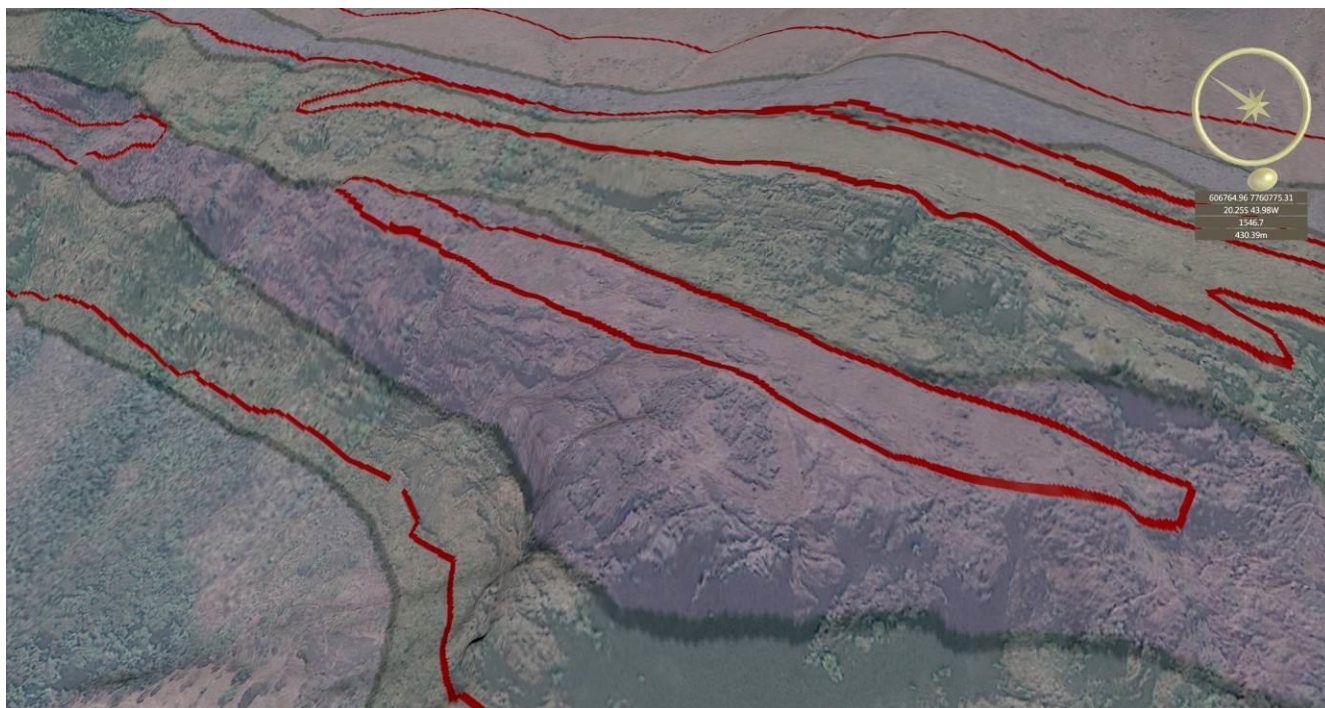


Figura 6 - Etapa de Pré-Campo, no ambiente de RV (*software* GeoVisionary). Fotointerpretação da relação do mapa geológico regional, com o relevo criado a partir da topografia IBGE 1:50.000 em imagem satelital. As linhas vermelhas marcam os contatos, a partir da morfologia, textura e cores.

4.1 Campo

A utilização do SIGMA *Mobile* associado ao *toughbook* permitiu levar em campo os dados fotointerpretados na etapa anterior, e toda a base de dados integradas no GIS. Estas informações agregadas ao dispositivo móvel com GPS, resultou em uma maior precisão na coleta de dados, seja na marcação de pontos ou no desenho de contatos e estruturas geológicas (Figura 7). A geração de um mapa parcial em campo, aumentou a qualidade da informação e reduziu o tempo de confecção e validação do produto.

Como observado por Westhead *et al.* (2013), é ainda perceptível o tratamento e intercâmbio de informações entre os usuários da plataforma digital, passando de uma percepção individual para uma coletiva, além das possibilidades de uso de outras plataformas relacionadas a análise de dados geológicos. No caso do trabalho aqui relacionado, a utilização do *software Stereonet*, permitiu em campo, perceber as variações da foliação regional no âmbito do alinhamento N/S da Serra da Moeda, e a definição através de análise de campo e estereogramas, a existência de dobramentos abertos com eixo de orientação aproximadamente E/W.

A produção de dados em caderneta digital possibilitou a criação de um banco de dados organizado e uma plataforma acessível para outros usuários. Os dados já inseridos em tempo real no ArcGIS, facilitou a criação de *layouts* e exportação de informações. As fotografias foram inseridas ao banco de dados em tempo real, permitindo a interpretação da mesma na forma de croquis esquemáticos (Figura 8). Entretanto algumas observações relacionadas ao dispositivo móvel devem ser levadas em consideração, a exemplo a bateria ainda possui um tempo de duração limitado, sendo necessário as vezes ter uma reserva. A quantidade de dados a serem utilizados, influencia no desempenho do dispositivo, sendo ainda, na tecnologia atual, necessário um *hardware* mais robusto para execução das tarefas com qualidade.

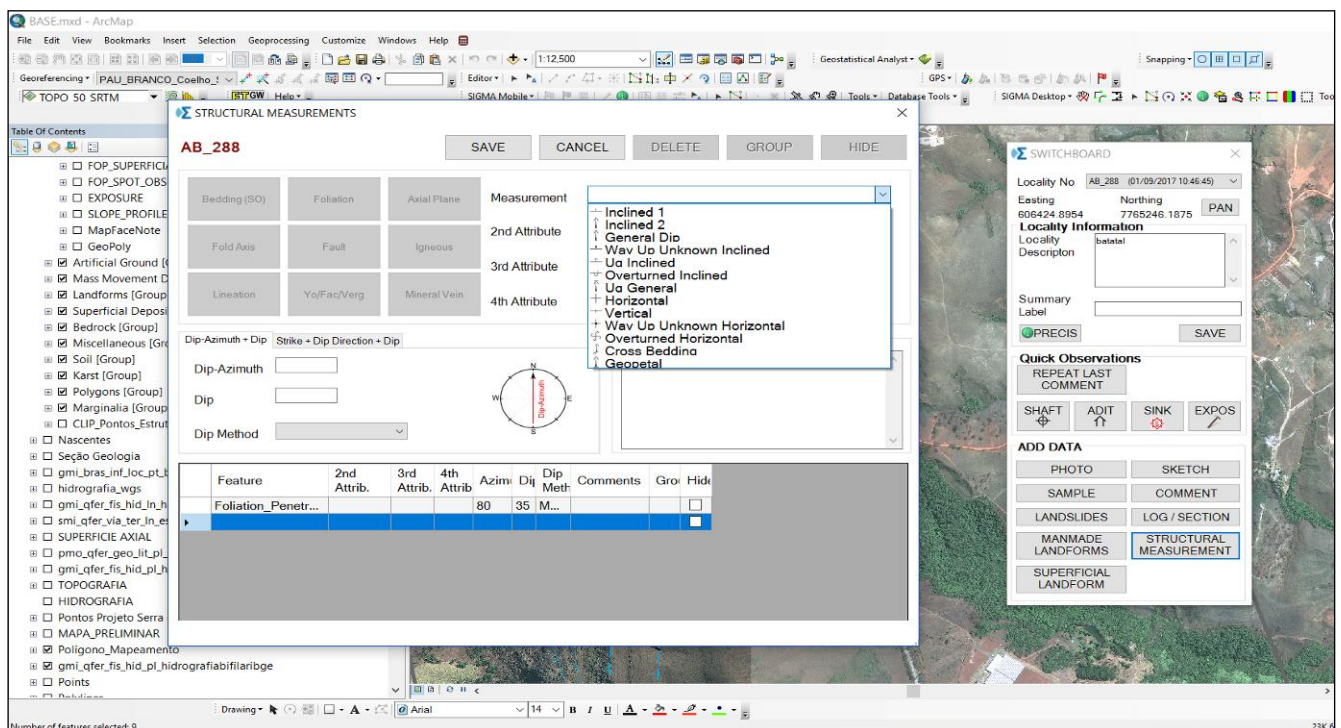


Figura 7 - Tela do *toughbook* em campo com o aplicativo SIGMA *Mobile*, demonstrando o modelo de inserção de dados estruturais (tela à esquerda) e o layout de inserção de pontos de campo (tela a direita). O ponto é integrado ao mapa de geológico de campo, já com a legenda correta para cada estrutura.

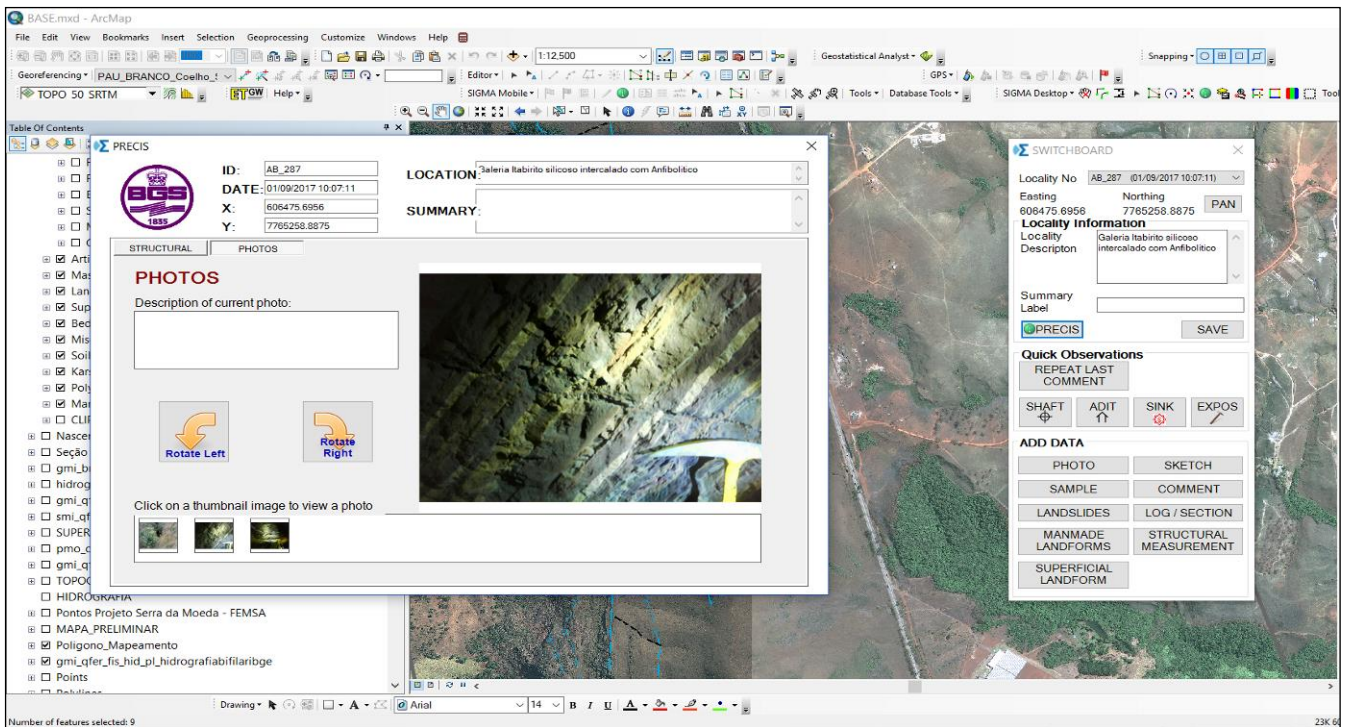


Figura 8 - Tela do *touchbook* em campo com o aplicativo SIGMA Mobile, demonstrando a inserção de fotografia, através da câmera integrada ao dispositivo móvel. A foto é integrada ao banco de dados automaticamente, e pode ser utilizada para realização de croquis dentro do aplicativo.

4.3 Pós-Campo

Após a etapa de campo, os dados coletados foram adicionados à base de trabalho em ambiente RV, *software* GeoVisionary, onde foi realizada uma reinterpretação e análise dos dados. Neste ambiente foram gerados os contatos finais e exportados para o ambiente SIG, para a construção do mapa final. O fechamento dos polígonos foi executado através de um método de preenchimento automático a partir de códigos estratigráficos pré-estabelecidos, incorporados no SIGMA na plataforma SIG (*software* ArcGIS), este processo adiciona atributos na área definidas por contatos (polilinhas), definindo a unidade estratigráfica, evitando erros de topologia e codificação de atributos. As fases relacionadas a este processo desde a etapa de pré-campo podem ser observadas na figura 9.

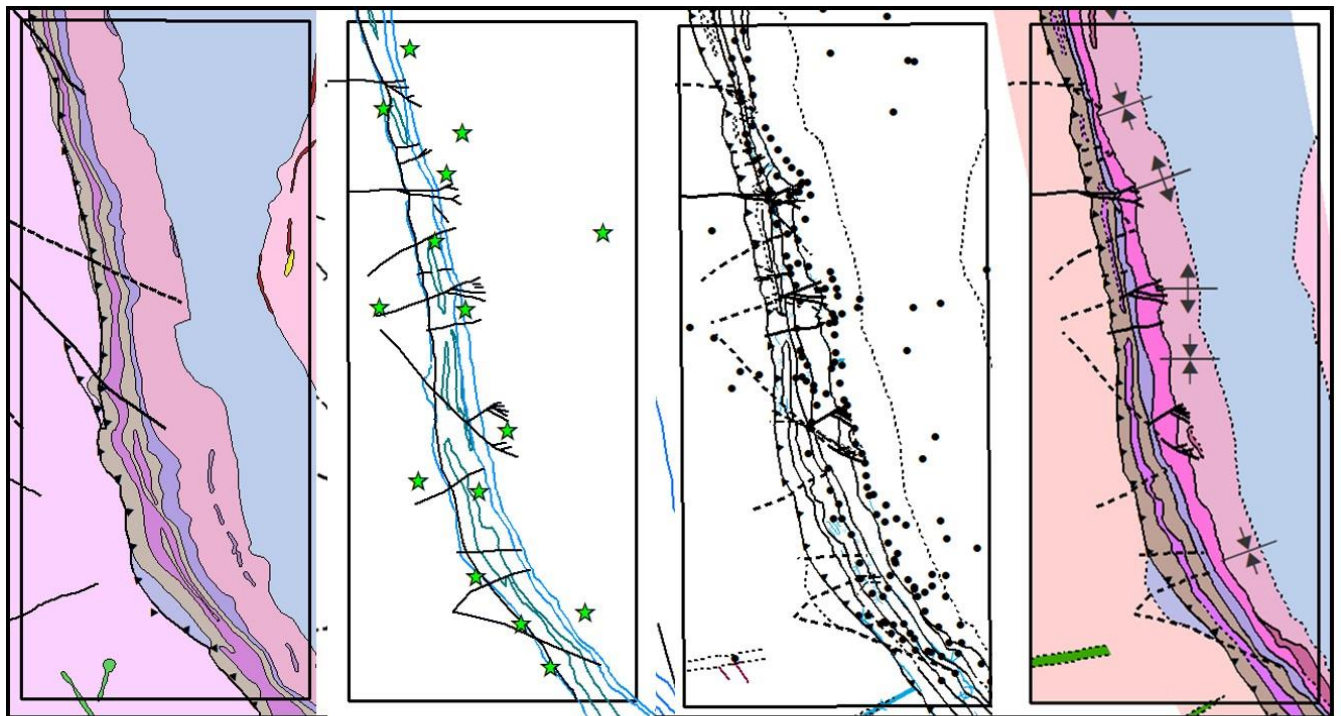
Ocorreram grandes mudanças nas definições de contato, que foi realizada através de fotointerpretação de imagem satelital e dados de campo. Devido a escala de mapeamento algumas regiões apresentaram mudanças nas interpretações de contatos de até 150 metros em relação a proposição original de mapeamentos anteriores (Figura 10).

O mapa final, foi transferido para o *software* Leapfrog, onde se construiu o modelo geológico local, a partir do modelamento implícito e reintegrado no ambiente de RV (GeoVisionary) para confirmação dos resultados (Figura 11).

Neste contexto, a integração entre os ambientes de SIG e RV estimulou a exploração dos diversos cenários de visualização, com articulação de cenários em 3D, que motivaram a reflexão para novas interpretações. Em relação a estratigrafia, a Formação Cauê um dos focos deste estudo, devido a distribuição de nascentes serem relacionadas a esta unidade estratigráfica, foi caracterizado em 3 subunidades distintas, com contatos gradacionais e marcados por zonas de transição. A divisão desta formação foi realizada através de critérios de campo, em predominância de ocorrência de certos litotipos, sendo definidas 3 subunidades; Itabirito Silicosa intercalado com Itabirito Anfibolítico, Itabirito Silicosa e Itabirito Anfibolítico. Esta divisão litoestratigráfica, usou critérios de descrição macroscópica em campo, com objetivo de separação de acordo com a permeabilidade

e porosidade do litotipo. Em relação a estruturação da Serra da Moeda, foram mantidos alguns dos lineamentos estruturais propostos pela bibliografia (Dorr, 1969 e Loabto *et al.* 2005), entretanto algumas falhas interpretadas com rejeitos, foram descartadas por não apresentarem indícios de cinemática em campo, sendo consideradas neste estudo como falhas interpretadas inferidas, sem rejeito definido. Entretanto foram observados outros falhamentos normais de cunho sub-regional principalmente em anfiteatros a montante de algumas nascentes, os mesmos com rejeitos definidos. Em relação aos dobramentos, os de escala mesoscópica apresentavam eixos N/S aproximadamente, mas foram caracterizados ao longo da crista da Serra da Moeda dobramentos de cunho sub-regional com eixos aproximados para E/W. Estes dobramentos foram marcados pela variação da orientação do bandamento composicional das formações ferríferas bandadas, onde o acompanhamento das mudanças nas direções de mergulho destas estruturas, marcavam dobramentos abertos com extensões de dezenas de metros.

Como bem observado em Terrington *et al.* (2015), a perspectiva 3D dos dados, apuram a análise e viabiliza percepções acerca das evidências geométricas que caracterizam a geologia, aprimorando a interpretação de elementos estruturais como falhas, dobras e da construção do modelo interpretativo. Sendo assim a metodologia aplicada foi especificada na geração de produtos que se configuram em um Mapa Geológico 2D, Seções Geológicas 2D, Modelo Geológico 3D, Banco de Dados padronizado em meio digital e dados totais integrados em ambiente RV.



A: Mapa Regional da área de estudo, Serra da Moeda –MG, a ser integrado em ambiente RV, para fotointerpretação e planejamento do campo.

B: Pré-Campo em ambiente RV, a partir de foto interpretação em imagem satelital e topografia integrados. Azul: contatos interpretados. Preto: Estruturas geológicas interpretadas. Estrela: pontos de checagem de campo

C: Lineamentos, polígonos e pontos geológicos gerados em campo a partir do SIGMA Mobile. Linhas grossas pontilhadas: estruturas geológicas. Linhas finas pontilhadas: Contatos interpretados em campo. Pontos pretos: Pontos geológicos de campo.

D: Pós-Campo geração do mapa final da região de mapeamento, desenhado a partir da reinterpretção dos dados de campo em ambiente de RV. O fechamento dos polígonos relacionados as unidades estratigráficas ocorre nesta fase.

Figura 9 - Evolução da construção do mapa geológico final, através da metodologia proposta pelo BGS Digital Workflow, com a inclusão da modelagem implícita através do software Leapfrog, A modelagem 3D dos mapas (regional e local), possibilitou uma maior aferição e entendimento da geologia regional na etapa Pré-Campo, e uma maior visualização e entendimento da geologia mapeada na etapa de Pós-Campo.

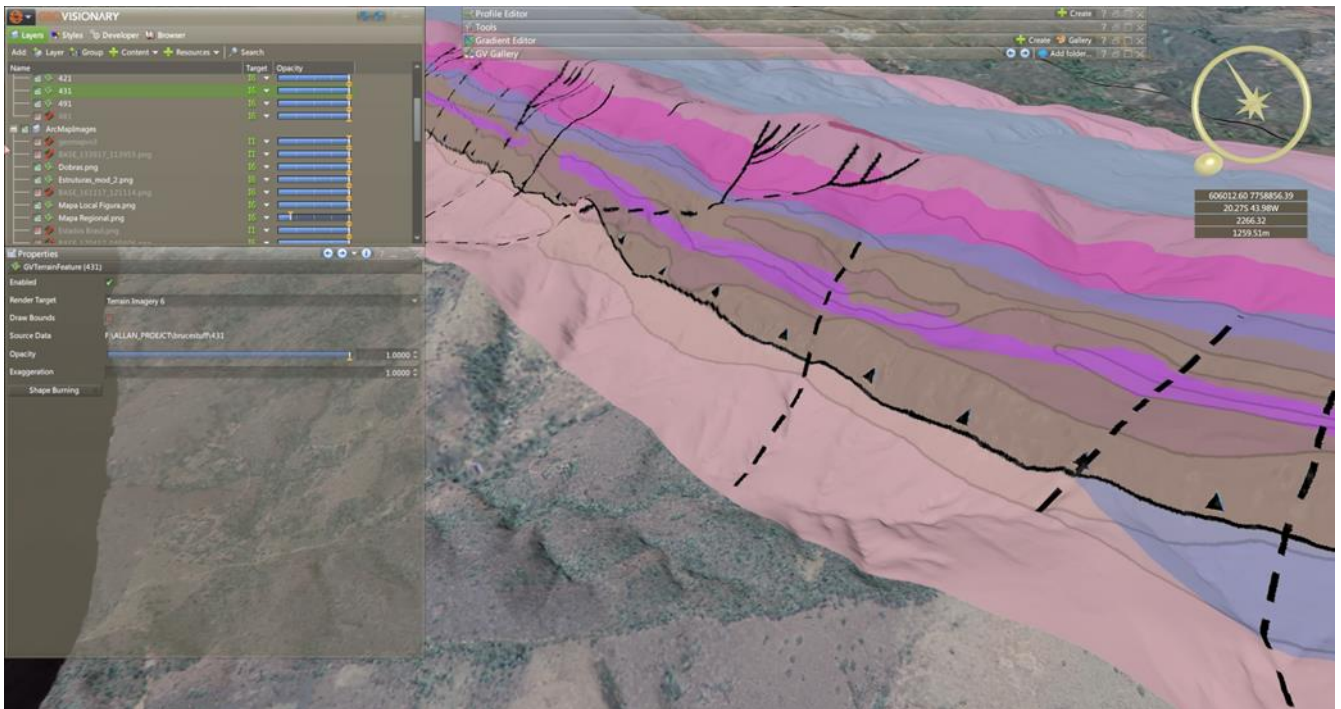


Figura 10 - Cruzamento do mapa regional com o mapa local (campo) em ambiente de RV (software GeoVisionary), na etapa Pós-Campo. Observa-se o deslocamento de contatos em relação aos dois mapas, e a relação com morfológica com o relevo.

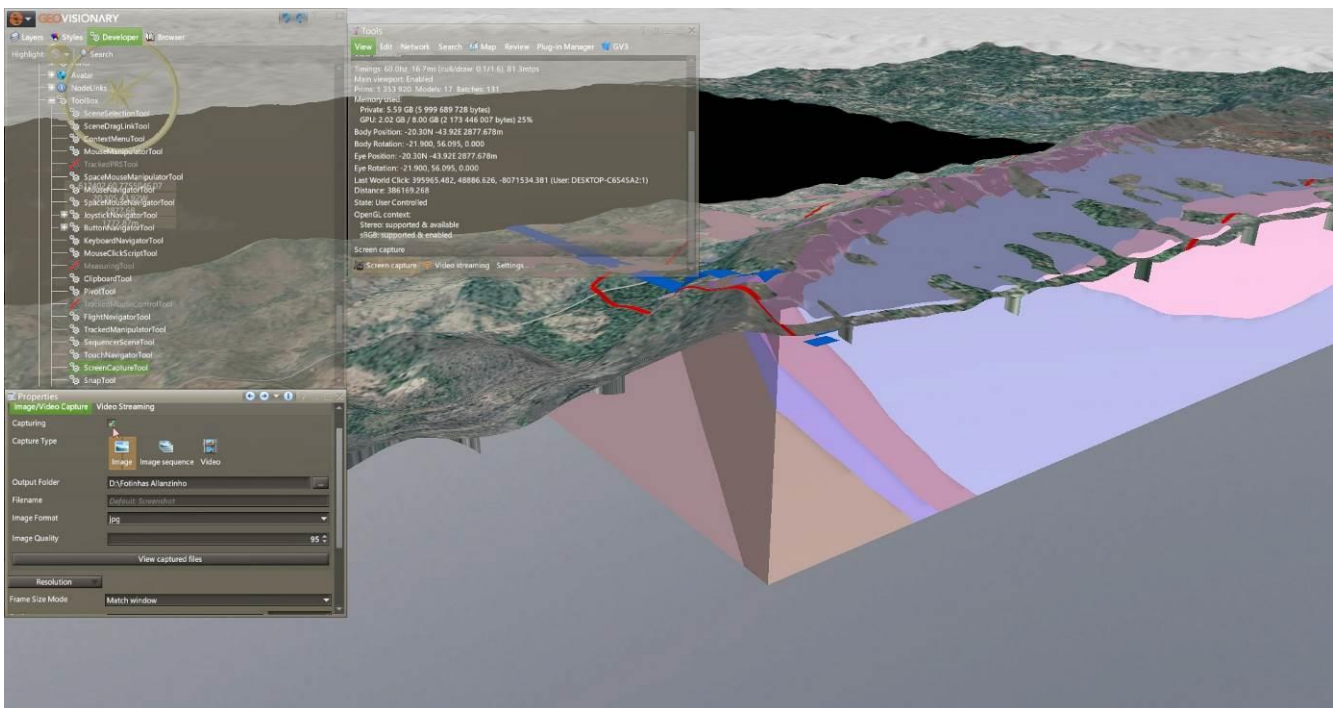


Figura 11 - Modelo Geológico local, construído a partir do mapeamento de campo e a reinterpretação dos dados em ambiente RV (Software GeoVisionary). Vista para NW, embasamento (rosa), formações Moeda (marrom), Batatal (roxo), Cauê (rosa escuro), Gandarela (roxo claro) e Cercadinho (rosa claro).

4.4 Considerações sobre as Nascentes d'Água na Serra da Moeda

Os produtos gerados pelas etapas anteriores serviram como base na análise da relação das características geológicas e estruturais da Serra da Moeda com a ocorrência de nascentes. A integração dos dados em ambiente RV, demonstrou uma relação da ocorrência das nascentes e as

características dos litotipos e estruturas associadas. Os dados estruturais foram tratados em estereogramas e adicionados ao software GeoVisionary, para observação do comportamento das estruturas mapeadas (Figura 12). No caso, foram reconhecidas 3 famílias de fraturas, as quais possuem direção preferencial para E/W, NE/SW, NW/SE. Observou-se que as fraturas de direção E-W são paralelas aos planos axiais dos dobramentos abertos sub-regionais ao longo da crista da Serra da Moeda, que possuem direção e eixo preferencialmente E/W com caimento variando para N e S. Estas estruturas (fraturamentos e planos axiais) são de certa forma estruturas obliquas ao encurtamento do Sinclinal Moeda, apresentando-se em condições com mais espaçamento, assim dizendo estruturas abertas, quais são as direções preferenciais para fluxo de água, ou seja, a dinâmica da água subterrânea, no caso da região das nascentes, está condicionada aos fraturamentos abertos paralelos aos planos axiais dos dobramentos abertos.

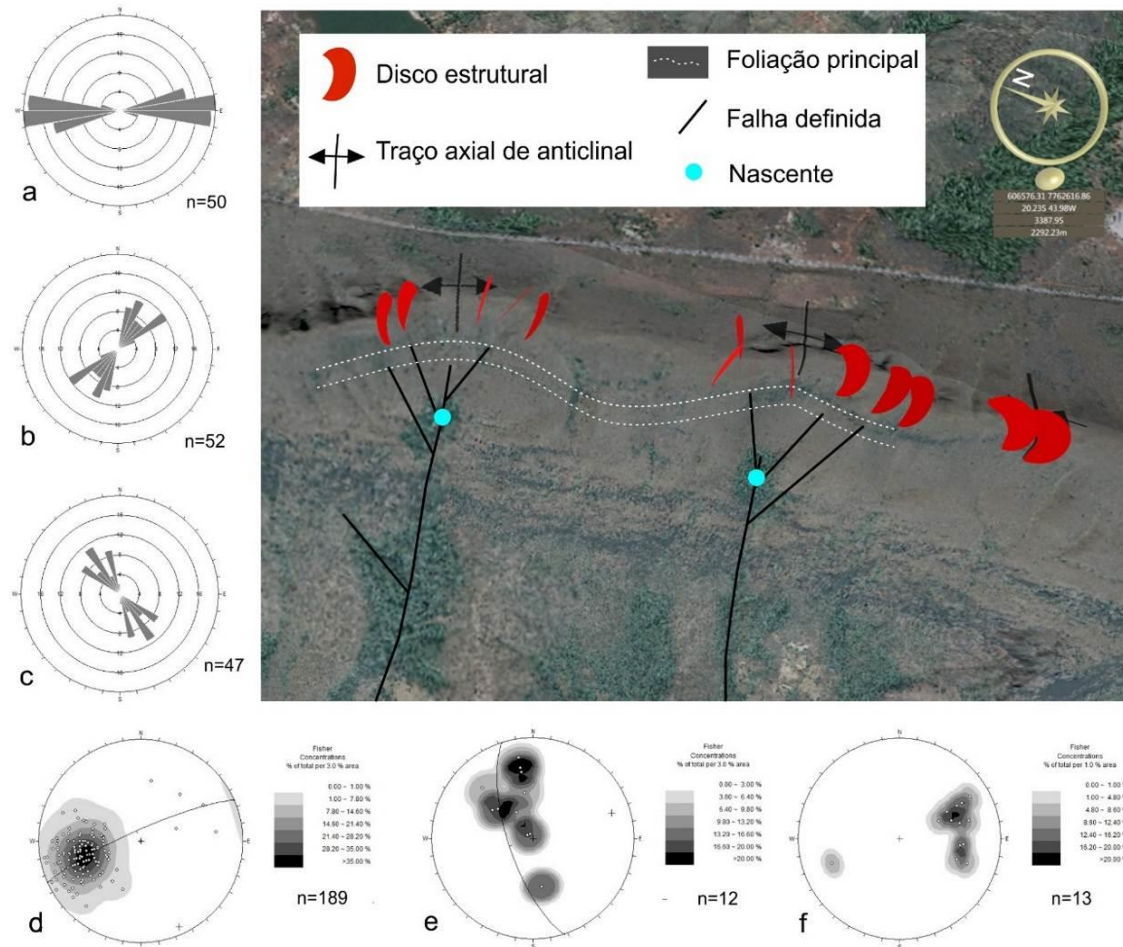


Figura 12: Dados integrados em ambiente RV (software GeoVisionary) com a representação das nascentes no contexto geológico estrutural. a: Roseta de fraturamentos E/W. b: Roseta de fraturamentos NE/SW. c: Roseta de fraturamentos NW/SE. d: Estereograma da foliação principal em formato de guirlanda, apontando o caimento do eixo para SSE, do Sinclinal Moeda. e: Estereograma de polos em formato de guirlanda da foliação principal dobrada, apontando eixo de caimento para ENE. f: Estereograma dos eixos das dobras abertas com eixo E/W. Linhas Brancas Tracejadas: linhas dos dobramentos abertos (Anticlinais com eixo E/W). Discos Vermelhos: planos de fraturamento e eixos axiais convergindo para o centro da dobra.

No caso, as nascentes principais ao longo da poligonal mapeada, ocorrem relacionadas no contato entre diferentes litotipos. Esta relação se deve as diferentes porosidades e condutividade hidráulica de acordo com o litotipo predominante. Exemplo são as nascentes da figura 12, que estão no contato entre 2 litotipos com comportamento hidrogeológico diferente; na base Formação Batatal (filitos), características de aquitardo e no topo Formação Cauê A (itabiritos) comportamento de aquífero fraturado.

Esta associação final ao dobramento com direcionamento do fluxo de água, é teorizada aqui com relação observada entre as nascentes e os dobramentos abertos, no caso de morfologia de anticlinais a montante das mesmas (Figura 13). O que resulta em que as direções de faturamento nestas regiões de anticlinais abertos, forma um leque de fraturas plano axiais aos dobramentos, direcionando o fluxo de água para em direção ao eixo de caimento do anticlinal. Esta relação explica a não ocorrência de outras nascentes associadas ao contato entre as formações Batatal e Cauê ao longo da serra, com exceção nas regiões onde estão associados aos anticlinais abertos com eixo preferencial E/W.

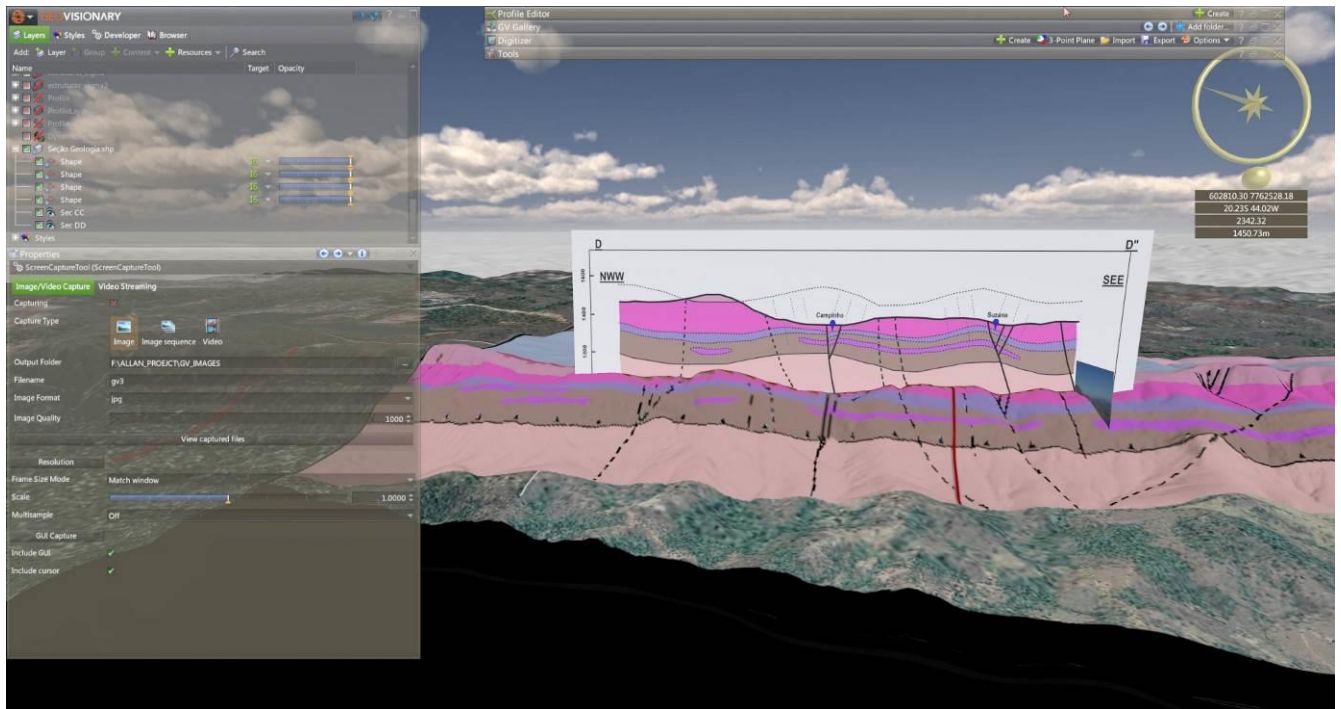


Figura 13 - Ambiente de RV (Software GeoVisionary), com a integração do mapa geológico local e o perfil NNW/SSE. Observa-se a relação das nascentes com a litologia (contato das Formações Batatal, roxo e Cauê, rosa escuro), associada com as ondulações de relevo da serra, marcada pelos dobramentos abertos, no caso nos anticlinais.

5. Conclusão

A aplicação da metodologia proposta pelo BGS (BGS Digital Workflow) com a inclusão da modelagem implícita, demonstrou uma otimização das etapas do mapeamento geológico e desenvolvimento das possibilidades de geovisualização dos dados. As análises de dados foram mais eficazes com a utilização da plataforma 3D em ambiente RV. O mapeamento digital em campo permitiu a aquisição de dados de forma precisa e organizada. O dispositivo móvel de campo (*toughbook*), com GPS e câmera integrados em ambiente SIG, proporcionou de maneira fácil e rápida, ativação e desativação de vários planos de informações, demonstrando mais eficiência na discussão e coleta de dados, devido a gama de informações carregadas em campo.

A aplicação da modelagem implícita, principalmente na confecção do produto, agregando um modelo 3D aos mapas e perfis tradicionais, é uma mudança cultural na apresentação de dados de mapeamento. Entretanto essa mudança do 2D para o 3D ainda é um paradigma, pois ainda se necessita de expressivos investimentos na aquisição destas ferramentas. Em vista da evolução tecnológica atual, prevê-se que o custo para aplicação destes softwares em um contexto geral deve cair relativamente rápido, devido a grande disseminação da utilização do ambiente RV, em diversas áreas associadas ao mapeamento geológico. Os processos de transformação paradigmática já

ocorreram em passado recente, com migração do uso de papel, fotografias aéreas, estereoscópios, mesas de luz, para uma base digital no CAD e SIG. Esta transformação gerou dificuldades de adaptação e resistência aos usuários, similar as ocorridas atualmente. A metodologia apresentada não se difere da metodologia tradicional de mapeamento, é apenas incorporada por novas ferramentas tecnológicas, pois como observado a base de interpretação e aquisição de dados juntamente com a apresentação dos resultados, são de certa forma iguais as tradicionais, mas potencializadas por softwares que melhoram a interpretação, visualização, e análise de dados, com integração de informações em ambiente RV e 3D.

Com base nestas preposições, observa-se que uma base consistente de dados pode se tornar mais significativa em termos espaciais, se estiver contida em uma estrutura que permite uma integração em diferentes formatos de visualização, o que permitirá uma compreensão do contexto geológico de forma multidisciplinar. Estas considerações estão orientadas para importância prática e analítica da coleta e interpretação de dados, que apresentou não apenas ganhos nos processos relacionados ao mapeamento, mas em ganhos conceituais, abrindo possibilidades de desenvolvimento teóricos e práticos para a pesquisa geológica.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPEMIG pelo apoio financeiro no desenvolvimento da pesquisa. A FEMSA pela disponibilidade das informações e ao BGS pelas discussões e uso das dependências laboratoriais.

7. Referências Bibliográficas

ARRUDA JUNIOR, E. R.; SEOANE, J. C. S.; MENEZES, P. M. L. L. Geotecnologias Portáteis e Produtos Gratuitos ou de Baixo Custo no Auxílio ao Mapeamento. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 62, p. 269-276, 2010.

BÜCHI, A.; NOVO, T., A.; CALAZANS, P. P.; SEOANE, J. C. S.; NAPIER, B.; CASTIGLIONE, L. H.; PAGUNG, R. Mapeamento Geológico na Exploração Mineral com uso de SIG e RV: Estudos Metodológicos. RBC. *Revista Brasileira de Cartografia (Online)*, 2018. (Submetido).

CALAZANS, P. M. P., CASTIGLIONE, L. H., BÜCHI, A., SEOANE, J. C. S., NAPIER B., FORD, J. 2016. Geovisualização em Ambientes de Realidade Virtual e sua Aplicação na Exploração Mineral. *Revista Brasileira de Cartografia*. 68/1: 43-61.

COWAN E. J.; BEASTON, R.K.; ROSS, H.J.; FRIGTH, W.R.; MCLENNAN, T.J.; EVANS, T.R.; CARR, J.C.; LANE, R.G.; BRIGHT, D.V.; GILLMAN, A.J.; OSCHURT, P.A. & TITLEY, M. *Practical Implicit Geological Modelling*, 5th International Mining Geology Conference Proceedings, AusIMM Publication Series 8/2003, 89-99. 2003.

ENDO, I., SILVA L. G., ZAVAGLIA G., ROCHA, F., O G., GUIMARÃES M. L. V., ROSAS C. F., LAGOEIRO L. E., SANTOS, G. J. I. 2004. Arcabouço estrutural e modelo evolutivo do Sinclinal Gandarela, Quadrilátero Ferrífero, MG. Resumo, XLII Congresso Brasileiro de Geologia, Araxá;

ESRI. 2008.ARCGIS 9 ARC Map Tutorial. ESRI USA. 58p. (http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/pdf/arcmap_tutorial.pdf)

JORDAN, C. 2009. SIGMA mobile: the BGS digital field mapping system in action: in the United Arab Emirates. In: *Digital Mapping Techniques 09*, West Virginia, USA, 10-13 May 2009. British Geological Survey. (Unpublished)(<http://nora.nerc.ac.uk/7482/>)

- JORDAN, C, NAPIER, B. 2016 Developing digital fieldwork technologies at the British Geological Survey. In: Bowman, M.; Jordan, C.J., (eds.) The value of outcrop studies in reducing subsurface uncertainty and risk in hydrocarbon exploration and production. London, UK, Geological Society of London, 219-229. (Geological Society Special Publication, 436).
- LOBATO, L.M.; BALTAZAR, O.F.; REIS, L.B.; ACHTSCHIN, A.B.; BAARS, F.J.; TIMBÓ, M.A.; BERNI, G.V; MENDONÇA, B.R.V. de; FERREIRA, D.V. 201 Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa. Belo Horizonte: CODEMIG, 2005. 1 CD-ROM
- McCAFFREY, K. J. W., JONES, R.R., HOLDSWORTH, R.E., WILSON, R.W., CLEGG, P., IMBER, J., HOLLIMAN, N., and TRINKS, I. 2005. Unlocking the Spatial Dimension - Digital Technologies and the Future of Geoscience Fieldwork: Journal of the Geological Society, v. 162, p. 927-938.
- NAPIER, B. GeoVisionary: virtual fieldwork for real geologists. 2011. V1 Magazine (<http://nora.nerc.ac.uk/13558/>).
- TERRINGTON, R.; NAPIER, B.; BÜCHI, A.; PROCÓPIO, P. M. 2015 Managing the mining cycle using GeoVisionary. In: Aachan International 5th Mining Symposia, Aachan, Germany, 27-28 May 2015.
- WESTHEAD, R.K., SMITH, M.; SHELLEY, W. A., PEDLEY, R. C., FORD, J., NAPIER, B. 2013 Mobile spatial mapping and augmented reality applications for nvironmental geoscience. Journal of Internet Technology and Secured Transactions, 2 (1-4). 185-190.
- WHITMEYER, S. J., NICOLETTI, J., DE PAOR, D. G., 2010. The digital revolution in geologic mapping: GSA Today, v. 20, no. 4/5, p. 4–10, doi:10.1130/GSATG70A.1.

7.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARRUDA JUNIOR, E. R.; SEOANE, J. C. S.; MENEZES, P. M. L. L. Geotecnologias Portáteis e Produtos Gratuitos ou de Baixo Custo no Auxílio ao Mapeamento. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 62, p. 269-276, 2010.

ATHEY, J. E.; FREEMAN, L. K.; WOODS, K. A. The Transition from Traditional to Digital Mapping: Maintaining Data Quality While Increasing Geologic Mapping Efficiency in Alaska. *Alaska GeoSurvey News*. Vol. 11, No. 2. 2008.

BRAGA, M. A.; CARLOS, D. U. SOUSA, R. R.; GALBIATTI, H.; ALMEIDA, T. Correção de terreno para dados de aerogravimetria gravimétrica 3D-FTG no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*, 28 (4), pag 703-722. 2010.

BÜCHI, A.; KARFUNKEL, J.; HOFMANN, M.; PIMENTA, F.; PAGUNG, R.; HOPPE, A.; FREITAS, C. R. Análise Multi-Temporal dos Georecursos ao norte de Belo Horizonte (MG): Estudo de Caso do Aluvião do Ribeirão da Mata. In: XLIII Congresso Brasileiro de Geologia, 2006, Aracaju -SE. 2006.

BÜCHI, A.; NOVO, T. A.; CALAZANS, P. P.; SEOANE, J. C. S.; NAPIER, B.; CASTIGLIONE, L. H.; PAGUNG, R. Mapeamento Geológico na Exploração Mineral com uso de SIG e RV: Estudos Metodológicos. RBC. *Revista Brasileira de Cartografia (Online)*, 2018. (Submetido).

CALAZANS, P. M. P. Geovisualização em Ambientes de Realidade Virtual: Mudança de paradigma na Exploração Mineral de Ferrosos. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geologia. 371 f. 2015.

CALAZANS, P. M. P.; CASTIGLIONE, L. H.; BÜCHI, A.; SEOANE, J. C. S.; NAPIER B.; FORD, J. Geovisualização em Ambientes de Realidade Virtual e sua Aplicação na Exploração Mineral. *Revista Brasileira de Cartografia*. 68/1: 43-61. 2016.

CASTIGLIONE, L. H. G.; CALAZANS, P. M. P. A constituição de uma base de dados geográficos para apoio a estudos geológicos: aspectos epistemológicos e práticos. In: SBSR – Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15, 2011, Curitiba. Anais eletrônicos. Curitiba: INPE, 2011.

COE, A. L.; ARGLES, T. W.; ROTHERY, D. A. & SPICER, R. A. (eds) 2010. *Geological Field Techniques*. xii 323pp. Wiley-Blackwell/Open University.2010.

COWAN, E. J.; BEASTON, R. K.; ROSS, H. J.; FRIGTH, W. R.; MCLENNAN, T. J.; EVANS, T. R.; CARR, J. C.; LANE, R. G.; BRIGHT, D.V.; GILLMAN, A. J.; OSCHURT, P. A. & TITLEY, M. Practical Implicit Geological Modelling, 5th International Mining Geology Conference Proceedings, AusIMM Publication Series 8/2003, 89-99. 2003.

COWAN, E. J.; LANE, R. G.; ROSS, H. J. Leapfrog's implicit drawing tool: a new way of drawing geological objects of any shape rapidly in 3D, in Mining Geology 2004 Workshop (eds: M.J. Berry and M.L. Quigley), Australian Institute of Geoscientists Bulletin, 41: 23–25.

CUVIER, G.; BRONGNIART, A. Essai sur la Géographie Minéralogique des Environs de Paris, avec une Carte Géognostique, et des Coupes de Terrain: Paris, Baudouin, 1808. 278 p.

ENDO, I., SILVA L. G., ZAVAGLIA G., ROCHA, F. O. G., GUIMARÃES M. L. V., ROSAS C. F., LAGOEIRO L. E., SANTOS, G. J. I. 2004. Arcabouço estrutural e modelo evolutivo do Sinclinal Gandarela, Quadrilátero Ferrífero, MG. Resumo, XLII Congresso Brasileiro de Geologia, Araxá.

ESRI.ARCGIS 9 ARC Map Tutorial. ESRI USA. 2008. 58p. (http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/pdf/arcmap_tutorial.pdf).

GOETZ, A. F.; ROCK, B. N.; ROWAN, L. C. Remote Sensing for exploration: an overview. Economic Geology, v.78. p. 570-73. 1983.

GUIMARAES FILHO, H. A. Metodologias para intercâmbio de dados entre programas de CADD, SGBD, PDI e SGI em projetos de exploração mineral. Campinas: Instituto de Geociências, 1994. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 1994. 118p.

JÉBRAK, M. Innovation in mineral exploration: successes and challenges. SEG Newsletter 86, 12–13. 2011.

JORDAN, C. SIGMA mobile: the BGS digital field mapping system in action: in the United Arab Emirates. In: Digital Mapping Techniques 09, West Virginia, USA, 10-13 May 2009. British Geological Survey. (Unpublished)(<http://nora.nerc.ac.uk/7482/>)

JORDAN, C.; BATESON, L.; BOW, J.; NEWELL, A.; NAPIER, B.; SABINE, R, J. GeoVisionary™ software for 3D visualisation and petroleum exploration in southern Tajikistan. In: RSPSoc.2009: New Dimensions in Earth Observation, Leicester, UK, 8-11 Sept 2009. (Unpublished) (<http://nora.nerc.ac.uk/8854/>).

JORDAN, C. & NAPIER, B. Developing digital fieldwork technologies at the British Geological Survey. In: Bowman, M.; JORDAN, C. J., (eds.) The value of outcrop studies in reducing subsurface uncertainty and risk in hydrocarbon exploration and production. London, UK, Geological Society of London, 219-229. (Geological Society Special Publication, 436). 2016.

KNOOP, P. A. & VAN DER PLUIJIM, B. GeoPad: Tablet PC-enabled Field Science Education. In: "The Impact of Pen-based Technology of Education: Vignettes, Evaluations, and Future Directions", eds., D. Berque, J. Prey, and R. Reed. Purdue University Press, 103-114. (133) 2006.

KRAMER, J. H. Digital Mapping Systems for Field Data, in Soller, D.R., editor, Digital Mapping Techniques '00 – Workshop proceedings: U.S. Geological Survey Open-file Report 00-325, p. 13-19. 2000.

LOBATO, L. M.; BALTAZAR, O. F.; REIS, L. B.; ACHTSCHIN, A. B.; BAARS, F. J.; TIMBÓ, M. A.; BERNI, G. V; MENDONÇA, B. R. V. de; FERREIRA, D. V. Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa. Belo Horizonte: CODEMIG, 2005. 1 CD-ROM

LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J. & RHIND, D. W. Geographic Information Systems and Science. Chichester: Wiley. .2001

MACHADO, M. M. M.; RENGER F. E.; RUCHYS, U. A. Estruturas Dobradas do Quadrilátero Ferrífero em Perfis Geológicos do Século. Geonomos, Belo Horizonte, v. 18, n. 2, p. 73-77, 2010.

McCAFFREY, K. J. W., JONES, R. R., HOLDSWORTH, R. E., WILSON, R. W., CLEGG, P., IMBER, J., HOLLIMAN, N., and TRINKS, I. 2005. Unlocking the Spatial Dimension - Digital Technologies and the Future of Geoscience Fieldwork: Journal of the Geological Society, v. 162, p. 927-938.

MENEGUETTE, A. A. C. A. Cartografia no século 21: revisitando conceitos e definições. Revista Geografia e Pesquisa, v. 6, p. 6-32, 2013. 2013.

MENEGUETTE, A. A. C. Geovisualização: exercícios práticos em sala de aula. Revista Brasileira de Cartografia (Impresso), v. 63, p. 831-841, 2014.

NAPIER, B. GeoVisionary: virtual fieldwork for real geologists. V1 Magazine (<http://nora.nerc.ac.uk/13558/>).2011.

SANTOS, T. C. C.; ANTUNES, M. A. H.; SEOANE, J. C. S.; SOUSA, G. M. Comparison of Atmospheric Correction Models for Worldview-2 Image. RBC. REVISTA BRASILEIRA DE CARTOGRAFIA (ONLINE), v. 69, p. 229-240, 2017.

SCHEIB, A, J. G-BASE trials of SIGMA digital field data capture: feedback and recommendations. British Geological Survey, 21pp. (IR/05/015) 2005. (Unpublished)

SEOANE, J. C. S.; OSAKO, L. S. ; SILVA FILHO, A. F. . Prospecção de rochas ornamentais auxiliada por sistema de informação geo-referenciada. Revista Brasileira de Geociências, v. 33, n.2, p. 73-82, 2003.

SHUFELDT, O.; WHITMEYER, S. J.; & BAILEY, C. M. The New Frontier of Interactive, Digital Geologic Maps: Google Earth-Based Multi-Level Maps of Virginia Geology. In Whitmeyer, S.J., De Paor, D.G., Bailey, J., and Ornduff, T. (eds) Google Earth and Virtual Visualizations in Geoscience Education and Research, GSA Special Paper 492, p. 147-164, doi: 10.1130/2012.2492(11). 2012.

SIGEL, H. O. Exploration. Mining Annual Review, Jun. 185:9-12. 1985.

SOUZA FILHO, C. R. & CROSTA, A. P. Geotecnologias aplicadas a Geologia. Rev. Bras. Geoc., 33(2-Suplemento): 1–4. 2003.

TERRINGTON, R.; NAPIER, B.; BÜCHI, A.; PROCÓPIO, P. M. Managing the mining cycle using GeoVisionary. In: Aachan International 5th Mining Symposia, Aachan, Germany, 27-28 May 2015.

WESTHEAD, R. K.; SMITH, M.; SHELLEY, W. A.; PEDLEY, R. C.; NAPIER, B. Mapping the geological space beneath your feet: the journey from 2D paper to 3D digital spatial data. In: Information Society (i-society): 2012 International Conference, London, UK, 25-28 June 2012. IEEE, 99-102.2012.

WESTHEAD, R. K., SMITH, M.; SHELLEY, W. A., PEDLEY, R. C., FORD, J., NAPIER, B. Mobile spatial mapping and augmented reality applications for nvironmental geoscience. Journal of Internet Technology and Secured Transactions, 2 (1-4). 185-190.2013.

WHITMEYER, S. J.; NICOLETTI, J.; DE PAOR, D. G. The digital revolution in geologic mapping: GSA Today, v. 20, no. 4/5, p. 4–10, doi:10.1130/GSATG70A.1. 2010.

WHITMEYER, S. J. Community Mapping in Geology Education and Research: How Digital Field Methods Empower Student Creation of Accurate Geologic Maps. In Kastens, K.A.,

and Manduca, C.A. (eds) *Earth and Mind II: A Synthesis of Research on Thinking and Learning in the Geosciences*, GSA Special Paper 486, p. 171-174, doi: 10.1130/2012.2486(27). 2012.

8.0 - ANEXO I - Carta de Colaboração entre o Autor e o
BGS (Serviço Geológico Britânico)

9.0 - ANEXO II - Comprovação de submissão do Artigo



**British
Geological Survey**

NATURAL ENVIRONMENT RESEARCH COUNCIL

Prof. Dr Tiago Amâncio Novo
Instituto de Geociências - Departamento de Geologia
Programa de Pós-Graduação
Universidade Federal de Minas Gerais
Avenida Presidente Antônio Carlos 6627
Pampulha - Belo Horizonte/MG CEP: 3409-5000

Keyworth

Environmental Science Centre
Keyworth
Nottingham
United Kingdom
NG12 5GG

Telephone +44(0)115 9363100
Direct Line +44(0)115 9363199
E-mail brn@bgs.ac.uk
Web www.bgs.ac.uk

17 March 2018

Dear Tiago,

I am writing in my capacity as Team Leader for 3D Visualisation Systems at the British Geological Survey (BGS) to offer support for the candidate, Graduate in Geology from IGC / UFMG, and candidate for the Master's Program, who has proposed a project entitled "Metodologia SIGMA no Modelamento Geológico-Estrutural do Lineamento São Vicente/Paciência, Quadrilátero Ferrífero – MG".

The BGS will host the candidate at its head office in Keyworth, UK for two or more two-week periods during his studies. During these periods, the BGS will provide the candidate with access to 3D visualisation systems, GeoVisionary and SIGMA software, as well as experts in the field of geotechnology as applied to field work, 3D geological modelling and virtual reality. The candidate will be supervised during the visits by Bruce Napier, and a programme of work appropriate to the project will be devised.

The use of technology is not new in geological mapping work. Digital media in 2D and 3D environments is well established in the academic and industrial environment, related to various areas of geosciences. The project proposed here is the application of a contextualized methodology in several geotechnologies associated with geological mapping and structural interpretation.

The proposed activities have been the candidate's object of study in recent years, taking part in research groups related to digital fieldwork technology, and the candidate has co-authored several publications (journals, book chapters and abstracts in conference proceedings).

The project will be funded by the candidate himself and will have participation of Outcrop-BR company with allowance for field activities and office support. The geotechnology software will be provided by the BGS, in this case the institution will make available its facilities for conducting research and development work. The applicant has close relations with the BGS, and has conducted mapping and research activity related to the methodology proposed here both in Brazil and in England (Annex I). Allan has been involved in a project with the BGS and Vale which involved developing the BGS Digital Workflow (SIGMA + GeoVisionary + Virtual Reality + Data Management) for use in ferrous mineral exploration.



INVESTOR IN PEOPLE



This included field and office work in Brazil and the UK, where his knowledge, skills, enthusiasm and energy were an asset to the project. The proposed project will build on this methodology for new developments in geological mapping and structural interpretation.

If there are any further questions regarding the support offered by the BGS, please do not hesitate to ask.

Yours sincerely,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'B. Napier', with a long horizontal stroke extending to the right.

Bruce Napier

Team Leader 3D Visualisation Systems

CAPA SOBRE PÁGINA DO USUÁRIO PESQUISA ATUAL ANTERIORES NOTÍCIAS

Capa > Usuario > Autor > Submissões > #2182 > Avaliação

#2182 AVALIAÇÃO

RESUMO AVALIAÇÃO EDIÇÃO

SUBMISSÃO

Autores
Allian Buchi, Tiago Amanco Novo, Patricia Moreira Procopio Calazans, José Carlos Sroli Seane, Bruce Naper, Luiz Henrique Guimarães Castiglione, Ricardo Pagnug
Título
MAPEAMENTO GEOLÓGICO NA EXPLORAÇÃO MINERAL COM USO DE SIG E REALIDADE VIRTUAL: ESTUDOS METODOLÓGICOS
Série
Artigos
Editor
Alan Salomão Graça

AVALIAÇÃO

RODADA 1

Versão para avaliação
2182-13302-1-R1R1AR_2018-02-05
Iniciado
—
Última alteração
—
Arquivo enviado
Nenhuma (0)

DECISÃO EDITORIAL

Decisão
—
Notificar editor
 Comunicação entre editor e autor [Sem comentários](#)
Versão do editor
Nenhuma (0)
Versão do autor
Nenhuma (0)
Transferir Versão do Autor

Revista da Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Topometria e Sensoriamento Remoto - SBCC | Copyright © 2010 | Todos os direitos reservados

IDIOMA

Selecionar idioma

Português (Brasil)

USUÁRIO

Logado como:

zall17

Perfil

Sair do sistema

CONTEÚDO DA REVISTA

Pesquisa

Escopo da Busca

Todos

Procurar

Por Edição

Por Autor

Por título

AUTOR

Submissões

Arquivo (1)

Arquivo (1)

Nova submissão

TAMANHO DE FONTE

Ajuda do sistema

INFORMAÇÕES

Para leitores

Para Autores

Para Bibliotecários