



## SENSORIAMENTO REMOTO MULTI-ESCALA EM REGOLITOS ACIMA DE ZONAS MINERALIZADAS DE ALTA FLORESTA - MT

**Palavras-Chave:** SENSORIAMENTO REMOTO, REGOLITOS, PROSPECÇÃO MINERAL

**Autores/as:**

JULIANA NOGUEIRA MONTEIRO [UNICAMP]; PROF. DR. DIEGO FERNANDO DUCART [UNICAMP]; ME. MATEUS DE PAULA MIRANDA [UNICAMP]

### INTRODUÇÃO

A Província Mineral de Alta Floresta (PMAF) constitui uma região de grande importância metalogenética, no Brasil, sendo uma das principais regiões produtoras de metais no país no período de 1980 e 1999 (Paes de Barros, 2007). Inicialmente a extração de ouro (Au) se dava a partir de garimpo em depósitos aluvionários-colvionários, porém atualmente a extração é concentrada nas ocorrências primárias (Assis, 2015). A região ainda possui grande potencial de exploração, sendo que mostrou mais de uma centena de depósitos primários de alto teor e pequeno porte (<5t Au) (Paes de Barros, 2007).

Na PMAF são encontrados regolitos resultado de ações intempéricas ao longo de sua evolução, tais regolitos afetam a expressão superficial dos depósitos minerais presentes na região (Butt & Zeegers, 1992), levando a lixiviação ou concentração de metais em múltiplos horizontes de um regolito (Porto, 2016). Ademais, a erosão e a deposição podem redistribuir os indicadores de presença de mineralização. Desse modo, o processamento de imagens e sua fo-

tointerpretação é de extrema relevância para a análise de dados geológicos nestas áreas (Nadalin *et al.*, 2016). Na região do VNIR (0,38-1,0  $\mu\text{m}$ ) os óxidos de ferro apresentam grande absorção, devido a camadas de elétrons não preenchidas de elementos de transição (Burns 1993), ou onde a absorção de um fóton faz com que um elétron se mova entre íons ou entre íons e ligantes (Sherman e Waite 1985).

### OBJETIVOS DA PESQUISA

O projeto tem como objetivo caracterizar os regolitos acima das zonas mineralizadas de Alta Floresta (MT), utilizando técnicas de sensoriamento remoto, com imagens multiespectrais do Sentinel - 2 e Worldview 2. Desse modo, busca auxiliar na elaboração de metodologias de exploração espectral e de sensoriamento remoto adequadas na área da PMAF. A partir dos regolitos presentes no local de estudo, acredita-se que será possível customizar e otimizar a prospecção mineral gerando novas ferramentas de prospecção mineral.

### CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

A Província Mineral de Alta Floresta (PMAF) (Fig. 1) está localizada na porção centro-sul do Cráton Amazônico, na região norte do estado de Mato Grosso (Souza *et al.*, 2005). Possui direção NW-SE limitada a norte pelo gráben Cachimbo e a sul pelo gráben do Caiabis (Assis, 2012). De acordo com Tassinari & Macambira (1999), a PMAF está inserida nas províncias geocronológicas Ventuari-Tapajós (1,95-1,8 Ga) e Rio Negro-Juruena (1,8-1,55 Ga). No entanto, Santos *et al.* (2001) a insere nas províncias Tapajós-Parima (2,03-1,88 Ga) e Rondônia-Juruena (1,82-1,54 Ga). Tais classificações diferem a partir do modelo geotectônico adotado.

Esta região compreende depósitos minerários ao longo do alinhamento Peru-Trairão (NW/SE), que se estende por mais de 150 km (Miguel-Jr, 2011). A região é datada de idade Paleo a Mesoproterozóica (Tassinari & Macambira, 1999; Santos, 2006; Silva & Abram, 2008), composta de suítes plutono-vulcânicas, sendo formada em ambiente de arco magmático (Souza *et al.*, 2005).

A região englobada neste trabalho se dá a partir de uma área retangular, que está localizada na porção leste da PMAF, abrange os municípios de Guarantã, Matupá, Nova Guarita, Novo Mundo e Peixoto de Azevedo.

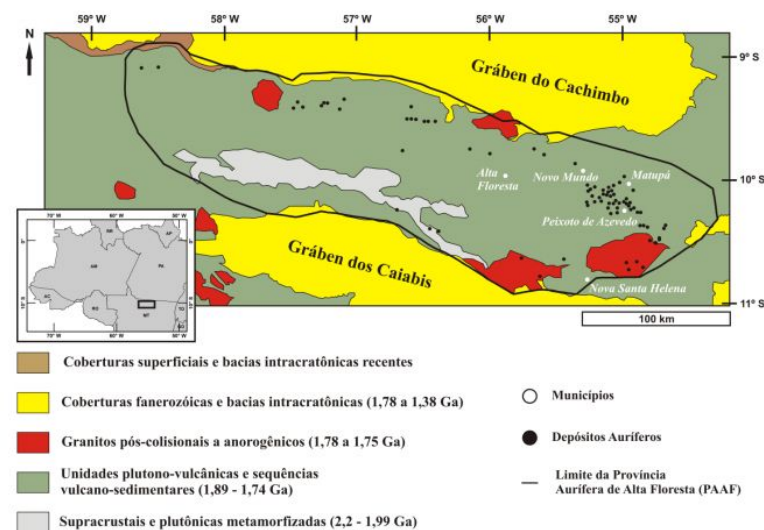


Figura 1: Mapa de localização da Província Aurífera de Alta Floresta e dos depósitos de ouro primário e secundário (Paes de Barros, 2007).

## METODOLOGIA

O trabalho se deu a partir da utilização de imagens multiespectrais do satélite/sensor Sentinel 2/MSI e Worldview 2. O satélite Sentinel 2 é fornecido pelo *Copernicus European Earth Observation programme* estabelecido pela *European Space Agency (ESA)*. Foi lançado em 2015 e tem como um dos seus instrumentos o sensor *MultiSpectral Instrument (MSI)* que possui 13 bandas, sendo 4 no VNIR, 6 no SWIR e 3 no TIR, com, respectivamente, 10, 20 e 60 metros de resolução espacial (Drusch et al., 2012). O satélite Worldview 2 é fornecido pela *DigitalGlobe*. Foi lançado em 2009, possui 8 bandas multiespectrais na região do VNIR e uma pancromática, com resolução espacial de 1,8 m e 0,46 m respectivamente.

Em relação às imagens Sentinel 2/MSI, foram necessárias 4 cenas do período de 26 de julho de 2019 da base de dados *Copernicus Open Access Hub*. Com isso, foram realizados os pré-processamentos nas imagens. As cenas foram processadas no *software SNAP* a fim de realizar as correções radiométrica e atmosférica. Para isso, foi utilizada a extensão de processamento *Sen2Cor280* e em seguida foi realizada a reamostragem das bandas, a partir da ferramenta *resampling*. Por fim, foi feito o agrupamento das quatro cenas utilizadas, resultando em um mosaico, a partir da ferramenta *mosaicking*.

Quanto ao satélite Worldview 2, foi utilizado apenas uma imagem que cobre uma faixa da porção central da área, a cena foi coletada no 08/08/2011 com um ângulo de visada de 37,9°. O pré processamento se deu a partir do *software ENVI* e realizados as correções radiométricas e atmosféricas.

Para ambas as imagens, foi aplicado o índice de vegetação NDVI e ajustado o histograma da imagem identificando a região de vegetação. Além disso, a fim de realçar as áreas cobertas com vegetação, foi realizada uma máscara. Por fim, com o intuito de mapear os óxidos de ferro e argilas da região foi realizado procedimentos de divisões de bandas, a partir da ferramenta *band maths*.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em relação ao mapeamento de óxidos de ferro, foi realizado a partir do método aplicado por Ducart *et al.* (2016) com o Landsat-8/OLI. Este método consiste na razão de banda  $[(4+6)/5]$  do Landsat-8/OLI. A Goethita e a Hematita têm absorção em 0,63-0,71 e 0,85-1,0  $\mu\text{m}$  devido a elementos de transição, enquanto em 0,48 e 0,55  $\mu\text{m}$  tem absorção por transferência de carga (Morris et al. 1985). O satélite Sentinel 2 tem destaque na capacidade de mapear óxidos de ferro (Mielke et al., 2014) sendo utilizado a região de absorção próxima aos 0,85 - 1,0  $\mu\text{m}$  (Mielke et al., 2015).

Neste trabalho foram utilizadas as bandas equivalentes a do Sentinel 2/MSI, desse modo, temos a razão de banda  $[(4+11)/8a]$ , resultando na detecção da absorção da banda 8a útil para identificação de óxidos de ferro férrico, como hematita e goethita. Com o ajuste de histograma, foram observadas as respostas mais similares aos espectros de reflectância dos óxidos de ferro (fig. 2).

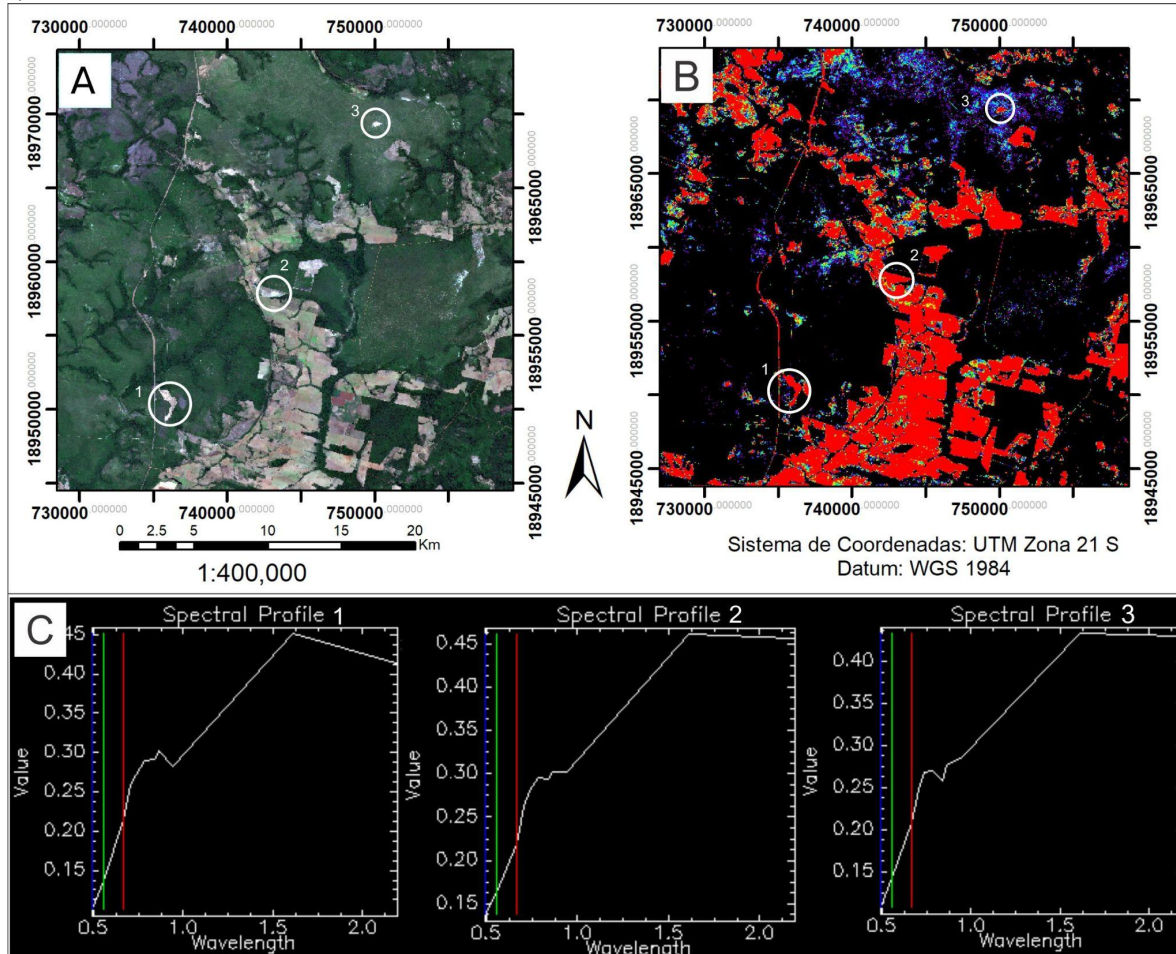


Figura 2: A - Imagem Sentinel 2/MSI de composição RGB cor real da região com principais alvos de reflectâncias similares a de hematita e goethita. B - Imagem da região com o processamento de razão de banda  $[(4+11)/8a]$  e ajuste de histograma com identificação dos principais alvos; C - Espectro de reflectância retirado do *software* ENVI dos alvos identificados na figura B.

Em relação ao mapeamento de óxidos de ferro no sensor WorldView 2, foi reamostrado o IFe (índice férrico) usado por Madeira Netto (1993) para as bandas do WorldView 2, utilizando a banda yellow (SVW4) e a banda green (SVW3). Desse modo, foi utilizado seguinte razão de bandas para identificação de óxidos  $[(swv4-svw3) / (swv4+swv3)]$  resultando na detecção da absorção da banda SVW3 útil para identificação e diferenciação de óxidos de ferro férrico, como hematita e goethita (Fig. 3).

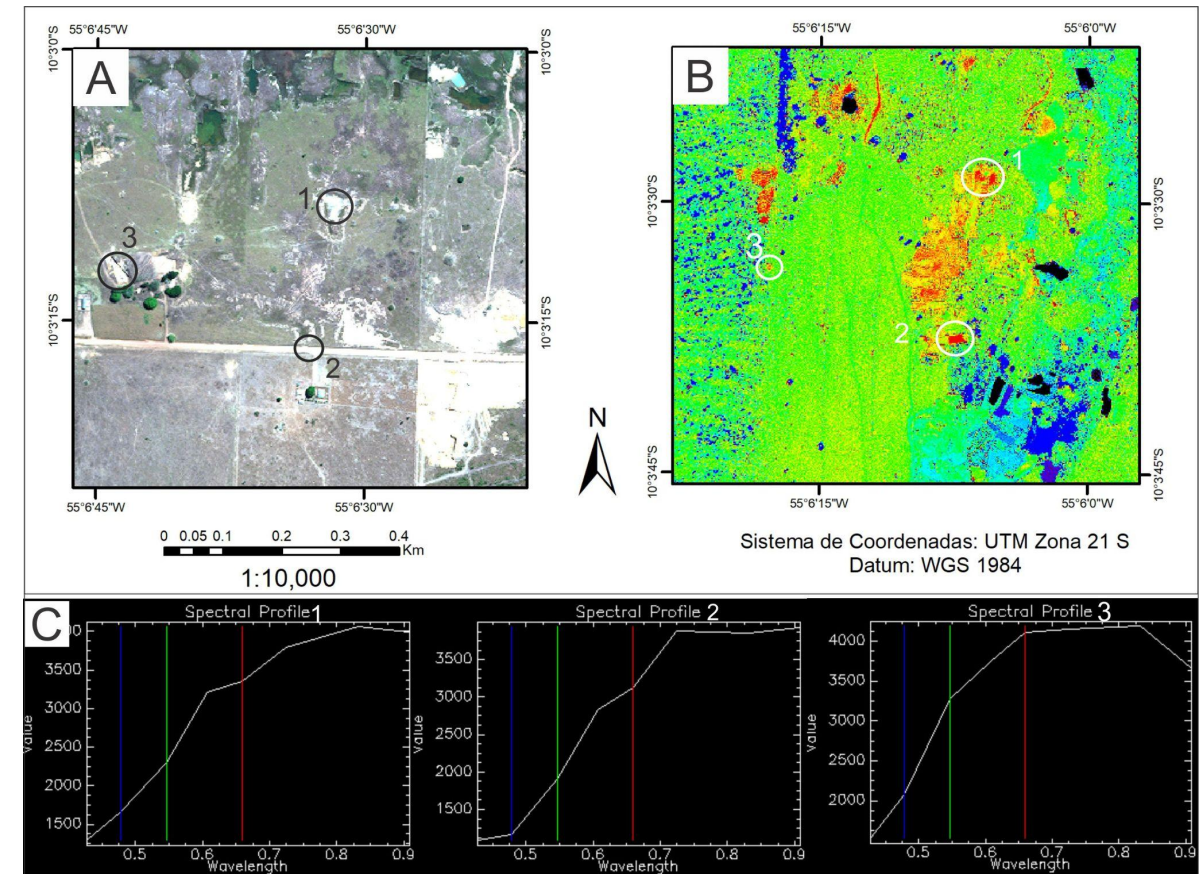


Figura 3: A - Imagem Worldview 2 de composição RGB cor real da região com principais alvos de reflectâncias similares a de hematita e goethita. B - Imagem da região com o processamento de razão de banda do IFe  $[(swv4-svw3) / (swv4+swv3)]$  e ajuste de histograma com identificação dos principais alvos; C - Espectro de reflectância retirado do *software* ENVI dos alvos identificados na figura B.

Para mapeamento de argilas, podemos observar que os minerais de argila como a Caulinita possuem alta reflectância nas bandas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 8a e 11 e uma região de absorção na banda 12 do Sentinel 2/MSI. Comumente é utilizado as bandas 11 e 12 para identificação de minerais de argila (Rowan et al. 1974, Goetz & Rowan 1981), em contrapartida sua similaridade com as respostas espectrais da vegetação nessa região podem dificultar a identificação. Neste trabalho foi utilizado a razão de bandas b11/b12, a partir da aplicação da máscara para diferenciar a vegetação (Fig. 4).

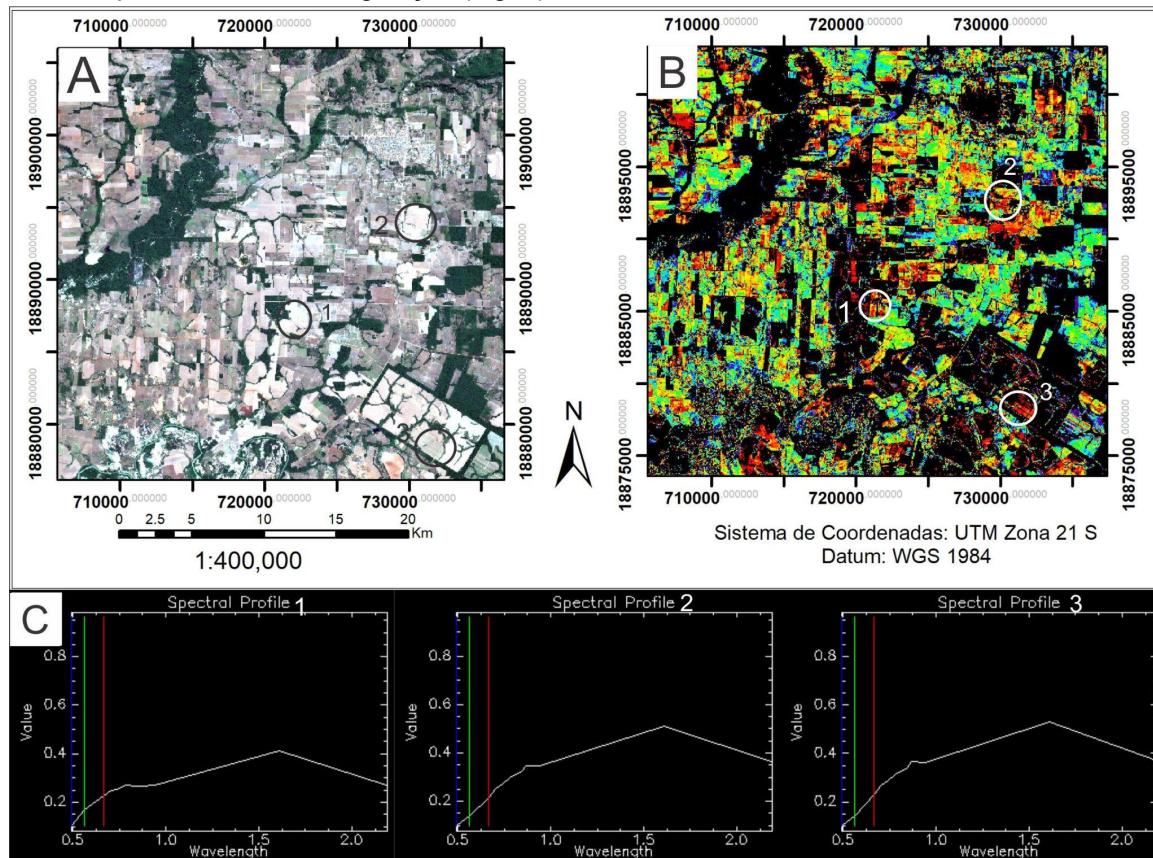


Figura 4: A - Imagem Sentinel 2/MSI de composição RGB cor real da região com principais alvos de reflectâncias similares a de argilas. B - Imagem da região com o processamento de razão de banda (11/12) e ajuste de histograma com identificação dos principais alvos; C - Espectro de reflectância retirado do *software* ENVI dos alvos identificados na figura B.

## CONCLUSÕES

Neste trabalho foi possível a caracterização dos regolitos acima das zonas mineralizadas de Alta Floresta (MT), a partir de técnicas de razão de bandas em imagens multiespectrais do Sentinel 2 e Worldview 2. O Sentinel 2 mostrou-se adequado para mapeamento dos regolitos principalmente para detecção de óxidos de Fe utilizando a divisão de bandas  $[(4+11)/8a]$ . Quanto ao mapeamento de argilas, foi obtido resultados satisfatórios a partir da divisão de bandas 11/12.

Entretanto houve empecilhos, a grande quantidade de vegetação fez com que fosse necessário a criação de uma máscara nas imagens, tornando possível a identificação tanto dos óxidos de Fe quanto de Argila no Sentinel 2. Em relação ao WorldView 2 a utilização do IFe  $[(swv4-svw3) / (swv4+swv3)]$  apresentou resultados muito satisfatórios, mostrando espectros semelhantes a goethita, podendo diferenciar os óxidos em hematita e goethita em futuros usos desta técnica.

Com isso, o trabalho realizado atingiu os resultados esperados de mapeamento da PMAF, sendo possível auxiliar em técnicas de exploração espectral por meio do sensoriamento remoto, otimizando a prospecção mineral do local.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimento ao CNPq/PIBIC pelo financiamento da bolsa de iniciação científica. Ao Instituto de Geociências da UNICAMP. Ao meu orientador que se fez presente mesmo durante a situação pandêmica e remota na qual estamos inseridos e ao meu co-orientador pelo auxílio e aconselhamentos nos estudos do trabalho.

## BIBLIOGRAFIA

- ASSIS, R. R.; XAVIER R. P.; PAES DE BARROS A.J.; BARBUENA D.; TREVISAN, V. G.; RAMOS, G. S.; TEIXEIRA, R DE. V.; MIGUEL JR E.; RODRIGUES R.M.; STABILE JR, A.; SANTOS, T.S.; MIRANDA, G. M.; BARROS, M. A. S.; PINHO, F. **Depósitos de Au + metais de base associados a sistemas graníticos Paleoproterozóicos do setor leste da Província Aurífera de Alta Floresta (MT), Cráton Amazônico**. 2012.
- ASSIS R.R. **Depósitos auríferos associados ao magmatismo félsico da Província de Alta Floresta (MT), Cráton Amazônico: idade das mineralizações, geoquímica e fonte dos fluidos**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 363p., 2015.
- BURNS R. **Mineralogical Applications of Crystal Field Theory**. 2º ed. Cambridge, Cambridge University Press, 551 p., 1993.
- BUTT, C.R.M. ZEEGERS, H. **Regolith Exploration Geochemistry in Tropical and Subtropical Terrains**. Elsevier, Amsterdam, 609 pp., 1992.
- DRUSCH, M., BELLO, U.D., CARLIER, S., COLIN, O., FERNANDEZ, V., GASCON, F., HOERSCH, B., ISOLA, C., LABERINTI, P., MARTIMORT, P., MEYGRET, A., SPOTO, F., SY, O., MARCHESE, F., BARGELLINI, P. **Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services**. Remote Sens. Environ. 120 (Suppl. C), 25–36 (The Sentinel Missions – New Opportunities for Science). 2012.
- DUCART, D.F., SILVA, A.M., TOLEDO, C.L.B., DE ASSIS, L.M. **Mapping iron-oxides with Landsat-8/OLI and EO-1/Hyperion imagery from the Serra Norte iron deposits in the Carajás Mineral Province, Brazil. Braz. J. Geol.** 46 (3), 331–349, 2016.
- MADEIRA NETTO, J. da S. **Étude quantitative des relations constituants minéralogiques – réflectance diffuse des latosols brésiliens: application à l'utilisation pédologique des données satellitaires TM (région de Brasília)**. Paris: Orstom, 240p. 1993.
- MIGUEL JR E. **Controle Estrutural das mineralizações auríferas e idades U-Pb das rochas encaixantes ao longo do Lineamento Peru-Trairão: Província Aurífera de Alta Floresta, Mato Grosso**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 86p., 2011.
- MIELKE, C., BOESCHE, N.K., ROGASS, C., KAUFMANN, H., GAUERT, C. **New geometric hull continuum removal algorithm for automatic absorption band detection from spectroscopic data**. Remote Sens. Lett. 6 (2), 97–105. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2015.1007246>. 2015.
- MIELKE, C., BOESCHE, N.K., ROGASS, C., KAUFMANN, H., GAUERT, C., DE WIT, M. **Spaceborne mine waste mineralogy monitoring in South Africa, applications for modern push-broom missions: Hyperion/OLI and EnMAP/Sentinel-2**. Remote Sens. 6 (8), 6790–6816. 2014.
- MORRIS R.V., LAUER H.V., LAWSON C.A., GIBSON E.K., NACE G.A., STEWART C. **Spectral and other physicochemical properties of submicron powders of hematite (alpha-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), maghemite (gamma-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), goethite (alpha-FeOOH) and lepidocrocite (gamma-FeOOH)**. Journal of Geophysical Research-Solid Earth and Planets, 90:3126-3144. 1985.
- NADALIN, R. J. **Fotointerpretação de relevo aplicada a cartografia geológica**. In: NADALIN, Rubens José et al. Tópicos Especiais em cartografia Geológica. 2. ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná. Cap. 4. p. 111-148. 2016.
- PAES DE BARROS A.J. **Granitos da região de Peixoto de Azevedo – Novo Mundo e mineralizações auríferas relacionadas – Província Aurífera Alta Floresta (MT)**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 154p., 2007.
- PORTO, C. G. **Geochemical exploration challenges in the regolith dominated Igarapé Bahia gold deposit, Carajás, Brazil**. Ore Geology Reviews, 73(3), 432-450. 2016.
- SANTOS J.O.S., GROVES D.I., HARTMANN A., MOURA M.A., MCNAUGHTON N.J. **Gold deposits of the Tapajós and Alta Floresta domains, Tapajós-Parima orogenic belt, Amazon Craton, Brazil**. Mineralium Deposita, 36:278-299. 2001.
- SANTOS J.O.S., HARTMANN L.A., FARIA M.S.G., RIKER S.R., SOUZA M.M., ALMEIDA M.E., MCNAUGHTON N.J. **A compartimentação do Cráton Amazonas em províncias: avanços ocorridos no período 2000- 2006**. In: SBG-NO, Simp. Geol. Amaz., 9, Belém, CD-Rom. 2006.
- SHERMAN D.M. & WAITE T.D. **Electronic spectra of Fe<sup>3+</sup> oxides and oxide hydroxides in the near IR to near UV**. American Mineralogist, 70:1262-1269.1985.
- SILVA M.G. & ABRAM M.B. **Projeto metalogenia da Província Aurífera Juruena-Teles Pires, Mato Grosso**. Goiânia, Serviço Geológico Brasileiro, CPRM, 212p., 2008.
- SOUZA J.P., FRASCA A.A.S., OLIVEIRA C.C. **Geologia e Recursos Minerais da Província Mineral de Alta Floresta. Relatório Integrado**. Brasília, Serviço Geológico Brasileiro, CPRM, 164p., 2005.
- TASSINARI C.C.G. & MACAMBIRA M.J.B. **Geochronological Provinces of the Amazonian Craton**. Episodes, 22(3):174-182. 1999.