

Petrografia e geoquímica dos gonditos associados ao embasamento do Orógeno Brasília Sul, regiões de Itapira e Socorro, Estado de São Paulo

Palavras-Chave: *Orógeno; Manganês; Óxidos; Hidróxidos; Gonditos; Petrografia; Mapeamento; Caracterização.*

Autores(as):

LUIS HENRIQUE FERNANDES COELHO, IG - UNICAMP

Prof. Dr. WAGNER DA SILVA AMARAL, IG - UNICAMP

INTRODUÇÃO:

O manganês (Mn) destaca-se nas aplicações em superligas metálicas, indústria química, agricultura e baterias, sendo considerado um “mineral estratégico” nos dias atuais (Cannon et al., 2017). Ocorrendo na natureza em forma de óxidos, hidróxidos, carbonatos e silicatos, e encontrado em variadas classes minerais (Stanton 1972), o Mn ocorre em menores proporções nos solos, como minerais secundários, originados pela interação entre a água e rocha.

Frequentemente é encontrado em depósitos associados a rochas metas sedimentares. Por Biondi (2003), os depósitos de Mn podem ser classificados como hidrotermais, sedimentares ou supergênicos, sendo esses os principais depósitos de Mn encontrados em regiões tropicais. Os depósitos supergênicos estão associados a processos pedogenéticos, demonstrando a interação entre a rocha e o clima, além da vegetação e relevo, com destaque na ação da água. A alteração química das rochas pelo clima tropical leva à assembleia mineralógica para novos minerais e mais estáveis. Em regiões tropicais, perfis de intemperismo são comumente observados apresentando crostas ferruginosas, com zonas de crescimento de gibbsita, hematita e goethita.

A área de estudo está inserida em um cenário geológico intrigante, onde os corpos litológicos e estruturais associados ao Mn são reflexo da Orogênese Brasileira, um evento neoproterozóico de colisão entre a margem leste passiva do Cráton São Francisco (CSF) e a margem oeste ativa da Placa Paranapanema, com fechamento de oceanos e a subsequente colisão continental. Este processo resultou na formação do Orógeno Brasília Sul (OBS), com sistemas de nappes e metamorfismo que varia de fácies xisto verde a granulito, incluindo a Nappe de Empurrão Socorro-Guaxupé (NESG), que se associa regionalmente com a região estudada (Heilbron et al., 2017; Campos Neto & Caby, 2000; e Campos Neto et al., 2004).

A região destaca-se por possuir corpos gondíticos associados ao contexto do Orógeno Brasília Sul, além de litotipos ricos em espessartita (granada manganésifera) e quartzo (Qtz), encontradas nos arredores dos municípios, com perfis de alteração intempélica evidente, enriquecidos em óxidos e hidróxidos de Mn. O OBS abriga ocorrências de Mn supergênico nas regiões SE de São Paulo e sul de Minas Gerais, formadas a partir das interações água/rocha dos gonditos. (Angeli et al., 2011; Verissimo, 1991). Assim, o projeto tem por objetivo caracterizar as ocorrências de manganês presentes no contexto do embasamento do Orógeno Brasília Sul, nas

regiões entre Itapira-SP, Socorro-SP, Jacutinga-MG e Ouro Fino-MG, em função a petrografia, geoquímica dos litotipos, geocronologia e sensoriamento remoto, afim de contribuir para um melhor entendimento dos corpos observados e servir como embasamento para futuras pesquisas.

ÁREA DE ESTUDO E METODOLOGIA:

A área de estudo que abrange quatro municípios, sendo eles de Itapira-SP, Socorro-SP, Jacutinga-MG e Ouro Fino-MG, com destaque a formas lenticulares de ocorrência do Mn, as quais estão inseridas inteiramente no contexto do Complexo Amparo, mais especificamente no Grupo Itapira (Complexo Amparo) (Figura 1). No geral, a formação é composta por sequências pelíticas, psamo-pelíticas, psamíticas, grauvaqueanas, arcósicas, margas e calcissilicáticas, com um metamorfismo regional na fácies de anfibolito de médio a alto grau (Parrotti, 2023).

Ocorrem Mn supergênicos, advindos do intemperismo químico de rochas gondíticas, os quais foram submetidos a processos deformacionais diversos, incluindo *boudinage*, com o litotipo encontrado tanto em rochas frescas quanto intemperizadas. A partir do momento em que os corpos são submetidos ao intemperismo, materiais escuros e amorfos são originados, ricos em óxidos e hidróxidos de manganês.

No geral, primeiramente realizou-se uma compilação de dados bibliográficos sobre as informações geológicas do Orógeno Brasília Sul e os arredores dos municípios com pontos de afloramento. Em função da caracterização dos corpos gondíticos, foram utilizados métodos baseados em trabalhos de campo (11 pontos), realizando levantamento de dados estruturais (quando possível), descrição macroscópica, coleta de amostras, estudos petrográficos, retirada de imagens de drone e mapas temáticos-analíticos. Ademais, torna-se imprescindível abordar a realização de análises geocronológicas e geoquímicas em fluorescência de raios-X (FRX) para algumas amostras, as quais foram iniciadas com a realização de etapas laboratoriais, como quarteamento de amostras, britagem, moagem, bateia, separação de minerais, etc. As amostras preparadas foram enviadas ao laboratório de geoquímica, com os dados dos elementos maiores disponíveis.

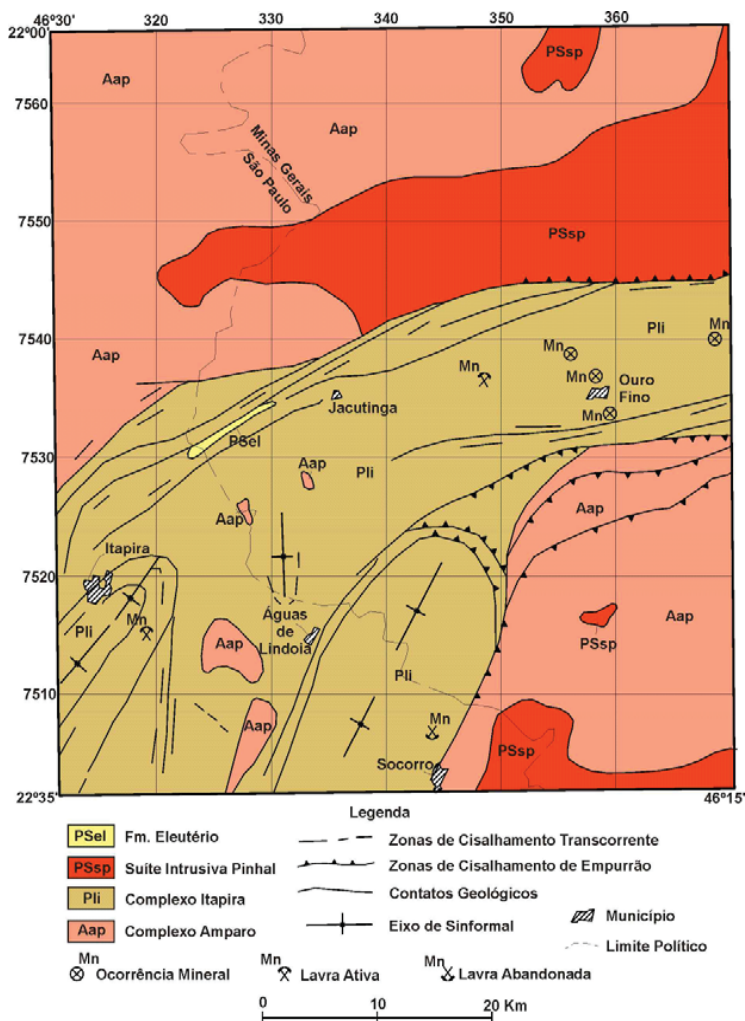


Figura 1: Mapa geológico, englobando os entornos de Itapira-SP, Socorro-SP, Jacutinga-SP e Ouro Fino-MG. Adaptado de Veríssimo, 1991.

As análises petrográficas foram realizadas a partir de nove lâminas polidas. Tornou-se possível realizar a caracterização da assembleia e paragéneses minerais nos litotipos analisados, condizentes com as bibliografias utilizadas, com texturas granoblástica a lepidoblástica predominantes e associações dos minerais com fluidos hidrotermais (opacos). A utilização de microscópios de luz refletida se tornou essencial, uma vez que sua utilização é ideal para amostras opacas, como os minerais de Mn e Grafita (Gr). A fim de aprofundar as análises petrográficas, planeja-se, posteriormente, a utilização do microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Para as análises geoquímicas, realizou-se a partir da fluorescência de raios-X (FRX) para as amostras dos gonditos (protominério de Mn) provenientes da região de estudo, com os óxidos maiores determinados sendo: SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃(t), MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O e P₂O₅; que são elementos relacionados à assembleia mineral visualizada na bibliografia, além de coerentes com as descrições petrográficas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Com a realização das análises petrográficas (Figura 2) foi evidenciado uma assembleia mineral condizente com a bibliografia analisada (Parrotti, 2023, Vieira, 2015), além de relevante teor de Mn nas amostras. A rocha pode ser descrita como um Gondito, com uma tendência de predomínio dos minerais de quartzo, granada manganésifera (espessartita) e opacos, caracterizando a assembleia mineral. Tanto o Qtz, como a Grt estão, em sua maioria, bem preservados e com alterações somente nas bordas, porém ocorre alteração evidente em alguns grãos, principalmente o Qtz preenchendo interstícios e microfraturas. No geral, os dois minerais predominantes possuem proporções semelhantes nas lâminas. Ademais ocorrem minerais secundários, descritos como opacos, que são gerados principalmente devido a processos supergênicos (Parrotti, 2023).

Os minerais opacos compartilham características físicas de muita semelhança, ausentes de orientação preferencial ou propriedades de identificação entre si, o que impossibilita a identificação criteriosa dos

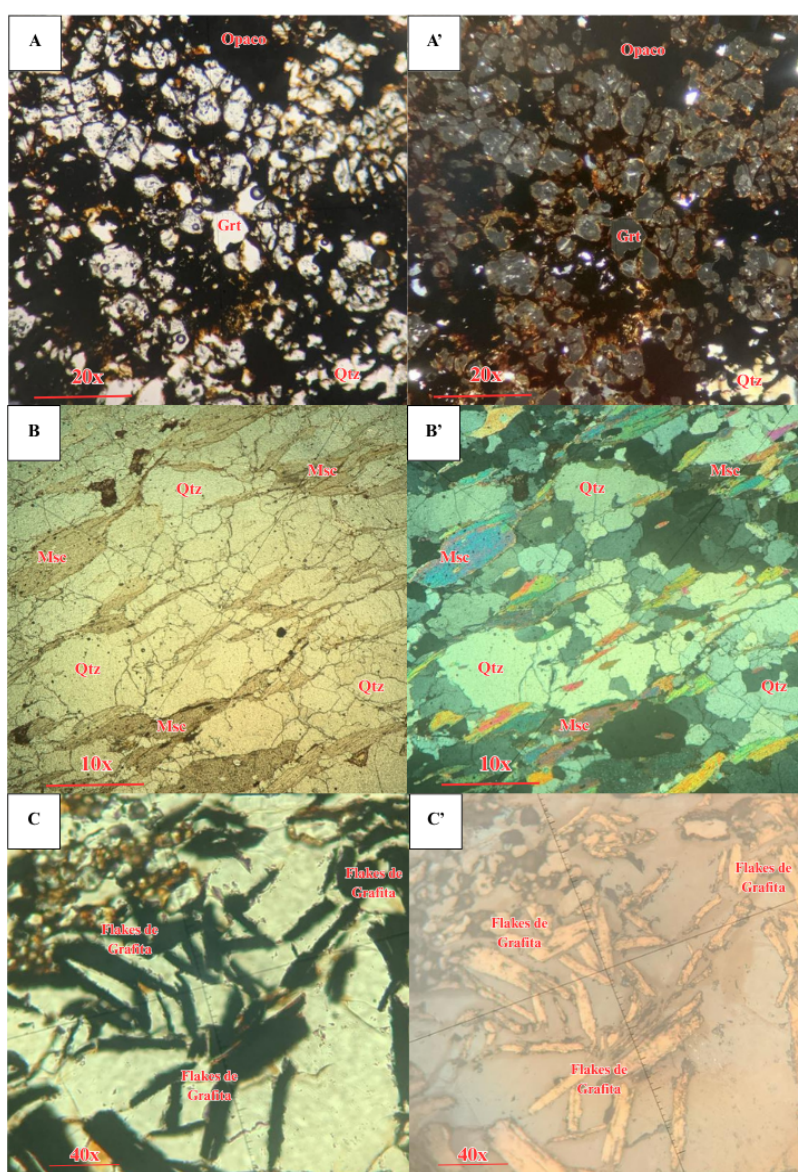


Figura 2: Panorama geral da assembleia mineral em lâmina. **A e A')** Minerais principais dos litotipos, com evidentes Qtz, Grt e Opacos. **B e B')** Litotipo encaixante, com assembleia diferente dos demais, apresentando xistosidade e micas aluminosas. **C e C')** Vista em microscópio de luz refletida para distinguir opacos. Observam-se aglomerados de grafita em algumas lâminas (flakes).

óxidos de manganês em luz transmitida, necessitando a microscopia de luz refletida. Os grãos opacos descrevem óxidos-hidróxidos de Mn e Fe, além da Gr, visualizados por reflectância na vitrina. Angeli et al. (2011) e Veríssimo (1991), apontam que comumente é encontrada a grafita associada aos minérios de MnO, ocorrendo na forma de lamelas finas (ou fiapos) de opacos, contornando os grãos de quartzo e espessartita, concordante com os resultados obtidos. A textura dos litotipos é predominantemente granoblástica a sutilmente lepidoblástica, variando de acordo com a quantidade de Gr, com ausente a singela orientação dos cristais, principalmente os opacos, sugerindo deformação metamórfica. Os grãos de quartzo apresentam-se com contatos retilíneos, quando primários, e há destaque nas espessartitas, ocorrendo como cristais subedrais, e tendência aproximada aos quartzos e opacos, em função ao contato dos grãos e textura. Os tamanhos dos grãos são variados, mas, indicando o predomínio de uma granulação fina a média.

O litotipo encaixante (ITA-3) se diferencia, com uma predominância de cristais de quartzo e muscovita (Msc), que compõem a assembleia mineral. Os grãos de quartzo mostram formas anedrais a subedrais, com contatos retilíneos bem definidos que configuram uma textura granoblástica típica de processos de recristalização metamórfica, além da visualização da xistosidade. A Msc também aparece como mineral dominante, com seu hábito micáceo característico e com sua marcante birrefringência. De maneira menos expressiva, representando menos de 5% da assembleia mineral, observam-se grãos opacos. Observando a vista geral da lâmina, torna-se evidente a orientação paralela dos minerais, principalmente micas, como resultado da pressão direcional durante o metamorfismo.

Amostra	Litotipo	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ (t)	MnO	MgO	#CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
JAC 09	Protominério de Mn	42,380	0,551	16,850	5,800	25,340	1,060	4,560	0,060	0,030	0,038
JAC 11	Protominério de Mn	35,220	0,341	15,030	6,360	31,280	0,400	2,390	0,030	0,190	0,084
ITA 02A	Protominério de Mn	38,540	0,521	14,930	5,790	23,580	0,680	3,340	0,060	0,480	0,091
ITA 02B	Protominério de Mn	52,760	0,442	9,990	5,870	17,280	0,490	1,170	0,040	0,100	0,141
ITA 02C	Protominério de Mn	55,490	0,245	12,590	3,160	21,080	0,900	2,220	0,030	0,050	0,030
ITA 04	Protominério de Mn	57,840	0,155	7,530	2,790	16,800	0,180	1,270	0,030	0,040	0,087
ITA 05	Protominério de Mn	44,110	0,432	15,490	4,340	26,480	0,850	3,670	0,030	0,040	0,072
ITA 06	Protominério de Mn	54,600	0,412	11,470	3,440	15,050	0,700	2,730	0,030	0,070	0,066
ITA 08	Protominério de Mn	46,560	0,330	11,290	5,450	17,900	0,570	1,830	0,020	0,050	0,171

Tabela 1: Resultados da análise geoquímica por FRX.

Os resultados do FRX (Tabela 1) apontam um predomínio marcante do SiO₂, que é o óxido mais abundante, com valores entre 35 e 57%, refletindo a expressiva presença de Qtz nas amostras e minerais com SiO₂ em sua estrutura. O óxido reflete o contraste entre os gonditos mais ricos em Qtz (ITA 02B, ITA 02C, ITA 04 e ITA-06, com teores acima de 50%) e aqueles com maior equilíbrio entre Qtz e Grt, que apresentam valores intermediários, na faixa de 35 a 46%. Ademais, o predomínio de MnO se destaca, com teores que variam de aproximadamente 15 a 31%, evidenciando a natureza manganesífera do litotipo. As concentrações mais elevadas

ocorrem principalmente em amostras Jacutinga-MG, com destaque a JAC 11, enquanto para as amostras da região de Itapira exibem maior amplitude dos dados, corroborando proporções equivalentes de quartzo e granada.

Em relação ao Al_2O_3 , os teores variam de 7 a 16%, sendo associados principalmente à espessartita e, em menores quantidades, a minerais aluminosos acessórios (como sillimanita, mineral sugerido em ITA 02A). O $\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{t})}$ apresenta teores que variam de 2 a 6%, valor compatível com a circunstância de possível especularita e hematita acessórios em lâmina, além de sua ocorrência na granada manganésifera. Destacam-se também os óxidos de Fe nas bordas alteradas dos minerais (principalmente grãos de granadas), evidenciado pela coloração alaranjada de halos de alteração e fraturas, observados na descrição petrográfica das demais lâminas.

Elementos como CaO e MgO ocorrem em teores menores, geralmente entre 1 e 4% e menores que 1%, respectivamente. Esses baixos valores indicam a participação limitada de silicatos de Mg e corpos carbonáticos. Posteriormente, se tem o TiO_2 , em concentrações mais inferiores, entre 0,1 e 0,5%, possivelmente associado a ilmenita e titanita, minerais acessórios. Por fim, para Na_2O e K_2O , eles são as menores porcentagem das análises (menores que 0,02 %), o que indica a mínima participação de feldspatos e micas. A amostra encaixante ITA-3, apresenta elevada participação da muscovita (descrita em lâmina), o que indica teores mais elevados de K_2O . Por fim, observou-se valores mínimos (residuais) para P_2O_5 , concordante com lâmina, não havendo indicação petrográfica de fosfatos. É válido abordar a grafita, que varia de 5 a 30% em lâmina e está associada a condições redutoras.

CONCLUSÕES:

Com base nas análises petrográficas e nos dados geoquímicos, foi possível identificar que os alvos estudados correspondem a gonditos, de composição silicática, em concordância com descrições prévias de Verissimo (1991), Angeli et al. (2011) e Parrotti (2023). As assembleias e paragêneses minerais observadas indicam um grau metamórfico médio, característico da fácies anfibolito. Embora os teores de manganês não sejam tão expressivos e a presença de grafita possa dificultar a exploração comercial, o estudo desses protominérios abre perspectivas para o estudo e o entendimento da formação de outros elementos químicos de interesse econômico, como o cobalto e molibdênio.

BIBLIOGRAFIA

- ANGELI, N., Khan, H., Ito, G. M., Carvalho, S. G. de, Jimenez-Rueda, J. R., & Penha, U. C. (2011). **Geologia e caracterização tecnológica do minério de manganês da mina Córrego do Cocho, Itapira (SP)**. Geologia USP. Série Científica, 11(3), 107-130. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X2011000300007>
- BIONDI, J. C. **Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros**. Oficina de Textos, 2003.
- CAMPOS NETO, M. C.; Caby, R. Lower crust extrusion and terrane accretion in the Neoproterozoic nappes of southeast Brazil. Tectonics, v. 19, p. 669-687, 2000.
- CAMPOS NETO, M. da C., Basei, M. A. S., Vlach, S. R. F., Caby, R., Szabó, G. A. J., & Vasconcelos, P. (2004). **Migração de orógenos e superposição de orogêneses: um esboço da colagem brasileira no Sul do Cráton do São Francisco, SE - Brasil**. Geologia USP. Série Científica, 4(1), 13-40.
- CANNON, W.F., Kimball, B.E., and Corathers, L.A., 2017, **Manganese**, chap. L of Schulz, K.J., DeYoung, J.H., Jr., Seal, R.R., II, and Bradley, D.C., eds., **Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply**: U.S. Geological Survey Professional Paper 1802, p. L1–L28, <https://doi.org/10.3133/pp1802L>.
- HEILBRON, M., CORDANI, U.G., ALKMIM, F.F. **São Francisco Craton, Eastern Brazil: Tectonic Genealogy of a Miniature Continent**. ISBN 978-3319-01715-0. DOI 10.1007/978-3319-01715-0. Cap.10. p.189-205. © Springer International Publishing Switzerland 2017
- PARROTTI, Davi Diorio. **Depósitos supérgenos de manganês na região de Ouro Fino e Careçu, Minas Gerais: caracterização mineralógica e química mineral**. 2023.
- STANTON, R.L. **"Ore Petrology"**, McGraw Hill Book Co., New York, 1972.
- VERÍSSIMO, César V et al. **PROTOMINÉRIO E MINÉRIO DE MANGANÊS DE ITAPIRA-SP CONSIDERAÇÕES GENÉTICAS**. [s. l.], 1991. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/4259aa4e-c10e-4cc3-9e66-d30a3ad9b9e0/0831356.pdf>
- VIEIRA, Leandro Ballarin. **Caracterização morfológica de ocorrência de manganês por meio de dados geofísicos**. 2015. 101 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/5bbbdfdd-b4d7-44c5-aba7-3ee912c4c279>