

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

22/36 - Caracterização Geológica da Jazida de Fosfato da Fazenda Ressaca (Mato Grosso do Sul)

Mariana Branco Barbosa da Silva

Monografia da disciplina Trabalho de Formatura (0440500)

Orientador: Paulo César Boggiani

Coorientador: Lucas Nery Ramos

IGC – USP

São Paulo

2022

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai, que é a base de apoio que possibilitou todas as conquistas na minha vida; e a minha mãe, que não chegou a ver a filha caçula se formar, mas esteve comigo por toda a graduação com o apelido de “Grosa” e sei que se encontra orgulhosa de mim onde quer que ela estiver.

AGRADECIMENTOS

Começo agradecendo aos meus pais, que sempre incentivaram aos filhos a estudar por mais difíceis que fossem alguns momentos em nossas vidas, pois sempre valorizaram o aprendizado e sabiam da importância da educação na trajetória de seus filhos.

Agradeço também a todos os meus professores que me transmitiram sabedoria e conhecimento desde o primário até o fim da faculdade, e principalmente ao meu orientador Paulo César Boggiani, que foi fundamental nesta reta final da graduação, tendo paciência, ensinando e me apoiando na entrega da monografia de final de curso.

Ao meu coorientador, Lucas Nery Ramos, que se dispôs a embarcar nessa jornada, me acompanhando e me ensinando sobre o grupo Corumbá e sobre os dolomitos e fosforitos da Jazida da Fazenda Ressaca. Também a Bárbara, Beatriz, Rafael e Kennedy, além de todos na EDEM que me receberam muito bem e foram muitos solícitos comigo, eu deixo meus sinceros agradecimentos.

Com relação ao desenvolvimento da monografia, agradeço ao Lúcio Massari e ao José Gabriel Araújo Alves, que se disponibilizaram e me ensinaram sobre a utilização de software Studio RM para a parte de modelagem e estimativa de recursos, e ao Henrique Fernandes, que me auxiliou em momentos de dúvidas e sugestões.

Por fim, agradeço a todos os demais que me auxiliaram, direta e indiretamente nesta monografia e na conclusão do curso, principalmente aos amigos que fiz, pois sem eles a graduação seria um percurso muito mais árduo, sem o brilho e importância que teve em minha vida.

RESUMO

A caracterização geológica de uma jazida é fundamental para seu planejamento e melhor aproveitamento. Nesse sentido, o presente trabalho de formatura teve por objetivo identificar e individualizar diferentes litotipos da jazida de fosfato da Fazenda Ressaca (Bonito, MS) e o mapeamento geológico de detalhe da jazida, assim como considerações sobre as gêneses dos diferentes litotipos. A jazida em estudo apresenta dois depósitos bem distintos – o primário, constituído pelos fosforitos e rochas fosfáticas do Grupo Corumbá (formações Bocaina e Tamengo) e o secundário, na forma de capa superficial de litotipo identificado como Rocha Fosfática Bege Friável, que vem sendo lavrado, em função da facilidade de extração, sem uso de explosivo, e lavrado para uso como remineralizador de solo, com teor de 15% de P_2O_5 e 5% de solubilidade em ácido cítrico, com boa aceitação entre os agricultores da região. Esse material teria se originado pelo intemperismo e remineralização do fosforito primário com formação de minerais de fosfato aluminosos do grupo da Crandalita. Com a lavra desse material superficial, pode-se observar e realizar mapeamento de detalhe dos litotipos primários, tendo sido identificados dez litotipos descritos em detalhe e mapeados em mapa geológico 1: 2.000. Desses litotipos, apenas um pertence à Formação Tamengo, na forma de brecha intraformacional com clastos de fosforitos e os demais pertencem à Formação Bocaina, com destaque para o Fosfalutito Pristine, caracterizado por camada de 2 a 4 m de espessura, homogênea, de cor preta característica, com porções com possível laminação microbiana e constituída por fluorapatita e teores de P_2O_5 ao redor de 34 %. A fonte do fósforo para a formação desse fosforito poderia ter sido correntes de ressurgência marinha mas a precipitação em si da fluorapatita teria sido condicionada pela atividade microbiana. Essa camada constitui o litotipo de maior interesse econômico, mas o que requer beneficiamento para seu futuro aproveitamento. O litotipo Brecha Sedimentar Basal da Formação Tamengo, pode-se viabilizar economicamente para produção de corretivo de solo, com teores médios de 3 % de P_2O_5 , constituindo uma alternativa futura ao material atualmente lavrado (Rocha Fosfática Bege Friável), sendo que futuros beneficiamentos desse material secundário poderiam empregar calcinação, com aumento significativo da solubilidade do Fósforo e uso direto na agricultura. Uma modelagem e estimativa de recurso foi elaborada com o método de interpolação do inverso do quadrado da distância e utilização de dados coletados por sondagem RC, considerando toda a jazida como uma zona mineralizada.

Palavras chaves: fosforitos, fosfato, Formação Bocaina, Grupo Corumbá, Fazenda Ressaca, lavra, jazida

ABSTRACT

The geological characterization of a deposit is essential for its planning and better use. In this sense, the present graduation work aimed to identify and individualize different lithotypes of the phosphate deposit at Fazenda Ressaca (Bonito, MS) and the detailed geological mapping of the deposit, as well as considerations on the genesis of the different lithotypes. The deposit under study has two very distinct types - the primary, consisting of phosphorites and phosphate rocks from the Corumbá Group (Bocaina and Tamengo formations) and the secondary, in the form of a surface layer of a lithotype identified as Rocha Fosfática Bege Friável, which has been mined, due to its easy extraction, without the use of explosives, and sold as a soil remineralizer, with a content of 15% P_2O_5 and 5% solubility in citric acid, with good acceptance among farmers in the region. This material would have originated by weathering and remineralization of the primary phosphorite with formation of aluminous phosphate minerals of the Crandalite group. With the mining of this surface material, it is possible to observe and carry out detailed mapping of the primary lithotypes, having been identified ten lithotypes described in detail and mapped in a geological map 1: 2,000. Among these lithotypes, only one belongs to the Tamengo Formation, in the form of an intraformational breccia with phosphorite clasts, and the others belong to the Bocaina Formation, with emphasis on the Fosfalutito Pristine, characterized by a layer 2 to 4m thick, homogeneous, black in color characteristic, with portions with possible microbial lamination and constituted by fluorapatite and P_2O_5 , contents around 34%. The source of phosphorus for the formation of this phosphorite could have been marine upwelling currents, but the precipitation itself of fluorapatite was possibly conditioned by microbial activity. This layer constitutes the lithotype of greatest economic interest, but the one that requires future improvement. The lithotype Brecha Sedimentar Basal da Formação Tamengo can be economically viable to produce soil corrective with average contents of 3% of P_2O_5 , constituting a future alternative to the material currently mined (Rocha Fosfática Bege Friável), and future improvements of this material could employ calcination, with a significant increase in phosphorus solubility and direct use in agriculture. A resource modeling and estimation was elaborated with the inverse distance square interpolation method and using data collected by RC drilling, considering the entire deposit as a mineralized zone.

Keywords: phosphorites, phosphate, Bocaina Formation, Corumbá Group, Fazenda Ressaca, mining, deposit

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	ii
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	2
2.1. Localização da área de estudo	2
3. JUSTIFICATIVA	3
4. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA	4
4.1. Contexto geológico local e geomorfológico.....	4
4.1.1. Potencial em fosforitos da Faixa Paraguai setentrional (Grupo Araras)	4
4.1.2. Fosforitos da Faixa Paraguai meridional (Grupo Corumbá).....	5
4.1.3. O Grupo Corumbá	6
4.2. Caracterização da área de estudo	10
5. MATERIAIS E MÉTODOS	12
5.1. Caracterização petrográfica e análises laboratoriais.....	13
6. RESULTADOS	13
6.1. Identificação e Nomenclatura dos litotipos	13
6.1.1. Litotipo Secundário (retrabalhamento superficial).....	15
6.1.1.1. Rocha Fosfática Bege Friável.....	15
6.1.2. Litotipos Primários (litologias das formações Bocaina e Tamengo)	24
6.1.2.1. Brecha Sedimentar Basal da Formação Tamengo.....	25
6.1.2.2. Brecha Sedimentar Superior Regular	26
6.1.2.3. Quartzito Arenoso Fosfático	27
6.1.2.4. Brecha Sedimentar Bocaina Superior	28
6.1.2.5. Estromatolito Silicificado	29
6.1.2.6. Fosfolutito Pristine	30
6.1.2.7. Marga Fosfática	34
6.1.2.8. Rudstone Pisolítico	34
6.1.2.9. Grainstone Oolítico	36

6.1.2.10. Brecha Sedimentar Bocaina Inferior	36
6.2. Mapa geológico dos litotipos identificados	37
6.3. Modelagem e estimativa de recursos.....	41
7. INTERPRETAÇÕES E DISCUSSÕES	44
8. CONCLUSÃO	46
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47

1. INTRODUÇÃO

Os fosforitos e rochas fosfáticas são material fonte para fósforo agromineral de importância estratégica para o Brasil, pois é um nutriente fundamental na produção agrícola junto com os outros minerais representados com a sigla NPK (nitrogênio, fósforo e potássio). E, apesar de sua importância, o Brasil importa aproximadamente 80% (ANDA, 2022) de todo o fertilizante utilizado no país, tornando-se dependente do mercado internacional e suas flutuações, o que pode ser uma desvantagem em tempos de crises econômicas com aumento de valores e desabastecimento do mineral no mercado internacional.

Sabendo destas limitações e da importância do fosfato, ao longo dos anos o governo brasileiro tem incentivado projetos de pesquisa mineral destes recursos. Para o fosfato, em especial, observou-se o potencial deste agromineral localizado na Faixa Paraguai, principalmente na porção meridional com depósitos e jazidas no topo da Formação Bocaina – Grupo Corumbá (Ediacarano), nas regiões de Bonito e Bodoquena, Mato Grosso do Sul.

Na presente monografia, foi realizada a caracterização geológica de detalhe da Jazida de Fosfato da Fazenda Ressaca (Bonito, Mato Grosso do Sul), com fosforitos e rochas fosfáticas sedimentares primárias, principalmente os do topo da Formação Bocaina, e fosfatos secundários, produto de alterações intempéricas.

A jazida da Fazenda Ressaca se encontra em lavra, com extração do litotipo Rocha Fosfática Bege Friável. Esse material diferencia-se dos litotipos primários da Formação Bocaina, fosforitos puros e rochas fosfática, por serem friáveis e, por isso, são facilmente lavrados, com cores claras, de branca a bege, e cuja origem vem sendo interpretada como remobilização dos fosforitos primários. Os teores desses materiais secundários são ao redor de 14% de P_2O_5 , sendo lavrados para uso com aplicação direta no solo.

Na caracterização da jazida como um todo, foram identificados os principais litotipos, diferenciados entre os primários e secundários, com sua caracterização e mapeamento geológico de detalhe, acrescido de modelo de distribuição de teores do Rocha Fosfática Bege Friável em lavra e estimativas de volumes, com o uso de modelagem.

2. OBJETIVOS

Este projeto de Trabalho de Formatura tem por objetivo principal a caracterização litológica e mineralógica dos principais litotipos de fosfato (primário e secundário) do depósito da Fazenda Ressaca da Formação Bocaina (do Grupo Corumbá, localizado no Mato Grosso do Sul), visando a sua aplicação na agricultura.

Para essa finalidade, seguem os seguintes objetivos específicos:

- a) mapeamento geológico de detalhe da área de lavra (1:2.000), com perfis geológicos;
- b) uso de diferentes técnicas de amostragem e coleta de amostras dos diferentes litotipos para caracterização petrográfica, mineralógica e análises químicas;
- c) modelamento preliminar de corpos mineralizados e estimativas de volume e teor associado ao material secundário.

2.1. Localização da área de estudo

A área de estudo localiza-se próxima das divisas entre as cidades de Bonito e Bodoquena, no Mato Grosso do Sul, na Fazenda Ressaca e que é acessada por meio da rodovia MS 178, a 35km de Bonito, no sentido de Bodoquena (figura 2.1).

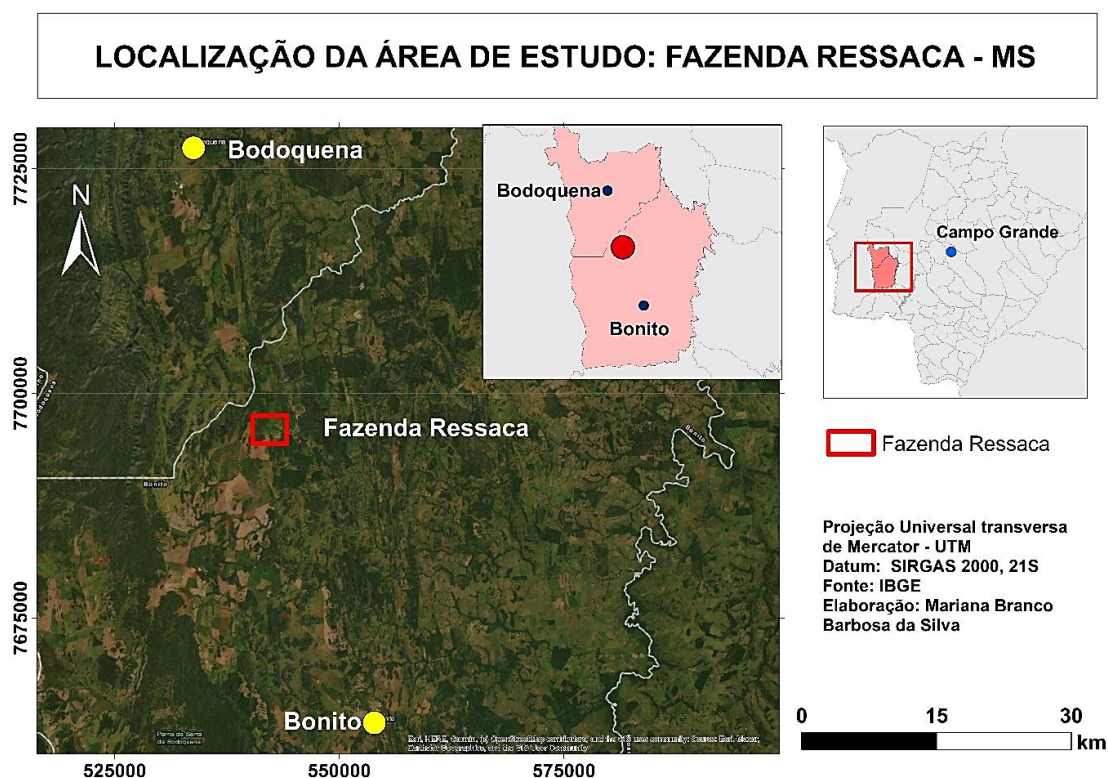


Figura 2.1 - Na imagem a esquerda está a localização da Fazenda Ressaca, entre os municípios de Bodoquena (ao norte) e Bonito (ao sul). Nas imagens a direita temos a ampliação da área de estudo. Mapas elaborados por basemap do ArcGis, utilizando sistema de projeção UTM e SIRGAS 2000

O detalhamento proposto no presente projeto foi realizado em uma área relativamente pequena, frente às exposições de demais ocorrências de fosfato ao longo da Serra da Bodoquena, especificamente na área de lavra, com dimensões de aproximadamente 500 x 500m. Neste local, porém, a diversidade de litotipos é relativamente grande, sendo que se distinguem dois tipos principais de minérios: os primários, ediacaranos, da Formação Bocaina e os secundários, produto de alteração intempérica e mais superficiais, com espessuras variáveis, de 0,5mm a 4m, sendo esse o material atualmente lavrado e empregado como remineralizador, com aplicação direta no solo, após moagem.

3. JUSTIFICATIVA

A guerra da Rússia com a Ucrânia acarretou uma crise de suprimento de demanda do Brasil em fertilizantes, sendo que 80% de seu consumo depende de importação (ANDRADE, 2022), além de o setor agropecuário sofrer com as elevações dos preços, o que já vinha acontecendo em decorrência das dificuldades de importação com a China, devido à pandemia do Covid-19.

Desta forma, visando contribuir para a diminuição da dependência de fósforo advindos do mercado externo e importação, o presente trabalho vem junto ao crescimento do interesse pelo estudo de novas fontes de P no Brasil, o qual – ao contrário de outros países – tem a produção de minério de P essencialmente de origem ígnea, e não sedimentar (Souza, 2009). Portanto, por meio de mapeamento da lavra em atividade, estudo da apresentação de seus tipos de minério de fosfato (primário e secundário), poderá ser possível colaborar na construção de conhecimento a respeito de fosforitos sedimentares e suas formas intemperizadas, como ocorre na jazida da Fazenda Ressaca, visando avançar na caracterização desses diferentes tipos, com fins econômicos e científicos, estes voltados ao entendimento de sua gênese.

A caracterização do minério é de extrema importância para várias etapas de desenvolvimento de um projeto de mineração, desde a exploração geológica até o planejamento de lavra. Baseado no entendimento geológico vigente, através de mapas geológicos e amostragens, também serão elaborados modelos geológicos e estatísticos tridimensionais para representar o recurso mineral. Passando pela modelagem e caracterização de zonas mineralizadas, o conhecimento geológico permeia os modelos de blocos até a operacionalização de planos de exaustão.

4. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

A jazida da Fazenda Ressaca encontra-se na Serra da Bodoquena, local em que afloram exposições do Grupo Corumbá (Ediacarano), na Faixa Paraguai, onde os fosforitos ocorrem no topo da Formação Bocaina.

4.1. Contexto geológico e geomorfológico local

Eventos colisionais associados ao Ciclo-Brasiliano/Pan-Africano, com a formação do Gondwana, geraram a formação de faixas de dobramentos, entre elas a Faixa Paraguai na região Centro-Oeste do Brasil, adjacente ao Cráton Amazônico e ao Bloco do Rio Apa. Estes dobramentos possuem comprimento de cerca de 1.200 km, e podem ser divididos em porção setentrional e meridional, tendo como principal ponto em comum a presença de diamictitos glaciais basais, pertencentes à Formação Puga (Boggiani e Alvarenga, 2004, Alverenga et al, 2004).

4.1.1. Potencial em fosforitos da Faixa Paraguai setentrional (Grupo Araras)

Fosfatos e complexos alcalinos com fosfato associado podem também ser encontrados na porção setentrional da Faixa Paraguai, na porção Centro-Sul do Mato Grosso, na unidade geomorfológica conhecida como Província Serrana. Porém. Ao contrário da porção sul da Faixa Paraguai, tem-se que o potencial para fósforo não é apenas de origem sedimentar, mas também advindos de complexos alcalinos intrusivos na Faixa Paraguai (Abreu Filho, 2011).

O Grupo Araras tem espessura de até 600 m e é constituído por rochas carbonáticas (calcíticas e terrígenas na base e dolomíticas no topo), apresentando fácies dolomíticas estromatolíticas. É datada como próximo ao limite do Neoproterozoico baseando-se na correlação com o Grupo Corumbá, e interpretada com a sua base sendo formada em ambientes de inframaré, com os dolomititos passando para um ambiente de infra a supramaré e depois passando para sedimentar, que definem uma transgressão marinha (Nogueira e Riccomini, 2006).

A Formação Serra do Caeté é uma formação limitada pela Faixa Paraguai e depositada sobre o Cráton Amazônico, constituída por rochas sedimentares com intercalações de conglomerados na base sob arenitos, ritmitos e tendo, por fim, pelitos, além de apresentar formação ferrífera bandada - BIF's. Foi originada entre 600 – 620 Ma durante eventos de glaciação no Neoproterozoico em ambiente marinho com influências glaciais (Abreu Filho, 2011).

Em 2011 desenvolveu-se um projeto de pesquisa da CPRM na região, em que se buscou entender o potencial para fosfato em rochas alcalinas e rochas sedimentares. As rochas

fosfáticas que foram analisadas indicaram resultados de até 1,5% de fósforo. As ocorrências de rochas fosfáticas relacionadas ao Grupo Araras tiveram valores inferiores a 1%. Já as rochas fosfáticas presentes na Serra do Caetê estão próximas a Mirassol d'Oeste e apresentam teores de até 9,49% com mineral principal sendo a fluorapatita, mas com contaminação por óxidos e hidróxido de ferro (que chega a ser >70%) (Abreu Filho, 2011). Estudos de viabilidade estão sendo realizados para análise do potencial e importância destes depósitos.

4.1.2. Fosforitos da Faixa Paraguai meridional (Grupo Corumbá)

Os fosforitos e rochas fosfáticas da Faixa Paraguai com maior produção atual são os da Formação Bocaina (Grupo Corumbá). Essa unidade é caracterizada por dolomititos com estromatólitos, grão revestidos e estruturas esféricas sedimentares como oncólitos e *ooids*, estratificações cruzadas, brechas intraformacionais e estruturas tepees, com rochas fosfáticas no topo da sucessão (Boggiani et al., 1993; Boggiani, 1998; Fontaneta, 2008, 2012).

As primeiras ocorrências do fosfato no Grupo Corumbá foram identificadas em 1976, pela Rio Doce Geologia e Mineração S/A – DOCEGEO, por meio de levantamento geoquímico na Serra da Bodoquena. A partir dessas informações, a CPRM (Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais) realizou trabalho de prospecção de fosfato no âmbito do “Projeto Fosfato de Bonito” (Luz et al., 1980).

Nos trabalhos do “Projeto Fosfato de Bonito” foram localizados corpos fosfáticos intercalados em pelitos e metapelitos, mas com posição estratigráfica incerta, se na Formação Bocaina ou na Formação Tamengo. O ambiente de deposição foi interpretado como costeiro, alternando períodos de instabilidade ou correntes marinhas que são evidenciados pela sedimentação terrígena onde os sedimentos fosfáticos encontram-se intercalados, e períodos de calmaria, evidenciados pela deposição dos calcários.

Desta maneira, Luz et al. (1980) interpretaram o material fosfático, intercalado aos pelitos, como alóctone, produto de retrabalhamento. Nesse estudo, foi dimensionada uma reserva total inferida de aproximadamente 4 milhões de toneladas, com teor médio de 5,95% de P_2O_5 , o que, à época, levou a conclusão de que esses depósitos não seriam economicamente viáveis (Luz et al. 1980).

Outras ocorrências de rochas fosfáticas sedimentares foram encontradas e estudadas por Boggiani (1990), com destaque para a ocorrência da Fazenda Ressaca, município de Bonito/MS, e com posicionamento estratigráfico no topo da Formação Bocaina (Boggiani et al., 1993).

O ambiente de deposição foi interpretado como costeiro de talude, sujeito a correntes de ressurgências marinhas (*upwellings*), sob aporte terrígeno nulo, resultante de calmaria tectônica durante a deposição (Boggiani, 1990; Boggiani et al., 1993).

Posteriormente, a CPRM retomou os trabalhos de prospecção no Estado do Mato Grosso do Sul, na região da Serra da Bodoquena, com estudo mais detalhado da ocorrência da Fazenda Ressaca no projeto intitulado “Fosfato da Serra da Bodoquena, Mato Grosso do Sul” (Justo, 2000).

Na ocorrência da Fazenda Ressaca foi observado também fosforitos associados a estromatólitos colunares e laminados, com teores de até 35% de P_2O_5 cujo principal mineral é a fluorapatita (Boggiani et al., 1993). Nesses estromatólitos foram identificadas estruturas microscópicas globulares, interpretadas como microfósseis (Sallun Filho et al. 1994) e fósseis esqueletais de *Titanotheca coimbrae* (Gaucher et al. 2003). Trabalhos de micropaleontologia, têm demonstrado a presença de acritarcas e VSM – *vase shape microfossils*. (Morais et al., 2021).

4.1.3. O Grupo Corumbá

A unidade de estudo encontra-se na porção meridional da Faixa Paraguai, no Grupo Corumbá, englobando as unidades das formações Cadiueus, Cerradinho, Bocaina, Tamengo e Guaicurus. O Grupo Corumbá representa sucessão sedimentar de 700 metros espessura (Almeida, 1965; Boggiani, 1998) que recobre quase totalmente o planalto da Serra da Bodoquena, com idades ediacaranas comprovadas por fósseis e datações radiométricas (Parry et al., 2017). A estratigrafia adotada aqui segue uma coluna proposta por Almeida (1965) com a inserção da Formação Cadiueus por Boggiani (1998), e é composta da base para o topo, pelas formações Cadiueus, Cerradinho, Bocaina, Tamengo e Guaicurus – sendo aqui esquematizada na figura 4.2.

Corumbá Group (Ediacaran)

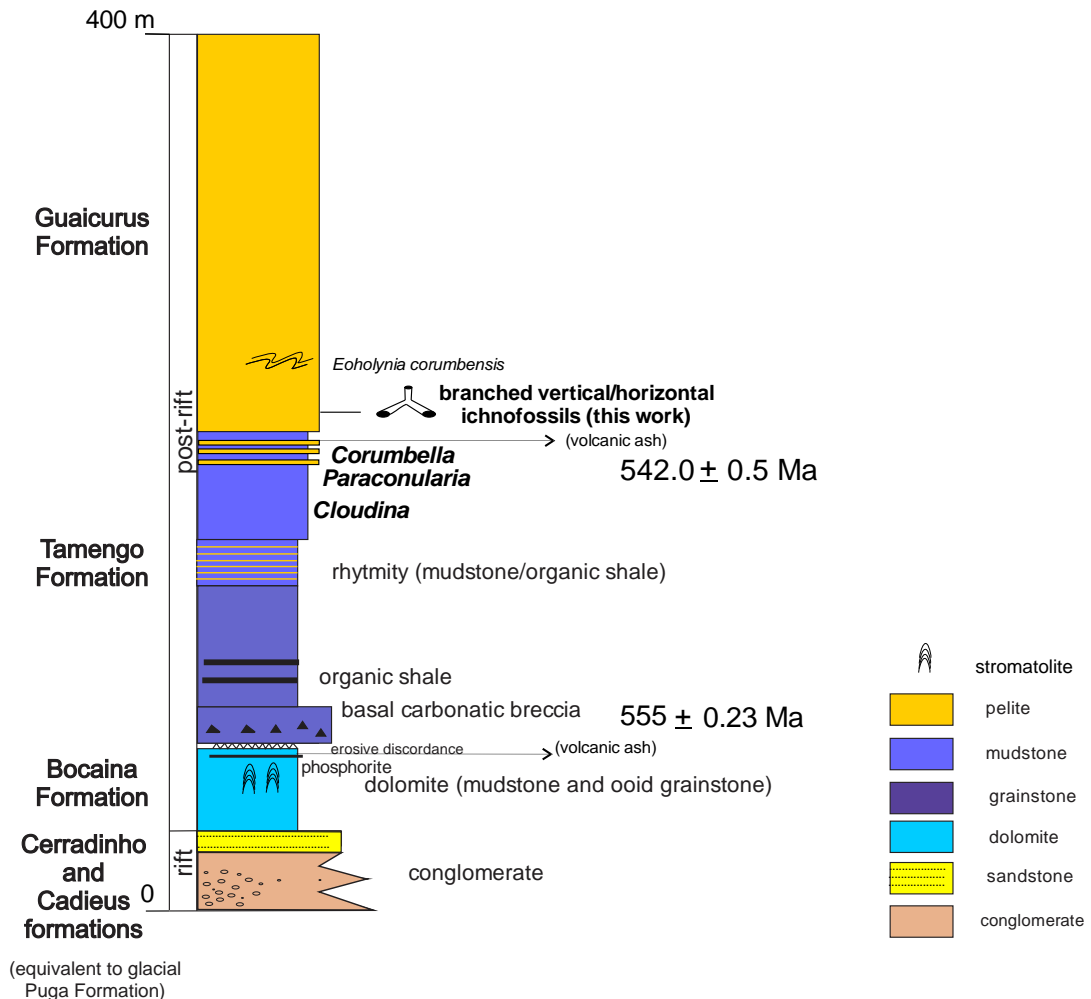


Figura 4.1 - Coluna estratigráfica da Grupo Corumbá, extraída de Parry et al. (2017).

As rochas da Formação Cadieus são ortoconglomerados polimíticos, folhelhos roxos e arcósio expostos na borda Oeste do Planalto da Bodoquena, e interpretados como originados por fluxos de sedimentos de alta energia como leques aluviais (Boggiani, 1998).

A Formação Cerradinho apresenta rochas arenosas, siltosas e argilosas com presença de rochas carbonáticas e sílex (Almeida, 1965). É interpretada como transicional entre ambientes deposicionais terrestres e marinhos como retrabalhamento em planície de maré (Boggiani, 1998).

Na Formação Bocaina predominam rochas carbonáticas dolomitizadas associadas à atividade biológica (Fontaneta, 2012), com presença de estruturas como oóides e

estromatólitos (Almeida, 1965). É na Formação Bocaina que são verificadas fácies fosfáticas. Níveis de *ash beds* no topo dessa unidade permitiram a datação de 555Ma (Parry et al., 2017), correspondente aos estágios finais de sedimentação da Formação Bocaina.

A Formação Tamengo é composta por calcários intercalados com folhelhos e possui rico arcabouço paleontológico. A unidade mais jovem, a Formação Guaicurus, corresponde essencialmente a folhelhos negros, provavelmente já de idade cambriana (Amorim et al., 2020).

Com relação a interpretações de gêneses, principalmente com relação a Formação Bocaina, esta é interpretada como depositada em extensa planície de maré com transição a leste para ambiente marinho aberto, na qual teriam se originado as rochas fosfáticas associadas a eventos de correntes marinhas de ressurgência. O ambiente de águas rasas e límpidas permitiu a proliferação microbiana, destacada pela presença de estromatólitos (Boggiani, 1998).

No âmbito da bacia, interpreta-se que a Formação Bocaina represente a transição de uma bacia restrita, do tipo rifte, para uma bacia francamente marinha, durante fase de abertura oceânica e desenvolvimento da rampa carbonática da Formação Tamengo (Boggiani, 1998, Oliveira et al., 2019, Amorim et al., 2020). Esse modelo, contudo, encontra-se em revisão, com a possibilidade da deposição da Formação Tamengo, superior na estratigrafia, ter ocorrido sob condições de fechamento, no contexto de bacia *foreland*, resultante da orogênese da Faixa Paraguai (Campanha et al., 2011).

Na Formação Bocaina também há ocorrência expressiva de brechas polimíticas, com clastos de fosforitos que representariam acentuado rebaixamento do nível do mar, estabelecendo assim uma plataforma marinha com quebra de talude, na qual teria se depositado a brecha, inclusive com clastos provenientes do embasamento. Com a subsequente elevação do nível do mar, depositaram-se os calcários e ritmitos da Formação Tamengo, em evento transgressivo (Boggiani, 1998, Boggiani et al., 2010, Fernandes et al., 2022). Partes da brecha basal da Formação Tamengo apresenta concentrações relativamente altas de fosforitos, podendo chegar a 30% da rocha.

Desta forma, supõe-se haver o registro da passagem de ambiente de águas rasas, eventualmente sujeito a exposições subaéreas, registrado na Formação Bocaina, para um ambiente francamente marinho, com a deposição da Formação Tamengo em contexto de rampa carbonática (Oliveira et al., 2019, Ramos, 2019, Amorim et al., 2020).

O posterior afogamento da plataforma carbonática, em continuidade do evento transgressivo, já registrado na deposição da Formação Tamengo, proporcionou a origem de

espessos pacotes de folhelhos da Formação Guaicurus (Almeida, 1965, Boggiani, 1998, Boggiani et al., 2010), encontrados desde a Serra da Bodoquena até Corumbá.

O aumento do nível d'água, e maior aporte terrígeno, mudaram as condições de deposição, não sendo mais favoráveis à formação de calcários, marcada pelos espessos pacotes de pelitos da Formação Guaicurus, que marca o final da sedimentação do Grupo Corumbá. A relação dessa mudança com o início de transformação da bacia, do contexto rifte para foreland, encontra-se em investigação (Campanha et al., 2011, McGee et al., 2018).

É no Grupo Corumbá que se encontra a Serra da Bodoquena (Fig. 4.2), uma feição geomorfológica proeminente no Estado de Mato Grosso do Sul, com aproximadamente 200 km direção norte-sul sendo um planalto de aproximadamente 800 metros de altitude, localizado a sudeste da Planície do Pantanal. Esse planalto é constituído predominantemente por rochas carbonáticas do Grupo Corumbá e Cuiabá sobre o qual desenvolve característico relevo cárstico, sendo diferenciado devido a presença de tufas calcárias em processo de formação devido as drenagens (Boggiani e Alvarenga, 2004). Pode ser dividida mediante aspecto tectono-deformacional através de faixas alongadas em direção N-S, onde na faixa a oeste encontram-se rochas com baixo índice de tectonismo e na faixa à leste um tectonismo mais intenso.

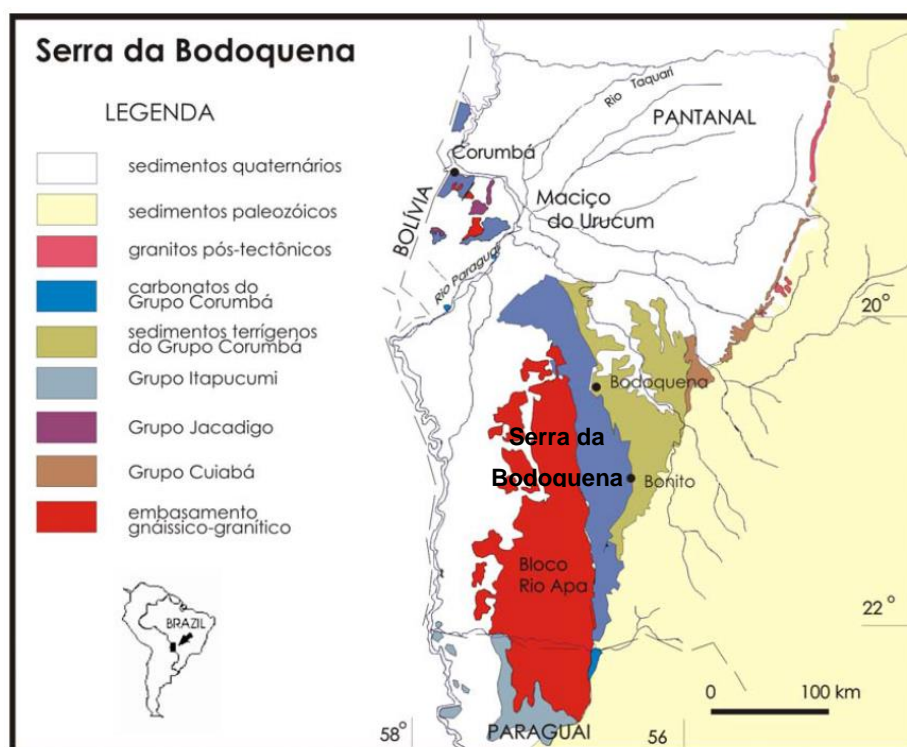


Figura 4.2 - Localização da Serra da Bodoquena no contexto geológico da Faixa de Dobramentos Paraguai meridional. Extraído de Boggiani e Alvarenga (2004).

A Serra da Bodoquena é, ao norte, delimitada com a Formação Pantanal de idade cenozoica e composta por coberturas sedimentares e, delimitada ao sul, por alguns morros espaçados do Grupo Itapucumi, de composição calcária (Boggiani e Alvarenga, 2004).

4.2. Caracterização da área de estudo

A jazida da Fazenda Ressaca é caracterizada por depósitos distintos, ao longo da Rodovia Bonito – Bodoquena, com litotipos diversos e de geometrias distintas. A parte primária dos depósitos do Grupo Corumbá ocorre com direção NE-SW com camadas mergulhando em média 35° para SE, em zona com falhamentos inversos e dobras isoclinais fechadas, com vergência para oeste.

Os fosforitos da Fazenda Ressaca foram descritos por Justo (2000) como ocorrendo em forma de fosfato com associação com chert, ricos em matéria orgânica e dolomitos, aparecendo como grandes reservas e em camadas espessas. Também no limite Fazenda Ressaca com a Fazenda Primavera, foram encontrados fosforitos em afloramentos de rocha de cor preta, maciça, que por vezes apresentavam uma fraca estratificação incipiente, com fraturas conchoidais e textura amigdalóide.

As fácies descritas na Fazenda Ressaca compreendem o topo da Formação Bocaina e a base da Formação Tamengo, que foram descritas em uma coluna estratigráfica com 200 m de espessura. Ao longo desta coluna foi identificada uma diversidade de dolomitos e calcários (oolíticos e estromatolíticos, grainstone e rudstone), fosforitos (laminados, alongados, em grãos finos), lamitos maciços, conglomerados e brechas (Fontaneta, 2012). Algumas destas fácies também foram identificadas com o trabalho de campo, sendo estas descritas como litotipos que foram possíveis de serem observados e reconhecidos com a abertura da frente de lavra.

A Fácies de Grainstone Oolítico Inferior é composta por dolomitos oolíticos com oóides aparecendo por vezes deformado e revestido por cristais espáticos de dolomita e micrita, sendo interpretado como originário de águas rasas e agitadas.

Constituído por dolomito fino cinza claro, a Fácies de Boundstone LLH é estromatolítica de laminação com ligação lateral plano paralela irregular e, por vezes, colunares, formando pseudo-colunas e até mesmo oncólitos. É interpretado como tendo um ambiente de formação de águas rasas, oxigenadas e límpidas, um pouco agitadas (Fontaneta, 2012, Boggiani, 1998).

A Fácies de Mudstone Maciço são camadas finas de mudstone maciço que se intercalam com grainstone oolítico em algumas porções a níveis centimétricos e foi interpretada como

originária de ambiente de baixa energia, rasas e protegidas como em uma laguna (Fontaneta, 2012).

Dolomitos cinza-escuros, por vezes associados com oncólitos e com estromatólitos tipo SH (colunares e pseudo-colunares) compõe a Fácies de Boundstones SH, sendo interpretada como formado em águas agitadas, rasas e límpidas (Fontaneta, 2012).

Constituído por grainstone dolomítico cinza-escuro com estratificação plano-paralela e intraclastos e ooides, a Fácies de Grainstone Oolítico Superior é um espesso pacote interpretado como de águas agitadas e rasas que sofreu influência de corrente (Fontaneta, 2012).

A Fácies de Rudstone Intraclástico é uma brecha intraformacional com matriz dolomítica cinza muito clara e interpretada como formada por fluxos gravitacionais de exposição subaérea, sendo composta por intercalações centimétricas de rudstone pisolítico com presença de partículas fosfáticas ou não, a Fácies de Rudstone Pisolítico foi considerada originária de zona vadosa e sua presença de fosforito é devida a variação da zona ativa de fosfogênese (Fontaneta, 2012).

A Fácies de Fosforito pode aparecer em forma de fosfalutito estratificado a porções estromatolíticas, de cor preta quando fresca e esbranquiçada friável quando alterada; a forma de fosforito alongado assemelha-se ao fosfalutito, porém possui nítida estratificação devido ao estiramento das partículas; e a forma de fosfoarenito apresenta grãos finos de fosfato arredondados, com baixa esfericidade e bem selecionados, que estão junto com grãos de quartzo e cimentação carbonática. Ela foi interpretada como de ambientação costeira com variações do nível do mar e ressurgências (Fontaneta, 2012, Boggiani, 1998).

A Fácies de Conglomerado Polimítico é um conglomerado polimítico com matriz micrítica dolomítica tendo intraclastos de tamanhos e formatos diferentes, com composição variada (dolomitos e fosforitos da Formação Bocaina, silexites e calcários), marcando a borda da plataforma tendo o rebaixamento eustático e retrabalhamento como fatores de formação (Fontaneta, 2012, Boggiani, 1998).

Boggiani (1998) ainda diferenciou uma fácies maciça de quartzo-arenitos com matriz dolomítica, com arenitos de granulometria fina a média, bem selecionados, subesféricos e bem arredondados, e foi interpretado como base da Formação Tamengo associado a regressão marinha, que passou por certo grau de deformação e que também sofreu retrabalhamento eólico dos grãos.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho teve início com levantamento bibliográfico e sua análise, seguido de levantamento geológico em campo, utilizando-se de métodos de descrição clássicos para rochas carbonáticas e coleta de dados para o mapa geológico em escala de detalhe realizado. Com o trabalho de campo, ocorrido durante os meses de junho e julho de 2022, foi realizado levantamento detalhado da área da jazida, com elaboração de mapa geológico de detalhe (anexo) e com coleta de amostras com caracterização em laboratório.

Para o mapa geológico, foram empregados os métodos usuais de mapeamento geológico, com delimitação e representação em mapa dos diferentes litotipos, com maior destaque para diferenciação da porção primária da secundária e coleta de amostras para posterior caracterização em laboratório. Nesta etapa de levantamento de campo também foram retiradas amostras de uma canaleta de 1,6 m do material superficial fosforítico para análises químicas em laboratório.

As descrições foram feitas com as observações dos litotipos dispostos em maioria verticalmente na borda da cava ou em pináculos cársticos expostos com a remoção do material fosfático entre os canais. Como materiais auxiliares desta etapa macroscópica de petrografia e descrição, foram utilizados o aplicativo Avenza para marcação local em mapa, coleta de dados de localização por GPS Garmin, lupa de bolso, canivete, bússola tipo Brunton e aplicativo clino para coleta de dados estruturais para posterior modelagem, utilização de ácido clorídrico 10% a 15% para caracterização de rochas carbonáticas e molibdato de amônia para identificação por teste colorífico para fosfato.

Após a etapa de levantamento de campo e amostras recolhidas, com caracterização macroscópica dos diferentes litotipos, foram realizados detalhamentos com uso de microscópio óptico, complementado por microscopia eletrônica, e análises mineralógicas, por difratometrias de Raios X (foram analisadas 02 amostras) e análises químicas por Fluorescências de Raios X (no total foram analisadas 09 amostras e 01 duplicata), em equipamentos do IGc – USP.

Seguindo a execução de mapeamento de detalhe e com os resultados químicos associados às diversas técnicas de amostragem executadas (como amostragem de rocha, canaletas e sondagens) é possível, por meio de métodos de estimativa de volume (seções paralelas, inverso do quadrado da distância) executar um modelamento preliminar dos corpos mapeados em frente de lavra. Esta modelagem foi desenvolvida com o software disponibilizado no laboratório de informática do IgC – USP, o Studio RM, da Datamine.

Parte do banco de dados sobre as sondagens na Fazenda da Jazida Ressaca foi cedida pela EDEM para fins de estudo de modelagem e estimativa de minério desta monografia, sendo utilizados 348 furos de sondagem tipo RC (circulação reversa), ocorridas antes da abertura da frente de lavra.

5.1. Caracterização petrográfica e análises laboratoriais

Para descrição das rochas carbonáticas, será empregada a nomenclatura de Dunham (1962), modificada por Embry & Klovan (1971). Para os fosforitos foi utilizada nomenclatura de Cook & Shergold (1986), também baseada por Dunham (1962) mas adaptada para esse tipo de rocha, com ênfase nas propriedades texturais, acrescida da nomenclatura de Follmi et al. (1991), com distinção de fosforitos em duas grandes categorias – litofácies fosfáticas não retrabalhadas (pristine) e litofácies fosfáticas retrabalhadas. Para a petrografia microscópica, as lâminas e escanerizações foram preparadas em equipamentos do IGc-USP.

A análise mineralógica por difratometria de raios-X foi realizada por fonte de radiação com um comprimento de ondas igual 1,540 Å incidindo na amostra e um detector de raios-x, sendo possível fazer a contagem dos raios-x espalhados na amostra. Então, com o pó da rocha moída, que foi para o difrator, é gerado um raio x que é difratado em um certo ângulo quando o raio se encontra com o mineral, possibilitando assim reconhecer os minerais compostos na amostra e sua contagem. Esta análise foi realizada em equipamento do IGc-USP.

Para a análise por Fluorescência de Raios-X, foram utilizadas amostras de canaleta obtidas em trincheira na Jazida da Fazenda Ressaca que foram moídas e secas, foram feitas pastilhas. A amostra, que foi misturada com borato de lítio fundido, é exposta a uma fonte de alta energia que interage com a amostra e a ioniza, emitindo raio-x característico para cada átomo, que é captado pelo detector em equipamento do IGc-USP

6. RESULTADOS

Os resultados ordenados a seguir foram obtidos com os resultados dos estudos ocorridos a partir do trabalho de campo, coleta de material e amostras (conforme descrito anteriormente em Materiais e Métodos) para análises, e com dados de sondagens tipo RC executadas e cedidas pela EDEM.

6.1. Identificação e Nomenclatura dos litotipos

Inicialmente a caracterização da Jazida da Fazenda Ressaca seria fundamentada em nomenclaturas propostas para fácies por Fontaneta (2012). No entanto, como a presente proposta de litotipos da Jazida da Fazenda Ressaca tem direcionamento para a pesquisa mineral, o trabalho anterior de Fontaneta (2012) não foi totalmente utilizado, pois teve o foco

na faciologia sedimentar, para fins de interpretação paleoambiental. O trabalho de Justo (2000) também foi voltado à pesquisa mineral, mas realizado com base apenas em afloramentos e trincheiras numa fase ainda de pouca exposição de minério, com uma proposta de termos que não se aplicam.

Com o avanço dos trabalhos de pesquisa pela empresa, com sondagens rotativas, trincheiras e a exposição do corpo primário com a lavra, foi possível um detalhamento que não se tinha anteriormente.

A jazida como um todo tem uma variação complexa de litotipos em corpos de geometria irregular e de contatos difusos, o que torna a sua caracterização desafiadora. Nesse sentido, o presente trabalho já é um avanço, que vai requerer refinamentos futuros, mas serve de base para a lavra em desenvolvimento e avanço na exploração da parte primária da jazida.

A geologia da Jazida da Fazenda Ressaca é dividida em dois tipos principais. Um superficial, friável, com teores de P_2O_5 em média de 14% sendo produto de processos geológicos superficiais, provavelmente com retrabalhamento e por isso definidos como secundários, e outro mais profundo, que se trata das litologias primárias da Formação Bocaina, com fosforitos puros com teores de P_2O_5 próximos ao máximo dessas mineralogias, por volta de 34%, por isso denominados primários.

O interesse econômico pela área, descoberta em 1992, apenas teve início com a constatação da economicidade do material friável, secundário, produto da remobilização do P dos litotipos primários, fácil de lavar por escavação e com uso imediato na agricultura como remineralizador de solo.

A lavra da jazida tem restrição ambiental significativa que é o uso de explosivo. Para seu uso, será requerido Estudo de Impacto Ambiental e respectivo relatório (EIA-RIMA), de elevado custo e com possibilidade de não ser aprovado, em função da proximidade de surgência cárstica (Atrativo Turístico Ceita Corê) em área de grande interesse turístico e preocupação ambiental.

O avanço futuro da lavra na região, após esgotamento da parte superficial, secundária, depende de como será feita a lavra da porção primária e possíveis projetos de beneficiamento, para os quais o presente trabalho vem a contribuir.

Nesse sentido, a caracterização dos litotipos é apresentada de forma diferenciada, para os litotipos secundários e primários, com destaque de ser uma proposta inicial a ser trabalhada com os profissionais da lavra, para que se torne uma nomenclatura usual e prática.

6.1.1. Litotipo Secundário (retrabalhamento superficial)

O litotipo secundário, produto de retrabalhamento superficial cenozoico, é o principal material extraído nos processos de lavra, denominado de Rocha Fosfática Bege Friável.

6.1.1.1. Rocha Fosfática Bege Friável

O litotipo Rocha Fosfática Bege Friável já recebeu nomes diversos, sendo o material atualmente lavrado. Já foi chamado de “foscrete”, por apresentar nódulos de material fosfático e aspecto semelhante aos calcretes, originados pela remobilização de carbonatos em subsuperfície. Foi também chamado de “saprólito”, porém ambas as gêneses – calcretização de fosfato, como alteração em situ, como se esperaria para um saprólito, não foi constatada. Desta forma, optou-se por usar termos descritivos e não interpretativos, e rochas fosfática em função do teor inferior a 18% de P_2O_5 .

A Rocha Fosfática Bege Friável recobre em áreas com comprimento e espessuras que variam de 3 a 4 m e inicialmente era escavada para cascalhar estradas vicinais, devido aos nódulos presentes (figuras 6.1 e 6.2).



Figura 6.1 - Aspecto do Rocha Fosfática Friável da jazida da Fazenda Ressaca em área que foi explorada inicialmente para extração do material para cascalhar estradas. Detalhe do material na Figura 6.2.



Figura 6.2 - Detalhe do material do litotipo Rocha Fosfática Bege Friável com os nódulos de material fosfático.

A geometria do corpo de Rocha Fosfática Bege Friável é de topo plano com ondulações suaves, acompanhando a superfície topográfica, com base irregular em superfície cárstica, com dissolução dos dolomitos subjacentes na forma de pináculos (figuras 6.3 e 6.4)



Figura 6.3 - Área lavrada do material friável (mesma área apresentada na figura 6.1) com os pináculos cársticos dos litotipos primários, demonstrando ser uma lavra difícil em função da geometria irregular da porção inferior do corpo. Ao fundo o telhado do depósito do material lavrado.



Figura 6.4 - Detalhe do topo dos pináculos em processo de escavação do litotipo Rocha Fosfática Bege Friável, este que é encontrado recobrindo e entre os canais formados entre os pináculos, dificultando acesso de escavadeiras.



Figura 6.5 - Nova área com início de lavra do litotipo Rocha Fosfática Bege Friável, onde o topo de um pináculo (com as pessoas em cima), cortado com fio diamantado, para facilitar a lavra (detalhe na figura 6.6).



Figura 6.6 - Topo do pináculo cortado com fio diamantado e perfurado com martelete para uso de massa expansiva para fragmentação, como forma de facilitar a lavra do litotipo friável.

Esse litotipo é constituído por uma rocha que desagrega facilmente, composta por resquícios de fosforito milimétricos junto à sílica e carbonatos alterados, sendo o principal material de interesse econômico da Jazida da Fazenda Ressaca. Este material possui, em média, cerca de 14% de teor de P_2O_5 e é removido por meio de retroescavadeira.

Esse litotipo, diante de sua economicidade em função da lavra mais fácil e de boa resposta de mercado no uso como remineralizador de solos, foi pesquisado em outras áreas requeridas, com uso de trado mecanizado, com o que se obteve dados que permitiram a modelagem apresentada mais à frente.



Figura 6.7 – Amostra do litotipo Rocha Fosfática Bege Friável.



Figura 6.8 - Detalhe da Trinchira 10 (49 m), que possui 0,2 m de profundidade, com exposição do litotipo Rocha Fosfática Bege Friável.

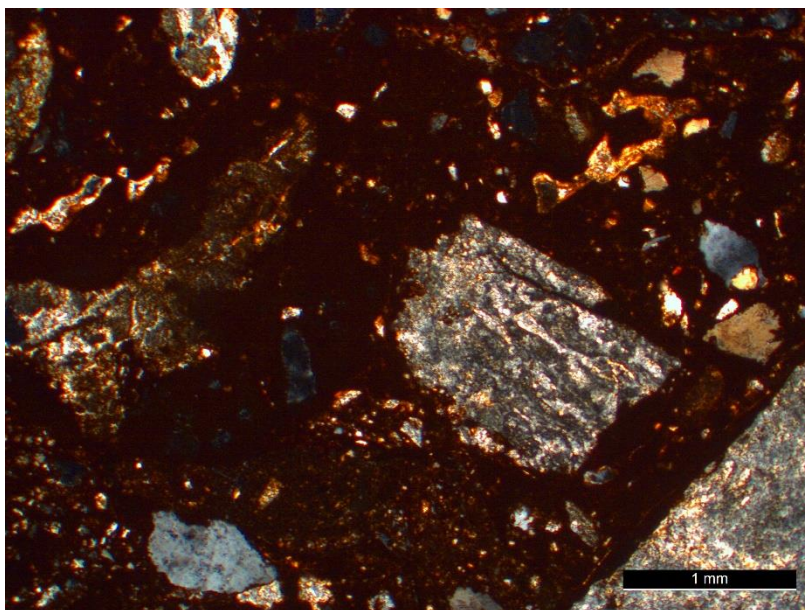


Figura 6.9 - Detalhe do litotipo Rocha Fosfática Bege Friável em microscopia com nicóis cruzados.

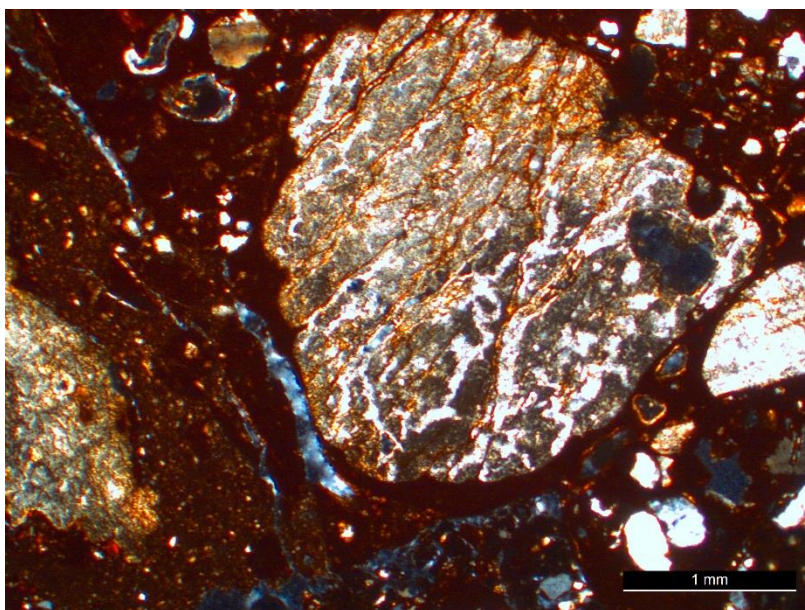


Figura 6.10 - Detalhe do litotipo Rocha Fosfática Bege Friável em microscopia com nicóis cruzados. É possível ver o alto grau de alteração nos minerais, característico do litotipo.

Para melhor caracterização do material de interesse econômico principal, foi elaborada uma canaleta na trincheira aberta para a porção superficial da Jazida da Fazenda Ressaca (figura 6.11), com o foco nos primeiros metros da Jazida da Fazenda Ressaca. Nesta canaleta foram coletadas amostras a cada 20 cm até a profundidade de 1,6 m, resultando em 9 amostras e uma duplicata.



Figura 6.11 - Trincheira (Trincheira 4) escavada na porção superficial da Jazida, com exposição da Rocha Fosfática Bege Friável da Jazida da Fazenda Ressaca, local onde foi realizada a canaleta vertical para coleta de amostras para análises químicas.

A partir destas amostras, preparadas em laboratório do IGc-USP, foram feitas análises químicas de Fluorescência de Raios-X (tabela 1). O resultado é considerado confiável, pois os dados da duplicata são próximos e a porcentagem total está entre 98,60 e 98,91 por cento.

Ressalta-se que a sílica, o cálcio e o P_2O_5 são os que predominam nessa amostra, o que era esperado devido à presença dos dolomitos, quartzo detrítico e da rocha fosforítica. A presença de Al também foi significativa nesta análise mais superficial da Rocha Fosfática Bege Friável.

Duas difratometrias de Raios X desse material permitiram identificá-los como principais minerais a Crandalita e Wavellita, minerais de fosfato aluminoso, além do quartzo detrítico observado macroscopicamente (Figuras 6.12 e 6.13).

Tabela 1 - Resultados da análise química de Fluorescência de Raios-X da Rocha Fosfática Bege Friável

Fluorescência de Raios-X, dados em %										
	Nível 0,0 m	Nível 0,2 m	Nível 0,4 m	Nível 0,6 m	Nível A 0,8 m	Nível B 0,8 m	Nível 1,0 m	Nível 1,2 m	Nível 1,4 m	Nível 1,6 m
SiO₂	26,99	25,29	27,16	18,36	12,55	12,45	19,80	21,73	12,89	12,51
TiO₂	0,467	0,469	0,490	0,554	0,180	0,179	0,617	0,454	0,259	0,174
Al₂O₃	13,64	15,72	13,92	16,51	4,55	4,54	18,9	18,39	11,01	6,95
Fe₂O₃	4,41	4,50	4,63	5,17	1,53	1,54	5,62	4,47	2,74	1,78

MnO	0,042	0,037	0,031	0,059	0,043	0,044	0,021	0,030	0,021	0,012
MgO	0,46	0,43	0,41	0,42	0,21	0,20	0,41	0,35	0,17	0,20
CaO	22,28	20,16	21,27	22,33	43,76	43,71	18,25	18,64	34,22	39,86
Na2O	0,10	0,37	0,15	0,24	< 0,008	< 0,008	0,23	0,11	0,01	0,05
K2O	0,83	0,78	0,76	0,77	0,15	0,14	0,76	0,50	0,21	0,13
P2O5	23,004	22,797	23,014	26,120	32,693	32,805	24,646	23,905	30,796	32,478
Loi	6,68	8,07	6,84	8,21	3,23	3,13	9,66	10,05	6,27	4,55
Total	98,91	98,62	98,67	98,74	98,90	98,74	98,92	98,63	98,60	98,69

Contagem em ppm										
	Nível 0,0 m	Nível 0,2 m	Nível 0,4 m	Nível 0,6 m	Nível A 0,8 m	Nível B 0,8 m	Nível 1,0 m	Nível 1,2 m	Nível 1,4 m	Nível 1,6 m
Ba	653	126	659	782	321	325	157	900	234	699
Ce	157	25	153	184	53	63	38	170	< 24	107
Co	16	-24	12	46	3	2	< 2	6	< 2	< 2
Cr	88	30	91	105	48	47	26	123	35	59
Cu	14	15	12	12	11	12	8	13	19	5
Ga	16	4	16	19	6	6	4	20	4	8
La	60	< 13	75	78	23	13	13	78	17	62
Nb	9	1	10	11	6	5	1	9	4	4
Nd	73	< 35	70	81	< 35	< 35	< 35	85	< 35	59
Ni	12	< 1	11	12	10	9	< 1	13	3	9
Pb	20	5	29	35	< 1,5	< 1,5	5	21	< 1,5	< 1,5
Rb	39	18	36	35	11	11	15	29	17	4
Sc	34	39	32	39	65	60	38	36	53	61
Sr	963	372	1007	1156	797	794	611	1254	715	1420
Th	< 2	7	2	< 2	< 2	< 2	5	< 2	< 2	< 2
U	11	11	11	12	6	8	6	11	7	6
V	65	6	68	72	28	22	< 5	56	13	22
Y	69	17	71	88	25	25	20	68	21	39
Zn	60	489	44	42	123	123	134	59	142	37
Zr	173	41	197	208	68	68	52	181	57	82
F	11560	21064	10308	11290	20478	20213	19245	10571	20564	19201
Cl	< 8	< 8	15	71	< 8	< 8	10	-58	77	< 8
S	< 2	176	< 2	< 2	103	103	130	12	281	40

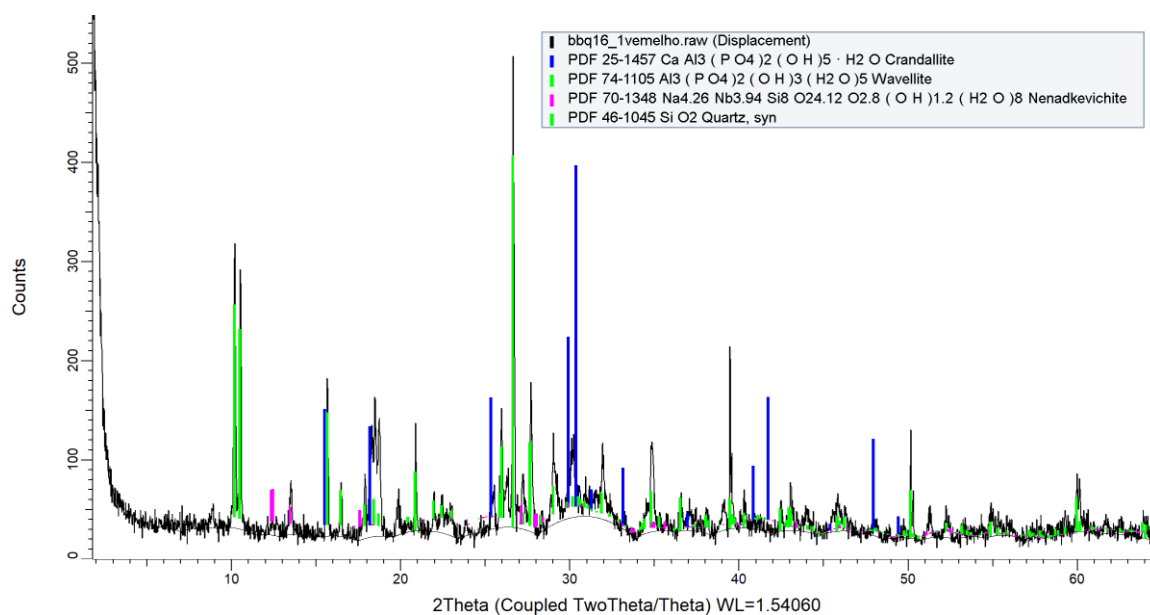


Figura 6.12 – Difratometria de Raios X da Rocha Fosfática Bege Friável por, indicando presença de Wavelita, Crandalita e Nenadkevichite

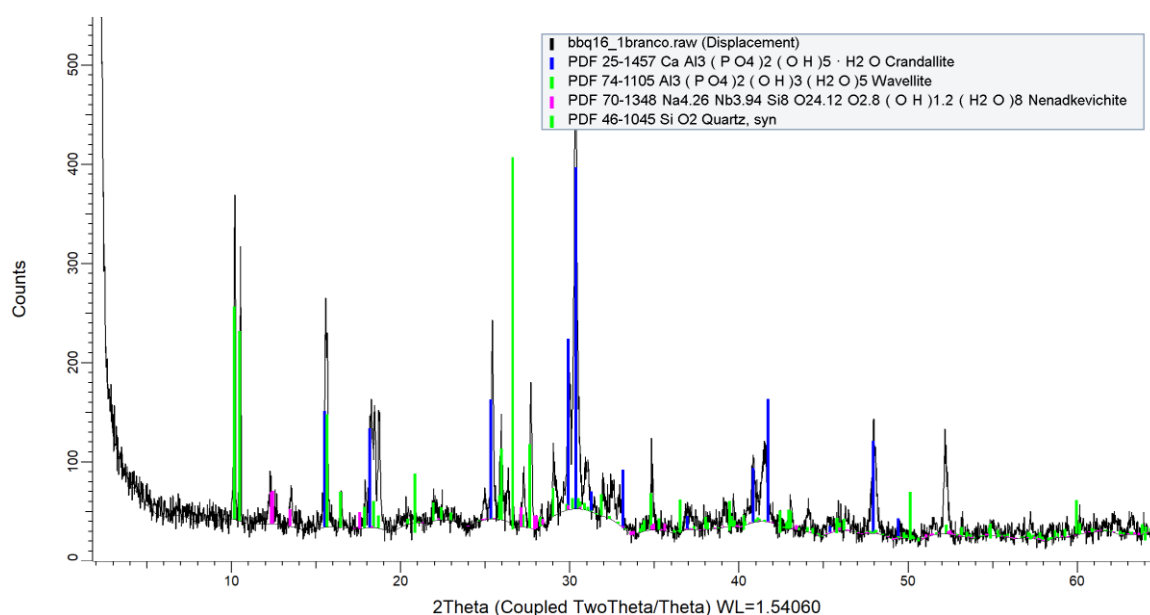


Figura 6.13– Difratometria de Raios X da Rocha Fosfática Bege Friável por, indicando presença de Wavelita, Crandalita e Nenadkevichite

Ambas as análises de difratometria indicaram também a presença de Nenadkevichite, um silicato raro com nióbio, o que pode ser correspondente a indicação de Nb na análise química.

Os minerais do Grupo da Crandalita são conhecidos em perfis de alteração de rochas alcalinas, também de interesse econômico, onde ocorre aumento dos teores de P_2O_5 como os

do Complexo de Juquiá (Cajati, SP) (Alcover Neto & Toledo, 1993) e de Ipanema (Iperó, SP) (Florencio, 1995). Segundo esses autores, nesses perfis de intemperismo, a alteração da apatita forma diretamente um fosfato de alumínio (wavelita) sem estágios intermediários existentes em outros locais (fosfatos da família da crandalita), promovendo, portanto, uma lixiviação imediata do cálcio mesmo em micromeios aparentemente mal drenados (espaços inter e intracristalinos fechados), podendo ser o mesmo processo que ocorre na Jazida da Fazenda Ressaca.

Esses materiais friáveis assemelham-se em parte aos depósitos que vêm recebendo importância econômica no nordeste do Pará e a noroeste do Maranhão (estes relacionados a perfis de intemperismo), na região de Gurupi (Queiroz, 2022).

No Pará, estes depósitos lateríticos tiveram como fonte rochas de diferentes origens, desde sedimentos até metamorfitos e ultramafitos; em alguns não se conhece a origem dos fosfatos (Oliveira & Costa, 1984) e até tempos atrás, não eram considerados econômicos (Toledo, 1999).

As jazidas econômicas desse tipo de minério em lavra no Pará, região de Bonito, passam por um processo de beneficiamento por meio de calcinação, que permite a disponibilidade do fósforo (Freitas 2009).

Em função da facilidade de escavação, bom preço de mercado e aceitação pelos agricultores, esse litotipo é o tipo investigado em outras áreas, devido também a pesquisa mais fácil, através de trados rotativos mecânicos.

6.1.2. Litotipos Primários (litologias das formações Bocaina e Tamengo)

Os litotipos primários relacionam-se principalmente à Formação Bocaina, com exceção da brecha basal da Formação Tamengo, que apresenta litotipos com retrabalhamento de rochas fosfáticas do topo da Formação Bocaina.

Esses litotipos primários foram definidos na cava aberta para lavra do material secundário, o que possibilitou seu detalhamento mais aprimorado e elaboração de mapa geológico de detalhe (escala 1: 2 000) – anexo1.

Os litotipos primários foram reconhecidos e descritos conforme a exposição superficial ocorrida com a retirada da Rocha Fosfática Bege Friável, ou seja, são observadas e descritas do topo para a base, e se distribuem empilhados na ordem representada a seguir em coluna estratigráfica (figura 6.14).

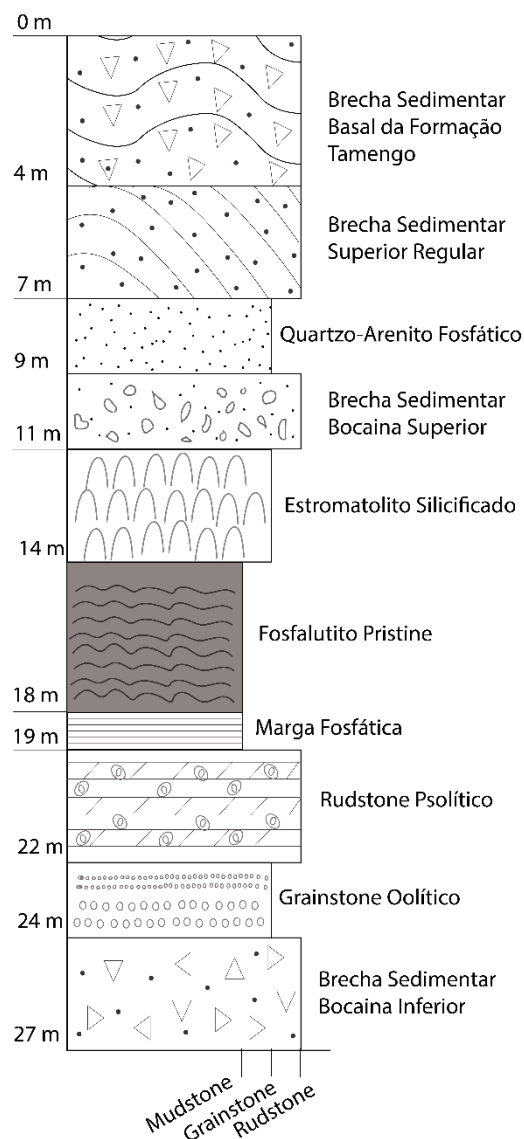


Figura 6.14 - Coluna estratigráfica dos litotipos descritos na lavra da Jazida da Fazenda Ressaca.

6.1.2.1. Brecha Sedimentar Basal da Formação Tamengo

Compreende o litotipo superior na topografia, com até aproximadamente 4m de espessura e é composto principalmente por uma matriz dolomítica de coloração cinza claro, formada em camadas de espessura centimétricas que se apresentam deformadas e com fraturas irregulares, além da presença de clastos centimétricos de rochas variadas. Estes clastos de tamanhos e formatos variados são compostos desde fosforito (estes muitas vezes aparecem subarredondados, porém em baixa quantidade e dispersos) até fragmentos de dolomito estromatolítico e brechas que se assemelham as observadas nos litotipos mais abaixo na estratigrafia.



Figura 6.15 - A esquerda temos um dos pináculos deste litotipo com estrutura deformada e com fraturas e a direita temos o detalhe destas camadas centimétricas dobradas.

6.1.2.2. Brecha Sedimentar Superior Regular

Muito semelhante ao litotipo anterior, porém com as camadas dolomíticas menos deformadas e onduladas, além das camadas possuírem espessuras mais finas e com o contato entre elas sendo mais irregular e ondulado. Esse litotipo também apresenta clastos, porém menores, sem fosforitos, e possui porções entre camadas com espessuras centimétricas, compostas por matriz micrítica fina de cor cinza escura e vênulas silicificadas. Este litotipo também apresenta porções maciças e altamente silicificadas de cor cinza clara e homogênea.



Figura 6.16 - A esquerda temos um dos pináculos deste litotipo, podendo observar o aspecto mais regular das camadas dolomíticas que compõem a estrutura. Em detalhe das camadas na direita, pode-se observar a espessura mais fina (comparado com a brecha sedimentar basal da Formação Tamengo), além do contato irregular entre uma camada com clastos silicificados em uma matriz micritica cinza.

6.1.2.3. *Quartzo Arenito Fosfático*

Este litotipo tem espessura em média de 2m e é composto em sua maioria por um quartzo arenito acamadado, moderadamente selecionado, com grãos variando de médio a grosso, sendo os grãos de quartzo subarredondados a subangulosos de alta esfericidade, podendo apresentar trechos com clastos de fosforito milimétricos. No entanto, há partes em que o arenito se apresenta de fino a médio e com matriz carbonática, e geralmente estes não apresentavam muitos clastos milimétricos de fosforito.



Figura 6.17 - A esquerda temos detalhe do arenito encontrado na Jazida da Fazenda ressaca, e a direita as camadas em que o arenito se encontra, já em processo de intemperismo e desagregando

6.1.2.4. Brecha Sedimentar Bocaina Superior

Este litotipo tem aproximadamente 2 m de espessura e é composto por um dolomito brechado com grande quantidade de intraclastos e clastos de fosforito centimétricos e mal selecionado. Estes clastos de fosforitos são em maioria de tamanho maior que 1 cm, com baixa esfericidade e angulosos, porém os inferiores a 1 cm são arredondados e esféricos. Alguns clastos maiores apresentam deformação de formato, podendo estar curvados. A matriz é dolomítica fina a média, com coloração cinza escura.



Figura 6.18 - A esquerda temos a brecha com fragmentos de fosforito subarredondados a angulosos, de milimétricos a centimétricos, e a direita temos os clastos com deformações onduladas

6.1.2.5. *Estromatolito Silicificado*

Litotipo composto por registro de estromatólitos em dolomito de matriz fina de coloração cinza clara e apresenta alto grau de silicificação. Os estromatólitos são observados aglomerados desde a base, em colunas de alturas centimétricas e ligados lateralmente, evidenciando as estruturas dos estromatólitos de forma bem aparente. Neste litotipo encontra-se a ausência de fósforo.



Figura 6.19 - Afloramento com o litotipo Estromatólito Silicificado apresentando as laminações pseudo-colunares dos estromatólitos ligados lateralmente.



Figura 6.20 - Detalhe das pseudo-colunas laminadas dos estromatólitos, com os domos arredondados preservados e ligados lateralmente.

6.1.2.6. Fosfalutito Pristine

O Fosfalutito Pristine ocorre como camada de fluorapatita pura, com o mineral fluorapatita unicamente identificado. Apresenta-se maciços e com partes laminadas em nítida estruturação microbiana. É o litotipo de maior interesse econômico, devido aos teores encontrados, por volta de 34% em P_2O_5 .



Figura 6.21 - Litotipo Fosfalutito Pristine em composição de diversas camadas silicificadas e fraturadas, em conjuntos centimétricos



Figura 6.22 - Litotipo Fosfalutito Pristine podendo também se apresentar em uma única camada centimétrica mais espessa.

Justo (2000) observou as rochas fosfáticas em trincheiras abertas na época e denominou esta fácies de tipo chert preto, provavelmente, pela semelhança com silexitos, mas o que não se considera apropriado, por não apresentar nada de sílica, apenas fluorapatita.

Em seção delgada, esse material se apresenta maciço a laminado, algumas sugestivas de esteiras microbianas (figuras 6.23 e 6.24)

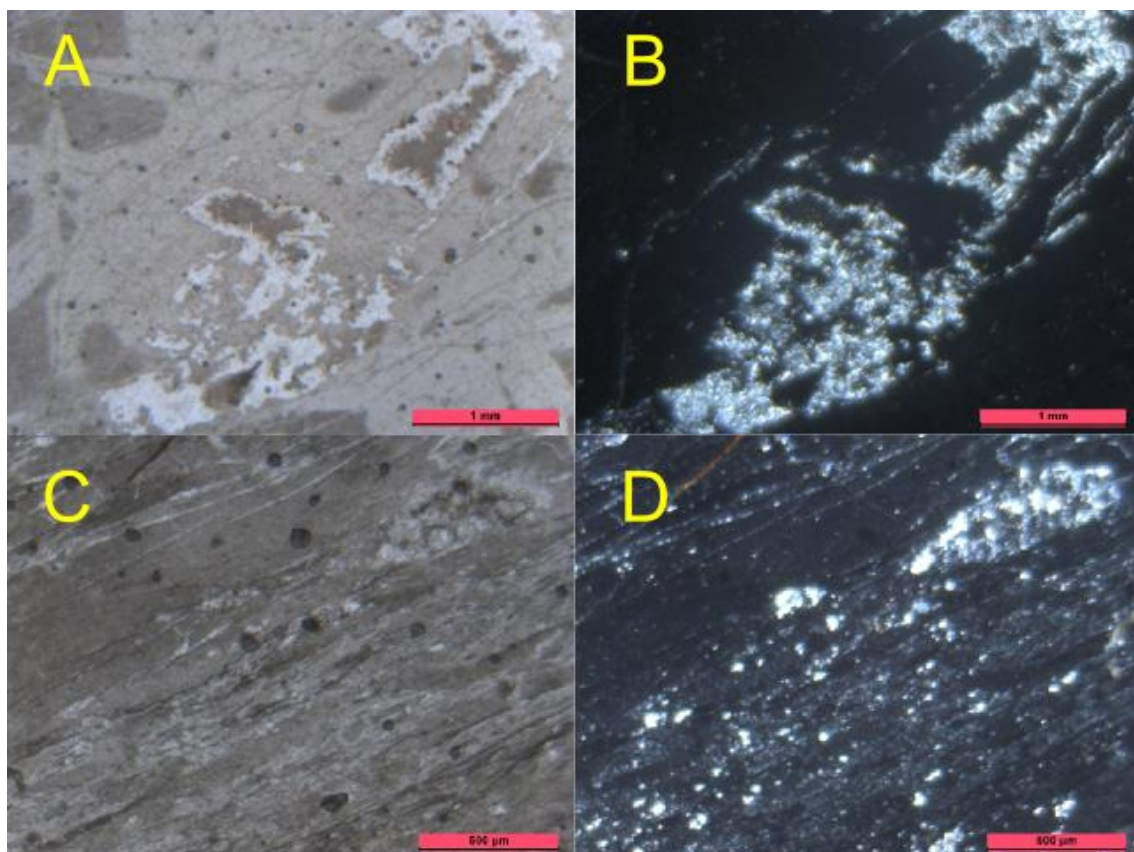


Figura 6.23 - Imagens ao microscópio petrográfico com nicóis cruzados e descruzados, do Fosforito Pristine.

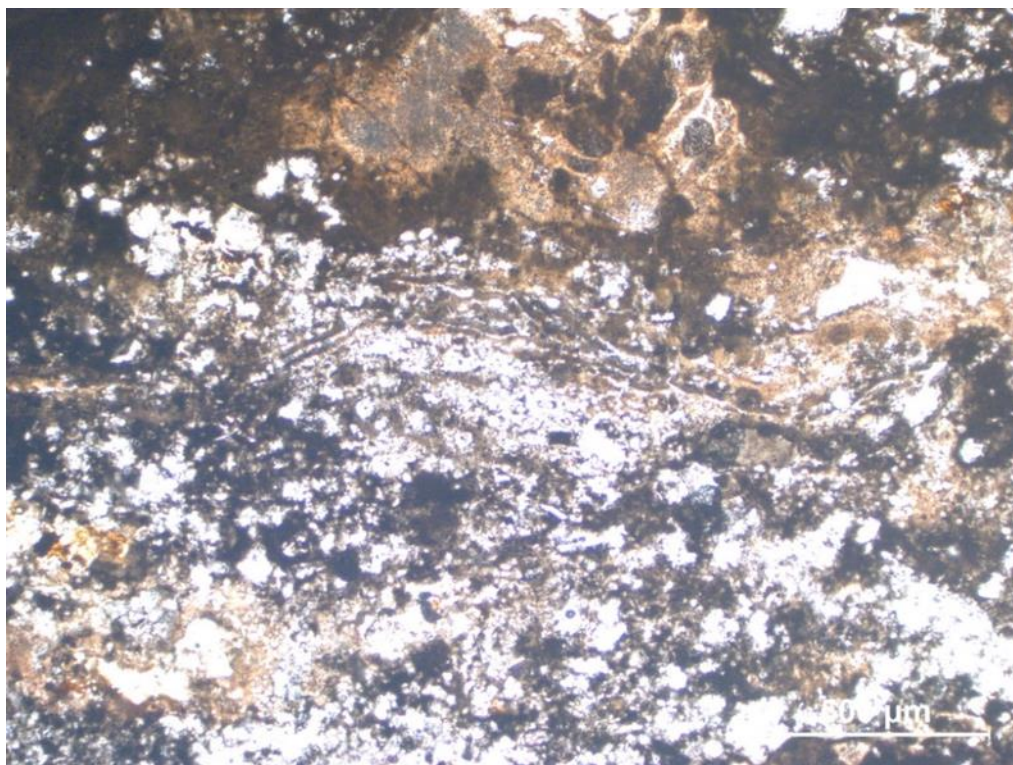


Figura 6.24 - Seção delgada do Fosforito Pristine mostrando uma porção alterada, com estrutura laminar (meio da foto) semelhante a esteiras microbianas.

Boggiani et al. (1993) interpretou, com base na associação de fácies, esses fosforitos como associados à correntes upwellings (ressurgências marinhas), sendo essas a principal fonte do fósforo. A associação de depósitos fosfáticos neoproterozoicos a ressurgências, tem sido estabelecido por Pufahl e Groat (2017). Nesse modelo, os fosforitos podem ser interpretados como não retrabalhados, depositando-se em camadas mais plano-paralelas, de ambientes mais calmos, ou como retrabalhados (por eventos de tempestade ou correntes) tornando-se mais granulares. Na Fazenda Ressaca, o litotipo Fosfalutito Pristine pode ser interpretada como a alternância dessas fácies mais retrabalhadas e pouco retrabalhadas, onde os minerais fosfáticos não necessariamente estariam consolidados, mas sim num aspecto gelatinoso, o que teria produzido as porções disformes tão características, porém associados a microbialitos.

As rochas fosfáticas têm muito a dizer sobre o paleoambiente e condições geoquímicas relacionadas aos elementos redox-sensitivos (indicadores de níveis de oxigênio) da época em que foram formadas, porém já é sabido que, para as unidades pré-cambrianas, os modelos fosfogênicos se contrapõem às de unidades fanerozóicas (Nelson et al., 2010). Modelos como os de ressurgência marinha são aceitos nas unidades fanerozóicas, porém nas unidades pré-cambrianas, a falta de evidências como a não comunicação com um paleoceanos (Misi e Kyle, 1994) sugerem condições não atualísticas do Neoproterozoico. Logo, os fosforitos da Formação Bocaina, que ocorrem em borda de paleocontinente, poderiam ser

associados a essas correntes de ressurgência, ou no mais, a uma específica condição de transição entre os tipos de processos fosfogenéticos pré-cambrianos (rochas fosfáticas o Grupo Bambuí e Grupo Uma) e fanerozoicos.

6.1.2.7. *Marga Fosfática*

Este litotipo possui espessura de cerca de 1 metro e é composto por uma rocha de matriz muito fina, milimetricamente acamadado, com intercalações de camadas, sendo uma composta por um material pelítico marrom-avermelhado e outra composta por um material fino cinza escuro com presença de fosforito na matriz. Algumas vezes essa fina alternância de camadas ocorre deformada ou ondulada, e intercalada também com camadas de dolomito ou sílica.



Figura 6.25 - Litotipo Marga fosfática deformado a esquerda e regular com camadas milimétricas a direita.

6.1.2.8. *Rudstone Pisolítico*

Litotipo com espessura em média de 3 metros, é composto por clastos de fosfato milimétricos, subarredondados a subangulosos de alta esfericidade, e com presença de grãos envelopados de tamanhos milimétricos (maiores que 2 mm). A matriz é dolomítica fina, de coloração bege clara e há presença de vênulas de sílica.



Figura 6.26 - A esquerda temos o litotipo Rudstone Pisolítico em sua diversidade de clastos e a direita temos o detalhe de um grão envelopado, que caracteriza este litotipo

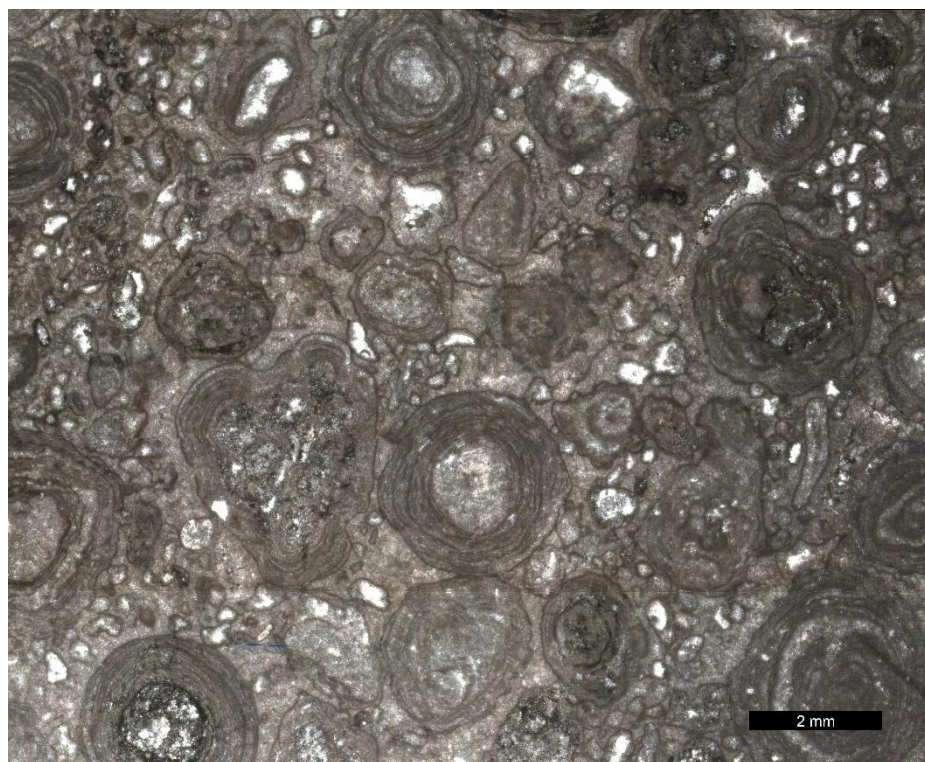


Figura 6.27 - Escanerização do litotipo Rudstone Pisolítico, apresentando grãos envelopados regulares e deformados. Nota-se matriz fina entre os grãos, dificultando que eles se encostem

6.1.2.9. *Grainstone Oolítico*

É um litotipo com espessura de cerca de 2 m, constituído por uma matriz dolomítica fina, com pacotes centimétricos na base sendo composta por ooides e com intraclastos dolomíticos moderadamente selecionados de tamanho milimétrico, tamanho que é observado diminuindo gradualmente conforme sobe-se na estratigrafia. Nota-se que alguns clastos maiores se destacam na matriz e nota-se a presença de clastos milimétricos de fosforito. Os clastos dolomíticos são subarredondados, com média esfericidade.



Figura 6.28 - Detalhe do litotipo Grainstone oolítico, destacando os ooides na base e a matriz fina com clastos dispersos acima.

6.1.2.10. *Brecha Sedimentar Bocaina Inferior*

Este litotipo possui espessura de 3 a 4 m e é composto por dolomito com intraclastos de variados tamanhos (desde milimétricos a centimétricos), com matriz dolomítica cinza escura fina com presença de clastos milimétricos escuros de fosforito. Este litotipo também apresenta porções em que se observa a presença de estromatólito muito silicificado.

Este litotipo é o que tem mais superfície recoberta com o a rocha fosfática bege friável quando foram feitos os levantamentos de campo.



Figura 6.29 - A esquerda temos detalhe da Brecha sedimentar superior, com variação de intraclastos centimétricos e clastos de fosforito milimétricos dispersos na matriz, e a direita temos a presença de estromatólito silicificado entre as brechas.

6.2. Mapa geológico dos litotipos identificados

A identificação e caracterização dos litotipos observados na Jazida da Fazenda Ressaca possibilitou a elaboração de um mapa geológico na escala de 1:2.000 (figura 6.30) da área da lavra em funcionamento.

Para composição deste mapa geológico foram descritos por toda a lavra cerca de 79 pontos com descrição macroscópica das litologias e estruturas geológicas presentes, com identificação e mapeamento dos seguintes litotipos, do topo para a base: Brecha Sedimentar Basal da Formação Tamengo, Brecha Sedimentar Superior Regular, Quartzito-Arenito Fosfático, Brecha Sedimentar Bocaina Superior, Estromatolito Silicificado, Fosfalutito Pristine, Marga Fosfática, Rudstone Psolítico, Grainstone Oolítico e Brecha Sedimentar Bocaina Inferior. Os pontos foram classificados com o código MBB-XXXX, com numeração seguindo números ordinais do 0000 ao 0079.

Devido a heterogeneidade geológica da Jazida da Fazenda Ressaca e melhor caracterização da mesma, juntamente com o mapa geológico foram desenvolvidas 03 seções transversais a lavra, direção NW-SE, sendo uma seção na porção norte da lavra – Seção N-N' (figura 6.31), uma seção próxima ao centro da lavra – Seção C-C' (figura 6.32), e uma seção na porção sul da lavra – Seção S-S' (figura 6.33). Foi necessário, para melhor ajuste a

formatação deste presente trabalho, que as seções tivessem duas escalas distintas, sendo que as escalas das seções estão em 1:250 nas seções norte e sul, e 1:400 na seção central.

Tanto as seções quanto o mapa geológico encontram-se em melhor visualização no anexo 1.

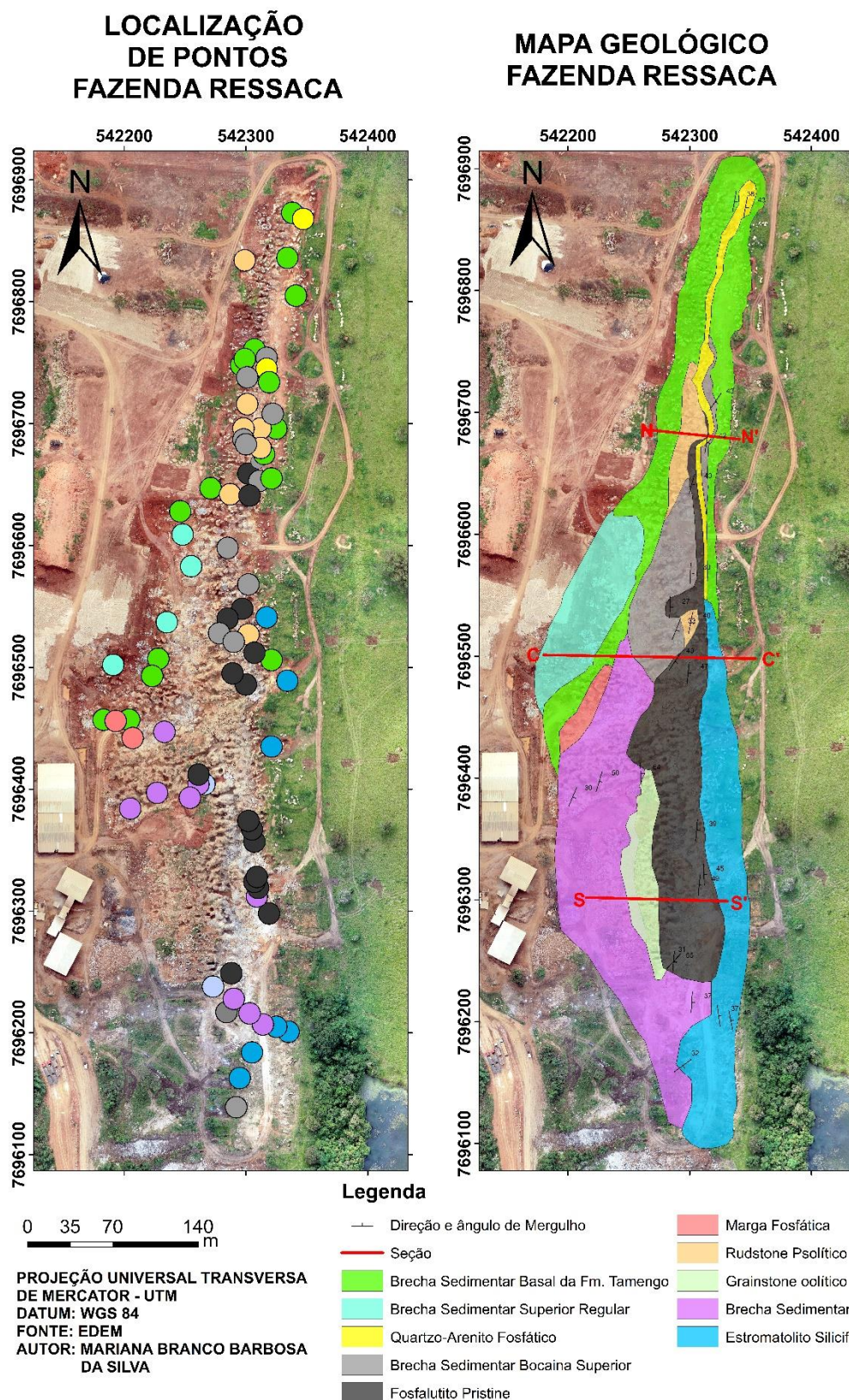


Figura 6.30 - A esquerda a distribuição de pontos de litologias e, a direita, mapa geológico desenvolvido com os dados coletados. Para mapa completo e em maior resolução, ver Anexo 1.

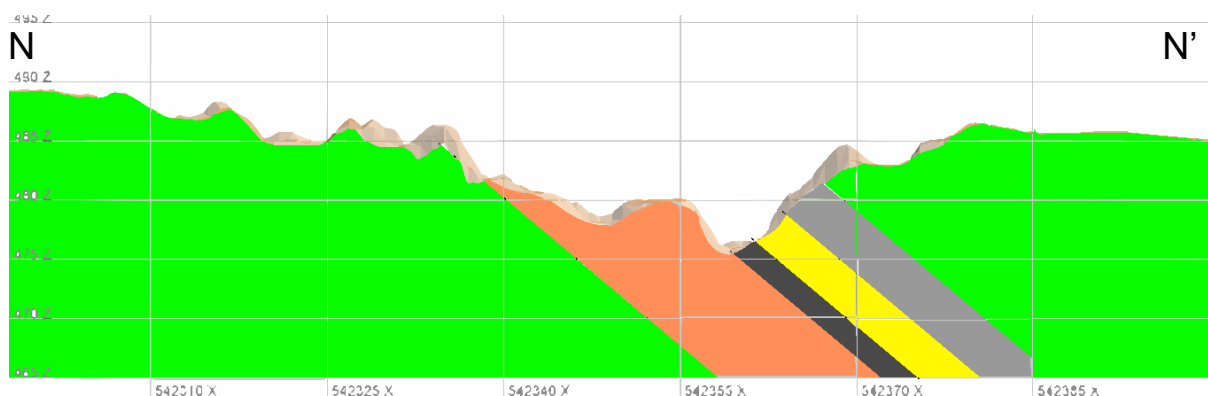


Figura 6.31 - Seção N-N', localizada ao norte da lavra da Jazida da Fazenda Ressaca. Escala 1:250. Nota-se a borda da cava sendo composta por Brecha Sedimentar Basal da Formação Tamengo, e entre ela os litotipos com maiores concentrações de fosfato.

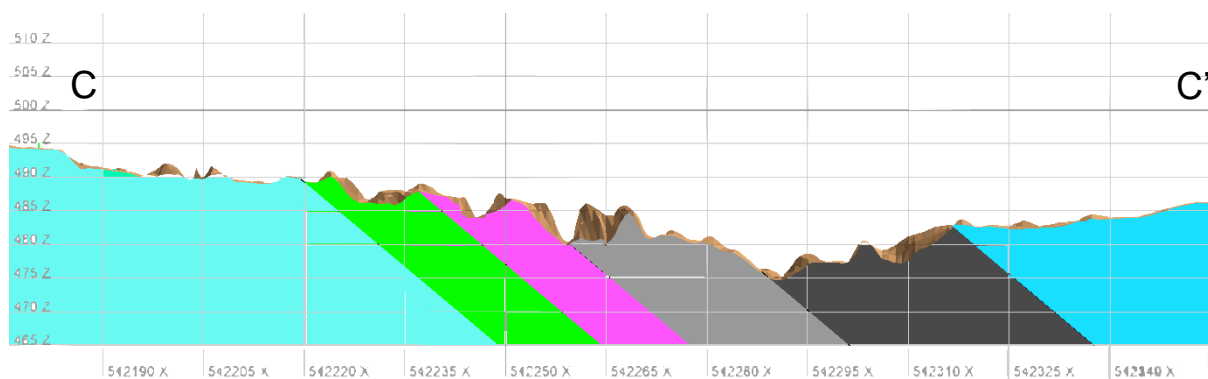


Figura 6.32- Seção C-C', localizada ao centro da lavra da Jazida da Fazenda Ressaca. Escala 1:400. Na parte central da lavra a litologia da borda da cava começa a mudar para Brecha Sedimentar Superior Regular e Estromatolito Silicificado, e destaque para o gradual aumento do litotipo Fosfalutito pristine

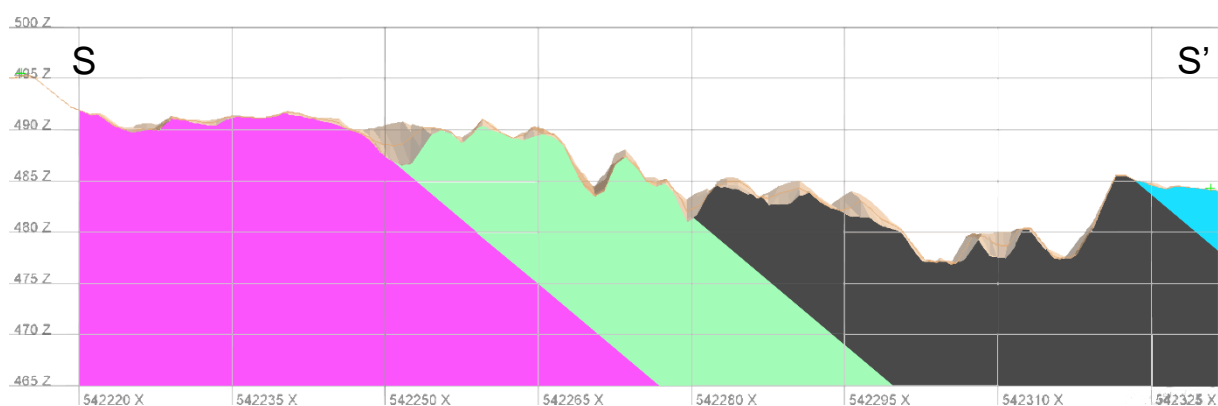


Figura 6.33 - Seção S-S', localizada ao sul da lavra da Jazida da Fazenda Ressaca. Escala 1:250. Nota-se que o litotipo do fosfalutito pristine aumenta com relação às outras seções, indicando ser a melhor porção da lavra economicamente a ser explorada.

6.3. Modelagem e estimativa de recursos.

Para fins de estudo desta monografia, a EDEM disponibilizou parte do seu banco de dados relacionados a sondagem que foram realizadas na Jazida da Fazenda Ressaca desde o início do processo de pesquisa, anterior a abertura da frente de lavra. As sondagens registradas no banco de dados consistiam em maioria de sondagens do tipo Sondagem Rotopercussiva de Circulação Reversa (RC Drilling). Além disso, a EDEM disponibilizou o levantamento topográfico da lavra que foi realizado no mês de junho/2022.

Inicialmente, durante a fase de tratamento de dados, foram identificados 518 furos de sondagem no banco de dados fornecidos, porém alguns dados estavam com erro ou faltando alguma informação que seria necessária para a modelagem, como conflitos nos dados X, Y ou Z, nos resultados ou identificação de furo. Desta forma, de possíveis 518 furos iniciais, foram utilizados de fato 348 furos de sondagem para a modelagem.

Utilizando-se do programa Studio RM da Datamine, programa licenciado no laboratório de informática do IGC-USP, foram inseridos os furos de sondagem que seriam utilizados na amostragem (figura 6.34). Com exceção dos espaços ao meio da porção sul, que não apresentou possíveis furos de sondagem registrados, a distribuição entre os furos ficou, em média, cerca de 12 m de distancias entre furos.



Figura 6.34 - Distribuição de furos de sondagem por toda a Jazida da Fazenda Ressaca. Nota-se as sondagens coloridas foram as que tiveram dados a serem categorizados e os cinza com dados ausentes.

Para ser possível delimitar o corpo mineralizado, é necessário delimitar seções para fins de modelagem, em que os furos de sondagem funcionam como guias de onde estima-se iniciar e terminar o topo e base deste corpo. Temos como exemplo uma seção da porção norte na Jazida da Fazenda Ressaca, em que a topografia está em marrom, o topo do corpo em vermelho e a base em azul (figura 6.35). Para fins de modelagem geral e considerando a

complexidade da topografia em terreno cárstico, além da natureza dos dados fornecidos serem por sondagem tipo RC (método destrutivo de amostras), foi considerado toda a lavra como uma zona mineralizada, não diferenciando entre o litotipos primários e secundários.

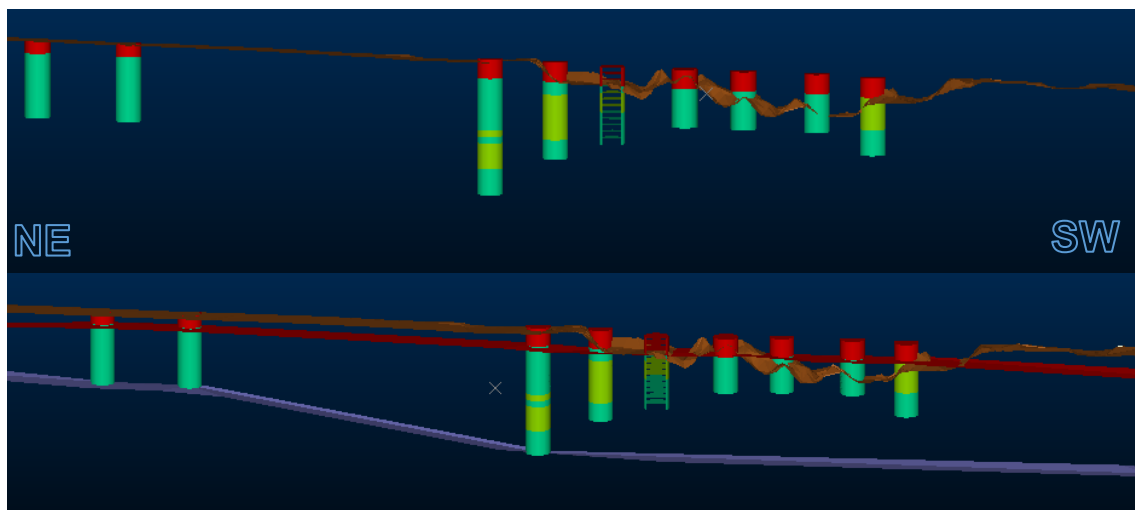


Figura 6.35 - Exemplo de seção em que foi delimitado o corpo mineralizado. Nota-se que a topografia atual já escavou parte da superfície do topo da zona mineralizada que foi considerada, e que os furos foram separados em 3 cores: vermelho superficial indicando solo com fosfato, verde-água indicando teores acima de 4% de fosfato e verde-limão indicando teores acima de 4% de fosfato.

Um elipsoide de busca de informações de sondagem foi então definido, com busca de até 20 m entre as amostras no eixo X e 10 m de distância para os eixos Y e Z, e então, com o método de inverso do quadrado da distância sendo o método utilizado para estimativa, o modelo de blocos foi criado (figura 6.36).

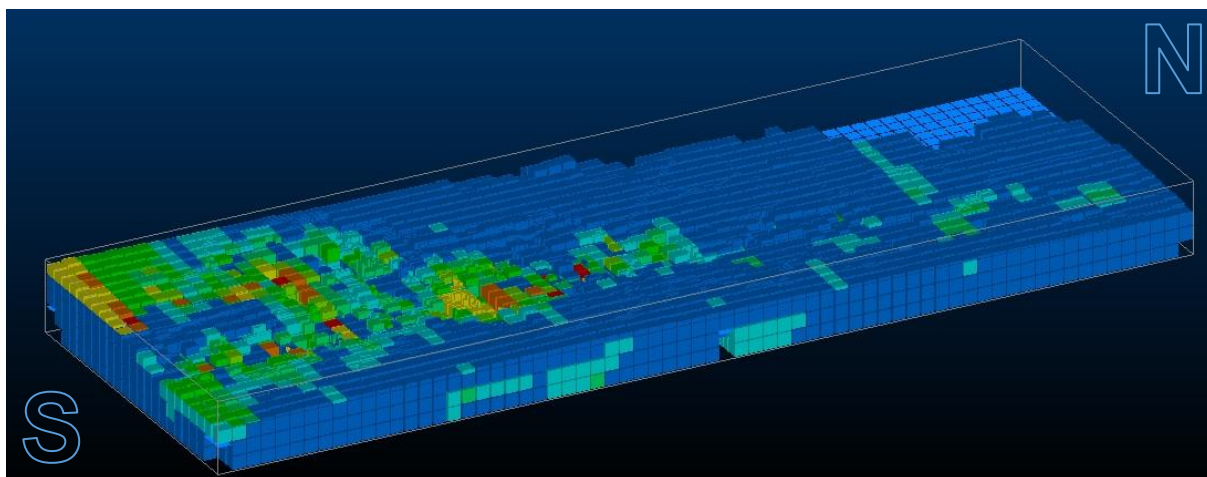


Figura 6.36 - Modelo de blocos gerado automaticamente com a estimativa do inverso do quadrado da distância. Nota-se os blocos mais promissores na porção sul da lavra. As cores indicam a confiabilidade da estimativa dos blocos, indo dos tons vermelho, laranja, amarelo, verde e azul, sendo o vermelho o melhor bloco estimado e o azul o pior

Depois de criado, o modelo de blocos foi redefinido, buscando melhorar a certeza e controle dos resultados obtidos. Para isso, utilizando-se da ferramenta TD (transformado da distância), definiu-se intervalos para categorizar os dados dos blocos em “medido”, “indicado” e “inferido” conforme a distância entre as amostras utilizadas nos blocos modelados, sendo o “medido” o que possui a menor distância entre amostras e o “inferido” o que possui a maior distância.

Como forma de conferência e certificação, foi feita uma validação cruzada (figura 6.37), obtendo-se um coeficiente de correlação para P_2O_5 de 0,84, mostrando que a modelagem proposta foi coerente.

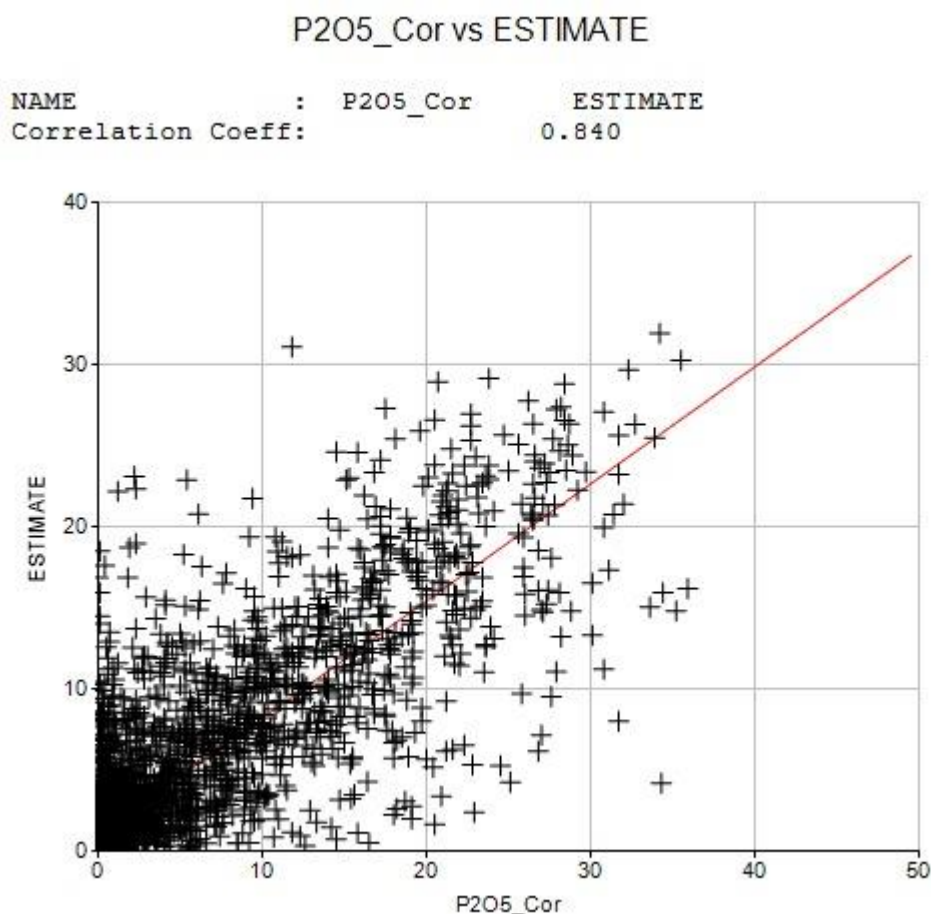


Figura 6.37 - Gráfico resultado da validação cruzada, indicando coeficiente de correlação de 0,84. Nota-se a distribuição próxima ao eixo seguindo certo padrão, e como o coeficiente de correlação está próximo ao eixo XY, indica confiabilidade na estimativa.

Por fim, para cálculo da quantidade de minério estimado, utilizou-se $1,89 \text{ g/cm}^3$ como a densidade do litotipo da Rocha Fosfática Bege Friável, dado disponibilizado pela EDEM. Desta forma, foram estimadas no total, entre medido, indicado e inferido, cerca de 117.784 toneladas de fosfato que a Jazida da Fazenda Ressaca possui de depósito total.

Tabela 2 - Quantificação de fosfato estimados da Jazida da Fazenda Ressaca.

CLASSIFICAÇÃO	VOLUME (m³)	MASSA (ton.)	DENSIDADE (g/cm³)	%P2O5	FOSFATO (ton.)
INDICADO	1.306.846	2.469.940	1.89	2,51	61.982
INFERIDO	2.105.349	3.979.109	1.89	1,85	73.572
MEDIDO	798.684	1.509.512	1.89	2,80	42.320
TOTAL	4.210.879	7.958.561			117.784

7. INTERPRETAÇÕES E DISCUSSÕES

A Jazida da Fazenda Ressaca se apresenta como uma área heterogênea de litotipos em uma distância próxima, possibilitando a discriminação dos litotipos ali presentes, o que resultou em pelo menos 10 litotipos primários distintos e que foram possíveis de serem reconhecidos macroscopicamente, sendo interessante para a usuabilidade durante a atividade de lavra.

A identificação de Fácies Sedimentares definida anteriormente por Boggiani (1998) e Fontaneta (2012) tem função para interpretação paleoambiental, não sendo prática para uso na pesquisa mineral, com fins práticos e econômicos, com vistas a futuros trabalhos de beneficiamento. A nomenclatura de Justo (2000) avança nesse sentido, mas com as escavações das porções superficiais, a presente definição de litotipos se mostra mais apropriada e usual, fato que também foi constatado com os profissionais da empresa que vêm trabalhando na área.

O mapa geológico desenvolvido e a coluna estratigráfica dos litotipos proposto é uma representação que unifica todas os litotipos observados na lavra, porém nota-se diferença de litotipos aflorantes na porção norte da lavra e da porção sul são diferentes. Esta diferença de litologias indica que houve certo controle estrutural, e que também delimitou o formato lenticular que a jazida se apresenta.

As 03 seções que foram distribuídas por toda a extensão da Jazida da Fazenda Ressaca, além de proporcionar uma melhor visualização do comportamento dos litotipos em profundidade, também evidenciam que as partes que tiveram maior escavação superficial com a retirada da Rocha Fosfática Bege Friável é também de onde os litotipos primários rico em fosfato estão localizados, o que era esperado pois a tendencia é a de haver maiores concentrações de fósforo nestas regiões.

A análise de fluorescência de raios-X demonstra alta concentração de CaO, Al₂O₃, SiO₂ e P₂O₅ no litotipo Rocha Fosfática Bege Friável, o que já era esperado, dado que a maioria dos litotipos observados era composto por dolomito e muitos litotipos observados estavam com

um certo grau de silicificação. No entanto, por se tratar em maioria de dolomito, esperava-se uma maior quantidade de Mg (o que pode indicar que ele já foi substituído por Fe em menor quantidade e Ca em maior quantidade) e a alta presença de alumínio indica uma camada superficial de intemperismo.

É interessante notar que a quantidade de P_2O_5 obtida em análise (figura 7.1) apresenta tendência de aumento de valores com a profundidade.

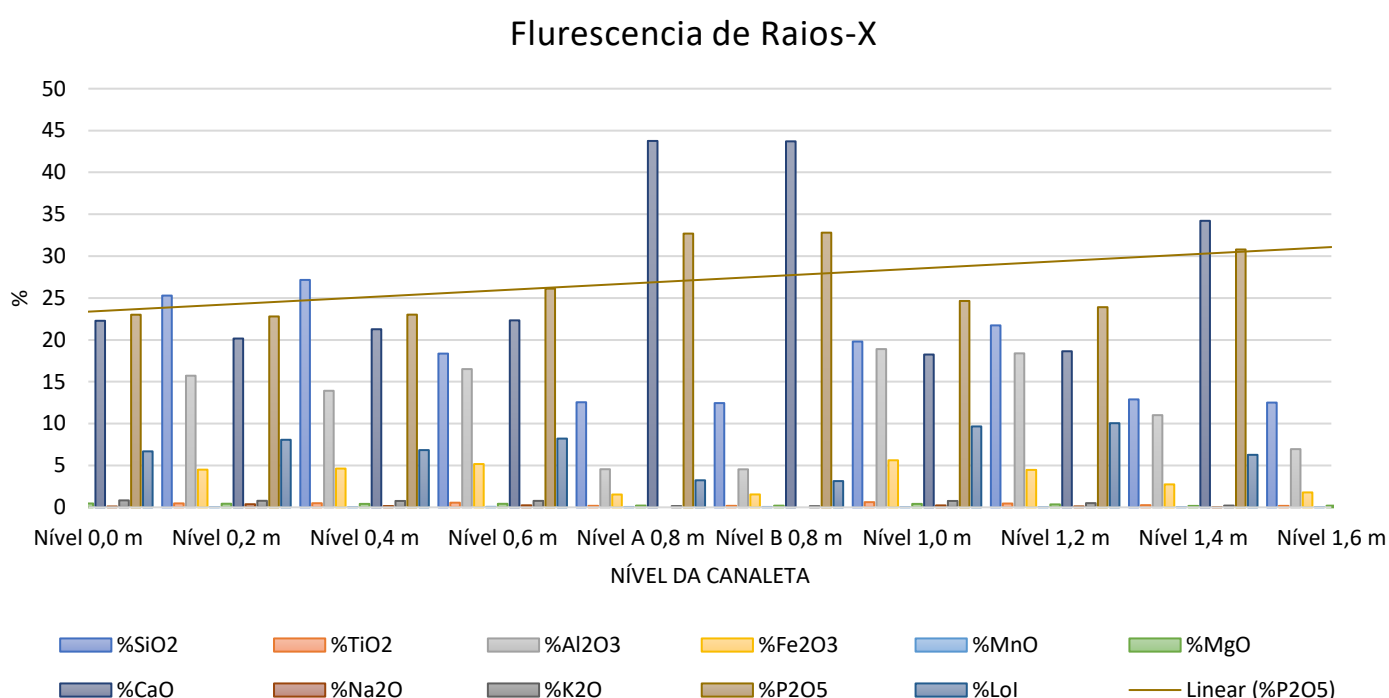


Figura 7.1 - Gráfico mostrando as concentrações em porcentagem dos elementos encontrados nas amostras, com destaque para a tendência de crescimento do teor de com o aumento da profundidade no perfil de alteração.

Também é possível observar que a alta presença de SiO_2 e Al_2O_3 no litotipo Rocha Fosfática Bege Friável se mostra possivelmente à presença dos minerais de quartzo e wavelita (fosfato de alumínio), conforme os resultados da difratometria de raios-x, que indicou a presença destes minerais. A crandalita, apesar de ter sido indicada, não corresponde totalmente com o gráfico, o que pode ser devido a sua menor proporção, e o mesmo ocorre com a nenadkevichita. No entanto, a presença de Nb e altos níveis de Al corroboram a possibilidade da presença destes minerais na amostra analisada.

Com relação a modelagem, é importante destacar que o valor calculado é para o potencial total da Jazida da Fazenda Ressaca, contando tanto com o da Rocha Fosfática Bege Friável, quanto dos litotipos primários. O terreno cárstico, associado com o método de sondagem RC

(um método destrutivo de amostras), dificulta a individualização dos litotipos amostrados, causando dificuldade para separar precisamente tanto estes litotipos, quanto a diferenciação dos litotipos primários que foram previamente descritos. Portanto, uma homogeneização do corpo mineralizado foi necessária, considerando todo o estimado como uma zona mineralizada, e utilizando-se também a densidade da Rocha Fosfática Bege Friável como base de cálculo do volume – que é menos densa do que os litotipos primários, o que provavelmente causou certa imprecisão na estimativa.

A EDEM estima que foi retirado, desde o início da abertura da cava, aproximadamente 600.000 toneladas da Rocha Fosfática Bege Friável. Desta forma, levando em conta o valor obtido como o volume do depósito estimado como “medido” (que foi o de dados mais confiáveis obtidos com o banco de dados, e considerando que a sondagem RC realizadas tinha como objetivo focar na identificação da Rocha Fosfática Bege Friável), pode-se considerar não estando muito incongruente comparado com o valor real em lavra. Ainda assim, métodos de modelagem em terrenos cársticos precisariam ser avaliados em trabalhos futuros para uma estimativa mais precisa.

O litotipo Rocha Fosfática Bege Friável, com teores médios entre 14 e 15 % e solubilidade em ácido cítrico por volta de 5%, tem apresentado boa aceitação nas áreas agrícolas da região, mas poderia ter sua solubilidade aumentada com técnicas de calcinação. Ensaios realizados por Francisco (2006) com materiais de perfis de alteração com minerais do grupo da Crandalita, demonstraram aumento do fósforo solúvel em cinitrato neutro de amônio de 5% para 54%, 16% e 53% para as amostras calcinadas de amostras de perfis de alteração de rochas com fosfato (rochas alcalinas) de Tapira-MG, Catalão-GO e Juquiá-SP, respectivamente. As amostras calcinadas não apresentaram mais presença de crandalita, devido às mudanças cristalográficas da calcinação.

8. CONCLUSÃO

A Jazida da Fazenda Ressaca se mostrou, em uma área relativamente pequena, com uma diversidade de litotipos mapeados e descritos macroscopicamente. Juntamente com o principal material de interesse econômico, o litotipo secundário Rocha Fosfática Bege Friável que fica distribuída superficialmente na Jazida da Fazenda Ressaca, foram diferenciados e descritos 10 litotipos primários diferentes, compostos principalmente por brechas dolomíticas com intraclastos, dolomitos estromatolíticos e fosfalutito pristine, abrangendo a porção basal da Formação Tamengo e a parte superior da Formação Bocaina.

O material atualmente lavrado (Rocha Fosfática Bege Friável) apresenta teor médio de 15% de P_2O_5 e 5 % de solubilidade em ácido cítrico, com boa aceitação entre os agricultores

da região. Esse material teria se originado pelo intemperismo e remineralização do fosforito primário com formação de minerais de fosfato aluminosos do grupo da Crandalita.

Com a lavra desse material superficial, pode-se observar e realizar mapeamento de detalhe dos litotipos primários, tendo sido identificados dez litotipos descritos em detalhe e mapeados em mapa geológico 1: 2.000.

Desses litotipos, apenas um pertence à Formação Tamengo, na forma de brecha intraformacional com clastos de fosforitos e os demais pertencem à Formação Bocaina, com destaque para o Fosfalutito Pristine, caracterizado por camada de 2 a 4 m de espessura, homogênea, de cor preta característica, com porções com possível laminação microbiana e constituída por fluorapatita e teores de P_2O_5 ao redor de 34 %.

A fonte do fósforo para a formação desse fosforito poderia ter sido correntes de ressurgência marinha, mas a precipitação em si da fluorapatita condicionada à atividade microbiana. Essa camada constitui o litotipo de maior interesse econômico, mas o que requer beneficiamento futuro. O litotipo Brecha Sedimentar Basal da Formação Tamengo, pode-se viabilizar economicamente para produção de corretivo de solo com teores médios de 3% de P_2O_5 , constituindo uma alternativa futura ao material atualmente lavrado (Rocha Fosfática Bege Friável), sendo que futuros beneficiamentos desse material poderiam empregar calcinação, com aumento significativo da solubilidade do fósforo e uso direto na agricultura.

A modelagem e estimativa de recurso que foi elaborada com o método de interpolação do inverso do quadrado da distância e utilização de dados coletados por sondagem RC teve que considerar toda a jazida como uma zona mineralizada devido a sua heterogeneidade dos litotipos e sua disposição, além de que o tipo de sondagem RC não permite distinção entre os litotipos. No entanto, conforme demonstrado na estimativa efetuada, ainda é grande o potencial de P_2O a ser retirado destes litotipos, principalmente no litotipo Fosfalutito Pristine, que se concentra em camadas métricas de fosforito.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

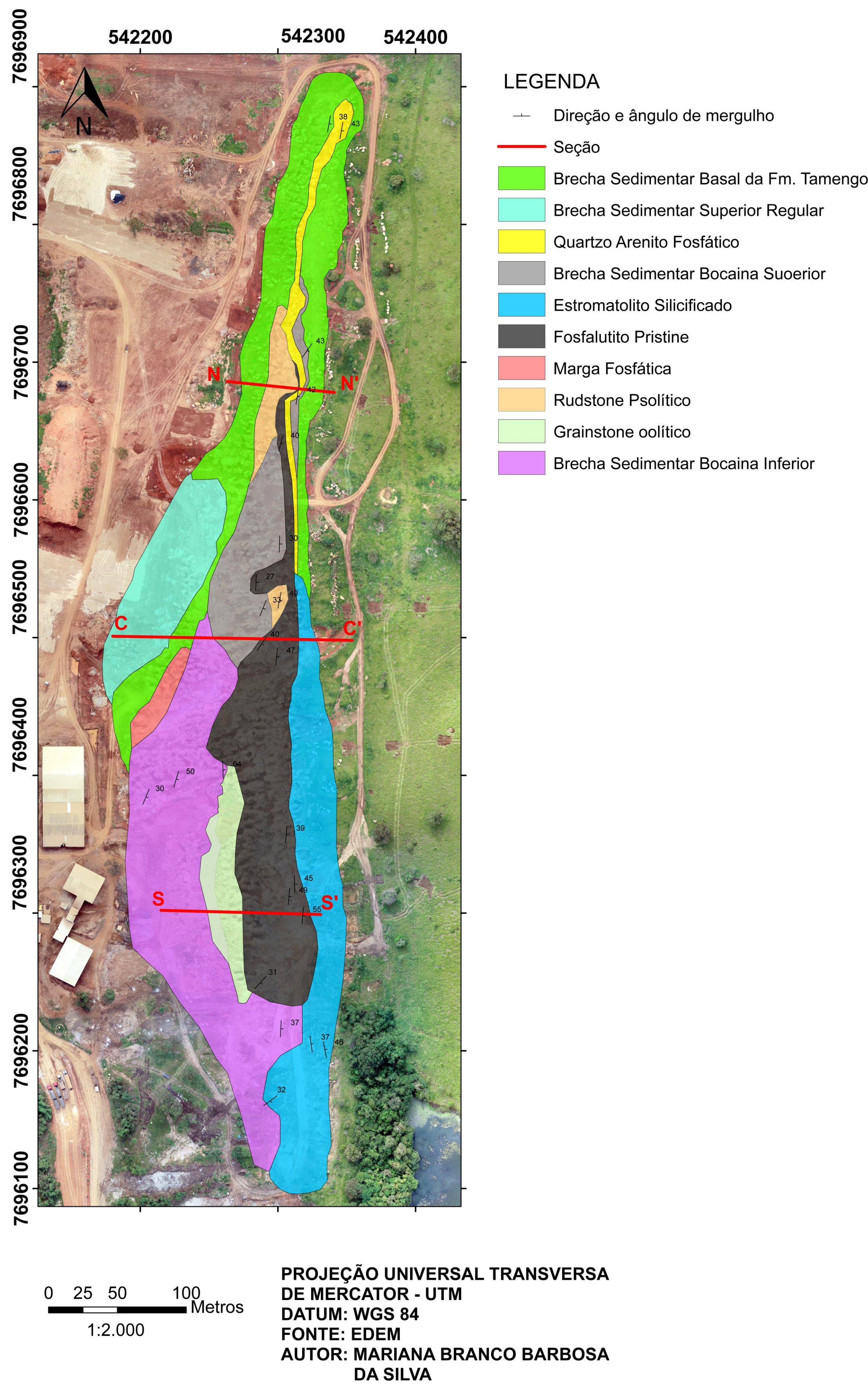
- Abreu Filho, W., Borges, F.R., Abram, M.B., 2011, Projeto Fosfato Brasil, estado de Mato Grosso: áreas Araras, Serra do Caeté e Planalto da Serra: Goiânia: CPRM, p. 159.
- Alcover Neto, A., & Toledo, M. C. M. D., 1993, Evolução supérgena do carbonatito de Juquiá (SP), Revista do Instituto Geológico, v. 14(1), p. 31-43.
- Almeida, F.F.M., 1965, Geologia da Serra da Bodoquena (Mato Grosso), Brasil: Boletim da Divisão de Geologia e Mineralogia, DNPM, no. 219, p. 1-96.

- Alvarenga, C.J.S., Santos, R.V., Dantas, E.L., 2004, C-O-Sr isotopic stratigraphy of cap. Carbonates overlying Marinoan-age glacial diamictites in the Paraguay Belt, Brazil: *Precambrian Research*, no. 131, p. 1-21.
- Amorim, K. B., Afonso, J.W.L.; Leme, J.M.; Diniz, C.Q.C.; Rivera, L.C.M.; Gutierrez, J.C.G.; Boggiani, P.C.; Trindade, R., 2020, Sedimentary facies, fossil distribution and depositional setting of the late Ediacaran Tamengo Formation (Brazil), *Sedimentology*: v. 67, p. 1-29.
- ANDA, Associação Nacional Para Difusão de Adubos, 2022, Macro Indicadores de Fertilizantes, acessado em maio, 2022.
- Boggiani, P.C., 1990, Ambientes de sedimentação do Grupo Corumbá na região central da Serra da Bodoquena, Mato Grosso do Sul, [Dissertação de mestrado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências.
- Boggiani, P.C.; Fairchild, T.R.; Coimbra, A.M., 1993, O Grupo Corumbá (Neoproterozóico-Cambriano) na região Central da Serra da Bodoquena, Mato Grosso do Sul (Faixa Paraguai), *Revista Brasileira de Geociências*, v. 23, p. 301-305.
- Boggiani, P.C., 1998, Análise estratigráfica da Bacia Corumbá (Neoproterozoico) – Mato Grosso do Sul [Tese de Doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências.
- Boggiani, P.C., Alvarenga, C.J.S., 2004, Faixa Paraguai In: *Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*: São Paulo: Beca, p. 113-120.
- Boggiani, P.C., Gaucher, C., Sial, A.N., Babinski, M., Simon, C.M., Riccomini, C., Ferreira, V.P., Fairchild, T.R., 2010. Chemostratigraphy of the Tamengo Formation (Corumbá Group, Brazil): a contribution to the calibration of the Ediacaran carbon-isotope curve: *Precambrian Research*, no. 182(4), p. 382-401.
- Campanha, G.A.C., Boggiani, P.C., Sallun Filho, W., Sá, F.A., Zuquim, M.P.A., Piacentini, T., 2011, A faixa de dobramento Paraguai na Serra da Bodoquena e Depressão do Rio Miranda, Mato Grosso do Sul: *Geologia USP: Série Científica*, v. 11(3), p. 79-96.
- Cook, P.J., Shergold J.H., 1986, *Phosphate Deposits of the World. Volume 1. Proterozoic and Cambrian Phosphorites*, New York, Cambridge University Press, 386 pp.
- Dunham, R.J., 1962, Classification of carbonate rocks according to depositional texture: classification of carbonate rocks.
- Embry III, A.F., Klován, J.E., 1971, A late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, NWT: *Bulletin of Canadian petroleum geology*, v. 19, no. 4, p. 730-781.
- Fernandes, H.A., Boggiani, P.C., Afonso, J.W.L., Amorim, K.B., Trindade, R.I.F., 2022. Sedimentary and tectonic breccias at the base of the Ediacaran Tamengo Formation (Corumbá Group): a comparative study. *Brazilian Journal of Geology*, 52(2), (in prelo): <https://doi.org/10.1590/2317-4889202220210062>.
- Follmi, K.B.E., Garrison, R.E., 1991, Phosphatic sediments, ordinary or extraordinary deposits? The example of the Miocene Monterey Formation (California) - *Controversies in Modern Geology*: Academic Press, p. 55-84.
- Fontaneta, G.T., 2012, Dolomitização e fosfogênese na Formação Bocaina, Grupo Corumbá (Ediacarano), [Tese de mestrado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências.
- Fontaneta, G.T., 2008, Petrografia, Geoquímica e Gênese das Rochas Fosfáticas do Grupo Corumbá (Ediacarano), [Trabalho de Formatura]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências.

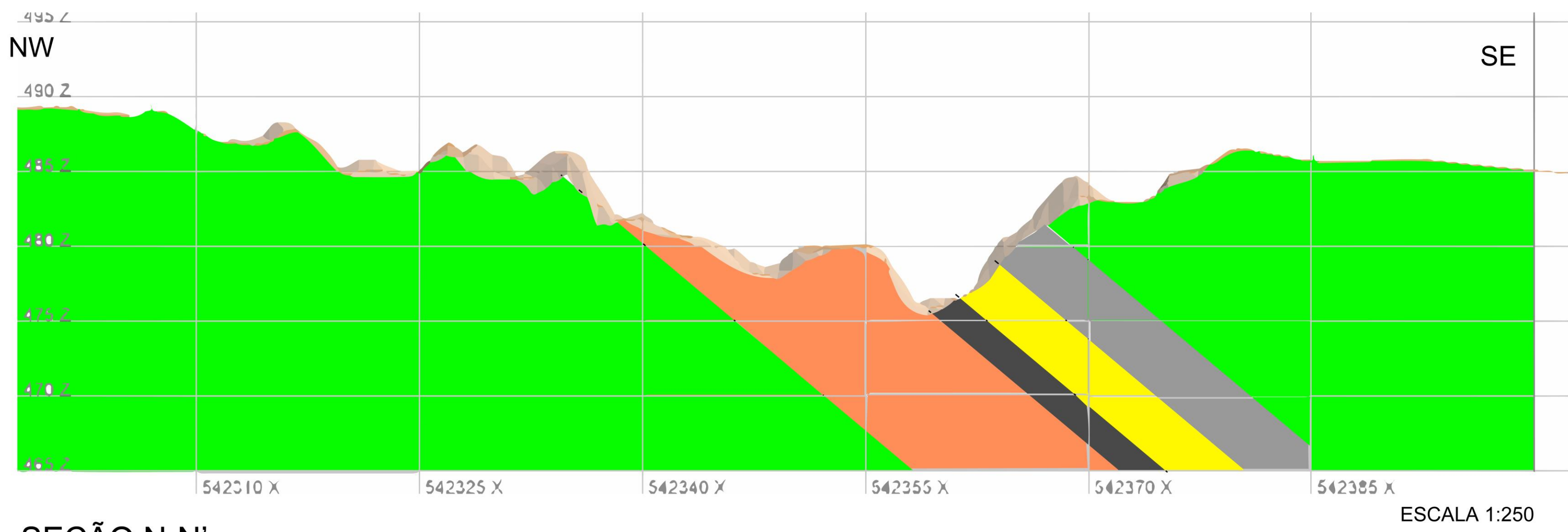
- Francisco, E.A.B. 2006. Fosfato aluminosos do grupo da Crandallita como fonte alternativa de fósforo para a cultura do arroz. Tese de doutoramento. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 145 p.
- Freitas, S.C.M., 2009, Fosfato aluminoso da ilha de traíra como fonte alternativa de fosfato para a agricultura familiar do maranhão, [Tese de Doutorado]: Maranhão, UEMA.
- Gaucher, C., Boggiani, P.C., Sprechmann, P., Sial, A.N., Fairchild, T.R., 2003, Integrated correlation of the Vendian to Cambrian Arroyo del Soldado and Corumbá Groups (Uruguay and Brazil): palaeogeographic, palaeoclimatic and palaeobiologic implications: *Precambrian Research*, no. 120, p. 241-278.
- Justo, L.J.E.C., 2000, Fosfato da Serra da Bodoquena – Mato Grosso do Sul. City: Programa de Avaliação Geológico-Econômica de Insumos Minerais para Agricultura no Brasil, Series Fosfato da Serra da Bodoquena – Mato Grosso do Sul, p.31.
- Luz, J.S., Marques, V. J., Abreu Filho, W., Brandão, I.A., Mello, J.C.R., 1980, Projeto Fosfato de Bonito. Relatório de Prospeção Preliminar, Convênio CODESUL/CPRM, p. 41.
- McGee B., Babinski M., Trindade R., Collins A.S., 2018, Tracing final Gondwana assembly: Age and provenance of key stratigraphic units in the southern Paraguay Belt, Brazil: *Precambrian Research*, v. 307, p. 1-33.
- Misi, A., & Kyle, J.R., 1994, Upper Proterozoic carbonate stratigraphy, diagenesis, and stromatolitic phosphorite formation, Irecê Basin, Bahia, Brazil. *Journal of Sedimentary Research*, v. 64(2a), p. 299-310.
- Morais, L.; Fairchild, T.R.; Freitas, B.T.; Rudnitzki, I.D.; Silva, E.P.; Lahr, D.; Moreira, A.C.; Abrahão Filho, E.A.; Leme, J.M.; Trindade, R.I.F., 2021, Doushantuo-Pertatataka-Like Acritarchs From the Late Ediacaran Bocaina Formation (Corumbá Group, Brazil): *Frontiers In Earth Science*, v. 9, p. 1.
- Nelson, G. J., Pufahl, P. K., Hiatt, E. E. 2010. Paleooceanographic constraints on Precambrian phosphorite accumulation, Baraga Group, Michigan, USA. *Sedimentary Geology*, v. 226(1), p. 9-21.
- Nogueira, A., Riccomini, C., 2006, O Grupo Araras (Neoproterozóico) na parte norte da Faixa Paraguai e sul do Craton Amazônico, Brasil, *Revista Brasileira de Geociências*, v. 36. p. 623-640.
- Oliveira, N.P. & Costa, M.L., 1984, Os fosfatos aluminosos do PA e MA: estágio atual de conhecimentos e estratégia para o aproveitamento econômico, *Ciências da Terra*, no. 10, p. 16-19.
- Oliveira, R.S., Nogueira, A.C.R., Romero, G.R., Truckenbrodt, W., Bandeira, J.C.S., 2019, Ediacaran ramp depositional model of the Tamengo Formation, Brazil: *Journal of South American Earth Sciences*, no. 96 (in press).
- Parry, L.; Boggiani, P.C.; Condon, D.; Garwood, R.; Leme, Juliana M. ; McIlroy, D. ; Brasier, M. D. ; Trindade, R. ; Campanha, G. A. C. ; Pacheco, M.L.A.F. ; Diniz, C. Q. C. ; Liu, A. G., 2017, Ichnological evidence for meiofaunal bilaterians from the Ediacaran?Cambrian transition of Brazil. *Nature Ecology and Evolution*, v. 9, p. 1.
- Pufahl, P.K., & Groat, L.A., 2017, Sedimentary and igneous phosphate deposits: formation and exploration: an invited paper, *Economic Geology*, v. 112(3), p. 483-516.
- Queiroz, A.F.S., 2022, Mineralogia e geoquímica dos depósitos de fosfatos aluminosos lateríticos da região Bonito-Ourém, no Estado do Pará, [Mestrado em Geoquímica e Petrologia]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências.

- Ramos, M.E.F., 2019, Sedimentological, petrographic, and geochemical characterization of Ediacaran platform carbonates (Tamengo Formation, Corumbá Group), [Tese de doutorado]: Brasília, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.
- Sallun Filho, W., Fairchild, T. R., Boggiani, P. C., 1994, Microesferas em fosforito do grupo corumba (proterozoico terminal), serra da bodoquena (ms): microfosséis ou estruturas inorgânicas, In Resumo das Comunicações, p. 71-72.
- Souza, A.E., Fonseca, D.S., 2009, Economia Mineral do Brasil – 2009: Brasília, DNPM/MME, p. 546 – 568.
- Toledo, M.C.M.D., 1999, Os fosfatos aluminosos da série da crandallita-uma revisão, Revista do Instituto Geológico, v. 20(1-2), p. 49-63.

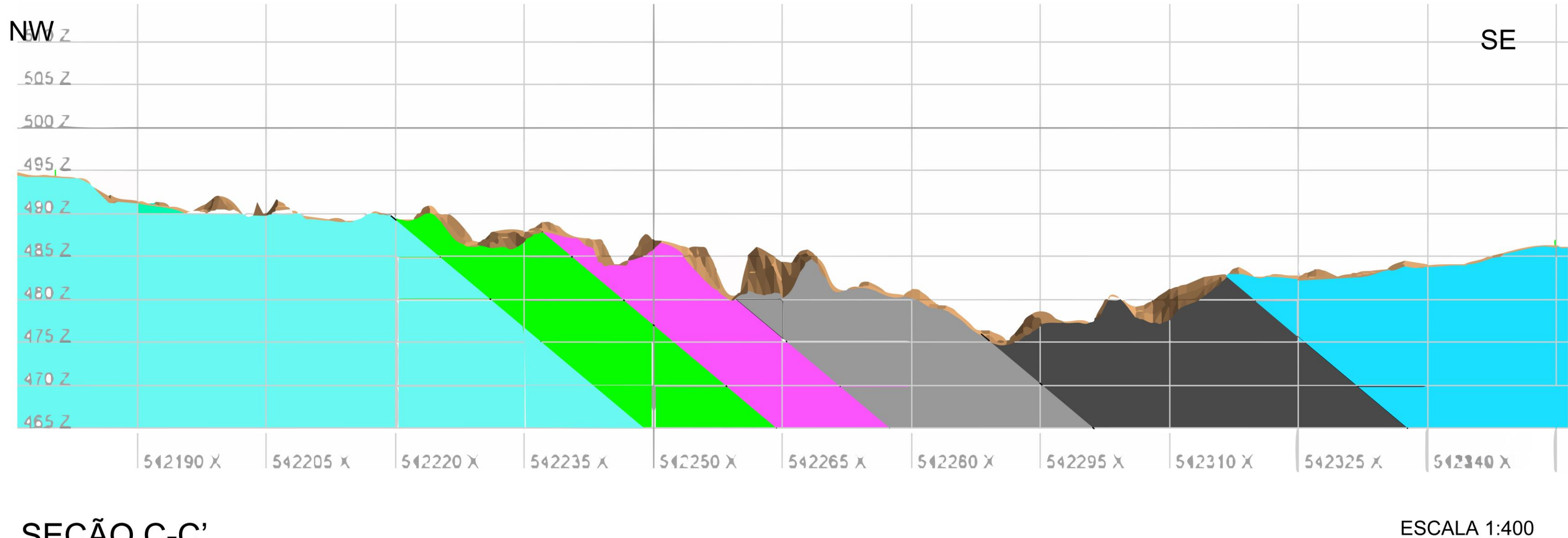
MAPA GEOLÓGICO



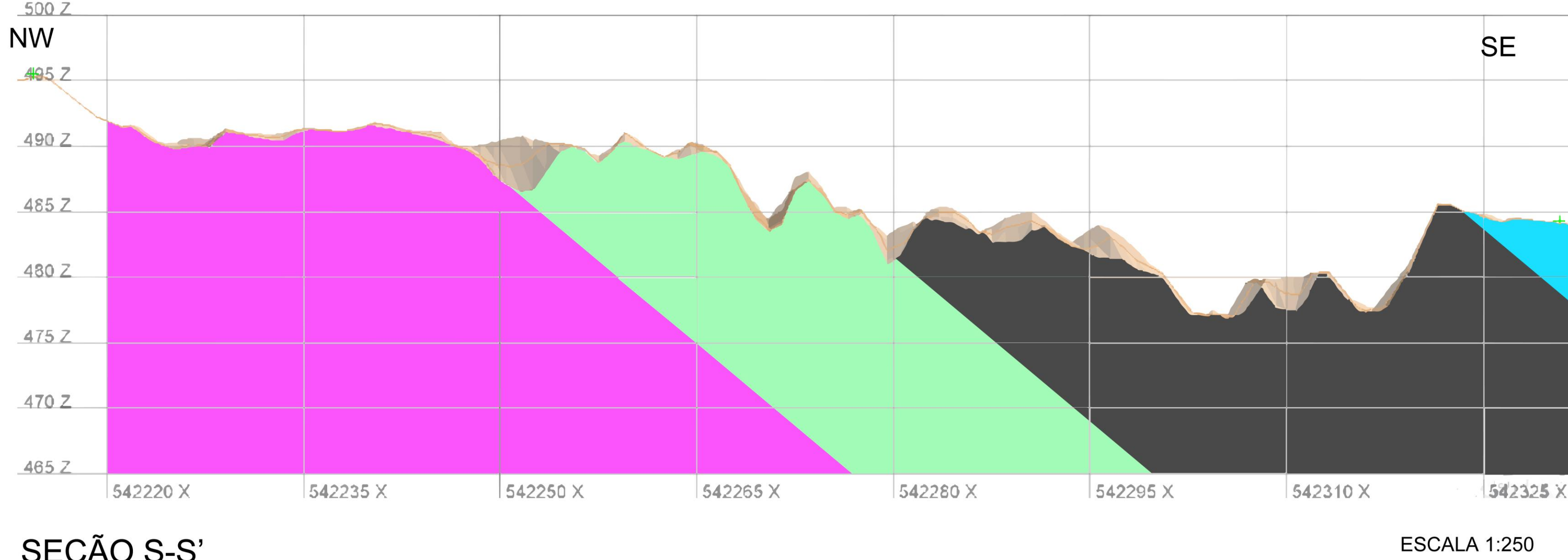
SEÇÕES



SEÇÃO N-N'

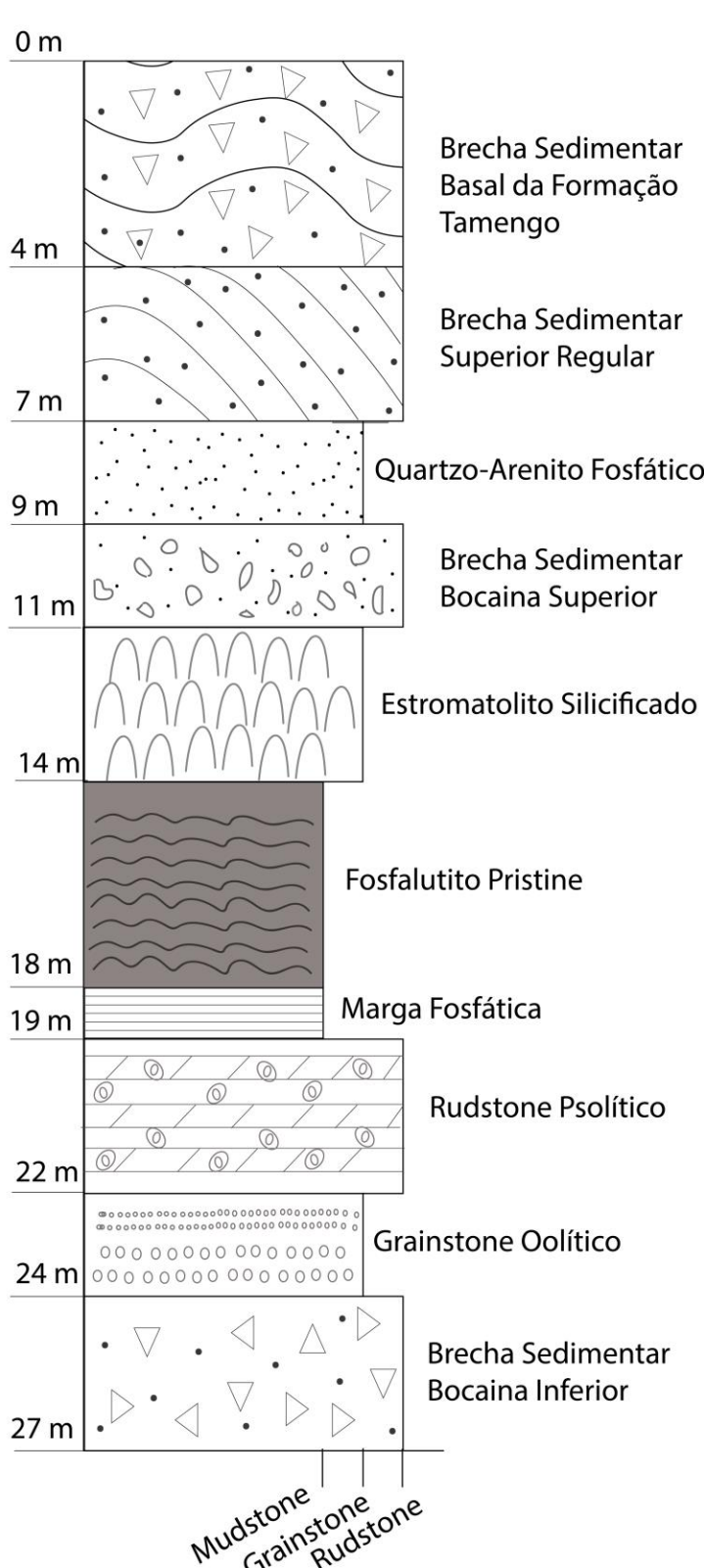


SEÇÃO C-C'



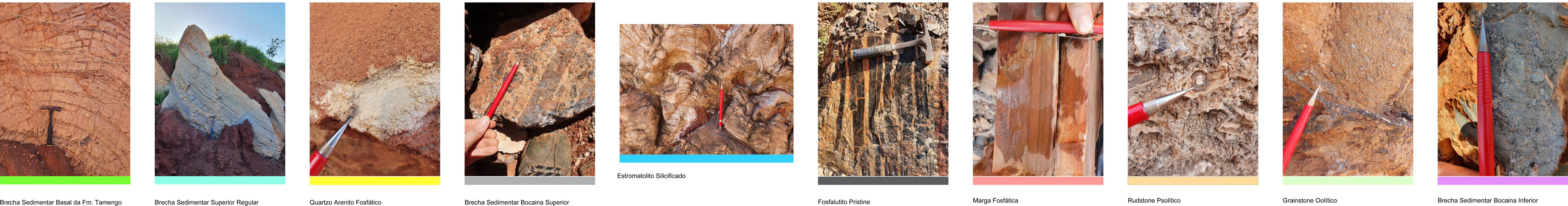
SEÇÃO S-S'

SUCCESSÃO DOS LITOTIPOS



DETALHE DO FOSFALUTITO PRISTINE

LITOTIPOS



LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO: FAZENDA RESSACA - MS

