

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

**GEOLOGIA ESTRUTURAL APLICADA A MINERAÇÃO
SUBTERRÂNEA DE CARVÃO: MINA D, ARARANGUÁ, SC**

THALES SEBBEN PETRY

ORIENTADOR – Prof. Dr. Ruy Paulo Philipp

COORIENTADOR – Prof. Dr. Clóvis Gonzatti

VOLUME I

Porto Alegre – 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

GEOLOGIA ESTRUTURAL APLICADA A MINERAÇÃO
SUBTERRÂNEA DE CARVÃO: MINA D, ARARANGUÁ, SC

THALES SEBEN PETRY

ORIENTADOR – Prof. Dr. Ruy Paulo Philipp

COORIENTADOR – Prof. Dr. Clóvis Gonzatti

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcus Vinicius Dorneles Remus (Instituto de Geociências,
Universidade Federal do Rio Grande do Sul)

Prof. Dr. Claiton dos Santos Scherer (Instituto de Geociências,
Universidade Federal do Rio Grande do Sul)

Prof. Dr. Romulo Machado (Instituto de Geociências, Universidade de São
Paulo)

Dissertação de Mestrado apresentada
como requisito parcial para a obtenção
do Título de Mestre em Geociências

Porto Alegre - 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitor: Jane Fraga Tutikian

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: André Sampaio Mexias

Vice-Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Petry, Thales Sebben

Geologia estrutural aplicada à mineração subterrânea de carvão:
Mina D, Araranguá, SC. / Thales Sebben Petry. - Porto Alegre:
IGEO/UFRGS, 2017.

[61 f.] il.

Dissertação (Mestrado).- Universidade Federal do Rio Grande do
Sul. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Instituto de
Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2017.

Orientador(es): Ruy Paulo Philipp
Coorientador(es): Clóvis Gonzatti

1. Região carbonífera. 2. Lineamentos. 3. Falhas. 4. Santa Catarina.
I. Título.

CDU 55

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Renata Cristina Grun

CRB 10/1113

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a instituição UFRGS e a todos que fazem dela a universidade de excelência que é hoje, funcionários, professores e servidores. Sem o trabalho de todas as pessoas envolvidas em fazer a universidade funcionar esta etapa não seria possível. Agradeço também ao Instituto de Geociências e ao Programa de Pós-graduação em Geologia pela formação e pelas oportunidades dadas. Aos meus orientadores Prof. Dr. Ruy Paulo Philipp e Prof. Dr. Clóvis Gonzatti agradeço pela oportunidade e pelos ensinamentos, que certamente enriqueceram o trabalho e a minha formação. A Maracajá Mineração S.A., em especial ao Claudio Zilli, agradeço pela disponibilidade e pelo interesse em que o trabalho fosse realizado. Agradeço também aos meus pais e a minha namorada Juliana pelo incentivo e pelo apoio que foi dado durante todo o trabalho.

RESUMO

A mineração subterrânea na região carbonífera de Santa Catarina possui forte controle estrutural. A área de pesquisa da Mina D situa-se na porção NE do município de Araranguá. Este trabalho definiu o comportamento estrutural das rochas sedimentares e da camada de carvão Barro Branco na área de pesquisa através da avaliação integrada de imagens de satélite e dados de 100 furos de sondagem. As principais direções dos lineamentos identificadas nas imagens de satélite são $N30^{\circ}-60^{\circ}W$, $N60^{\circ}-80^{\circ}E$ e $N30^{\circ}-60^{\circ}E$. O mapa de contorno estrutural da camada de carvão e as seções geológicas mostram que a área é afetada por falhas normais de direção $N30^{\circ}-60^{\circ}W$, $N50^{\circ}-70^{\circ}E$, $N10^{\circ}-20^{\circ}W$ e E-W. As falhas normais de direção NE apresentam extensão regional e exercem significativa influência no arranjo estrutural da área. Nesses casos os rejeitos são expressivos (>100 metros) e inviabilizam a recuperação econômica do carvão em algumas porções da área. A orientação das galerias deve ser de modo paralelo a estas falhas nas suas proximidades. As falhas normais de direção NW são as mais frequentes e possuem extensão e rejeitos menores (<30 metros). O planejamento da lavra deve considerar esse sistema de falhas, evitando o cruzamento das mesmas. As falhas normais de direção N-S foram identificadas na área e apresentam rejeitos expressivos (>70 metros). Ocorrem ainda falhas inversas associadas ao soerguimento ocasionado por intrusões de diabásio. Próximo a estas áreas podem ocorrer zonas de acúmulo de tensões, geralmente associadas a problemas de instabilidade de teto e levantamento de piso. A metodologia aplicada demonstrou ser eficiente na determinação prévia das estruturas tectônicas e na avaliação preliminar da sua influência na mineração subterrânea de carvão.

Palavras chave: Região carbonífera, Lineamentos, Falhas, Bacia do Paraná, Santa Catarina, Araranguá.

ABSTRACT

The underground coal mining in the carboniferous region of Santa Catarina state has a great structural control. The Mina D research area is located in the NE portion of the Araranguá city. This study has defined the structural bearing of the sedimentary rocks and the Barro Branco coal seam in the research area through the integrated evaluation of satellite images and 100 boreholes data. The major lineaments identified in the satellite images have N30°-60°W, N60°-80°E and N30°-60°E directions. The coal seam structural contour map and the geological sections presents that the area is affected by normal faults which have N30°-60°W, N50°-70°E, N10°-20°W and E-W directions. The NE direction normal faults have regional extension and are the most influent in the structural arrangement of the area. This faults have expressive tailings (>100 meters) and prevent the economic recover of the coal in some portions of the area. The galleries should be oriented parallel to it. The normal faults with NW direction is the most frequent and have minor extension and tailings (<30 meters). The mining plan should consider it in order to avoid have to cross it. The N-S direction normal faults were identified in the area and presents expressive tailings (>70 meters). Inverse faults occur associated with the uplift related to diabase sills intrusion. Close to this area may occur stress accumulation zones usually related to roof instability and floor heaving problems. The applied methods proved to be efficient in the determination of tectonic structures and in the preliminary evaluation of their influence on underground coal mining.

Keywords: Carboniferous region, Lineaments, Faults, Paraná Basin, Santa Catarina, Araranguá

SUMÁRIO

ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	4
CAPÍTULO I	5
1. Introdução	5
1.1 Geologia regional.....	7
1.2 Zonas de Falhas na mineração subterrânea de carvão	11
2. Metodologia.....	13
2.1 Revisão bibliográfica e mapas	13
2.2 Análise dos lineamentos	14
2.3 Mapa de contorno estrutural e seções geológicas.....	15
Referências bibliográficas	15
CAPÍTULO II	18
Artigo científico submetido à revista Pesquisas em Geociências	18
CAPÍTULO III	48
1. Conclusões.....	48
2. Anexos	49

ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho é uma dissertação de mestrado no formato de artigo científico de acordo com a Norma 103 de Submissão de Teses e Dissertações do Programa de Pós-Graduação em Geociências (PPGGEO), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

A dissertação dispõe-se em capítulos, o Capítulo I descreve a introdução com os objetivos do trabalho, a revisão da geologia da Região Carbonífera de Santa Catarina, o contexto geológico local, a revisão do estado da arte sobre Zonas de Falhas na mineração subterrânea de carvão e os métodos aplicados.

O Capítulo II é o corpo principal da dissertação apresentando o artigo científico submetido a revista *Pesquisas em Geociências* sob o título “Geologia estrutural aplicada a mineração subterrânea de carvão: Mina D, região de Araranguá, SC”.

O Capítulo III apresenta sucintamente as conclusões da dissertação e os anexos.

CAPÍTULO I

1. Introdução

Um dos aspectos mais importantes da pesquisa de carvão mineral em áreas de mineração subterrânea é a definição das zonas de falha na área de mineração. O uso de tecnologias de mecanização na mineração subterrânea de carvão torna a atividade mais segura, porém em áreas tectonicamente afetadas o conhecimento da geologia estrutural é fundamental. Em certas regiões as falhas inviabilizam a extração econômica e segura do carvão.

A região carbonífera de Santa Catarina é a maior produtora de carvão mineral do Brasil e tem mais de 800 bocas de minas subterrâneas, entre ativas e inativas. O esgotamento das jazidas a céu aberto e das minas subterrâneas rasas levou a mineração a obter o carvão em maiores profundidades. A mineração subterrânea na região carbonífera é desenvolvida pelo método de câmeras e pilares e, por isso, o conhecimento da geologia regional e local é fundamental para a manutenção da segurança e economicidade da atividade. A identificação e a caracterização das zonas de falhas e áreas de intenso fraturamento é indispensável na execução de projetos de exploração de minas de carvão subterrâneas, sendo vital no planejamento e durante toda a operação da lavra. Antes de iniciar a atividade de mineração ou outro tipo de escavação em rocha, é necessário determinar as zonas de falhas, caracterizando suas direções, extensões, deslocamentos, cinemática e características geotécnicas da maneira mais detalhada possível.

A região carbonífera de Santa Catarina está localizada na porção sudeste da Bacia do Paraná em uma área composta por rochas sedimentares e vulcânicas (Fig. 1). Situa-se na porção sul do estado de Santa Catarina e compreende os municípios de Criciúma, Lauro Müller, Morro da Fumaça, Forquilha, Cocal do Sul, Içara, Siderópolis, Nova Veneza, Treviso, Urussanga, Araranguá, Balneário Rincão e Orleans. A área de pesquisa da Mina D está concedida a empresa Maracajá Mineração S.A. e se localiza na parte leste da região carbonífera, entre a BR-101 e o litoral, e abrange os municípios de Araranguá, Içara e Balneário Rincão (Fig. 2). O objetivo desta Dissertação de Mestrado foi avaliar a geologia estrutural e determinar o comportamento estrutural das rochas sedimentares e da camada de carvão Barro Branco na área da futura Mina D. Com a caracterização dos tipos de falhas que ocorrem na região foi possível determinar o comportamento estrutural da camada de

carvão na área de pesquisa e os riscos associados, oferecendo subsídios para o aprimoramento do projeto de exploração para a Mina D.

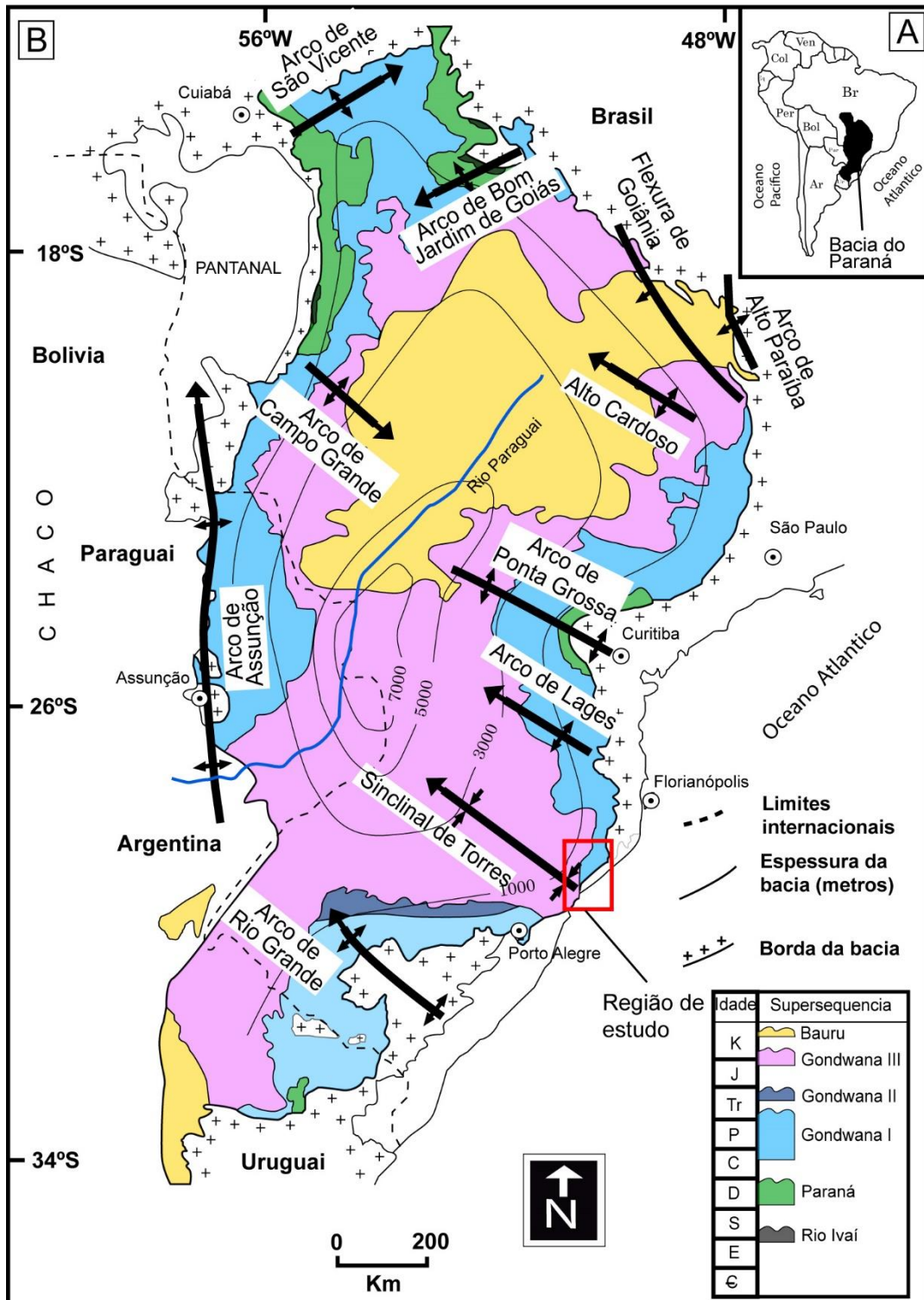


Figura 1. Mapas da Bacia do Paraná. A) Mapa de localização da Bacia do Paraná na América do Sul; B) Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná mostrando o contato das rochas sedimentares com o embasamento, a distribuição das supersequências deposicionais e as estruturas de grande escala (modificado de Milani, 2004). O retângulo vermelho destaca a localização da região carbonífera de Santa Catarina.

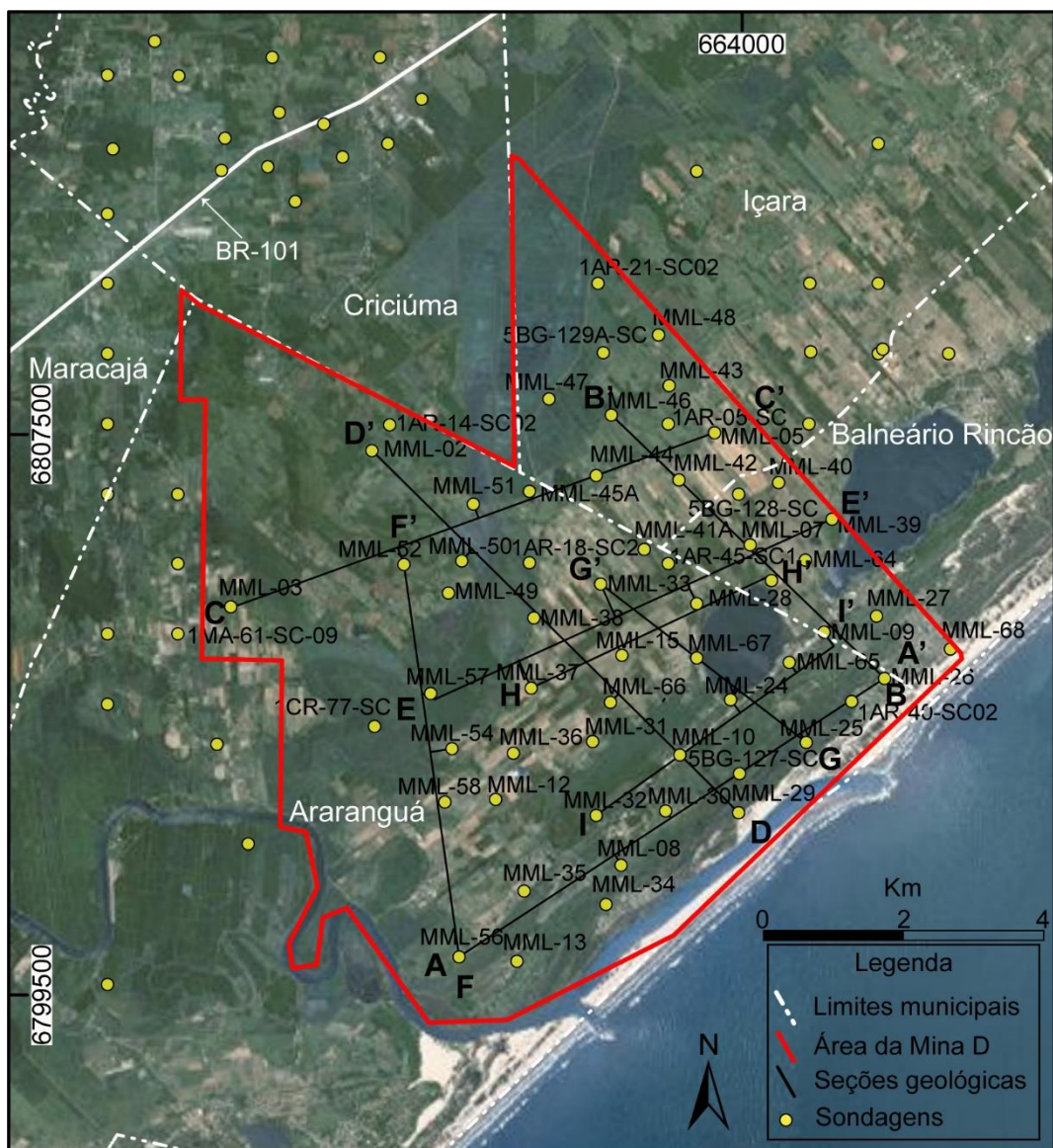


Figura 2. Imagem de satélite mostrando a localização e os limites da área de pesquisa da Mina D, os limites municipais e a localização dos furos de sondagem e das seções geológicas.

1.1 Geologia regional

A Bacia do Paraná é uma bacia intracratônica Paleozoica situada na porção centro-leste da Plataforma Sul-Americana com uma área total de 1.500.000 km² (Milani *et al.*, 2007). Esta bacia é composta por um pacote de rochas sedimentares e vulcânicas de cerca de 7000 metros de espessura, subdivididas em seis supersequências de segunda ordem, com intervalo deposicional entre o Neo-Ordoviciano e o Neocretáceo, definindo um registro estratigráfico de quase 400 Ma (Milani *et al.*, 2007). As supersequências são delimitadas por superfícies de discordâncias de caráter inter-regional e foram definidas por Milani (1997) como: (i) Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), (ii) Paraná (Devoniano), (iii) Gondwana I

(Carbonífero-Eotriássico), (iv) Gondwana II (Meso a Neotriássico), (v) Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e (vi) Bauru (Neocretáceo) (Fig 1). As três primeiras são representadas por sucessões sedimentares que definem ciclos transgressivo-regressivos associados a variações do nível relativo do nível do mar durante parte do Paleozoico. As demais sucessões correspondem a rochas sedimentares continentais com rochas ígneas associadas (Milani *et al.*, 2007). A origem e evolução da Bacia do Paraná são atribuídas à geração de espaço de acomodação pela reativação de estruturas do embasamento pré-cambriano em resposta as orogêneses andinas da borda oeste do Gondwana (Milani & Ramos, 1998; Holz *et al.* 2006; Zeffass *et al.* 2005).

Na região carbonífera de Santa Catarina ocorrem rochas sedimentares e vulcânicas da Bacia do Paraná e rochas do embasamento Pré-cambriano (Fig. 3). O embasamento cristalino na região é constituído pelas rochas graníticas da Suíte Pedras Grandes e por complexos granito-gnáissicos, na porção sul do Batólito Florianópolis (Silva *et al.*, 2000). O complexo granito-gnáissico é composto pelos granitoides Santa Rosa de Lima, Santo Antônio e Paulo Lopes, que compreendem composições sieno e monzograníticas, e de modo subordinado granodioritos. Estes granitoides apresentam em geral uma foliação de fluxo ígneo com orientação de megacristais de Kf e agregados de biotita. Localmente podem desenvolver uma foliação milonítica em zonas de bordos. A Suíte Pedras Grandes compreende, predominantemente, o batólito granítico Imaruí-Capivari, com ocorrência de corpos graníticos menores. As principais litologias são biotita e hornblenda monzogranitos.

Na região carbonífera de Santa Catarina, a Bacia do Paraná está composta pelas supersequências Gondwana I e Gondwana III depositadas entre o Neocarbonífero e o Eocretáceo (Fig. 1). A primeira coluna estratigráfica da Bacia do Paraná foi proposta por White (1908) com base nos afloramentos da Serra do Rio do Rastro, na região de Lauro Müller, com vistas a definir o potencial exploratório do carvão mineral. As rochas da supersequência Gondwana I constituem a unidade basal Bacia do Paraná na região carbonífera catarinense.

As formações Campo do Tenente, Mafra e Rio do Sul constituem o Grupo Itararé na região e consistem na unidade litoestratigráfica basal da bacia na região. Estas formações representam diferentes ambientes de um sistema deposicional flúvio-lacustre e marinho que esteve sob influência de geleiras (Schneider *et al.*, 1974). Recobrimo o as rochas do Grupo Itararé ocorrem as rochas das formações Rio Bonito e Palermo, que constituem o Grupo Guatá. Este grupo registra um evento

transgressivo no Permiano e representa diferentes sistemas deposicionais. Na base da Fm. Rio Bonito ocorre arenitos de ambiente flúvio-deltaico recobertos por pelitos de ambiente marinho transgressivo. O topo desta formação é composto por arenitos e pelitos de ambiente costeiro de laguna barreira com influência fluvial (Kalkreuth *et al.*, 2010). Os siltitos da Fm. Palermo representam o afogamento do ambiente costeiro da Fm. Rio Bonito e foram depositados em ambiente marinho transgressivo sob influência de ondas e marés.

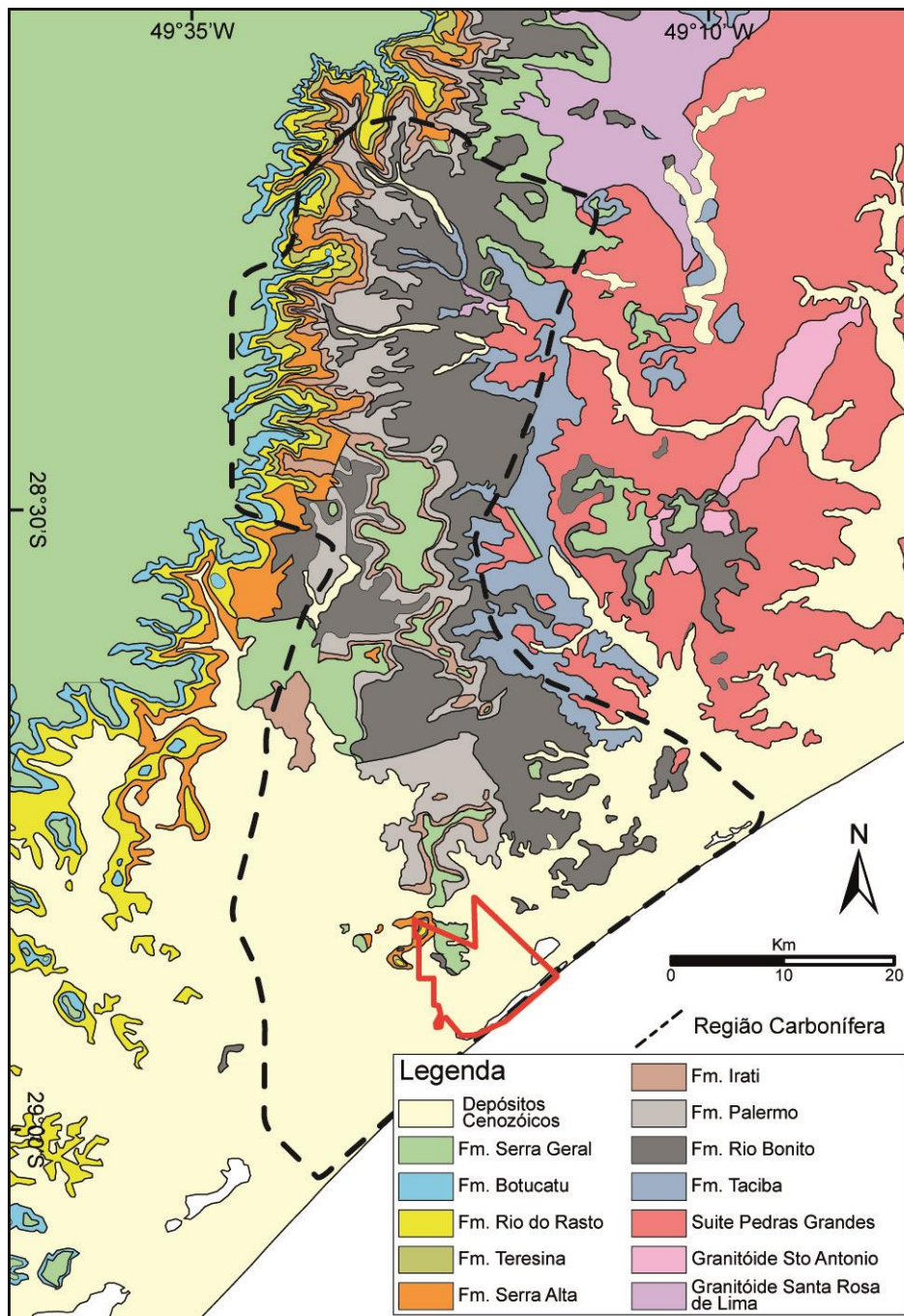


Figura 3. Mapa geológico da região carbonífera de Santa Catarina e adjacências (modificado de Wildner *et al.*, 2014). O polígono vermelho destaca a localização da área de pesquisa da Mina D.

As rochas das formações Irati, Serra Alta, Teresina e Rio do Rastro constituem o Grupo Passa Dois, que recobre o Grupo Guatá. As rochas da Fm. Irati representam a deposição em ambiente marinho de águas calmas, abaixo do nível das ondas, e consistem principalmente de folhelhos e calcários (Schneider *et al.*, 1974). Os folhelhos e siltitos da Fm. Serra Alta representam depósitos de ambiente marinho de baixa energia e consistem na última incursão marinha na Bacia do Paraná (Milani *et al.*, 2007). A Fm. Teresina recobre a Fm. Serra Alta e compreende depósitos de siltitos e arenitos de ambiente marinho de águas rasas e agitadas, dominado por ondas e marés (Schneider *et al.*, 1974). No topo do Grupo Passa Dois ocorre a Fm. Rio do Rastro, composta por intercalações de arenitos e siltitos. A deposição desta formação é atribuída inicialmente a um ambiente marinho raso (supra a infra-maré) que transiciona para depósitos de planície costeira passando, posteriormente, à implantação de uma sedimentação flúvio-deltaica (Schneider *et al.*, 1974).

A supersequência Gondwana III sucede a supersequência Gondwana I e entre as duas supersequências ocorre uma discordância de aproximadamente 100 Ma, que abrange o período do Eotriássico ao Neojurássico. A supersequência Gondwana III compreende os depósitos eólicos da Formação Botucatu e as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral (Milani *et al.*, 2007). A Formação Botucatu é composta predominantemente por arenitos de fácies eólicas depositados em ambiente desértico (Milani *et al.*, 2007). As rochas vulcânicas da Formação Serra Geral recobrem a Formação Botucatu e foram geradas em um evento magmático fissural Mesozoico. A Formação Serra Geral é composta por uma espessa pilha de lavas basálticas e uma intrincada rede de diques e soleiras que cortam a inteira seção sedimentar da Bacia do Paraná (Milani *et al.*, 2007).

Na área de pesquisa da Mina D foram identificadas através de furos de sondagem parte das formações que compõe a Supersequência Gondwana I, de idade Permiana, e corpos subvulcânicos (soleiras e diques) de rochas básicas pertencentes a Supersequência Gondwana III. Os perfis litoestratigráficos de parte dos furos de sondagem da área podem ser observados nas seções geológicas realizadas (Anexos). As rochas da Formação Rio do Sul, topo do Grupo Itararé, são encontradas na base de alguns furos de sondagem e são recobertas de modo concordante pelas rochas da Formação Rio Bonito e Formação Palermo, que constituem o Grupo Guatá. As formações do Grupo Passa Dois sucedem as do Grupo Guatá e compreendem, na área de estudo, a Formação Irati e a Formação Serra Alta. As rochas da Formação Serra Alta ocorrem no topo dos furos de sondagem.

Nos furos de sondagem estudados foram identificados soleiras e diques de diabásio com espessura de poucos metros a dezenas de metros. A forma e extensão lateral dos corpos observados nas seções geológicas indicam um predomínio de grandes de soleiras de diabásio. A área de pesquisa da Mina D é recoberta pelos depósitos cenozóicos da planície costeira de Santa Catarina. Os sedimentos são compostos principalmente por areias depositadas em ambiente de laguna-barreira.

1.2 Zonas de Falhas na mineração subterrânea de carvão

Zonas de falha são descritas na literatura como superfícies ou zonas estreitas com deslocamento visível ao longo do próprio plano ou superfície. As falhas podem apresentar comportamento rúptil ou dúctil. O deslocamento ou rejeito atribuído as falhas rúpteis normalmente varia de poucos centímetros até centenas de metros. Apesar de serem consideradas superfícies ou zonas estreitas as zonas de falha apresentam espessuras variáveis. Falhas com rejeitos expressivos tendem a ser complexas zonas de deformação constituídas por diversas falhas menores e com volume de rocha afetada por deformação rúptil variável. As falhas são classificadas como normais, inversas ou transcorrentes conforme o sentido de deslocamento. Falhas normais apresentam em geral alto ângulo de mergulho ($>45^\circ$) e são aquelas em que o bloco alto sobe em relação ao bloco baixo sem se sobrepor a ele. Falhas normais, também chamadas de falhas de gravidade, indicam regime extensional. Falhas inversas apresentam em geral baixo ângulo de mergulho ($<45^\circ$) e rejeito vertical e são aquelas em que o bloco alto se sobrepõe ao bloco baixo. Falhas inversas, também chamadas de falhas de empurrão, indicam regime compressivo. As falhas transcorrentes, ou falhas de rejeito direcional, são geralmente verticais ou tem alto ângulo de mergulho e apresentam deslocamento horizontal paralelo ao plano de falha.

Em zonas de falha, a trama estrutural da rocha exerce grande impacto na estabilidade das escavações, sendo esse aspecto do maciço rochoso muitas vezes negligenciado (Phillipson, 2005a, b). Diversos trabalhos acerca da caracterização estrutural em regiões de mineração de carvão são encontrados na literatura, em grande parte realizados durante as atividades de mineração, onde a determinação das estruturas é feita *in situ* e a sua influência na estabilidade das escavações é visível (Coolen, 2003; Bailey et al., 2005; Phillipson, 2005a, b). A descrição geotécnica das descontinuidades associadas as zonas de falha é de grande importância na identificação de áreas de risco em minas subterrâneas. As características a serem

observadas são a orientação, espaçamento, persistência, abertura, rugosidade e preenchimento das fraturas (ISRM, 1978). O deslocamento vertical da camada de carvão por zonas de falhas é um dos principais problemas a ser considerado em áreas afetadas por atividades tectônicas. Zonas de falhas que apresentam rejeitos expressivos exigem adaptações no projeto da mina. Muitas vezes as falhas ocasionam o basculamento da camada de carvão, o que praticamente inviabiliza a mineração em áreas com mergulho superior a 15° (Nelson, 1991).

A instabilidade do teto das galerias é outro fator relacionado as zonas de falhas. A configuração das galerias e dos pilares deve considerar a orientação e o espaçamento das descontinuidades na zona de falha. As zonas de falhas compostas por famílias de fraturas pouco espaçadas, ou famílias que se intersectam, são relacionadas a instabilidade do teto nas minas, uma vez que provocam intensa fragmentação da rocha e catalisam os processos de alteração intempérica. Galerias que avançam de modo paralelo a direção das falhas e dos sistemas de fraturas que se intersectam em forma de cunha, apresentam os maiores riscos de queda de teto. Nesses casos a melhor orientação das galerias é perpendicular ao seu plano, restringindo assim, a área de influência da zona de falha, o volume de material estéril escavado e a área com suporte de teto complementar. Além da complementação do sistema de suporte de teto é comum a necessidade de aumentar o tamanho dos pilares, visto que a fragmentação da rocha nas zonas de falha diminui a sua resistência.

O influxo de água por zonas de falhas pode acelerar a alteração da rocha e trazer impurezas como argilas para o carvão, além de ocasionar problemas operacionais. Algumas falhas são caminhos de fluxo para água subterrânea, enquanto outras são barreiras para o movimento da água. A ascensão de diques de diabásio, frequentemente é associada à ocorrência de zonas de falhas e pode trazer problemas para a mineração de carvão. Os diques de diabásio que ocorrem em toda a região carbonífera de Santa Catarina, além de constituir um material estéril a ser removido, são rochas duras que impõe muito desgaste aos equipamentos utilizados na mineração. Os principais tipos de falhas relacionados a problemas de instabilidade do teto são as falhas normais oblíquas e falhas de rejeito direcional, enquanto as falhas normais não aparentam ter essa associação (Peng, 1986). Falhas inversas também representam zonas de instabilidade de teto por concentrarem esforços compressionais (Krebs, 2004).

Os principais sistemas de falhas identificados na região carbonífera de Santa Catarina têm direção N5°-30°W e N45°-75°E. Subordinadamente ocorrem falhas de direção próxima de N-S, N30°-45°E, N30°-45°W e E-W (Krebs, 2004). As falhas normais de direção N5°-30°W apresentam comprimentos que podem alcançar 50 km e rejeitos verticais expressivos, superiores a 30 m em alguns casos. Este sistema é associado a calhas tectônicas de maior acumulação de carvão e altos do embasamento, o que sugere se tratar de falhas sin-sedimentares. O sistema de falhas normais de direção N45°-75°E é um sistema mais jovem que o descrito anteriormente e apresenta rejeitos significativos, por vezes superiores a 40 m (Krebs, 2004). O sistema de falhas N-S é muito importante na região, pois tem caráter extensional e muitas vezes encaixa diques de diabásio. As falhas de direção N30°-45°E e N30°-45°W ocorrem de maneira localizada a partir de falhas de outro sistema, o que sugere se tratar de falhas sintéticas e antitéticas. As falhas do sistema E-W são pouco frequentes na região e apresentam pequenos rejeitos (<5 m) e as vezes deslocam falhas de outros sistemas.

2. Metodologia

A metodologia utilizada no neste trabalho consistiu na revisão bibliográfica, interpretação de imagens de satélite e confecção do mapa de contorno estrutural e seções geológicas a partir dos dados de furos de sondagem.

2.1 Revisão bibliográfica e mapas

A revisão bibliográfica sobre a geologia da região carbonífera de Santa Catarina foi efetuada com os trabalhos realizados por Schneider *et al.* (1974), Holz (2003), Krebs (2004), Kalkreuth *et al.* (2010) e pelo convênio DNPM/CPRM entre 1971 e 1986 (Fabrício *et al.*, 1972a, b; Fabrício *et al.*, 1973; Krebs *et al.*, 1981; Krebs *et al.*, 1982; Krebs *et al.*, 1983; Aboarrage & Lopes, 1986; entre outros), e foi muito importante na definição das litologias e das principais estruturas que ocorrem na região. Visto que na área de pesquisa da Mina D as falhas não são visíveis em superfície esta revisão foi fundamental para entender como as falhas ocorrem nas outras áreas da região carbonífera de Santa Catarina e interpretar o comportamento estrutural da camada de carvão na área de estudo. A revisão de trabalhos sobre a geologia de outras regiões da Bacia do Paraná e sobre a evolução tectônica para esta região de Santa Catarina também foi realizada.

O mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná utilizado no trabalho foi modificado de Milani (2004). O mapa geológico da região carbonífera de Santa Catarina utilizado no trabalho foi confeccionado a partir do mapa de Wildner *et al.* (2014) utilizando-se os softwares *ArcGis®* e *Adobe Illustrator*.

2.2 Análise dos lineamentos

A análise dos lineamentos nas imagens de satélite foi realizada em uma área de 20.000 km², abrangendo toda a região carbonífera de Santa Catarina, parte do embasamento e parte do planalto da Serra Geral. Uma porção da área de análise estrutural por imagem de satélite, que abrange a região carbonífera, é apresentada na figura 4. Foram utilizadas imagens *Landsat 8*, disponíveis no software *ArcGis®*, e imagens de relevo sombreado, disponibilizadas por Wildner *et al.* (2014). Três escalas de trabalho foram utilizadas 1:500.000, 1:250.000 e 1:20.000, deste modo estruturas de diferentes comprimentos foram observadas. A partir dos lineamentos traçados foram gerados os Diagramas de Roseta da densidade e do comprimento com a extensão *AzimuthFinder* (Queiroz *et al.*, 2014) no software *ArcGis®*.

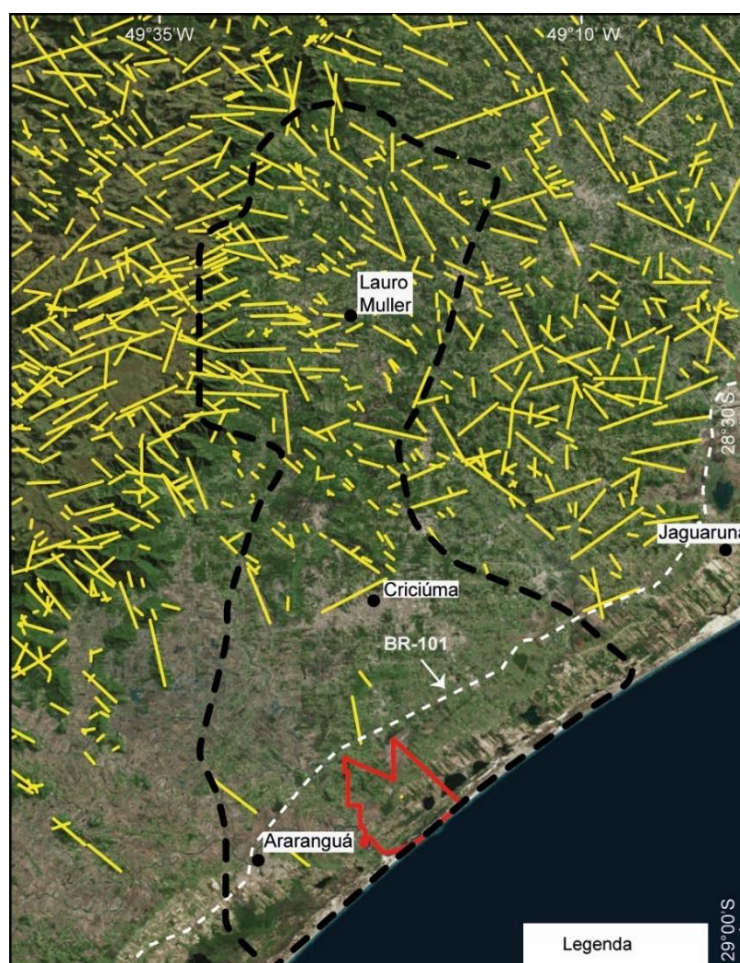


Figura 4. Imagem de satélite com os lineamentos, as áreas correspondentes a região carbonífera de Santa Catarina e a Mina D delimitadas e as principais cidades da região.

2.3 Mapa de contorno estrutural e seções geológicas

Para a interpretação estrutural da área de pesquisa da Mina D foram utilizados os dados de 100 furos de sondagem (Fig. 2). A partir do banco de dados dos testemunhos de sondagem disponibilizado pela Maracajá Mineração S.A. foram confeccionados os perfis litológicos de alguns furos para a elaboração das seções geológicas utilizadas na interpretação estrutural. Foram confeccionadas nove seções geológicas para visualização tridimensional do comportamento estrutural na área. Os perfis litológicos dos furos de sondagem e as seções geológicas foram realizados utilizando os softwares *AutoCAD* e *Adobe Illustrator*. Os furos de sigla MML foram realizados pela empresa Maracajá Mineração S.A., enquanto que os furos com siglas AR, CR, BG, MA, MB e IPB, foram realizados pelo convênio DNPM/CPRM. A camada de carvão Barro Branco é a mais superficial e a mais importante economicamente na região. Por apresentar continuidade lateral e ambiente de deposição considerado plano, a camada foi utilizada como guia para os mapas de contorno estrutural na área da mina. O mapa de contorno estrutural da camada de carvão Barro Branco na área de pesquisa da Mina D foi confeccionado através da interpolação das cotas de lapa da camada. Diferentes métodos de interpolação foram testados e o método que apresentou melhores resultados foi o inverso da distância ponderada (IDW). O mapa de contorno estrutural com as falhas definidas foi confeccionado com o software *ArcGis®* e editado com o software *Adobe Illustrator*.

Referências bibliográficas

- Aboarrage, A. M. & Lopes, R. da C. 1986. Projeto *A Borda Leste da Bacia do Paraná: integração geológica e avaliação econômica*. Porto Alegre: DNPM/CPRM, v. 18, 223p.
- Coolen, J.M. 2003. Coal mining along the Warfield Fault, Mingo County, West Virginia: a tale of ups and downs. *International Journal of Coal Geology*, 54: 193-207.
- Bailey, W.R., Walsh, J.J. & Manzocchi, T. 2005. Fault populations, strain distribution and basement fault reactivation in the East Pennines Coalfield, UK. *Journal of Structural Geology*, 27: 913-928.
- ISRM. 1978. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15(6): 319-368.

- Fabrício, J.A.C. 1972. *Projeto carvão de Santa Catarina: Relatório da segunda fase de sondagem*. Porto Alegre: DNPM/CPRM, v. 1, 40p.
- Fabrício, J.A.C., Lange, F.M.Q., Valiati, D., Silva, M.A.S. & Pozza, E.V. 1972a. *Projeto carvão de Santa Catarina: relatório integrado*. Porto Alegre: DNPM/CPRM, v. 1, 58p.
- Fabrício, J.A.C., Silva, M.A.S. & Valiati, D. 1972b. *Projeto carvão de Santa Catarina: Estudos de geologia de subsuperfície*. Porto Alegre: DNPM/CPRM, v. 1, 106p.
- Fabrício, J.A.C., Aboarrage, A.M., Valiati, D., Pozza, E.V., Ferreira, J.A.F. & Suffert, T. 1973. *Projeto carvão de Santa Catarina: relatório integrado*. Porto Alegre: DNPM/CPRM, v. 1, 203 p.
- Floribal, L.M., Heaman, L.M., Janasi, V.A. & Bitencourt, M.F. 2014. Tectonic significance of the Florianópolis Dyke Swarm, Paraná–Etendeka Magmatic Province: A reappraisal based on precise U-Pb dating. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 289: 140-150.
- Holz, M., Kuchle, J., Philipp, R.P., Bischoff, A.P. & Arima, N. 2006. Hierarchy of tectonic control on stratigraphic signatures: base-level changes during the Early Permian in the Paraná Basin, southernmost Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 22: 185–204.
- Kalkreuth, W., Holz, M., Mexias, A., Balbinot, M., Levandowski, J., Willett, J., Finkelman, R. & Burger, H. 2010. Depositional setting, petrology and chemistry of Permian coals from the Paraná Basin: 2. South Santa Catarina Coalfield, Brazil. *International Journal of Coal Geology*, 84: 213-236.
- Krebs, A.S.J. 2004. *Contribuição ao conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos da bacia hidrográfica do Rio Araranguá, SC*. Florianópolis, 375p. Tese de Doutorado, Curso de Doutorado em Geografia, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Krebs, A.S.J., Grazia, C.A., Amaral, J.E., Casé, M.G., Branco, P. de M., Oliveira, R.L. & Silva, V.R. 1982. *Programa carvão energético no estado de Santa Catarina: relatório final*. Porto Alegre: DNPM/CPRM, v. 1, 206p.
- Krebs, A.S.J., Grazia, C.A.; Amaral, J.E., Casé, M.G., Oliveira, R.L. & Silva, V.R. 1983. *Projeto carvão nas áreas da mina Esperança e da mina Fontanella – SC: relatório final*. Porto Alegre: DNPM/CPRM, v. 1, 123 p.
- Milani, E.J. & Ramos, V.A. 1998. Orogenias Paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 28: 473-484.

- Milani, E.J., 2004. Comentários sobre a origem e evolução tectônica da Bacia do Paraná. *In: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C.D.R. & Brito-Neves, B.B. de (Eds.). Geologia do continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida.* São Paulo, p. 265-279.
- Milani, E.J., Melo, J.H.G., Souza, P.A., Fernandes, L.A. & França, A.B. 2007. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2): 265-287.
- Nelson, W.J. 1991. Faults and their effect on coal mining in Illinois. *Illinois State Geological Survey, Circular*, 523: 1–40.
- Peng, S. S. 1986. Coal Mine Ground Control. *John Wiley & Sons*, 2a. ed., 490p.
- Phillipson, S.E. 2005a. Effects of late Paleozoic foreland deformation on underground coal mine ground instability, Illinois and Appalachian Basins. *International Journal of Coal Geology*, 64: 3-19.
- Phillipson, S.E. 2005b. Laramide orogeny-related controls on coal mine ground instability in Cretaceous coal seams, southern Rocky Mountain foreland. *International Journal of Coal Geology*, 64: 20-43.[
- Queiroz, G.L., Salamuni, E. & Nascimento, E.R. 2014. AzimuthFinder: ferramenta para a extração de dados e apoio na análise estrutural. *Revista Geologia USP, Série Científica*, 14(1): 6-80.
- Schneider, R.L., Mühlmann, H., Tommasi, E., Medeiros, R.A., Daemon, R.F. & Nogueira, A. A. 1974. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 28, Porto Alegre, 1974. *Anais...* Porto Alegre SBG, v. 1, p.41-65.
- Silva, M.A.S., Leites, S.R & Caruso, Jr. F. 2000. *Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil*. Criciúma, Folha SH.22-X-B. Estado de Santa Catarina. Escala 1:250.000. CPRM, Brasília.
- Valiati, D., Lange, F.M.Q., Fabrício, J.A.C., Ferreira, J.A.F., Silva, M.A.S. & Orlandi, V.F. 1971. *Projeto carvão de Santa Catarina: Relatório final da primeira fase*. Porto Alegre: DNPM/CPRM, v. 1, 55p.
- White, I.C. 1908. *Relatório final da Comissão de Estudos das Minas de Carvão de Pedra do Brasil*. Rio de Janeiro: DNPM, 617 p.
- Wildner, W., Camozzato, E., Toniolo, J.A., Binotto, R.B., Iglesias, C.M.F., Laux, J.H. 2014. *Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina*. Programa Geologia do Brasil, Superintendência Regional de Porto Alegre, v. 1, escala 1:500.000.

CAPITULO II

Artigo científico submetido à revista Pesquisas em Geociências

Geologia estrutural aplicada à mineração subterrânea de carvão: na D, região de Araranguá, SC

Structural geology applied to the underground coal mining: Mina D, Araranguá region, SC

Thales Sebben PETRY¹, Ruy Paulo PHILIPP² & Clóvis GONZATTI²

¹Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9.500, CEP 91.540-000, Porto Alegre, Brasil. E-mail: thallesspetry@gmail.com.

²Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9.500, CEP 91.540-000, Porto Alegre, Brasil. E-mail: ruy.philipp@ufrgs.br, gonzatti@ufrgs.br.

Resumo. A mineração subterrânea na região carbonífera de Santa Catarina possui forte controle estrutural. A área de pesquisa da Mina D situa-se na porção NE do município de Araranguá. Este trabalho definiu o comportamento estrutural das rochas sedimentares e da camada de carvão Barro Branco na área de pesquisa através da avaliação integrada de imagens de satélite e dados de 100 furos de sondagem. As principais direções dos lineamentos identificadas nas imagens de satélite são N30°-60°W, N60°-80°E e N30°-60°E. O mapa de contorno estrutural da camada de carvão e as seções geológicas mostram que a área é afetada por falhas normais de direção N30°-60°W, N50°-70°E, N10°-20°W e E-W. As falhas normais de direção NE apresentam extensão regional e exercem significativa influência no arranjo estrutural da área. Nesses casos os rejeitos são expressivos (>100 m) e inviabilizam a recuperação econômica do carvão em algumas porções da área. A orientação das galerias deve ser de modo paralelo a estas falhas nas suas proximidades. As falhas normais de direção NW são as mais frequentes e possuem extensão e rejeitos menores (<30 m). O planejamento da lavra deve considerar esse sistema de falhas, evitando o cruzamento das mesmas. As falhas normais de direção N-S foram identificadas na área e apresentam rejeitos expressivos (>70 m). Ocorrem ainda falhas inversas associadas ao soerguimento ocasionado por intrusões de diabásio. Próximo a estas áreas podem ocorrer zonas de acúmulo de tensões, geralmente associadas a problemas de instabilidade de teto e levantamento de piso. A metodologia aplicada demonstrou ser eficiente na determinação prévia das estruturas tectônicas e na avaliação preliminar da sua influência na mineração subterrânea de carvão.

Palavras-chaves: Região Carbonífera, Lineamentos, Falhas, Bacia do Paraná, Santa Catarina, Araranguá.

Abstract. The underground coal mining in the carboniferous region of Santa Catarina state has a great structural control. The Mina D research area is located in the NE portion of the Araranguá city. This study has defined the structural bearing of the sedimentary rocks and the Barro Branco coal seam in the research area through the integrated evaluation of satellite images and 100 boreholes data. The major lineaments identified in the satellite images have N30°-60°W, N60°-80°E and N30°-60°E directions. The coal seam structural contour map and the geological sections presents that the area is affected by normal faults which have N30°-60°W, N50°-70°E, N10°-20°W and E-W directions. The NE direction normal faults have regional extension and are the most influent in the structural arrangement of the area. This faults have expressive tailings (>100 m) and prevent the economic recover of the coal in some portions of the area. The galleries should be oriented parallel to it. The normal faults with NW direction is the most frequent and have minor extension and tailings (<30 m). The mining plan should consider it in order to avoid have to cross it. The N-S direction normal faults were identified in the area and presents expressive tailings (>70 m). Inverse faults occur associated with the uplift related to

diabase sills intrusion. Close to this area may occur stress accumulation zones usually related to roof instability and floor heaving problems. The applied methods proved to be efficient in the determination of tectonic structures and in the preliminary evaluation of their influence on underground coal mining.

Keywords: Carboniferous region, Lineaments, Faults, Paraná Basin, Santa Catarina, Araranguá

1 Introdução

Mapas estruturais em escala regional e de detalhe são pré-requisito para qualquer atividade de mineração. A região carbonífera de Santa Catarina é, atualmente, a maior produtora de carvão mineral do Brasil e possui um carvão com alto poder de queima e baixo teor de cinzas. O esgotamento das jazidas explotadas a céu aberto e das minas subterrâneas rasas levou à mineração do carvão a maiores profundidades, o que exige conhecimento da geologia estrutural da área a ser minerada. A mineração subterrânea na região é desenvolvida pelo método de câmeras e pilares e, por isso, o conhecimento da geologia regional e local é fundamental para a segurança e economicidade da atividade. A identificação e a caracterização das zonas de falhas e de áreas de intenso fraturamento são indispensáveis na execução de projetos de exploração de minas de carvão subterrâneas, sendo vital para o planejamento e operação da lavra. A análise estrutural da região através de imagens de satélite e a interpretação do comportamento estrutural da camada de carvão através de dados de furos de sondagem proporcionam a visualização em três dimensões e a confecção de um mapa estrutural que permita avaliar os riscos associados as zonas de falhas. Além de afetar a estabilidade da escavação, as falhas podem deslocar a camada de carvão. Antes de iniciar a atividade de mineração, bem como qualquer outro tipo de escavação em rocha, é necessário determinar as zonas de falhas, suas direções, extensões, deslocamentos e características geotécnicas da maneira mais detalhada possível. A estabilidade de escavações subterrâneas em rochas sedimentares é influenciada, principalmente, pelo tipo de litologia, estruturas sedimentares, coesão da rocha, grau de faturamento e perfil do manto de alteração.

O objetivo desta pesquisa foi avaliar a geologia estrutural da região carbonífera de Araranguá para determinar o comportamento estrutural das rochas sedimentares e da camada de carvão Barro Branco na área da futura Mina D. Esta análise tem como base a avaliação dos lineamentos por imagens de satélite, associada com as informações obtidas nos de furos de sondagem disponibilizados pela empresa Maracajá Mineração Ltda. A integração dos dados permitiu a confecção do mapa de contorno estrutural da camada de carvão Barro Branco e de seções geológicas. A caracterização dos tipos de falhas que ocorrem na área permitiu determinar

o comportamento estrutural da camada de carvão na área de pesquisa e avaliar os riscos associados, servindo de subsídio para o aprimoramento do projeto de exploração para a mina.

2 Área, materiais e métodos

A região carbonífera de Santa Catarina está localizada na região sudeste da Bacia do Paraná em uma área composta por rochas sedimentares e vulcânicas (Fig. 1). Esta bacia é composta por um pacote de rochas sedimentares e vulcânicas subdivididas em seis supersequências de segunda ordem, com intervalo deposicional entre o Neo-Ordoviciano e o Neocretáceo. A Bacia do Paraná apresenta cerca de 7000 m de espessura e define um registro estratigráfico de quase 400 Ma (Milani *et al.*, 2007).

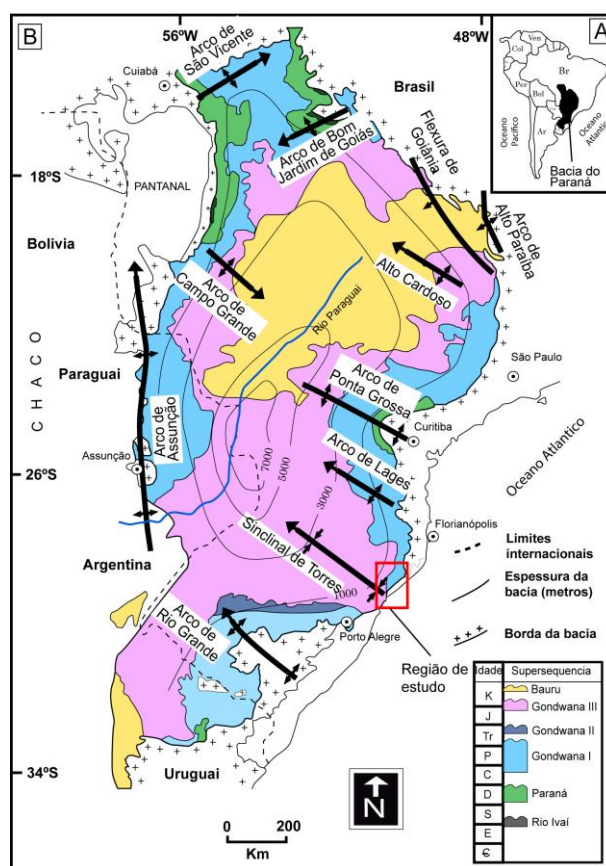


Figura 1. Mapas da Bacia do Paraná. A) Mapa de localização da Bacia do Paraná na América do Sul; B) Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná mostrando o contato das rochas sedimentares com o embasamento, a distribuição das supersequências deposicionais e as estruturas de grande escala (modificado de Milani, 2004). O retângulo vermelho destaca a localização da região carbonífera de Santa Catarina.

Figure 1. Paraná Basin maps. A) Location map of the Parana Basin in the South America; B) Simplified geological map of the Parana Basin showing the basement contacts, the distribution of the depositional supersequences and the large-scale structures (modified from Milani, 2004). The red rectangle highlights the location of the carboniferous region of Santa Catarina state.

A região carbonífera catarinense se situa na porção sul do estado de Santa Catarina e compreende os municípios de Criciúma, Lauro Müller, Morro da Fumaça, Forquilha, Cocal do Sul, Içara, Siderópolis, Nova Veneza, Treviso, Urussanga, Araranguá, Balneário Rincão e Orleans. Estes municípios possuem a mineração de carvão como uma das principais atividades econômicas e fonte de empregos formais. A área de pesquisa de carvão mineral da Mina D concedida a empresa Maracajá Mineração Ltda., se localiza na parte leste da região carbonífera, entre a BR-101 e o litoral, e abrange os municípios de Araranguá, Içara e Balneário Rincão (Fig. 2).

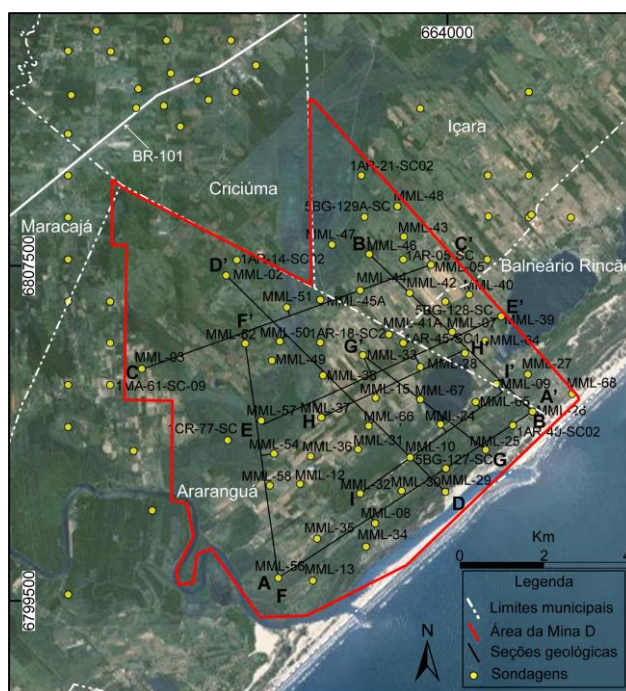


Figura 2. Imagem de satélite mostrando a localização e os limites da área de pesquisa da Mina D, os limites municipais e a localização dos furos de sondagem e das seções geológicas.

Figure 2. Satellite image showing the localization and the limits of the research area of Mina D, the cities limits and the location of the boreholes and the geological sections.

O desenvolvimento desta pesquisa tem como base a revisão bibliográfica, a análise de imagens de satélite associada com trabalhos de campo, descrição de furos de sondagem,

integração espacial de banco de dados de sondagem e confecção de seções geológicas da área de carvão a ser minerada. As imagens de satélite foram analisadas para avaliar a disposição espacial dos lineamentos em termos de comprimento e densidade. A integração destes dados permitiu a visualização tridimensional da geologia e avaliar os principais desafios a serem superados ao longo da exploração da Mina D.

2.1 Geologia da área

A Bacia do Paraná é uma bacia intracratônica e sua origem e evolução são atribuídas à geração de espaço de acomodação pela reativação de estruturas do embasamento pré-cambriano em resposta as orogêneses andinas da borda oeste do Gondwana (Milani & Ramos, 1998; Holz *et al.*, 2006). Muitos trabalhos com foco na geologia estrutural foram realizados em diferentes regiões da bacia. Os trabalhos de pesquisa para carvão realizados pelo convênio DNPM/CPRM entre 1971 e 1986 apresentam, entre outros aspectos, as feições estruturais de diferentes áreas da região carbonífera, identificadas através da interpretação de fotografias aéreas, construção de seções geológicas e de mapas de contorno estrutural das camadas de carvão (Fabrício *et al.*, 1972a, b; Fabrício *et al.*, 1973; Krebs *et al.*, 1981; Krebs *et al.*, 1982, 1983; Aboarrage & Lopes, 1986). Em estudo hidrogeológico na bacia hidrográfica do rio Araranguá com abrangência na área de pesquisa deste trabalho, Krebs (2004) aborda os aspectos estruturais da região através da interpretação de fotos aéreas e de seções geológicas e de observações *in situ* em minas de carvão subterrâneas.

Na região de carbonífera de Santa Catarina ocorrem rochas sedimentares e vulcânicas da Bacia do Paraná e rochas do embasamento Pré-cambriano (Fig. 3A). O embasamento cristalino na região é constituído pelas rochas graníticas da Suíte Pedras Grandes e por complexos granito-gnáissicos, e compreende a porção sul do Batólito Florianópolis (Silva *et al.*, 2000; Bitencourt *et al.*, 2008). O complexo granito-gnáissico é composto pelos granitoides Santa Rosa de Lima, Santo Antônio e Paulo Lopes, que apresentam composições sieno e monzograníticas, subordinadamente granodioríticas, com texturas porfiríticas e foliação de fluxo ígneo, localmente, desenvolvendo foliação milonítica. Estes granitoides ocorrem como corpos alongados com orientação N20°-30°E e apresentam um posicionamento sin-transcorrente as zonas de cisalhamento dúcteis da orogênese brasileira (Silva *et al.*, 2000; Bitencourt *et al.*, 2008). A Suíte Pedras Grandes compreende, predominantemente, o Granito Imaruí-Capivari, com ocorrência de corpos graníticos menores. As principais litologias são biotita e hornblenda monzogranitos, que apresentam características geoquímicas de granitos

pós-colisionais (Jelinek *et al.*, 2005). Os lineamentos estruturais possuem direções NW-SE, NNW, NNE e NE-SW.

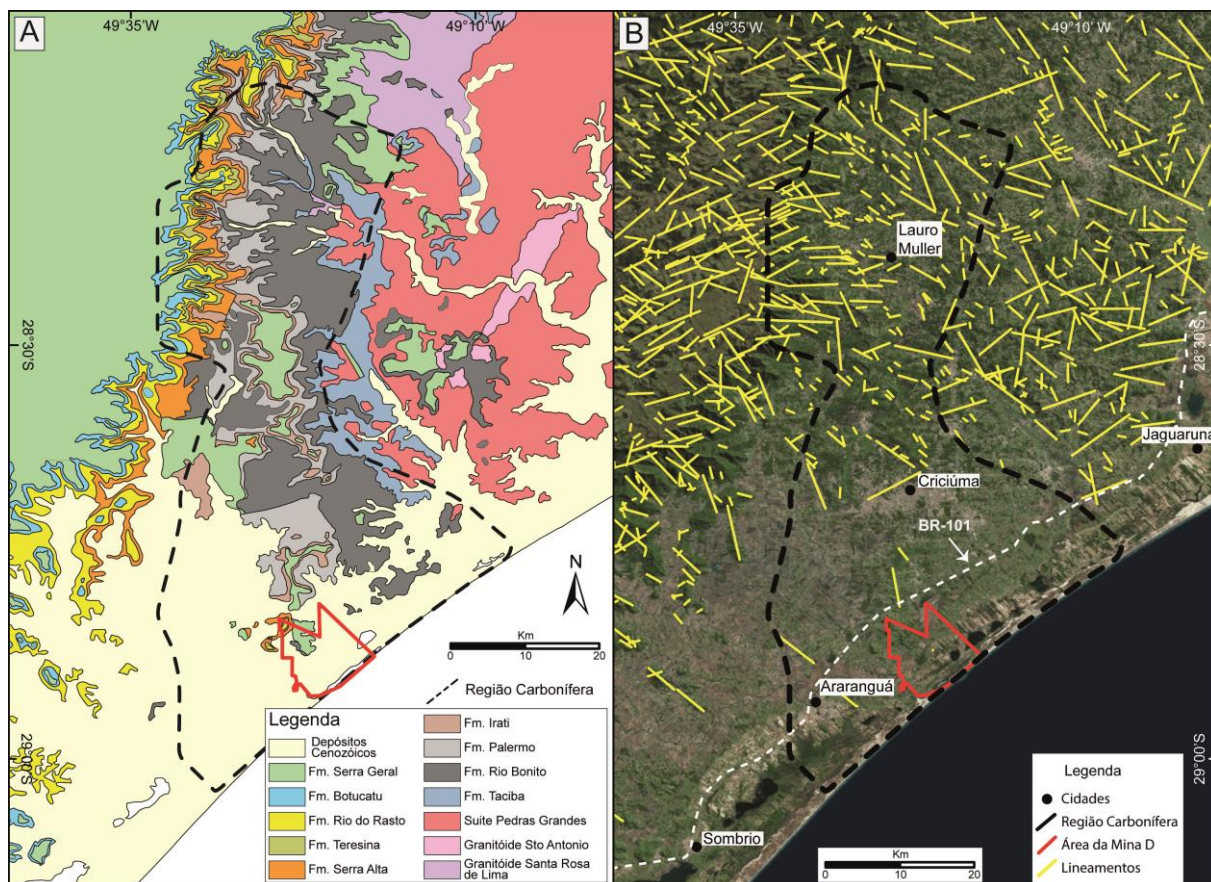


Figura 3. Mapas da região carbonífera de Santa Catarina. A) Mapa geológico da região carbonífera de Santa Catarina e adjacências (extraído e modificado do Geobank da CPRM); B) Imagem de satélite com os lineamentos, as áreas correspondentes a região carbonífera de Santa Catarina e a Mina D delimitadas e as principais cidades da região.

Figure 3. Maps of the carboniferous region of Santa Catarina state. A) Geological map of the carboniferous region of the Santa Catarina state (extracted and modified from CPRM Geobank); B) Satellite image with lineaments, highlighting in the red line the corresponding area of Mina D and in black line, the limit of the carboniferous region of Santa Catarina state and the main cities.

A Bacia do Paraná na região carbonífera de Santa Catarina compreende as supersequências deposicionais Gondwana I e Gondwana III e depositadas entre o Neocarbonífero e o Eocretáceo (Milani *et al.*, 2007). Através de furos de sondagem foram identificadas parte das formações que compõe a Supersequência Gondwana I, de idade Permiana. As rochas da Formação Rio do Sul, topo do Grupo Itararé, são encontradas na base

de alguns furos de sondagem. As litologias identificadas incluem arenitos com estratificação cruzada ou plano paralela, arenitos com estrutura de fluidização, siltitos e intercalações rítmicas de siltitos e arenitos, depositados em ambiente de leques submarinos com influência glacial. Recoberto concordantemente a Formação Rio do Sul ocorrem as formações Rio Bonito e Palermo do Grupo Guatá. A Formação Rio Bonito é subdividida nos membros Triunfo, Paraguaçu e Siderópolis (Schneider *et al.*, 1974). No membro basal da formação predominam arenitos com estratificação plano-paralela e cruzada acanalada formados pela progradação de um sistema flúvio-deltaico sobre os leques submarinos da Formação Rio do Sul (Holz, 2003; Kalkreuth *et al.*, 2010). De modo subordinado ocorrem siltitos carbonosos laminados e camadas de carvão de importância econômica, principalmente a camada Bonito Inferior. O Membro Paraguaçu, depositado durante a transgressão marinha sobre o membro basal, é composto por arenitos finos com estratificação plano-paralela, siltitos laminados e intercalações entre as duas fácies. O Membro Siderópolis constitui a parte superior da formação e é composto por arenitos com estratificação plano-paralela, siltitos laminados e carbonosos e heterolitos com estruturas “flaser”, “wavy” e “linsen”, por vezes bioturbados. A deposição das rochas do Membro Siderópolis ocorreu em ambiente costeiro de laguna-barreira com influência fluvial (Holz, 2003; Kalkreuth *et al.*, 2010). No membro superior ocorre a camada de carvão Barro Branco, formada em ambiente pantanoso situado atrás da barreira litorânea (Kalkreuth *et al.*, 2010). A espessura máxima da Formação Rio Bonito, identificada por furos de sondagem é de 90 m. A porção superior do Grupo Guatá é composta pela Formação Palermo, que recobre concordantemente a Formação Rio Bonito. Na área de estudo essa formação é composta principalmente por heterolitos “wavy” e “linsen”, com a ocorrência de siltitos laminados e, subordinadamente, arenitos com estratificação cruzada acanalada, margas e calcários. A ocorrência de bioturbação é frequente e muito intensa em alguns intervalos da formação. A Formação Palermo apresentou uma espessura máxima de 125 m.

As formações Irati e Serra Alta do Grupo Passa Dois sucedem as do Grupo Guatá e apresentam um contato transicional. A Formação Irati é dividida nos membros Taquaral e Assistência (Schneider *et al.*, 1974) e foi formada em ambiente marinho de águas calmas, abaixo do nível das ondas, devido à restrição da circulação das correntes marinhas (Milani *et al.*, 2007). Os depósitos são de folhelhos e folhelhos betuminosos, margas e calcários, com a ocorrência de siltitos e arenitos em menor volume. A espessura máxima da Formação Irati na área é de 115 m. A Formação Serra Alta recobre os folhelhos da Formação Irati e o contato entre as formações é transicional. A sua deposição é atribuída a um ambiente marinho de baixa energia (Milani *et al.*, 2007). As rochas da formação são constituídas por siltitos laminados e folhelhos e intercalações entre os dois. A Formação Serra Alta é encontrada no topo de alguns

furos de sondagem, em nenhum deles ocorre a formação sobrejacente, por isso sua espessura não pode ser determinada.

As rochas vulcânicas Formação Serra Geral de idade Eocretácea recobrem as rochas sedimentares da Bacia do Paraná. Este intenso vulcanismo de origem fissural deu origem a uma espessa pilha de basaltos toleíticos e andesitos basálticos com estruturas tipo pahoehoe e *a'a*. A porção superior é composta por lavas ácidas, de composição riolítica a riodacítica. Na região carbonífera ocorrem derrames de lava básica, além de diques e soleiras de diabásio. Muitos morros são sustentados topograficamente por estes corpos intrusivos. A ascensão e o posicionamento das intrusões é controlado por jogos de falhas extensionais e sistemas de fraturas que ainda ativam os planos de acamamento das rochas sedimentares. O enxame de diques de Florianópolis, que se situa a norte da região carbonífera, é interpretado como sendo alimentador do vulcanismo Serra Geral e possui orientação preferencial NNE (Florisbal *et al.*, 2014). Nas seções geológicas são identificados corpos ígneos intrusivos de espessura e extensão lateral variáveis, desde corpos com 2 m de espessura e sem continuidade lateral, até corpos com mais de 100 m de espessura e extensão lateral de mais de 6 km. As intrusões pouco espessas e sem continuidade lateral são interpretadas como diques de diabásio, enquanto que as intrusões espessas e que apresentam continuidade entre os furos de sondagem são interpretadas como soleiras de diabásio. Uma soleira de diabásio é identificada no intervalo estratigráfico da Formação Irati em todas as seções geológicas realizadas e possui uma área de aproximadamente 22 km², que abrange a porção central e parte da porção leste da área de pesquisa, e espessura variando entre 43 e 135 m. A área de pesquisa da Mina D é recoberta pelos depósitos cenozóicos da planície costeira de Santa Catarina. Os sedimentos são compostos principalmente por areias depositadas em ambiente de laguna-barreira. A presença desta cobertura sedimentar impede a observação dos lineamentos por imagens de satélite na área.

2.2 Materiais e métodos

A análise dos lineamentos nas imagens de satélite foi realizada em uma área de 20.000 km², abrangendo toda a região carbonífera de Santa Catarina, parte do embasamento e parte do planalto da Serra Geral. Uma porção da área de análise estrutural por imagem de satélite, que abrange a região carbonífera, é apresentada na figura 3B. Foram utilizadas imagens Landsat 8, disponíveis no software ArcGis®, e imagens de relevo sombreado, disponíveis no *Geobank* da CPRM. Três escalas de trabalho foram utilizadas 1:500.000, 1:250.000 e 1:20.000, deste modo estruturas de diferentes comprimentos foram observadas. A partir dos lineamentos traçados foram gerados os Diagramas de Roseta da densidade e do comprimento com a extensão

AzimuthFinder (Queiroz *et al.*, 2014) no software ArcGis®. Para a interpretação estrutural da área de pesquisa da Mina D foram utilizados os dados de 100 furos de sondagem (Fig. 2). Os furos de sigla MML foram realizados pela empresa Maracajá Mineração S.A., enquanto que os furos com siglas AR, CR, BG, MA, MB e IPB, foram realizados pelo convênio DNPM/CPRM. A camada de carvão Barro Branco é a mais superficial e a mais importante economicamente na região. Por apresentar continuidade lateral e ambiente de deposição considerado plano, a camada foi utilizada como guia para os mapas de contorno estrutural na área da mina. A interpolação das cotas de lapa da camada foi realizada utilizando o software ArcGis® e diferentes métodos de interpolação foram testados. O método que apresentou melhores resultados foi o inverso da distância ponderada (IDW). A partir dos dados de furos de sondagem foram confeccionadas nove seções geológicas para visualização tridimensional do comportamento estrutural na área.

3 Resultados

3.1 Análise dos lineamentos

A interpretação das imagens de satélite e a confecção dos diagramas de roseta mostrou que as principais direções dos lineamentos na área são $N30^{\circ}-60^{\circ}W$, $N60^{\circ}-80^{\circ}E$ e $N30^{\circ}-60^{\circ}E$. De modo subordinado ocorrem lineamentos de direção $N60^{\circ}-80^{\circ}W$, $N10^{\circ}-30^{\circ}E$, $N10^{\circ}-30^{\circ}W$, N-S e E-W. A imagem de satélite da figura 3B apresenta os lineamentos identificados na região carbonífera de Santa Catarina e adjacências. Os diagramas de roseta de Frequência de Direções (Fig. 4A) e de Comprimento (Fig. 4B) apresentam o resultado da análise estatística empregada. Além dos diagramas que consideram toda a área analisada foram confeccionados quatro diagramas que apresentam as direções dos lineamentos que ocorrem nas diferentes unidades litológicas da região (Fig. 5).

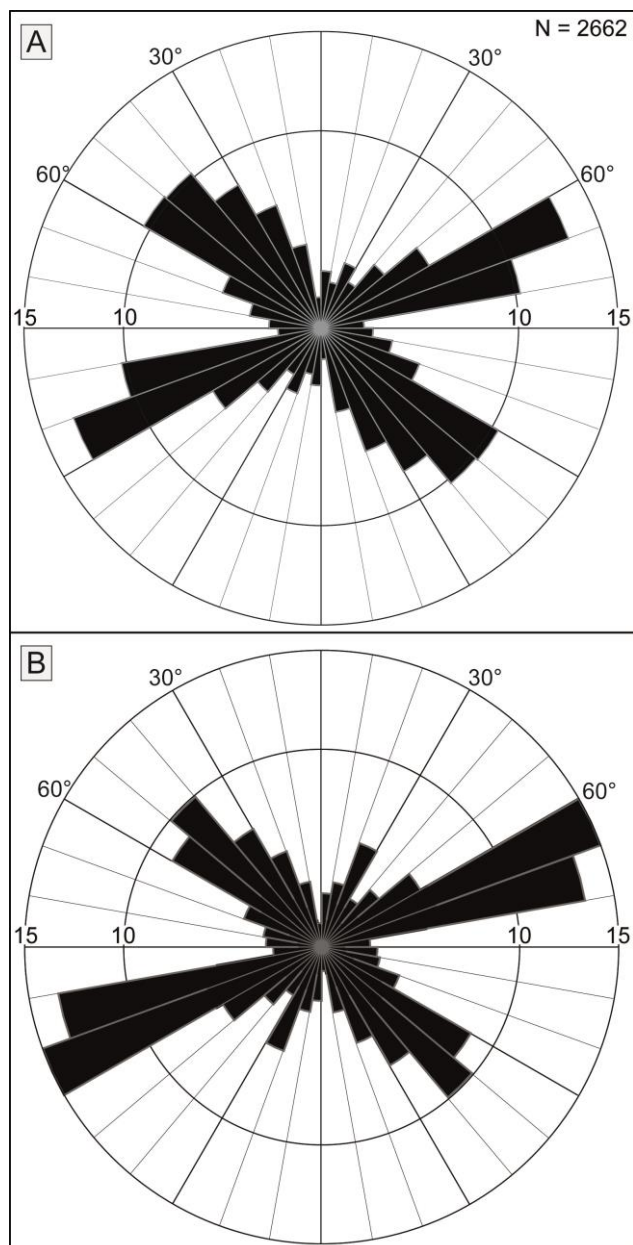


Figura 4. Diagramas de Roseta. A) Diagrama de Roseta de densidade dos lineamentos; B) Diagrama de Roseta de comprimento dos lineamentos.

Figure 4. Rose Diagrams. A) Rose Diagram of the lineaments density; B) Rose Diagram of the lineaments comprimento.

Os lineamentos de maior frequência na área têm direção N30°-60°W (n=750) e apresentam o comprimento dos traços relativamente uniforme, em geral entre 2 e 4 km. Estes lineamentos estão distribuídos em toda a área analisada e ocorrem com menor espaçamento e maior persistência em uma faixa de direção NW-SE com cerca de 80 km de extensão, entre as cidades de Torres e Criciúma, que se estende da planície costeira até o planalto da Serra Geral. Esse é um dos principais sistemas de falhas que afeta todas as unidades litológicas da região e

o que apresenta maior frequência nas rochas sedimentares da Bacia do Paraná e na Formação Rio Bonito (Fig. 5B e C). No planalto da Serra Geral o sistema é um condicionante do relevo, controlando a orientação das drenagens e dos vales da escarpa da serra. No embasamento cristalino estes lineamentos ocorrem de forma esparsa e na planície costeira, ao sul da região carbonífera, controla o alongamento dos morros compostos por rochas da Bacia do Paraná.

Os lineamentos de direção $N60^{\circ}-80^{\circ}E$ ($n=599$) apresentam os traços de maior comprimento, atingindo até 17 km de extensão. Estes lineamentos são identificados em todas as unidades litológicas da região e apresentam espaçamento constante exceto na porção sul da região, próximo a Torres, onde ocorre o adensamento das falhas. É o sistema de falhas predominante nas rochas vulcânicas da Formação Serra Geral (Fig. 5D). No planalto da Serra Geral estes lineamentos têm forte influência no relevo, encaixando drenagens e vales. Os lineamentos de direção $N30^{\circ}-60^{\circ}E$ ($n=364$), apesar de apresentarem frequência e comprimento consideráveis na região, ocorrem com expressividade apenas na Formação Serra Geral (Fig. 5D). Esse sistema de lineamentos possui ocorrência subordinada nas demais unidades litológicas.

Os lineamentos de direção $N10^{\circ}-30^{\circ}W$ ($n=272$) e $N10^{\circ}-30^{\circ}E$ ($n=161$) se distribuem de maneira esparsa na região e apresentam comprimentos variáveis, variando de poucas centenas de m a mais de 10 km. Os dois sistemas apresentam maior frequência nas rochas do embasamento (Fig. 5A), destacando os lineamentos de direção NW.

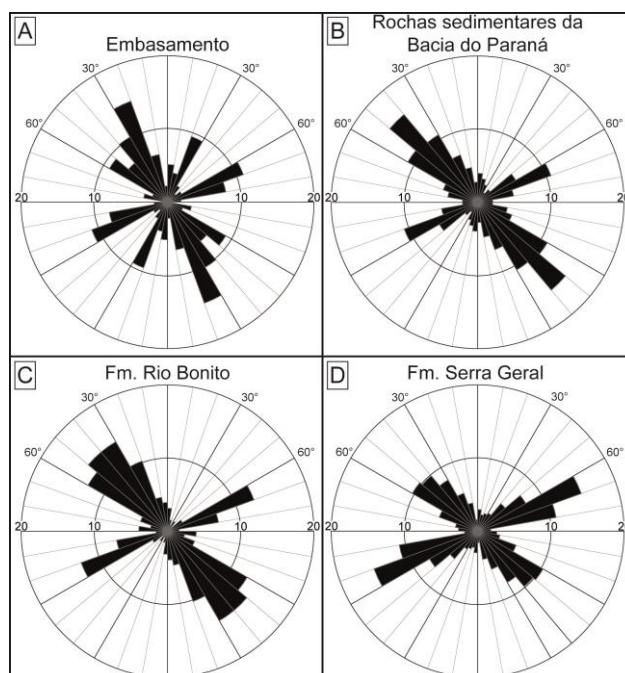


Figura 5. Diagramas de Roseta de densidade dos lineamentos das unidades litológicas da região. A) Embasamento; B) Rochas sedimentares da Bacia do Paraná; C) Formação Rio Bonito; D) Formação Serra Geral.

Figure 5. Rose Diagram of the lineaments density of lithologic units in the region. A) Basement rocks; B) Paraná Basin sedimentary rocks; C) Rio Bonito formation; D) Serra Geral formation.

3.2 Mapa de Contorno Estrutural

A interpretação estrutural da área da Mina D foi realizada através da análise do mapa de contorno estrutural da lapa da camada de carvão Barro Branco (Fig. 6A) e da interpretação das seções geológicas confeccionadas. A interpretação visa determinar o arranjo estrutural da área, as direções das falhas e seus rejeitos, além de verificar se há relação temporal entre as estruturas identificadas e as variações na espessura da Formação Rio Bonito e da camada de carvão. A camada Barro Branco ocorre em quase todos os furos de sondagem na área da mina e nos furos adjacentes, exceto naqueles em que foi cortada por soleiras de diabásio. A espessura da camada de carvão varia entre 0,44 e 2,46 m e a espessura de carvão na camada varia entre 0,20 e 1,39 m. A cota de lapa da camada Barro Branco varia entre -76 e -378 m. A presença de soleiras de diabásio pode induzir ao erro na interpretação do mapa de contorno estrutural, visto que estes corpos ígneos podem deslocar as camadas. As seções geológicas são importantes nesse aspecto.

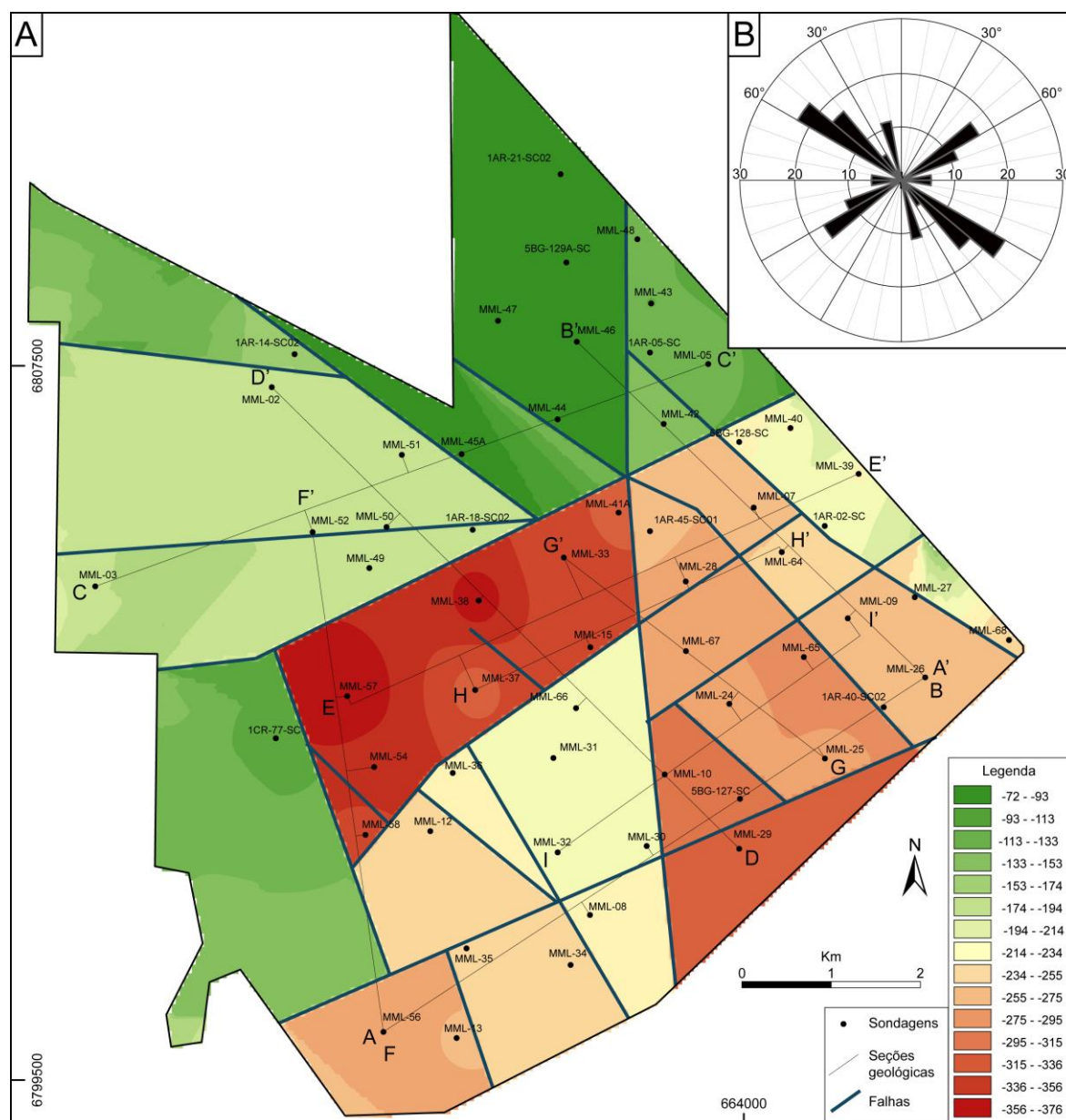


Figura 6. Interpretação estrutural da área de pesquisa. A) Mapa de contorno estrutural da camada de carvão Barro Branco com as falhas definidas; B) Diagrama de Roseta de densidade das falhas na área.

Figure 6. Structural interpretation of the research area. A) Barro Branco coal seam structural contour map with defined faults; B) Rose Diagram of density of the faults in the area.

O mapa de contorno estrutural da lapa da camada de carvão integrado com as falhas foi realizado para a área de pesquisa, onde a malha de furos de sondagem é mais densa, o que permitiu uma interpretação mais precisa (Fig. 6A). As nove seções geológicas confeccionadas têm direções NW-SE e NE-SW e cortam perpendicularmente as principais estruturas na área. As quatro seções selecionadas são apresentadas nas figuras 7 e 8. As falhas normais representam as principais feições estruturais identificadas na área e apresentam as direções

N30°-60°W, N50°-70°E, N10°-20°W e E-W (Fig. 6B). O cruzamento dos sistemas de falhas resulta em um mosaico irregular com blocos abatidos e soerguidos, ocasionando o afundamento da camada a partir da porção central em direção ao limite SE da área de pesquisa. Em toda a extensão da região carbonífera são descritos basculamento de blocos, porém na área de estudo não foram identificadas feições que suportem a interpretação de que a camada está basculada em alguma porção da área. As falhas normais de direção N30°-60°W são as que ocorrem com maior frequência na área (Fig. 6B), seguidas por falhas de direção N50°-70°E, que são as mais extensas. O rebaixamento da camada de carvão está relacionado com estas falhas normais, que também registram os rejeitos mais expressivos na área, atingindo mais de 100 m em alguns locais. A porção central da área de pesquisa constitui um baixo estrutural, caracterizando um *graben* delimitado por duas falhas de direção N50°-70°E. O mapa de contorno estrutural mostra este rebaixamento da camada de carvão e a diferença da cota de lapa da camada entre o bloco alto e o bloco baixo, que é de 180 m. Este rejeito é resultante da soma dos rejeitos das falhas normais de direção N50°-70°E e N10°-20°W como mostram as seções E-E' (Fig. 7B) e D-D' (Fig. 8A). As falhas normais de direção NE que delimitam o *graben* nas suas porções NW e SE, têm rejeito da ordem de 110 m. O rejeito da falha normal de direção N10°-20°W do limite NE é de aproximadamente 70 m. Em relação a falha normal que delimita a estrutura a SW não se pode afirmar o rejeito real, pois o perfil litológico do único furo de sondagem do bloco soerguido não está disponível. A falha normal de direção N10°-20°W que delimita o *graben* na sua extremidade NE apresenta um rejeito variável. Na porção norte da falha o bloco abatido se situa no lado oeste, enquanto que na porção sul da falha, o bloco abatido se situa no lado leste (Fig. 6A).

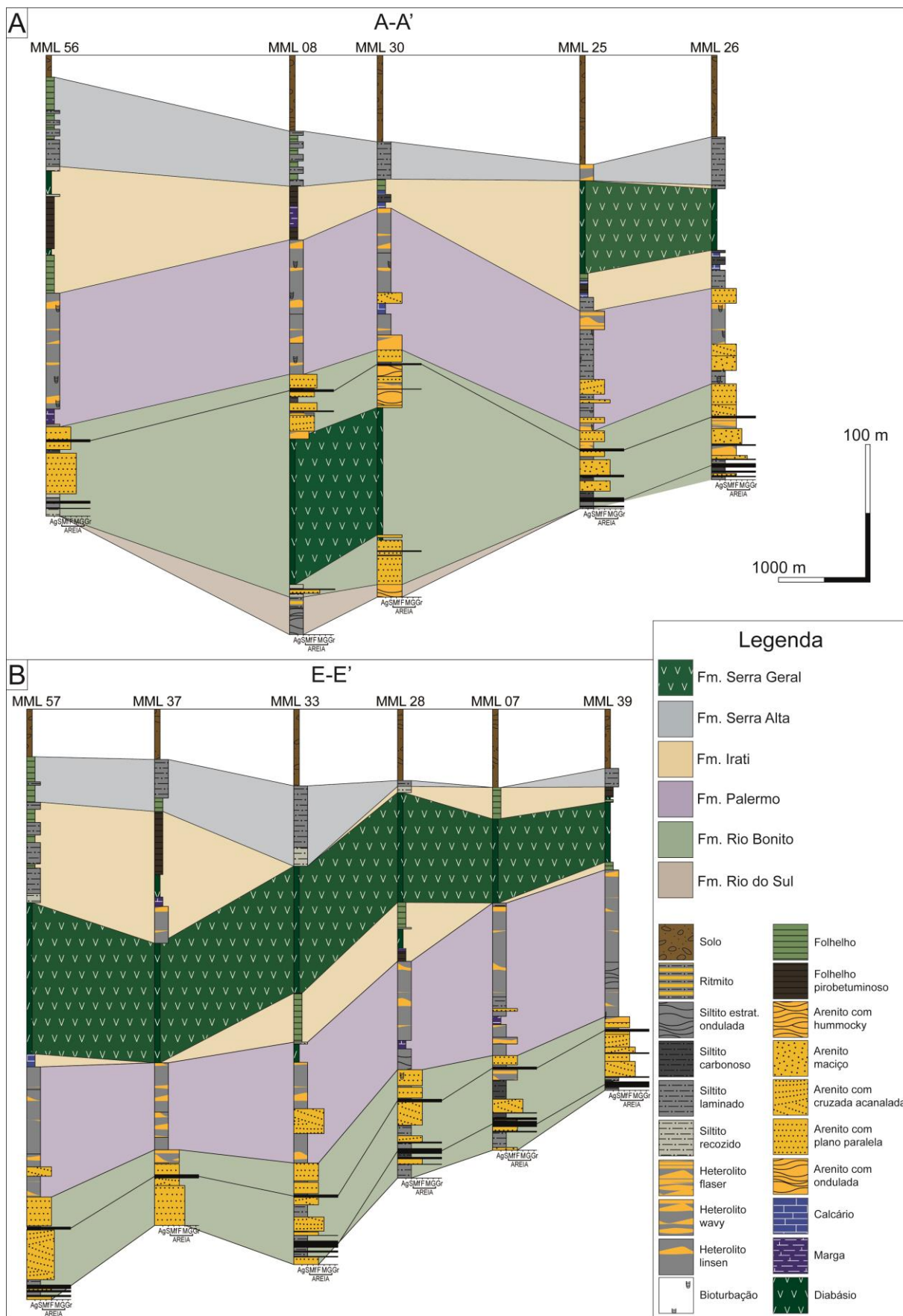


Figura 7. Seções geológicas de direção NE-SW. A) Seção A-A'; B) Seção E-E'.

Figure 7. Geological sections of NE-SW direction. A) A-A' section; B) E-E' section.

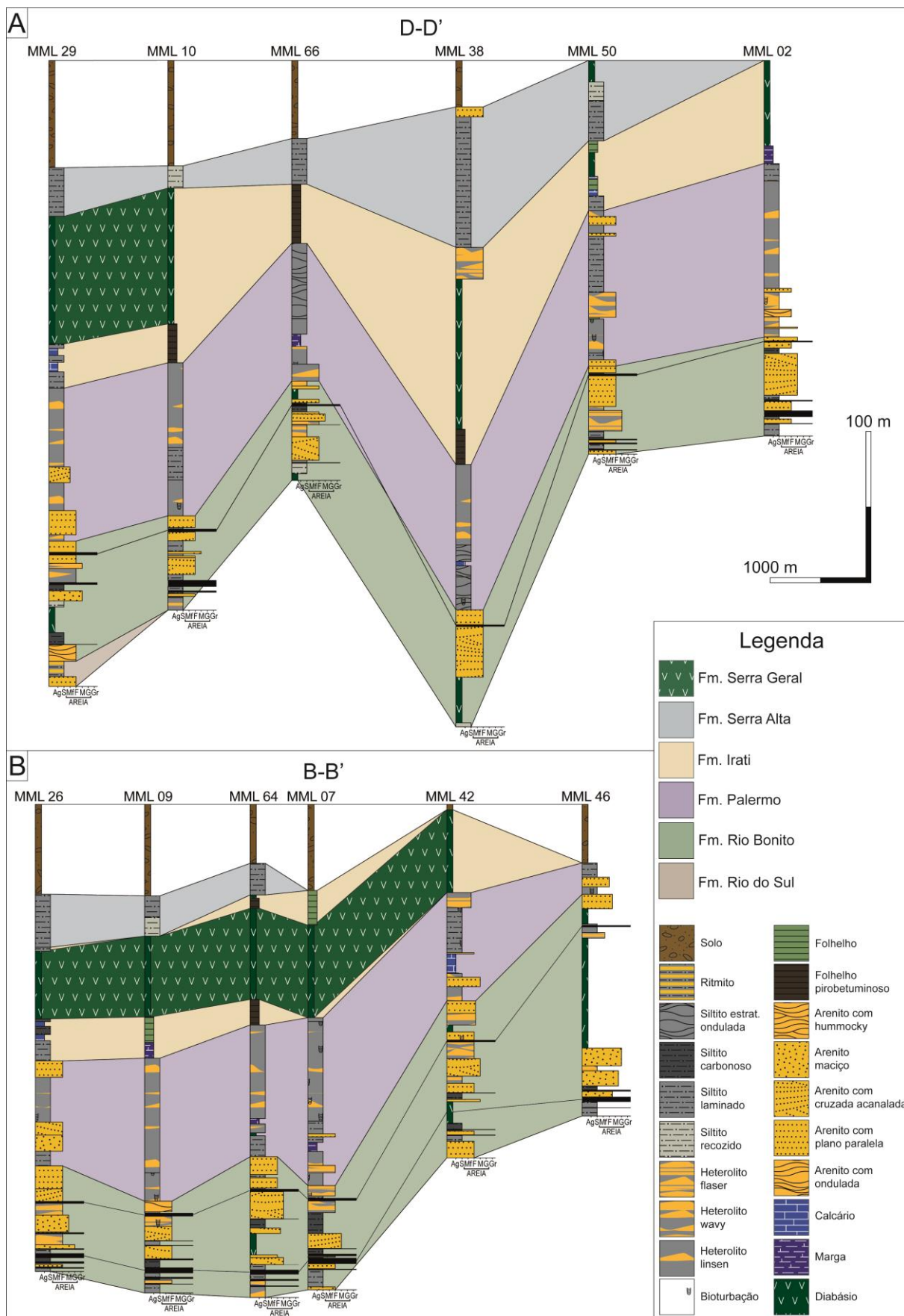


Figura 8. Seções geológicas de direção NW-SE. A) Seção D-D'; B) Seção B-B'.

Figure 8. Geological sections of NW-SE direction. A) D-D' section; B) B-B' section.

Na porção norte da área, nos furos MML 44, 46 e 47, em que a cota da lapa da camada de carvão é da ordem de -80 m, a análise do mapa de contorno estrutural pode levar a interpretação de que o deslocamento do bloco alto em relação ao bloco baixo, situado a leste e que abrange os furos MML 43, 48 e 05, é ocasionado pelo rejeito de uma falha. De fato, ocorre uma falha normal entre os blocos, como mostra a seção B-B' (Fig. 8B), porém o soerguimento do bloco alto está relacionado a intrusão de uma soleira de diabásio. Subtraindo-se a espessura do corpo de diabásio (85 m) dos perfis dos furos, a cota de lapa da camada no bloco alto estaria 20 m abaixo da cota de lapa do bloco baixo. Outra porção com soerguimento da camada de carvão devido a intrusão de uma soleira de diabásio se situa na parte central da área de pesquisa, mais precisamente entre os furos MML 08, 30 e 32. Entre estes furos ocorre uma falha normal de direção N50°-70°E que desloca a soleira de diabásio, ou seja, a movimentação da falha é posterior a sua intrusão, como mostra a seção A-A' (Fig. 7A). O soerguimento da camada de carvão por soleiras de diabásio ocorre quando estas se posicionam no intervalo estratigráfico da Formação Rio Bonito, abaixo da camada de carvão Barro Branco. Este fato é identificado nas seções geológicas ou verificando-se a espessura do intervalo estratigráfico entre as camadas de carvão Barro Branco e Bonito Inferior.

As soleiras de diabásio, cuja presença é expressiva na área, se mostraram bons guias na análise estrutural. Uma grande soleira ocorre no intervalo estratigráfico da Formação Irati e abrange as porções central e leste da área de pesquisa, sendo identificada em todas as seções apresentadas (Figs. 7 e 8). Os corpos de diabásio auxiliaram na interpretação das seções geológicas por serem mais jovens que as rochas sedimentares encaixantes, assim as estruturas que são anteriores as intrusões não as afetam. Entre os furos MML 45A e MML 44, ocorre uma soleira de diabásio que intrude a Formação Rio Bonito na mesma cota, porém em intervalos estratigráficos diferentes. Essa relação sugere a existência de uma falha anterior à intrusão do diabásio. Na seção E-E' (Fig. 7B) é possível observar que entre os furos MML 57, 37 e 33 a soleira de diabásio indica que o perfil do furo MML 37 foi rebaixado em relação aos adjacentes, enquanto que a camada de carvão Barro Branco indica que o mesmo perfil foi soerguido. Este comportamento sugere à presença de falhas normais anteriores a intrusão do diabásio, que soergueram o perfil MML 37 em relação aos outros perfis, e de falhas normais posteriores a sua colocação, responsáveis pelo abatimento do bloco em que se situam os furos MML 57, 37 e 33 (Fig. 7B).

A maioria das seções geológicas realizadas não mostra uma relação entre as falhas normais definidas na área e variações na espessura do intervalo estratigráfico da Formação Rio

Bonito. Entretanto, a seção A-A' registra um aumento da espessura da formação, como observado nos furos MML 08 e MML 30. O mapa de contorno estrutural foi comparado com o mapa de isópacas da camada e com o mapa de espessura de carvão na camada Barro Branco. Não foi identificada correlação entre as estruturas definidas na área e a espessura da camada de carvão. Ocorre um discreto aumento da espessura na camada de carvão situada no baixo estrutural da parte central da área de pesquisa, que pode ser relacionado as estruturas que geraram o *graben*.

4 Discussão

Em zonas de falha, a trama estrutural da rocha exerce grande impacto na estabilidade das escavações, sendo esse aspecto do maciço rochoso muitas vezes negligenciado (Phillipson, 2005a, b). Diversos trabalhos acerca da caracterização estrutural em regiões de mineração de carvão são encontrados na literatura, em grande parte realizados durante as atividades de mineração, onde a determinação das estruturas é feita *in situ* e a sua influência na estabilidade das escavações é visível (Coolen, 2003; Bailey *et al.*, 2005; Phillipson, 2005a, b). O deslocamento vertical da camada de carvão por zonas de falhas é um dos principais problemas a ser considerado em áreas afetadas por atividades tectônicas. Em alguns casos a camada é deslocada por dezenas de metros, o que exige adaptações no projeto da mina. Muitas vezes além do rejeito vertical, as falhas ocasionam o basculamento da camada de carvão, o que praticamente inviabiliza a mineração em áreas com mergulho superior a 15° (Nelson, 1991).

A descrição geotécnica das discontinuidades é de grande importância na identificação de áreas de risco em minas subterrâneas. As características a serem observadas são a orientação, espaçamento, persistência, abertura, rugosidade e preenchimento (ISRM, 1978). A diminuição na estabilidade do teto das galerias é outro fator relacionado a presença de falhas e zonas fraturadas. A configuração das galerias e dos pilares deve considerar a orientação e o espaçamento das discontinuidades. As zonas de falhas compostas por famílias de fraturas pouco espaçadas, ou famílias que se intersectam, são ligadas a zonas de instabilidade nas minas, uma vez que provocam intensa fragmentação da rocha e catalisam os processos de alteração intempérica. Galerias que avançam de modo paralelo a direção das falhas e dos principais sistemas de fraturas que se intersectam em forma de cunha, apresentam os maiores riscos de queda de teto. Nesses casos a melhor orientação das galerias é perpendicular ao seu plano, restringindo assim, a área de influência da zona de falha, o volume de material estéril escavado e a área com suporte de teto complementar. Além da complementação do sistema de suporte de

teto é comum a necessidade de aumentar o tamanho dos pilares nas proximidades da zona de falha.

O influxo de água por zonas de falhas pode acelerar a alteração da rocha e trazer impurezas como argilas para o carvão, além de ocasionar problemas operacionais. Algumas falhas são caminhos de fluxo para água subterrânea, enquanto outras são barreiras para o movimento da água. A ascensão de diques de diabásio, frequentemente é associada à ocorrência de zonas de falhas e pode trazer problemas para a mineração de carvão. Os diques de diabásio que ocorrem em toda a região carbonífera de Santa Catarina, além de constituir um material estéril a ser removido, são rochas duras que impõe muito desgaste aos equipamentos utilizados na mineração. Os principais tipos de falhas relacionados a problemas de instabilidade do teto são as falhas normais oblíquas e falhas de rejeito direcional, enquanto as falhas normais não aparentam ter essa associação (Peng, 1986). Falhas inversas também representam zonas de instabilidade de teto por concentrarem esforços compressivos (Krebs, 2004).

A interpretação estrutural através de imagens de satélite se mostrou uma ferramenta útil na determinação das feições estruturais da região, apesar de ainda não poder ser realizada *in situ* na área da mina. A análise dos lineamentos apresentou resultados semelhantes aos descritos anteriormente em trabalhos realizados na região carbonífera de Santa Catarina (Fabrício *et al.*, 1973; Krebs *et al.*, 1982; Krebs, 2004). As direções dos lineamentos encontradas neste trabalho são compatíveis com as apresentadas por Krebs (2004). As variações dos resultados apresentados nos dois trabalhos são atribuídas as diferentes metodologias utilizadas.

As zonas de falhas normais identificadas neste trabalho e interpretadas como sendo as mais antigas têm direções N10°-30°W e N30°-60°W. Estes sistemas de falhas são predominantes nas rochas do embasamento pré-cambriano e nas rochas sedimentares da Bacia do Paraná. Estas estruturas apresentam relação com a formação de calhas estruturais e altos do embasamento, áreas onde pode haver maior acumulação de carvão, erosão ou não deposição (Fabrício *et al.*, 1972a; Krebs, 2004). Este fato associado as variações de espessura da Formação Rio Bonito sugere que estes sistemas de falhas foram ativos durante a sedimentação. O comprimento máximo para os lineamentos destes sistemas encontrado neste trabalho é de 17 km, porém é descrita a ocorrência de uma falha pertencente ao sistema N10°-30°W com mais de 50 km de extensão que cruza a região carbonífera e se estende no planalto da Serra Geral (Krebs, 2004). Os sistemas de falhas de direção NW-SE são identificados no RS e condicionaram a formação e o soerguimento do Arco de Rio Grande e a deposição das unidades da Formação Santa Maria de idade triássica (Faccini, 2000, 2007; Zerfass *et al.* 2003, 2005; Philipp *et al.*, 2013a, b, 2014) e também das unidades sedimentares da Formação Guará e do arenito Pedreira no início do Jurássico (Scherer & Lavina, 2006; Bruckmann *et al.*, 2016). O

Arco de Rio Grande é sucedido ao nordeste pela Sinclinal de Torres, estrutura que se estende até próximo da região de Araranguá e que condicionou grande parte do vulcanismo fissural da Formação Serra Geral no nordeste do estado do RS e sul de SC (Stica *et al.* 2014; Waichel *et al.*, 2012). A região onde está situada a Mina D faz parte de uma estrutura soerguida referida aqui como Arco de Lages. Trabalhos anteriores como os de Nothfleet *et al.*, (1969), Almeida (1983) e Roldan, (2007) descreveram esta estrutura de direção NW-SE e o soerguimento da região.

Os lineamentos de direção N60°-80°E ocorrem em toda a região carbonífera e são predominantes na Formação Serra Geral. Este sistema de falhas normais são as maiores estruturas da região e intersectam as falhas normais de direções N10°-30°W e N30°-60°W (Fabrício *et al.*, 1973; Krebs *et al.*, 1982; Krebs, 2004). A formação destas falhas de direção NE-SW é atribuída aos processos extensionais envolvidos na separação continental e abertura do Oceano Atlântico (Almeida, 1967, 1969, 1980, 1981). A influência destas falhas na região é marcante, visto que a camada de carvão Barro Branco ocorre na cota de 350 m na porção NW da região carbonífera, enquanto que na área da mina, na porção SE, ela atinge a cota dos -350 m de profundidade. Este conjunto de falhas normais de direção NE define para a região carbonífera de SC uma estruturação associada a uma bacia de *rift* de meio *graben* com um deslocamento inferido mínimo de 700 m. Esta estrutura afeta as soleiras de diabásio da Formação Serra Geral e representa a evolução inicial do *rift* e o preenchimento da porção norte da Bacia de Pelotas (Stica *et al.* 2014). Estes autores demonstraram por sísmica regional profunda que as falhas normais da borda continental (*proximal domain*) da porção norte da Bacia de Pelotas possuem direção nordeste com mergulhos elevados para noroeste.

Os lineamentos de direção N10°-30°E e N-S ocorrem de maneira subordinada na região, porém em alguns casos, apresentam grande extensão. Estas falhas normais, geralmente encaixam diques de diabásio (Floribal *et al.*, 2014; Krebs, 2004) e por isso tem grande importância para a mineração. Stica *et al.* (2014) identificaram anomalias magnéticas circulares alongadas ao longo de um *trend* de direção NS paralelo a costa do estado de Santa Catarina, interpretando estas estruturas como falhas extensionais.

Os lineamentos de direção E-W são pouco representativos, mas registram as atividades recentes de movimentação das zonas de fraturas Florianópolis e Rio Grande (Stica *et al.* 2014). Estas estruturas estão relacionadas à expansão da Dorsal do Meso-Atlântico e representam o limite ainda indefinido entre as bacias de Pelotas e Santos.

As direções dos lineamentos identificadas nas imagens de satélite e as direções das falhas definidas com a interpretação do mapa de contorno estrutural da camada de carvão Barro Branco e das seções geológicas na área da Mina D são condizentes. As falhas normais

identificadas na área de pesquisa têm direções principais N30°-60°W e N50°-70°E, idênticas as descritas em outras áreas da região carbonífera por Krebs *et al.*, (1981, 1983). De forma subordinada, ocorrem falhas normais de direção N10°-20°W e E-W. As falhas que ocorrem na região carbonífera são, predominantemente, falhas normais com disposição subvertical a vertical (Fabrício *et al.*, 1972a, 1973). A feição estrutural mais marcante na área é o rebaixamento gradativo da camada de carvão em direção a linha de costa, comportamento relacionado às falhas normais de direção N50°-70°E. Este sistema de falhas normais é considerado o mais importante na área por apresentar os rejeitos mais significativos. Tais rejeitos podem ser relacionados a uma falha, ou serem resultado da soma do rejeito de sucessivas falhas menores. Estas falhas são extensas e contínuas, e duas delas cortam a área de pesquisa e se estendem para fora dela, o que sugere que são falhas normais regionais. Provavelmente uma destas falhas é a continuação da Falha das Lagoas (Fabrício *et al.*, 1973), a qual se estende por 30 km do sul de Araranguá até Balneário Rincão e apresenta rejeito variando de 30 a 110 m. Estes rejeitos impedem que a mineração atravesse a zona de falha e com isso as galerias devem avançar em direção paralela a falha. A estrutura do tipo *graben* na porção central da área de pesquisa apresenta deslocamento vertical de aproximadamente 180 m, sendo resultado da soma dos rejeitos das falhas N50°-70°E e N10°-20°W que o delimitam. As seções geológicas mostram que o maior deslocamento é atribuído a falha normal de direção N50°-70°E que atravessa a área de pesquisa e limita o *graben* na sua porção NW. Esta falha rebaixa todo o bloco situado ao SE da estrutura produzindo um rejeito vertical de 110 m. O rebaixamento deste bloco inviabiliza a recuperação do carvão nesta área. Esse comportamento estrutural de rebaixamento gradativo da camada de carvão em direção ao litoral (Fabrício *et al.*, 1973; Krebs, 2004) é relacionado ao rifteamento ocorrido no Terciário (Krebs, 2004). As falhas que controlam este rebaixamento possuem direção similar as falhas identificadas na região de Araranguá e ocorrem desde a porção NW da região carbonífera, com rejeitos de até 30 m (Krebs *et al.*, 1983; Krebs *et al.*, 1981), até a porção SE da região, onde atingem rejeitos superiores a 100 m (Fabrício *et al.*, 1973; Krebs, 2004).

O sistema de falhas normais de direção N30°-60°W é o mais frequente na área de pesquisa e na região carbonífera, sendo considerado o sistema de falhas mais antigo na região, pois controla a formação de calhas tectônicas de maior acumulação de carvão e altos do embasamento (Fabrício *et al.*, 1972a; Krebs, 2004). Foi identificado nas seções geológicas que este sistema de falhas apresenta movimento vertical e produz um espessamento localizado da Formação Rio Bonito. Estas falhas são sin-sedimentares e são anteriores a implantação do magmatismo da Formação Serra Geral e da intrusão de soleiras de diabásio. O rejeito máximo para as falhas deste sistema identificadas na área é de 30 m, compatível com o que é identificado

nas outras áreas. A variação do rejeito em falhas pertencentes a este sistema foi reconhecida anteriormente por Krebs *et al.* (1982, 1983), sugerindo que as mesmas podem ocorrer como falhas em tesoura, fato não identificado na área de Mina D. Este sistema de falhas deve ser mapeado com maior atenção na área. Por apresentar falhas de menor extensão e de pequenos rejeitos sua presença não é tão evidente e devem ocorrer falhas deste sistema que não foram identificadas neste trabalho. Em relação as falhas normais com rejeito e extensão de maior expressão, as galerias devem avançar de modo paralelo, ou devem cruza-las com disposição perpendicular. Krebs (2004) descreve na região da bacia hidrográfica do Rio Araranguá a ocorrência de um sistema de falhas de menor expressão com direção N30°-45°W, resultante da reativação de sistemas mais antigos, que secciona as falhas do sistema NE. As falhas normais de direção N10°-20°W definidas na área da mina são correlacionadas ao sistema N-S identificado em outros trabalhos. Apesar de serem menos frequentes, são falhas de grande extensão e que podem apresentar rejeitos da ordem de 100 m (Fabrício *et al.*, 1973). A falha deste sistema que delimita o *graben* na sua porção NE se estende além da área de pesquisa e apresenta rejeito de 70 m. As falhas com esta direção têm caráter extensional e geralmente encaixam diques de diabásio (Krebs, 2004).

É reportada a ocorrência localizada de falhas inversas associadas às intrusões de diabásio na região (Fabrício *et al.*, 1972a). Este condicionamento é encontrado na área de pesquisa, onde uma mesma falha comporta-se como falha normal no intervalo da camada de carvão Bonito Inferior e como falha inversa no intervalo da camada de carvão Barro Branco. Este fato está relacionado ao soerguimento gerado por uma soleira de diabásio intrudida no intervalo entre as duas camadas. Estas áreas de soerguimento de blocos associados às intrusões são áreas de acúmulo de tensões compressivas, por isso a mineração próxima a soleiras deve ser evitada. Falhas normais de extensão local e pequenos rejeitos (<5m), ou até inexistentes, são provavelmente as que mais serão encontradas na mineração de carvão (Fabrício *et al.*, 1972b). Observar as características geotécnicas destas falhas e dos sistemas de fraturas associados é importante para definir os melhores métodos de estabilização em cada caso. Falhas com estas características dificilmente serão definidas no trabalho de pesquisa, porém a determinação prévia das zonas de falha e suas direções são imprescindíveis.

As idades relativas dos processos que geraram os sistemas de falhas rúpteis descritos neste trabalho podem ser estabelecidas a partir de relações de campo e das relações obtidas nas seções geológicas. Adicionalmente, para esta região de Santa Catarina, existem informações termocronológicas obtidas a partir de idades de traços de fissão em apatita e zircão (Gallagher *et al.*, 1995; Jelinek *et al.*, 1997; Karl *et al.*, 2013). Os dados de traços de fissão obtidos por estes autores indicam que a evolução tectônica da margem passiva do Atlântico Sul na região

sul envolveu quatro eventos tectônicos principais: (i) Fase Pré-Rift (155-135 Ma), (ii) 1º Pulso Fase Rift (135-113 Ma), (iii) 2º Pulso Fase Rift (113-90 Ma) e (iv) Fase Pós-Rift (90-66 Ma), marcada pelo soerguimento (Arco de Lages) e rebaixamento regional (*Graben* de Urussanga).

O primeiro evento está associado às atividades termiais anteriores à instalação da Pluma de Tristão da Cunha na base da Crosta (Bueno, 2004; Waichel *et al.*, 2012). O segundo evento marca o pico térmico (~130 Ma) associado com a abertura do Gondwana e com a movimentação de falhas normais de direção NW-SE, que atuaram como condutos principais para a extrusão das lavas da Formação Serra Geral e que estão registradas nos enxames de diques e soleiras de diabásio dos arcos de Ponta Grossa e Rio Grande e no Sinclinal de Torres. Bueno (2004) sugere uma mudança na direção dos enxames de diques de ortogonais ao *Rift* do Atlântico Sul, entre 133 e 130 Ma, para diques paralelos ao *rift*, entre 130 e 125 Ma. Esta mudança está associada à geração de uma discordância regional nas bacias de Santos (Bueno, 2004) e de Pelotas (Stica *et al.* 2014) e a rotação dos *Seaward Dipping Reflectors* (SDR), observados a partir de seções sísmicas profundas. Este período estaria associado à geração das falhas normais de direção N50-70°E. A movimentação destas falhas ainda se estenderia ao terceiro evento tectônico e seria responsável pela deformação dos sedimentos *sin-rift* e pela geração dos rejeitos observados nos sistemas de falhas NE que afetaram a área da Mina D. O último evento tectônico, com pulso principal entre 90 e 66 Ma está associado ao soerguimento regional dos arcos de Rio Grande, Ponta Grossa e de Lages e ao rebaixamento e formação do Sinclinal de Torres e do *Graben* de Urussanga, situados respectivamente, ao sul e ao norte da área de estudo.

5 Conclusões

Este trabalho definiu os sistemas de falhas normais existentes na área de pesquisa da Mina D e identificou as suas características geológicas principais a partir da integração de observações realizadas por outros autores em diferentes locais da região carbonífera e dos dados avaliados neste trabalho. A análise dos lineamentos por imagens de satélite se mostrou uma ferramenta eficiente na determinação dos principais sistemas de falha da região. A região é amplamente afetada por sistemas de falhas normais de direções N30°-60°W, N60°-80°E, N30°-60°E, N10°-30°W e de modo subordinados, por sistemas de orientação N60°-80°W, N10°-30°E, N-S e E-W.

A interpretação do mapa de contorno estrutural da camada de carvão e das seções geológicas mostrou os aspectos estruturais e as principais direções de falhas normais da área. Os principais sistemas de falhas da área apresentam direção N30°-60°W e N50°-70°E, com sistemas subordinados de direção N10°-20°W e E-W. As falhas normais que mais influenciam

no arranjo estrutural da área são as de direção N50°-70°E, que apresentam extensão regional e rejeitos que podem ser superiores a 100 m. Por estas características é um sistema que deve condicionar a orientação das galerias da mina, com a frente de lavra avançando paralela a esta direção nas proximidades destas falhas. Em algumas porções da área, como no *graben* localizado na parte central da área, o deslocamento vertical associado a estas falhas inviabiliza técnica e economicamente a extração do carvão. As falhas normais de direção N30°-60°W são as mais frequentes na área, conseqüentemente é o sistema que mais deverá influenciar na mineração de carvão na área da Mina D. As falhas normais deste sistema que apresentam maiores extensões e rejeitos devem ser consideradas no planejamento da lavra, a fim de evitar que tenham que ser cruzadas.

Diques de diabásio podem estar associados a qualquer um dos sistemas de falha identificados, porém ocorrem com maior frequência nos sistemas de falhas de direções NW e N-S. As falhas inversas relacionadas as intrusões de diabásio podem gerar zonas de acúmulo de tensões, o que pode levar a problemas de estabilidade de teto e levantamento de piso. São escassas informações sobre as características geotécnicas dos sistemas de falhas e fraturas da região. O conhecimento destes aspectos seria de grande auxílio para a mineração subterrânea de carvão.

Agradecimentos. R. P. Philipp agradece ao CNPq pela concessão de bolsa de produtividade em pesquisa. Os autores agradecem a empresa Maracajá Mineração Ltda. pela disponibilização dos dados para o trabalho.

Referências bibliográficas

- Aboarrage, A. M. & Lopes, R. da C. 1986. Projeto *A Borda Leste da Bacia do Paraná: integração geológica e avaliação econômica*. Porto Alegre: DNPM/CPRM, v. 18, 223p.
- Almeida, F.F.M. 1967. *Origem e evolução da plataforma brasileira*. DNPM-DGM, Boletim 241, Rio de Janeiro, p.1-36.
- Almeida, F.F.M. 1969. Diferenciação tectônica da plataforma brasileira. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 23, SBG, Salvador, *Anais*, p. 29-46.
- Almeida, F.F.M. 1980. *Tectônica da Bacia do Paraná no Brasil*. Relatório PAULIPETRO, São Paulo, IPI, p.1-18.

- Almeida, F.F.M. 1981. Síntese sobre a tectônica da Bacia do Paraná. *In: Simpósio Regional de Geologia, III, SBG-SP, Curitiba, Atas, v.1, p. 1-20.*
- Almeida, F.F.M. 1983. Relações tectônicas das rochas alcalinas Mesozóicas da região meridional da Plataforma Sul-Americana. *Revista Brasileira de Geociências, 13(3): 139-158.*
- Bailey, W.R., Walsh, J.J. & Manzocchi, T. 2005. Fault populations, strain distribution and basement fault reactivation in the East Pennines Coalfield, UK. *Journal of Structural Geology, 27: 913-928.*
- Bitencourt, M.F., Bongioio, E.M., Philipp, R.P., Morales, L.F.G., Rubert, R.R., Melo, C.L. & Luft Jr., J.L. 2008. Estratigrafia do Batólito Florianópolis, Cinturão Dom Feliciano, na região de Garopaba-Paulo Lopes, SC. *Pesquisas em Geociências, 35(1): 109-136.*
- Bruckmann, M.P., Philipp, R.P., Scherer, C.M.S. & Espindola, E. 2016. Petrografia e estratigrafia do Arenito Pedreira, Jurássico da Bacia do Paraná, RS. *In: Congresso Brasileiro de Geologia, 48, Porto Alegre. Boletim de Resumos, SBG.*
- Bueno, G.V. 2004. Diacronismo de eventos no rifte Sul-Atlântico. *Boletim de Geociências da Petrobras, 12(2): 203-229.*
- Coolen, J.M. 2003. Coal mining along the Warfield Fault, Mingo County, West Virginia: a tale of ups and downs. *International Journal of Coal Geology, 54: 193-207.*
- Fabício, J.A.C., Lange, F.M.Q., Valiati, D., Silva, M.A.S. & Pozza, E.V. 1972a. *Projeto carvão de Santa Catarina: relatório integrado.* Porto Alegre: DNPM/CPRM, v. 1, 58p.
- Fabício, J.A.C., Silva, M.A.S. & Valiati, D. 1972b. *Projeto carvão de Santa Catarina: Estudos de geologia de subsuperfície.* Porto Alegre: DNPM/CPRM, v. 1, 106p.
- Fabício, J.A.C., Aboarrage, A.M., Valiati, D., Pozza, E.V., Ferreira, J.A.F. & Suffert, T. 1973. *Projeto carvão de Santa Catarina: relatório integrado.* Porto Alegre: DNPM/CPRM, v. 1, 203 p.
- Faccini, U.F. 2000. *Estratigrafia do permo-triássico do Rio Grande do Sul: estilos deposicionais versus espaço de acomodação.* Porto Alegre, 332p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Faccini, U.F. 2007. Mesozoic sedimentary record of Southern Paraná Basin, Brazil. *In: I WORKSHOP – PROBLEMS IN WESTERN GONDWANA GEOLOGY, 1., 2007, Gramado. Extended abstracts, (1): 42-45.*
- Florisbal, L.M., Heaman, L.M., Janasi, V.A. & Bitencourt, M.F. 2014. Tectonic significance of the Florianópolis Dyke Swarm, Paraná–Etendeka Magmatic Province: A reappraisal

- based on precise U-Pb dating. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 289: 140-150.
- Gallagher, K., Hawkesworth, C.J. & Mantovani, M.S.M. 1995. Denudation, fission track analysis and long-term evolution of passive margin topography: application to the southeast Brazilian margin. *Journal of South American Earth Sciences*, 8(1): 65-77.
- Holz, M., Kuchle, J., Philipp, R.P., Bischoff, A.P. & Arima, N. 2006. Hierarchy of tectonic control on stratigraphic signatures: base-level changes during the Early Permian in the Paraná Basin, southernmost Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 22: 185–204.
- ISRM. 1978. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15(6): 319-368.
- Jelinek, A.R. 1997. *Análise por traços de fissão em apatitas (AFTA) da encaixante dos depósitos de fluorita filoniana do sudeste catarinense: uma evolução hidrotermal polifásica*. Porto Alegre, 200 p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Jelinek, A.R., Bastos Neto, A.C., Leite, J.A.D., Hartmann, L.A. & McNaughton, N.J. 2005. SHRIMP U-Pb zircon dating of Pedras Grandes Suite, southern Santa Catarina State, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 77(1): 125-135.
- Jelinek, A.R., Chemale Jr., F., Van-der-Beek, P.A., Guadagnin, F., Cupertino, J.A. & Viana, A. 2014. Denudation history and landscape evolution of northern East-Brazilian continental margin from apatite fission-track thermochronology. *Journal of South American Earth Sciences*, 54: 158-181.
- Kalkreuth, W., Holz, M., Mexias, A., Balbinot, M., Levandowski, J., Willett, J., Finkelman, R. & Burger, H. 2010. Depositional setting, petrology and chemistry of Permian coals from the Paraná Basin: 2. South Santa Catarina Coalfield, Brazil. *International Journal of Coal Geology*, 84: 213-236.
- Karl, M., Glasmacher, U.A., Kollens, S., Stockli, D.F. & Hackspacher, P.C. 2013. Evolution of the South Atlantic passive continental margin in southern Brazil derived from zircon and apatite (U-Th-Sm)/He and fission track data. *Tectonophysics*, 604: 224-244.
- Krebs, A.S.J. 2004. *Contribuição ao conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos da bacia hidrográfica do Rio Araranguá, SC*. Florianópolis, 375p. Tese de Doutorado, Curso de Doutorado em Geografia, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina.

- Krebs, A.S.J., Grazia, C.A., Amaral, J.E., Casé, M.G., Branco, P. de M., Oliveira, R.L. & Silva, V.R. 1982. *Programa carvão energético no estado de Santa Catarina: relatório final*. Porto Alegre: DNPM/CPRM, v. 1, 206p.
- Krebs, A.S.J., Grazia, C.A.; Amaral, J.E., Casé, M.G., Oliveira, R.L. & Silva, V.R. 1983. *Projeto carvão nas áreas da mina Esperança e da mina Fontanella – SC: relatório final*. Porto Alegre: DNPM/CPRM, v. 1, 123 p.
- Milani, E.J. & Ramos, V.A. 1998. Orogenias Paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 28: 473-484.
- Milani, E.J., 2004. Comentários sobre a origem e evolução tectônica da Bacia do Paraná. In: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C.D.R. & Brito-Neves, B.B. de (Eds.). *Geologia do continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, p. 265-279.
- Milani, E.J., Melo, J.H.G., Souza, P.A., Fernandes, L.A. & França, A.B. 2007. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2): 265-287.
- Nelson, W.J. 1991. Faults and their effect on coal mining in Illinois. *Illinois State Geological Survey, Circular*, 523: 1–40.
- Northfleet, A.A., Medeiros, R.A. & Müllmann, H. 1969. Reavaliação dos dados geológicos da Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 12(3): 291-346.
- Peng, S. S. 1986. Coal Mine Ground Control. *John Wiley & Sons*, 2a. ed., 490p.
- Philipp, R.P., Zvirtes, G., Bruckmann, M.P., Faccini, U.F., Viana, A.R., Lavina, E. & Scherer, C.M.S. 2013a. Estruturas tectônicas na seção geológica Santana do Livramento-Rosário do Sul-Jaguari: evidências do Arco de Rio Grande, Bacia do Paraná, RS. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 14., 2013, Chapada dos Guimarães. *Boletim de Resumos Expandidos*, Chapada dos Guimarães, SBG.
- Philipp, R.P., Kloss, H.P., Schultz, C.L., Basei, M.A.S., Horn, B.L. & Soares, M. 2013b. Proveniência por U-Pb LA-ICP-MS em zircão detrítico e idade de deposição da Formação Santa Maria, Triássico da Bacia do Paraná, RS: evidências da estruturação do Arco do Rio Grande. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 14., 2013, Chapada dos Guimarães. *Boletim de Resumos Expandidos*, Chapada dos Guimarães, SBG.
- Philipp, R.P., Rolim, S.B.A., Malta, L., Jelinek, A.R., Viana, A., Lavina, E.L., Cagliari, J. & Faccini, U.F. 2014. Estruturação do Arco de Rio Grande e da Sinclinal de Torres, Bacia do Paraná, RS: evidências por levantamentos magnetotélúricos. In: SIMPÓSIO

- BRASILEIRO DE GEOFÍSICA, 6., 2014, Porto Alegre. *Extended Abstracts*, Porto Alegre, SBGf.
- Phillipson, S.E. 2005a. Effects of late Paleozoic foreland deformation on underground coal mine ground instability, Illinois and Appalachian Basins. *International Journal of Coal Geology*, 64: 3-19.
- Phillipson, S.E. 2005b. Laramide orogeny-related controls on coal mine ground instability in Cretaceous coal seams, southern Rocky Mountain foreland. *International Journal of Coal Geology*, 64: 20-43.
- Queiroz, G.L., Salamuni, E. & Nascimento, E.R. 2014. AzimuthFinder: ferramenta para a extração de dados e apoio na análise estrutural. *Revista Geologia USP, Série Científica*, 14(1): 6-80.
- Roldan, L.F. 2007. *Tectônica rúptil Meso-Cenozóica na região do Domo de Lages*. São Paulo, 131p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Santos, R.V., Souza, P.A., Alvarenga, C.J.S., Dantas, E.L., Pimentel, M.M., Oliveira, C.G. & Araújo, L.M. 2006. Shrimp U-Pb Zircon dating and palynology of bentonitic layers from the Permian Irati Formation, Paraná Basin, Brazil. *Gondwana Research*, 9: 456-463.
- Scherer, C.M.S. & Lavina, E.L. 2006. Stratigraphic evolution of a fluvial–eolian succession: The example of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous Guarú and Botucatu formations, Paraná Basin, Southernmost Brazil. *Gondwana Research*, 9: 475-484.
- Schneider, R.L., Mühlmann, H., Tommasi, E., Medeiros, R.A., Daemon, R.F. & Nogueira, A. A. 1974. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 28, Porto Alegre, 1974. *Anais...* Porto Alegre SBG, v. 1, p.41-65.
- Silva, M.A.S., Leites, S.R & Caruso, Jr. F. 2000. *Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil*. Criciúma, Folha SH.22-X-B. Estado de Santa Catarina. Escala 1:250.000. CPRM, Brasília.
- Stica, J.M., Zalán, P.V. & Ferrari, A.L. 2013. The evolution of rifting on the volcanic margin of the Pelotas Basin and the contextualization of the Paraná-Etendeka LIP in the separation of Gondwana in the South Atlantic. *Marine and Petroleum Geology*, 50: 1-21.
- Zerfass, H., Chemale Jr., F., Schultz, C.L. & Lavina, E. 2003. Tectonics and sedimentation in Southern South America during Triassic. *Sedimentary Geology*, 166: 265–292.

Zerfass, H., Chemale Jr., F. & Lavina, E. 2005. Tectonic Control of the Triassic Santa Maria Supersequence of the Paraná Basin, southernmost Brazil and its correlation to the Waterberg Basin, Namibia. *Gondwana Research*, 8: 163-176.

Waichel, B.L., Lima, E.F., Viana, A.R., Scherer, C.M., Bueno, G.V. & Dutra, G. 2012. Stratigraphy and volcanic facies architecture of the Torres Syncline, Southern Brazil, and its role in understanding the Paraná-Etendeka Continental Flood Basalt Province. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 215-216: 74-82.

CAPÍTULO III

1. Conclusões

Este trabalho definiu os sistemas de falhas normais existentes na área de pesquisa da Mina D e identificou as suas características geológicas a partir da integração de observações anteriores em diferentes locais da região carbonífera e dos dados avaliados neste trabalho. A análise dos lineamentos por imagens de satélite identificou quatro sistemas de falhas normais de direções N30°-60°W e N10°-30°W, N30°-60°E e N60°-80°E, e de modo subordinado, sistemas de orientação N-S e N10°-30°E e, E-W e N60°-80°W. A análise de lineamentos por imagens de satélite se mostrou uma ferramenta eficiente na determinação prévia das estruturas que afetam a região carbonífera de Santa Catarina.

A interpretação do mapa de contorno estrutural da camada de carvão e das seções geológicas mostrou que os principais sistemas de falhas na área apresentam direção N30°-60°W e N50°-70°E, com sistemas subordinados de direção N10°-20°W e E-W. As falhas normais de direção N50°-70°E apresentam extensão regional e rejeitos que podem ser superiores a 100 metros. Por estas características devem condicionar a orientação das galerias da mina, com a frente de lavra avançando paralela a esta direção na zona de influência das falhas. No *graben* localizado na parte central da área, o deslocamento vertical associado a estas falhas inviabiliza a extração econômica do carvão.

As falhas normais de direção N30°-60°W são as mais frequentes, e desta forma é consistem no sistema que mais deverá influenciar na mineração de carvão na área da Mina D. As falhas normais deste sistema que apresentam maiores extensões e rejeitos devem ser consideradas no planejamento da lavra, a fim de evitar que tenham que ser cruzadas.

Os diques e as soleiras de diabásio estão associados aos dois principais sistemas de falhas identificados, porém ocorrem com maior frequência nas falhas de direção NW-SE e N-S. As falhas inversas relacionadas as intrusões das soleiras de diabásio podem gerar zonas de acúmulo de tensões compressivas, o que pode levar a problemas de estabilidade de teto e levantamento de piso.

A região carbonífera de Santa Catarina apresenta poucas informações sobre as características geotécnicas dos sistemas de falhas e fraturas que afetam a região. O conhecimento destes aspectos é importante e de grande auxílio para a mineração subterrânea de carvão.

2. Anexos



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
Pesquisas em Geociências

Porto Alegre, 25 de janeiro de 2017.

Ao
Thales Sebben Petry e colaboradores

Venho comunicar o recebimento do manuscrito listado, submetido para publicação em *Pesquisas em Geociências*, órgão de divulgação científica editado pelo Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Contudo, para dar prosseguimentos às atividades editoriais, é necessário realizar pequenos ajustes, necessitando, portanto, de nova submissão.

Utilizem o arquivo em anexo para contendo indicações das modificações solicitadas, para confecção de um novo arquivo.

Agradeço a seleção de *Pesquisas em Geociências* para a publicação de sua contribuição. Uma nova versão é aguardada até o dia 25/02/2017.

Manuscrito 656: Geologia estrutural aplicada a mineração subterrânea de carvão: Mina D, região de Araranguá, SC.
Autores: Thales Sebben Petry, Ruy Paulo Philipp & Clovis Gonzatti.

Atenciosamente,

Prof. Dr. Paulo Alves de Souza - Editor Chefe

Pesquisas em Geociências
Instituto de Geociências – Departamento de Paleontologia e Estratigrafia
Av. Bento Gonçalves, n° 9500 - Bloco 1 - Prédio 43127
CEP 91.540-000, Porto Alegre, RS, Brasil.
Email: paulo.alves.souza@ufrgs.br

Figura 5. Carta de submissão do artigo à revista *Pesquisas em Geociências*.

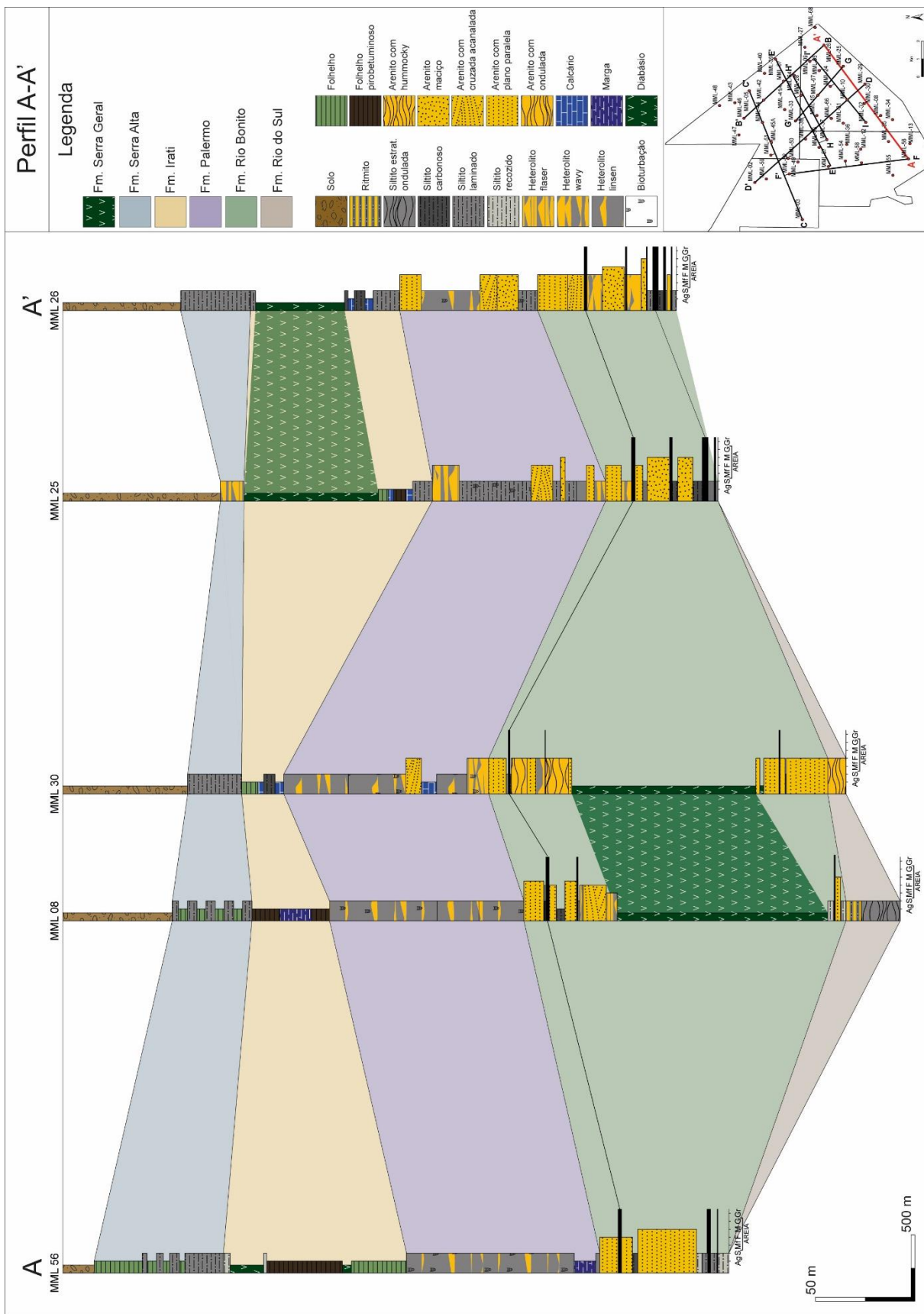


Figura 6. Seção geológica A-A'.

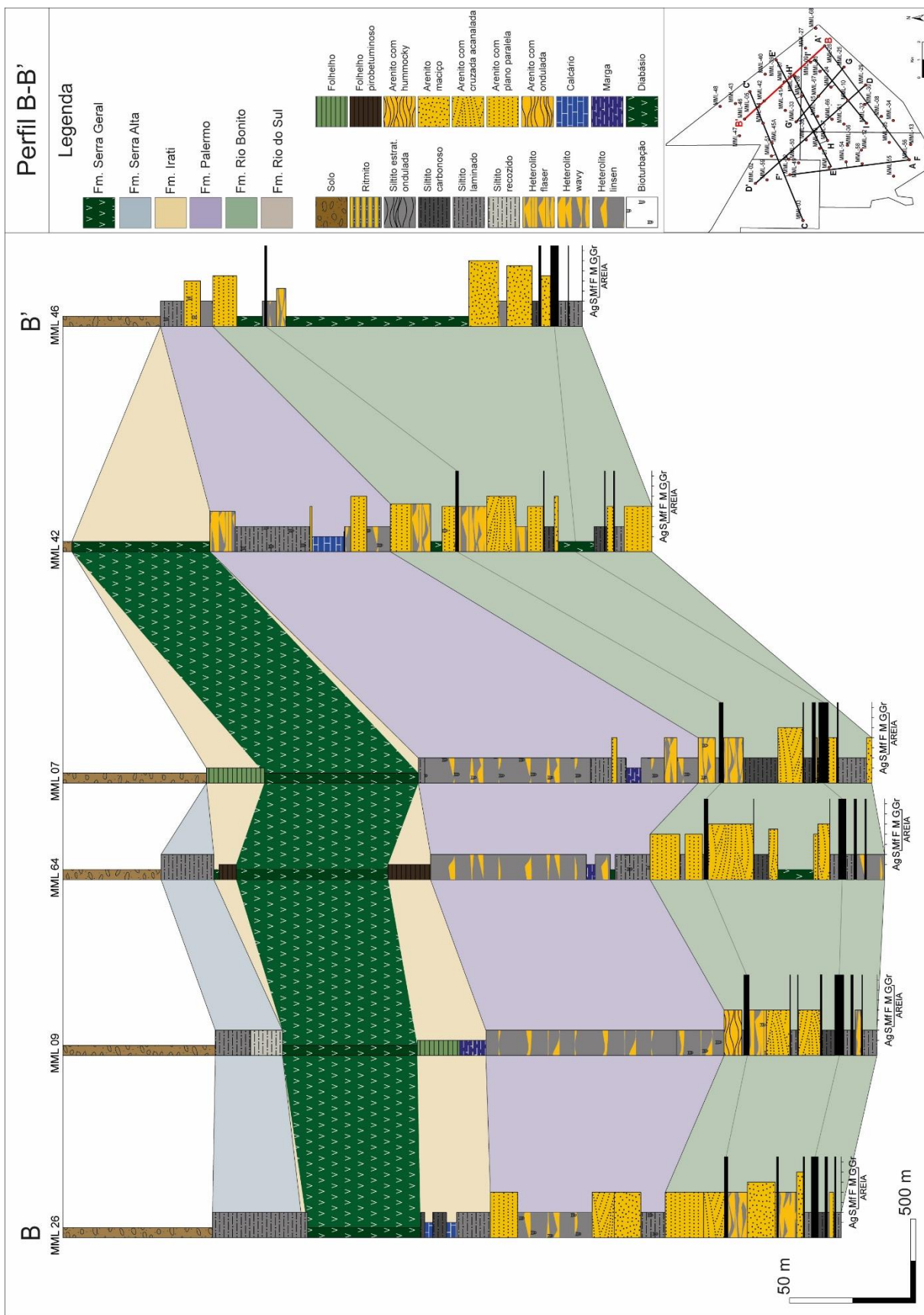


Figura 7. Seção geológica B-B'.

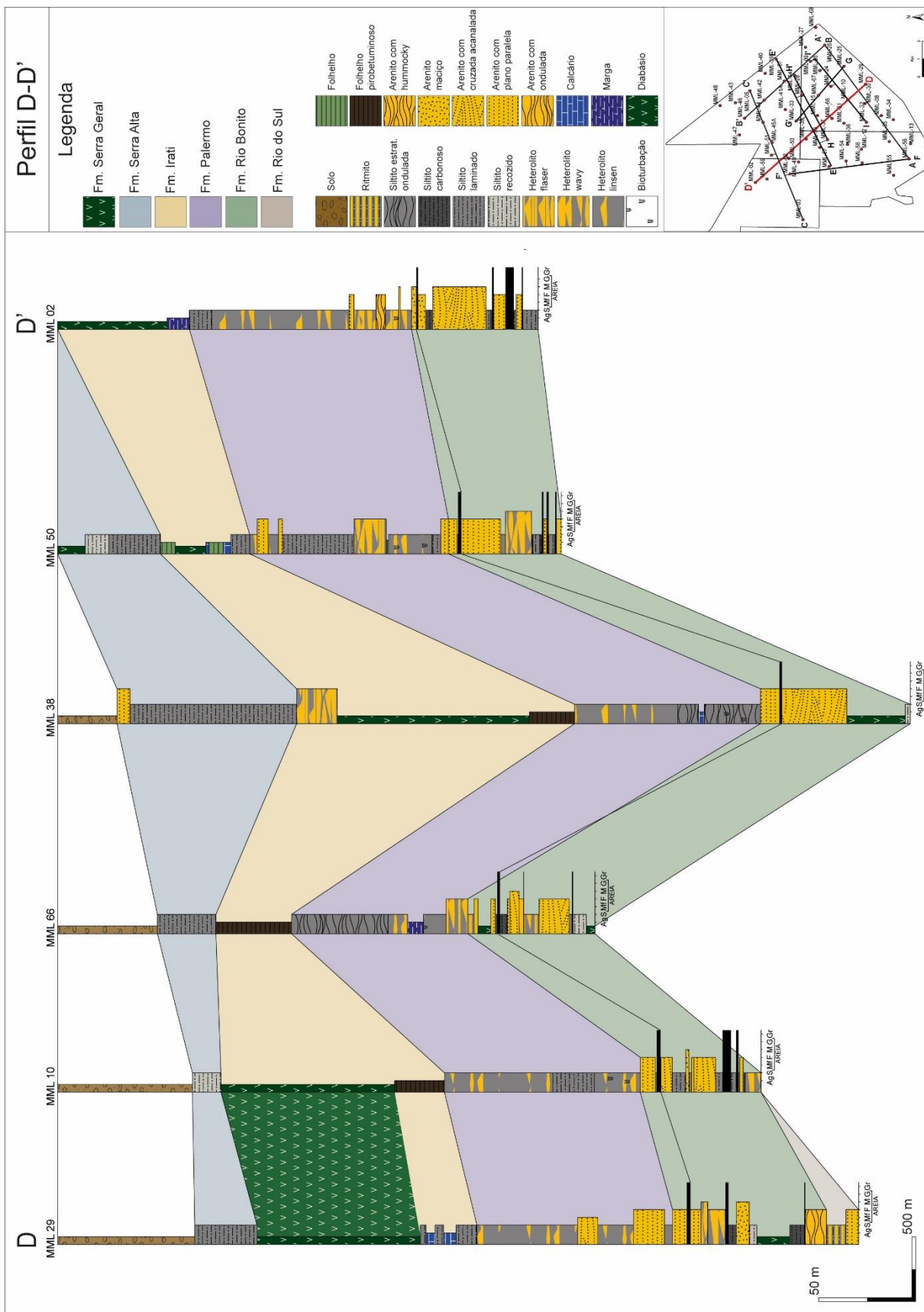


Figura 9. Seção geológica D-D'.

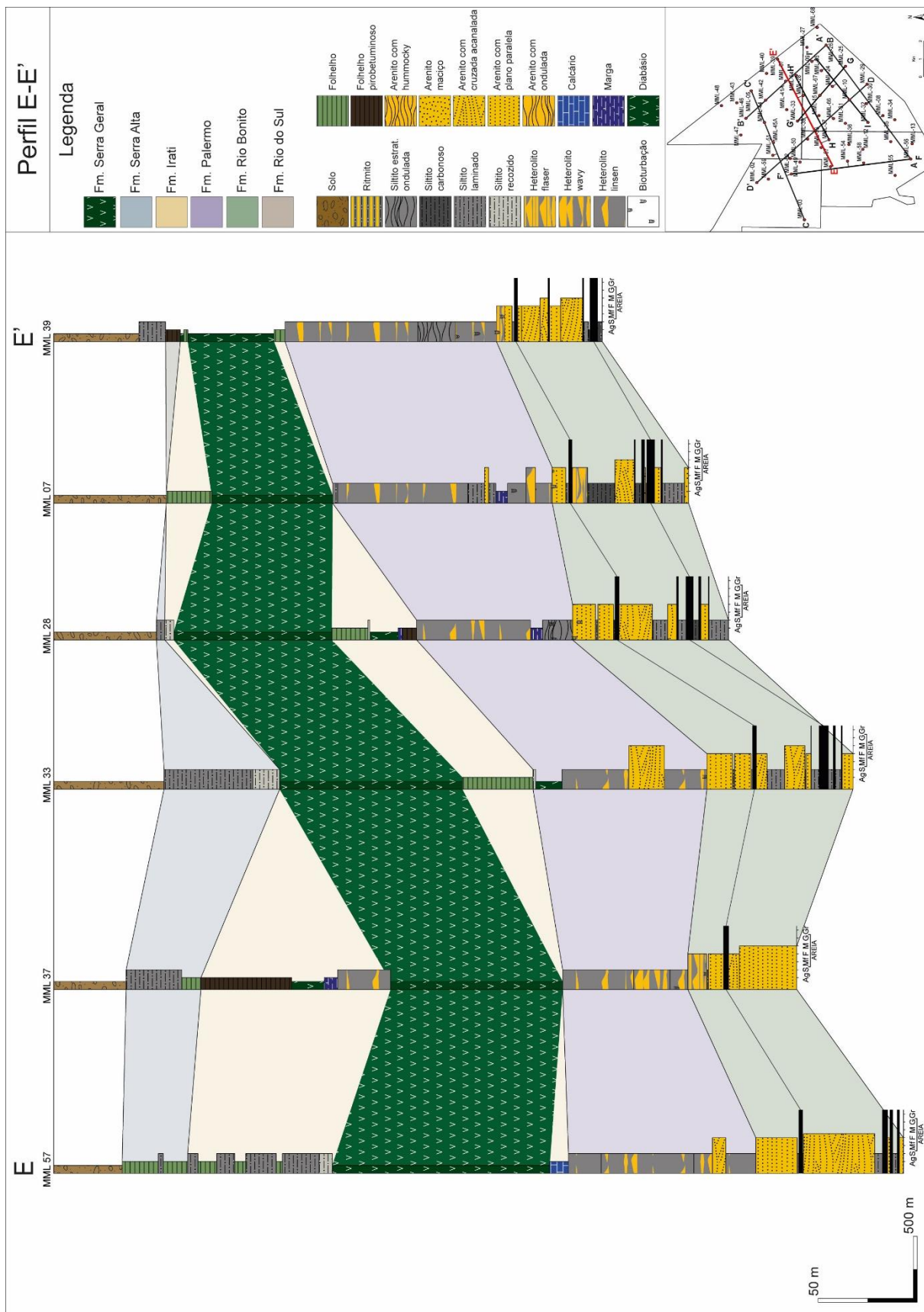


Figura 10. Seção geológica E-E'.

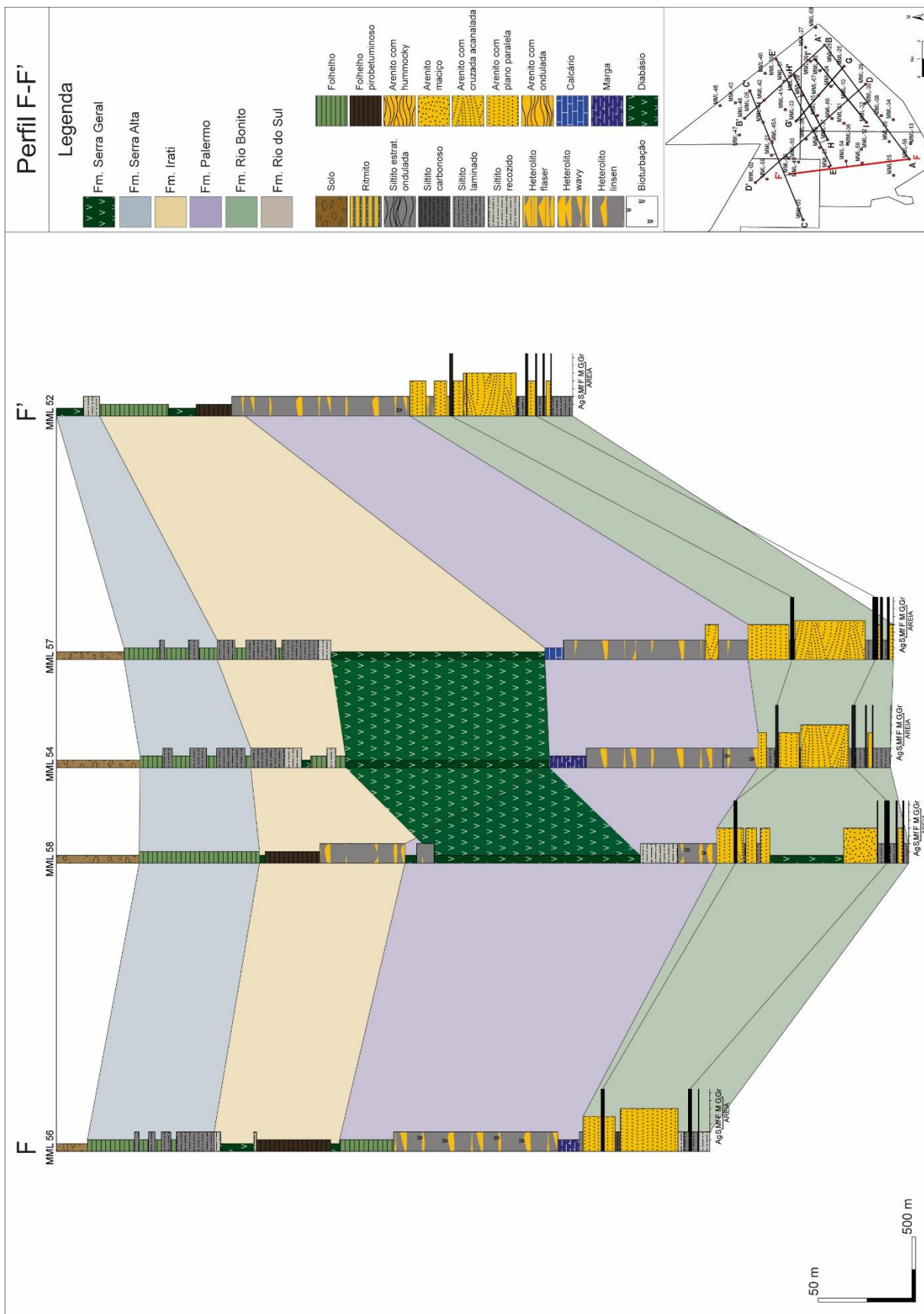


Figura 11. Seção geológica F-F'.

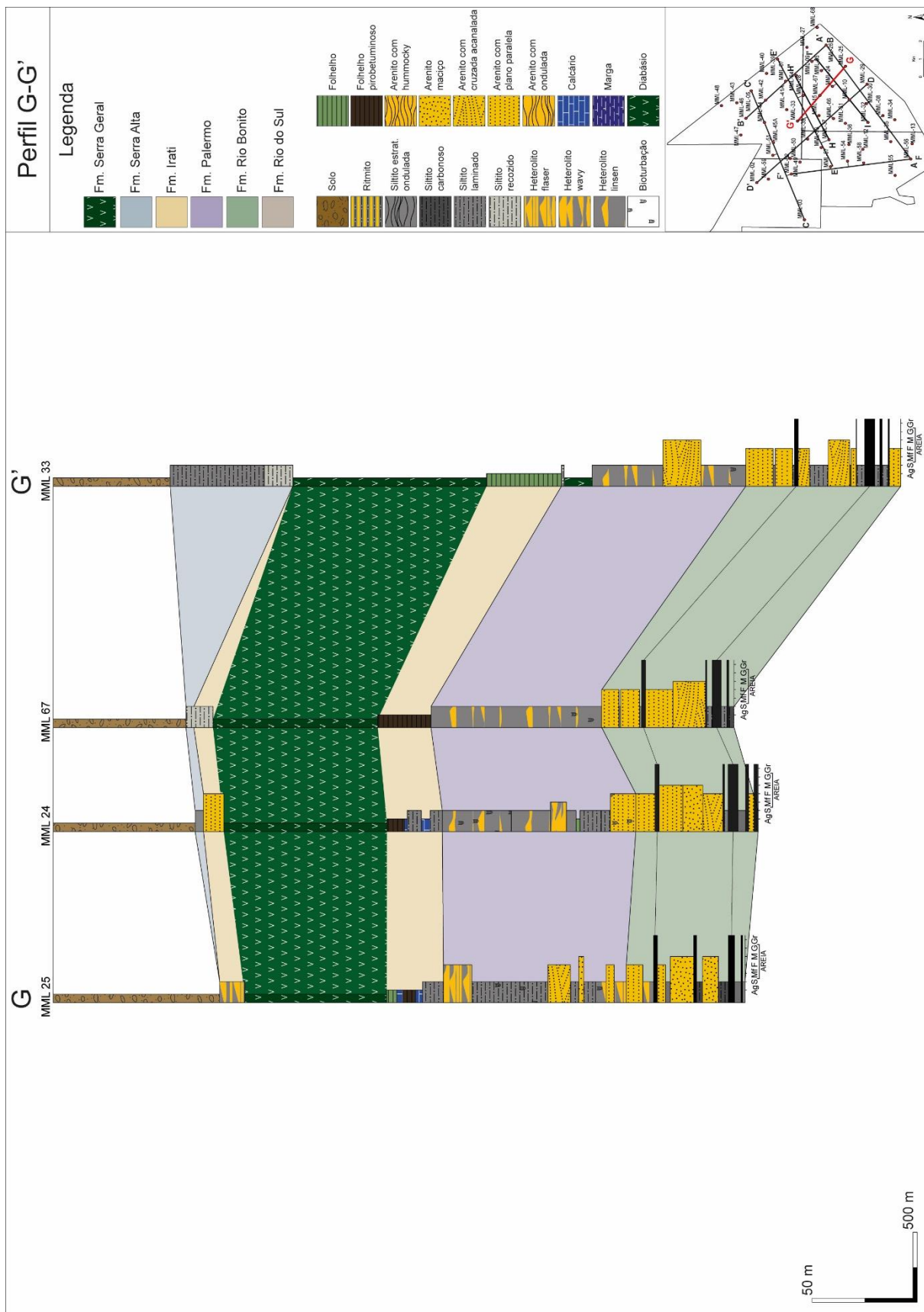


Figura 12. Seção geológica G-G'.

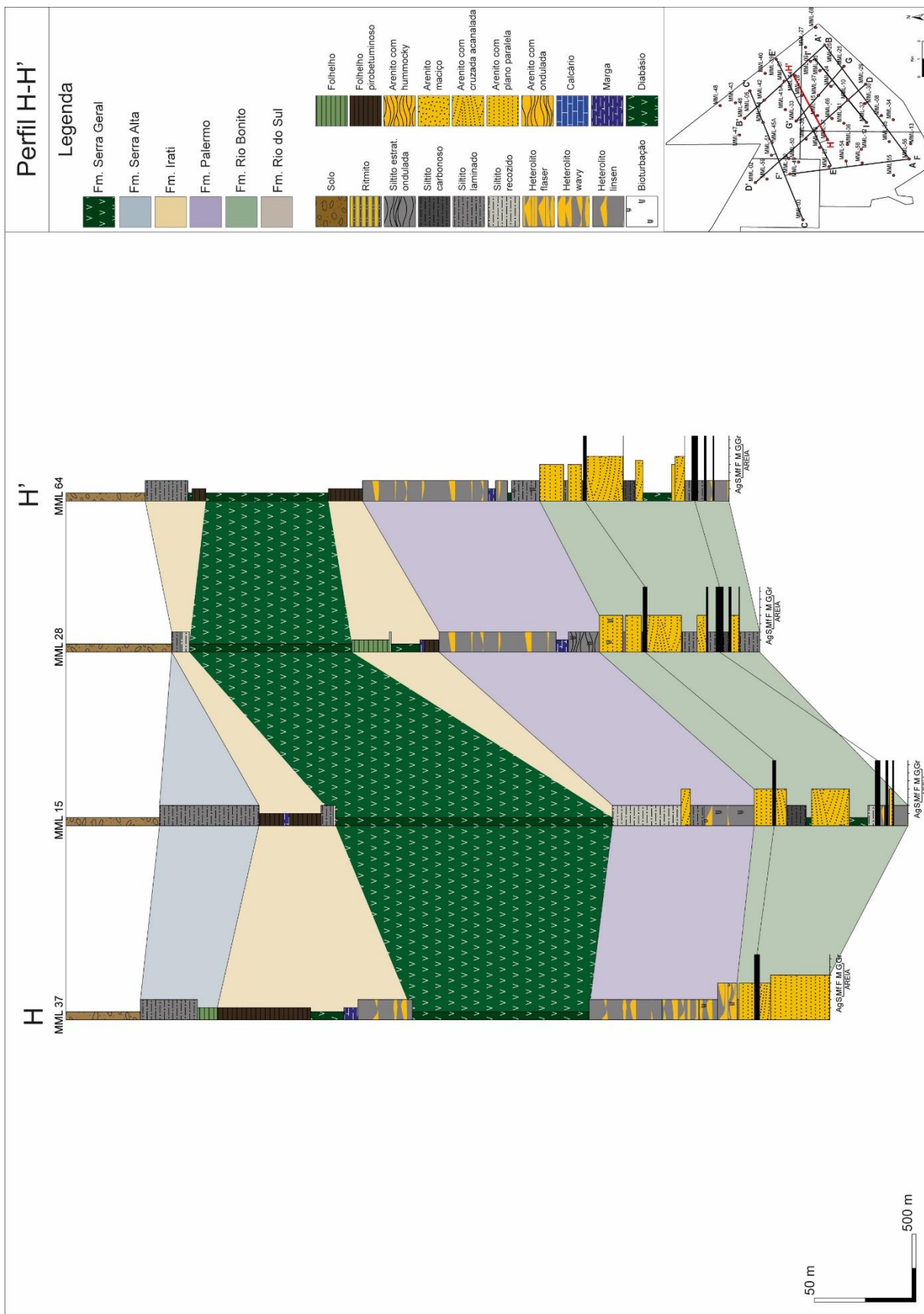


Figura 13. Seção geológica H-H'.

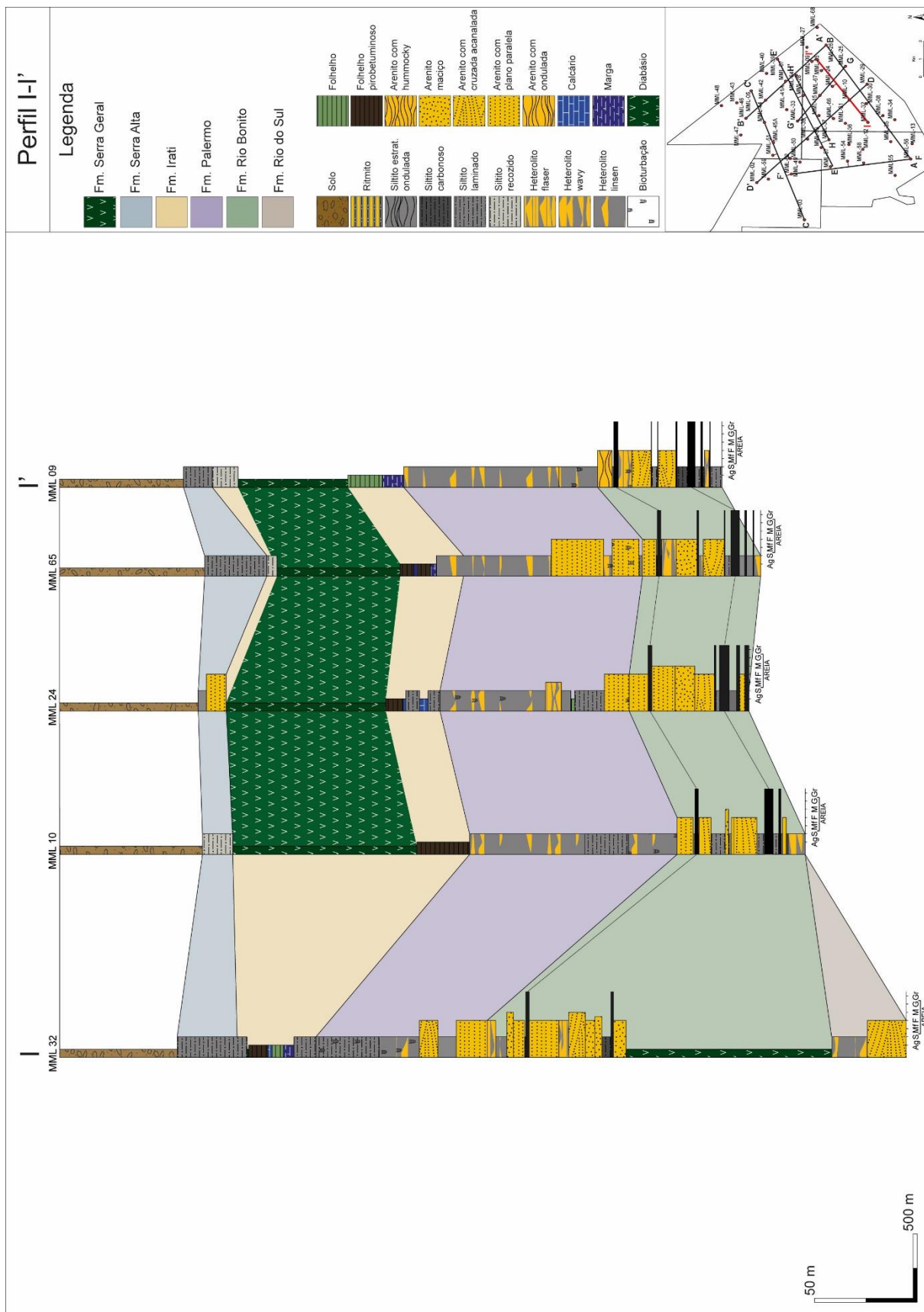


Figura 14. Seção geológica I-I'.