



Diques intermediários do setor norte - complexo intrusivo Lavras do Sul, RS: imagem ASTER e suscetibilidade magnética

R.P. Flores¹, M.C. Gastal², S.B.A. Rolin³, F.J.F. Ferreira⁴ & A.S.G. Carvalho⁵

1 Curso de Geologia, Instituto de Geociências, UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500. Porto Alegre, 91 501-970; georenan@hotmail.com

2 Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500. Porto Alegre, 91 501-970; maria.gastal@ufrgs.br.

3 Departamento de Geodésia, Instituto de Geociências, UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500. Porto Alegre, 91 501-970; silvia.rolin@ufrgs.br.

4 Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada, Departamento de Geologia, UFPR, caixa postal 19 001, Curitiba, PR, 81531-980; francisco.ferreira@ufpr.br.

5 Instituto de Geociências, UFRGS, bolsista BIC/PROPESQ. Av. Bento Gonçalves, 9500. Porto Alegre, 91 501-970; awilsacarvalho@hotmail.

Abstract We discuss some major structural features of the post-collisional Lavras do Sul intrusive complex (LSIC), formed during the Late Neoproterozoic in the Sul-Riograndense Shield. Textural patterns on ASTER image (VNIR, 321 color composition) and magnetic susceptibility data, compared with gravity and magnetic data, strengthen previous interpretations. This study provides an explanation for some large dipolar magnetic anomalies, such as that situated on the northern contact of LSIC and characterized by a superficial, semicircular magnetic lineament. Dykes swarms also occur along this contact zone. They include mainly andesites, and probably represent remnants of a precursory cone-sheet intrusion. The values of magnetic susceptibility show an abrupt increase in the rocks along this contact, with the maximum in country rocks. So, we conclude that this magnetic anomaly result from the thermal effect caused by intrusion.

Keywords: ASTER image, magnetic susceptibility, magnetic, gravity, Lavras do Sul intrusive complex.

O complexo intrusivo Lavras do Sul (CILS) congrega uma gama de granitóides cronocorrelatos a traquiandesitos da Formação Hilário, todos de idade neoproterozóica (606-586 Ma). O CILS é dividido em dois setores. No norte está o monzonito Tapera - MT, e o setor sul consiste no *pluton* granítico circundado parcialmente a norte-nordeste pelo monzodiorito Arroio do Jacques - MAJ (Fig. 1). As relações de campo, complementadas por dados de gravimetria e aeromagnetometria, revelam que essas são intrusões agregadas de um sistema vulcano-plutônico de subsidência, que teria evoluído de norte para sul (Gastal *et al.* 2006a). A natureza multi-intrusiva do CILS é confirmada pelas idades de cristalização disponíveis para diferentes litologias ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ e $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$). Entretanto, tais idades refletem história mais complexa para o CILS, envolvendo mais de um ciclo de subsidência-ressurgência (Gastal *et al.* 2005). No conjunto, observa-se também a mudança na composição de diques no sentido da evolução do complexo intrusivo. No setor norte, os diques incluem traquiandesito similar às lavas Hilário, quartzo monzonito e biotita-

clinopiroxênio andesito, e espessartito e riolito subordinados. No *pluton* granítico, os diques são bimodais com riolito-dacito e minetes. As mineralizações de Au-Cu estão concentradas em uma faixa de direção E-W a WNW-ESE, posicionada no centro do corpo principal do CILS, e que se estende por 5 km para leste no domínio da sequência vulcânica cronocorrelata (Fig. 1).

São apresentados, no presente trabalho, a imagem digital ASTER (VNIR, composição colorida 321) para a região, e os dados de suscetibilidade magnética para o setor norte do CILS. Os últimos são complementares ao trabalho desenvolvido no *pluton* granítico, detalhado em Gastal *et al.* (2006b). As informações apresentadas são comparadas aos dados gravimétricos e magnéticos (Gastal *et al.* 2006a; Ferreira *et al.* em preparação), visando discutir os aspectos estruturais e geológicos mais relevantes do complexo intrusivo. Maior ênfase é dada aos diques do setor norte, em face de sua importância na estruturação do sistema vulcano-plutônico de subsidência.

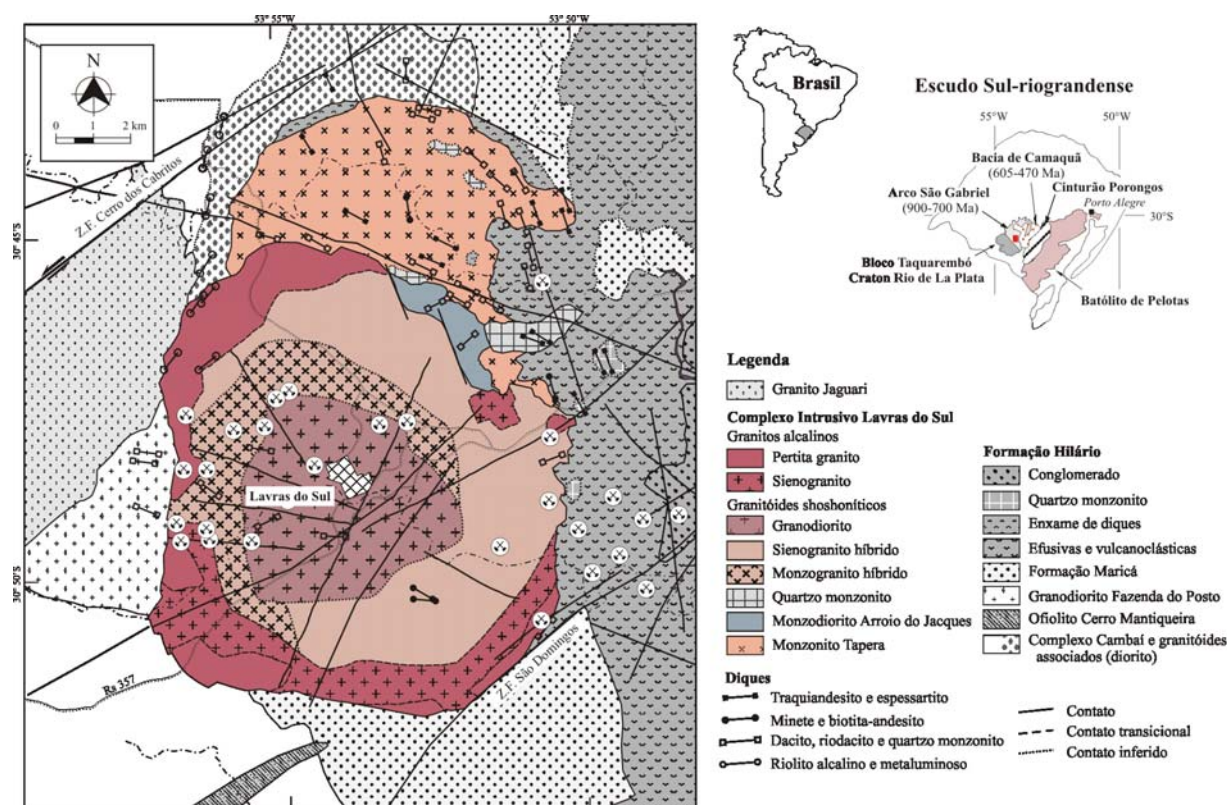


Figura 1. Mapa geológico do complexo intrusivo Lavras do Sul, exibindo a localização das principais minas de ouro inativas (Gastal et al. 2006a)

MATERIAIS E MÉTODOS O sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) registra imagens de alta-resolução (15 a 90 metros quadrados por pixel) em 14 comprimentos de onda do espectro eletromagnético, desde a região do visível até o infravermelho termal. Encontra-se a bordo da Plataforma TERRA, juntamente com outros sensores. Lançado pela NASA em 1999, como parte do programa *Earth Observing System* (EOS), o sensor ASTER é constituído de três subsistemas de telescópio distintos: VNIR (visível e infravermelho próximo - resolução espacial de 15 m), SWIR (infravermelho de ondas curtas - resolução de 30 m) e TIR (infravermelho termal resolução espacial de 90 m). Assim, esse sensor permite a obtenção de uma base cartográfica preservando aspectos texturais e espectrais, e a produção de imagens estereoscópicas e modelos digitais do terreno, na banda do infravermelho próximo. A imagem ASTER para a região do CILS foi georeferenciada no programa ENVI 4.0, tendo por base as cartas planialtimétricas, em escala 1:50.000, das folhas Arroio América e Lavras do Sul, as quais foram previamente digitalizadas e georeferenciadas no programa AutoCAD. É apresentada a base cartográfica ASTER

em composição colorida 321 (VNIR) para toda a região e setor norte do CILS, e o modelo digital do terreno-MDT para o último. O MDT, com precisão melhor que 30 m, foi gerado com o uso do algoritmo AsterDTM do ENVI 4.0, e integrado a uma composição colorida ASTER 321 (VNIR) por meio da técnica de fusão de imagens.

A suscetibilidade magnética – k é uma propriedade física intrínseca a uma substância (mineral, rocha, etc.) e reflete o grau segundo o qual essa pode ser magnetizada (Clark 1997). Representa a razão entre a magnetização – M ou I (densidade de fluxo magnético), e a força magnetizante – H (campo magnético indutor), qual seja: $k = M/H$ (sistema SI) e $k' = I/H$ (sistema CGS). A suscetibilidade magnética é adimensional, porém sua magnitude é distinta nos dois sistemas: $k = 4\pi k'$, sendo k referida em unidades SI. Para determinação de k em afloramento, utilizou-se o suscetibilímetro KT-3 (*Exploranium Radiation Detection Systems*), que opera com um campo magnético de baixa intensidade (0,1 mT) e cuja resolução é de $0,02 \cdot 10^{-3}$ SI. Foram efetuadas entre 8 e 10 medidas por afloramento, obedecendo a uma malha de cerca de 1 km por 1 km. As correções devidas à rugosidade da superfície do afloramento foram



efetuadas, e a partir das médias por afloramento foram traçadas as curvas de contorno.

GEOLOGIA E PRINCIPAIS ESTRUTURAS DO COMPLEXO INTRUSIVO O CILS é um corpo com dimensões de 12 x 17 km, alongado segundo direção N-S (Fig. 1). A oeste-sudoeste e norte-noroeste, as unidades do CILS cortam ortognaisses e granitóides pré- e sin-tectônicos, formados durante a orogênese São Gabriel (900-700 Ma), e as formações basais da Bacia de Camaquã (606-470 Ma): arenitos Maricá a sul-sudeste e nordeste, e seqüência vulcânica Hilário a leste. Granitóides e gnaisses situados a norte-noroeste do CILS foram separados em tonalitos sin-tectônicos e dioritos e gnaisses pré-tectônicos, para os quais foram conferidas designações específicas (UFRGS 2003). Entretanto, para simplificar, é mostrada no mapa geológico apenas a área de dominância de dioritos e gnaisses máficos ocorrentes nessa região (Fig. 1).

Os padrões texturais da imagem ASTER corroboram a subdivisão de fácies proposta para o CILS, havendo boa concordância com o traçado dos contatos como mostrado na figura 2A. Além disso, são realçadas as principais estruturas também reveladas pelos dados aeromagnetométricos e gravimétricos (Figs. 2B-D), as quais são relacionadas a seguir:

1) dois sistemas de falhas de direção NE-SW que balizam os limites do complexo intrusivo a noroeste e sudeste, respectivamente Cerro dos Cabritos e São Domingos (Fig. 1). Essas são evidenciadas por estruturas magnéticas bidimensionais (Fig. 2C), que tem continuidade em profundidade (Ferreira *et al.* em preparação);

2) a zona de falha de direção NE-SW que secciona diagonalmente a porção central do *pluton* granítico, também evidenciada pelos dados magnéticos (Fig. 2C), tem menor expressão superficial.

3) no *pluton* granítico, são marcantes os lineamentos de direção E-W a ESE-WNW, e NW-SE subordinados, que confere um padrão radial discreto. Tais lineamentos parecem traduzir um sistema de fraturas mais superficiais, segundo os quais estão alojadas as principais ocorrências de Au. Entretanto, os lineamentos de direção E-W são coincidentes, em linhas gerais, com a zona de fraturas mais profunda marcada pelo alinhamento dos baixos gravimétricos 3-4 (Fig. 2B), a qual teria atuado como conduto para os magmas graníticos;

4) a zona de falha de direção WNW-ESE, que marca a separação entre os dois setores do CILS (norte – MT, e sul – *pluton* granítico e MAJ), está bem evidenciada na imagem ASTER pela maior densidade de lineamentos no domínio do MT (Figs. 2A e 3A). Essa zona de falha é caracterizada por estrutura magnética bidimensional de menor amplitude, que é bem caracterizada em profundidade (Ferreira *et al.* em preparação). Nos níveis superficiais, essa é interrompida e deslocada pelos lineamentos de direção NE-SW e N-S (Figs. 2C-D), como também evidenciado na imagem ASTER. Segundo essa estrutura, estão alojados inúmeros diques de andesito, quartzo monzonito e riolito, e

5) padrão semicircular do contato norte do CILS, onde ocorrem importantes enxames de diques (Fig. 1). Esse contato é marcado por anomalia magnética bipolar de grande amplitude (I – Fig. 2C), que exibe um padrão semicircular perfeito nos níveis superficiais (Fig. 2D). Como discutido em Ferreira *et al.* (em preparação), essa anomalia magnética torna-se mais estreita e deslocada para sul, o que permite inferir forma cônica em profundidade para o setor norte do complexo intrusivo. O padrão semicircular está bem caracterizado no mapa de contorno de suscetibilidade magnética-k medida em afloramento (Fig. 3), discutido a seguir.

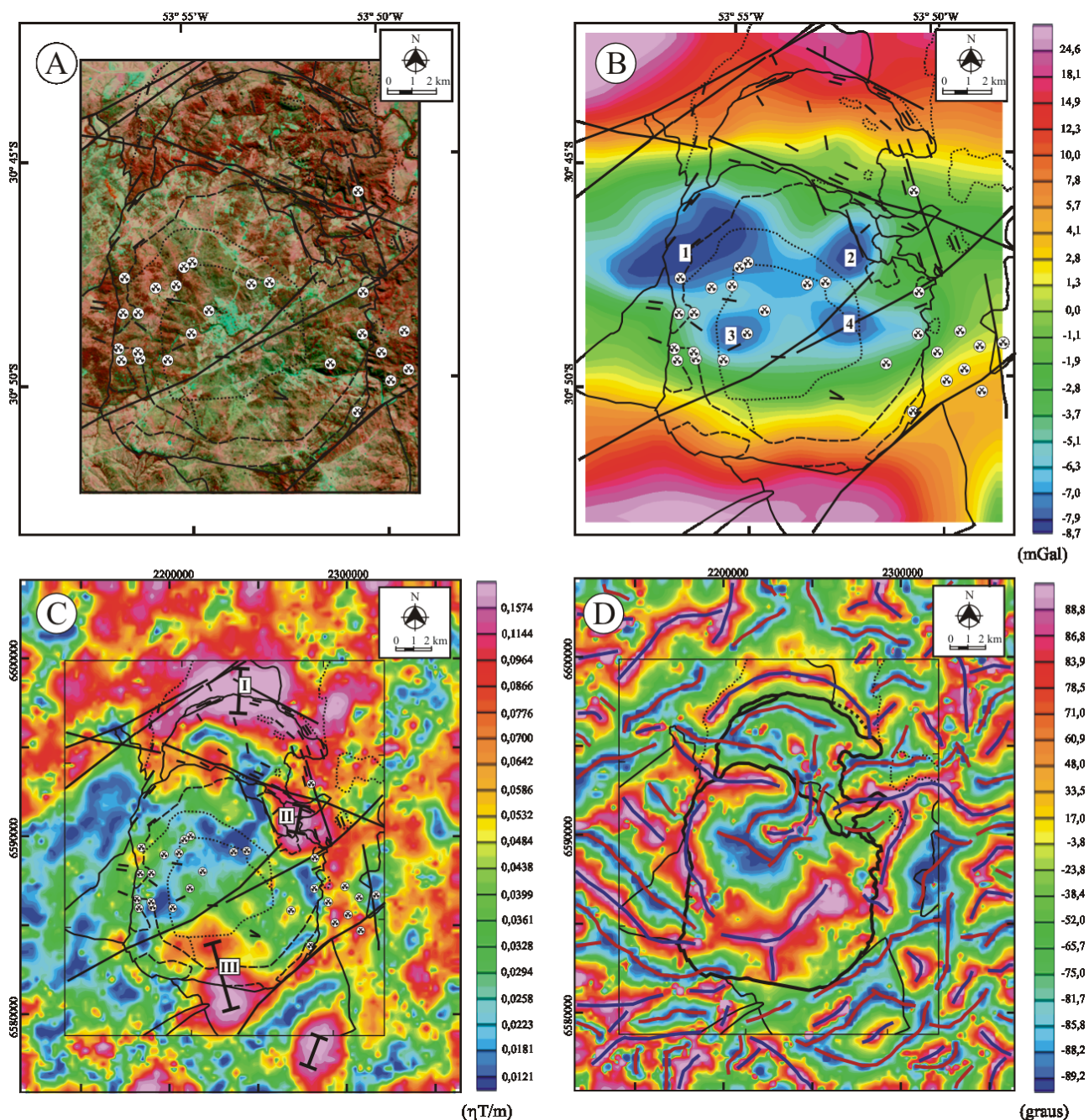


Figura 2. A - Imagem ASTER (VNIR, composição colorida 321) para a região do complexo intrusivo comparada a dados residuais gravimétricos mostrados em B, e aeromagnetométricos em C-D (Gastal et al., 2006a; dados magnéticos originais de Jackson et al., 1973). B - Mapa gravimétrico residual, realçando os principais baixos gravimétricos ($< -7,9$ mGal) no centro do pluton granítico (numerados de 1 a 4). C - Mapa magnético da amplitude do sinal analítico, que realça o posicionamento das principais anomalias magnéticas positivas ao longo do contato do CILS (I a III, barra salienta o eixo das anomalias). D - Mapa magnético da fase do sinal analítico, que salienta as estruturas rasas (principais lineamentos magnéticos: azul – altos e vermelho – baixos). Em A-C, os mapas estão sobrepostos com o contorno das unidades geológicas, diques e minas de Au-Cu inativas, como mostrado na figura 1; e em D, os detalhes são retirados

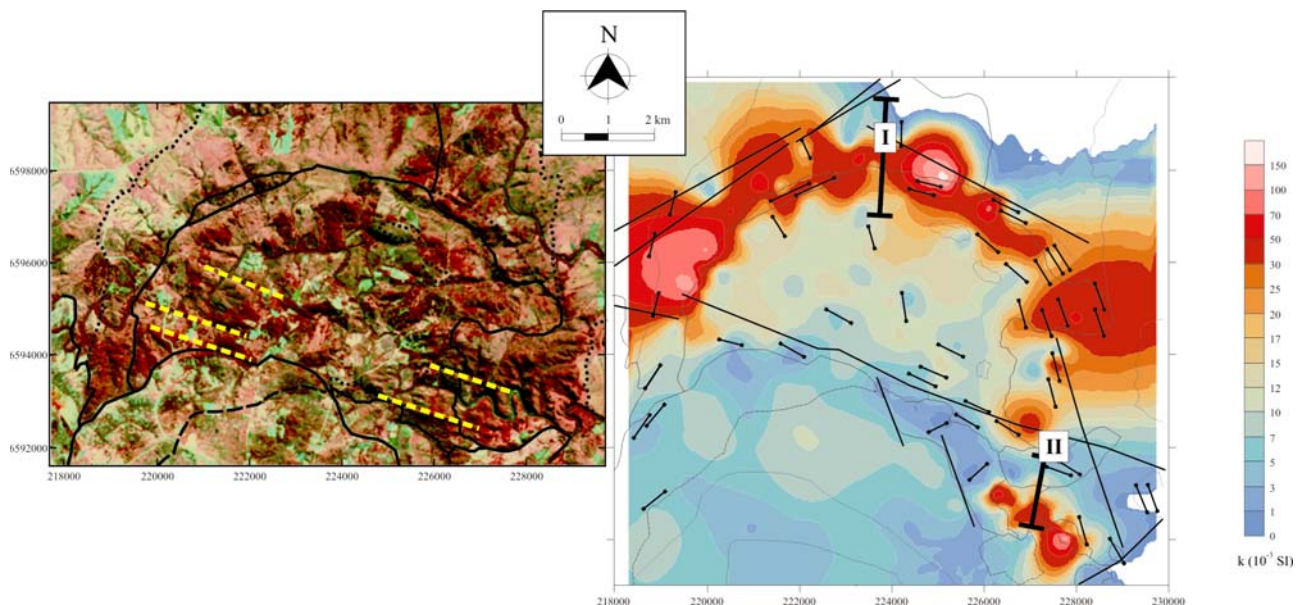


Figura 3. Imagem ASTER (VNIR, composição colorida 321) a esquerda, e mapa de contorno de suscetibilidade magnética- k medida em afloramento (direita) do setor norte do complexo intrusivo Lavras do Sul, ambos sobrepostos com o contorno das unidades litológicas mostrado na figura 1. Na imagem, linha pontilhada amarela realça os principais lineamentos de direção WNW-ESE, e no mapa de contorno de k são mostradas as principais estruturas e diques (Fig. 1) e o posicionamento das duas anomalias magnéticas dipolares (Fig. 2C). A continuidade nos altos de suscetibilidade magnética para leste e oeste deve ser vista com cautela, dada a insuficiência de pontos nessas regiões

SETOR NORTE – COMPLEXO INTRUSIVO

Geologia O setor norte do CILS, representado pelo monzonito Tapera – MT tem forma de meia-laranja em planta, com dimensões de 8 km por 4 km. Em profundidade esse corpo é pouco espesso (≤ 2 km), estando marcado por forte gradiente nas anomalias Bouguer que aumentam de sul para norte, até um alto gravimétrico situado no domínio dos gnaisses encaixantes (Ferreira *et al.* em preparação). O MT é constituído por quartzo monzonito, monzonito, monzodiorito e diorito, os quais exibem zonalidade normal (Lima 1995, UFRGS 2003). O diorito ocorre em lentes descontínuas preferencialmente associadas aos enxames de diques. Exibe foliação magmática paralela aos limites do corpo, dada pelo alinhamento dimensional de plagioclásio. A leste-sudeste, o diorito é intrusivo nas lavas traquiandesíticas, contendo xenólitos dessas. Monzonito e monzodiorito, mais isotrópicos, são os termos dominantes na porção central da intrusão. Esses são seccionados por *stocks*, diques e apófises de quartzo monzonito porfirítico. O contato entre monzonito e quartzo monzonito é brusco ou transicional, de modo que o último pode representar os termos evoluídos do MT.

A noroeste e a nordeste, enxames de diques, com espessura de 200 a 500 m, marcam o contato do corpo

(Fig. 1). Esses incluem clinopiroxênio feno-andesito, feno-andesito e diorito/quartzo-diorito, e são seccionados pelos monzonitos. Nos enxames de diques, ocorre a gradação dos tipos petrográficos da borda para o interior, com Cpx feno-andesitos na porção externa e dioritos próximo ao contato com o MT. Os últimos são isotrópicos, possuem textura seriada fina a média e exibem feições de hibridismo marcantes. Portanto, são perfeitamente distintos dos dioritos posicionados na borda do MT. Os Cpx feno-andesitos exibem matriz criptocristalina a vítrea, com heterogeneidades atribuídas a fluidização ao longo de fraturas com a formação localizada de tufisitos. Nesses, são também frequentes faixas com abundantes amígdalas preenchidas por mica branca e clorita. Os feno-andesitos são os tipos dominantes nos enxames de diques e, nesses, as variedades texturais estão relacionadas à abundância e granulação dos fenocristais de Pl. No interior do MT, predominam os diques de feno-andesito, riolito e quartzo monzonito e, mais raramente, ocorrem diques de biotita-Cpx feno-andesitos e lamprófiros (espessartito/camptonito).

Suscetibilidade magnética Os valores médios de suscetibilidade para as diferentes litologias do setor norte do CILS e encaixantes imediatas, consideradas



na construção do mapa de contorno (Fig. 3B), são apresentados na tabela 1.

Unidade/fácies	k (10 ⁻³ SI)	
	Média (1σ)	nº pto.
1. Complexo Intrusivo Lavras do Sul		
Granitos alcalinos		
Pertita granito	9,44 ± 1,78	
Equigranular	9,64 ± 1,89	12
Seriado	9,15 ± 1,66	9
Sienogranito	9,83 ± 1,48	13
Granitos do núcleo		
Híbridos	6,87 ± 2,19	
Sienogranito	7,95 ± 1,74	37
Monzogranito	4,87 ± 1,41	20
Granodioritos	4,15 ± 1,31	
Seriado	3,99 ± 1,27	12
Porfiritico	4,33 ± 1,40	10
Monzodiorito Arroio do Jacques		
Diorito a monzodiorito	2,28 ± 1,35	22
Cornubianito	51,32 ± 30,30	17
Quartzo monzonito		
Fácies grossa a fina	3,33 ± 2,08	17
Fácies de borda	21,21 ± 23,65	16
Monzonito Tapera		
Monzodiorito a monzonito	14,99 ± 5,65	61
Diorito - borda	43,08 ± 6,94	10
Diques Norte		
Tipo- I	26,14 ± 26,10	5
Tipo-II	25,62 ± 11,69	4
Tipo-III	7,91 ± 5,44	5
Tipo-IV	27,79 ± 11,89	15
Tipo-V	1,15 ± 1,90	8
2. Formação Hilário		
Efusivas	18,10 ± 11,27	11
Tufos	25,65 ± 14,80	11
3. Encaixantes - norte		
Tonalitos	13,57 ± 4,42	2
Dioritos e metamáficas	52,38 ± 42,22	22
Meta-andesitos	1,20 ± 0,02	3

Tipos petrográficos – diques: I – Cpx feno-andesitos, II – dioritos, III – rochas lamprofíricas, IV – feno-andesitos e V – riolitos.

Tabela 1. Valores médios de suscetibilidade magnética-k medida em afloramento para rochas da região norte do complexo intrusivo Lavras do Sul.

No MT e efusivas Hilário, os valores médios de k ao redor de 18 10⁻³ SI são superiores aos dos granitos situados a sul (< 10 10⁻³ SI). O monzodiorito Arroio do Jacques, situado entre os dois setores do CILS, exibe valores extremamente baixos de k (~2,3 10⁻³ SI). Desse modo, a separação dos dois setores está bem evidenciada no mapa de contorno (Fig. 3B). No interior do MT, os valores médios de k não variam muito, estando as diferenças associadas à ocorrência de diques diversos e quartzo monzonitos, ou a zonas de fraturamento mais intenso. Porém, os valores crescem substancialmente nas zonas de contato no norte-noroeste. Os diques posicionados ao longo desse contato também exibem valores elevados de k (20-40 10⁻³ SI), porém valores extremos (~40 a > 120 10⁻³ SI) caracterizam as encaixantes imediatas, em sua maioria, constituídas por rochas metamáficas. Os valores médios de k definem um alto importante que tem um padrão semicircular coincidente com a expressão superficial da anomalia magnética dipolar I (Fig. 2D) e com as feições morfológicas realçadas na imagem ASTER (Fig. 2A). Isto leva a conclusão de que os efeitos termais nas encaixantes ocasionados pelo posicionamento de enxames de diques e MT, ao longo do contato norte, são os responsáveis pela anomalia magnética I. Conclusão similar pode ser aventada para a anomalia magnética II, posicionada no centro do CILS, no contato do MT-MAJ com os granitos do setor sul, onde são frequentes os cornubianitos (Martil & Gastal 2006).

CONSIDERAÇÕES FINAIS Os padrões da imagem ASTER e os dados de suscetibilidade magnética corroboram as interpretações prévias sobre a estruturação do complexo intrusivo. O conjunto de informações disponíveis revela a importância dos enxames de diques intermediários na formação do setor norte, constituído pelo monzonito Tapera. As variações petrográficas nesses enxames sugerem que os mesmos representem importantes condutos precursores do vulcanismo cronocorrelato.

Agradecimentos Este trabalho foi financiado com os auxílios de pesquisa FAPERGS nº 00/2366-3 e 03/0321-3, e PRONEX/CPGQ/UFRGS (nº 662179978). Somos gratos ao colega Rafael G. Frizzo (BIC/FAPERGS 02/50586.1) por sua colaboração durante os trabalhos de campo.

Referências

- CLARK D.A. 1997. Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys. *AGSO J. Austr. Geol. Geophys.*, **17**(2):83-103.
- GASTAL M.C.P., TEIXEIRA W., LAFON J.M., REMUS M.V.D. 2005. Geocronologia ⁴⁰Ar-³⁹Ar, ²⁰⁷Pb-²⁰⁶Pb e ²⁰⁷Pb-²³⁸U do complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS. In: Simp. Vulc. e ambientes associados, 3, Cabo Frio, Anais, p. 83-88.
- GASTAL M.C.P., LAFON J.M., FERREIRA F.J.F., MAGRO F.U.S., REMUS M.V.D., SOMMER C.A.



- 2006a. Reinterpretação do Complexo Intrusivo Lavras do Sul – RS, de acordo com os sistemas vulcano-plutônicos de subsidência. Parte I: Geologia, geofísica e geocronologia ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ e $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$). *Rev. Bras. Geoc.*, no prelo.
- JACKSON V.N., RAMOS V.A, TERRY S.A, ZUZEK A B. 1973. *Projeto Aerogeofísico Camaquã, estado do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, Texas Instruments, DNPM/CPRM/ CENEN, 208p.(inédito).
- GASTAL M.C., FERNANDES G.A., FERREIRA F.J.F., FRIZZO R.G. 2006b. Zonalidade reversa dos granitos do Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS: Petrografia, suscetibilidade magnética e óxidos de Fe-Ti. *Rev. Bras. Geoc.*, no prelo.
- LIMA E.F. de 1995. *Petrologia das rochas vulcânicas e hipoabissais da Associação Shoshonítica de Lavras do Sul, RS*. Tese de Doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 338p.
- MARTIL M.M.D. & GASTAL M.C.P. 2006. Geologia e petrografia do monzodiorito Arroio do Jacques, complexo intrusivo Lavras do Sul, RS. In: Cong. Bras. Geol., 43, Aracaju, submetido.
- UFRGS. 2003. *Mapeamento de parte da folha Arroio América (1:50.000)*. Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 60p.