

1762550



Estudo Re-Os dos basaltos continentais de alto Ti da Bacia do Paraná, Brasil

J.D. Kirk¹, C.T. Correia¹, A.J.R. Nardy², C.C.G. Tassinari¹, V.A.V. Girardi¹ & L.A. Petronillo¹

¹ Depto. de Mineralogia e Geotectônica, Instituto de Geociências - USP, Rua do Lago, 562, 05508-900, São Paulo, SP, Brasil. gmggc@usp.br

² Depto. de Petrologia e Metalogenia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas - UNESP, Av. 24, 1515, CEP 13500-230, Rio Claro, SP, Brasil. nardy@rc.usnesp.br

ABSTRACT The Re-Os isotopic systematics of Urubici-type and Paranapanema-type High-Ti flood basalts of the Paraná Basin of Brazil were investigated. These samples represent some of the least contaminated basalts in the region and therefore offer the best opportunity for examining the potential sources for these magmas. For both HI-34 (Urubici) and KNJ-161 (Paranapanema) samples, different fractions of the same whole rock powders exhibit a spread in Re and Os concentrations as well as Re/Os ratios and indicate both samples are of the same age and derived from the same source reservoir, within error. Together both samples yield an age of approximately 131 Ma, consistent with other isotopic systems, and coincident with the age of maximum eruption rates within the Paraná Basin. An initial ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os ratio of approximately 0.133 does not give a unique solution for the source reservoir, but suggests direct derivation from a plume source or contamination of a Sub-Continental Lithospheric Mantle (SCLM) derived magma by crustal assimilation limited to 1-2%.

Keywords: Re-Os, flood basalt, Paraná Basin, geochemistry, geochronology.

CONTEXTO GEOLÓGICO A Província Magmática do Paraná-Etendeka corresponde na América do Sul aos derrames de lavas da formação Serra Geral e as rochas intrusivas associadas (diques e sills) que no conjunto recobrem cerca de 75% da superfície total da Bacia do Paraná (cerca de 1.200.000 km²), ocupando um volume da ordem de 800.000 km³, dos quais 98% são representados por basaltos e o restante por rochas mais diferenciadas, andesitos, riolitos e riolitos. Na África essa província está representada pelos toleitos das Bacias de Kwanza e Namibe em Angola.

Classificada entre as grandes províncias ígneas continentais (PIC) caracterizadas por derrames de magmatismo efusivo básico de natureza toleítica, a fonte envolvida na sua formação é o manto terrestre. A estreita correlação temporal, entre a formação das PIC e subsequente fragmentação continental, tem sido objeto de pesquisas que procuram estabelecer relações causais entre os processos geodinâmicos envolvidos, as fontes mantélicas relacionadas, a instalação da província e a subsequente fragmentação continental.

Um número considerável de datações radiométricas (⁴⁰Ar/³⁹Ar), nos basaltos da Província Paraná revelou que o evento vulcânico principal deva ter ocorrido entre 128-136 Ma, e que seu período de duração não deva ter se estendido por mais de alguns poucos milhões de anos (Renne *et al.* 1992, Ernesto *et*

al. 1999, Stewart *et al.* 1996). Segundo esses autores, o magmatismo que afetou a Bacia do Paraná precedeu em cerca de 5 Ma a ruptura do Gondwana e a abertura do Atlântico Sul.

Por meio de dados geoquímicos, dois grandes grupos dessas rochas podem ser reconhecidos e denominados de alto e baixo titânio, para valores em TiO₂ respectivamente acima ou abaixo da fronteira ao redor de 2%. De maneira geral, esses grupos não ocorrem dispostos aleatoriamente na Província Magmática do Paraná, mas sim em latitudes inferiores e superiores a 26° caracterizando, respectivamente, as regiões sul e norte dessa província (Fig. 1). Esses dois grupos de rochas podem, ainda, ser subdivididos em vários outros. Seguindo os critérios adotados por Peate *et al.* (1992) o grupo alto em titânio é representado pelos subgrupos Urubici (TiO₂>3,3%; Sr>550; Ti/Y>500; Zr/Y>6,5), Pitanga (TiO₂>2,9%; Sr>350; Ti/Y>500, Zr/Y>5,5%) e Paranapanema (1,7<TiO₂<3,2%; 200<Sr<450; Ti/Y>330, 4<Zr/Y<7), enquanto o grupo baixo em titânio é representado pelos subgrupos Gramado (0,75<TiO₂<1,9%; 140<Sr<400; Ti/Y<300; 3,5<Zr/Y<6,5), Esmeralda (1,1<TiO₂<2,3%; 120<Sr<250; Ti/Y<330; 2<Zr/Y<5) e Ribeira (1,5<TiO₂<2,3%; 200<Sr<375; Ti/Y>300; 3,5<Zr/Y<7).



Figura 1. Mapa esquemático com a distribuição dos diferentes subgrupos dos tipos geoquímicos de magmas básicos na Bacia do Paraná: I Parapanema e Pitanga, II Urubici, III Esmeralda, IV Gramado e V Ribeira. Subgrupos I e II correspondem ao grupo alto em Ti (Ati) e os Subgrupos III, IV e V constituem o grupo baixo em Ti (Bti).

Dados isotópicos de Sr de Picirillo *et al.* (1989), Peate *et al.* (1992, 1999), Marques *et al.* (1999), Peate & Hawkesworth (1996) mostram que os basaltos da região sul da Província Magmática do Paraná foram fortemente afetados por processos de contaminação crustal. Nessa região ocorrem predominantemente basaltos do subgrupo Gramado com razões iniciais de Sr ($Sr_i = ^{87}Sr/^{86}Sr$) variando entre 0,7075 e 0,7167. As razões de Nd medidas ($Nd_m = ^{144}Nd/^{143}Nd$) situam-se no intervalo de 0,5128 e 0,5122 e as de Pb medidas ($^{206}Pb/^{204}Pb_m$) variam entre 18,33 e 18,90. Os basaltos do subgrupo Esmeralda apresentam valores mais baixos de $Sr_i = 0,7046$ e $0,7086$, seguidos também pelo $Nd_m = 0,5126$ e $0,5124$ e $Pb_m = 18,6$ a $18,8$. Localizadamente nessa região também ocorre, de modo mais restrito, basaltos do subgrupo Urubici de alto Ti, que apresentam intervalos de razões isotópicas bem mais restritos, com $Sr_i = 0,7046$ a $0,7066$ e $Nd_m = 0,5125$ a $0,5123$, $Pb_m = 15,46$ e $15,58$, que correspondem aos menos contaminados da Bacia.

A região norte da Província Magmática do Paraná é caracterizada quase que exclusivamente pela presença de basaltos do tipo alto titânio dos subgrupos Pitanga e Parapanema, com razões isotópicas variando em intervalos bastante restritos e próximos entre si, com $Sr_i = 0,7058 - 0,7062$, $Nd_m = 0,5124 - 0,5123$ e $Pb_m = 15,52 - 15,54$, evidenciando pequena influência de processos de contaminação crustal.

Nessa região, em áreas muito restritas, ocorre a presença de basaltos baixos em titânio, do subgrupo Ribeira, que a exemplo das rochas do grupo alto em titânio da região, mostram estreita variação nas composições isotópicas com $Sr_i = 0,7055 - 0,7059$; $Nd_m = 0,5125$ e $0,5124$ e $Pb_m = 15,46$ e $15,58$, valores esses indicativos de pequena influência de processos de contaminação crustal.

Embora a Província Magmática do Paraná- Etendeka tenha sido alvo de muitos estudos geoquímicos, petrológicos, paleomagnéticos e geocronológicos existem ainda controvérsias acerca dos processos e materiais progenitores envolvidos na gênese dessas rochas vulcânicas e da extensão e abrangência dos processos de assimilação crustal. Três modelos principais ainda estão em discussão: a) atuação da Pluma de Tristão da Cunha fornecendo material astenosférico (ex.: Gibson *et al.* 1999, Milner & Le Roex 1996, Ewart *et al.* 1998), b)- fusão parcial do manto litosférico (ex.: Turner & Hawkesworth 1995, Peate *et al.* 1999, Marques *et al.* 1999, Comin-Chiaromonti *et al.* 1999) e c)- mistura de magmas entre fontes mantélicas em especial dos tipos OIB e N-MORB (Peate *et al.* 1999).

No estudo de magmas derivados do manto, em particular no que diz respeito à idade da diferenciação, ao tipo de reservatório mantélico e do grau de interação que tiveram com produtos crustais, o sistema isotópico Re-Os têm se revelado particularmente eficaz em função do antagonismo do comportamento geoquímico desses elementos nos processos de fusão parcial: embora ambos os elementos apresentem afinidades com fases sulfeto e ligas metálicas, o Re apresenta comportamento incompatível concentrando-se na fase líquida enquanto o Os permanece no resíduo, fazendo com que o fracionamento entre eles seja o maior observado quando confrontados com os demais pares isotópicos litófilos (ex.: Rb-Sr e Sm-Nd) normalmente utilizados para fins geocronológicos e petrogenéticos. Em particular, quando comparados com isótopos de Nd, a maior diferença de inclinações entre as curvas de evolução dos isótopos de Os dos magmas derivados em relação ao manto leva às intersecções melhor definidas fornecendo idades modelo Re-Os mais robustas em relação ao momento de separação do manto, permitindo melhor interpretar esse tipo de informação.

A sistemática Re-Os tem avaliado com sucesso o papel que desempenharam na formação dos magmas progenitores a astenosfera, o manto litosférico subcontinental (SCLM) e a crosta continental.

Merece ainda destacar que os sistemas litófilos são facilmente modificados por fluidos magmáticos e metassomáticos resultando em significativa



sobreposição das assinaturas mantélicas e dos reservatórios crustais. Em contraste, as elevadas concentrações em Os das rochas do manto preservam sua assinatura isotópica de modificações posteriores. Isso é particularmente importante para se determinar quando as assinaturas “enriquecidas” de distintos derrames basálticos resultam de assimilação de crosta continental ou, alternativamente, são herdadas do SCLM metassomatizado.

Também é possível com esses isótopos se obter isócronas a partir da análise de diferentes alíquotas do pó de uma mesma amostra devido ao efeito conhecido como *nugget effect* (efeito pepita) que é caracteristicamente mais proeminente no sistema Re-Os em função das inhomogeneidades na distribuição dos PGE e do Re nas fases sulfetadas e ligas metálicas (Shirey & Walker 1998), que não se distribuem homogeneamente seja nas amostras, seja nas diferentes fases minerais, fazendo com que mesmo os pós de rocha total, não se comportem como homogêneos para alíquotas de algumas gramas, como as analisadas. Enquanto esse comportamento dificulta medições representativas de teores absolutos de Re e Os nos materiais, ele possibilita a obtenção de isócronas por meio da análise de razões isotópicas da mesma amostra de rocha total ou de uma determinada fase mineral.

Neste trabalho serão apresentados os resultados preliminares de análises Re-Os obtidas em duas amostras dos grupos de alto Ti da Bacia do Paraná, aquelas que menos apresentam evidências de modificações das composições dos magmas progenitores, com objetivo de confrontar os dados obtidos com os resultados geocronológicos e petrogenéticos existentes na literatura.

MÉTODO, RESULTADOS E DISCUSSÃO

As amostras estudadas (Fig. 1): HI-34 (26,381° S e 51,255° W, cota 835 m) e KJN-161 (24,370° S e 51,669° W, cota 690 m), correspondem a amostras com estrutura maciça com granulação variando entre muito fina a afanítica (hipovítrea, HI-34) e fina a média (KJN-161), coletadas em afloramentos frescos de superfície, que fazem parte do grupo alto em TiO₂ apresentando, respectivamente, características geoquímicas dos subgrupos Urubici e Paranapanema (vide Figs. 2 e 3).

Os procedimentos analíticos executados no Laboratório Re/Os do Centro de Pesquisas Geocronológicas do Instituto de Geociências da USP (CPGeo) seguiram a seguinte sistemática: para cada alíquota analisada, aproximadamente entre 3 e 6 gramas de pó de rocha total foram dissolvidos em 12-15 mL de 2:1 HNO₃:HCl em conjunto com quantidades apropriadas de *spike* de ¹⁸⁵Re e ¹⁹⁰Os em

solução. A dissolução das amostras e a reequilibração *spike*-amostra processaram-se em tubos de vidro de borossilicato do tipo Carius, a temperaturas de ~240°C durante quatro dias (e.g., Shirey & Walker 1995). Em seguida separou-se o Os usando as técnicas de extração pelo solvente CCl₄ de Cohen & Waters (1996) seguida de purificação por microdestilação (Birck *et al.* 1997). O Re foi separado e purificado em colunas de troca iônica segundo o procedimento de Walker (1988).

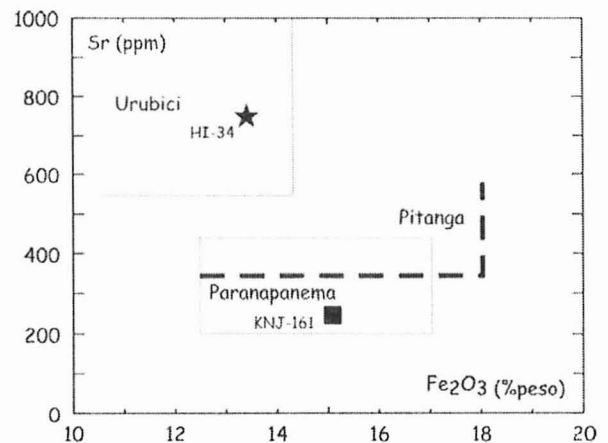


Figura 2. Diagrama de Sr X Fe₂O₃, com a localização das amostras HI-34 e KJN-161, respectivamente nos campos composicionais dos subgrupos Urubici e Paranapanema.

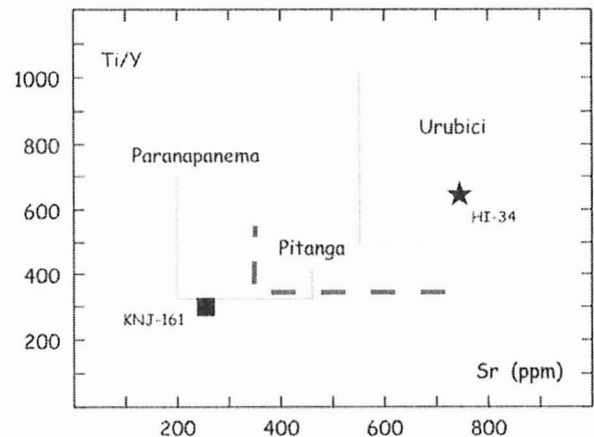


Figura 3. Diagrama da razão Ti/Y X Sr com a localização das amostras HI-34 no campo composicional do subgrupo Urubici e da amostra KJN-161 nos limites do campo composicional do subgrupo Paranapanema.

Para espectrometria de massa das frações purificadas utilizou-se o equipamento Finnigan MAT 262 N-TIMS. Os procedimentos de análise de branco revelaram concentrações de aproximadamente 1 pg



para Os com composição isotópica de $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ de $\sim 0,17$ e entre 5-10 pg para o Re. As isócronas foram calculadas usando o programa Isoplot 3.0 (Ludwig 2003), com a constante de decaimento para o ^{187}Re de $1,666 \times 10^{-11} \text{ yr}^{-1}$ (Smoliar *et al.* 1997).

Os resultados obtidos (Tabela 1) demonstram que as concentrações de Re para as alíquotas analisadas dos basaltos HI-34 (tipo Urubici) e KNJ-161 (tipo Paranapanema) variam, respectivamente, entre 529-556 ppt e 732-733 ppt. As concentrações de Os revelam um intervalo, que se situa aproximadamente entre 44-102 ppt (HI-34) e entre 15-18 ppt (KNJ-161). Ambas as amostras apresentam razões de $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ que variam significativamente, em cada

alíquota analisada, em função do já referido “efeito pepita”.

As medições indicam que as amostras estudadas são da mesma idade e derivadas do mesmo reservatório, para os intervalos de erros considerados. A amostra HI-34 fornece a idade de $131 \pm 19 \text{ Ma}$ ($n = 7$, MSWD de 28) com razão inicial $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ de $0,133 \pm 0,015$. A amostra KNJ-161 produz uma isócrona de dois pontos com idade de $136,4 \pm 9,5 \text{ Ma}$ e razão inicial $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ de $0,111 \pm 0,037$. Esses valores de idade e de razão inicial se encontram, de modo recíproco, nos respectivos intervalos de erro e, quando combinados, apresentam uma idade de $130,9 \pm 2,5 \text{ Ma}$ ($n=9$, MSWD de 21) com razão inicial $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ de $0,1328 \pm 0,0042$ (Fig. 4).

Tabela 1. Valores Re-Os das diferentes alíquotas das amostras HI-34 e KNJ-161. Resultados obtidos no laboratório Re/Os do CPGeo do IGC-USP.

Sample	Magma type	Re (ppb)	Os (ppb)	Common Os (ppb)	$^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$	$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$
HI-34	Urubici	0,556	0,0437	0,0429	63,33 \pm 0,63	0,2708 \pm 0,0029
Duplicate		0,529	0,0720	0,0711	35,82 \pm 0,36	0,2139 \pm 0,0006
Duplicate		0,529	0,0593	0,0585	43,57 \pm 0,44	0,2295 \pm 0,0011
Duplicate		0,529	0,0482	0,0474	53,75 \pm 0,54	0,2551 \pm 0,0024
Duplicate		0,530	0,0496	0,0488	52,30 \pm 0,52	0,2414 \pm 0,0010
Duplicate		0,532	0,0489	0,0482	53,31 \pm 0,53	0,2472 \pm 0,0013
Duplicate		0,532	0,1024	0,1017	25,23 \pm 0,25	0,1856 \pm 0,0005
KNJ-161	Paranapanema	0,732	0,0180	0,0170	208,5 \pm 2,1	0,5844 \pm 0,0031
Duplicate		0,733	0,0147	0,0136	260,1 \pm 2,6	0,7017 \pm 0,0018

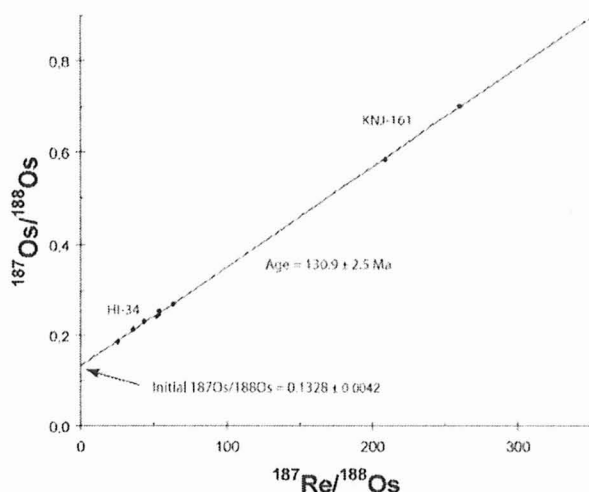


Figura 4. Diagrama Isocrônico Re-Os para as análises das diferentes alíquotas das amostras HI-34 e KNJ-161.

Essa razão inicial $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ de $0,1328 \pm 0,0042$ para 131 Ma guarda estreita correlação com o valor médio do intervalo das razões $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ dos basaltos não contaminados do tipo OIB (basalto de ilha oceânica: 0,129 a 0,145; Widom 1997) e situa-se no limite inferior da faixa de erro para os valores equivalentes da fonte mantélica dos basaltos tipo

MORB em se considerando o valor atual de $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os} = 0,4353$, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0,1296$ (Meisel *et al.* 2001).

Uma vez que nesse modelo de manto em convecção, o intervalo das razões $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ da fonte mantélica dos basaltos tipo MORB deve equivaler, para idades correspondentes, ao intervalo esperado para o SLCM, pode-se tecer considerações em se considerando o SLCM possível fonte para a derivação do magmatismo basáltico da Bacia do Paraná.

Nesse aspecto, em razão das razões Re/Os extremamente baixas do SLCM, basaltos derivados exclusivamente a partir desse tipo de fonte mantélica, apresentariam razões $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ muito menores que as ora obtidas para os basaltos analisados da Bacia do Paraná. Desse modo, para explicar os valores medidos é preciso modelar quanto os magmas derivados do SLCM teriam assimilado para alcançar as razões obtidas.

Nesse contexto, para efeito da modelagem realizada, considerou-se primeiramente que as unidades crustais subjacentes à Bacia do Paraná devem variar em termos de idades entre os limites de 2,1-0,6 Ga. Adicionalmente estimou-se que o SCLM nas vizinhanças da Bacia do Paraná pode apresentar



valores de $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ entre 0,114 e 0,125, que se apresentam consistentes com a base global de dados (Carlson *et al.* 2005) para peridotitos cratônicos e não cratônicos. Valeu-se ainda para os cálculos, da utilização do valor zero como correspondente à razão Re/Os do SCLM (Modelagem TR_D : Walker *et al.* 1989), uma vez que devido ao extremo fracionamento de Re para a crosta continental, essa razão de fato tende ao zero no SCLM.

Considerando-se esses parâmetros e os valores da razão $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ média para a crosta continental de 50, com Os equivalente a 50 ppt: (Esser & Turekian 1993), a modelagem permite concluir que seria necessário a adição de cerca de 1-2% de material continental sobrejacente às unidades da Bacia do Paraná para produzir os valores medidos.

Desse modo, levando-se em conta apenas os resultados preliminares de Os aqui apresentados, conclui-se que os basaltos de alto Ti da Bacia do

Paraná derivaram-se provavelmente da fusão parcial de uma fonte do tipo pluma de OIB ou, alternativamente, de uma fonte do tipo SCLM que teria assimilado não mais que 2% de material continental para produzir os valores medidos.

Novas determinações Re-Os em curso deverão permitir melhor correlacionar as informações dessa sistemática com aquelas já existentes para os outros sistemas isotópicos disponíveis, no esforço de melhor estabelecer o tipo de reservatório mantélico que originou os diferentes grupos e subgrupos dos basaltos da bacia, e a extensão dos processos de diferenciação que atuaram na sua evolução petrogenética.

Agradecimentos Os autores agradecem às agências Fapesp (Proj. de pesq. 04/03032-6 e de pós-doutorado 05/50391-0) e CNPq pelo suporte que viabiliza esta pesquisa.

Referências

- BIRCK J.L., BARMAN R., CAPMAS F. 1997. Re-Os isotope measurements at the femtomole level in natural samples. *Geostandards Newsletter*, **20**:19-27.
- CARLSON R.W. 2005. Application of the Pt-Re-Os isotopic systems to mantle geochemistry and geochronology. *Lithos*, **82**:249-272.
- COHEN A.S. & WATERS F.G. 1996. Separation of osmium from geologic materials by solvent extraction for analysis by TIMS. *Analytical Chimica Acta*, v. 332, p. 269-275.
- COMIN-CHIARAMONTI P., CUNDARI A., DEGRAFF J.M., GOMES C.B., PICCIRILLO E.M. 1999. Early Cretaceous-Tertiary Magmatism in Eastern Paraguay (Western Paraná Basin): Geological, geophysical and geochemical relationships. *Journal of Geodynamics*, **28**:375-391.
- ERNESTO M., RAPOSO M.I.B., MARQUES L.S., RENNE P.R., DIOGO L.A., DE MIN A. 1999. Paleomagnetism, geochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the north-eastern Paraná magmatic province: tectonic implications. *Journal of Geodynamics*, **28**:321-340.
- ESSER B.K. & TUREKIAN K.K. 1993. Anthropogenic osmium in coastal deposits. *Envi. Sci. Tech.*, **27**:2719-2724.
- EWART A., MILNER S.C., ARMSTRONG R.A., DUNCAN A.R. 1998. Etendeka volcanism of the Goboboseb Mountains and Messum Igneous Complex, Namibia. Part I: geochemical evidence of early cretaceous Tristan plume melts and the role of crustal contamination in the Paraná-Etendeka CFB. *J. Petrol.*, **39**:2:191-225.
- GIBSON S.A., THOMPSON R.N., LEONARDOS O.H., DICKIN A.P., MITCHELL J.G. 1999. The limited extent of plume-lithosphere interactions during continental flood-basalt genesis: geochemical evidence from Cretaceous magmatism in southern Brazil. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **137**:147-169.
- LUDWIG K.J. 2003. Isoplot 3.00. *Berkeley Geochronology Center Special Publication*, No. 4, 70 p.
- MARQUES L.S., DUPRÉ B., PICCIRILLO E.M. 1999. Mantle source compositions of the Paraná magmatic province: evidence from trace element and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry. *J. Geodynamics*, **28**:439-459.
- MEISEL T., WALKER R.J., IRVING A.J., LORAND J.P. 2001. Osmium isotopic composition of mantle xenoliths: a global perspective. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **65**:1311-1323.
- MILNER S.C. & LE ROEX A.P. 1996. Isotope characteristics of the Okenyena igneous complex, northern Namibia: constraints on the composition of the early Tristan plume and the origin of the EM1 mantle component. *Earth Plan. Sci. Lett.*, **141**:277-291.
- PEATE D.W. & HAWKESWORTH C.J. 1996. Lithospheric to asthenospheric transition in low-Ti flood basalts from southern Paraná, Brazil. *Chem. Geol.*, **127**:1-24.
- PEATE D.W., HAWKESWORTH C.J., MANTOVANI M.S.M. 1992. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas, South America: classification of magma types and their spatial distribution. *Bull. Volcan.*, **55**:119-139.
- PEATE D.W., HAWKESWORTH C.J., MANTOVANI M.S., ROGERS N.W., TURNER S.P. 1999. Petrogenesis and stratigraphy of the high Ti/Y Urubici magma type in the Paraná flood baalt province and implications for the nature of "Dupal" – type mantle in the South Atlantic Region. *J. Petrol.*, **40**(3):451-473.
- PICCIRILLO E.M., CIVETTA L., PETRINI R., LONGINELLI A., BELLINI G., COMIN-CHIARAMONTI P., MARQUES L.S., MELFI A.J. 1989. Regional variations within the Paraná flood basalts (southern Brazil): evidence for subcontinental



- mantle heterogeneity and crustal contamination. *Chemical Geol.*, **75**:103-122.
- RENNE P.R., ERNESTO M., PACCA I.G., COE R.S., GLEN J.M., PRÉVOT M., PERRIN M. 1992. The age of Paraná flood volcanism, rifting of Gondwanaland, and the Jurassic-Cretaceous boundary. *Science*, **258**:975-979.
- SHIREY S.B. & WALKER R.J. 1995. Carius tube digestion for low blank rhenium-osmium analysis: *Analytical Chemistry*, v. 67, p. 2136-2141.
- SHIREY S.B. & WALKER R.J. 1998. The Re-Os isotope system in cosmochemistry and high-temperature geochemistry. *Annual Reviews Earth and Planetary Sciences*, **26**:423-500.
- SMOLIAR M. I., WALKER R. J., MORGAN J. W. 1997. Rhenium-osmium isochrons for IA meteorites: further refinement of the rhenium-187 decay constant. *Meteoritics and Planetary Science*, **32**:122-123.
- STEWART K., TURNER S., KELLEY S., HAWKESWORTH C., KIRSTEIN L., MANTOVANI M. 1996. 3-D, ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology in the Paraná continental flood basalt province. *Earth and Planetary Science Letters*, **143**:95-109.
- TURNER S. & HAWKESWORTH C.J. 1995. The nature of the continental mantle lithosphere: constraints from the major-element compositions of continental flood basalts. *Chem. Geol.*, **120**:135-154.
- WALKER R.J. 1988. Low-blank chemical separation of osmium and rhenium from gram quantities of silicate rock for measurement by resonance ionization mass spectrometry. *Anal. Chem.*, **60**:1231-1234.
- WALKER R.J., CARLSON R.W., SHIREY S.B., BOYD F.R. 1989. Os, Sr, Nd, and Pb Isotope Systematics of Southern African peridotite xenoliths: Implications for the Chemical Evolution of Subcontinental Mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **53**:1583-1595.
- WIDOM E. 1997. Sources of ocean island basalts: a review of the Sr-Nd-O isotope geochemistry of the shield basalts of Gran Canaria, osmium isotope evidence. *Physica A*, **244**:484-496.