



PALEOMAGNETISMO DO COMPLEXO ALCALINO PLANALTO DA SERRA (MATO GROSSO): IMPLICAÇÕES PARA A FORMAÇÃO DO GONDWANA

Mariana S. R. Garcia¹, Ricardo I. F. Trindade¹, Manoel S. D'Agrella-Filho¹, Francisco E. C. Pinho²

¹ Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, São Paulo, Brasil.

² Universidade Federal do Mato Grosso, Mato Grosso, Brasil.

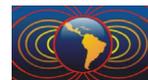
RESUMO

No limite Ediacarano-Cambriano ocorreram mudanças significativas no clima, na composição da atmosfera e dos oceanos, com implicações para o surgimento dos organismos multicelulares. Existem muitas divergências acerca da paleogeografia do Ediacarano e do Cambriano, entre 630 a 500 Ma, em função da escassez de dados paleomagnéticos, principalmente nas unidades que formaram o Gondwana, como o Cráton Amazônico. Novos dados permitiriam testar, por exemplo, a existência ou não do oceano ediacarano-Clymene, entre o Cráton Amazônico e o restante do Gondwana. Com este objetivo foram estudadas as intrusões do Complexo Alcalino Planalto da Serra (CAPS), que cortam os metamorfitos do Grupo Cuiabá os diamictitos da Formação Puga. O CAPS é composto por piroxenitos, apatita-piroxenitos, flogopita-piroxenitos, apatititos, carbonatitos e fenitos. Foram coletados em campo cilindros orientados com bússola solar e magnética, em 12 sítios diferentes, compreendendo 10 sítios de rochas alcalinas do CAPS e 2 sítios de diamictitos da Formação Puga. Todos os sítios do CAPS apresentam uma direção característica coerente, com inclinação positiva forte a moderada para norte, nordeste ou noroeste, que difere da orientação característica dos diamictitos. O polo paleomagnético CAPS obtido a partir da média dos PGVs destes sítios situa-se em 49.7° N e 313.4° E (N = 10, R = 9.6, K = 21.1, $\alpha_{95} = 10.8$). A idade do polo CAPS pode ser estimada a partir das idades obtidas pelo método ⁴⁰Ar-³⁹Ar em flogopitas, de 604 ± 16.2 e 615 ± 4.5 Ma. Os resultados, quando confrontados com os dados paleomagnéticos já existentes na literatura, corroboram a existência de um amplo oceano de idade Ediacarana entre o Cráton Amazônico e a porção central do Gondwana, que foi fechado durante o Cambriano.

Palavras-chave: Paleomagnetismo, Ediacarano, Gondwana, Clymene, Alcalina.

ABSTRACT

The Ediacaran-Cambrian boundary is marked by significant changes in climate and in the composition of the oceans and the atmosphere, with implications to the appearance of the first animals. There is still no consensus on the paleogeography at this time period, comprising the 630-500 Ma interval, mostly due to the scarcity of reliable paleomagnetic data, particularly on the cratonic units that formed the Western Gondwana. New data on these cratonic blocks are necessary to test the different paleogeographic scenarios debated in the literature, such as the existence of a wide oceanic domain between the Amazonian Craton and the rest of Gondwana at the early Ediacaran. In this work, we have focused on the intrusions of the Planalto da Serra Alkaline Complex (CAPS, in Portuguese), that cut across the metamorphic rocks of the Cuiabá Group and diamictites of the Puga Formation. The CAPS is formed by pyroxenite, apatite-pyroxenite, phlogopite-pyroxenite, apatite, carbonatite and phenite. In total, 12 sites were sampled with a portable drill and oriented with magnetic and solar compass, comprising 10 sites in the CAPS and 2 sites in the host diamictites. After AF and thermal treatment, all sites of the CAPS presented a coherent magnetic component, with positive steep to moderate inclination towards the north, which contrasts with the component disclosed for the diamictites. The average of the PGVs obtained for the 10 sites in the intrusives provided a paleomagnetic pole at 49.7° N e 313.4° E (N = 10, R = 9.6, K = 21.1, $\alpha_{95} = 10.8$). The age of the pole was estimated through two ⁴⁰Ar-³⁹Ar datings in phlogopite, 604 ± 16.2 and 615 ± 4.5 Ma. Our results, when compared to those of surrounding cratons corroborate the hypothesis of an Ediacaran ocean between the Amazonian Craton and the rest of Gondwana that was progressively closed at the Cambrian.



Keywords: Paleomagnetism, Ediacaran, Gondwana, Clymene, Alkaline.

Introdução

O limite Ediacarano-Cambriano é um dos períodos mais importantes na história da Terra, pois nele ocorreram mudanças significativas no clima, na composição da atmosfera e dos oceanos, que se superpõem no tempo ao surgimento dos organismos multicelulares (Schields-Zhou & Och, 2011). Neste contexto, a configuração dos continentes pode ter tido influência significativa nessas mudanças, uma vez que a configuração paleogeográfica é determinante no controle do clima terrestre (Fluteau *et al.*, 2001).

Existem muitas divergências acerca da paleogeografia do Ediacarano e Cambriano, entre 630 a 500 Ma (Tohver *et al.*, 2006; Trindade, Macouin, 2007). O paleomagnetismo atrelado a datações isotópicas fornece informações acuradas a respeito da paleogeografia para diferentes períodos, sendo a ferramenta mais importante em reconstruções paleogeográficas. Portanto, um dos motivos para a controvérsia é a escassez de dados paleomagnéticos para o período de 1000 Ma e 600 Ma, além do fato que os polos compreendidos nesse período apresentam resultados ambíguos (Abrajevitch, van der Voo, 2010; McCausland *et al.*, 2011). Os principais problemas referem-se à posição da Laurentia nesse período e à cronologia de amalgamação do Gondwana.

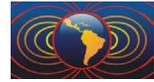
Uma das áreas-chave para resolver os dois principais problemas da paleogeografia do Ediacarano e Cambriano é o Cráton Amazônico. Essa unidade cratônica pertenceu às duas principais aglutinações de continentes do Neoproterozóico: o Rodínia e o Gondwana. O Cráton Amazônico tem forte afinidade com a Laurentia, sendo posicionado junto a este cráton durante boa parte do Neoproterozóico, constituindo a margem sul do supercontinente Rodínia (Li *et al.*, 2008). Com a fragmentação do Rodínia, o Cráton Amazônico separa-se da Laurentia e vai de encontro ao Gondwana. O momento no qual o Cráton Amazônico choca-se com a parte central do Gondwana e passa a fazer parte deste supercontinente é motivo de debate na literatura. Como sintetizado em Cordani *et al.* (2009), há duas hipóteses na literatura. A primeira assume que a aglutinação se dá ainda no Ediacarano entre 650-600 Ma. Nesse caso, os cinturões de dobramento Paraguai e Araguaia representariam aulacógenos (riftes abortados) posteriormente deformados em um contexto intracontinental. A segunda hipótese assume que a colisão da Amazônia com o restante do Gondwana, e conseqüentemente a unificação deste, se deu somente no Cambriano. Nesse caso, os cinturões Araguaia e Paraguai seriam os remanescentes em superfície do suturamento de um oceano Ediacarano, que foi nomeado de Clymene por Trindade *et al.* (2006).

O paleomagnetismo permitiria testar essas hipóteses a partir da comparação de polos paleomagnéticos Ediacaranos da Amazônia com pólos do restante do Gondwana. Com esse objetivo foram estudadas as rochas do Complexo Alcalino Planalto da Serra (CAPS), que foram recentemente datadas em 600 Ma por De Min *et al.* (2012).

Contexto Geológico e Metodologia

A cidade de Planalto da Serra está localizada a 250 km de Cuiabá-MT. Do ponto de vista geológico a região está inserida no contexto da Faixa Paraguai, localizada na margem sudeste do Cráton Amazônico; é uma faixa de dobramento, constituída de sedimentos, depositados em margem passiva durante o Neoproterozóico, dobrados e metamorfizados durante o Brasiliano quando o Cráton Amazônico colidiu com o Cráton São Francisco (Alvarenga, Trompette, 1993). As intrusões do Complexo Alcalino Planalto da Serra cortam os metamorfitos do Grupo Cuiabá e estão provavelmente relacionadas com esforços distensivos ao longo da Faixa Paraguai (De Min *et al.*, 2012). O Complexo Alcalino Planalto da Serra (CAPS) é composto por piroxenitos, apatita-piroxenitos, flogopita-piroxenitos, apatititos, carbonatitos e fenitos (Ormond, 2006).

Foram coletados em campo cilindros orientados nos corpos intrusivos do Complexo Alcalino Planalto da Serra (CAPS) e nos diamictitos encaixantes. As amostras foram coletadas em 12 sítios diferentes, compreendendo 10 sítios de alcalinas do CAPS e 2 sítios de diamictitos da Formação Puga.



As MRNs foram medidas antes de qualquer tipo de tratamento. Foram realizadas; desmagnetização por campos alternados, desmagnetização a baixa temperatura (LTD) seguida de desmagnetização por campos alternados, desmagnetização térmica e desmagnetização a baixa temperatura (LTD) seguida de desmagnetização térmica, nas alcalinas do CAPS. Amostras da encaixante foram coletadas para realização do teste do contato, porém ao realizar a desmagnetização por campos alternados as amostras não desmagnetizaram devido à alta coercividade de seus portadores magnéticos, tornando necessária a desmagnetização térmica. Após as desmagnetizações, os dados foram analisados utilizando o programa Remasoft da AGICO. Este programa permite determinar as diferentes componentes magnéticas a partir da rotina de análise por componentes principais de Kirschvink (1980) tanto para a obtenção de direções de magnetização (análise vetorial) quanto para a determinação de planos de desmagnetização (análise por grandes círculos).

Curvas termomagnéticas foram feitas utilizando um susceptômetro com aparatos de alta e baixa temperatura com o intuito de determinar as temperaturas de transição dos minerais magnéticos presentes nas rochas, e curvas de histerese em um magnetômetro de amostra vibrante (VSM) para a obtenção dos parâmetros de histerese e construção do diagrama de Day, com ele obter informações sobre o estado de domínio e, conseqüentemente, o tamanho dos grãos magnéticos.

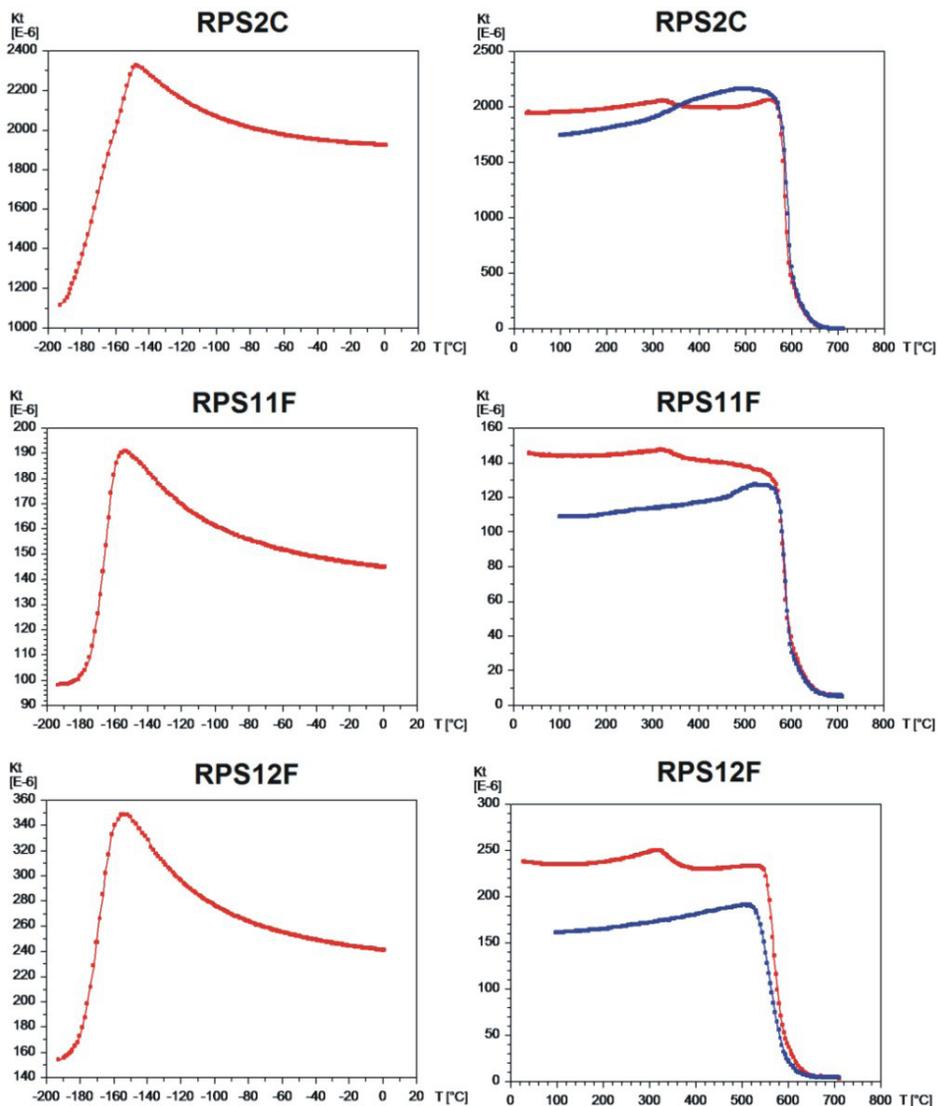


Figura 1. Curvas Termomagnéticas de amostras dos sítios 2, 11 e 12.



Resultados

As curvas termomagnéticas mostram, em baixa temperatura, a presença da transição de Verwey que é diagnóstica da presença de magnetita (fig. 1). Em alta temperatura as curvas têm comportamento irreversível, com uma transição a cerca de 300-350 °C, que é característica da quebra da maghemita (fig. 1). Este mineral se transforma durante o aquecimento em hematita, o que explica a curva de resfriamento com valores de susceptibilidade inferiores aos da curva de aquecimento. Após a transição em torno de 300 °C as curvas apresentam uma forte queda da susceptibilidade a cerca de 580 C, que é típica da presença de magnetita pura. No entanto, a queda completa dos valores de susceptibilidade só acontece acima dos 600 °C, indicando que além da magnetita há também hematita nas amostras. A temperatura de Néel da hematita é 680 °C. Essa hematita detectada nas amostras poderia estar presente inicialmente nas rochas, mas pode também pelo menos em parte ser o resultado da quebra da maghemita como mencionado anteriormente. Além das curvas termomagnéticas, foram também efetuados ciclos de histerese. Os resultados foram representados no diagrama de Day (fig. 2). Praticamente todas as amostras apresentam parâmetros de histerese compatíveis com uma mistura entre magnetitas MD e SD, com proporção MD/SD entre 60 e 95%.

Os resultados direcionais são apresentados na Figura 3. Ela inclui projeções estereográficas, projeções ortogonais e gráficos de magnetização M/M_{Max} [A/m] x campo desmagnetizante [mT], ou magnetização M/M_{Max} [A/m] x Temperatura [°C]. Todos os sítios do CAPS apresentam uma direção característica coerente, com inclinação positiva forte a moderada para norte, nordeste ou noroeste.

Discussão

Após a desmagnetização de uma componente aleatória em campos baixos, quase todas as amostras mostram uma componente característica coerente, com inclinação positiva moderada a forte e orientação dominante norte (fig. 4). Médias por sítio e por espécime foram calculadas e são apresentadas na Tabela 01. As amostras da encaixante mostram um resultado bastante diferente daquele observado nas intrusivas (fig. 4). A componente característica nos diamictitos tem inclinação negativa e direção norte. Essa componente é semelhante àquela definida por Trindade *et al.* (2003) para os carbonatos que capeiam a Formação Puga na parte cratônica. Ela também é semelhante ao pólo Jurássico das intrusivas Tapirapuã (Montes-Lauar *et al.*, 1994) ou mesmo ao campo atual. Esse teste de contato é inconclusivo por vários aspectos. Primeiro, as amostras coletadas próximo às bordas das intrusões não apresentaram as direções características do CAPS. Segundo, não se pode afirmar com certeza se as direções características dos diamictitos são elas mesmas primárias ou secundárias, podendo ser Ediacaranas (se da mesma idade da direção dos carbonatos), Jurássicas (se da mesma idade das intrusivas Tapirapuã) ou mesmo uma remagnetização recente (caso representem o campo atual).

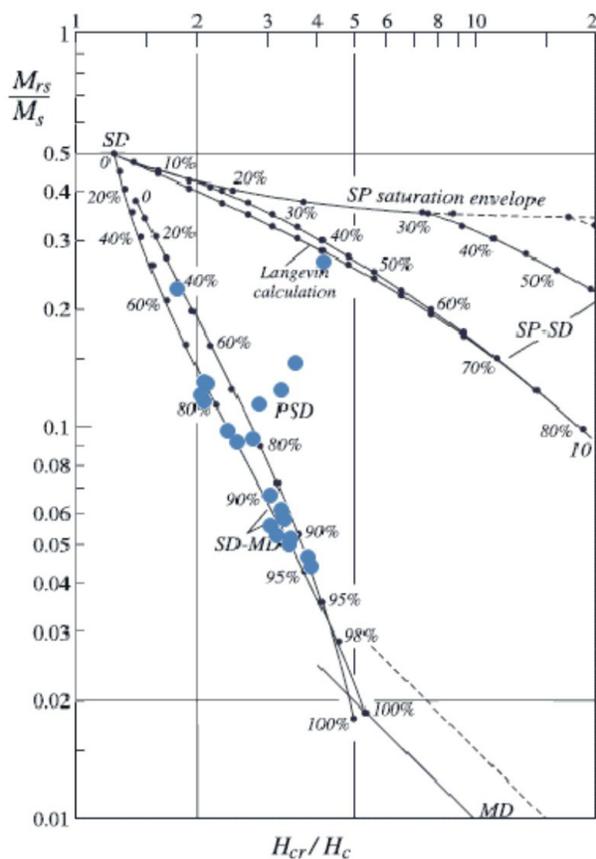


Figura 2. Diagrama de Day modificado por Dunlop (2002); as amostras do CAPS estão indicadas por pontos azuis.

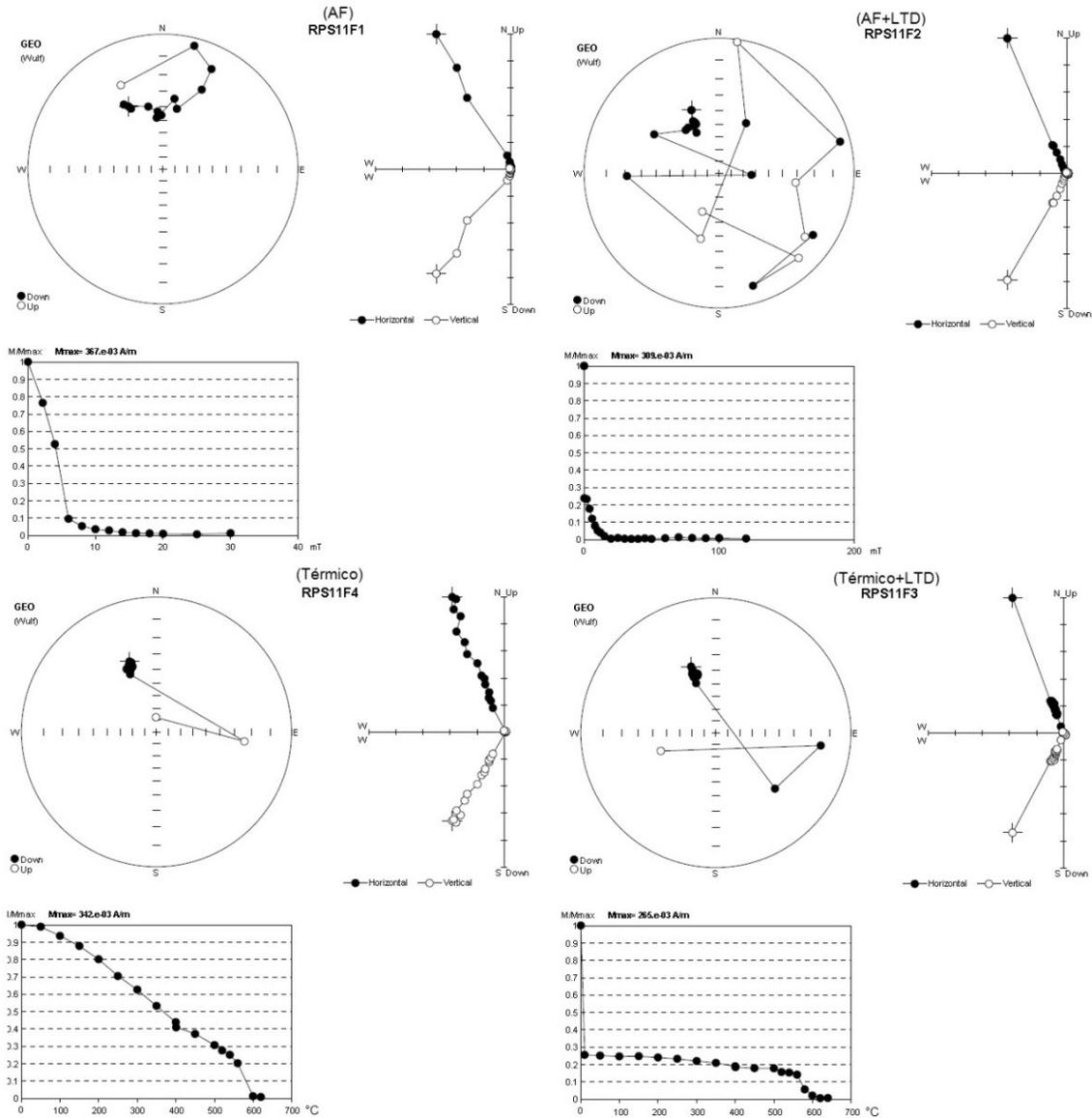


Figura 3. Projeções ortogonais, estereogramas e gráficos de desmagnetização M/MM_{max} [A/m] x campo desmagnetizante [mT] ou Temperatura [$^{\circ}C$] para amostras do sítio 11.

Direções médias semelhantes foram obtidas a partir das médias calculadas para os 10 sítios ou a partir de todo o conjunto de espécimes analisados, indicando uma boa coerência dos resultados (Tabela 1). Apesar da ausência de reversões e do número limitado de sítios, a boa distribuição espacial da amostragem e o grande número de cilindros analisados mostrando uma dispersão moderada sugerem que a variação secular foi amostrada de forma satisfatória. Desta forma pode-se calcular um polo paleomagnético CAPS situado em 49.7° N e 313.4° E ($N = 10$, $R = 9.6$, $K = 21.1$, $\alpha_{95} = 10.8$) a partir da média dos PGVs de cada sítio. A idade do polo CAPS pode ser estimada a partir da idade de cristalização fornecida por De Min *et al.* (2012) a partir da datação pelo método $^{40}Ar-^{39}Ar$ de flogopitas, com idades de 604 ± 16.2 e 615 ± 4.5 Ma.

Conclusão

Os dados obtidos neste trabalho têm implicações quanto aos modelos paleogeográficos do Ediacarano, em particular quanto ao momento de aglutinação do Gondwana. Quando comparado aos polos obtidos

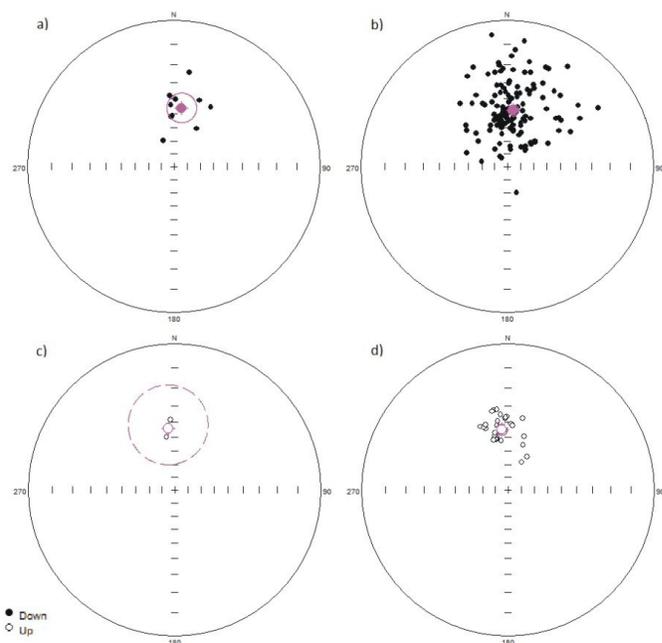
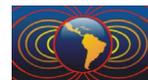


Figura 4. Média das direções características (a) por sítios do CAPS, (b) por espécimes do CAPS, (c) por sítios da encaixante e (d) por espécimes da encaixante.

nas unidades sedimentares que capeiam os diamictito do Puga, os polos Puga A e Puga B de Trindade *et al.* (2003), cujas idades foram atribuídas com base em critérios estratigráficos em ~ 635 Ma e ~ 520 Ma respectivamente, o polo CAPS tem posição intermediária ao longo de um padrão de deriva polar aparente que é bastante distinto daquele do Gondwana para período de tempo semelhante (fig. 5).

O polo CAPS pode também ser comparado com o polo AdmaDiorite de idade semelhante, obtido na borda leste do Cráton Oeste África (Morel, 1981). Esta comparação baseia-se no fato que este bloco e o Cráton Amazônico são classicamente correlacionados na literatura (*e.g.*, Tohver *et al.*, 2006). Após rotação do polo CAPS para a África usando a reconstrução de Lawver, Scotese (1987), esses dois polos situam-se a cerca de 30° com intersecção entre seus círculos de confiança (fig. 6).

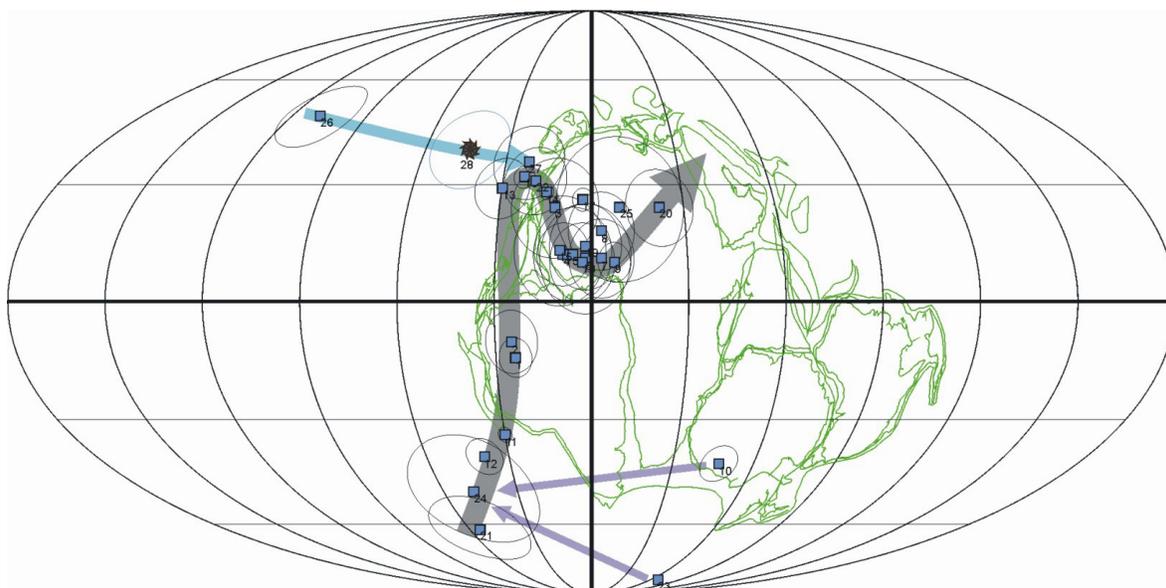


Figura 5. Curvas de deriva polar aparente para o Gondwana (Cinza) e para o Cráton Amazônico (Azul). Os polos correspondem àqueles listados em Trindade *et al.*, (2006), usando o “tightfit”, além do polo 21 (Noladykes; Moloto-A-Kenguemba *et al.*, 2008) e do polo 28 (este estudo).



Média	Declinação	Inclinação	N	R	k	Alfa95
Sítios do CAPS	7.2°	46.1°	10	9.63	24.35	10.0°
Espécimes do CAPS	5.7°	47.7°	137	125.14	11.47	3.7°
Sítios da encaixante	354°	-44.1°	2	1.99	95.55	25.8°
Espécimes da encaixante	353.9°	-44.7°	31	30.36	46.76	3.8°

Tabela 1. Média das direções características e parâmetros de Fisher por sítios e por espécimes das rochas do CAPS e da encaixante.

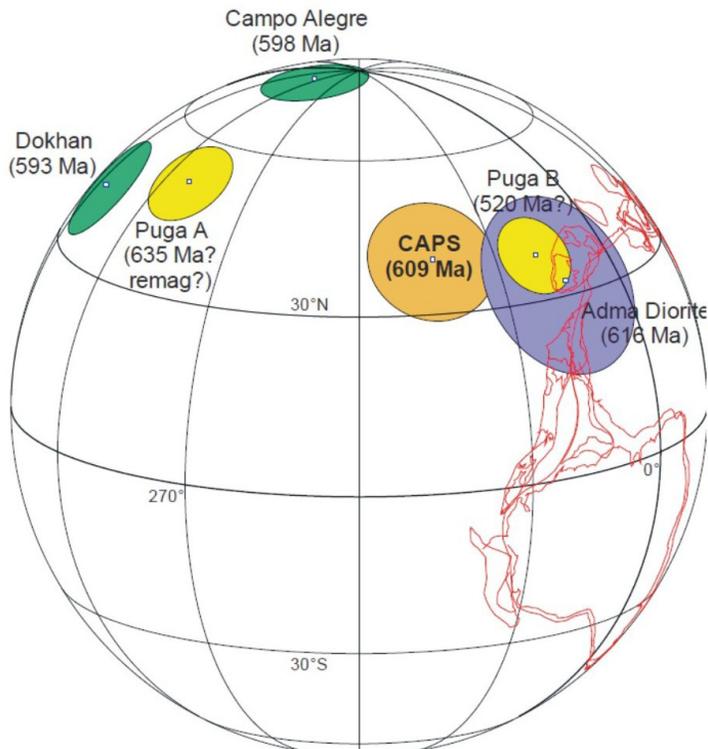


Figura 6. Posição dos polos paleomagnéticos para o Oeste do Gondwana obtidos em unidades com idade em torno de 635 Ma. Os polos foram rotacionados para a África usando a reconstrução de Lawver & Scotese (1987).

Ao compararmos esses polos com aqueles de idade semelhante da porção central do Gondwana (polos Campo Alegre e Dokhanvolcanics), nota-se uma diferença significativa (fig. 6). Esta diferença significa que o conjunto Oeste África-Amazonia estava distante da porção central do Gondwana há ~ 600 Ma e em consequência deveria haver um oceano suficientemente amplo para acomodar a distância entre esses dois conjuntos. Esse resultado favorece fortemente a hipótese de um oceano Ediacarano (o Clymene) antes da amalgamação final do Gondwana.

Bibliografia:

- Abrajevitch, A., Van der Voo, R., 2010. Incompatible Ediacaran paleomagnetic directions suggest an equatorial geomagnetic dipole hypothesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 293, pp. 164–170.
- Alvarenga, C. J. S., Trompette, R., 1993. Evolução Tectônica Brasileira da Faixa Paraguai Na região de Cuiabá. *Revista Brasileira de Geociências*.
- Cordani, U. G., Teixeira, W., D'Agrella-Filho, M. S., & Trindade, R. I., 2009. The position of the Amazonian craton in supercontinents. *Gondwana Research*, 15 (3-4), 396-407.



- De Min, A., B. Hendriks, F. Slejko, P. Comin-Chiaramonti, V. Girardi, E. Ruberti, C. B. Gomes, R. D. Neder, and F. C. Pinho, 2013. "Age of Ultramafic High-K Rocks from Planalto Da Serra (MatoGrosso, Brazil)." *Journal of South American Earth Sciences* 41, 57-64.
- Dunlop, D. J., 2002. Theory and application of the day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc) 1. theoretical curves and tests using titanomagnetite data. *Journal of Geophysical Research B: Solid Earth*, 107(3), 4-1.
- Fluteau, F., Besse, J., Broutin, J. & Ramstein, G., 2001. The Late Permian climate. what can be inferred from climate modelling concerning Pangea scenarios and Hercynian range altitude? *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 167(1-2), 39-71
- Kirschvink, J. L., 1980. The last-squares line and plane and the analysis of paleomagnetic data, *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 62, 699-718
- Lawver, L., Scotese, C. R., 1987. A revised reconstruction of Gondwanaland. In: McKenzie, G.D. (Ed.), *Gondwana Six: Structure, Tectonics and Geophysics. AGU Geophys. Mon.* 40, 17-23.
- Li, Z. X., Bogdanova, S. V., Collins, A. S., Davidson, A., De Waele, B., Ernst, R. E., Fitzsimons, I. C. W., Fuck, R. A., Gladkochub, D. P., Jacobs, J., Karlstrom, K. E., Lu, S., Natapov, L. M., Pease, V., Pisarevsky, S. A., Thrane, K., Vernikovsky, V., 2008a. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis. *Precambrian Res.* 160, 179-210
- McCausland, P. J. A., Hankard, F., Van der Voo, R., & Hall, C. M., 2011. Ediacaran paleogeography of Laurentia: Paleomagnetism and ⁴⁰Ar-³⁹Ar geochronology of the 583Ma baie des moutons syenite, Quebec. *Precambrian Research*, 187 (1-2), 58-78.
- Moloto-A-Kenguemba, G. R., Trindade, R. I. F., Monié, P., Nédélec, A., & Siqueira, R., 2008. A late neoproterozoic paleomagnetic pole for the Congo craton: Tectonic setting, paleomagnetism and geochronology of the Nola dike swarm (central African Republic). *Precambrian Research*, 164 (3-4), 214-226.
- Montes-Lauar, C. R., Pacca, I. G., Melfi, A. J., Piccirillo, E. M., Bellieni, G., Petrini, R. & Rizzieri, R., 1994. The Anari and Tapirapuã Jurassic formations, western Brazil: Paleomagnetism, geochemistry and geochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 128 (3-4), 357-371.
- Morel, P., 1981. Paleomagnetism of a Pan-African diorite: a Late Precambrian pole for western Africa. *Geophys. Journal Royal Astronomical Society*, 65, 493-503.
- Ormond, M., 2006. Petrografia do Complexo Alcalino Planalto da Serra-MT. XLII Congresso Brasileiro de Geologia, Aracaju-SE. Anais XLIII CBG, 2006.
- Schields-Zhou, G., Och, L., 2011. The case for a neoproterozoic oxygenation event: geochemical evidence and biological consequences. *GSA Today* 21, 4-11
- Tohver, E., D'Agrella-Filho, M., and Trindade, R. I. F., 2006. Paleomagnetic record of Africa and South America for the 1200-500 Ma interval, and evaluation of Rodinia and Gondwana assemblies: *Precambrian Research*, v. 147, 193-222, doi:10.1016/j.precamres.2006.01.015.
- Trindade, R. I. F., E. Font, M. S. D'Agrella-Filho, A. C. R. Nogueira, and C. Riccomini, 2003. "Low-Latitude and Multiple Geomagnetic Reversals in the Neoproterozoic Puga Cap Carbonate, Amazon Craton." *Terra Nova* 15 (6), 441-446.
- Trindade, R. I. F., D'Agrella Filho, M. S., EPOF, I., Neves, B. B. B., 2006. Paleomagnetism of early Cambrian Itabaiana mafic dikes (NE Brazil) and the final assembly of Gondwana. *Earth and Planetary Science Letters* 244, 361-377.
- Trindade, R. I. F., Macouin, M., 2007. Palaeolatitude of glacial deposits and paleogeography of Neoproterozoic ice ages. *Comptes Rendus Geoscience* 339, 200-211.