



Neotectônica vs. clima na submersão de cavernas na Serra da Bodoquena (MS)

*W. Sallun Filho¹, I. Karmann², X. Wang³, R. Lawrence Edwards³, H. Cheng³,
Y. Asmerom⁴ & V.J. Polyak⁴*

1 Instituto Geológico – SMA, Avenida Miguel Stéfano, 3900, São Paulo, SP, 04301-903, Brasil, wsallun@gmail.com.

2 Instituto de Geociências – USP, Rua do Lago 562, São Paulo, SP, 05508-080, Brasil.

3 Department of Geology and Geophysics, University of Minnesota, Minneapolis, MN 55455, USA.

4 Department of Earth and Planetary Sciences, University of New Mexico, Albuquerque, New Mexico 87131, USA

Abstract The Serra da Bodoquena comprises a karstified carbonate plateau developed upon rocks of the Corumbá Group (Neoproterozoic III), which stands topographically above the plains of the Pantanal wetlands. Some features suggest neotectonic activity in this area, related to the development of the Cenozoic Pantanal Basin, which is still undergoing subsidence. The more conspicuous feature of this karst is the presence of submerged and subaquatic speleothems, below the minimal seasonal water level in flooded caves. These caves occur in residual hills of dolomitic karst plains, which is lower relative to the limestone that outcrops westwards. This is attributed to the movement of fault, with a normal component, because more soluble limestones should have been lowered relative to the less soluble dolomites, after being submitted to same weathering conditions. The presence of stalactites at depths of up to 16 m below the minimal seasonal water table suggests that tectonic subsidence caused their submersion, since it seems improbable that such a large variation in water table would have been caused only by climate change in an inland region. Climatic factors accelerated this flooding process, which reached 1.8 mm/year, during the last 5.000 years, as has been obtained by U/Th dating of submerged stalagmites in the Mimoso cave.

Palavras-chave: Serra da Bodoquena, carste, cavernas submersas, espeleotemas submersos, espeleotemas subaquáticos, neotectônica.

Keywords: Serra da Bodoquena, karst, flooded caves, submerged speleothems, subaqueous speleothems, neotectonics.

INTRODUÇÃO A Serra da Bodoquena, desenvolvida em rochas do Grupo Corumbá, é uma das mais extensas áreas cársticas do Brasil, que se destaca por situar-se em uma área de tectônica recente ativa, dentro do contexto da Plataforma Brasileira, devido à sua proximidade com a área em subsidência do Pantanal Matogrossense (Fig. 1). O carste da Serra da Bodoquena possui alguns aspectos distintos das demais áreas cársticas no Brasil, como compor um planalto carbonático elevado em relação às planícies de rochas menos solúveis adjacentes e a presença de cavernas submersas. A influência tectônica na submersão dessas cavernas tem sido sugerida devido a subsidência da Bacia do Pantanal. Porém, mudanças climáticas durante o Quaternário, também podem ter ocasionado variações significativas do nível de água, eventualmente superpondo o sinal dessa variação tectônica.

O objetivo deste trabalho é confrontar o papel da tectônica recente no afogamento dessas cavernas e a influência da variação climática nos últimos milhares de anos.

A Serra da Bodoquena está localizada na porção Centro-Oeste do Brasil e compõe uma área elevada que se estende por cerca de 200 km na direção Norte-Sul, com altitudes de cerca de 800 m. Faz parte de um sistema de planaltos e serras que circundam as Planícies do Pantanal Matogrossense (Fig. 1), com nível de base regional entre 60 e 180 m de altitude. Atualmente essa área possui clima tropical úmido (Zavattini 1992) com temperaturas médias entre 22 e 24°C (Nimer 1979) e uma precipitação média anual de 1419 mm, com de 1 a 3 meses de seca entre junho e agosto. A vegetação é de cerrado, com floresta estacional decidual.

CAVERNAS E ESPELEOTEMAS SUBMERSOS

As cavernas da Serra da Bodoquena ocorrem com maior frequência no Planalto da Bodoquena e em morros residuais em planícies na Depressão do rio Miranda (Fig. 1). As cavernas submersas ocorrem nos morros residuais dolomíticos na Depressão do rio Miranda, uma unidade geomorfológica mais rebaixada topograficamente em relação ao planalto. Essas cavernas com lagos, espeleotemas vadosos submersos

(estalagmites, estalactites e cortinas) e espeleotemas subaquáticos (cones e crostas) são uma das características mais marcantes do carste da Serra da Bodoquena. Neste trabalho estudaram-se as cavernas Mimoso, Lago Azul e Anhumas, que possuem espeleotemas vadosos abaixo do nível de água mínimo atual.

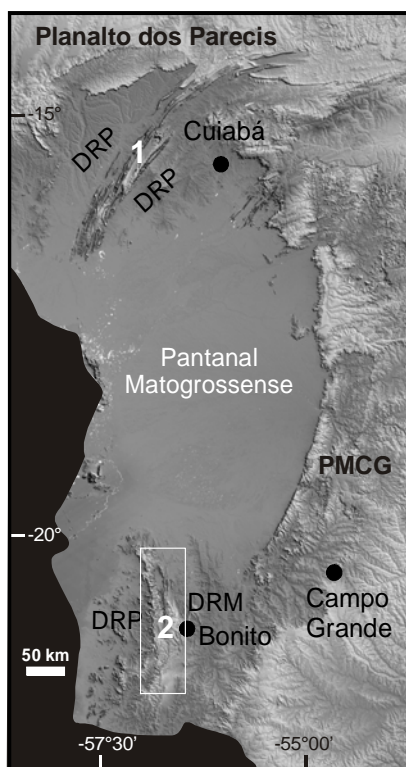


Figura 1. Localização da área estudada, com as principais feições geomorfológicas regionais. Serras residuais do rio Paraguai: 1-Serra das Araras, 2-Planalto da Bodoquena; PMCG-Planalto de Maracajú-Campo Grande; DRP-Depressão do rio Paraguai; DRM-Depressão do rio Miranda.. Modelo digital de terreno baseado nos dados de SRTM (USGS)

A variação sazonal atual do nível de água foi monitorada para estimar a influência climática na submersão das cavernas. No ano da coleta, a precipitação medida de chuva foi de 912,8 mm (Fig. 2). Isto mostra que, em 24 anos de registro, o ano de coleta foi mais seco que a média de 1419 mm, mais seco que o máximo registrado de 1954 mm (em 1969) e um pouco mais chuvoso que o mínimo de 581,3 mm (em 1999). Assim, para a finalidade proposta, foi um ano representativo de períodos secos. Inicialmente, a distribuição dos espeleotemas submersos e subaquáticos foi relacionada com a variação sazonal atual do nível de água. A variação atual medida foi de 8,5 m na Gruta Mimoso, 2,6 m na Gruta Lago Azul e 2,6 metros no Abismo Anhumas.

Na Gruta Mimoso, os espeleotemas vadosos ocorrem desde acima do nível de água máximo até 16 metros abaixo do nível de água mínimo, ou seja, atualmente os espeleotemas submersos mais profundos não emergem durante os períodos mais secos (Fig. 3a, b, c). Já os espeleotemas subaquáticos, como crostas e cones, ocorrem desde 5 metros até mais de 40 metros abaixo do nível de água mínimo (Fig. 3c, d, e). As crostas subaquáticas cobrem tanto sobre a rocha das paredes e do teto como espeleotemas vadosos e cones (Fig. 3c, d, e). As maiores espessuras observadas são de até 10 cm, mas espessuras maiores são prováveis. Os cones são estruturas de dimensões variadas e os maiores alcançam até 7 m de altura e 2 m de diâmetro (Fig. 3d).

Espeleotemas vadosos e crostas calcíticas subaquáticas, coletadas na Gruta Mimoso, de 9,3 a 11,3 m (em relação ao nível de água médio), foram datadas pelo método U/Th (Fig. 3f). As idades mostram que o lago esteve mais baixo entre 7800 e 5300 anos BP, quando houve deposição das estalagmites. A partir de 5300 anos BP inicia-se a deposição de crostas subaquáticas, com o nível do lago mais alto.

DISCUSSÃO O Planalto da Bodoquena, juntamente com os sedimentos da Bacia do Paraná, no Planalto de Maracajú-Campo Grande, formam uma única superfície de aplainamento, correlacionada com a Superfície Sul-Americana. Essa superfície, com altitude de cerca de 760 metros, é visível na porção central do Planalto da Bodoquena e, mais raramente, nos alinhamentos dos topos dos morros na Depressão do rio Miranda.

Há um desnível entre o Planalto da Bodoquena e a Depressão do rio Miranda, ao qual corresponde de forma geral aos calcários e aos dolomitos, respectivamente. Se a superfície de aplainamento original era a mesma para as duas rochas, como se observa na porção central da serra, seria de se esperar que os morros residuais dos dolomitos possuíssem cotas mais elevadas que os calcários, porém com as planícies de ambos, niveladas entre si. No domínio dos dolomitos, a superfície de aplainamento original é pouco preservada, ocorrendo na parte central da serra (planalto) e em raros topos de morros (depressão).

Estudos demonstram que a calcita é mais solúvel que a dolomita (Chou *et al.* 1989, Appelo & Postma 1993) da mesma forma que os calcários em relação aos dolomitos (Rauch & White 1977). A natureza dolomítica das rochas não permitiu o desenvolvimento de muitas feições cársticas de superfície, apesar do desenvolvimento de condutos e cavernas.

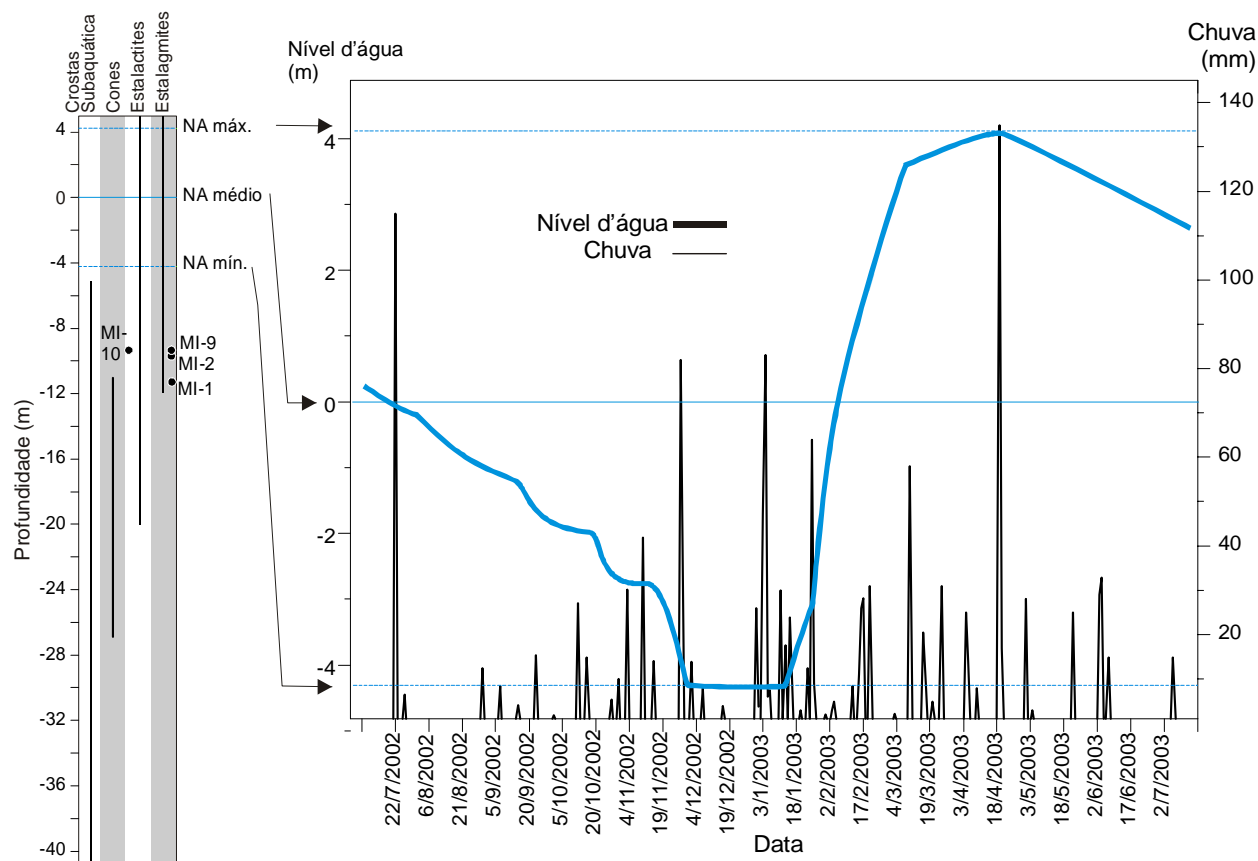


Figura 2. Profundidades dos espeleotemas relacionadas a variação sazonal do nível de água na Gruta Mimosa, e a precipitação de chuva na área no período estudado

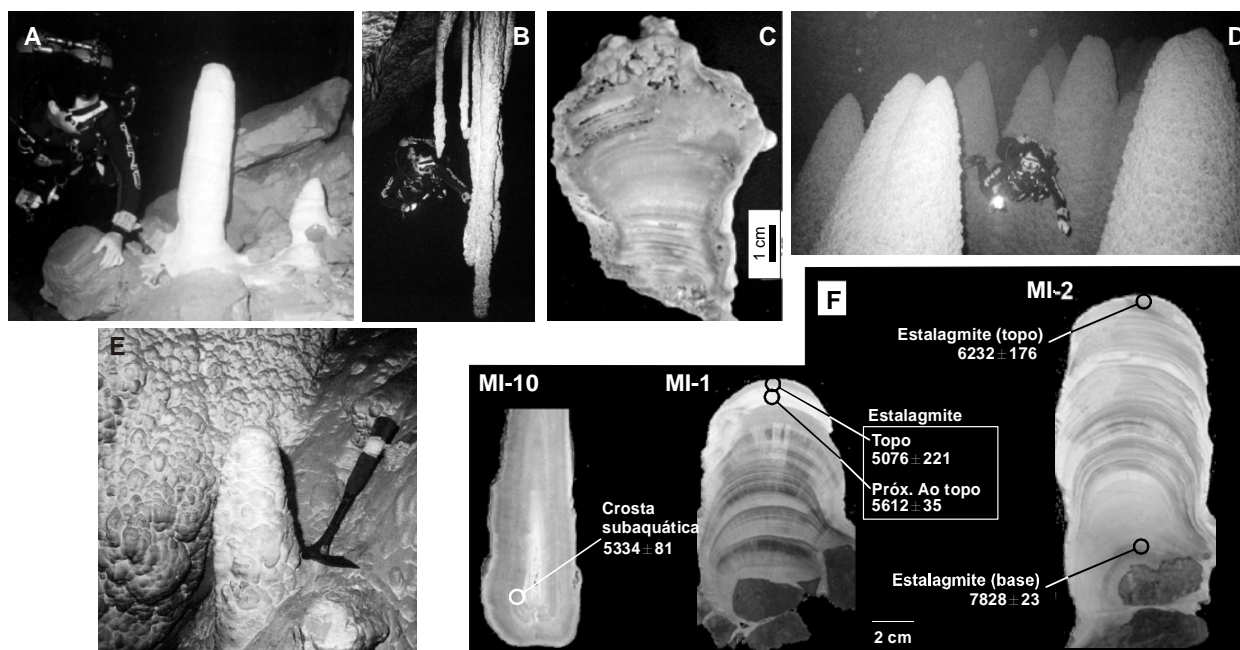


Figura 3. Espeleotemas na Gruta Mimosa com as profundidades relativas ao nível de água médio. A) Estalagmite dissolvida nas bordas sobre blocos desmoronados (-10 m); B) Estalactite coberta por crosta subaquática (-12 m); C) Estalagmites cobertas por crosta (-9 m); D) Cones subaquáticos cobertos por crosta (topo a -20 m e base a -26 m); E) Estalagmites cobertas por crosta (-11 m); F) Idades U/Th de amostras MI-10, 1 e 2, coletadas respectivamente nas profundidades, relativa ao nível de água médio, de 9, 11,6 e 10 m



Essa superfície foi elevada no final do Cretáceo/Mioceno com o soerguimento pré-Pantanal, e desde então vem sendo esculpida. Após esse soerguimento tem-se o início da subsidência e sedimentação da Bacia do Pantanal no Plio-Pleistoceno (Assine & Soares 2004, Ussami *et al.* 1999) e o desnivelamento da superfície de aplainamento por meio de blocos de falha. Baseados em geofísica Shiraiwa & Ussami (1993) estimaram que no início da orogenia andina a área do Pantanal foi soerguida, seguida de subsidência, e atualmente as áreas elevadas ao redor da bacia, como os planaltos da Bodoquena, Maracaju-Campo Grande e da Província Serrana, representam a topografia erodida desse período.

Assim a abertura do Pantanal além de gerar diferenças dentro do planalto, também gerou desníveis entre blocos distintos, hoje delimitados por escarpas. As falhas que delimitam os blocos em soerguimento e subsidência não foram observadas diretamente, mas dados geofísicos confirmam sua existência (Ussami *et al.* 1999).

A subsidência tectônica da Bacia do Pantanal alcança até 500 metros de espessura de sedimentos e é reflexo de esforços distensionais no arco flexural da bacia de antepaís do Chaco (Shiraiwa 1994, Ussami *et al.* 1999).

O desenvolvimento dessa bacia faz com que haja uma subsidência não só no depocentro, mas também nas bordas. Dessa forma é lógico pensar que a Serra da Bodoquena, que está na borda sul da Bacia do Pantanal, esteja em subsidência. A subsidência tectônica da Bacia do Pantanal provoca o rebaixamento do nível de base regional e, conseqüentemente, o aumento do gradiente hidráulico nas bordas, pois há uma convergência das drenagens dos planaltos adjacentes para seu interior, com um desnível de quase 1.000 metros entre eles.

O rebaixamento da Depressão do rio Miranda em relação ao Planalto da Bodoquena, com cavernas com espeleotemas vadosos submersos em alguns deles reforça a subsidência tectônica desse bloco. Porém, provavelmente, ocorre influência climática e tectônica no processo de afogamento das cavernas e espeleotemas vadosos. Mas por meio da quantificação da variação atual do nível da água constatou-se que na Gruta Mimoso a variação atual é de 8,5 metros e dessa forma, em uma época muito seca, seria possível, porém improvável, que as estalagmites mais profundas encontradas estivessem em ambiente vadoso. Isto não se ocorreu observado no período estudado, que foi mais seco que a média, mas não mais seco já registrado na região em 24 anos de registro.

Apesar dos dados paleoclimáticos existentes serem de outras regiões e bastante contraditórios, reconhece-se um período mais seco que o atual na maior parte do Brasil, a exceção da região Nordeste. Ledru (1993) determinou um período seco entre 5500 e 4500 anos BP, no Brasil Central, e indica que esse período seco ocorreu em toda a América do Sul em épocas distintas, de acordo com a latitude. Na região Amazônica brasileira, na Venezuela e na Colômbia, um período seco entre 8.000 e 4.000 anos foi constatado por Ledru (1993). Thomas & Thorp (1995) estabeleceram que a partir de 9.000 anos BP inicia-se uma fase seca que culmina há 3.500 anos BP, quando se inicia uma fase úmida chegando aos níveis atuais. Ainda no Brasil Central Salgado-Laboriau *et al.* (1997) descreveram clima seco entre 18.500 e 6.500 anos BP, com um aumento de umidade por volta dos 5.000 anos BP. Ledru *et al.* (1998) observaram clima seco entre 10.000 e 7.000 anos BP, sazonal entre 7.000 e 4.000 anos BP e próximo das condições atuais após 4.000 anos BP, nas regiões Sudeste e Central do Brasil. Em terraços do rio Paraná, no estado do Paraná, Stevaux (2000) reconheceu um período seco entre >40.000 e 8.000 anos BP, seguido de período úmido que durou até 3.500 anos BP. Posteriormente, Parolin & Stevaux (2001) descreveram em local próximo, mas no estado do Mato Grosso do Sul, depósitos eólicos indicativos de clima seco entre 10.000 e 3.000 anos BP. Os dados paleoclimáticos mais próximos são de lagos no Pantanal Matogrossense onde Bezerra (1999) estabeleceu uma mudança para um clima mais úmido entre 10.200 e 5.190 anos BP que permitiu a individualização dos lagos, o que levou Assine & Soares (2004) a estabelecer o limite Pleistoceno/Holoceno para o estabelecimento das terras úmidas no Pantanal.

As idades obtidas nas cavernas submersas mostram que o lago esteve mais baixo entre no mínimo 7.800 e 5.300 anos BP quando houve deposição de espeleotemas vadosos, indicando um clima mais seco, porém não árido. A partir de 5.300 anos BP houve deposição de crostas em ambiente subaquático com o nível do lago mais alto, indicando clima úmido, talvez muito parecido com o atual. Essa fase mais seca pode ser correlacionada a períodos secos descritos acima em outras regiões brasileiras.

Acreditamos assim que mesmo na fase seca houve precipitação de chuva suficiente para deposição de espeleotemas, porém com o lago mais baixo. A subida do lago por subsidência tectônica ocorre continuamente, mesmo na fase seca. Em 5.000 anos BP houve uma conjunção de condições climáticas úmidas e subsidência tectônica que permitiram o afogamento dos espeleotemas vadosos. Após 5.000 anos BP fases secas são registradas em carbonatos precipitados em lagoas



no Pantanal em 3.820 anos BP (Assine *et al.* 1997) e em estalagmites na Gruta João Arruda (próxima a Gruta Mimoso) entre 3.800 e 2.500 anos BP (Bertaux *et al.* 2002).

O papel da subsidência tectônica no afogamento dos espeleotemas vadosos é demonstrado pela rapidez de subida do nível de água. Auler & Smart (2001) registraram uma descida do nível de água de 13 metros durante os últimos 17.000 anos BP no Nordeste do Brasil, que possuía um clima úmido passando para condições semi-áridas, nos dias de hoje. A partir desses dados obtemos taxas de descida do nível de água de cerca de 0,76 mm/ano. Apesar de ser em um local muito distante, esse valor é uma referência para quantificação da variação do nível de água no Brasil por intermédio de fenômenos unicamente climáticos. Atualmente no Nordeste do Brasil o clima é semi-árido com precipitações em torno de 500 mm anuais, não ocorrendo deposição efetiva de espeleotemas. Se antes de 5.300 anos BP o clima da Serra da Bodoquena fosse semi-árido a tal ponto de baixar o

nível do lago em cerca de 12 metros não deveria haver a deposição de estalagmites e estalactites.

Na Gruta Mimoso a taxa de subida do nível de água de 8 metros em 5.000 anos BP, ou 1,8 mm/ano, é cerca de 2 vezes mais rápido que a taxa obtida para o Nordeste do Brasil. Essa taxa é considerada muito alta, tanto para efeito exclusivamente tectônica ou climático. A presença de possíveis estalactites a 16 metros do nível de água mínimo atual, confirma o efeito tectônico na submersão desses espeleotemas, pois é improvável uma variação climática tão acentuada em uma área continental.

Assim atribui-se essa subida de nível de água a uma somatória dos dois fatores, com influência climática e tectônica no processo de afogamento das cavernas e espeleotemas vadosos, sem quantificar a influência de cada fator.

Agradecimentos Os autores agradecem à FAPESP pelo financiamento das pesquisas (proc. n° 01/07481-7). Ao CECAV-IBAMA pelo apoio e expedição das autorizações de coleta. São gratos aos mergulhadores Marcos Philadelphi e Ismael Escote pelas coletas e fotografias dos espeleotemas.

Referências

- APELLO C.A.J. & POSTMA D. 1993. Carbonates and carbon dioxide. In: APELLO C.A.J. & POSTMA D. (eds.) *Geochemistry, groundwater and pollution*, A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield, pp.: 86-141.
- ASSINE M.L. & SOARES P.C. 2004. Quaternary of the Pantanal, west-central Brazil. *Quaternary International*, **114**: 23-34.
- ASSINE M.L., SOARES P.C., ANGULO R.J. 1997. Construção e abandono de lobos na evolução do leque do rio Taquari, Pantanal Mato-grossense. In: ABEQUA, Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, 6, *Anais*, pp. 431-433.
- AULER A., SMART P.L. 2001. Late Quaternary paleoclimate in semiarid Northeastern Brazil from U-series dating of travertine and water-table speleothems. *Quaternary Research*, **55**: 159-167.
- BERTAUX J., SONDAG F., SANTOS R., SOUBIÈS, F., CAUSSE C., PLAGNES V., LE CORNEC F., SEIDEL, A. 2002. Paleoclimatic record of speleothems in a tropical region: study of laminated sequences from a Holocene stalagmite in central-west Brazil. *Quaternary International*, **89**: 3-16.
- BEZERRA M.A.O. 1999. *O Uso de Multi-traçadores na Reconstrução do Holoceno no Pantanal Mato-grossense, Corumbá, MS*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de São Carlos, 214 p.
- CHOU L., GARRELS R.M., WOLLAST R. 1989. Comparative study of the kinetics and mechanisms of dissolution of carbonate minerals. *Chemical geology*, **78**: 269-282.
- LEDRU M.P. 1993. Late Quaternary environmental and climatic changes in Central Brazil. *Quaternary Research*, **39**: 90-98.
- LEDRU M.P., SALGADO-LABOURIAU M.L., LORSCHETTER M.L. 1998. Vegetation dynamics in southern and central Brazil during the last 10,000 yr B.P. *Review of Palaeobotany and Palynology*, **99**: 131-142.
- NIMER E. 1979. *Climatologia do Brasil*. IBGE, Série Recursos Naturais e Meio Ambiente, vol. 4, 422 pp.
- PAROLIN M. & STEVAUX J.C. 2001. Formação de Dunas Eólicas Durante o Holoceno Médio Taquaruçu, Mato Grosso do Sul. *Pesquisas em Geociências*, **28**(2): 43-46.
- RAUCH H.W., WHITE W.B. 1977. Dissolution kinetics of carbonate rocks. 1. Effects of lithology on dissolution rate. *Water resources research*, **13**: 381-394.
- SALGADO-LABOURIAU M.L., CASSETI V., FERRAZ-VICENTINI K.R., MARTIN L., SOUBIÈS F., SUGUIO K., TURCQ B. 1997. Late Quaternary vegetational and climatic changes in cerrado and alm swamp from Central Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **128**: 215-226.
- SHIRAIWA S. 1994. *Flexura da litosfera continental sob os Andes centrais e a origem da Bacia do Pantanal*. Tese de Doutorado, Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, Brasil, 86 p.
- SHIRAIWA S. & USSAMI N. 1993. *Lithospheric flexure of the Central Andes and the origin of the Cenozoic Pantanal Basin, western Brazil*. EOS Transactions American Geophysical Union, Washington, n. suppl., pp. 500.
- STEVANUX J.C. 2000. Climatic events during the Late Pleistocene and Holocene in the Upper Parana River:



XLIII Congresso Brasileiro de Geologia
Aracaju, 3 a 8 de setembro de 2006

- Correlation with NE Argentina and South-Central Brazil. *Quaternary International*, **72**: 73-85
- THOMAS M.F. & THORP M.B. 1995. Geomorphic response to rapid climatic and hydrologic change during the Last Pleistocene and Early Holocene in the humid and sub-humid tropics. *Quaternary Science Reviews*, **14**: 193-207.
- USSAMI N., SHIRAIWA S., DOMINGUEZ J.M.L. 1999. Basement reactivation in a sub-Andean foreland flexural bulge: the Pantanal wetland, SW Brazil. *Tectonics*, **18**(1): 25-39.
- ZAVATTINI J.A. 1992. Dinâmica Climática no Mato Grosso do Sul. *Geografia (Rio Claro)*, **17**(2): 69-95.