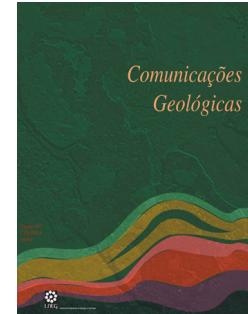


Morfodinâmica de sistemas eólicos costeiros: um modelo baseado em exemplos do Holocénico brasileiro e seu potencial interpretativo

Morphodynamics of coastal aeolian systems: a model based on Holocene Brazilian examples and its interpretative potential

P. C. F. Giannini^{1*}, A. O. Sawakuchi¹, V. R. Mendes¹; A. Zular¹, H. A. A. Andrade¹, C. T. Martinho², C. C. F. Guedes³, D. R. Nascimento Jr.⁴, A. P. B. Tanaka⁵, M. Fornari⁶



Artigo Curto
 Short Article

© 2014 LNEG – Laboratório Nacional de Geologia e Energia IP

Resumo: A morfodinâmica de sistemas eólicos costeiros é controlada pelo saldo sedimentar relativo, i.e., relação entre saldo absoluto (influxo-efluxo) e espaço de acumulação. Este espaço delimita-se pela extensão da área fonte e pelas dimensões de equilíbrio ou saturação: distância no rumo do vento (D_{eq}) e altura (H_{eq}) dentro das quais o saldo influxo-efluxo permaneça positivo. Rumo sotavento, os sistemas eólicos costeiros do Brasil dividem-se em três associações de elementos morfológicos: praia-duna (dunas frontais, protodunas e lençóis de areia); planície deflacionar (rupturas de deflação, rastros residuais, retrocordões e dunas parabólicas); e campo de dunas livres (barcans e barcanoides, com papel de elevar a acumulação até H_{eq} , mais cordões de precipitação e lobos deposicionais, com função de estendê-la até D_{eq}). Eles podem ser classificados de acordo com as associações de elementos envolvidas na satisfação do equilíbrio entre sedimento disponível e energia do vento (ou entre influxo e efluxo). Desdobram-se assim em quatro categorias, conforme esse equilíbrio seja alcançado na associação praia-duna, na relação entre as associações praia-duna e planície de deflação, na relação entre praia-duna, planície de deflação e campo de dunas ou na relação direta entre praia-duna e campo de dunas. Do detalhamento destas relações, saem oito tipos morfodinâmicos de sistemas eólicos propostos neste trabalho, numerados de 1 a 8 em grau crescente de saldo sedimentar relativo. Submetido a desequilíbrios próximos do equilíbrio, o sistema eólico responde no sentido oposto ao da perturbação, em reação de retroalimentação negativa ou auto-regulação. Já em desequilíbrios muito distantes do equilíbrio, sua resposta é de retroalimentação positiva ou auto-organização, com transformação instantânea de um tipo de sistema em outro, em que a retenção de areia seja menor, caso o saldo sedimentar relativo tenha caído, ou maior, caso tenha crescido.

Palavras-chave: Sistema eólico costeiro, Teoria de sistemas, Classificação de dunas, Morfodinâmica eólica, Holocénico.

Abstract: The morphodynamics of coastal aeolian systems is controlled by the relative sedimentary balance, *i.e.*, the ratio between absolute sediment balance (influx-efflux) and accumulation space. The accumulation space depends on source area extension as well as on the equilibrium (sand saturation) dimensions: the distance along wind direction (D_{eq}) and the height (H_{eq}) in which the balance influx-efflux keeps positive. The morphologic elements identified in the Brazilian+ coastal aeolian systems are organized in three associations: beach-dune (foredunes, protodunes and sand sheets); deflation plain (blowouts, trailing ridges, gegenwalle and parabolic dunes); and dune field (barchans and barchanoid chains, with the role

of raise the accumulation until H_{eq} , and precipitation ridges and depositional lobes, whose function is to deposit sand until D_{eq}). The Brazilian coastal aeolian systems can be divided in four categories as for the element associations involved in the energy/supply equilibrium. This equilibrium can be satisfied in the beach-dune association, in the relation between beach-dune and deflation plain associations, in the relation among beach-dune, deflation plain and dune field associations or in the direct passage from beach-dune to dune field. Detailing these four categories, eight morphodynamic types of aeolian systems are proposed in this work, numbered from 1 to 8 in crescent order of relative sedimentary budget. When submitted to disequilibrium near equilibrium, the aeolian system responds in the opposite direction to the perturbation, in a typical negative feedback or self-regulation reaction. When the perturbation is far from the equilibrium, the aeolian system response is a positive feedback or self-organization, that consists in the instantaneous transformation from a morphodynamic stage to other in which the sand retention is minor if the relative sedimentary balance have fallen, or major if the relative sedimentary balance have risen.

Keywords: Aeolian coastal system, Systems theory, Classification of dunes, Aeolian morphodynamics, Holocene.

¹Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Rua do Lago, 562, São Paulo-SP, Brasil, CEP 05508-080.

²Pontifícia Universidade Católica, Porto Alegre, RS.

³Universidade Federal de São Paulo, Santos, SP.

⁴Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, PE.

⁵Petrobrás – Petróleo Brasileiro S.A., Rio de Janeiro, RJ; 6- Universidade Estadual Paulista, São Vicente, SP.

*Autor correspondente / Corresponding author: pcgianni@usp.br

1. Introdução

O objetivo deste trabalho é apresentar um modelo conceitual para a dinâmica de sistemas eólicos costeiros, compatível com a “teoria geral de sistemas”, e calcado em exemplos brasileiros.

A primeira etapa da descrição de um sistema é sua abordagem como “uma caixa”, domínio do espaço, cujo volume e geometria são determinados por entradas e saídas

e pelas variáveis do meio capazes de exercer controle sobre estas entradas e saídas. Entradas, no caso, correspondem a influxo (deriva eólica efetiva), e saídas, a efluxo (Kocurek & Havholm, 1993). O espaço de estocagem ou de acumulação delimita-se pela extensão da área fonte (prisma intermarés) e pelas dimensões de equilíbrio ou de saturação, isto é, distância no rumo do vento (D_{eq}) e altura (H_{eq}) dentro das quais o saldo influxo menos efluxo (influxo-efluxo) no sistema permaneça positivo. As dimensões de saturação dependem da posição do nível freático relativa à superfície deposicional, controlada pelo clima e pela subsidência, os quais, nos casos costeiros, agem juntos através do nível relativo do mar (NRM).

A segunda etapa da análise de um sistema (item 2 deste trabalho) é a descrição interna ou estrutural. Consiste em reconhecer suas partes constituintes e caracterizar a respectiva distribuição espacial. A descrição das partes só tem sentido quando elas são vistas em grupos, com funções determinadas. Função aqui refere-se a fluxo de sedimentos, devendo portanto seguir-se do proximal para o distal; e partes constituintes refere-se a elementos morfológicos.

A terceira etapa do estudo sistemático (item 3) é a análise de estabilidade, isto é, como o sistema evolui no tempo, em resposta a oscilações em variáveis como aporte e espaço de acumulação.

2. Elementos morfológicos e suas associações

Rumo sotavento, os elementos morfológicos identificados nos sistemas eólicos costeiros do Brasil podem ser divididos, quanto à sua função, em quatro grupos: 1. de estoque inicial (dunas frontais, protodunas, lençóis de areia e dunas sem vegetação de orientação transversal ao vento); 2. de deflação (rupturas de deflação, rastros lineares residuais, retrocordões e dunas parabólicas), com função de separar o estoque inicial (1) do final (3 e/ou 4); 3. de superposição ou cavalgamento (dunas barcans e cadeias barcanoides), com papel de elevar a acumulação até H_{eq} ; e 4. de avanço (cordões de precipitação e lobos deposicionais), com função de estender o campo de dunas, lateral e longitudinalmente, até sua D_{eq} .

Sob condição de desequilíbrio construtivo (influxo maior que efluxo) em dado grupo funcional de elementos morfológicos, o excesso de areia tende a ser consumido na formação e alimentação de grupo a sotavento. Os grupos funcionais constituem domínios espaciais interligados, com posição e morfologia definida dentro do sistema. Sob esse aspecto, guardam estreita relação com associações de fácies deposicionais. Desse modo, os elementos de estoque inicial compõem a associação praia-duna (A); os elementos de deflação reúnem-se na associação planície deflacionar (B); e os elementos de cavalgamento e de avanço definem a associação campo de dunas livres (C). Os sistemas eólicos costeiros podem desdobrar-se em quatro categorias, conforme o equilíbrio entre sedimento

disponível e energia do vento (e entre influxo e efluxo) seja alcançado na associação praia-duna (A), na relação entre a associação praia-duna e a associação planície de deflação (A-B), na relação entre as associações praia-duna, planície de deflação e campo de dunas livres (A-B-C) ou na relação direta entre as associações praia-duna e campo de dunas livres (A-C). Este último caso representa equilíbrio entre influxo e efluxo ainda não atingido (campo de dunas em formação). Destas relações, saem oito estágios ou tipos morfodinâmicos de sistemas eólicos, numerados de 1 a 8 em grau crescente de relação saldo eólico / espaço de acumulação, isto é, saldo eólico relativo (Fig. 1).

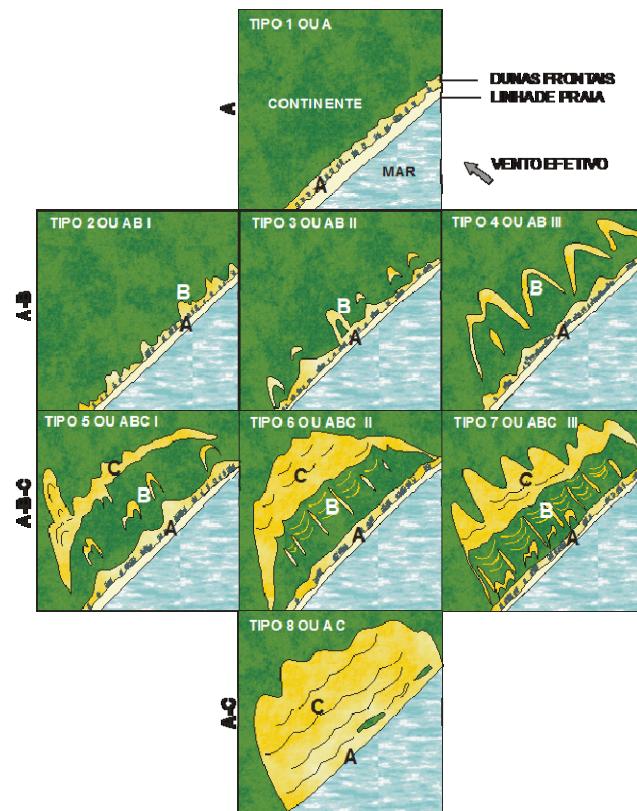


Fig. 1. Tipos de sistemas eólicos costeiros do Brasil, sob vento efetivo transversal à linha de costa. A, B e C são associações de elementos morfológicos: praia-duna, planície deflacionar e campo de dunas livres, respectivamente. Do tipo 1 ao 8, tem-se crescimento no saldo sedimentar eólico relativo (aporte eólico / espaço de acumulação).

Fig. 1. Types of coastal aeolian systems in Brazil under effective wind transverse to the coast line. A, B and C are associations of morphologic elements: beach-dune, deflation plain and dune field, respectively. The relative sedimentary balance (aeolian supply / accumulation space) increases from 1 to 8.

3. Análise de estabilidade do sistema

3.1. Desequilíbrios próximos do equilíbrio

Oscilações menores no saldo eólico relativo levam a desequilíbrios próximos do equilíbrio, aos quais o sistema responde no sentido oposto ao da perturbação, numa

reação de retroalimentação clássica ou negativa (auto-regulação ou resiliência). Por exemplo, se a costa possui comportamento temporário transgressivo, o aumento imediato de saldo relativo provocado pela perda de espaço de acumulação é compensado pela saída de areias eólicas por erosão subaquosa e pelo incremento de coesão nas interdunas. Quanto à arquitetura deposicional, há pelo menos três casos resultantes de auto-regulação. O caso I é de linha de costa estável e equilíbrio ainda não alcançado (Fig. 2a). O caso II é com configuração de equilíbrio alcançada, mas com balanço influxo-efluxo no sistema como todo ainda positivo (Fig. 2b); o sistema mantém-se através da subdivisão em duas porções, separadas por planície de deflação, de modo que a porção mais proximal passe a atuar como fonte para a distal. Pode representar a transformação de um campo de dunas primário (derivado diretamente da praia) em secundário, com re-estocagem de areia eólica na forma de um novo campo de dunas primário em iniciação (Fig. 2b). No caso III, sob D_{eq} atingida e saldo influxo-efluxo no sistema nulo, a porção interior do sistema passa simplesmente a migrar (Fig. 3a). Esta migração leva ao distanciamento desta parte do sistema, em relação à área fonte, além da D_{eq} e, a médio prazo, à sua estabilização. Ao mesmo tempo, um novo foco de deposição eólica ativo tende a surgir junto à praia. Uma possibilidade de caso III é o recuo das fácies de avanço durante regressão da linha de costa (Fig. 3b), numa geometria que poderia ser confundida com a de planície de cordões litorâneos clássica (Martinho *et al.*, 2010).

3.2. Desequilíbrios distantes do equilíbrio

Quando o sistema é submetido a mudanças drásticas na relação entre influxo e efluxo e/ou no espaço de acumulação, tem-se um desequilíbrio muito distante do equilíbrio, ao que ele reage por retroalimentação positiva (auto-organização; evolução espontânea ou transitória). Corresponde à transformação do sistema eólico de um tipo em outro em poucos anos a séculos, portanto em processo instantâneo na escala de tempo geológica. Sob condição de

saldo sedimentar específico decrescente (queda absoluta do saldo influxo-efluxo e/ou aumento absoluto de espaço), a reação consiste em deslocar o sistema para um novo equilíbrio dinâmico, em que a retenção de areia seja menor, portanto para estágio morfodinâmico de número inferior na figura 1. Se a linha de costa regide irreversivelmente, por exemplo, parte da areia que antes se encontrava em circulação no sistema praia-duna passa a ser consumida para a construção dos elementos subaquosos progradantes, o que diminui a disponibilidade de areia para o sistema eólico, ao mesmo tempo em que amplia o espaço de acumulação; neste caso, a reação do sistema é deslocar-se para estágio compatível com menor consumo de areia eólica, como aparentemente ocorre, nos últimos 60 anos, em vários setores costeiros do Sul do Brasil.

Se o saldo sedimentar específico cresce bruscamente, a reação consiste em deslocar o sistema para um novo equilíbrio dinâmico, em que a retenção de areia seja maior, portanto para estágio morfodinâmico de número superior. Reconhecem-se aí três novos casos de construção de arquitetura deposicional. I. Sob aumento abrupto de aporte (por exemplo, crescimento exponencial do aporte eólico absoluto), aumenta a D_{eq} e somem gradativamente as planícies deflacionares. II. Sob alternância de equilíbrios distintos por variação de espaço de acumulação (linha de costa regressiva em pulsos), pode aparecer padrão com cordões de idade intermediária entre (e sob) os campos de dunas sucessivos (Fig. 4). É assim em Campos Verdes, Laguna (Tanaka *et al.*, 2009) e na enseada da Pinheira, em SC (Hesp *et al.*, 2009). III. Com transgressão acentuada, por subida de NRM ou erosão costeira, a arquitetura é caracterizada por inundação das fácies mais proximais e redução da área de acumulação, com concentração do aporte eólico e aumento da saturação sedimentar (Fig. 5). A tendência é o crescimento ascendente da representatividade de fácies de cavalgamento e avanço, principalmente em relação a fácies de deflação, e a deposição de fácies subaquosas sobre fácies de deflação.

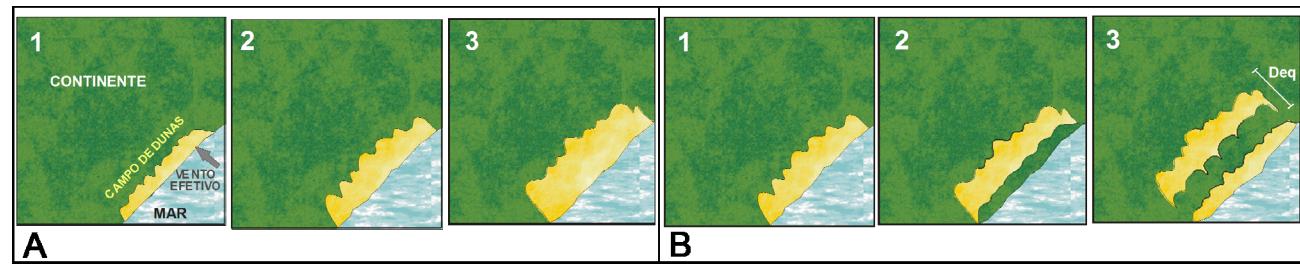


Fig. 2. Evolução de campos de dunas por auto-regulação (de 1 para 3). A. Caso I: configuração de equilíbrio ainda não atingida. B. Caso II: configuração de equilíbrio alcançada, com saldo influxo-efluxo positivo.

Fig. 2. Evolution of dune fields by self-regulation (from 1 to 3). A. Case I: equilibrium configuration not reached yet. B. Case II: equilibrium configuration reached, with positive influx-efflux balance.

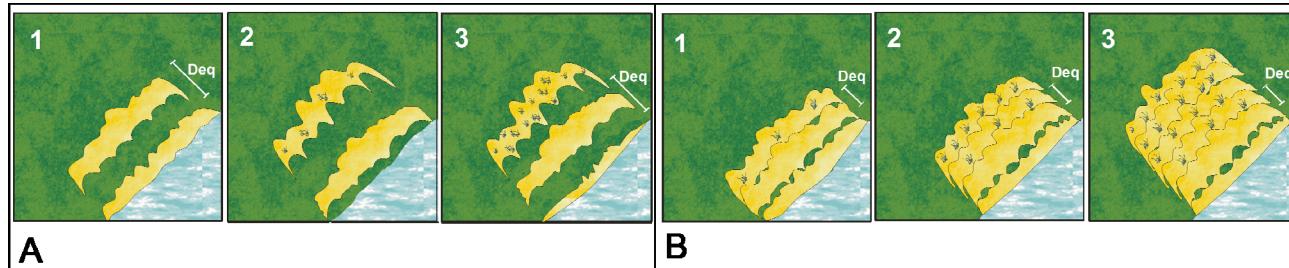


Fig. 3. Evolução de campos de dunas por auto-regulação (de 1 para 3). Caso III: configuração de equilíbrio atingida, e saldo influxo-efluxo nulo. A. Com linha de costa estável. B. Com linha de costa ligeiramente regressiva.

Fig. 3. Evolution of dune fields by self-regulation (from 1 to 3). Case III: equilibrium configuration reached, with null influx-efflux balance. A. With stationary coast line. B. With slightly regressive coast line.

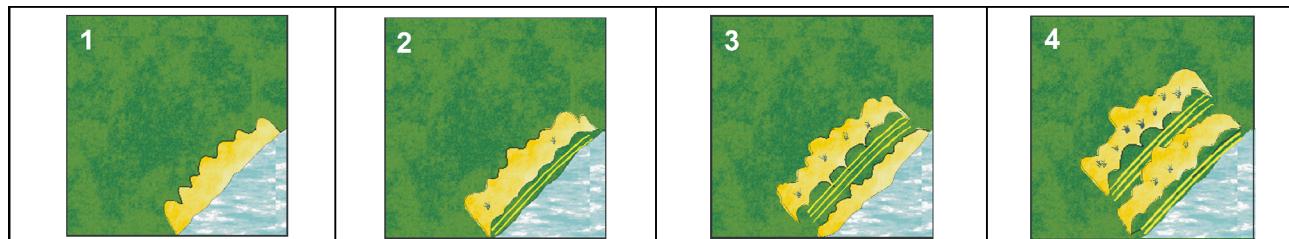


Fig. 4. Evolução de campo de dunas por auto-organização (de 1 para 4), com alternância de equilíbrios distintos por variação de espaço de acumulação (linha de costa regressiva em pulsos).

Fig. 4. Evolution of dune fields by self-organization (from 1 to 4) with variations in the accumulation space (regression pulses).

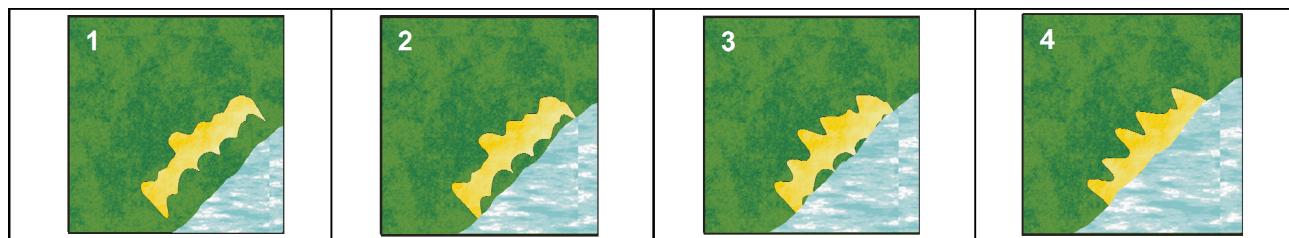


Fig. 5. Evolução de campo de dunas por auto-organização (de 1 para 4), com transgressão acentuada, induzida por subida de nível do mar ou erosão costeira.

Fig. 5. Evolution of dune fields by self-organization (from 1 to 4), with rapid transgression induced by relative sea level rise or coastal erosion.

4. Considerações finais: potencial interpretativo do modelo apresentado

Se o padrão identificado de mudança do sistema eólico em dado intervalo de tempo é de auto-regulação, interpreta-se que as variáveis controladoras do aporte eólico relativo mantiveram-se constantes no decorrer desse intervalo. Apesar disto, variações de distância de equilíbrio ou de tipologia do sistema de uma porção da costa para outra

podem ocorrer e indicar que o aporte eólico varia ao longo da costa. Na maioria dos casos, este aporte aumenta para onde convergem a deriva litoral e/ou as frentes de ondas e onde a praia fica mais dissipativa.

Se o padrão de variação no tempo é de auto-organização, as mudanças na tipologia de sistema podem refletir alterações nas grandes variáveis controladoras, como aporte, NRM e ventos, todas ligadas ao clima. Isto é especialmente provável onde e quando estas mudanças

possuem expressão regional. Exemplo é a redução de saturação sedimentar nos últimos 60 anos no Sul do Brasil, que coincide com período de mais humidade e ventos mais fracos. No Nordeste do país, esta estabilização de dunas em tempo histórico não é evidente, talvez pelo suposto padrão climático antifásico com o Sul.

Em escala mais abrangente, de Holocénico superior, uma mudança brusca na tipologia do sistema eólico de dunas frontais para tipos mais saturados observa-se tanto no Nordeste, como no Sul e no Sudeste. A correlação entra estas variações bruscas no tipo de sistema eólico costeiro, ainda a ser feita via datações, provavelmente ajudará a compreender as mudanças climáticas no Quaternário e a aprimorar o uso do registro eólico costeiro como indicador ambiental.

Por outro lado, o modelo aqui apresentado sugere que aumentos na saturação do sistema eólico podem resultar tanto do fator climático quanto da estabilização da linha de costa. O próximo desafio para a aplicação deste modelo é portanto distinguir entre estes dois efeitos e avaliar em que casos eles se superpõem e em que casos eles agem em sentidos opostos.

Agradecimentos

À FAPESP (2009/54232-4).

Referências

- Hesp, P.A., Giannini, P.C.F., Martinho, C.T., Miot Da Silva, G., Asp Neto, N.E., 2009. The Holocene barrier system of the Santa Catarina coast, Southern Brazil. In: S.R. Dillenburg, P.A. Hesp, (Eds). *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil*. Berlin – Heidelberg, Springer, 93-134.
- Kocurek, G., Havholm, K.G., 1993. Elolian Sequence Stratigraphy – A Conceptual Framework. In: *Siliciclastic Sequence Stratigraphy*, 393-409. *AAPG Memoir*, **58**.
- Martinho, C.T., Hesp, P.A., Dillenburg, S.R., 2010. Morphological and temporal variations of transgressive dunefields of the northern and mid-littoral Rio Grande do Sul coast, Southern Brazil. *Geomorphology*, **117(1/2)**, 14-32.
- Tanaka, A.P.B., Giannini, P.C.F., Fornari, M., Nascimento, D.R., Jr., Sawakuchi, A.O., Rodrigues, S.I., Menezes, P.M.L., De Blasis, P., Porsani, J.L., 2009. A planície costeira holocênica de Campos Verdes (Laguna, SC): evolução sedimentar inferida a partir de georadar (GPR), granulometria e minerais pesados. *Revista Brasileira de Geociências*, **39(4)**, 750-766.