Pesquisas em Geociências

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias>

Fácies, Associação de fácies e Modelo Depositional dos Arenitos Eólicos da Formação Botucatu (Cretáceo Inferior) na Região Sul de Santa Catarina

Fernanda Guilardi da Silva, Claiton Marlon dos Santos Scherer

Pesquisas em Geociências, 27 (2): 15-30, set./dez., 2000.

Versão online disponível em:

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/20187>

Publicado por

Instituto de Geociências

Portal de Periódicos
UFRGS

UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL

Informações Adicionais

Email: pesquisas@ufrgs.br

Políticas: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/editorialPolicies#openAccessPolicy>

Submissão: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#onlineSubmissions>

Diretrizes: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#authorGuidelines>

Data de publicação - set./dez., 2000.

Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

Fácies, Associação de fácies e Modelo Depositional dos Arenitos Eólicos da Formação Botucatu (Cretáceo Inferior) na Região Sul de Santa Catarina

FERNANDA GUILARDI DA SILVA & CLAITON MARLON DOS SANTOS SCHERER

Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Caixa Postal 15001 CEP 91501-970
Porto Alegre RS, Brasil. E-mail: guilardi@if.ufrgs.br ; cscherer@portoweb.com.br

(Recebido em 05/00. Aceito para publicação em 09/00)

Abstract - Investigations of eolian deposits of Botucatu Formation situated at the southern portion of Santa Catarina State allowed the detailed facies characterization of the unit. In this area, the Botucatu Formation is thicker than adjacent areas, with packages that vary between 80 and 200 meters thick. The lower contact is an unconformity that removed deposits of the Rio do Rasto Formation (Permian). The upper contact is concordant with the basalts of the Serra Geral Formation. It is possible to individualize two litofacies: fine to coarse-grained sandstone with planar large scale cross stratification (ACGP) and fine to medium-grained sandstone with concave up medium scale cross stratification (ACMP). These litofacies compose only one facies association that consists of ACGP facies sets and locally by ACMP facies grouped sets. These deposits can be interpreted as resulting of simple crescentic dunes migration with straight to slightly sinuous crest line that locally develops secondary crescentic dunes in frontal face. The absence of wet interdune deposits led to the interpretation that the Botucatu Formation is the record of a dry eolian system. The thick accumulation of eolian dunes and wind pattern inflection along a preferential direction allowed to infer that the analyzed area was in the domain of a topographically depressed region, controlled by NW-SE faulting system related to the initial break up of the Gondwanaland.

Keywords - Botucatu Formation, eolian processes deposits, eolian depositional system, Gondwanaland

INTRODUÇÃO

Os estratos eólicos da Formação Botucatu (Gonzaga Campos, 1889) estão expostos sobre uma área de aproximadamente 1.300.000 km² da Plataforma Sul-Americana, abrangendo extensas áreas no Brasil (Bacia do Paraná), Paraguai, Argentina e Uruguai, e correspondem a depósitos de um extenso paleodeserto de clima quente e árido. Almeida (1954) considera esta unidade como o maior depósito eólico contínuo do mundo. Milani *et al.* (1998) apontam a Formação Botucatu como o registro da máxima expansão da sedimentação da Bacia do Paraná durante o Mesozóico. Até o presente momento, poucos estudos de detalhe enfocando a faciologia da Formação Botucatu foram realizados (Bigarella & Salamuni, 1961; Bigarella, 1973 e Bigarella, 1979). Recentemente, Scherer (1998) efetuou uma análise detalhada das características litofaciológicas da Formação Botucatu no Estado do Rio Grande do Sul, aplicando conceitos da estratigrafia de seqüência.

As boas exposições desta unidade ao longo da porção sul de Santa Catarina constituem um ex-

celente laboratório para a análise do registro estratigráfico de sistemas eólicos secos (terminologia de Kocurek & Havholm, 1993) e caracterização morfológica do tipo de duna. Além disso, a área estudada apresenta anomalias em relação à espessura dos pacotes eólicos da Formação Botucatu e um padrão de dispersão das paleodunas que difere substancialmente daqueles obtidos nos arredores (Bigarella & Salamuni, 1961). Com isto faz-se necessário uma análise detalhada desta região para o melhor entendimento da evolução do *paleoerg* Botucatu.

Este trabalho enfatiza (1) reconhecimento e descrição de litofácies eólicas, (2) identificação das superfícies limítrofes ocorrentes, (3) caracterização de associação de fácies e (4) análise de paleocorrentes. Tais abordagens permitem interpretar os processos sedimentares, reconstruir os tipos de forma de leito dominante neste sistema eólico.

ESTRATIGRAFIA

A Formação Botucatu apresenta uma distribuição contínua na Bacia do Paraná, conforme atestam os dados de afloramentos (Fig. 1) e de

subsuperfície, com uma espessura máxima de 400 m no norte da bacia (Milani, 1997). No que diz respeito à estratigrafia, a Formação Botucatu posiciona-se sobre uma discordância de caráter regional. Nos afloramentos do norte de São Paulo e Minas Gerais, a Formação Botucatu está disposta diretamente sobre o embasamento cristalino. Nos estados de Mato Grosso e Goiás esta unidade recobre a Formação Furnas, de idade devoniana. Na faixa de afloramentos da borda leste da Bacia do Paraná, a Formação Botucatu ocorre em contato discordante com unidades permianas, mais precisamente com a Formação Pirambóia nos estados de São Paulo e Paraná, e com a Formação Rio do Rasto em Santa Catarina. No Rio Grande do Sul esses arenitos eólicos recobrem diferentes unidades litoestratigráficas (Formação Rio do Rasto, Pirambóia, Santa Maria, Caturrita e Guará), com idades variando do Neopermiano ao Jurássico.

Figura 1 - Área de afloramento da Formação Botucatu e unidades correlatas nas bacias do Paraná e Chaco-Paraná (modificado de Araújo *et al.*, 1995).

O contato superior da Formação Botucatu é concordante com os basaltos da Formação Serra Geral. Sedimentos eólicos intercamadados com os derrames vulcânicos descritos em diferentes localidades da bacia (Almeida & Melo, 1981; Milani, 1997; Scherer, 1998), além das inúmeras feições de interação sedimento/lava descritas por Scherer (*op. cit.*) são indicativas de que o vulcanismo coexistiu com a deposição eólica.

Datações Ar^{40}/Ar^{39} indicam que as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral apresentam uma idade entre 139-128 M.a. oferecendo um referencial geocronológico seguro para o término da sedimentação eólica. Entretanto, a determinação da idade do início da sedimentação é bem mais problemática. Tomando como base os icnofósseis de vertebrados identificados nos estratos eólicos, Bonaparte (1996) atribui uma idade Neojurássica-Eocretácea para a Formação Botucatu, hipótese esta admitida por Milani *et al.* (1998) para a elaboração do arcabouço estratigráfico do Mesozóico da Bacia do Paraná. No entanto, conforme discutido por Scherer *et al.* (2000), as inúmeras feições sedimentológicas e estruturais que indicam a contemporaneidade entre as lavas e os sedimentos e a inexistência de supersuperfície (*sensu* Kocurek, 1988) dentro do pacote eólico, sugere que na porção meridional da Bacia do Paraná, a Formação Botucatu compreende um intervalo de tempo mais reduzido, tendo a acumulação eólica ocorrido no máximo algumas centenas de milhares de anos antes do vulcanismo Serra Geral.

Na região em estudo (folhas topográficas de Praia Grande e Jacinto Machado), a Formação Botucatu compreende uma área de aproximadamente 270 km² (Fig. 2) e apresenta espessuras que variam de 80 m a 200 m (em média 100 m), sendo que os maiores valores são observados na porção sul da área estudada. Como em outras porções da bacia, a Formação Botucatu exposta na área de estudo, é limitada na base por uma discordância regional desenvolvida sobre depósitos permianos flúvio-lacustres da Formação Rio do Rasto. O contato superior acha-se encoberto pela vegetação e por depósitos de leques aluviais recentes. Porém afloramentos próximos da área de estudo, como por exemplo Torres (RS) e a Serra do Corvo Branco (SC), registram uma interdigitação entre os depósitos eólicos e os derrames basálticos da Formação Serra Geral (Milani, 1997; Scherer, 1998), similarmente ao observado em outros setores da bacia.

Figura 2 - Área de estudo da presente pesquisa e mapa geológico simplificado.

Figura 3 - Litofácies ACGP composta por arenitos com estratificação cruzada planar de grande porte (a). Numa visão em planta os estratos são retos e com grande continuidade lateral (b).

LITOFÁCIES

Arenitos com Estratificação Cruzada de Grande Porte (ACGP)

Descrição – Os arenitos com estratificação cruzada de grande porte (ACGP) (Fig. 3) são dominantes em relação à litofácies ACMP, que será posteriormente descrita. Basicamente, esta litofácies é constituída por arenitos finos a grossos, bem selecionados, com grãos arredondados e de alta esfericidade, coloração rosa avermelhado, por vezes branco ou bege, apresentando estratificação cruzada planar ou tangencial de grande porte (Fig. 3a). Estes ocorrem na forma de *sets* de 5 a 10 m de espessura e extensão lateral de até 150 m, sendo esta a medida máxima de exposição nos afloramentos. Numa visão em planta, os estratos são retos a suavemente curvos e apresentam uma grande continuidade lateral (Fig. 3b). Os

estratos cruzados, quando analisados em conjunto, apresentam uma dispersão no sentido de paleocorrente 333° a 135° com um vetor médio para E (089°).

Os estratos cruzados são caracterizados pela presença de laminações cavalgantes transladantes e, subordinadamente, depósitos de fluxos de grão. As laminações cavalgantes transladantes (Fig. 4) perfazem 85 a 90% do total de estratos que compõem a litofácies ACGP. São compostas por arenitos finos a grossos, moderadamente selecionados, que se apresentam sob a forma de lâminas milimétricas de 1 a 7 mm, com valores médios em torno de 3 a 5 mm, descontínuas e com geometria lenticular, sendo o contato basal abrupto e erosivo (Fig. 4a). Por vezes, estas laminações estão dispostas em estratos tabulares e com grande continuidade lateral. Internamente é possível observar que os estratos arranjam-se em gradação inversa. Esta gradação inicia na base com arenito fino de coloração bege ou rosa claro e em

direção ao topo grada para um arenito médio a grosso de coloração vermelho escuro (Fig. 4b). Laminações cavalgantes transladantes apresentam mergulhos que variam de 15° a 23°. Os maiores valores são encontrados, geralmente, em direção ao topo dos *sets*.

Estratos de fluxo de grãos (Fig. 5) perfazem 10 a 15% dos estratos que compõem a litofácies ACGP. São constituídos por arenitos médios a grossos, bem selecionados, de coloração rosa claro a esbranquiçado. Depósitos individuais ocorrem sob a forma de cunhas quando vistas num corte paralelo ao mergulho dos *foresets* ou então como lentes quando vistas num corte transversal (Fig. 5a) e, devido a esta geometria, são facilmente reconhecidos em campo. A espessura destes estratos varia de 3 até 11 cm, com um valor médio entre 4 e 6 cm, sendo seu contato inferior abrupto, reto e erosivo. Internamente são homogêneos ou então apresentam

gradação inversa incipiente, compondo um arcabouço frouxo (Fig. 5b). Estratos de fluxo de grãos dispõem-se preferencialmente nas porções de topo dos estratos cruzados e são separadas por laminações cavalgantes transladantes. Esta interdigitação de estratos perdura em direção à base dos *sets*, onde a espessura dos depósitos de fluxo de grãos diminui progressivamente até tornar-se praticamente inexistente e as laminações transladantes cavalgantes passam a ocorrer com maior frequência. Tais feições podem ser melhor observadas em cortes paralelos ao mergulho dos estratos (Fig. 6). O mergulho dos estratos de fluxo de grão varia de 20 a 28°, com um valor médio de 23°.

Interpretação – A presença de arenitos finos a grossos, bem selecionados, com grãos bem arredondados e de alta esfericidade, juntamente com estratificação cruzada de grande porte composta por laminações cavalgantes transladantes e de fluxos de grão, indica

Figura 4 - Laminações cavalgantes transladantes compostas por arenitos finos a grossos dispostos em lâminas com espessura em torno de 3 a 5 mm e com geometria lenticular (a). Internamente os estratos arranjam-se em gradação inversa (b).

A

B

Figura 5 - Estratos de fluxo de grãos compostos por arenitos médios a grossos que ocorrem na forma de lentes, vistos em corte transversal ao mergulho dos *foresets* (a). Internamente são homogêneos (b) ou apresentam gradação inversa incipiente.

a migração e deposição de dunas eólicas. A ocorrência de estratificação cruzada planar sugere formas de leito crescentes de crista reta a levemente ondulada. A presença de estratos produzidos por fluxo de grãos indica dunas eólicas com faces de escorregamento bem desenvolvidas, embora tais depósitos constituam apenas uma pequena porção se comparado com as laminações cavalgantes transladantes. Isso pode estar relacionado ao fato de que a proporção atribuída para este tipo de depósito pode não corresponder à quantidade real e sim somente à porção preservada. Como tais depósitos tendem a ocorrer na parte superior de uma duna, a tendência é de que apenas uma pequena porcentagem seja incorporada no registro, visto que somente a porção basal da duna é preservada. Segundo Rubin & Hunter (1982), depósito do tipo fluxo de grãos somente alcança as porções basais dos *sets* no caso de paleodunas pequenas.

É importante ressaltar que a associação de estratos gerados por fluxo de grãos com aquelas

Figura 6 - Disposição dos estratos de fluxos de grãos que gradam lateralmente para laminações transladantes cavalgantes nas litofácies ACGP.

geradas pela migração de *ripples* eólicas, demonstra que a face de escorregamento sofreu retrabalhamento decorrente da ação de ventos secundários.

Interpretação – A presença de arenitos finos a grossos, bem selecionados, com grãos bem arredondados e de alta esfericidade, juntamente com estratificação cruzada de grande porte composta por laminações cavalgantes transladantes e de fluxos de grão, indica a migração e deposição de dunas eólicas. A ocorrência de estratificação cruzada planar sugere formas de leito crescentes de crista reta a levemente ondulada. A presença de estratos produzidos por fluxo de grãos indica dunas eólicas com faces de escorregamento bem desenvolvidas, embora tais depósitos constituam apenas uma pequena porção se comparado com as laminações cavalgantes transladantes. Isso pode estar relacionado ao fato de que a proporção atribuída para este tipo de depósito pode não corresponder à quantidade real e sim somente à porção preservada. Como tais depósitos tendem a ocorrer na parte superior de uma duna, a tendência é de que apenas uma pequena porcentagem seja incorporada no registro, visto que somente a porção

basal da duna é preservada. Segundo Rubin & Hunter (1982), depósito do tipo fluxo de grãos somente alcança as porções basais dos *sets* no caso de paleodunas pequenas.

É importante ressaltar que a associação de estratos gerados por fluxo de grãos com aquelas geradas pela migração de *ripples* eólicas, demonstra que a face de escorregamento sofreu retrabalhamento decorrente da ação de ventos secundários.

Arenito com Estratificação Cruzada de Médio Porte (ACMP)

Descrição – A litofácies ACMP ocorre de maneira muito restrita nos limites da área pesquisada, restringindo-se à porção nordeste da folha de Praia Grande, onde é composta por arenitos finos a médios de cor rosa claro a avermelhado, bem selecionados, com grãos arredondados e de alta esfericidade. Apresenta estratificação cruzada acanalada de médio porte (Fig. 7), disposta em *sets* de 1,5 a 3 m de espessura e extensão lateral em média de 5m, chegando até 30 m, sendo esta a exposição máxima dos afloramentos.

Os *foresets* possuem geometria tangencial e direção de mergulho para NE (028°). São constituídos exclusivamente por laminações cavalgantes transladantes. As lâminas possuem uma espessura de 2 a 4 mm e estendem-se lateralmente por 0,5 a 1,5 m. Internamente ocorre gradação inversa, caracterizada por arenito fino de coloração rosa claro na base, que grada para arenito médio de coloração rosa escuro no topo.

Interpretação – A ocorrência de arenitos finos a grossos, bem selecionados, com grãos arredondados e de alta esfericidade, juntamente com estratificação cruzada composta por laminações cavalgantes transladantes, indica a migração e deposição de

Figura 7 - Litofácies ACMP composta por arenitos com estratificação cruzada acanalada de médio porte.

dunas eólicas. A presença de estratificação cruzada acanalada sugere formas de leito crescentes de crista curva. A ocorrência exclusiva de laminações cavalgantes transladantes indicam dunas eólicas sem uma face de escorregamento bem desenvolvida ou formas de leito severamente truncadas, onde os depósitos de fluxo de grãos não foram preservados.

SUPERFÍCIES LIMÍTROFES

Um dos constituintes essenciais na análise de pacotes eólicos são as superfícies limítrofes dos estratos cruzados. A análise das diversas exposições de estratos eólicos permitiu a individualização de três tipos de superfícies que seguem uma ordem hierárquica conforme a definição proposta por Brookfield (1977).

Superfícies de 3ª ordem – As superfícies de 3ª ordem, ou superfícies de reativação, identificadas na área em estudo, separam pacotes de *foresets* que possuem discretas mudanças no sentido de mergulho. Essas superfícies são retas a levemente curvas e mergulham na mesma direção, mas em ângulos sensivelmente mais baixos do que os estratos cruzados, gerando suaves truncamentos (Fig. 8). Não foram observadas as relações de truncamento com outros tipos de superfícies limítrofes.

As superfícies de 3ª ordem são interpretadas como formadas por flutuações na velocidade ou direção do vento, as quais resultaram na erosão da face frontal da duna, truncando os estratos adjacentes (Kocurek, 1991). Um estudo pormenorizado deste tipo de superfície, utilizando seções de Radar de Penetração em Solo (*Ground-Penetrating Radar* – GPR) podem ser encontrados em Silva, 2000; Silva & Scherer, 2000 e Silva *et al.*, 2000.

Superfícies de 2ª ordem – As superfícies de 2ª ordem ocorrem de forma muito restrita na área em estudo. Estas superfícies separam *sets* individuais da litofácies ACMP. Apresentam geometria côncava (Fig. 9) e possuem sentido de mergulho para nordeste.

As superfícies de 2ª ordem, são interpretadas como decorrentes da migração de dunas eólicas superpostas na face frontal de formas de leito principais (Kocurek, 1991).

Superfícies de 1ª ordem – Este tipo de superfície separa *sets* de arenitos com estratificação cruzada de grande porte (Fig. 10). O mergulho destas superfícies varia de aproximadamente horizontal até 8° definindo um padrão suavemente ondulado.

Figura 8 - Superfície erosiva interpretada como de 3ª ordem (reativação). Cada marca da barra corresponde a 0,5 m.

As superfícies de 1ª ordem são interpretadas como originadas a partir da migração e cavalgamento do campo de dunas. Marcam a movimentação de dunas eólicas simples ou *draas*.

ASSOCIAÇÃO DE FÁCIES

Foi identificado, na porção meridional de Santa Catarina, uma única associação faciológica de dunas eólicas. Essa associação é composta por *sets* de arenitos com estratificação cruzada de grande porte (ACGP) limitadas por superfícies de 1ª ordem que apresentam uma geometria suavemente ondulada e podem ser rastreadas por uma grande extensão lateral (Fig. 11).

Por vezes, podem ser observados *sets* agrupados da litofácies ACMP dentro da litofácies ACGP. Separando os *sets* de estratos cruzados, ocorrem superfícies de 2ª ordem com geometria côncava e com mergulho nunca superior a 18°. Os estratos da forma de leito principal possuem uma direção de mergulho para ESE (106°), enquanto as dunas superpostas apresentam um sentido de mergulho para NNE (028°).

A configuração acima descrita permite-nos classificar a associação faciológica como resultante do desenvolvimento de dunas crescentes simples a localmente compostas (*draas*), com uma linha de crista reta a suavemente ondulada. A diferença, de cerca de 80°, no sentido de paleocorrente indica que

Figura 9 - Superfície erosiva de 2ª ordem separando *sets* de estratos cruzados da litofácies ACMP. Essas superfícies são interpretadas como resultantes do cavalgamento de dunas crescentes menores na face frontal de uma forma de leito maior. Cada marca da barra corresponde a 0,5 m.

Figura 10 - Superfície erosiva de 1ª ordem separando dois *sets* de estratos cruzados (litofácies ACPG), interpretada como resultante da migração e cavalgamento de dunas eólicas simples ou *draas*.

Figura 11 - Superfície de 1ª ordem (indicada nas fotos por setas brancas) rastreada através da localidade de Costãozinho.

as dunas superpostas (ACMP) migravam aproximadamente paralelas à linha de crista da forma de leito principal (ACGP). A interpretação morfológica das dunas crescentes simples é corroborada por dados de GPR, conforme discutido por Silva, 2000; Silva & Scherer, 2000.

A geometria ondulada das superfícies de 1ª ordem indica que as formas de leito principais migravam fora de fase umas em relação às outras (Rubin, 1987 – figura 34A).

ANÁLISE DE PALEOCORRENTES E INFERÊNCIAS SOBRE O PADRÃO DE VENTOS

Os *foresets* das dunas eólicas da Formação Botucatu apresentam comumente direções de mergulho unidirecionais, quando as formas de leito são analisadas individualmente. No entanto, verifica-se uma significativa variação quando são considerados os valores de toda a região estudada. A figura 12 apresenta o estereograma com as medidas de direção do mergulho dos *foresets* obtidas apenas nas dunas simples. Os dados apresentam uma dispersão que varia de NNW (333°) até SE (135°). Essas medidas indicam um vetor médio de paleocorrentes das dunas principais (litofácies ACGP) para E (089°), embora se observe um transporte secundário para NNE marcado pelo sentido de migração das dunas secundárias (litofácies ACMP).

Se compararmos os dados de paleocorrentes da área estudada com os dados de localidades circundantes (Bigarella & Salamuni, 1961; Bossi *et al.*,

Figura 12 - Estereograma com as paleocorrentes medidas a partir do mergulho dos *foresets* das dunas eólicas principais (litofácies ACGP).

1978), como Torres no Rio Grande do Sul e diversas localidades nas regiões central e norte de Santa Catarina, é possível observar uma mudança no vetor médio do sentido de mergulho dos estratos cruzados. Enquanto na região meridional de Santa Catarina os valores são para E, as áreas adjacentes possuem um vetor médio para NE.

Bigarella & Salamuni (1961) reúnem 2892 medidas de paleocorrentes em 51 afloramentos distribuídos no Brasil (Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo e Minas Gerais) e no Uruguai. Os dados levantados por estes autores indicam que a região da presente pesquisa apresenta uma anomalia em relação aos valores médios de paleocorrentes. Na região de Jacinto Machado foram obtidas 53 medidas que apresentam uma dispersão média para SE (099°), semelhante aos resultados obtidos na presente pesquisa. No entanto, medidas da região norte de Santa Catarina apresentam uma dispersão média para NE (004°, 049°, 072°), ocorrendo o mesmo na região central do Estado de Rio Grande do Sul (040°, 061°, 075°).

Outro trabalho que atesta esta anomalia é o de Bossi *et al.* (1978), que, ao realizarem uma análise das paleocorrentes da Formação Botucatu na faixa costeira norte do Rio Grande do Sul, concluem que a população amostrada apresenta diferenças marcantes não só no sentido norte-sul, mas também no sentido leste-oeste. Enquanto a região de Osório, Rolante e Barra do Ouro (distante aproximadamente 60 km de Praia Grande) apresenta uma dispersão média do mergulho dos *foresets* para NE (075°), a região de Maquiné e Torres apresenta valores para SE (115°). Quando é feita uma comparação com estudos realizados na área imediatamente a oeste, que abrange a região de Novo Hamburgo, São Leopoldo, Taquara, Montenegro e Gravataí (Bossi *et al.*, 1977), que apresentam valores médios de paleocorrentes para NE (034°), percebe-se uma mudança gradativa em sentido horário destas médias. Para explicar tal fato Bossi *et al.* (1978) sugerem a existência de uma particularidade local que cause esta inflexão. Se compararmos estas medidas com aquelas obtidas no presente trabalho, percebe-se um desvio das médias não só de oeste para leste, como também para norte.

Os modelos paleoclimáticos indicam que as dunas eólicas da Formação Botucatu na porção meridional da Bacia do Paraná encontravam-se dentro da faixa de atuação dos ventos *westerlies*, onde o sentido predominante do vento sopravam de SW

(cf. Scherer, 2000), conforme atestam as paleocorrentes das dunas eólicas para NE no Rio Grande do Sul (069°) e Norte de Santa Catarina (049°, 072°). No entanto, conforme discutiu-se anteriormente, a área estudada possui um vetor médio de paleocorrentes para 089°, apresentando uma diferença de cerca de 30° em relação às áreas adjacentes. Uma das hipóteses usadas para explicar diferenças marcantes no padrão de direções de mergulho de estratos correlacionados, em localidade próximas, é a interação entre os ventos e a topografia local (Lancaster, 1983; Blakey, 1988; Havholm & Kocurek, 1988; Bell, 1991). Silva (2000) identifica um sistema de falhas com direção NW-SE, denominado Torres-Posadas, contemporâneo à acumulação eólica da Formação Botucatu. Essa feição topográfica infletiria os ventos regionais para leste, resultando no padrão de migração para 089° das dunas eólicas na área em estudo.

MODELO DEPOSICIONAL

Os depósitos da área estudada são constituídos pelo sucessivo cavalcamento de dunas eólicas crescentes simples a localmente compostas separadas por superfícies de 1ª ordem (Fig. 13) que não apresentam qualquer evidência de interduna úmida ou de qualquer feição indicativa do lençol freático próximo à superfície. Tal fato permite interpretar a associação de fácies da Formação Botucatu, na área em estudo, como um sistema eólico seco.

Segundo Scherer (2000), as condições climáticas extremamente áridas seriam decorrência das configurações paleogeográficas do Gondwana. A presença da cordilheira pré-andina deve ter impedido que os ventos *westerlies* deslocassem umidade para o interior do continente, produzindo uma ampla faixa de aridez e gerando campos de duas eólicas que cobriram grande parte da Plataforma Sul-Americana, cujo registro remanescente na Bacia do Paraná são os depósitos eólicos da Formação Botucatu. Além disso, na borda da cadeia de montanhas, desenvolveu-se um amplo sistema de leques aluviais, que serviram como área fonte das areias das dunas eólicas da Formação Botucatu (Milani, 1997).

A grande disponibilidade de areia seca possibilitou a formação de fluxos saturados ou subsaturados que, por possuírem uma baixa capacidade de transporte, depositaram a carga sedimentar transportada. Esta transferência de sedimento para o substrato promoveu a formação de três diferentes hierarquias

de formas de leito: *ripples* eólicas, dunas eólicas e *draas*. Cada elemento desta hierarquia responde dinamicamente a um componente do regime de vento em uma área e possui um período de tempo característico, denominado tempo de reconstituição ou relaxação (Allen, 1974), sobre o qual a forma de leito se ajustará às mudanças de condições. Segundo Lancaster (1987), *ripples*, a menor forma de leito na hierarquia, têm uma morfologia que é controlada pela natureza dos eventos dinâmicos individuais (períodos de ventos que movimentam areia) de curta duração (horas ou dias). A morfologia das dunas simples e superpostas é governada principalmente por direções e velocidades de ventos com padrões de escala sazonal e pelas mudanças espaciais no vento que atua sobre as formas de leito maiores. O tempo de reconstituição destas dunas está na ordem de 10 a 100 anos. Já as formas de leito maiores em hierarquia, os *draas*, respondem apenas às mudanças no regime geomorfológico geral (*sensu* Jackson, 1975). Elas são insensíveis às mudanças nas condições de fluxo local e podem persistir por 1.000 a 100.000 anos.

Na área pesquisada, o registro eólico estudado é caracterizado pela ausência de acumulação de interdunas planas, como é de se esperar em sistemas eólicos secos. Sweet & Kocurek (1990) explicam esta proposição através da observação de modelos de fluxo de ar em formas de leito, onde ocorre aceleração do fluxo e erosão no dorso, seguida pela desaceleração e deposição na face frontal da duna. Posteriormente, o fluxo retorna a acelerar na região de interduna até que uma nova duna seja alcançada, e o processo recomeça. Desta maneira, toda a areia disponível tende a ser movimentada para as dunas, enquanto as regiões de interdunas passam a ser erodidas, formando as superfícies limítrofes de 1ª ordem.

O cavalcamento de sucessivas dunas eólicas gerou uma espessa acumulação sedimentar quando comparada às regiões adjacentes. Essa acumulação significativa de dunas eólicas deve ter como um dos principais controladores a tectônica local. A área em estudo teve um incremento da taxa de subsidência pela reativação tectônica do Sistema de Falhas Torres-Posadas (Silva, 2000), que acarretou o aumento do espaço de acomodação, possibilitando a preservação de um pacote eólico com espessura superior a 200 m.

O pacote de dunas eólicas da Formação Botucatu na área em estudo não apresenta evidências de supersuperfícies, sugerindo que esses depósi-

Figura 13 - Modelo deposicional da Formação Botucatu para a área em estudo. As dunas eólicas principais (litofácies ACGP) são constituídas predominantemente por *ripples* que intercalam-se, nas porções de topo, com estratos de fluxo de grãos – indicados por setas – (a). O sucessivo cavalgamento das dunas principais, são marcados pelas superfícies de 1ª ordem (b). Por vezes, dunas crescentes menores (litofácies ACMP) migram na face frontal da forma de leito maior (ACGP), gerando superfícies de 2ª ordem (c). Também podem ser identificadas superfícies de 3ª ordem – reativação – (d)

tos representem um único evento de acumulação eólica. A identificação de supersuperfícies no registro geológico constitui um problema prático, principalmente porque são passíveis de serem confundidas com superfícies de 1ª ordem. Apesar disto, algumas características observadas, segundo os critérios sugeridos por Kocurek & Havholm (1993), permitem definir as superfícies de maior hierarquia observadas na área em estudo como de 1ª ordem. No presente caso, o estilo deposicional observado abaixo e acima das superfícies em questão é o mesmo, não havendo mudança nas características faciológicas do sistema eólico, o que dificilmente ocorreria no caso de supersuperfícies. Outro fato que deve ser ressaltado é a extensão local das superfícies observadas. No caso de supersuperfícies é comum constituírem superfícies correlacionáveis ao longo de toda bacia. Também a ausência de concentração de grânulos e de superfícies de deflação não favorece a interpretação de supersuperfícies.

Resumidamente, pode-se dizer que os estratos eólicos estudados representam uma continuidade do sistema eólico seco, já observado e descrito em localidades mais ao sul da bacia, onde dominaram as dunas crescentes simples, que, por vezes, desenvolviam dunas crescentes superpostas em sua face frontal. Todos os depósitos que compõem a Formação Botucatu na porção meridional de Santa Catarina representam um único evento de acumulação (*erg*), estando o término desta sedimentação eólica vinculado ao magmatismo Serra Geral.

CONCLUSÕES

Os depósitos da Formação Botucatu, na porção sul do Estado de Santa Catarina, constituem o registro de um sistema deposicional eólico seco. O pacote correspondente a esta unidade dispõe-se discordantemente sobre os depósitos areno-pelíticos da Formação Rio do Rasto e, nas porções de topo encontra-se em contato concordante com as rochas basálticas da Formação Serra Geral.

A Formação Botucatu apresenta duas litofácies: arenitos com estratificação cruzada planar de grande porte, onde predominam os estratos transladantes cavalgantes sobre estratos gerados por fluxo de grãos; e arenitos com estratificação cruzada acanalada de médio porte composta somente por estratos transladantes cavalgantes.

A associação faciológica é composta por *sets* de arenitos com estratificação cruzada de grande porte que, por vezes, apresentam internamente

sets agrupados de arenitos com estratificação cruzada acanalada de médio porte. Esta configuração indica a ocorrência de dunas crescentes simples a localmente compostas, com o desenvolvimento de dunas superpostas migrando na face frontal das formas de leito principais.

A comparação dos dados de paleocorrentes da área estudada (vetor médio: 089°) com dados de localidades adjacentes (no Rio Grande do Sul e Norte de Santa Catarina o vetor médio tem uma direção NE) permite-nos inferir uma inflexão para E no vetor médio do mergulho dos estratos cruzados, que pode estar relacionada com a interação entre os ventos regionais e o Sistema de Falhas Torres-Posadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, J. R. L. 1974. Reactivation, relaxation and lag in natural sedimentary systems: general principles, examples and lessons. *Earth-Science Reviews* 10:263-342.
- Almeida, F. F. M. 1954. Botucatu, um deserto triássico da América do Sul. DNPM Divisão de Geologia e Mineralogia, *Notas Preliminares e Estudos*, Rio de Janeiro, 86, 21p.
- Almeida, F. F. M. & Melo, C. 1981. A Bacia do Paraná e o vulcanismo Mesozóico. In: Bistrichi, C. A.; Carneiro, C. D. R.; Dantas, A. S. L.; Ponçano, W. L. (eds). *Mapa geológico do Estado de São Paulo – Nota Explicativa*, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1:46-47.
- Araújo, L. M.; França, A. B.; Potter, P. G. 1995. Aquífero gigante do Mercosul no Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai: Mapas hidrogeológicos das Formações Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones e Taquarembó. UFPR/PETROBRAS, 16p.
- Bell, C. M. 1991. The relationships between sedimentary structures, transport direction and dune types in Mesozoic aeolian sandstones. Atacama Region, Chile. *Sedimentology*, 38:289-300.
- Bigarella, J. J. 1973. Textural characteristics of the Botucatu Sandstone. *Boletim Paranaense de Geociências*, 31:85-94.
- Bigarella, J. J. 1979. Botucatu and Sambaiba Sandstones of South America (Jurassic and Cretaceous); and Cave Sandstone and similar sandstones of southern Africa (Triassic). In: McKee, E.D. (ed.). *A study of global sand seas*. U.S. Geological Survey Professional Paper 1052, p. 233-238.
- Bigarella, J. J. & Salamuni, R. 1961. Early Mesozoic wind patterns as suggested by dune bedding in the Botucatu Sandstone of Brazil and Uruguai. *Geological Society of America Bulletin*, 72:1089-1106.
- Blakey, R. C. 1988. Basin tectonics and erg response. *Sedimentary Geology*, 56:127-151.
- Bonaparte, J. R. 1996. Late Jurassic vertebrate communities of eastern and western Gondwana. *Georesearch Forum*, 1-2:427-432.
- Bossi, G. E.; Piccoli, A. E. M.; Pillati, F. Thomaz, S. L.; Jabur, I. C.; Rodrigues, M. A.; Medeiros, E. R. 1977. Paleocorrente da Formação Botucatu nas Folhas de Montenegro, Novo Hamburgo, Taquara, Gravataí e São Leopoldo, RS. *Estudos Tecnológicos*, 2(3):83-120.
- Bossi, G. E.; Montardo, D. K.; Rolim, J. L.; Funchal, P. R.; Coelho, O. G. W. 1978. Análise de paleocorrentes da Formação Botucatu na faixa costeira do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., 1978, Goiania. *Anais...Recife*, SBG. v.2, p. 758-770.
- Brookfield, M. E. 1977. The origin of bounding surfaces in ancient aeolian sandstones. *Sedimentology*, 24:303-332.
- Gonzaga de Campos, L. F. 1889. Relatório da Comissão Geográfica e Geológica de São Paulo. *Anexo*, 21-34.
- Havholm, K. G. & Kocurek, G. 1988. A preliminary study of the dynamics of a modern dune, Algodones, southeastern California, U.S.A. *Sedimentology*, 35:649-669.

- Hunter, R. E. 1977. Basic types of stratification in small eolian dunes. **Sedimentology**, **24**: 361-387.
- Jackson, C. 1975. Hierarchical attributes and a unifying model of bedforms composed of cohesionless material and produced by shearing flow. **Geological Society of America Bulletin**, 1523-1533.
- Kocurek, G. 1991. Interpretation of ancient eolian sand dunes. **Annual Review of Earth Planetary Science**, p. 19, v. 43-75.
- Kocurek, G. & Havholm, K. G. 1993. Eolian sequence stratigraphy - a conceptual framework. In: Weimer, P. & Posamentier, H. W. (eds.). **Siliciclastic sequence stratigraphy: recent developments and applications**. p. 393-409 (SEPM Special publication, n. 52).
- Lancaster, N. 1983. Controls of dune morphology in the Namib sand sea. In: Brookfield, M. E. & Ahlbrandt, T. S. (eds). **Eolian Sediments and Processes, Developments in Sedimentology**. Elsevier, Amsterdam. n. 38, p. 261-289.
- Lancaster, N. 1987. The development of large aeolian bedforms. **Sedimentary Geology**, **55**:69-89.
- Milani, E. J. 1997. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental**. Porto Alegre. 2v. Tese de Doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Milani, E. J.; Faccini, U. F.; Scherer, C. M. S.; Araújo, L. M.; Cupertino, J. A. 1998. Sequences and stratigraphic hierarchy of the Paraná Basin (Ordovician to Cretaceous), Southern Brazil. In: Amos, A. J.; López-Gamundi, O.; Rocha-Campos, A. C. (eds). **Sedimentary Basins of South America**, Amsterdam, Elsevier.
- Rubin, D. M. 1987. **Cross-bedding, bedform and paleocorrets**. Society. Of Economic Paleontology Mineral. Concepts Geol., **1**, 187p.
- Rubin, D. M. & Hunter, R. E. 1982. Bedform climbing in theory and nature. **Sedimentology**, **29**: 121-138.
- Scherer, C. M. S. 1998. **Análise Estratigráfica e Litofaciológica da Formação Botucatu (Eocretáceo da Bacia do Paraná) no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre. 224p. Tese de Doutorado Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Scherer, C. M. S. 2000. Eolian dunes of Botucatu Formation (Cretaceous) in southernmost Brazil: morphology and origin. **Sedimentary Geology** (no prelo).
- Scherer, C. M. S.; Faccini, U. F.; Lavina, E. L. 2000. Bacia do Paraná – A sucessão Mesozóica. In: Holz, M. & De Ros, L. F., **Geologia do Rio Grande do Sul** (no prelo).
- Silva, F. G. 2000. **Caracterização Morfológica e Morfodinâmica das Dunas Eólicas da Formação Botucatu (Eocretáceo da Bacia do Paraná) no Sul de Santa Catarina**. Porto Alegre. 157p. Dissertação de Mestrado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Silva, F. G. & Scherer, C. M. S. 2000. Morphological characterization of ancient aeolian using the ground-penetrating radar, Botucatu Formation, Southern Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, **30**(3): 527-530.
- Silva, F. G.; Marques, E. J. J.; Scherer, C. M. S. Aplicação do radar de penetração de solo (GPR) no reconhecimento das estruturas internas de uma duna eólica da Formação Botucatu – Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geofísica** (no prelo).
- Sweet, M. L. & Kocurek, G. 1990. An empirical model of eolian dune lee-face flow dynamics. **Sedimentology**, **37**: 1023-1038.