

Histórico do estudo de dinoflagelados fósseis no Brasil: sua relação com a evolução da exploração petrolífera no Cretáceo das bacias da margem continental

Retrospective of fossil dinoflagellate studies in Brazil:

their relationship with the evolution of petroleum exploration in the Cretaceous of continental margin basins

Mitsuru Arai | Cecília Cunha Lana

resumo

A Palinoestratigrafia – Palinologia a serviço da Bioestratigrafia – no Cretáceo brasileiro tem sido baseada principalmente em palinomorfos terrestres (sobretudo esporos e grãos de pólen), pelo fato de que, nos primórdios da exploração de petróleo brasileiro, o centro de atenção era o Recôncavo Baiano, de natureza não-marinha. Nos anos 60, a Petrobras iniciou a exploração da plataforma continental (*offshore*), mas o espaço para a Palinoestratigrafia não se criou imediatamente, pois havia a crença de que, nas seções marinhas, foraminíferos e nanofósseis calcários seriam ferramentas mais eficientes. Todo esse quadro veio a sofrer mudanças nos anos 70, com a descoberta de petróleo na Bacia de Campos, onde a primeira unidade litoestratigráfica a ser reconhecida como portadora de petróleo foi a Formação Macaé, depositada em plataforma carbonática. Esse ambiente deve ter oferecido condições hostis para a proliferação de foraminíferos e organismos produtores de nanofósseis calcários que, por consequência, não têm sido capazes de oferecer mais do que duas ou três unidades bioestratigráficas dentro dessa unidade. Além disso, não tardou a se perceber que o arcabouço palinoestratigráfico tradicional, com base

sobretudo em palinomorfos terrestres, era também pouco útil para a exploração da Formação Macaé. A primeira contribuição significativa à Palinologia marinha cretácea do Brasil foi lançada em 1976 pelo geólogo Namio Uesugui, que adotou três espécies de dinoflagelados e uma de acritarco para subdividir a Formação Macaé. Desde o final da década de 1980, a Petrobras vem experimentando grandes progressos na Palinoestratigrafia marinha, com base principalmente em dinoflagelados. Atualmente, o banco de dados micropaleontológico da Companhia comporta centenas de dinoflagelados-guias que passaram a ser utilizados na maioria das bacias da margem continental brasileira, contribuindo para a melhora da resolução cronoestratigráfica.

(originais recebidos em 18.03.2004)

Palavras-chave: Cretáceo | Brasil | dinoflagelados | Palinologia

abstract

Palynostratigraphy of the Brazilian Cretaceous was mainly based on terrestrial palynomorphs (mostly spores and pollen grains) until the end of the nineteen eighties. This was so because, for several decades, petroleum

exploration in Brazil was focused on the essentially nonmarine sediments of the Recôncavo Basin. During the nineteen sixties, Petrobras extended oil exploration to the Brazilian continental shelf (offshore areas). Nevertheless, at that time the company did not invest immediately in marine palynostratigraphy, because it was believed that biostratigraphic schemes based on foraminifers and calcareous nannofossils would be more efficient than palynology in marine sequences. This belief changed only in the seventies, when commercial oil reservoirs were discovered in the Campos Basin, within the Macaé Formation, a rock unit deposited in a carbonate shelf environment. Its environmental conditions were certainly hostile to the development and post-mortem preservation of foraminifers and calcareous nannofossil-producing algae. As a result, no more than two or three biozones could be identified in the Macaé carbonate section on the basis of such organisms. Besides, carbonate shelf sediments, subject to only minor terrigenous input, are usually poor in terrestrial palynomorphs. On the other hand, the palynological content of some Macaé strata consists mainly (up to 100%) of such marine palynomorphs as dinoflagellates, acritarchs e palynoforaminifers. Consequently, Petrobras recognized the importance of developing a zonal framework based on these organisms. The first Cretaceous dinoflagellate zonation in Brazil was erected in 1976, and since the nineteen eighties, marine Cretaceous palynostratigraphy has made significant advances mainly due to the use of dinoflagellates. Hundreds of Cretaceous dinoflagellate index species have been introduced into Petrobras databanks, becoming widely applicable to the biostratigraphy of all Brazilian continental margin basins.

(expanded abstract available at the end of the paper)

Keywords: Cretaceous | Brazil | dinoflagellates | palynology

introdução

Pretende-se, aqui, registrar o histórico da evolução do estudo de dinoflagelados fósseis e seu paralelismo com o avanço da exploração em bacias petrolíferas da margem continental (= bacias sedimentares marginais, fig. 1). A incorporação de dinoflagelados foi de extrema importância na consecução da Palinoestratigrafia marinha aplicada à exploração de petróleo nessas bacias.

Palinoestratigrafia

A Palinologia é uma das ferramentas mais utilizadas na bioestratigrafia aplicada à exploração do petróleo, tendo como seu objeto de estudo todos os tipos de palinomorfos encontrados em resíduo orgânico resultante da eliminação por meio de ataque químico das frações minerais das rochas sedimentares. Os palinomorfos abrangem todas as estruturas de matéria orgânica identificáveis taxonomicamente ao microscópio. Basicamente, palinomorfos são estruturas relacionadas a plantas vasculares (esporos e grãos de pólen), algas (e.g. *Botryococcus*, *Pediastrum*, *Ovoidites* e *Chomotriletes*), fungos (hifas e esporos), cistos de protistas (dinoflagelados e a maioria dos acritarcos), testas quitinosas de foraminíferos (palinoforaminíferos) e restos orgânicos de alguns metazoários (e.g. quitinozoários, escolecodontes, graptolitos, copépodes e conchostráceos), entre outros. Essa ampla gama de gênese, que abrange desde elementos continentais – produzidos por plantas terrestres ou mesmo por organismos dulciaquícolas – até organismos francamente marinhos, faz com que palinomorfos sejam encontrados praticamente em todos os ambientes. Convém observar que os palinomorfos continentais, uma vez dispersos pelo vento ou pela água, podem se depositar e preservar em praticamente todos os sítios deposicionais, inclusive o marinho. Já os palinomorfos derivados de organismos marinhos não ocorrem em sedimentos não-marinhos, a menos que sejam em forma de retrabalhamento.

Essa diversidade de origem – tanto de natureza ecológica como biológica – faz com que palinomorfos apresentem larga abrangência temporal, ocorrendo desde o Proterozóico até aos dias de hoje, sempre apresentando formas típicas em cada época do tempo geológico. Este fato, aliado a suas dimensões microscópicas que lhes conferem alta transportabilidade e seu alto potencial de preservação nos sedimentos, faz dos palinomorfos excelentes fósseis para utilização em bioestratigrafia. Essa bioestratigrafia, exercida com base na Palinologia, recebe o nome de Palinoestratigrafia.



Figura 1
Localização das bacias sedimentares brasileiras, destacando as bacias marginais com preenchimento cretáceo (modificada de Lana et al. 2002).

Figure 1
Location map showing mainly the Cretaceous basins of the Brazilian continental margin (modified from Lana et al. 2002).

Palinoestratigrafia marinha: dinoflagelados

Quando se fala em Palinoestratigrafia marinha no Cretáceo, resume-se praticamente em Bioestratigrafia com base em dinocistos (cistos de dinoflagelados). Isto porque, no Mesozóico, os palinomorfos marinhos que prosperaram no Paleozóico se tornaram decadentes e numericamente insignificantes – como no caso de acritarcos – ou, senão, totalmente extintos – como nos casos de quitinozoários e graptolitos.

Nos estratos cretáceos, os acritarcos não apresentam a mesma abundância e diversidade do Paleozóico. Conhecem-se poucos táxons de acritarcos *lato sensu* – que incluem as prasinófitas – no Cretáceo brasileiro, tendo sido registrados até o momento apenas os seguintes gêneros: *Crassosphaera*, *Cyclopsiella*, *Micrhystridium*, *Nummus*, *Pterospermella*, *Tarsisphaeridium*, *Tasmanites*, *Veryhachium* e *Wuroia*. Destes, apenas uma espécie de *Cyclopsiella* – aquela denominada “*Acritarcha* ? sp.” por Uesugui (1976) e “*Cyclopsiella mura*” por Botelho Neto

(1996) – tem importância estratigráfica, por ser fóssil-guia da unidade bioestratigráfica conhecida como “Intervalo Alfa”, situada no Albiano inferior a médio.

Já os dinoflagelados, surgidos no final do Triássico, tiveram seu auge no Cretáceo (fig. 2). Em função da ocorrência abundante e diversificada e da existência de um número elevado de fósseis-guias eficientes – segundo Williams *et al.* (1998), existem milhares de táxons (583 gêneros e 3785 espécies) de dinoflagelados fósseis no registro geológico –, os dinocistos são amplamente utilizados na consecução de Palinoestratigrafia marinha, em nível global.

Os dinoflagelados, pelo que se conhece através de espécies viventes, são protistas predominantemente marinhos – apenas cerca de 10% das espécies atuais são dulciaquícolas – e meroplânctônicos, produzindo tecas celulósicas em sua fase planctônica do ciclo de vida, e cistos orgânicos (dinospolina) que constituem a fase bentônica destes organismos. Somente os cistos de dinoflagelados – dinocistos – são fossilizáveis e conservados nos sedimentos e nas rochas sedimentares (fig. 3). Além do grande potencial biocronoestratigráfico, mais recentemente os dinoflagelados vêm sendo utilizados em interpretações ambientais e em análises estratigráficas integradas (e.g. Scull *et al.* 1966; Wilpshaar e Leereveld, 1994; Lana, 1997).

histórico da Palinoestratigrafia marinha no Brasil

No Brasil, até o final da década de 1980, a Palinoestratigrafia do Cretáceo era baseada principalmente em palinóforos terrestres (sobretudo esporos e grãos de pólen). Esta restrição deveu-se aos seguintes fatores: (1) por várias décadas, o centro de atenção da Palinoestratigrafia aplicada à exploração de petróleo brasileiro foi o Recôncavo Baiano, cuja bacia, essencialmente cretácea, experimentara uma sedimentação predominantemente não-marinha; (2) mesmo entre as bacias com seções marinhas, a maioria apresentou resultados satisfatórios com a aplicação do esquema palinoestratigráfico tradicional (e.g. Regali *et al.* 1974a, b) com base em palinóforos terrestres, já que o início da exploração *offshore* se deu em

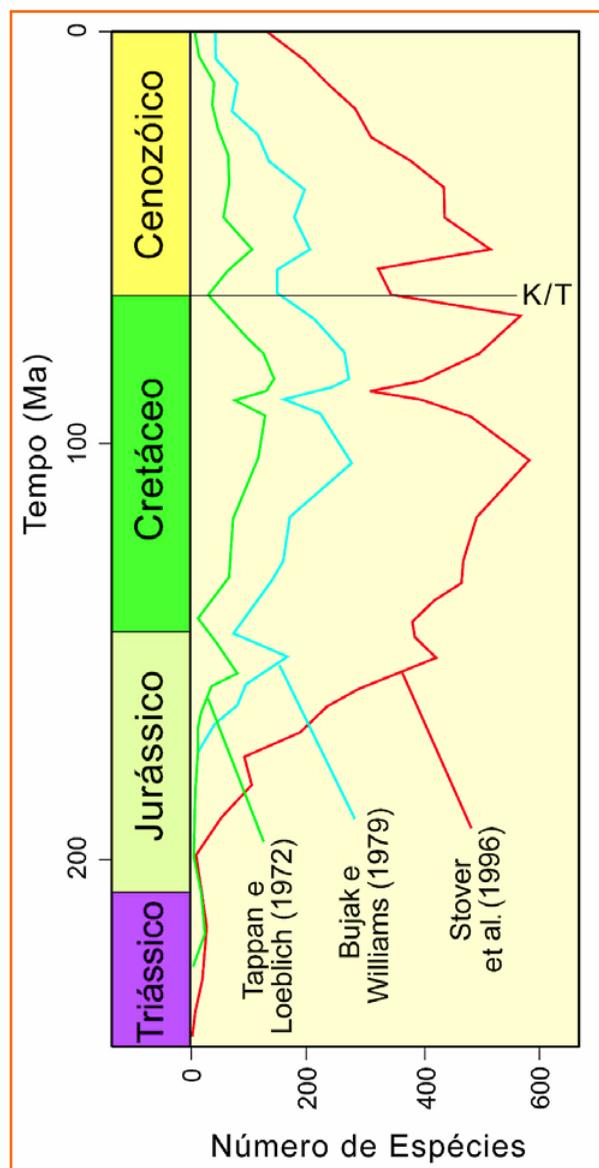


Figura 2 – Diversidade de dinoflagelados no tempo geológico (modificada de MacRae, 2002).

Figure 2 – Dinoflagellate diversity along geological time (modified from MacRae, 2002).

áreas de águas rasas, onde o efeito de aporte terrígeno é mais notável; (3) os estrangeiros pioneiros (e.g. Helmut Müller) que treinaram os primeiros palinólogos da Petrobras, nas décadas de 1950/1960, eram especialistas em palinóforos terrestres; (4) o Cretáceo marinho tem poucos afloramentos na área emersa (*onshore*) do Brasil, o que dificultou bastante a iniciativa dos pesquisadores da comunidade acadêmica, pois o acesso ao material litológico de subsuperfície das bacias submersas da margem continental brasi-

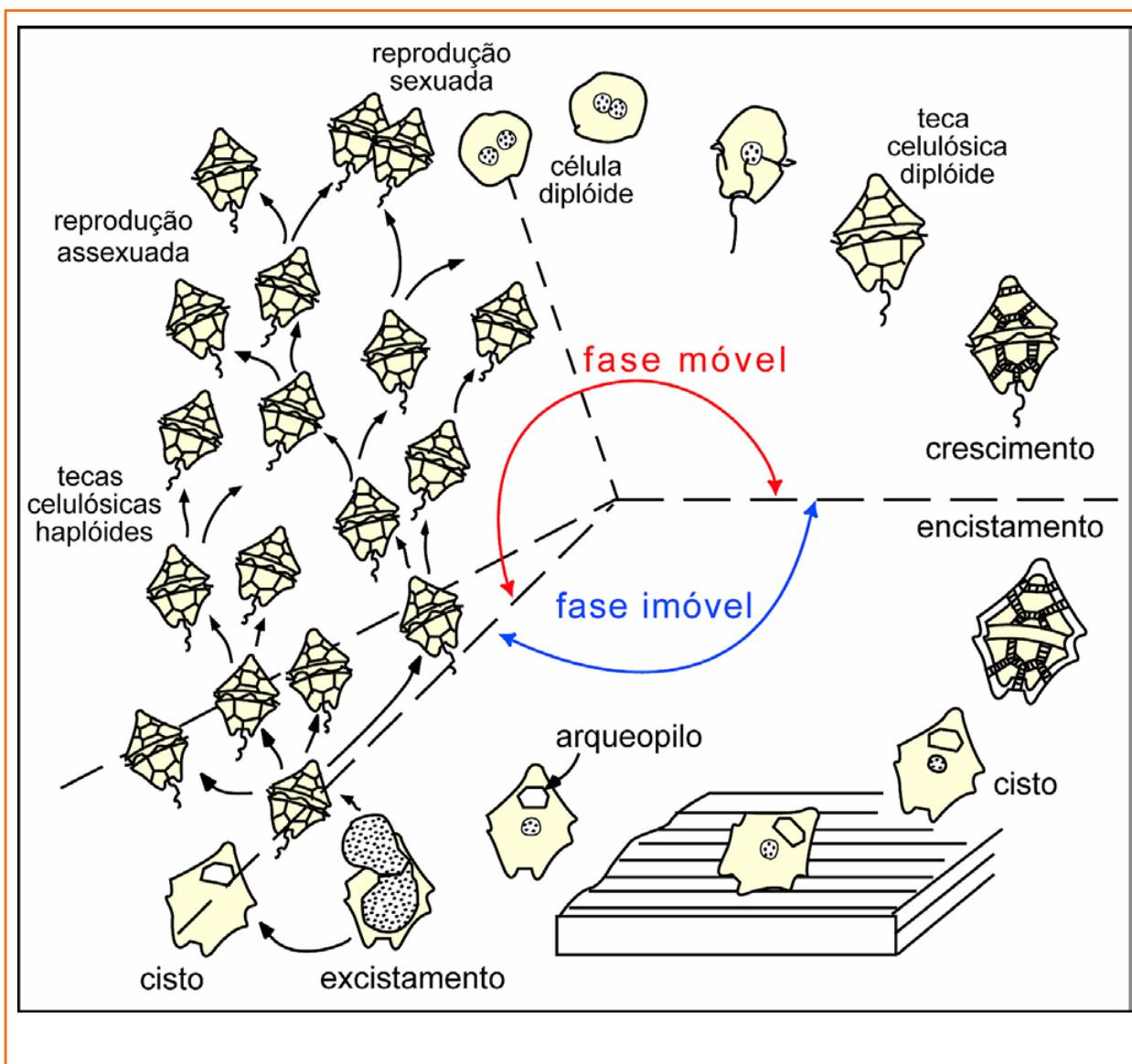


Figura 3 – Ciclo de vida esquemático de um dinoflagelado produtor de cisto. Este é formado no início da fase imóvel do ciclo, sendo a única parte fossilizável do dinoflagelado (modificada de Evitt, 1985).

Figure 3 – Schematic life cycle of a cyst-producing dinoflagellate. The cyst is formed in the beginning of the non-motile stage, and is the only fossilizable part of the dinoflagellate (modified from Evitt, 1985).

leira – que, além de ser mais rico, abrange maior gama de intervalo estratigráfico – era conseguido praticamente de modo exclusivo pelas atividades de exploração petrolífera da Petrobras. Para vislumbrar quão efetivo foi este fator, basta compará-lo com os estudos de palinórfos marinhos do Devoniano brasileiro - sobretudo escolecodontes, quitinozoários e microfítoplâncton (prasinofíceas e acritarcos) -, que tinham tido seu advento ainda nos anos 1940 e 1950 (e.g. Lange, 1947, 1949, 1950, 1952; Sommer, 1953, 1956), servindo-se das

extensas faixas de afloramentos nas bordas das grandes bacias paleozóicas do Paraná e Amazonas.

Nos anos de 1960, a Petrobras iniciou a exploração das bacias cretáceas da plataforma continental (*offshore*), mas o espaço para a Palinotratigrafia não se criou imediatamente. Havia a crença de que, nas seções marinhas, os arcabouços bioestratigráficos baseados em foraminíferos e nanofósseis calcários seriam mais eficientes.

Todo esse quadro veio a sofrer mudanças na década de 1970, com a descoberta de petróleo

na Bacia de Campos, onde a primeira unidade litoestratigráfica a ser reconhecida como portadora de reservatório de petróleo foi a Formação Macaé, composta por litologias predominantemente carbonáticas. Seu ambiente deposicional, sendo de mar restrito e raso, deve ter oferecido condições hostis para a proliferação de foraminíferos e organismos produtores de nanofósseis calcários, assim como para sua preservação (Spadini *et al.* 1988). De fato, dentro da seção carbonática da Formação Macaé, estes organismos não têm sido capazes de oferecer mais do que duas ou três unidades bioestratigráficas. É também sabido que ambientes de plataforma carbonática, desenvolvidos em condições climáticas mais áridas, caracterizam-se pela pobreza de material terrígeno, em função do pequeno aporte e da baixa disponibilidade de biomassa continental. Não tardou a se perceber que o arcabouço palinoestratigráfico tradicional (e.g. esquema de Regali *et al.* 1974a, b), com base sobretudo em palinomorfos terrestres, também era pouco útil para o fatiamento bioestratigráfico da Formação Macaé. Além disso, passou-se a observar que alguns níveis dentro da formação continham até 100% de palinomorfos marinhos (dinoflagelados, acritarcos e palinoforaminíferos). Assim, a Petrobras sentiu a necessidade de elaborar um esquema baseado principalmente nesses organismos.

Analisando a evolução do estudo de dinoflagelados fósseis no Brasil, pode-se afirmar que a Palinoestratigrafia marinha do Cretáceo teve três fases históricas bem marcantes.

fase 1 (décadas de 1970 e 1980)

O primeiro momento foi, sem dúvida, a proposição dos intervalos Alfa e Beta que introduziu a subdivisão inédita para o Albiano da Bacia de Campos (Uesugui, 1976). Este arcabouço recebeu aprimoramento por Azevedo *et al.* (1987), que propuseram as subdivisões do Intervalo Beta (Beta-0 e Beta-1), e por Arai e Uesugui (1989), que efetuaram as correções necessárias na nomenclatura taxonômica relativa aos fósseis-guias dos Intervalos: *Cyclopsiella* sp. (Alfa), *Ovoidinium diversum* (Beta-0) e *Oligosphaeridium complex* (Beta-1) (fig. 4).

fase 2 (década de 1990)

O segundo ciclo é representado pela série de trabalhos de Arai (1990, 1992, 1994) que consolidou o biozoneamento baseado exclusivamente em dinoflagelados para todo o Cretáceo marinho da Bacia de Campos. Também foi nessa segunda fase que houve aprimoramento significativo no levantamento taxonômico. O número de táxons de dinoflagelados reconhecidos no Brasil saltou de 30, no final da década de 1980, para cerca de 180, nos meados da década de 1990 (fig. 5). Além disso, efetuou-se exaustiva atualização taxonômica, tomando-se como padrão a lista de gêneros e espécies de Lentin e Williams (Lentin e Williams, 1985; Williams *et al.* 1998).

fase 3 (década de 2000)

O terceiro ciclo é constituído pela expansão da aplicação do zoneamento para além do limite da Bacia de Campos. Não se tardou descobrir que o arcabouço bioestratigráfico concebido nessa bacia serviria para todas as bacias costeiras do Sul e Sudeste, como foi provado por Arai e Botelho Neto (1996). Com o avanço de estudos, foram propostos esquemas bioestratigráficos de dinoflagelados em outras regiões do País: Bacia Potiguar (Lana, 1997) e Bacia do Ceará (Lana e Roesner, 2002). Com o levantamento das associações de diversas bacias, houve amadurecimento no estudo de provincialismo paleobiogeográfico (Arai *et al.* 2000), cujo ensaio pioneiro no Brasil já havia sido esboçado por Lana e Botelho Neto (1989). Com a conscientização da existência de provincialismo, passou-se a valorizar arcabouços regionais diferentes daqueles utilizados nas bacias do Sul/Sudeste, sempre com a preocupação de calibrar os bio-horizontes em relação à escala cronoestratigráfica padrão. O exemplo deste esforço pode ser apreciado no trabalho de Lana *et al.* (2002), que fizeram um estudo comparativo das sucessões de associações de dinoflagelados entre as bacias da margem equatorial e as do Sudeste, as quais proporcionaram, respectivamente, 10 e 17 biozonas de dinoflagelados no Cretáceo, sendo quatro delas bio-horizontes comuns.

CRONOES - TRATIGRAFIA		Regali <i>et al.</i> (1974 a, b)	Uesugui(1976), Azevedo <i>et al.</i> (1987)	Arai e Botelho (1996) Lana <i>et al.</i> (2002)
TURONIANO			<i>Steevesipollenites</i> <i>nativensis</i>	<i>Cribopteridinium</i> sp. A
				<i>Atopodinium haromense</i>
CENOMANIANO		<i>Gnetaceaepollenites</i> <i>diversus</i>	Gama	<i>Cribopteridinium edwardsii</i>
				<i>Palaeopteridinium cretaceum</i>
				<i>Litosphaeridium arundum</i>
ALBIANO	SUP	<i>Elaterosporites protensus</i>	Beta - 1	<i>Gordiacysta coronata</i>
			Beta - 0	<i>Ovoidinium diversum</i>
	MED INF		Alfa	<i>Pseudoceratium anaphrissum</i>
				<i>Muderongia cf. parjata</i>

Figura 4 – Evolução das propostas de zoneamento palinoestratigráfico do Cretáceo médio (Albiano – Turoniano) da Bacia de Campos.

Figure 4 – Evolution of palynostratigraphic schemes proposed for the middle Cretaceous (Albian – Turonian) of the Campos Basin.

Com o avanço da atividade exploratória em direção às áreas de águas profundas nas últimas décadas, os estratos atravessados por poços ali perfurados também passaram a representar paleoambientes marinhos cada vez mais profundos. Não é exagero afirmar que, se não houvesse a incorporação de dinoflagelados, o exercício de bioestratigrafia no Cretáceo marinho estaria seriamente comprometido, sobretudo no intervalo Aptiano – Cenomaniano, já que ali os outros métodos bioestratigráficos (palinómorfos continentais, nanofósseis calcários e foraminíferos) revelaram-se menos eficientes.

feitos bioestratigráficos obtidos exclusivamente com o estudo de dinoflagelados

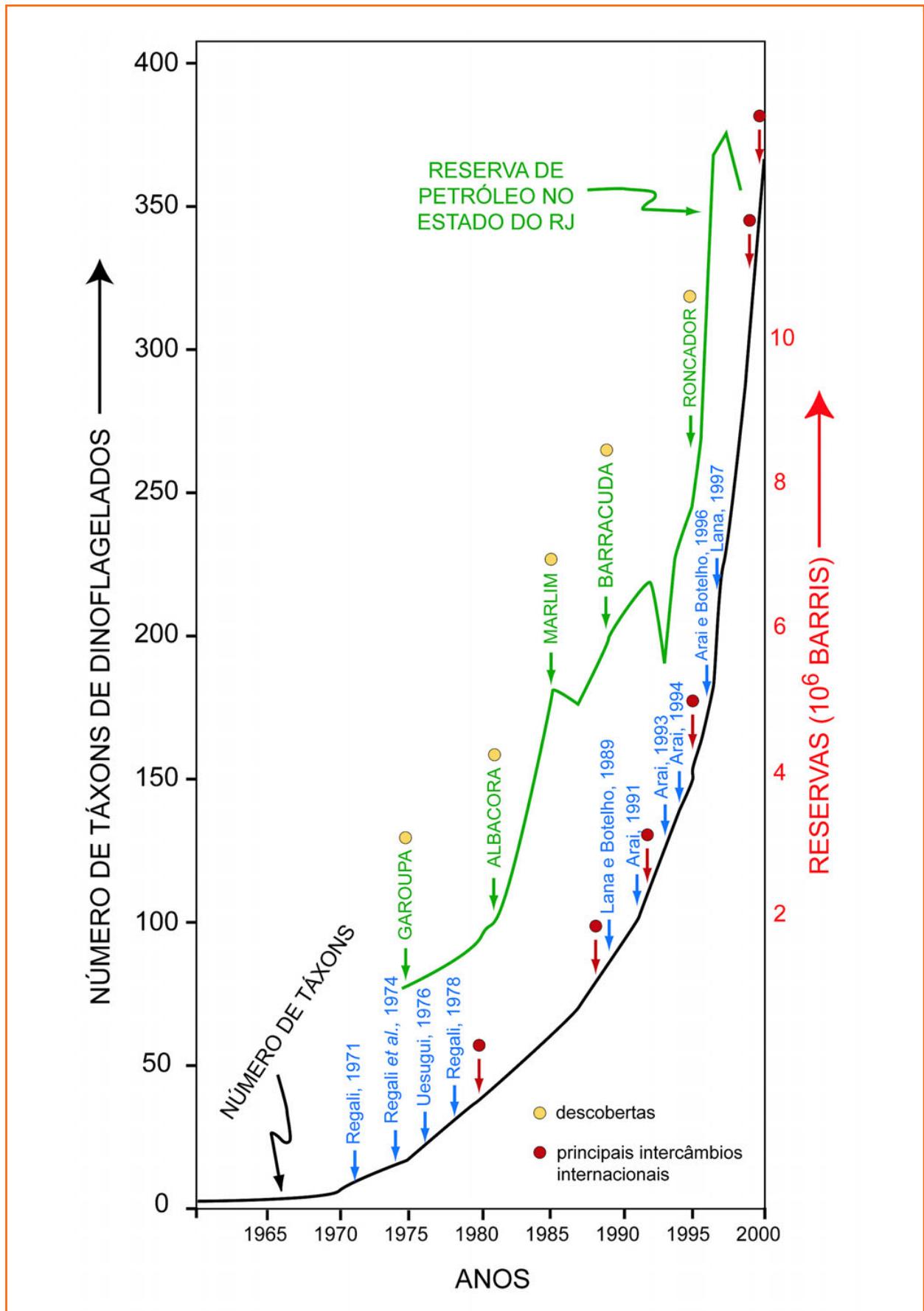
Além dos biozoneamentos com base em dinoflagelados, aplicáveis em todas as bacias da margem continental brasileira, podem ser destacados alguns feitos bioestratigráficos obtidos exclusivamente com este grupo fóssil:

Figura 5

Evolução da reserva de petróleo no Estado do Rio de Janeiro e do número de táxons de dinoflagelados cadastrados no banco de dados da Petrobras (seg. Arai, 2001).

Figure 5

Evolution of petroleum reserves in the State of Rio de Janeiro and the increasing number of dinoflagellate taxa registered in the Petrobras databank (after Arai, 2001).



- reconhecimento de incursão marinha precoce já no Eoaptiano, como verificado nas bacias de Camamu-Almada, por meio de registro da Ecozona *Subtilisphaera almadaensis* (e.g. Lana e Pedrão, 2000a, b; Pedrão e Lana, 2000) (fig. 6a);
- identificação de evidências de ingressões marinhas incipientes, em diversos estudos do Albo-Aptiano do Nordeste, por meio de registros da Ecozona *Subtilisphaera* spp. (e.g. Regali, 1989; Arai e Coimbra, 1990; Arai et al. 1994; Antonioli e Arai, 2002);
- subdivisão do Albo-Cenomaniano das bacias de Campos e Santos em pelo menos sete unidades bioestratigráficas (Arai, 1992; Arai e Botelho Neto, 1996), representadas pelas dinozonas *Muderongia* cf. *pariata* (Albiano inferior) a *Cribroperidium edwardsii* (Cenomaniano médio a superior) (fig. 4);
- demarcação segura do topo do Campaniano nas bacias do Sul/Sudeste do Brasil (e.g. Arai e Botelho Neto, 1996), por meio da identificação da dinozona *Odontochitina costata*. Convém lembrar que a identificação do limite Campaniano-Maastrichtiano não é possível com os métodos de foraminíferos planctônicos e nanofósseis calcários.

conclusões

Ao se apreciar o histórico da evolução do estudo de dinoflagelados fósseis no Brasil, pode-se tecer as seguintes conclusões:

- sem dúvida alguma, a necessidade exploratória na Bacia de Campos foi um grande estímulo primordial, pois os primeiros reservatórios ali reconhecidos eram do Albo-Cenomaniano, onde palinomorfos marinhos desempenharam papel importante;
- nas últimas décadas, o estudo de dinoflagelados com vistas à aplicação bioestratigráfica teve avanço progressivo, *pari passu* com a evolução da exploração petrolífera *offshore* em direção às áreas de águas profundas e ultraprofundas;

- a Palinostratigrafia com base em dinocistos (fig. 6) constitui um conhecimento estratégico em alguns intervalos estratigráficos (e.g. Albo-Turoniano das bacias de Campos e Santos), onde geralmente dinoflagelados proporcionam uma resolução bioestratigráfica melhor do que a de outros organismos;
- a aplicabilidade estratigráfica de dinoflagelados se encontra consolidada, fato este que pode ser comprovado pela existência de zoneamentos já formalizados, com ampla utilização em diversas bacias do Brasil.

reconhecimento e agradecimentos

Pretendeu-se demonstrar que o processo histórico da evolução do conhecimento sobre dinoflagelados fósseis no Brasil constituiu na superação de vários desafios. Além dos autores, participaram dessa epopéia os seguintes colegas da Petrobras: Marília S. P. Regali, Namio Uesugui, Armando T. Hashimoto, José Botelho Neto, Elizabeth Pedrão Ferreira, Eduardo Henrique Roesner, Rodolfo Dino, Sônia Silveira e Solange M. Gonzaga. Isso sem contar com os consultores que deram grandes estímulos aos estudos primordiais: William A. S. Sarjeant (Universidade de Saskatchewan, Canadá) e Edwige Masure (Universidade de Paris VI, França), que, respectivamente, realizaram suas primeiras visitas ao Brasil em 1980 e 1988 (fig. 4). A Dra. Masure retornou ao Brasil em mais três ocasiões (1991, 1999 e 2003), em consultoria para os palinólogos da Petrobras.

O estudo de dinocistos na Companhia evoluiu também com a contribuição de outros especialistas estrangeiros que tiveram contato com a Equipe de Palinologia do Cenpes: Anne de Vernal (Canadá), Armando Fasola (Venezuela), Bernard Courtinat (França), Daniel Michoux (França), Danièle Fauconnier (França), Graham Williams (Canadá), Geoffrey Norris (Canadá), Hamid Slimani (Marrocos), Hiroshi Kurita (Japão), Javier Helenes (México), Jean-Claude Foucher (França), Kazumi

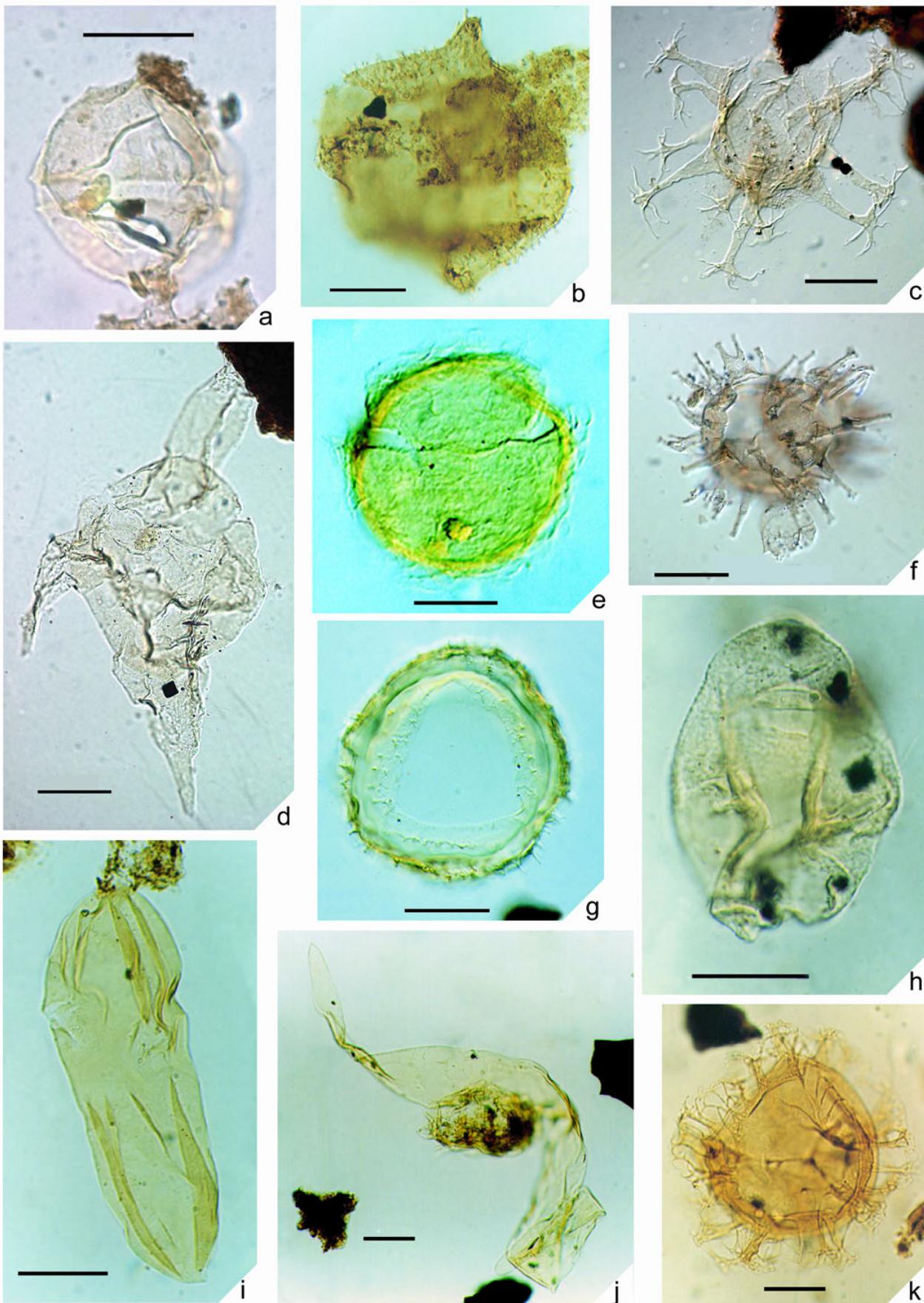


Figura 6

Estampa de dinocistos do Cretáceo do Brasil.
Escala gráfica: 20 µm.

- a - *Subtilisphaera almadaensis*
(Aptiano inferior da Bacia de Almada);
- b - *Pseudoceratium anaphrissum*
(Albiano inferior-médio da Bacia do Ceará);
- c - *Oligosphaeridium itajaiense*
(Turoniano da Bacia de Santos);
- d - *Odontochitina ancala*
(Albiano superior da Bacia de Jequitinhonha);
- e - *Ovoidinium diversum*
(Albiano superior da Bacia de Campos);
- f - *Florentinia radiculata*
(Cenomaniano-Turoniano da Bacia de Jequitinhonha);
- g - *Trichodinium castanea*
(Cenomaniano superior da Bacia Potiguar);
- h - *Isabelidinium* aff. *cooksoniae*
(Campaniano superior-Maastrichtiano inferior da Bacia do Ceará);
- i - *Amphigymnium mitratum*
(Campaniano da Bacia do Ceará);
- j - *Yolkinigymnium lanceolatum*
(Maastrichtiano da Bacia de Santos);
- k - *Nematosphaeropsis "grandis"*
(Campaniano inferior da Bacia do Ceará).

Figure 6

Some dinocysts from the Brazilian Cretaceous.
Scale bar: 20 µm

- a - *Subtilisphaera almadaensis*
(lower Aptian of the Almada Basin);
- b - *Pseudoceratium anaphrissum*
(lower to middle Albian of Ceará Basin);
- c - *Oligosphaeridium itajaiense*
(Turonian of the Santos Basin);
- d - *Odontochitina ancala* (upper Albian of the Jequitinhonha Basin);
- e - *Ovoidinium diversum*
(upper Albian of the Campos Basin);
- f - *Florentinia radiculata*
(Cenomanian -Turonian of the Jequitinhonha Basin);
- g - *Trichodinium castanea*
(upper Cenomanian of the Potiguar Basin);
- h - *Isabelidinium* aff. *cooksoniae*
(upper Campanian to lower Maastrichtian of the Ceará Basin);
- i - *Amphigymnium mitratum*
(Campanian of the Ceará Basin);
- j - *Yolkinigymnium lanceolatum*
(Maastrichtian of the Santos Basin);
- k - *Nematosphaeropsis "grandis"*
(lower Campanian of the Ceará Basin).

Matsuoka (Japão), Mercedes Pramparo (Argentina), Mirta Quattrocchio (Argentina), Omar Colmenares (Venezuela), Raquel Guerstein (Argentina), Robert Fensome (Canadá), Roel Verreussel (Holanda), Roger Jan-du-Chêne (França), Susana Palamarczuk (Argentina), Véronique Begouen (França), Viviana Barreda (Argentina) e Wolfram Brenner (Alemanha). Embora os contatos com estes cientistas tenham sido esporádicos ou até mesmo efêmeros, eles deixaram marcas indeléveis na cultura científica brasileira, relativa aos dinoflagelados fósseis.

Também merecem reconhecimento os doutorandos que aceitaram o desafio de estudar dinoflagelados cretáceos em suas teses, contribuindo significativamente para o conhecimento desses organismos: Antonioli (2001), Carvalho (2001) e Sarkis (2002).

Os autores manifestam gratidão especial à Petrobras, que autorizou a publicação deste trabalho, além de ter proporcionado a oportunidade de desenvolver os estudos necessários; a Sílvia Maria Couto dos Anjos, gerente da Bioestratigrafia e Paleocologia do Cenpes, pelo incentivo; e aos colegas José Henrique G. de Melo e Rogério Loureiro Antunes, pela revisão do manuscrito.

referências bibliográficas

ANTONIOLI, L. **Estudo Palinocronoestratigráfico da Formação Codó - Cretáceo Inferior do Nordeste Brasileiro**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001. 265 p. Tese (Doutorado).

_____. ; ARAI, M. O registro da Ecozona *Subtilisphaera* na Formação Codó (Cretáceo Inferior da Bacia do Parnaíba, Nordeste do Brasil): seu significado paleogeográfico. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCEO DO BRASIL, 6., 2002, São Pedro. **Boletim...** Rio Claro: UNESP, 2002. p. 25-30.

ARAI, M. Dinoflagelados fósseis do Cretáceo Médio da Bacia de Campos. **Paleobotânica Latinoamericana**. [S.l.], v. 9, n. 1, 1990. (Circular Informativa ALPP), p. 5.

_____. Dinoflagellates from the middle Cretaceous in the offshore Campos Basin, southeastern Brazil. In: SIMPÓSIO SOBRE AS BACIAS CRETÁCIAS BRASILEIRAS, 2., 1992, Rio Claro. **Resumos Expandidos...** São Paulo: UNESP, 1992. p. 27-29.

_____. Dinoflagelados do Cretáceo Superior (Turoniano – Maastrichtiano) da Bacia de Campos, plataforma continental do Sudeste Brasileiro. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCEO DO BRASIL, 3., 1994, Rio Claro. **Boletim...** São Paulo: UNESP, 1994. p. 59-61.

_____. Bacia de Campos: o berço da Palinoestratigrafia marinha do Cretáceo brasileiro. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 7., 2001, Rio de Janeiro. **Boletim de Resumos...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia, 2001. p. 116.

_____.; BOTELHO NETO, J. Biostratigraphy of the marine Cretaceous from Brazilian southern and southeastern marginal basins, based on fossil dinoflagellates. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 39., 1996, Salvador, **Anais...** Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia. 1996, v. 7, p. 408-410.

_____.; BOTELHO NETO, J.; LANA, C. C.; PEDRÃO, E. Cretaceous dinoflagellate provincialism in Brazilian marginal basins. **Cretaceous Research**, London, v. 21, n. 2/3, p. 351-366, Apr. 2000.

_____.; COIMBRA, J. C. Análise paleoecológica do registro das primeiras ingressões marinhas na Formação Santana (Cretáceo Inferior da Chapada do Araripe). In: SIMPÓSIO SOBRE A BACIA DO ARARIPE E BACIAS INTERIORES DO NORDESTE, 1., 1990, Crato. **Atas...** Crato, 1990. p. 225-239.

_____.; LANA, C. C.; PEDRÃO, E. Ecozona *Subtilisphaera* spp.: registro eocretáceo de um importante episódio ecológico do Oceano Atlântico primitivo. **Acta Geológica Leopoldensia**, São Leopoldo, v. XVII, n. 39/ 2, p. 521-538, 1994.

_____.; UESUGUI, N. Dinoflagellate biostratigraphy of the Macaé Formation (Albian - Cenomanian), Campos Basin. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MODERN AND FOSSIL DINOFLAGELLATES, 4., 1989, Woods Hole. **Abstracts...**, Woods Hole, 1989. p. 20.

AZEVEDO, R. L. M.; GOMIDE, J.; VIVIERS, M. C.; HASHIMOTO, A. T. Bioestratigrafia do Cretáceo marinho da Bacia de Campos, Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 17, n. 2, p. 147 – 153, jun. 1987.

BOTELHO NETO, J. Porção Norte da plataforma de Regência, Bacia do Espírito Santo: caracterização palinoestratigráfica e evolução paleoambiental.

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, 1996. 163 p. Dissertação (Mestrado).

CARVALHO, M. A. **Paleoenvironmental reconstruction based on palynological and palynofacies analyses of the Aptian – Albian succession in the Sergipe Basin, northeastern Brazil.** Heidelberg: Universidade de Heidelberg, 150p., 6 est., 4 apêndices, 2001 (Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde der Naturwissenschaftlich-Mathematischen Gesamtfakultät der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg).

EVITT, W. R. **Sporopollenin Dinoflagellate cysts: their morphology and interpretation.** Austin: American Association of Stratigraphic Palynologists, 1985. 333 p.

LANA, C. C. **Palinologia e estratigrafia integrada da seção Cenomaniano médio – Turoniano inferior da porção centro-leste da Bacia Potiguar, NE do Brasil.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997. v. 1, p. 197, v. 2, p. 144. Dissertação (Mestrado).

_____.; ARAI, M.; ROESNER, E. H. Dinoflagelados fósseis da seção-cretácea marinha das bacias brasileiras: um estudo comparativo entre as margens equatorial e sudeste. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCEO DO BRASIL, 6., 2002, São Pedro. **Boletim...** Rio Claro: UNESP, 2002. p. 247-252.

_____.; BOTELHO NETO, J. Evidências de provincialismo entre os dinoflagelados peridinióides do Cretáceo Superior – Paleoceno das bacias de Santos e Potiguar, Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PALEONTOLOGIA, 11., 1989, Curitiba. **Anais...** Curitiba, Sociedade Brasileira de Paleontologia, v. 1, p. 353-371.

_____.; PEDRÃO, E. *Subtilisphaera almadaensis*, uma nova espécie de dinoflagelado da Bacia de Almada, Brasil. **Revista Universidade de Guarulhos**, São Paulo, p. 86-88, 2000 a. (Geociências, V). Número especial.

_____.; _____. Um episódio de incursão marinha no Eoaptiano (Eoalagoas) da Bacia de Almada, BA, Brasil. **Revista Universidade de Guarulhos**, São Paulo, p. 89-92, 2000 b. (Geociências V). Número especial.

_____.; ROESNER, E. H. Biocronoestratigrafia de dinoflagelados da seção cretácea marinha das bacias do Ceará e Potiguar, Margem Equatorial Brasileira.

- In: SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCEO DO BRASIL, 6., 2002, São Pedro. **Boletim...** Rio Claro, UNESP, p. 239-245.
- LANGE, F. W. Anelídeos poliquetas dos folhelhos devonianos do Paraná. **Arquivos do Museu Paranaense**, [S.l.], v. 6, p. 161-230, 1947.
- _____. Novos microfósseis devonianos do Paraná. **Arquivos do Museu Paranaense**, [S.l.], v. 7, p. 287-298, 1949.
- _____. Um novo escolocodonte dos Folhelhos Ponta Grossa. **Arquivos do Museu Paranaense**, [S.l.], v. 8, p. 189-214, 1950.
- _____. Chitinozoários do Folhelho Barreirinha, Devoniano do Pará. **Dusenya**, Curitiba, v. 3, n. 5, p. 373-386, 1952.
- LENTIN, J. K.; WILLIAMS, G. L. Fossil dinoflagelates: index to genera and species, 1985 edition. **Canadian Technical Report of Hydrography and Ocean Sciences**. Nova Scotia, v. 60, p. 1-451.
- MacRAE, A. Diversity of dinoflagelates species from Triassic to Quaternary. A: total number of species per time interval. Disponível em: <http://geo.uncalgary.ca/~macrae/diversity_sp93.gif> Acesso em: 06 dez. 2002.
- PEDRÃO, E.; LANA, C. C. Ecozona *Subtilisphaera* e seu registro nas bacias brasileiras. **Revista Universidade de Guarulhos**, São Paulo, p. 81-85, 2000. (Geociências V). Número especial.
- REGALI, M. S. P. **Palinologia dos sedimentos cenozóicos da foz do Rio Amazonas**. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1971. 11 estampas, 8 anexos. 96 p. Tese (Doutorado)
- _____. Palinologia da Bacia do Ceará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31., 1980, Camboriú. **Anais...** Florianópolis: Sociedade Brasileira de Geologia, v. 5, p. 3118-3129.
- _____. Primeiros registros da transgressão neo-aptiana na margem equatorial brasileira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PALEONTOLOGIA, 11., 1989, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Sociedade Brasileira de Paleontologia, v. 1, p. 275-293.
- REGALI, M. S. P.; UESUGUI, N.; SANTOS, A. S. Palinologia dos sedimentos meso-cenozóicos do Brasil I. **Boletim Técnico PETROBRAS**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 3, p. 177-190, jul./set. 1974a.
- _____. Palinologia dos sedimentos meso-cenozóicos do Brasil II. **Boletim Técnico PETROBRAS**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 4, p. 263-301, out./dez. 1974b.
- SARKIS, M. F. R. **Palinoestratigrafia com base em dinoflagelados do limite Cretáceo-Terciário, Pedreira Poty, Bacia de Pernambuco-Paraíba, Nordeste do Brasil**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002. 253 p., 10 estampas. Tese (Doutorado).
- SCULL, B. J.; FELIX, C. J.; McCALEB, S. B.; SHAW, W. G. The inter-discipline approach to paleoenvironmental interpretations. **Transactions of Gulf Coast Association of Geological Societies**, New Orleans, LA, v. 16, p. 81-117, 1966.
- SOMMER, F. W. **Os esporomorfos do folhelho de Barreirinha**. Rio de Janeiro: IBGE, 1953. 49 p., il. (Boletim Divisão Geologia Mineral, 140)
- _____. Novas espécies de *Tasmanites* do Devoniano do Pará. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 28, n. 4, p. 455-463, 1956.
- SPADINI, A. R.; ESTEVES, F. R.; DIAS-BRITO, D.; AZEVEDO, R. L. M.; RODRIGUES, R. The Macaé Formation, Campos Basin, Brazil: its evolution in the context of the initial historical of South Atlantic. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 18, n. 3, p. 261-272, 1988.
- UESUGUI, N. **Intervalos bioestratigráficos da Bacia de Campos do Albiano ao Santoniano**. Rio de Janeiro: PETROBRAS. DEXPRO. DIVEX. SEGEL, 1976. 11 f. Relatório técnico.
- WILLIAMS, G. L.; LENTIN, J. K.; FENSOME, R. A. **The Lentin & Williams index of fossil dinoflagellates 1998 edition**. College Station, Tex.: American Association of Stratigraphic Palynologists Foundation, 1998. 817 p. (Contributions series, 34)
- WILPSHAAR, M.; LEEREVELD, H. Palaeoenvironmental change in the Early Cretaceous Vocontian Basin (SE France) reflected by dinoflagellate cysts. **Review of Paleobotany Palynology**, Amsterdam, v. 84, n. 1/2, p. 121-128, 1994.

expanded abstract

This paper summarizes the evolution of the fossil dinoflagellate studies in Brazil and the parallel progress of offshore petroleum exploration. The use of dinoflagellates as a new tool was very important to the upgrading of marine palynostratigraphy applied to petroleum exploration. Although biostratigraphic applications of dinoflagellate cysts had been previously considered in Brazil (e.g. Regali, 1971; Regali et al. 1974 a,b; Regali, 1980), a biostratigraphic framework based exclusively on dinoflagellates was not erected until the early nineteen nineties (Arai, 1992, 1994; Arai and Botelho Neto, 1996; Lana and Roesner, 2002; Lana et al. 2002). Certainly, oil exploration needs in the Campos Basin were an initial stimulating factor, because the first reservoirs recognized were within the Albian-Cenomanian marine strata. Until the end of the nineteen eighties, Cretaceous palynostratigraphy in Brazil was based traditionally on terrestrial palynomorphs (mainly spores and pollen grains). This was due to the following factors: (1) for several decades, Brazilian petroleum exploration had focused on the Recôncavo Basin, the sedimentary filling of which is essentially nonmarine; (2) some other basins, both of marine and nonmarine character, have yielded reasonable results through the application of traditional palynostratigraphy based on terrestrial palynomorphs; (3) pioneer foreign palynologists (e.g. H. Müller), who came to Brazil to train the earliest native biostratigraphers at Petrobras, were all experts in spores and pollen grains; (4) marine Cretaceous rocks suitable to palynological study are poorly exposed in Brazilian onshore areas, so hampering investigations by Brazilian academics who had no access to subsurface data. The last factor was particularly crucial in hindering the development of the Brazilian marine Cretaceous palynology. The access to subsurface material, which is palynologically richer and involves a wider range of stratigraphic intervals, was restricted to workers in the employ of the petroleum companies. A striking contrast is noticed as the situation is compared to the study of Brazilian marine Devonian palynomorphs – mostly scolecodonts, chitinozoans, and microphytoplankton. Here, investigations began as early as the nineteen forties and fifties and were supplied by abundant materials collected from areas of extensive exposures along the borders of the great Paleozoic intracratonic basins, particularly the Paraná and Amazonas basins. During the nineteen sixties, Petrobras extended oil exploration to the Brazilian

continental shelf (offshore areas) (fig. 1). Nevertheless, at that time the company did not invest immediately in marine palynostratigraphy, because it was believed that biostratigraphic schemes based on foraminifers and calcareous nannofossils would be more efficient and reliable than palynology in dating marine Cretaceous sequences. This belief changed only in the nineteen seventies, when the first commercial oil fields were discovered in the Campos Basin. The oil reservoirs identified at that time were within the Macaé Formation, a rock unit deposited in a carbonate shelf environment under restricted (hypersaline), shallow marine conditions. These environmental conditions were certainly hostile to the development and post-mortem preservation of foraminifers and calcareous nannofossil-producing algae. As a result, no more than two or three biozones could be identified in the Macaé carbonate section on the basis of such organisms. Besides, carbonate shelf sediments, subject only to minor terrigenous input, are usually poor in terrestrial palynomorphs. After some initial attempts it was soon concluded that traditional palynostratigraphy, based mainly on terrestrial palynomorphs, was unsuitable to the zonation of the Macaé Formation. On the other hand, the palynological content of some Macaé strata consists mainly (up to 100%) of such marine palynomorphs as dinoflagellates, acritarchs e palynoforaminifers. Consequently, Petrobras recognized the importance of developing a zonal framework based on those organisms. The first zonation was erected by Uesugui (1976), who used one acritarch and three dinoflagellate species to subdivide the Macaé Formation. Since the nineteen eighties, marine Cretaceous palynostratigraphy has made significant advances mainly due to the use of dinoflagellates. Nowadays, marine Cretaceous palynostratigraphy in Brazil relies almost entirely on dinocysts (dinoflagellate cysts). These is due to the fact that, by Mesozoic times, marine palynomorphs that had prospered in the Paleozoic had either become decadent and numerically insignificant (e.g. acritarchs) or were long extinct (such as chitinozoans and graptolites). On the other hand, dinoflagellates first appeared at the end of the Triassic and attained their climax during the Cretaceous (fig. 2). Because of their abundance and diversity, with plenty of efficient guide fossils, dinocysts (fig. 3) are utilized worldwide in the Cretaceous marine palynostratigraphy. As far as the evolution of fossil dinoflagellate studies in the Cretaceous of Brazil is concerned, three historic moments can be defined. The first was un-

doubtedly the proposal of the Alpha and Beta intervals as the pioneer subdivisions of the Albian of the Campos Basin (Uesugui, 1976). This framework was later improved by Azevedo et al. (1987), who further subdivided the Beta interval (Beta-0 and Beta-1), and Arai and Uesugui (1989), who corrected the taxonomic nomenclature of guide fossils of the Alpha, Beta-0 and Beta-1 intervals (fig. 4). The second moment was marked by the publication of a series of works by Arai (1990, 1992, 1994) that consolidated a biozonation based exclusively on dinoflagellates, applicable to all Cretaceous marine sections of the Campos Basin. This second phase was also characterized by a remarkable progress in the taxonomic inventory. The number of fossil dinoflagellate taxa known in Brazil increased from 30, by the end of the nineteen eighties, to about 180, in the mid-nineties (fig. 5). The third historic moment was characterized by the extended applicability of dinoflagellate zonal schemes beyond the Campos Basin. It was soon realized that the same biozonation could be applied to all continental margin basins of South and Southeast Brazil, as indicated by Arai and Botelho Neto (1996). Furthermore, new biostratigraphic frameworks based on dinoflagellates were created for other basins of Brazil, namely: Potiguar (Lana, 1997) and Ceará (Lana and Roesner, 2002). The survey of dinoflagellate associations in various basins led to an improved knowledge of paleobiogeographic provinces (Arai et al. 2000), through pioneer studies by Lana and Botelho Neto (1989). Consequently, regional frameworks quite different from that of the Campos Basin became acceptable, with the main bio-horizons being calibrated in relation to the standard chronostratigraphic scale. In recent decades, as petroleum exploration activities moved into deep-water areas of the Brazilian coast, strata representative of deeper marine paleoenvironments were drilled. It is now clear that, had an operational dinoflagellate biostratigraphy not been improved in due time, Petrobras would now face considerable difficulties in the marine middle Cretaceous biostratigraphy.

autor author



Mitsuru Arai

Centro de Pesquisas da Petrobras (Cenpes)

Gerência de Bioestratigrafia e Paleocologia

e-mail: arai@cenpes.petrobras.com.br

Mitsuru Arai nasceu no Japão em 1951, vindo para o Brasil em 1959. Formou-se em Geologia pelo Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo em 1976, ingressando na Petrobras em 1977. No ano de ingresso, trabalhou na Geologia de Subsuperfície, acompanhando a perfuração de poços exploratórios nas bacias de Sergipe, Alagoas, Espírito Santo e Campos. Trabalha na Bioestratigrafia desde 1978, tendo sido lotado no antigo Dexpro, no Depex e, desde 1981, no Cenpes. Trabalhou também com a Geoquímica Orgânica no período de 1982 a 1985. É mestre pela Universidade Federal Fluminense (pós-graduação em Geoquímica) e, atualmente, prepara seu doutoramento na área de Estratigrafia junto à Universidade Federal do Rio Grande do Sul.