

# Ecologia do microfitobentos ou a cor dos lodos

Vanda Brotas

Instituto de Oceanografia, Departamento de Biologia Vegetal, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Campo Grande, 1749-016 Lisboa

Os lodos e sapais são paisagens inóspitas que requerem uma aprendizagem progressiva e lenta. O visitante, que de início só sente a monotonia e a quietude do lugar, ao fim de pouco tempo percebe que a calma é aparente, que há uma mudança constante dada pelo movimento das marés, e que a monotonia se transforma em padrões de variedade de espécies vegetais e animais.

Se focar o seu olhar sobre o microcosmos, o visitante poderá reparar que a superfície do lodo apresenta manchas de cor que vão do castanho-dourado ao verde-claro, formando um tapete uniforme ou pequenos mosaicos (Fig. 1). Se esperar pela chegada da maré enchente, poderá reparar que essas manchas de cor desaparecem rapidamente. Se, intrigado, o visitante perguntar a um pescador da zona, este dir-lhe-á que é um "coalho" formado pela vasa, que desaparece com as chuvas ou ventanias, que é comido pelas tainhas e enguias, mostrando os rastros das suas bocas no solo. Se, ainda insatisfeito, perguntar a um biólogo, poderá obter a seguinte resposta: "estas manchas são formadas por

microalgas unicelulares epibênticas, principalmente diatomáceas pinuladas, euglenófitas e cianófitas, que constituem o primeiro elo da cadeia trófica bentónica e têm um papel muito importante nos ciclos biogeoquímicos da interface sedimento-água".

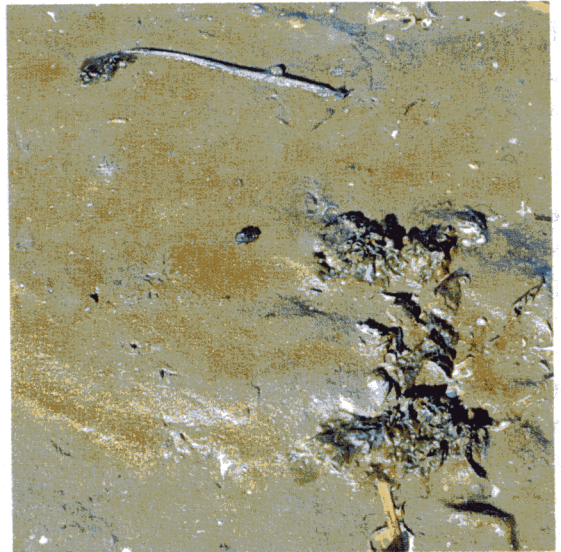


Figura 1 - Fotografia da superfície da vasa, no Estuário do Tejo, onde se distinguem as manchas de cor castanho-douradas devido à presença de diatomáceas.

*Discuti o meu relatório de estágio de licenciatura com o Professor Catarino em 18 Janeiro de 1983. Sabia que o INIC<sup>a</sup> aceitava candidaturas para Bolsas de Iniciação à Investigação Científica, cujo prazo acabava 48 h depois.*

*"Tem de concorrer!", disse o Professor, quando eu, timidamente, lhe expliquei a situação. "Da última vez que estive no sapal", disse ele, "reparei na intensidade da cor dos lodos. Essa cor é dada pelas microalgas, que têm uma biomassa muito elevada, responsáveis por uma grande parte da produção primária destes ecossistemas. É um assunto muito interessante, e não há ninguém em Portugal a estudá-lo."*

*Nessa tarde, o Professor Catarino e eu, escrevemos um plano de bolsa com três parágrafos, que haveria de determinar a minha vida e que, ainda hoje, ao fim de mais de 20 trabalhos científicos, inúmeras comunicações, projectos da JNICT/FCT, projectos europeus, cooperações bi-laterais com vários países, estagiários, bolseiros, doutoramentos, pós-doutoramentos, não consegui completar.*

## O que é o microfitobentos?

Microfitobentos é um termo que designa as algas unicelulares que vivem sobre um substrato inerte em ambiente aquático. A comunidade do microfitobentos é constituída essencialmente por diatomáceas, euglenófitas e cianobactérias. As dimensões destes organismos variam entre poucos micrómetros até mais de 500 µm, e incluem formas livres e formas que estão agarradas às partículas de sedimento. A fracção livre tem a capacidade de migrar verticalmente no sedimento, em resposta ao estímulo conjugado da luz e da maré<sup>1</sup>. As diatomáceas, que constituem o grupo dominante (Figura 2), segregam mucila-

gens, formadas por mucopolissacáridos, que muito contribuem para a estabilidade dos sedimentos<sup>2</sup>. A película formada pelas células das microalgas e pelas mucilagens designa-se por biofilme, constitui uma fronteira física entre o sedimento e a coluna de água, ou o ar, e por vezes, é ressuspensa por acção da maré, formando uma membrana de alguns centímetros de diâmetro.

A concentração das células à superfície dos sedimentos, suficiente para causar uma coloração intensa, pode atingir valores da ordem de  $10^9$  a  $10^{10}$  células  $m^{-2}$  (3,4)<sup>b</sup>.

Esta conspicuidade deve ser a causa das diatomáceas bênticas, tal como as pelágicas, serem reconhecidas pela comunidade científica desde 1830<sup>5</sup>, sendo a ocorrência de manchas de cor castanha da vasa referida como um indício claro da sua presença por Pelletan em 1888<sup>6</sup>. O fenómeno da migração com as marés foi objecto de publicação em 1907<sup>7</sup>.

No entanto, os primeiros trabalhos sobre a ecologia desta comunidade datam apenas do fim da década de 50 do século XX, tendo sido o trabalho de Pomeroy (1959)<sup>8</sup> o primeiro a medir a produção fotossintética das microalgas bênticas dos sedimentos intertidais de um sapal da Georgia (U.S.A.), concluindo sobre a importância do seu contributo para a elevada produtividade dos sapais. Note-se que os famosos trabalhos de Steeman-Nielsen sobre a produção primária do fitoplâncton, descrevendo a metodologia do carbono catorze são de 1951/52.

É curioso verificar que houve sempre um

<sup>b</sup> Como se vêem espécies do microfitobentos?

- Recolha a superfície da vasa e coloque, por exemplo, numa caixa de Petri.

- À chegada ao laboratório, depois de homogeneizar a superfície da vasa, coloque a caixa de Petri (destapada) à luz (pode ser ao pé de uma janela), e coloque uma lamela sobre a vasa. - Depois de esperar um pouco (10 a 30 minutos, dependendo da concentração das células), retire cuidadosamente a lamela, com a ajuda de uma pinça, e monte-a numa lâmina de microscópio, onde já tinha adicionado uma gota de água (preferencialmente com salinidade semelhante à da amostra). É claro que a superfície da lamela em contacto com a vasa tem de ficar em contacto com a gota de água.

- Observe ao microscópio. As microalgas, sob o efeito da luz migraram, ficando coladas à lamela, isoladas das partículas de sedimento. Observe a cor, a forma, o movimento das células.

<sup>a</sup> Instituto Nacional de Investigação Científica.



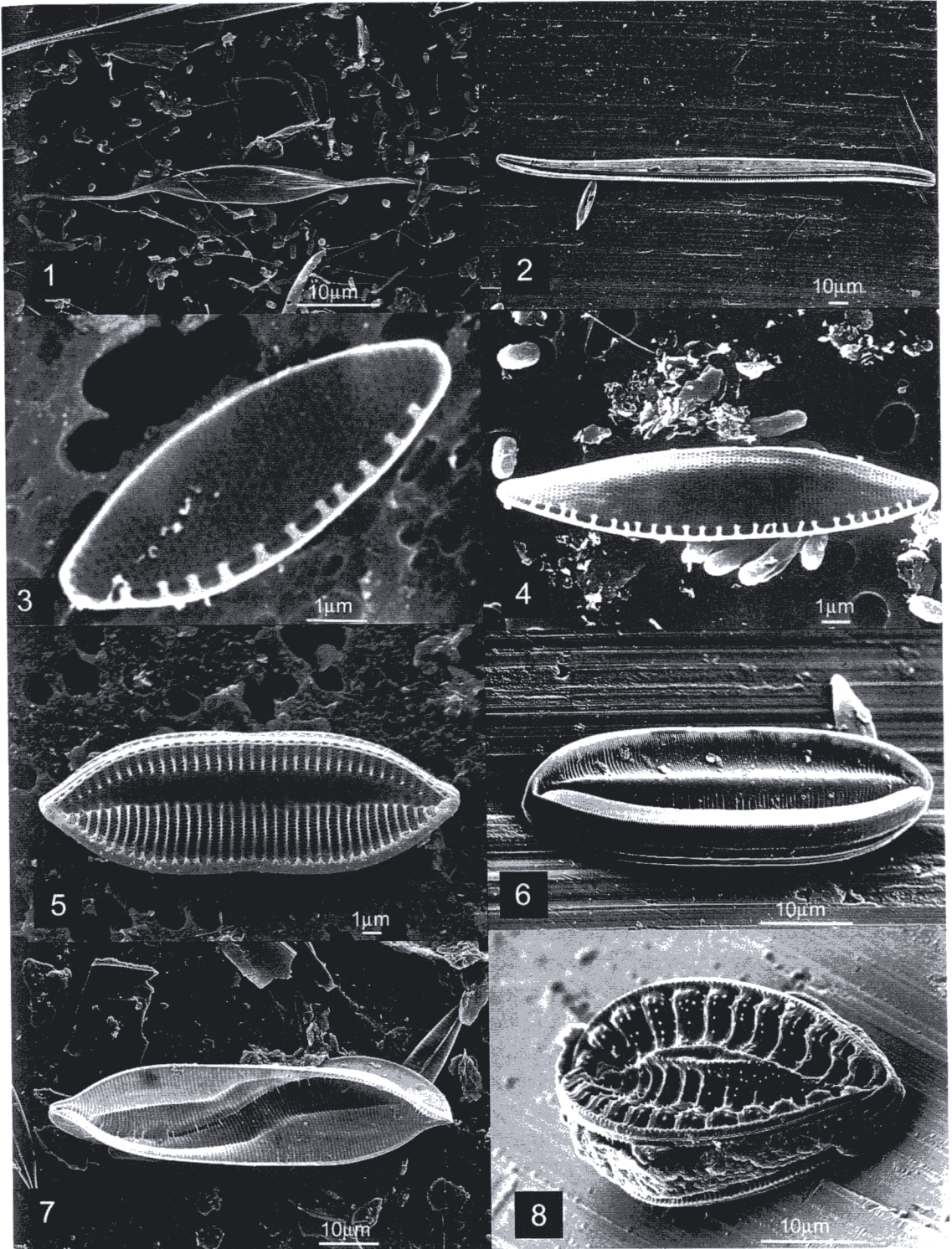


Figura 2 - Fotografias de espécies típicas de diatomáceas no Microscópio Eletrônico de Varrimento. 1. *Cylindrotheca closterium*, 2. *Nitzschia sigma*, 3. *N. alexandrina*, 4. *N. tubicula*, 5. *Tryblionella apiculata*, 6. *T. gracilis*, 7. *Entomoneis paludosa*, 8. *Surirella* sp. [cf. *brightwellii*], adaptado de Ribeiro e colaboradores<sup>29</sup>

atraso de alguns anos entre a aplicação de metodologias novas no fitoplâncton e no microfítobentos (por exemplo, aplicação da análise dos pigmentos por HPLC para a quimio-taxonomia, aplicação da fluorescência para estudar a fotossíntese, aplicação dos isótopos naturais para o estudo das cadeias tróficas) o que se justifica pela importância relativa que as duas comunidades têm, em termos de área, na biosfera.

A partir da década de 70, o estudo do microfítobentos tem sido objecto de muitas publicações, sobretudo para a Europa do Norte e Estados Unidos, em que a caracterização dos povoamentos, a quantificação da biomassa e avaliação da produção primária são feitas em paralelo com a formulação de hipóteses sobre os factores bióticos e abióticos que as influenciam. Mais recentemente, os trabalhos feitos sobre o microfítobentos são parte integrante de temas interdisciplinares, como a modelização dos ecossistemas estuarinos, o seu papel na assimilação de compostos azotados e conseqüentemente na remoção de azoto dos ecossistemas, a resposta desta comunidade à eutrofização, a relação entre erodibilidade dos sedimentos e concentração de biomassa de microfítobentos, ou a ressuspensão dos sedimentos e a produtividade dos estuários, entre outros. A Figura 3 resume a posição das células do microfítobentos, em termos de função, no seu habitat.

*Entre ler a descrição das metodologias nos artigos e a sua implementação vai um grande passo, tanto maior quanto maior a nossa inexperiência na matéria, que, no caso, era considerável. Encalhávamos nos pormenores aparentemente mais simples. "Mas como fazemos a colheita da amostra sem perturbar a superfície do sedimento de modo a quantificar tanto a área como o peso?"*

<sup>c</sup> Note-se que, exactamente esta questão, ainda entra na agenda da reunião de um projecto europeu, em que participo, a decorrer em Junho de 2002.

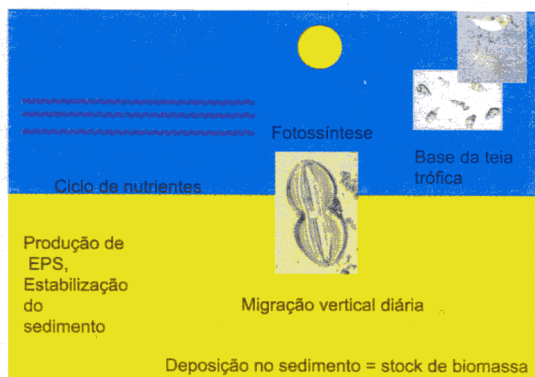


Figura 3 - Esquema que resume os principais processos que envolvem as células do microfítobentos no seu habitat.

*"É fácil", lembrou o Professor Catarino, com o seu optimismo habitual, "está a ver aqueles anéis dos queijinhos frescos?". Comprámos (e comemos) os queijos frescos e experimentámos os anéis, que foram os primeiros de uma longa série de "corers", de vários diâmetros e tamanhos. "Para retirar a amostra do sedimento com 1 cm de profundidade, sem estragar, a Vanda sabe o que é uma colher de pedreiro?". Eu não sabia, mas fiquei a saber, porque comprei muitas, que se enferrujavam rapidamente na lama do Tejo.*

### Factores que influenciam a distribuição da biomassa do microfítobentos

As microalgas bênticas colonizam a superfície dos sedimentos aquáticos até ao limite da penetração da radiação luminosa, e nas zonas intertidais, até ao limite superior da praia-mar.

A distribuição da biomassa exhibe um elevado grau de heterogeneidade espacial a várias escalas, devido à multiplicidade de factores que a influenciam. Simplificando, podem-se considerar duas escalas, uma da ordem dos milímetros, que depende essencialmente de alterações microtopográficas da superfície do sedimento e do modo de colo-



nização das microalgas, decorrente do seu modo de divisão vegetativa, e a outra, que engloba a variabilidade encontrada numa gama que varia dos centímetros às dezenas de metros, que se relaciona com gradientes ambientais tais como a estrutura do sedimento, o grau de exposição ao ar, a cobertura por plantas superiores, ou a presença de herbívoros. A heterogeneidade espacial é uma característica interessante desta comunidade, que é necessário ter em conta quando se fazem extrapolações de biomassa para áreas maiores ou quando se comparam diferentes regiões.

Tal como para o fitoplâncton, o índice de biomassa para o microfítobentos é a determinação da quantidade de clorofila *a* por unidade de área ou de peso de sedimento.

Embora só as microalgas que estão à superfície do sedimento recebam radiação luminosa, e portanto, estejam em condições de realizar fotossíntese, para determinar o índice de biomassa, toma-se, consoante os autores, uma espessura de sedimento que vai de 2 mm a 1 cm. Assim, quando se fazem comparações entre os vários ecossistemas, há que ter em conta não só a heterogeneidade espacial, como a metodologia utilizada pelos vários trabalhos.

Para exemplificar esta questão, apresenta-se a Figura 4, que ilustra a heterogeneidade obtida a pequena escala (1 m<sup>2</sup>), e à escala intermédia (transepto de 35 m no sapal de Pancas), assim como os resultados obtidos em 21 estações de colheita distribuídas pelos cerca de 100 km<sup>2</sup> de área intertidal do Estuário do Tejo. O último gráfico compara o valor da média anual da biomassa microfítobentónica para várias regiões da Europa, incluindo o sapal de Pancas (dados gentilmente cedidos por K. Sundbäck). Se compararmos o coeficiente de variação (desvio padrão a dividir pela média, em percentagem) para estas séries de dados, obtemos o seguinte: 13% para a pequena escala, 86 % para o transepto no sapal, 73% para as

estações do Estuário do Tejo e 64% para as regiões costeiras europeias.

*Escondido do trânsito da ponte, nas tra-seiras das novas urbanizações da outra banda, ficava o sapal de Corroios. Vasta extensão de canais imbricados e zonas de sapal alto, em que na maré vazia, a superfície da vasa ficava repleta de pequenos búzios (*Hydrobia ulvae*) e cheia de pequenos orifícios, de onde saíam, de vez em quando, bolhas de ar que rebentavam, equivalentes ao respirar do ecossistema.*

*O Sr. Felizberto tinha uma casa de madeira bem no meio do sapal, mesmo ao lado da minha estação 2. Sempre que lá íamos, avistávamos o Sr. Felizberto no meio da lama, arrastando uma pequena jangada de madeira, ou ao pé da vala, lançando as redes na água para apanhar camarinha, colhendo todos os recursos do sapal que se vendiam ao quilo.*

*Quando o Professor Catarino vinha connosco, a conversa com o Sr. Felizberto estendia-se por vários assuntos, "As minhocas para a pesca, então onde é que vai vender? Tantos quilos de chocos por maré? Isso dá x toneladas por ano! As lamejinhas vão para a Marateca para a aquacultura? Uma família apanha sete cestos por maré?". "Então e o Professor gosta de choquinhos grelhados?" perguntava, retoricamente, o Sr. Felizberto, "...maravilha... e com feijão?" respondia o Professor Catarino.*

*De uma das vezes mostrou-nos uma ave limícola, morta, com uma anilha que reparamos ser escrita em inglês. "Essa ave foi anilhada num país estrangeiro, se quiser, dê-nos a anilha que nós lá no Museu tratamos de a entregar às pessoas que a colocaram", ofereceu o Professor Catarino.*

*"Não, deixe estar" disse o Sr. Felizberto, completamente sujo de lama, sorrindo, como sempre, de ténis desfeitos e calções arregaçadas até às virilhas, "eu mando pelo correio para o Museu Britânico".*

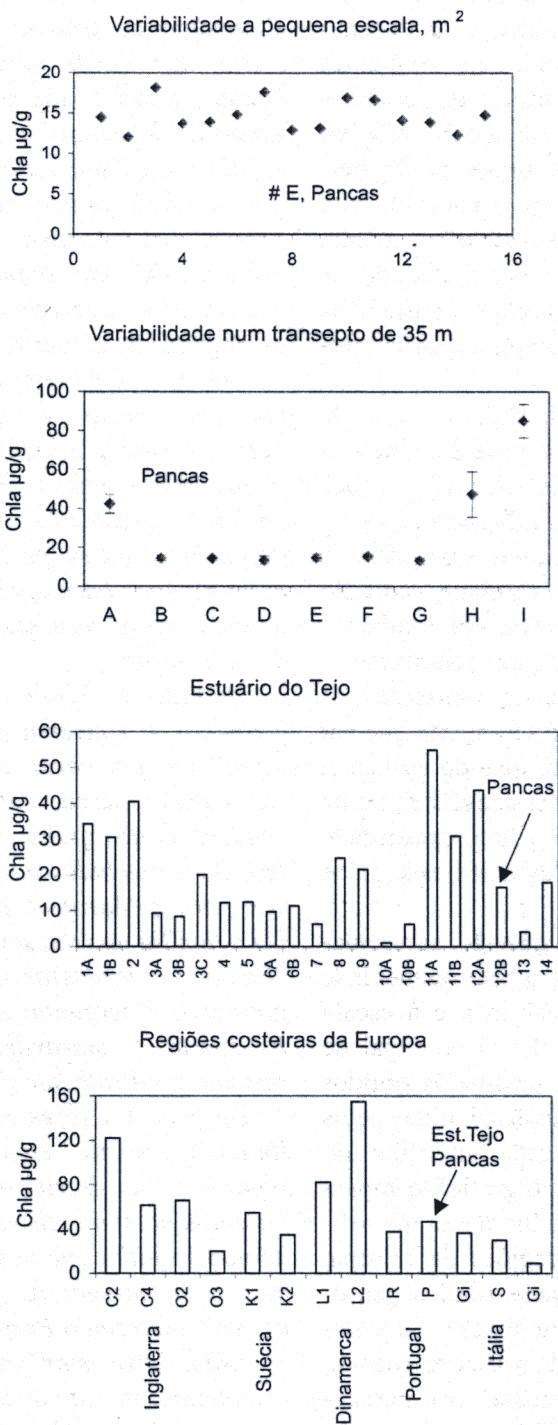


Figura 4 - Variabilidade espacial da clorofila *a* (índice de biomassa do microfitobentos), em várias escalas. Dados adaptados 10,22 e cedidos por K. Sundbäck.

O microfítobentos está sujeito a uma distribuição temporal, sofrendo a influência de várias escalas de tempo justapostas: o ritmo semi-diário das marés, o ciclo dia/noite, o ciclo quinzenal das marés vivas/marés mortas, e as estações do ano<sup>9</sup>.

Esta comunidade está localizada na interface sedimento-água. Segundo alguns autores, esta interface pode ser considerada como uma ergoclina (*ergo*, do grego, significa trabalho), dado que constitui uma transição abrupta entre uma fase instável, com nível elevado de energias auxiliares (a coluna de água) e uma fase estável com baixos níveis de energia (o sedimento). Todas as interfaces com produção biológica elevada constituiriam ergoclinas, ocorrendo a produção máxima no lado estabilizado da interface. Ainda segundo esta teoria, as energias auxiliares seriam as marés, o vento, a "bioperturbação" e a herbivoria, enquanto que os recursos potencialmente limitantes seriam a luz, os nutrientes e o espaço.

Com efeito, a acção do vento e das correntes de maré provoca a ressuspensão das células das microalgas e das partículas de sedimento na coluna de água. Assim, o recurso espaço é renovado através da ressuspensão do sedimento, estando a comunidade das microalgas sujeita à alternância de uma fase estável, em que há produção (acréscimo de biomassa), com a fase instável, em que há dispersão das células na coluna de água, pelo efeito das energias auxiliares. A presença das células de microalgas bênticas na coluna de água tem um efeito positivo no fluxo de energia da cadeia trófica do ecossistema, dado que ficam disponíveis também para os níveis tróficos presentes na coluna de água.

Deste modo, a distribuição temporal do microfítobentos segundo as diversas escalas de tempo tem importância na ecologia desta comunidade, assim como no funcionamento do ecossistema a que pertence.

Deixando a discussão das outras escalas de variabilidade temporal para o capítulo de J. Serôdio, apresentam-se aqui resultados da evolução anual da biomassa microfítica, nos anos de 1991/92 e 1997/98, para quatro estações de colheita situadas no vasto espraiado de maré frente à localidade do Rosário (Fig. 5).

A existência de um padrão sazonal para o microfítobentos com valores mais elevados na Primavera-Verão é referido por alguns autores, enquanto outros verificam a sua ausência, justificando com a grande variabilidade dos factores ambientais e biológicos que potencialmente a influenciam. Num trabalho publicado em 1995<sup>10</sup>, concluímos que, nos locais situados em cotas de maré superiores, a evolução da biomassa sofria a influência de parâmetros climáticos, enquanto que, nos locais de baixas cotas de maré, a biomassa seria afectada principalmente pela acção da ressuspensão dos sedimentos. No entanto, após a realização do segundo ciclo anual, em 1997/98, a imprevisibilidade parece ser a única resposta que sabemos dar, face à complexidade dos fenómenos envolvidos<sup>d</sup>.

Para além da distribuição ao longo dos vectores espaço e tempo, o microfítobentos distribui-se também em profundidade. A existência de células no interior do sedimento deve-se ao efeito da migração (numa espessura de alguns  $\mu\text{m}$  em relação à superfície do sedimento) mas, principalmente, ao efeito da sedimentação que faz com que importantes concentrações de células vivas permaneçam enterradas no sedimento, em estado latente, constituindo um stock de produtores primários potenciais<sup>11</sup>. Estas células podem manter-se viáveis durante muito tempo, tornando-se fotossinteticamente acti-

<sup>d</sup> Esta situação não é apanágio do microfítobentos. Há uma anedota que corre nos congressos que é a seguinte: "Se queres uma boa tese de mestrado, faz um ciclo anual de fitoplâncton, com colheitas mensais, se queres uma boa tese de doutoramento, faz um ciclo de dois anos, se queres nunca acabar o doutoramento, faz um ciclo de três anos".



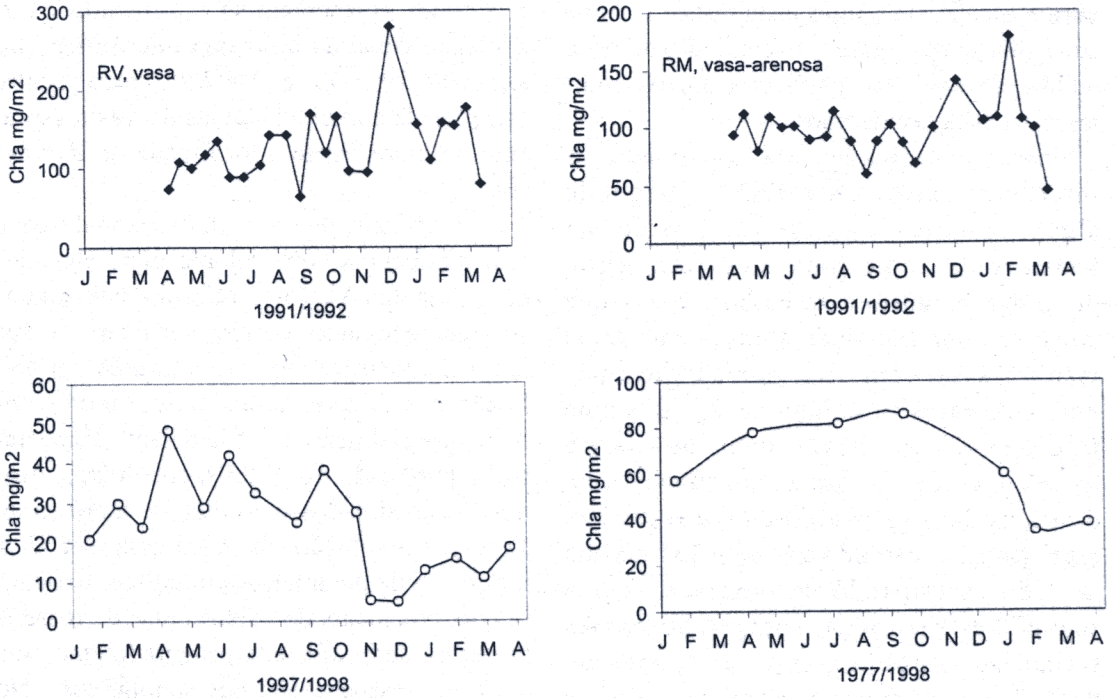


Figura 5 - Variação sazonal da biomassa do microfitobentos, obtida em dois ciclos anuais<sup>10,24</sup> em estações localizadas na zona intertidal frente à localidade do Rosário. Note-se que as escalas são diferentes.

vas apenas quando a superfície do sedimento é removida, sob o efeito da ressuspensão ou da “bioperturbação”. A concentração de biomassa em profundidade é função da sua concentração à superfície de sedimento, no tempo  $t$ , como foi por nós demonstrado num trabalho anterior<sup>12</sup>. Com efeito, a quantidade de biomassa presente em cada camada de sedimento pode ser descrita segundo uma função do tipo exponencial (Fig. 6A), permitindo generalizar a seguinte conclusão: a percentagem de clorofila  $a$  presente na camada superficial de 0-0,5cm em relação ao estrato de 0-5cm é de 21% e 25% para sedimentos arenosos e vasosos, respectivamente, enquanto que a percentagem de clorofila  $a$  na camada de 0-1 cm em relação ao mesmo estrato de 0-5cm, é de 39% e 44%, também para sedimentos arenosos e vasosos, reflectindo a importância considerável desta reserva de biomassa no interior dos sedimentos intertidais estuarinos. Por outro lado, a

partir de dados de cerca de 100 perfis de pigmentos em profundidade, amostrados quinzenalmente no Estuário do Tejo, determinámos que o equilíbrio dinâmico a que as células estão sujeitas, que se pode designar como ressuspensão/enterramento, está deslocado no sentido do enterramento, dado que medimos uma taxa de enterramento positiva de 0,2-0,3mm por dia, e que a relação entre a concentração de clorofila  $a$  em cada camada de profundidade e a coordenada tempo pode ser representada segundo o modelo ilustrado na Fig. 6B.

*Como medir a produção primária? Existem os métodos clássicos e, de vez em quando, surgem novos métodos. Antes de termos tido tempo de ensaiarmos os clássicos, surgiu-nos a oportunidade de experimentar uma nova metodologia, utilizada, até essa altura, apenas para as plantas superiores.*



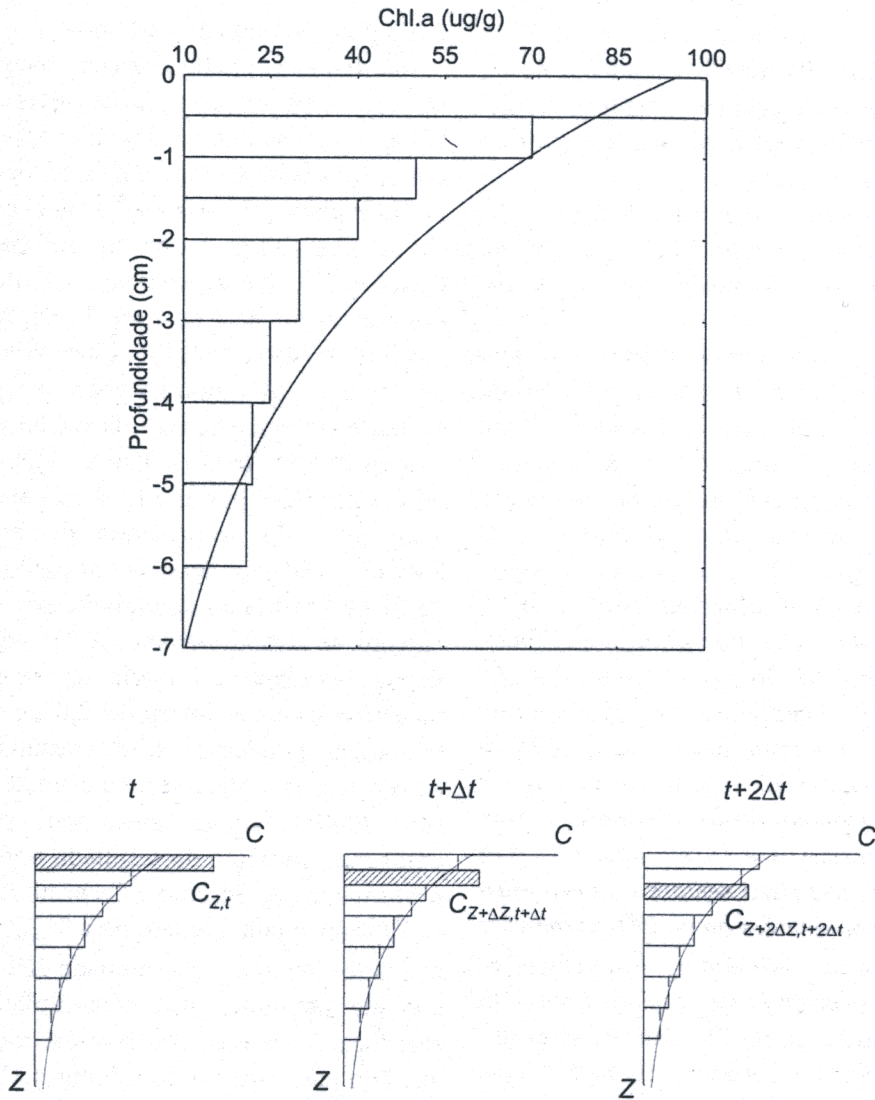


Figura 6 - A. Distribuição da clorofila *a* em profundidade, que pode ser descrita com uma função exponencial. B. Modelo que relaciona a concentração da clorofila *a*,  $C$ , em função da profundidade,  $Z$ , ao longo do tempo,  $t$ .<sup>12</sup>

"Vanda", disse-me o Professor Catarino, "Na Quinta da Sobreda há um equipamento óptimo para medir a fotossíntese, o "CO<sub>2</sub> porometer", tem de levar lá os seus queijinhos de lama. Eu assim fiz. Passei longos dias na Quinta da Sobreda, a carregar no "Start", a beber sumos, sob um calor tórrido e uma atmosfera parada. Amostras de sedimento de cor castanha-clara, amostras de sedimento com manchas

de cor verde-escura, e amostras da macroalga *Bostrychia scorpioides*, (que forma tufos espessos à volta dos caules de *Spartina*, aos quais os pescadores designam por musgo ou muge). A fotossíntese é um passo de magia, faz-se "On" no botão da luz, e observa-se no registador, o teor de CO<sub>2</sub> a diminuir. Ainda não havia computadores, John Tenhunen (um investigador americano a trabalhar em Warzburg) ensinou-me a fazer os cálculos de

*fotossíntese e respiração das amostras na minha "Hewlett Packard", nos intervalos em que não estava ele próprio a medir fotossíntese nas plantas mediterrânicas ou a tomar conta do filho pequeno.*

*Passados uns tempos, recebo outro recado entusiasta: "O Professor Lange está na Sobreda, tem de ir lá mostrar os seus resultados".*

*Lá fui eu, com o meu caderno de capa azul cheio de cálculos e tabelas, as folhas de registador devidamente identificadas, um discurso mal alinhavado "As microalgas, muito importantes, o Estuário do Tejo, muito grande, os sapais, a fotossíntese..." O Professor Lange e a sua assistente olhavam-me com um olhar absolutamente estático, desinteressado, "Yes, but what is the question?". Eu estava tão nervosa que a minha boca secara completamente, dificultando ainda mais a minha pobre explicação, o calor (os alemães só faziam campanhas em Portugal em pleno Verão) e a tensão eram quase insuportáveis e só me faziam querer desaparecer dali para sempre e nunca mais ouvir falar em alemães ou no CO<sub>2</sub> porometer.*

*Menos de um ano depois deste episódio, o mesmo Professor Lange assinava um artigo na prestigiada revista *Marine Biology*, com o Professor Catarino, comigo e com John Tenhunen, onde se mostrou a importância desses resultados e onde se acabou por contar uma boa história<sup>13</sup>.*

## **Função do microfitobentos nos ecossistemas**

Por definição, a produção primária líquida é a quantidade de carbono fixada através da fotossíntese, que está disponível para o primeiro nível heterotrófico. Deste modo, é a medida base de todos os ecossistemas, a partir da qual se levantam as outras questões ambientais, tais como, a transferência de energia ou a influência dos processos

biológicos no ciclo do carbono<sup>14</sup>.

No Estuário do Tejo existem quatro tipos de produtores primários: as halófitas ou plantas de sapal, as macroalgas, o fitoplâncton e o microfitobentos. Para o microfitobentos, a produtividade primária média anual estimada foi de 47 e 178 g de Carbono m<sup>-2</sup> para duas estações de colheita, Rosário e Alfeite, situadas a cotas de maré de 1,4 e 3,1 m, respectivamente<sup>15</sup>. Nesse trabalho, estimou-se a produtividade do microfitobentos para o Estuário do Tejo, através da média entre os valores obtidos para as duas estações, 113 g de Carbono m<sup>-2</sup> por ano (g C m<sup>-2</sup> ano<sup>-1</sup>), e a área total dos espriados de maré do Estuário, 100 km<sup>2</sup>, tendo-se atingido o valor de 11 000 toneladas de carbono por ano. No entanto, se considerarmos que 88% dos sedimentos vasosos do estuário se encontram a uma cota de maré inferior a 2,0 m, fazendo uma média ponderada entre os resultados das duas estações, obtém-se uma estimativa inferior: 7200 toneladas de carbono por ano, valor mais próximo do resultado obtido posteriormente por Serôdio e Catarino (2000)<sup>16</sup>.

O valor médio medido para P<sup>b</sup><sub>max</sub>, ou seja, a taxa fotossintética por unidade de clorofila, sob luz saturante, (que é controlada pelas reacções enzimáticas da fase escura da fixação do carbono) foi de 0,6 mg de Carbono por mg de Clorofila *a* por hora (mg C mg Chl<sup>a</sup>-1 h<sup>-1</sup>), semelhante aos valores referidos na maior parte da bibliografia para o microfitobentos<sup>15</sup>, embora se possa encontrar um leque de valores elevado, que se estende até 12 mg C mg Chl<sup>a</sup>-1 h<sup>-1</sup> (17).

Este parâmetro, de importância fundamental na formulação de modelos de produtividade primária pode variar, no que diz respeito ao fitoplâncton (onde a quantidade de trabalhos é muito superior), entre 0,5 e 20 mg C mg Chl<sup>a</sup>-1 h<sup>-1</sup> (14). As razões da sua variabilidade ainda não são bem conhecidas. Para obviar este problema, alguns modelos de produção primária optam por utilizar uma



constante para  $P_{b_{max}}$  (valores como 3,7, 2,5 e 4,8 têm sido sucessivamente propostos por vários autores).

Em Ecologia, na impossibilidade de se conhecer a medida exacta das comunidades biológicas, em todos os momentos do espaço e do tempo, é fundamental conhecer a sua ordem de grandeza, assim como os seus limites. Assim, há perguntas que fazem todo o sentido: "Como se compara esta comunidade com os outros produtores primários, em termos de biomassa e produtividade? Quais os ecossistemas mais produtivos? Qual a maior produtividade primária possível, teoricamente?"

A Tabela 1 compara valores de concentração de clorofila *a* por superfície (mg Chl  $a$   $m^{-2}$ ) em diversas comunidades vegetais, realçando os resultados obtidos para o microfitobentos. A Tabela 2 compara valores de Produtividade Primária para vários ecossistemas, destacando os valores obtidos para o Estuário do Tejo. Foram integrados nesta tabela valores recolhidos em livros de texto clássicos, cujos resultados provinham de metodologias diferentes consoante os diferentes ecossistemas, e valores de Produção Primária Líquida (NPP, "Net Primary Productivity) publicados em 1998 por Field e colaboradores<sup>18</sup>, estimados a partir da modelização de dados de imagens de satélite, de dados de radiação fotossintética e do parâmetro  $\epsilon$ , a eficiência fotossintética de utilização da luz (determinado a partir de dados experimentais de campo). É interessante notar que esta última estimativa indica valores inferiores de produtividade total e coloca em equivalência a produtividade marinha, com 46,2% e a produtividade terrestre, com 53,8%, enquanto que, nas anteriores estimativas<sup>19,20</sup>, o equilíbrio do planeta era nitidamente a favor dos ecossistemas terrestres, com 64,2% do total. Ainda segundo Field, a produtividade máxima registada é da ordem de 1000 a 1500 g C  $m^{-2}$  ano<sup>-1</sup>, encontrada tanto nos ecossistemas terrestres (flo-

restas tropicais) como nos marinhos (estuários e zonas de "upwelling" ou afloramento costeiro). Outro factor a ter em conta na análise da Tabela 2 é a diferença abismal entre o tempo de "turnover" da biomassa das microalgas, 2 a 6 dias e as plantas terrestres, 20 anos em média (valores indicados por Field *op. cit.*)

Da análise destas tabelas, verifica-se que, em relação à biomassa do microfitobentos, sendo os valores de 900 mg Chl  $a$   $m^{-2}$  raros na bibliografia (ocorrendo nas cotas de maré superiores, sob a protecção da vegetação de sapal), os valores máximos referidos na generalidade dos casos, 300 mg Chl  $a$   $m^{-2}$ , são equivalente aos registados para o fitoplâncton em zonas de "upwelling". Verifica-se também, que a maioria dos valores de produção primária referenciados, estão situados entre o intervalo de valores de produção primária para o fitoplâncton dados para o oceano e para as zonas de "upwelling". Temos assim uma medida da importância do microfitobentos no contexto dos outros produtores primários, ao nível da biosfera.

O papel da fotossíntese do microfitobentos nos ciclos de nutrientes e na remineralização da matéria orgânica é crucial. Com efeito, a interface sedimento-ar ou sedimento-água representa uma fronteira entre o ar ou a água e uma zona anaeróbia, o sedimento, onde ocorrem diversos processos químicos (ver P. Cartaxana neste volume). Esta fronteira oxigenada é extremamente reduzida, tanto mais fina quanto menores as partículas de sedimento, e é da ordem de 1 a 2 mm em sedimentos vasosos. Entre os ciclos de nutrientes, o azoto reveste-se de um significado particular nos tempos actuais.

Na Europa, a carga de azoto a partir de fontes antropogénicas que entra nos ecossistemas marinhos, tem aumentado drasticamente durante as últimas décadas. Devido a esta eutrofização, a qualidade do ambiente em muitas zonas costeiras tem diminuído consideravelmente.

Tabela 1 - Valores de clorofila por unidade de superfície para diversas comunidades vegetais

	mg Chla m <sup>-2</sup>
Pradarias e pastos <sup>21</sup>	700 - 1000
Cultivo de gramíneas e soja <sup>21</sup>	900 - 2700
Bosque de Pinus-Quercus <sup>21</sup>	3100
Campos abandonados <sup>21</sup>	300 - 600
Sapal de <i>Spartina alterniflora</i> <sup>21</sup>	300 - 2260
Comunidades de macroalgas marinhas <sup>21</sup>	300 - 2750
Fitoplâncton oceânico <sup>20</sup>	30
Zonas de upwelling <sup>20</sup>	300
Zonas costeiras <sup>20</sup>	200
Microfitobentos Estuário do Tejo <sup>10</sup>	11 - 300
Microfitobentos de zonas intertidais <sup>10,22</sup>	10 - 900

Tabela 2 - Produção primária líquida (NPP), dos vários componentes da Biosfera em g de Carbono por m<sup>2</sup> e total, considerando a respectiva área de ocupação

	NPP m <sup>-2</sup> g C m <sup>-2</sup> ano <sup>-1</sup>	NPP Total *10 <sup>15</sup> g C ano <sup>-1</sup>
Florestas tropicais	2000 <sup>23</sup>	17,8 <sup>18</sup>
Bosques	400 <sup>21</sup>	
Agricultura	350 <sup>21</sup>	8,0 <sup>18</sup>
Estepes e pastos	200 <sup>21</sup>	
Desertos	50 <sup>21</sup>	0,5 <sup>18</sup>
Sapais e mangais	3000 <sup>19</sup>	6,0 <sup>20</sup>
Lagos e rios	400 <sup>19</sup>	
Corais e macroalgas	2500 <sup>19</sup>	1,6 <sup>19</sup>
Ecossistemas terrestres	426 <sup>18</sup>	
Oceano	140 <sup>18</sup>	
Zonas de "upwelling"	500 <sup>19</sup>	0,2 <sup>19</sup>
Oceano oligotrófico		11 <sup>18</sup>
Oceano mesotrófico		27,4 <sup>18</sup>
Oceano eutrófico		9,1 <sup>18</sup>
Microfitobentos Estuário do Tejo	47 - 178 <sup>10</sup>	
Microfitobentos zonas intertidais	28 - 250 <sup>10</sup>	
Total terrestres		117,5 <sup>20</sup> - 56,4 <sup>18</sup>
Total marinhos		55 <sup>20</sup> - 48,5 <sup>18</sup>



O ciclo do azoto é dominado pela fase gasosa. As formas de azoto que entram nos ecossistemas são maioritariamente compostos orgânicos e  $\text{NH}_4$ . O processo que consiste na sua oxidação para  $\text{NO}_3$ , designa-se por nitrificação. A redução de  $\text{NO}_3$ ,  $\rightarrow \text{NO}_2$ ,  $\rightarrow \text{NO}$ ,  $\rightarrow \text{N}_2\text{O}$  e finalmente para  $\text{N}_2$  denomina-se desnitrificação.

Os dois processos que removem o azoto de um ecossistema costeiro são, a desnitrificação, em que o azoto é libertado para a atmosfera, sob a forma de  $\text{N}_2$  e a deposição de compostos orgânicos no interior do sedimento, como consequência da assimilação de azoto pelos produtores primários.

O microfítobentos actua no ciclo do azoto indirectamente, através da libertação fotosintética de oxigénio (indispensável para a nitrificação), e directamente pela assimilação de  $\text{NO}_3$  e  $\text{NH}_4$ .

Em relação ao Estuário do Tejo, num trabalho de 2000<sup>24</sup>, concluímos que, dos dois processos estudados, assimilação/desnitrificação, o processo principal pelo qual o microfítobentos contribui para a remoção de azoto no ecossistema consiste na assimilação de azoto inorgânico, e sua incorporação em matéria orgânica, que posteriormente é consumida pelos vários níveis da cadeia trófica, ou fica depositado no interior do sedimento, como já foi explicado nas páginas anteriores. Com efeito o valor estimado para a razão assimilação/desnitrificação, apresentou um valor médio igual a 2, embora com grande variação ao longo do ano (ver T. Cabrita neste volume). A taxa de desnitrificação aparece fortemente associada ao ciclo sazonal, sendo importante no Inverno e negligenciável no Verão. A assimilação dos compostos azotados, calculada a partir dos resultados de produção primária bruta é, ao contrário, mais importante no Verão do que no Inverno.

Para concluir este capítulo, refira-se ainda o papel do microfítobentos na estabilização

dos sedimentos costeiros. Tipicamente, as diatomáceas, o grupo dominante desta comunidade<sup>25</sup>, produzem substâncias poliméricas extracelulares (EPS, do inglês *extracellular polymeric substances*), constituídas por carboidratos, que formam pedúnculos, tubos, películas aderentes, ou filamentos. Estas estruturas mucilaginosas podem ter uma variedade de funções, sendo a sua produção apontada como uma característica que ajuda a explicar o sucesso evolutivo deste grupo taxonómico<sup>26</sup>. No que respeita às diatomáceas epibênticas, uma das funções dos EPS é permitir o movimento das células<sup>27</sup>, outro será a protecção contra a dessecação. A presença de EPS, para além de servir como fonte de carbono para a comunidade bêntica heterotrófica e detritívora, aumenta o nível crítico a partir do qual o sedimento sofre erosão<sup>2,28</sup>. Com efeito, estas estruturas biogénicas formam agregados com as partículas do sedimento, que muito contribuem para a sua estabilização. É fácil perceber o interesse aplicado que esta matéria tem, tanto a nível do estudo do transporte e erosão dos sedimentos costeiros, como para (tentar) responder a um dos fantasmas do nosso tempo, o aumento do nível médio do mar, e a função dos sedimentos costeiros na defesa contra essa ameaça.

Mais do que nunca, a interdisciplinaridade é um denominador comum nos projectos de investigação. As questões científicas que se colocam requerem obrigatoriamente valências de vários quadrantes. O microfítobentos, colonizando um habitat situado numa interface física, também está numa interface de disciplinas, entre os obscuros (porque são às escuras) e sulfurosos (porque anaeróbios) processos químicos, e a biologia, tanto a biologia dos modelos e das previsões, como a biologia dos poliquetas com as suas mil sedas ou a dos flamingos que, placidamente, voam sobre a imensidão dos espriados de maré.

## Referências bibliográficas

1. Serôdio J., Silva J. M., & Catarino F. (1997). Non-destructive tracing of migratory rhythms of intertidal benthic microalgae using in vivo chlorophyll a fluorescence. *J. Phycol.* **33**: 542 - 553.
2. Paterson, D. M. (1994) Microbiological mediation of sediment structure and behaviour. In NATO ASI Series Vol. G35. *Microbial Mats*. Stal L.J., Caumette P. (eds) Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
3. Pomeroy, L. R., Darley, W. R., Dunn, E. L., Gallagher, J. L., Haines, E. B., & Whitney, D. M. (1981) Primary Production. In Pomeroy, L. R & Wiegart, R. G., (eds). *The ecology of a Salt Marsh*. Springer-Verlag, p: 39-67.
4. Rincé, Y. & Robert, J. M. (1983). Évolution des Peuplements de Diatomées Planctoniques et Benthiques d'un Marais Salant Lors des Variations Printanieres de Salinité. *Cryptogamie : Algologie IV*(1-2), 73-87.
5. Plante-Cuny, M.-R.(1978). Pigments photosynthétiques et production primaire des fonds meubles néritiques d'une région tropicale (Nosy.Bé, Madagáscar). *Travaux et Documents de l'O.R.S.T.O.M*: **96**, 356pp.
6. Pelletan, J. (1888) Recherche et récolte des diatomées. Les diatomées, histoire naturelle, préparation, classification et description des principales espèces. *J. de Micrographie*, Paris, p 93-95
7. Callame, B. & Debyser, J. (1954). Observations sur les mouvements des diatomées à la surface des sediments marins de la zone intercotidale. *Vie et Milieu* **5**(2): 242-249.
8. Pomeroy, L. R., (1959). Algal productivity in salt-marshes of Georgia. *Limnology & Oceanography* **4**: 386-397.
9. Underwood, G. J. C. & Kromkamp, J. (1999). Primary production by phytoplankton and microphytobenthos in Estuaries. *Adv. in Ecological Research* **29**, 93-153.
10. Brotas, V., Cabrita, T., Portugal, A., Serôdio, J. & Catarino, F. (1995). Spatio-temporal distribution of microphytobenthic biomass in tidal flats of the Tagus estuary (Portugal). *Hydrobiologia* **300/301**: 93-104.
11. Brotas, V. & Catarino, F. (1984). Microfitobentos do Estuário do Tejo. *Actas do IV Simposium Ibérico de Estudos do Benthos Marinho*, **3**: 119-129.
12. Brotas, V. & J. Serôdio, 1995. A mathematical model for the vertical distribution of chlorophyll a in estuarine intertidal sediments. *Netherlands Journal of Aquatic Ecology* **29**(4): 315-321.
13. Catarino, F., Tenhunen, J. D., Brotas, V. & Lange, O. L. (1985). Application of CO<sub>2</sub>-porometer methods to assessment of components of photosynthetic production in estuarine ecosystems. *Marine Biology*, **89** (1): 37-43.
14. Behrenfield, M. J. & Falkowski, P. G. (1997). A consumer's guide to phytoplankton productivity models. *Limnology & Oceanography*, **42**(7): 1479-1491.
15. Brotas, V. & F. Catarino, 1995. Microphytobenthos primary production of Tagus estuary intertidal flats (Portugal). *Netherlands Journal of Aquatic Ecology* **29**(4): 333-339.
16. Serôdio, J. & Catarino, F. (2000). Modelling the Primary Productivity of Intertidal Microphytobenthos: time scales of variability and effects of migratory rhythms. *Marine Ecology Progress Series*. **192**, 13-30.
17. Blanchard, G., Guarini, J.-M, Gros, Ph., and Richard, P. (1997). Seasonal effect on the relationship between the photosynthetic capacity of intertidal microphytobenthos and temperature. *J.Phycol.* **33**, 723-728.
18. Field, C. F., Behrenfield, M. J., Ramderson, J. T., Falkowski, P. (1998). Primary Production of the Biosphere: Integrating Terrestrial and Oceanic Components. *Science*, **281**:237-241.



19. Jeffrey, S. W. (1981) Responses to Light in Aquatic Plants. In: Lange O. L., Nobel P. S., Osmond C. B., Ziegler H. (eds) *Physiological Plant Ecology I*. Springer-Verlag, Berlin, p: 249-276.
20. Larcher, W. 1995. *Physiological Plant Ecology* (3<sup>rd</sup> ed). Springer-Verlag
21. Margalef, 1974. *Ecologia*. Ediciones Omega. Barcelona.
22. Brotas, V. 1987. *Avaliação dos pigmentos fotossintéticos das microalgas epibênticas do Estuário do Tejo*. Provas de aptidão científica e capacidade pedagógica. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Lisboa. 44p.
23. Valiela, I., 1995. *Marine Ecological Processes* (2nd ed). Springer-Verlag, 686p.
24. Cabrita, T. & V. Brotas, 2000. Seasonal variation of denitrification and dissolved nitrogen fluxes in intertidal mudflats of Tagus estuary (Portugal). *Marine Ecology Progress Series*, **202**: 51-65.
25. Brotas V. & M. R. Plante-Cuny, 1998. Spatial and temporal patterns of microphytobenthic taxa of estuarine tidal flats in the Tagus estuary using pigment analysis by HPLC. *Marine Ecology Progress Series* **171**: 43-57.
26. Hoagland, K. D., Rosowski, J. R., Gretz, M. R. & Roemer, S. C. (1993). Diatom extracellular polymeric substances: function, fine structure, chemistry and physiology. *J. Phycol*, **29**: 537-566.
27. Perkins, R.G., Underwood, G.J.C., Brotas, V., Snow, G.C., Jesus, B. and Ribeiro, L. 2001. Responses of microphytobenthos to high light: primary production and carbohydrate allocation over an emersion period. *Marine Ecology Progress Series*, **223**: 101-112.
28. Tolhurst, T. J., Jesus, B., Brotas, V. & Paterson, D. M.. Diatom Migration and Sediment Armouring - an example from the Tagus Estuary Portugal. Submetido a *Hydrobiologia*.
29. Ribeiro, L., Brotas, V., Mascarél, G., & A. Couté, A.(2002). Taxonomic survey of the microphytobenthic communities of Tagus Estuary. Aceite para publicação em *Acta Oecologica*.