

A Modelagem Evolutiva da Interação de Dinâmicas Populacionais de Algas Sujeitas à Efeitos Antrópicos: Um Estudo de Campo.

R. F. Oliveira,¹

DEMAT, ICE – UFRRJ, 23.890-000, Seropédica/RJ.

M. B. B. Barros-Barreto,²

Depto de Botânica, IB – UFRJ, 21.941-902, Rio de Janeiro/RJ.

M. Amorim,³

DEMAT, ICE – UFRRJ, 23.890-000, Seropédica/RJ.

T. R. S. Freitas⁴

Depto de Botânica, IB – UFRRJ, 23.890-000, Seropédica/RJ.

T. S. Triani,⁵ J. Hokama,⁶ M. T. C. Cunha,⁷

DEMAT, ICE – UFRRJ, 23.890-000, Seropédica/RJ.

Resumo. Neste trabalho o clássico modelo de competição intra-inter específica é aplicado à duas espécies de algas, a saber, *Ulva fasciata* e *Centroceras clavulatum*. O intuito é verificar se a presença de atividade humana interfere nos parâmetros do modelo e, portanto, se este modelo representa bem a realidade. Experimentos de campo foram realizados em duas praias da Ilha da Marambaia (RJ). Os parâmetros de crescimento foram estimados utilizando modelo de regressão linear simples. Os resultados medidos nas coletas e simulados pelo modelo foram comparados.

Palavras-chave: *Dinâmica populacional; Competição intra-interespecífica; Macroalgas marinhas; Modelagem matemática e estatística.*

¹rosanef@ufrj.br

²beatrizdebb@biologia.ufrj.br

³maurodeamorim@gmail.com

⁴tigorsf@ig.com.br

⁵tarciotriani@gmail.com

⁶jhokama@ufrj.br

⁷tise@ufrj.br

1. Introdução

A Ilha da Marambaia (I.M.) está localizada no sul do Estado do Rio de Janeiro, numa região conhecida como Costa Verde. A ilha é o extremo oeste da Restinga da Marambaia e está situada na entrada da Baía de Sepetiba, em frente à Ilha Grande. A Baía de Sepetiba (B.S.) tem, aproximadamente, 305 km^2 com um corpo de água salinas e salobras junto com áreas de mangue e zonas estuarinas. Constitui um criadouro para diversas espécies de peixes, moluscos, crustáceos e algas e tem na pesca uma das principais atividades econômicas dos moradores da região.

O local deste estudo foi escolhido pela infraestrutura oferecida pela Marinha do Brasil, em convênio com a UFRRJ. Tal local não está distante das atividades industriais e dos problemas causados à baía em função do crescimento econômico e imobiliário do entorno. O lançamento de efluentes líquidos, resíduos tóxicos e esgoto diretamente nos rios que deságuam na baía e as consequências para o meio ambiente tem sido fonte de pesquisas há algum tempo (Amado Filho et al., 1999). Como novos e futuros impactos estão a construção de novos portos, a presença de navios trazendo água de lastro e possíveis incidentes no transporte e atividades de carga e descarga (Széchy et al., 2005; Jornal O Globo, 2008; Jornal JBoonline, 2009).

Em regiões litorâneas, as atividades que geram efluentes, aumento do pisoteio em alguns pontos, coleta de organismos e outras ações resultam em impactos. Na natureza existem alguns seres que, de acordo com uma ou mais características observadas, indicam se o meio em que vivem está submetido a certo grau de impacto ambiental. São organismos, populações ou comunidades que apresentam alterações de suas funções vitais em resposta às alterações do meio. Esses seres são denominados bioindicadores ou biomonitores. Um bom bioindicador, segundo Amado Filho et al. (1999), deve ser sedentário, de fácil identificação, abundante, de longa vida, disponível para amostras durante o ano todo e tolerante à exposição de mudanças físico químicas no ambiente. Wu et al. (2005) acrescenta que a resposta biológica deve refletir o estresse ambiental ao longo do tempo de maneira quantitativa.

Macroalgas marinhas bentônicas são organismos macroscópicos, fotossintetizantes que vivem fixos principalmente em costões rochosos. Estas macroalgas são consideradas excelentes sensores biológicos das condições ambientais e das tendências evolutivas de seu ecossistema. Por serem organismos sésseis, sofrem efeitos de diversos elementos do meio circundante e, por estarem situ-

adas nos costões, as algas são mais afetadas pela ação dos poluentes urbanos e industriais lançados na água, pois estes tendem a permanecer na superfície (Taouil e Yoneshigue-Valentin, 2002; Orduña-Rojas e Longoria-Espinoza, 2006; Pinedo et al., 2007).

Dados pretéritos mostram que em 2003 foram identificados 96 espécies diferentes de macroalgas na Baía de Sepetiba (Amado Filho et al., 2003) e que houve uma menor diversidade em locais mais poluídos. As macroalgas marinhas são responsáveis por 68% da cobertura do substrato de costões rochosos na B.S. e pouco se conhece sobre a estrutura e dinâmica de suas comunidades.

A influência da poluição na dinâmica populacional de algas também foi observada na região da praia de Boa Viagem em Niterói, RJ, onde foi verificado o desaparecimento de 30 espécies durante o período de três décadas (Taouil e Yoneshigue-Valentin, 2002), atribuído à toxicidade de compostos orgânicos presentes no esgoto não tratado.

A teoria ecológica mostra que a competição por recursos limitantes é um importante fator na estruturação de comunidades naturais, sendo verificada a existência de competição entre algumas algas marinhas (Fong et al., 1993). Um dos recursos pelos quais as algas competem é o espaço. A competição pelo espaço pode levar a uma redução da sobrevivência, densidade, crescimento e reprodução de organismos. O sucesso da competição pode ser medido experimentalmente pelos efeitos da variação da abundância, estimada através da porcentagem de cobertura.

2. Objetivos

A modelagem de competição interespecífica na dinâmica populacional de algas foi estudada por Guimaraens (1994), na Ilha de Cabo Frio, em Arraial do Cabo, RJ. Nesse estudo considerou-se o espaço como o objeto de competição e a predação por ouriços.

Este trabalho tem por objetivo verificar a influência de impactos antropogênicos na dinâmica populacional de duas espécies de algas, *Ulva fasciata* Delile e *Centroceras clavulatum* (C. Agardh) Montagne, em duas praias distintas da Ilha da Marambaia. Para tal, são analisados os parâmetros do modelo matemático que representa o crescimento e as interações intra-inter específicas das algas. Os parâmetros foram estimados a partir dos dados coletados em campo.

O desenho experimental adotado está baseado na metodologia conhecida por *replacement series* (Jolliffe, 2000), também utilizado em Guimaraens (1994).

O modelo matemático foi o clássico sistema com competição inter-intra específica:

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= r_1 \left(1 - \frac{N_1}{K_1} \right) N_1 - \alpha_{12} N_1 N_2 \\ \frac{dN_2}{dt} &= r_2 \left(1 - \frac{N_2}{K_2} \right) N_2 - \alpha_{21} N_2 N_1 \end{aligned} \quad (2.1)$$

considerando-se N_1 a porcentagem de cobertura da espécie *U. fasciata* e N_2 a da espécie *C. clavulatum*. Os parâmetros são considerados constantes, que devem ser entendidas como uma média. A predação foi desconsiderada.

O objetivo do experimento é estimar a taxa de crescimento intrínseco (r), a capacidade de suporte (K) e o fator de competição (α), parâmetros presentes no modelo.

3. Metodologia

A partir de uma sequência de visitas à ilha, no segundo semestre de 2008, foram escolhidas duas praias que possuíssem características físicas o mais semelhante possível (batimetria, inclinação do costão rochoso e tempo de exposição ao sol), que fossem afetadas de forma distinta pela ação do homem e que estivessem próximas uma da outra.

Foram escolhidas as praias do Kutuca e da Cachoeirinha (Figura 1). Ambas possuem costão rochoso irregular (matacão) e uma sofre mais os efeitos da ação do homem do que a outra. Foi comprovado, pela análise da água, realizada pelo Laboratório Analítico de Alimentos e Bebidas da UFRRJ, que a praia da Cachoeirinha possui nível de coliformes totais aproximadamente 3 vezes superior ao da praia do Kutuca, esta com boa qualidade da água. Além disso, foram observados na praia da Cachoeirinha aspectos da interferência antropogênica: esgoto doméstico, lixo local e deslocado, material e atividades pesqueiras, presença de embarcações e interferências diretas no costão rochoso (pisoteio, crianças arrancando algas manualmente), o que não foi percebido na praia do Kutuca.

Alguns trabalhos (Malta e Verschuure, 1997; Taouil e Yoneshigue-Valentin, 2002; Mayer-Pinto e Junqueira, 2003; Orduña-Rojas e Longoria-Espinoza, 2006) enfatizam a eficiência das espécies da clorófito *U. fasciata*, que responde a mudanças do meio com variação no seu crescimento. A escolha da outra alga é



Figura 1: Localização das Praias do Kutuca (PK) e Cachoeirinha (PC) na Ilha de Marambaia (IM) - Baía de Sepetiba

justificada por sua presença nos locais de estudo e por possuir as características de um bioindicador. Ambas são algas oportunistas e de crescimento rápido (Steneck e Dethier, 1994; Tâmega e Figueiredo, 2007).

Buscaram-se regiões semelhantes do costão rochoso nas duas praias, semelhanças essas relativas à inclinação, profundidade e exposição às ondas. Com tantas exigências, foi possível dividir cada região em 4 blocos experimentais de 50x50 cm. Cada bloco foi dividido em 25 quadrados de 10x10 cm.

Para se estudar a competição e obter o parâmetro α , foram sorteados em cada bloco 3 quadrados onde foram considerados os tratamentos:

- Quadrado 1 com somente *U. fasciata*;
- Quadrado 2 com somente *C. clavulatum*; e
- Quadrado 3 com 50% de *U. fasciata* e 50% de *C. clavulatum*.

Sorteado o quadrado 1, em seguida, foi retirada toda a cobertura de *C. clavulatum* deste; sorteado o quadrado 2, em seguida, foi retirada toda a cobertura de *U. fasciata* deste. Como medidor da porcentagem de cobertura, foi usado um quadrado auxiliar, de 10x10 cm, com 100 quadrados de 1x1 cm.

Para determinar a taxa de crescimento intrínseco (r) e a capacidade de suporte (K), de cada espécie, foram utilizados, em cada bloco, mais dois quadrados de 10x10 cm, um contendo *U. fasciata* e o outro *C. clavulatum*. Em cada quadrado, a cada visita, era realizada uma raspagem do que estava lá e não fosse a alga em questão.

As oito medições foram realizadas de fevereiro a maio de 2009. Tentou-se respeitar um período de 15 dias entre as medições dependendo, sempre, de uma amplitude ideal da maré para realizá-las. O período total de 106 dias foi considerado suficiente para a estimação dos parâmetros, uma vez que não havia informação na literatura sobre aspectos sazonais.

Para a estimação dos parâmetros de crescimento foi utilizada a equação de crescimento logístico que tem a forma geral

$$\frac{dN}{dt} = r \left(1 - \frac{N}{K} \right) N$$

e cuja solução é

$$N(t) = \frac{K}{1 + \exp\left(-rt + \ln\left(\frac{|K - N_0|}{N_0}\right)\right)}$$

Rearranjando a expressão de $N(t)$ obtém-se

$$\ln \frac{|K - N|}{N} = -rt + \ln \frac{|K - N_0|}{N_0}$$

Foi considerado o modelo de regressão linear simples ao linearizar a relação acima e introduzir um erro estocástico, que pode ser justificada teoricamente pela natureza experimental dos dados. A relação estatística pode ser expressa formalmente como $y = a + bx + u$, com $y = \ln\left(\frac{|K-N|}{N}\right)$, $b = -r$ e $a = \ln\left(\frac{|K-N_0|}{N_0}\right)$. Foram postuladas as seguintes hipóteses básicas para o erro u : u é uma variável aleatória independente, com uma distribuição de probabilidade centrada no zero e com uma variância constante em relação a variável independente t . Admitindo-se válidas essas hipóteses, os parâmetros são estimados pelo método dos mínimos quadrados e o valor K é estimado de tal forma a maximizar R^2 , o coeficiente de determinação que mede o bom ajuste da relação linear. Como as medições foram realizadas em 4 unidades experimentais, foi utilizada a média aritmética dos dados coletados de cada alga em cada praia. Assim, os dados obtidos em campo foram linearizados de acordo com $y = \ln\left(\frac{|K-N|}{N}\right)$. Foi determinada, também a partir da equação do primeiro grau acima, a condição inicial N_0 , que é dada por $N_0 = (K/1 + e^a)$. Os valores obtidos por esses ajustes estão representados na tabela 1 e os gráficos gerados através desses valores são dados na figura 2.

Para determinar os parâmetros de competição utiliza-se o sistema 2.1 e obtém-se

$$\alpha_{ij} = \frac{r_i N_i (K_i - N_i) - \frac{dN_i}{dt} K_i}{K_i N_i N_j}; \quad i, j = 1, 2.$$

O valor de $N(t)$ é dado pela média aritmética dos dados coletados em todos os tratamentos de competição. Para estimar $\frac{dN}{dt}$ foi utilizada a série de Taylor para $N(t+h)$ e $N(t-h)$, com h representado o período de tempo entre coletas, e obtém-se

$$\frac{N(t+h) - N(t-h)}{2h} = \frac{dN}{dt} + O(h^2).$$

Como os valores de $\frac{dN}{dt}$ ajustados, foram calculados α_{12} e α_{21} em cada praia e em cada dia (i) de coleta obtendo-se uma função do tempo i do tipo:

$$\alpha_{mn}(i) = \frac{r_m N_m(i)(K_m - N_m(i)) - \left(\frac{dN_m}{dt(i)}\right) K_m}{K_m N_m(i) N_n(i)}, \quad m, n = 1, 2 \text{ e } m \neq n.$$

Para manter a aproximação em $O(h^2)$, tais valores foram ajustados a uma função do 2º grau e, a partir desta função, é realizada a média integral, que gera as constantes α_{12} e α_{21} . Os valores obtidos para os parâmetros são apresentados na tabela 2.

4. Resultados

Com os parâmetros obtidos com os quadrados experimentais de crescimento (tabela 1), o modelo logístico foi implementado e os gráficos estão representados na figura 2.

Tabela 1: Valores dos parâmetros de crescimento e coeficiente de correlação

	Kutuca		Cachoeirinha	
	<i>U. fasciata</i>	<i>C. clavulatum</i>	<i>U. fasciata</i>	<i>C. clavulatum</i>
r	-0,03852272	0,048194899	-0,072292684	0,05048541
K	18,5	66,45	10,6	71,1
R^2	0,6284	0,8375	0,8087	0,5399

O baixo valor para R^2 dos dados de *C. clavulatum* na Cachoeirinha está relacionado ao que ocorreu em $t = 63$ na coleta. Neste dia as medidas foram realizadas em condições imprevistas. A lua cheia alterou a amplitude da maré

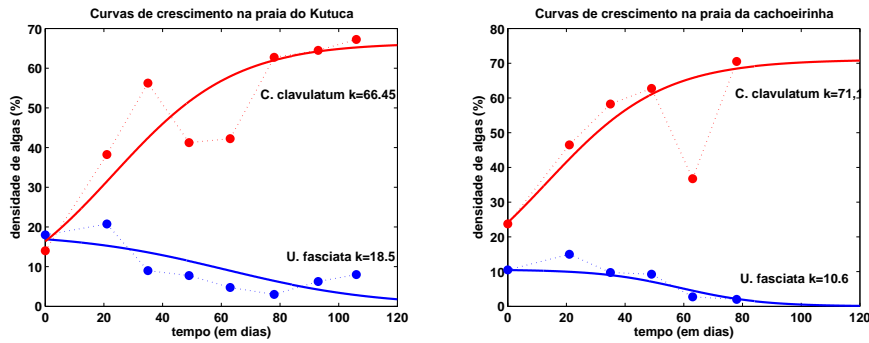


Figura 2: Curvas de crescimento geradas pelo modelo em comparação com os dados coletados

e, distinto dos outros dias, com maré mais alta que o previsto e sob o efeito de ondas, houve dificuldades na realização das medidas.

Se este dia, $t = 63$, for retirado então novos parâmetros de crescimento são obtidos, como pode ser visto na tabela 2.

Tabela 2: Valores dos parâmetros na P. da Cachoeirinha alterados pela retirada de $t = 63$

	<i>C. clavulatum</i>	<i>U. fasciata</i>
r	0,060367465	-0,044588145
K	69,35	11,7
R^2	0,9971	0,788794559

Foi adotada também uma outra estratégia para estimar um novo valor para a porcentagem de cobertura no tempo $t = 63$. Essa estimativa pode ser realizada através de uma média ponderada, entre $N(49)$ e $N(78)$, ou seja, entre as duas leituras adjacentes à do tempo em questão. Os fatores de ponderação são: o inverso do intervalo de tempo $\Delta t_1 = (63 - 49)$ para $N(49)$ e o inverso do $\Delta t_2 = (78 - 63)$ para $N(78)$. Chamando de x a estimativa de $N(63)$, obtem-se:

$$x = \frac{\frac{1}{\Delta t_1} N(49) + \frac{1}{\Delta t_2} N(78)}{\left(\frac{1}{\Delta t_1} + \frac{1}{\Delta t_2} \right)}.$$

Com esses valores estimados para as medidas do dia $t = 63$, os parâmetros

são recalculados (tabela 3).

Tabela 3: Parâmetros de crescimento recalculados na Praia da Cachoeirinha

	<i>C. clavulatum</i>	<i>U. fasciata</i>
r	0,0597092292729337	-0,0439802979013879
K	69,3	11,7
R^2	0,9974	0,8072

Este procedimento melhora os resultados de ajuste, o que pode ser visualizado na figura 3.

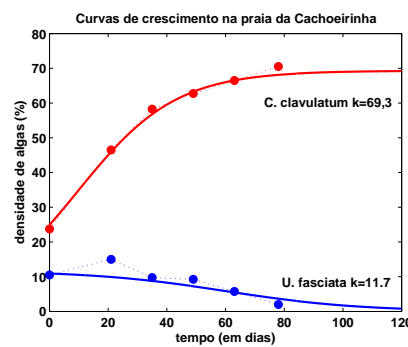


Figura 3: Curvas de crescimento na P. da Cachoeirinha modificado

Com o tratamento feito para a obtenção dos parâmetros de competição (tabela 4), o modelo com competição foi implementado e a comparação entre os dados medidos e simulados aparece na figura 4.

Tabela 4: Parâmetros de Competição

	Praia do Kutuca	Praia da Cachoeirinha
α_{12}	-0,00026873	0,000011938
α_{21}	0,00074674	0,0054

O que se observa com os resultados é que a espécie *C. clavulatum* se beneficia com os efeitos antrópicos, uma vez que tem maior crescimento e capacidade de suporte em Cachoeirinha, praia mais impactada. *U. fasciata*, no período do experimento, esteve em declínio em ambas as praias, mas sofre mais na Cachoeirinha.

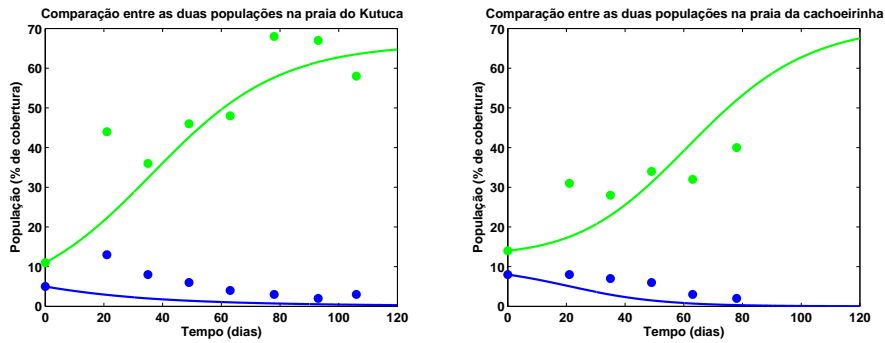


Figura 4: Comparação entre as populações nas duas praias

A análise da competição fica prejudicada, pois uma das algas está em declínio. De fato, a influência de *C. clavulatum* em *U. fasciata* é pouco significativa nas duas praias; entretanto é mais significativa na praia da Cachoeirinha, ou seja, *U. fasciata* sente mais a competição onde se desenvolve menos. Por outro lado, mesmo com os níveis populacionais em baixa, existe influência de *U. fasciata* em *C. clavulatum* nas duas praias, e *C. clavulatum* sente mais esta influência onde se desenvolve mais, na Cachoeirinha.

Os retratos de fase dos sistemas Cachoeirinha e Kutuca (figura 5) evidenciam um equilíbrio instável, durante o período do experimento.

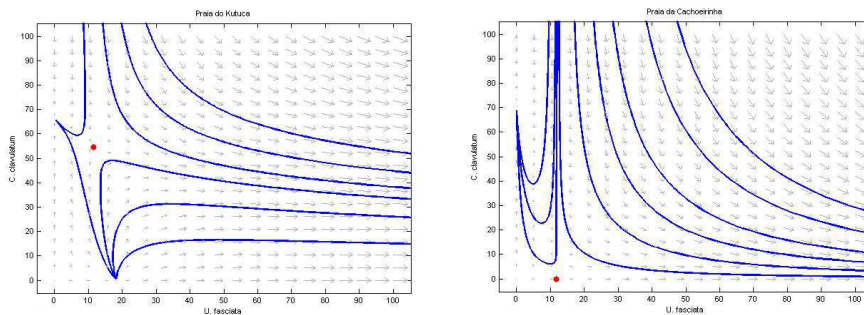


Figura 5: Planos de fase

5. Conclusões

O modelo logístico ajustou bem os dados e seus parâmetros (r e K), para as espécies escolhidas, são sensíveis aos efeitos antrópicos.

Com as observações realizadas durante todo o período deste trabalho, constata-se um efeito sazonal, principalmente na população de *U. fasciata*. Dessa observação podem surgir alterações no modelo, os parâmetros podem ser considerados como funções do tempo. Novos experimentos, em um período de tempo maior podem ser planejados e realizados.

O experimento evidencia a existência de competição, mas a comparação entre os dados e os valores do modelo indica a necessidade de mudar a forma como ela é modelada.

Agradecimentos

Este trabalho teve o apoio do CADIM - Marinha do Brasil e contou com bolsas de iniciação científicas (PROIC - UFRJ).

Referências

- Amado Filho, G. M., Andrade, L. R., Karez, C. S., Farina, M., e Pfeiffer, W. C. (1999). Brown algae species as biomonitors of Zn and Cd at Sepetiba Bay, Rio de Janeiro, Brazil. *Marine Environmental Research*, 48:213–224.
- Amado Filho, G. M., Barros-Barreto, M. B., e Marins, B. V. (2003). Estrutura das comunidades fitobentônicas do infralitoral da Baía de Sepetiba, RJ, Brasil. *Revista Brasileira de Botânica*, 26:329–342.
- Fong, P., Donohoe, R. M., e Zedler, J. B. (1993). Competition with macroalgae and benthic cyanobacterial mats limits phytoplankton abundance in experimental microcosms. *Marine Ecology Progress Series*, 100:97–102.
- Guimaraens, M. A. (1994). O papel da competição interespecífica na dinâmica das populações de *Laurencia obtusa* (Hudson) e *Hypnea spinella* (C. Agardh) Kützting na Ilha de Cabo Frio, Arraial do Cabo - RJ. Dissertação de Mestrado, Ecologia - UFRJ, Rio de Janeiro.
- Jolliffe, P. A. (2000). The replacement series. *Journal of Ecology*, 88:371–385.

- Jornal JBoonline (2009). Matéria publicada em 30 de Setembro de 2009.
- Jornal O Globo (2008). Matéria publicada no dia 10 de Agosto de 2008, pp 33 e 34.
- Malta, E. e Verschuure, J. M. (1997). Effects of environmental variables on between-year variation of *Ulva* growth and biomass in a eutrophic brackish lake. *Journal of Sea Research*, 38:71–84.
- Mayer-Pinto, M. e Junqueira, A. O. R. (2003). Effects of organic pollution on the initial development of fouling communities in a tropical bay, Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, 46:1495–1503.
- Orduña-Rojas, J. e Longoria-Espinoza, R. M. (2006). Metal content in *Ulva lactuca* (Linnaeus) from Navachiste Bay (Southeast Gulf of California) Sinaloa, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 77:574–580.
- Pinedo, S., Garcia, M., Satta, M., Torres, M., e Ballesteros, E. (2007). Rocky-shore communities as indicators of water quality: a case study in the North-western Mediterranean. *Marine Pollution Bulletin*, 55:126–135.
- Steneck, R. S. e Dethier, M. N. (1994). A functional group approach to the structure of algal-dominated communities. *Oikos*, 69:476–498.
- Széchy, M. T. M., Amado Filho, G. M., Cassano, V., Paula, J. C., Barros-Barreto, M. B., Reis, R. P., Marins-Rosa, B. V., e Moreira, F. M. (2005). Levantamento florístico das macroalgas da baía de Sepetiba e adjacências, RJ: ponto de partida para o Programa GloBallast no Brasil. *Acta Botanica Brasílica*, 19:587–596.
- Taouil, A. e Yoneshigue-Valentin, Y. (2002). Alterações na composição florística das algas da Praia de Boa Viagem (Niterói, RJ). *Revista Brasileira de Botânica*, 25:405–412.
- Tâmega, F. T. S. e Figueiredo, M. A. O. (2007). Distribution of crustose coralline algae (Corallinales, Rhodophyta) in the Abrolhos reefs, Bahia, Brazil. *Rodriguésia*, 58:941–947.
- Wu, R. S. S., Siu, W. H. L., e Shin, P. K. S. (2005). Induction, adaption and recovery of biological responses: Implications for environmental monitoring. *Marine Pollution Bulletin*, 51:623–634.