



PROTEÇÃO À LINHA DE COSTA POR RECIFES DE CORAL: POTENCIAL VS. VULNERABILIDADE

Carla I. Elliff¹ & Gerson Fernandino²

¹ Red Iberoamericana PROPLAYAS, Nodo Paranoá, Grupo de Pesquisa Paranoá/IFBaiano/CNPq, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano – IFBaiano, Rua Rouxinol, 115, CEP 41720-052, Salvador, Bahia, Brasil. E-mail: carlaelliff@gmail.com.

² Departamento Interdisciplinar, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Campus Litoral Norte, Km 92, RS-030, 11700, 95590-000, Tramandaí, Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: gerson.fernandino@yahoo.com.br.

RESUMO

Apesar de recifes de coral serem considerados um dos ecossistemas mais vulneráveis às mudanças climáticas, estes podem ser ambientes estratégicos para mitigar alguns efeitos deste fenômeno. O serviço ecossistêmico de proteção à linha de costa, por exemplo, fornecido por recifes de coral do mundo todo pode ajudar a enfrentar problemas como a erosão costeira, inundações e outros processos intensificados pelas mudanças climáticas, além também das variações do nível médio do mar. No entanto, estudos sobre a aplicação deste serviço dentro de estratégias de gestão ainda são escassos, principalmente por falta de informações no tema. Ademais, a sinergia entre os diferentes impactos das mudanças climáticas sobre os recifes de coral, como o aumento da temperatura do mar, a acidificação dos oceanos e as variações do nível do mar, ainda é pouco compreendida. Dessa forma, o objetivo do presente trabalho foi fazer uma reflexão destacando as principais contribuições e potencialidades dos recifes de coral como agentes protetores da costa e discutir como as sinergias entre efeitos das mudanças climáticas podem afetar a provisão deste serviço ecossistêmico. Considerando os fatores físicos envolvidos nos processos para obter este benefício, observa-se que diversos atributos dos recifes têm participação na atenuação de energia das ondas. No entanto, dada a variabilidade que estes atributos podem apresentar, o fornecimento ou não do serviço torna-se específico para cada caso. Da mesma forma, a intensidade de ocorrência de efeitos das mudanças

climáticas pode ser variável, o que afetará a complexa avaliação de sua sinergia. De maneira geral, a conservação da estrutura física do recife, especialmente sua rugosidade, é essencial para a manutenção do serviço de proteção à linha de costa.

Palavras-chave: serviços ecossistêmicos, mudanças climáticas, gestão com base ecossistêmica, sinergia

SHORELINE PROTECTION BY CORAL REEFS: POTENTIAL VS. VULNERABILITY

ABSTRACT

Although coral reefs are considered one of the most vulnerable ecosystems to climate change, they can in fact be strategic environments to mitigate some of the effects of this phenomenon. The ecosystem services of shoreline protection, for example, delivered by coral reefs all around the world can help tackle problems such as coastal erosion, flooding and other processes intensified by climate change, as well as mean sea-level variations. However, studies on the applicability of this service within management scenarios are still scarce, especially due to the lack of information on this subject. Moreover, synergies among different impacts of climate change on coral reefs, such as increased ocean temperature, acidification and sea-level variations, are still poorly understood. Thus, the objective of the present study was to bring a reflection highlighting the main contributions and potentialities of coral reefs as protecting agents for the shoreline and



discuss how the synergy of climate change effects can affect the supply of this ecosystem service. Considering the physical factors involved in the processes to obtain this benefit, several reef attributes are shown to influence wave energy attenuation. However, given the variability that these attributes may present, the delivery or not of this service becomes highly case specific. Similarly, the intensity in which climate change effects occur can be variable, which will affect the complex evaluation of synergy. The conservation of the physical structure of the reef, especially its rugosity, is essential for the maintenance of the service of shoreline protection.

Keywords: ecosystem services, climate change, ecosystem-based management, synergy

INTRODUÇÃO

Recifes de coral são ecossistemas relativamente raros. No entanto, ocupando menos de 1% do ambiente bentônico global, são considerados os ecossistemas mais diversos e produtivos dos oceanos (MARTÍNEZ et al., 2007). Construídos pelo acúmulo de carbonato de cálcio (CaCO_3) por intermédio de diversos organismos (por exemplo, colônias de corais, algas calcárias incrustantes, moluscos e esponjas) sobre um substrato estável, essa complexa estrutura tridimensional pode ser considerada um sistema biofísico altamente dinâmico.

Estes habitats ocorrem nas águas quentes, claras, rasas e oligotróficas das zonas tropicais e subtropicais do globo. O Brasil está entre as principais regiões de ocorrência de recifes de corais nas Américas, junto ao Caribe e o leste do Pacífico (CORTÉS, 2003). Além de sua importância para o equilíbrio do meio ambiente, os recifes de coral também possuem alta relevância socioeconômica, sendo a fonte de renda e sustento para milhões de pessoas (PRINCIPE et al., 2012), através da pesca e coleta de organismos, como peixes, polvos, lagostas, etc., além da exploração do turismo, entre outras atividades.

Porém, recifes de coral são frequentemente rotulados como o ecossistema mais vulnerável às mudanças climáticas. O aumento da temperatura dos oceanos, a acidificação, as variações do nível médio do mar, entre outros fatores, têm claros impactos negativos sobre esses habitats. Há décadas já se levanta a preocupação com relação ao declínio dos recifes de coral ao redor do mundo devido a alterações climáticas, às dificuldades em frear este processo e à recuperação destes habitats (KNOWLTON, 2001).

No entanto, apesar da vulnerabilidade destes ambientes, eles também possuem características que os tornam potenciais agentes mitigadores dos efeitos danosos de mudanças climáticas sobre a costa (SPALDING et al., 2014; ELLIFF & SILVA, 2017). Recifes de coral constituem um obstáculo físico na zona costeira para possíveis efeitos deletérios da subida do nível do mar e chegada de tempestades tropicais, cuja frequência e intensidade têm aumentado (WALSH & RYAN, 2000; GRABEMANN & WEISSE, 2008; MANN et al., 2017). A proteção à linha de costa por recifes de coral tem ganhado destaque como um importante serviço ecossistêmico a ser explorado em estratégias com base ecossistêmica. Porém, este tipo de estratégia aplicada à gestão costeira integrada ainda apresenta importantes desafios a serem superados com relação ao aproveitamento de ecossistemas naturais, e os serviços que estes provêm, dentro de cenários de mudanças climáticas (FERNANDINO et al., 2018a).

Dessa forma, o objetivo do presente trabalho foi fazer uma reflexão destacando as principais contribuições e potencialidades dos recifes de coral como agentes protetores da costa e discutir como as sinergias ainda pouco entendidas entre efeitos das mudanças climáticas podem afetar o fornecimento deste serviço ecossistêmico.



PROTEÇÃO À LINHA DE COSTA COMO UM SERVIÇO ECOSISTÊMICO

Serviços ecossistêmicos são os benefícios promovidos por ecossistemas que garantem o bem-estar humano. Uma das classificações mais comumente adotadas é aquela proposta pelo Millennium Ecosystem Assessment, onde são reconhecidos serviços de provisão, de regulação, de suporte, e culturais (MEA, 2005). Como descrito por ELLIFF & KIKUCHI (2015), cada categoria diz respeito a um grande grupo de benefícios que, de uma maneira ou outra, estão interligados. Por exemplo, o serviço de regulação do clima está diretamente relacionado ao serviço de suporte de ciclagem de nitrogênio, enquanto a provisão de alimento pode afetar serviços culturais de turismo caso ocorram no mesmo espaço. Assim, não é incomum a utilização de outros sistemas de classificação com abordagens diferentes a depender dos objetivos do estudo. Por exemplo, BOYD & BANZHAF (2007) e FISHER et al. (2009) utilizam uma classificação que separa serviços intermediários (como o processo de purificação da água) dos serviços considerados finais (como a água limpa), permitindo avaliações distintas.

O benefício de proteção à linha de costa é justamente um exemplo de serviço ecossistêmico que poderia ser classificado de múltiplas formas. Essa diversidade se torna clara quando pensamos “proteção contra o quê?”. As zonas costeiras são áreas altamente dinâmicas, sujeitas à ação de agentes oceano-meteorológicos. Esta instabilidade inerente promove diversos riscos, sendo o risco entendido aqui como a combinação da probabilidade de um evento ocorrer e suas consequências negativas (UNISDR, 2009). Dessa forma, a proteção à linha de costa pode se referir à regulação da erosão costeira, a processos de atenuação de energia de ondas e seu *run-up*, ao controle de

inundações, à mitigação da subida do nível médio do mar, ou a um conjunto de quaisquer destes fenômenos.

Não é comum observar na literatura uma descrição clara do que está sendo considerado numa dada investigação como formas de proteção à linha de costa. No entanto, no estudo de LIQUETE et al. (2013), por exemplo, foi definido que o serviço de proteção se referia à defesa física de qualquer bem presente na zona costeira, como propriedades, pessoas ou infraestrutura, uma definição bastante ampla. Por outro lado, alguns estudos avaliam o potencial de proteção costeira de maneira indireta, considerando como os ecossistemas influenciam na vulnerabilidade costeira da área avaliada (p.ex. ARKEMA et al., 2013; ELLIFF & KIKUCHI, 2017). Vulnerabilidade pode ser entendida no presente estudo como as características e circunstâncias de uma comunidade, sistema ou bem que a torna suscetível aos efeitos danosos de fenômenos, substâncias, atividades ou condições humanas perigosos, que são capazes de causar mortes, lesões ou impactos à saúde de maneira geral, danos a propriedades, perdas de meios de sustento e serviços, perturbações socioeconômicas, ou danos ao meio ambiente (UNISDR, 2009).

Entende-se que independentemente de qual risco costeiro esteja sendo considerado, a proteção à linha de costa apenas se concretiza como um serviço ecossistêmico uma vez que traga benefícios à população humana. Além disso, por se tratar de um serviço ecossistêmico, este benefício deverá ser promovido por habitats naturais, como manguezais, dunas, gramíneas marinhas, recifes de coral, entre outros. A construção de estruturas artificiais para a promoção de proteção ou outros benefícios, além de ter um alto custo, nunca poderá substituir toda a gama complexa de serviços ecossistêmicos fornecidos por um ecossistema natural (UNEP-WCMC, 2006).



A proteção à linha de costa por recifes de coral é um serviço ecossistêmico com alto retorno financeiro. Estima-se que, na ausência de recifes de coral, os danos anuais causados por inundações dobrariam, enquanto os custos associados a tempestades frequentes triplicariam em todo o mundo (BECK et al., 2018). No entanto, ainda há importantes lacunas no entendimento da transição entre os processos de atenuação de energia de ondas e o benefício de fato de proteção à linha de costa (PRINCIPE et al., 2012). Por exemplo, a presença de um recife de coral adjacente à costa não é garantia da ausência de erosão costeira. Essa situação pode parecer um paradoxo, porém alguns estudos já associam esse achado a questões ligadas à conservação dos recifes e até às suas características naturais (p.ex. COSTA et al., 2016; REGUERO et al., 2018; FERNANDINO et al., 2018b).

OS PROCESSOS FÍSICOS ENVOLVIDOS NA PROTEÇÃO À LINHA DE COSTA POR RECIFES DE CORAL

Tomando a definição de proteção à linha de costa de LIQUETE et al. (2013), mencionada anteriormente, entende-se que para um recife de coral fornecer este serviço, ele deve ser capaz de reduzir a energia de ondas incidentes e servir de obstáculo para agentes hidrodinâmicos, de modo a beneficiar uma determinada população humana. Dessa forma, é necessário entender como se dá a dinâmica costeira na presença de um recife de coral.

As transformações sofridas por uma onda incluem empolamento, refração, difração, reflexão e rebentação (GARRISON, 2006), que são responsáveis por alterações em seus parâmetros, como altura, período e direção, e pela transferência de sua energia para a costa que a recebe. Quando as ondas encontram um obstáculo ou alguma forma de descontinuidade no fundo marinho (p.ex. um recife de coral), estas podem

sofrer mudanças em sua altura e direção devido aos processos de refração, difração ou reflexão. Além disso, ao chegar a áreas com menor profundidade, ocorre também um aumento na altura e diminuição no comprimento da onda, caracterizando o processo de empolamento. Essa chegada a áreas mais rasas pode ocorrer de maneira gradual ou mais repentina dependendo das características e influência do recife. A rebentação da onda se dá a partir da instabilidade causada pelo processo de empolamento, a partir do qual a energia da onda começa a ser dissipada.

ELLIFF & SILVA (2017) apresentam uma revisão sobre os principais atributos relevantes de recifes de coral para a promoção dos processos físicos necessários para a proteção à linha de costa. Estes são a declividade da frente recifal, a rugosidade, as dimensões e o tipo morfológico do recife. Cada um desses atributos, sozinhos ou conjuntamente, tem uma contribuição distinta no fornecimento de proteção à linha de costa e, com sua ocorrência sendo altamente variável em cada recife, tornam cada caso único.

A influência da declividade da frente recifal foi avaliada em simulações por QUATAERT et al. (2015). Estes autores encontraram que quanto mais íngreme a frente recifal, maior o empolamento da onda antes de sua rebentação e, conseqüentemente, maior o seu *run-up*. O *run-up* é caracterizado como uma flutuação temporária no nível do mar devido à rebentação de ondas (GARRISON, 2006), ou seja, representa o alcance de uma onda, após sua rebentação, em direção ao continente. Frentes recifais com declividades mais suaves tendem a promover menor *run-up* e, conseqüentemente, menor ocorrência de inundações costeiras.

Já a rugosidade determina o nível de fricção entre a onda após sua rebentação e o obstáculo (recife) que promoveu esta rebentação. Quanto maior a rugosidade de um recife, maior a fricção e maior a atenuação de



energia promovida. O que torna um recife mais ou menos rugoso é principalmente sua composição biológica. Um recife com alta cobertura de corais vivos e outros organismos, tende a ser um ambiente com arquitetura mais complexa (ALVAREZ-FILIP et al., 2009). No entanto, avaliações sobre o papel da rugosidade ainda são limitados, com a expectativa do desenvolvimento de novas ferramentas dentro da próxima década que consigam incluir de maneira robusta este atributo em modelagens computacionais (HEARN, 2011).

No entanto, já é entendido que a fricção promovida pela rugosidade é particularmente relevante sobre o topo recifal. Considerando que mais da metade da atenuação de energia pela fricção ocorre nos primeiros 150 m desta porção do recife (FERRARIO et al., 2014), topos recifais mais extensos do que isso não necessariamente serão mais eficientes para este processo.

Dessa forma, fica evidente também a contribuição das dimensões do recife para as transformações de ondas relevantes para o serviço de proteção à linha de costa. Além da extensão do topo recifal e a declividade da frente, é importante observar a largura do recife, sua profundidade, e a presença de canais. Um recife de coral cortado por canais pode na realidade favorecer a concentração de energia de ondas, ocorrência de correntes de retorno e permitir a fuga de sedimentos, aumentando a erosão costeira (FERNANDINO et al., 2018b).

Por fim, ainda relacionado à questão das dimensões do recife, há a morfologia recifal. A depender da história evolutiva da costa e do recife, este ecossistema pode apresentar formas bastante distintas. Algumas das morfologias mais comuns são os recifes em barreira, em franja, bancos recifais, e atóis. Nem todos estes tipos morfológicos já foram avaliados em detalhe com relação à sua contribuição para a proteção

à linha de costa (ELLIFF & SILVA, 2017). No entanto, as características inerentes a elas dizem respeito a alguns atributos já mencionados, como a declividade da frente recifal, dimensões, e presença de descontinuidades, como canais. Além desses aspectos, é importante enfatizar também a distância do recife até a linha de costa. Como observado por FERNANDINO et al. (2018b), devido às características hidrodinâmicas e praias locais em Porto Seguro, Brasil, a distância do recife até a costa tornou-se um fator importante na piora da erosão costeira observada, permitindo o reagrupamento de raios de ondas após a difração promovida por um banco recifal.

SINERGIA DOS IMPACTOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Como mencionado anteriormente, aumentos na temperatura dos oceanos, acidificação, e variações do nível médio do mar são efeitos das mudanças climáticas reconhecidamente deletérios aos recifes de coral (Figura 1). É necessário que se entenda com qual intensidade cada um destes processos afeta uma dada região para então poder avaliar seus impactos cumulativos. No entanto, compreender a sinergia destes efeitos permanece um desafio (HERNÁNDEZ-DELGADO, 2015).

O trabalho clássico de HOEGH-GULDBERG (1999) completou 20 anos de sua publicação. Nele, o autor descreve a resposta negativa de recifes de coral quanto ao aumento da temperatura nos oceanos. Este talvez seja o efeito mais bem investigado dentre os impactos das mudanças climáticas. O processo de aquecimento dos oceanos se dá pelo aumento das emissões de gás carbônico (CO₂) atmosférico, exacerbando o efeito estufa do planeta. Esse aquecimento ocorre de maneira gradual, porém também são observados períodos de anomalias térmicas positivas, além da intensificação deste



aumento gradual com a ocorrência do fenômeno cíclico El Niño. Calcula-se que o planeta já tenha sofrido um aumento de 0,85 °C entre 1880 e 2012, considerando uma média global das superfícies terrestres e dos oceanos (IPCC, 2014).

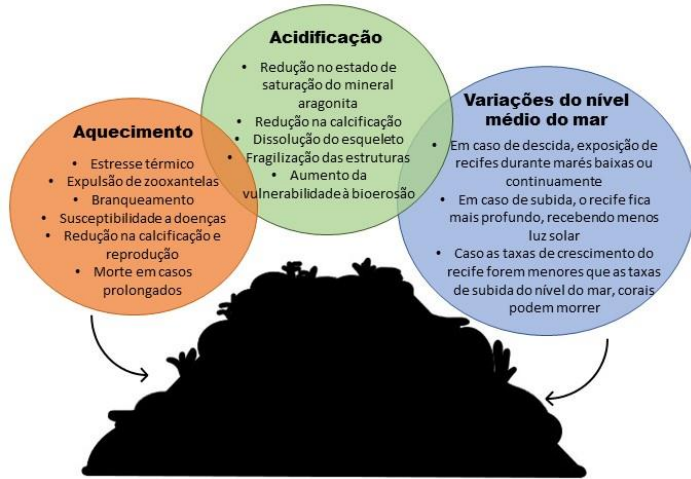


Figura 25: Impactos negativos sobre recifes de coral por efeitos das mudanças climáticas (como o aquecimento dos oceanos, a acidificação e as variações no nível médio do mar, aqui esquematizados) podem ter relações sinérgicas entre si e agravar seu potencial de causar danos.

Por se tratar de organismos sésseis, os corais não conseguem se deslocar em busca de águas dentro do seu estreito limite de tolerância térmica. Dessa forma, corais têm experimentado condições estressantes cada vez mais frequentes e intensas. O estresse do aumento da temperatura causa a expulsão das zooxantelas, microalgas simbióticas que vivem no tecido dos corais e que fornecem parte da energia necessária para sua vida. Uma vez expulsas, os corais passam por um processo chamado branqueamento (PANDOLFI et al., 2011). Apesar deste ser um processo reversível, os corais se tornam neste momento mais suscetíveis a doenças, sua calcificação e reprodução são reduzidas para economizar energia, e caso a situação se mantenha por longos períodos pode causar a morte dos corais (SPALDING & BROWN, 2015).

Conhecida como o “outro problema do CO₂”, a acidificação dos oceanos também é desencadeada pelo mesmo aumento de emissões para a atmosfera. Neste caso, a diminuição do pH nos oceanos leva a uma redução no estado de saturação do mineral aragonita, o qual é necessário para a formação da estrutura carbonática dos recifes (PANDOLFI et al., 2011). Corais são mais sensíveis à acidificação que crustáceos e peixes (IPCC, 2014), o que aumenta a preocupação sobre a vitalidade dos recifes dentro de cenários futuros. Além de prejudicar a calcificação dos corais, a acidificação promove a dissolução de estruturas já formadas, tornando-as mais frágeis e propensas à quebra e vulneráveis à bioerosão (ELLIFF & SILVA, 2017).

Por fim, variações no nível médio do mar trazem algumas possibilidades de piora (ou até de melhora) nas condições do recife. É esperado que algumas regiões do planeta passem por uma diminuição em seu nível do mar, devido a processos de soerguimento continental em função de processos tectônicos, por exemplo, ou como consequência da isostasia promovida pela perda de massa de gelo por derretimento, o que causa um efeito “elástico” pelo alívio de pressão (KHAN, 2019). Nestes casos, a diminuição no nível do mar pode expor os recifes durante alguns períodos de maré ou continuamente. Como discutido por SAUNDERS et al. (2015), variações tanto negativas quanto positivas também irão alterar processos hidrodinâmicos locais e a disponibilidade de luz para o ecossistema. No caso de uma subida do nível do mar, pode-se considerar ainda hoje a classificação proposta por NEUMANN & MACINTYRE (1985). Estes autores descreveram três evoluções para um recife: um recife do tipo “*keep up*”, do tipo “*catch-up*” ou do tipo “*give-up*”. Um recife “*keep up*”, ou seja, “que acompanha”, tem uma taxa de crescimento igual à taxa de subida do nível do mar. Já



o tipo “*catch-up*”, ou seja, “que alcança”, tem uma taxa de crescimento inicialmente abaixo da taxa de subida, porém eventualmente alcança o nível médio do mar. Finalmente, um recife do tipo “*give-up*”, ou seja, “que desiste”, não consegue acompanhar a subida do nível do mar e sua acreção eventualmente cessa, tornando-se um recife relíquia.

Uma possibilidade positiva com um aumento do nível do mar é o incremento de áreas para colonização (SAUNDERS et al., 2015). No entanto, a sinergia dos outros efeitos pode ser um empecilho para essa expansão recifal. Caso o recife esteja fragilizado por branqueamento ou com uma estrutura em processo de dissolução, como é possível que os corais possam se reproduzir de maneira eficiente e ser pioneiros em um novo ambiente? Como evitar que recifes se tornem do tipo “que desiste” se suas taxas de crescimento estão intimamente ligadas com seu bem-estar, tão afetado pelo aquecimento e acidificação? Ocorrências de branqueamento em massa poderão se tornar mais letais devido à subida do nível do mar? Além disso, como fica a sinergia entre estes efeitos das mudanças climáticas e os impactos negativos locais causados pelo homem (como a sobrepesca, poluição e eutrofização)? Todas essas questões são essenciais para desenvolver estratégias de recuperação, adaptação e mitigação. No entanto, como explicado anteriormente, espera-se que cada região tenha níveis de intensidade diferentes para cada impacto. Assim, é necessário reconhecer quais as prioridades de ação em cada caso.

APROVEITANDO O POTENCIAL DE PROTEÇÃO COSTEIRA POR RECIFES DE CORAL

Apesar do cenário pouco animador para os recifes de coral frente às mudanças climáticas, é cedo demais para considerar que este ecossistema está terminantemente condenado (SPALDING & BROWN,

2015). O maior agravante das mudanças climáticas talvez seja a velocidade em que essas alterações estejam ocorrendo (ELLIFF & SILVA, 2017). Recifes de coral estão presentes no registro fóssil em épocas passadas com níveis de CO₂ acima daqueles observados hoje (PANDOLFI et al., 2011). Porém, esse incremento ocorreu ao longo de um período mais longo, permitindo a aclimação dos organismos que compõem o recife às novas condições.

É importante observar que nem toda espécie de coral que compõe um recife tem o mesmo nível de sensibilidade e, dessa forma, o nível de vulnerabilidade de recifes frente às mudanças climáticas é variável. A fauna coralínea brasileira, por exemplo, cujas características destoam em muitos aspectos daquelas no Caribe e no Indo-Pacífico, ainda não apresentou casos de mortalidade em massa devido a eventos de branqueamento, considerando casos registrados até 2010 (LEÃO et al., 2016). Este achado pode ser um indicativo de que a comunidade de corais encontrada no Brasil, por exemplo, pode conter pistas do que faz um recife ser mais resistente contra esse fator estressante. Como descrito por CAMP et al. (2018), há uma crescente utilização do termo “supercoral” na literatura recente para buscar descrever corais com taxas superiores de sobrevivência. No entanto, estes autores enfatizam a necessidade de padronização do uso deste termo para evitar generalizações que podem ser danosas para ações de gestão.

A capacidade de fornecer serviços ecossistêmicos está diretamente relacionada ao nível de resiliência de um ecossistema (ELLIFF & KIKUCHI, 2015). Resiliência é um termo utilizado frequentemente em estudos ambientais. Como discutido por LEVIN & LUBCHENCO (2008), resiliência pode ser considerada equivalente a robustez e, assim, se refere à manutenção das funções ambientais de um ecossistema que está diante de



fatores perturbadores. A função ambiental de interesse no presente estudo é a proteção à linha de costa promovida por recifes de coral, enquanto os fatores perturbadores são as mudanças climáticas e suas sinergias.

Em muitas áreas, a ameaça dos efeitos das mudanças climáticas está em segundo plano, sendo os impactos locais, como a poluição e a sobrepesca, os mais preocupantes para manter a resiliência deste ecossistema (SPALDING & BROWN, 2015). Porém, ao abordar uma solução para um dado fator estressante, é provável que outros fatores também sejam amenizados. Por exemplo, no estudo de SHAVER et al. (2018), foi demonstrado que ações de gestão costeira locais permitiram não só uma melhora destes problemas, mas também uma maior resiliência de corais frente ao branqueamento desencadeado por aquecimento.

Estratégias de recuperação de recifes de coral, como a recolonização de recifes a partir do transplante de colônias de coral, ainda apresentam importantes incertezas com relação ao aumento da rugosidade de um recife na prática e à compatibilidade entre a área que essa estratégia consegue cobrir e a área *in situ* que está degradada (HOEGH-GULDBERG et al., 2007). Somado a isso, há diversas questões sobre como incluir os ditos “supercorais” em estratégias para enfrentar alterações ambientais rápidas (CAMP et al., 2018). No entanto, estima-se que o custo para investir em estratégias para aumentar a resiliência dos recifes de coral seja vantajoso considerando a gama de serviços recebidos, particularmente considerando os benefícios de proteção contra riscos costeiros (FERRARIO et al., 2014).

Dessa forma, sugere-se que os aspectos que devem ser priorizados para garantir esse serviço devem ser aqueles relacionados à manutenção da complexidade da estrutura física do recife. Um recife

pequeno, não contínuo, e pouco rugoso é menos capaz de atenuar a energia de ondas incidentes e, assim, proteger propriedades e vidas humanas, ao passo que um recife com características opostas é considerado como um bom potencial fornecedor do serviço de proteção à linha de costa.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O recurso mais necessário para garantir o serviço de proteção costeira por recifes de coral é o tempo. Tempo para permitir a aclimação dos recifes de coral, tempo para desenvolver e aplicar técnicas para sua recuperação, ou até tempo para estabilizar o nosso clima. Investir recursos em manter o serviço de proteção costeira por recifes de coral não traz apenas este benefício. As soluções necessárias para manter este benefício são, na realidade, as mesmas que precisam ser aplicadas para garantir outros serviços como provisão de alimento, por exemplo. Dessa forma, a integração de estratégias de gestão e principalmente a aplicação de estratégias com base ecossistêmica se mostram como um caminho promissor. A manutenção da complexidade deste ecossistema é essencial, especialmente de aspectos como a rugosidade do topo recifal (diretamente relacionado à cobertura de corais vivos) e a integridade da estrutura física.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) nº do processo 40817/2014-0, através das bolsas de doutorado de C.I. Elliff e G. Fernandino, respectivamente.



REFERÊNCIAS

- ALVAREZ-FILIP, L.; DULVY, N.K.; GILL, J.A.; CÔTÉ, I.M. & WATKINSON, A.R. 2009. Flattening of Caribbean coral reefs: region-wide declines in architectural complexity. *Proceedings of the Royal Society*, 276: 3019–3025. (doi:10.1098/rspb.2009.0339)
- ARKEMA, K.K.; GUANEL, G.; VERUTES, G.; WOOD, S.A.; GUERRY, A.; RUCKELSHAUS, M.; KAREIVA, P.; LACAYO, M. & SILVER, J.M. 2013. Coastal habitats shield people and property from sea-level rise and storms. *Nature Climate Change*, 3: 913–918. (doi:10.1038/nclimate1944)
- BECK, M.W.; LOSADA, I.J.; MENÉNDEZ, P.; REGUERO, B.G.; DIÁZ-SIMAL, P. & FERNÁNDEZ, F. 2018. The global flood protection savings provided by coral reefs. *Nature Communications*, 9(2018):2186. (doi:10.1038/s41467-018-04568-z)
- BOYD, J. & BANZHAF, S. 2007. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics*, 63(2007): 616–626. (doi:10.1016/j.ecolecon.2007.01.002)
- CAMP, E.F.; SCHOEPF, V. & SUGGETT, D.J. 2018. How can “Super Corals” facilitate global coral reef survival under rapid environmental and climatic change? *Global Change Biology*, 24(2018):2755–2757. (doi:10.1111/gcb.14153)
- CORTÉS, J. 2003. *Latin American Coral Reefs*. 509 p., Elsevier, Amsterdã, Holanda. (ISBN 9780444513885)
- COSTA, M.B.S.F.; ARAÚJO, M.; ARAÚJO, T.C.M. & SIEGLE, E. 2016. Influence of reef geometry on wave attenuation on a Brazilian coral reef. *Geomorphology*, 253:318–327. (doi:10.1016/j.geomorph.2015.11.001)
- ELLIFF, C.I. & KIKUCHI, R.K.P. 2015. The ecosystem service approach and its application as a tool for integrated coastal management. *Natureza & Conservação*, 13:105–111. (doi:10.1016/j.ncon.2015.10.001)
- ELLIFF, C.I. & KIKUCHI, R.K.P. 2017. Ecosystem services provided by coral reefs in a Southwestern Atlantic Archipelago. *Ocean & Coastal Management*, 136(2017):49–55. (doi:10.1016/j.ocecoaman.2016.11.021)
- ELLIFF, C.I. & SILVA, I.R. 2017. Coral reefs as the first line of defense: shoreline protection in face of climate change. *Marine Environmental Research*, 127:148–154. (doi:10.1016/j.marenvres.2017.03.007)
- FERNANDINO, G.; ELLIFF, C.I. & SILVA, I.R. 2018a. Ecosystem-based management of coastal zones in face of climate change impacts: Challenges and inequalities. *Journal of Environmental Management*, 215:32–39. (doi:10.1016/j.jenvman.2018.03.034)
- FERNANDINO, G.; GONZÁLEZ, M.; CÁNOVAS, V.; TANAJURA, C.A.S. & SILVA, I.R. 2018b. Erosional patterns induced by coral reefs in the eastern coast of Brazil. *Pesquisas em Geociências*, 45(3):e0750. (doi:10.22456/1807-9806.91391)
- FERRARIO, F.; BECK, M.W.; STORLAZZI, C.D.; MICHELI, F.; SHEPARD, C.C. & AIROLDI, L. 2014. The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation. *Nature Communications*, 5:3794. (doi:10.1038/ncomms4794)
- FISHER, B.; TURNER, R.K. & MORLING, P. 2009. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 68:643–653. (doi:10.1016/j.ecolecon.2008.09.014)
- GARRISON, T. 2006. *Essentials of Oceanography*. 4a. ed. 384p., Thomson Higher Education, Belmont, EUA. (ISBN: 0-495-01175-4)
- GRABEMANN, I & WEISSE, R. 2008. Climate change impact on extreme wave conditions in the North Sea: an ensemble study. *Ocean Dynamics*, 58:199–2012. (doi:10.1007/s10236-008-0141-x)
- HEARN, C.J. 2011. Perspectives in coral reef hydrodynamics. *Coral Reefs*, 30:1–9. (doi:10.1007/s00338-011-0752-4)
- HERNÁNDEZ-DELGADO, E.A. 2015. The emerging threats of climate change on tropical coastal ecosystem



- services, public health, local economies and livelihood sustainability of small islands: cumulative impacts and synergies. *Marine Pollution Bulletin*, 101(1):5-28. (doi:10.1016/j.marpolbul.2015.09.018)
- HOEGH-GULDBERG, O. 1999. Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Marine and Freshwater Research*, 50(8):839-866. (doi:10.1071/MF99078)
- HOEGH-GULDBERG, O.; MUMBY, P.J.; HOOTEN, A.J.; STENECK, R.S.; GREENFIELD, P.; GOMEZ, E.; HARVELL, C.D.; SALE, P.F.; EDWARDS, A.J.; CALDEIRA, K.; KNOWLTON, N.; EAKIN, C.M.; IGLESIAS-PRIETO, R.; MUTHIGA, N.; BRADBURY, R.H.; DUBI, A. & HATZIOLOS, M.E. 2007. Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science*, 318:1737-1742. (doi:10.1126/science.1152509)
- IPCC. 2014. 151 p. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Suíça.
- KHAN, A.A. 2019. Why would sea-level rise for global warming and polar ice-melt? *Geoscience Frontiers*, 10(2):481-494. (doi:10.1016/j.gsf.2018.01.008)
- KNOWLTON, N. 2001. The future of coral reefs. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98(10):5419-5425. (doi:10.1073/pnas.091092998)
- LEÃO, Z.M.A.N.; KIKUCHI, R.K.P.; FERREIRA, B.P.; NEVES, E.G.; SOVIERZOSKI, H.H.; OLIVEIRA, M.D.M.; MAIDA, M.; CORREIA, M.D. & JOHNSON, R. 2016. Brazilian coral reefs in a period of global change: a synthesis. *Brazilian Journal of Oceanography*, 64(sp2):97-116. (doi:10.1590/S1679-875920160916064sp2)
- LEVIN, S.A. & LUBCHENCO, J. 2008. Resilience, robustness, and marine ecosystem-based management. *BioScience*, 58(1):27-32. (doi:10.1641/B580107)
- LIQUETE, C.; ZULIAN, G.; DELGADO, I.; STIPS, A. & MAES, J. 2013. Assessment of coastal protection as an ecosystem service in Europe. *Ecological Indicators*, 30(2013):205-217. (doi:10.1016/j.ecolind.2013.02.013)
- MANN, M.E.; RAHMSTORF, S.; KORNHUBER, K.; STEINMAN, B.A.; MILLER, S.K. & COUMOU, D. 2017. Influence of anthropogenic climate change on planetary wave resonance and extreme weather events. *Scientific Reports*, 7(45242):1-10. (doi:10.1038/srep45242)
- MARTÍNEZ, M.L.; INTRALAWAN, A.; VÁZQUEZ, G.; PÉREZ-MAQUEO, O.; SUTTON, P. & LANDGRAVE, R. 2007. The coasts of our world: ecological, economic and social importance. *Ecological Economics*, 63(2007):254-272. (doi:10.1016/j.ecolecon.2006.10.022)
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment). 2005. 155 p. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Island Press, Washington, EUA. (ISBN: 1-59726-040-1)
- NEUMANN, A.C. & MACINTYRE, I. 1985. Reef response to sea level rise: keep-up, catch up or give-up. In: *Fifth International Coral Reef Congress. Proceedings of the Fifth International Coral Reef Congress, Tahiti*, 3:105-110.
- PANDOLFI, J.M.; CONNOLLY, S.R.; MARSHALL, D.J. & COHEN, A.L. 2011. Projecting coral reef futures under global warming and ocean acidification. *Science*, 333(6041):418-422. (doi:10.1126/science.1204794)
- PRINCIPE, P.; BRADLEY, P.; YEE, S.; FISHER, W.; JOHNSON, E.; ALLEN, P. & CAMPBELL, D. 2012. Quantifying coral reef ecosystem services. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Research Triangle Park, NC. EPA/600/R-11/206. Disponível em: <http://www.epa.gov/ged/quantify.pdf>.
- QUATAERT, E.; STORLAZZI, C.; VAN ROOIJEN, A.; CHERITON, O. & VAN DONGEREN, A. 2015. The influence of coral reefs and climate change on



- wave-driven flooding of tropical coastlines. *Geophysical Research Letters*, 42:6407-6415. (doi:10.1002/2015GL064861)
- REGUERO, B.G.; BECK, M.W.; AGOSTINI, V.N.; KRAMER, P. & HANCOCK, B. 2018. Coral reefs for coastal protection: A new methodological approach an engineering case study in Grenada. *Journal of Environmental Management*, 210(2018):146-161. (doi:10.1016/j.jenvman.2018.01.024)
- SAUNDERS, M.I.; ALBERT, S.; ROELFSEMA, C.M.; LEON, J.X.; WOODROFFE, C.D.; PHINN, S.R. & MUMBY, P.J. 2015. Tectonic subsidence provides insight into possible coral reef futures under rapid sea-level rise. *Coral Reefs*, 35(1):155-167. (doi:10.1007/s00338-015-1365-0)
- SHAVER, E.C.; BURKEPILE, D.E. & SILLIMAN, B.R. 2018. Local management actions can increase coral resilience to thermally-induced bleaching. *Nature Ecology and Evolution*, 2:1075–1079. (doi:10.1038/s41559-018-0589-0)
- SPALDING, M.D. & BROWN, B.E. 2015. Warm-water coral reefs and climate change. *Science*, 350(6262):769-771. (doi:10.1126/science.aad0349)
- SPALDING, M.D.; RUFFO, S.; LACAMBRA, C.; MELIANE, I.; HALE, L.Z.; SHEPARD, C.C. & BECK, M.W. 2014. The role of ecosystems in coastal protection: adapting to climate change and coastal hazards. *Ocean & Coastal Management*, 90:50-57. (doi:10.1016/j.ocecoaman.2013.09.007)
- UNEP-WCMC (United Nations Environment Programme World Conservation Monitoring Centre). 2006. 33 p. In the Front Line: Shoreline Protection and Other Ecosystem Services from Mangroves and Coral Reefs. UNEP-WCMC, Cambridge, Reino Unido.
- UNISDR (United Nations International Strategy for Risk Reductions). 2009. 35 p. Terminology on Disaster Risk Reduction. United Nations, Genebra, Suíça.
- WALSH, K.J.E. & RYAN, B.Y. 2000. Tropical cyclone intensity increase near Australia as a result of climate change. *Journal of Climate*, 13:3029–3036 (doi: 10.1175/1520-0442(2000)013<3029:TCIINA>2.0.CO;2)