

Colapso do Isognomon bicolor em costão rochoso de Arraial do Cabo

COLAPSO POPULACIONAL DE ESPÉCIE INVASORA NO ATLÂNTICO SUDOESTE: ESTUDO DO BIVALVE *ISOGNOMON BICOLOR* EM COSTÃO ROCHOSO DE ARRAIAL DO CABO, BRASIL

Luciano Rapagnã^{1,2*} , Jaqueline Pereira De Azevedo Rapagnã³ , Bianca Cardoso
Duarte De Souza³ , Rodolfo Dias Corrêa² , Gustavo Borges De Oliveira² , Thalita Castro
De Souza² , Josman Ferreira França² , Gabriela Da Silva Marques² , Julio Cesar
Quintanilha Peres Dos Santos²  & Ana Polycarpa de Almeida Marinho Carvalho² 

¹. Universidade Federal Fluminense, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Dinâmicas do Oceano e da Terra, Avenida General Milton Tavares de Souza, s/n, Campus da Praia Vermelha, Boa Viagem, Niterói, RJ, Brasil, CEP 24.210-346.

². Faculdade União Araruama de Ensino – UNILAGOS, Curso de Medicina, Rua Baster Pilar, nº 500, Parque Hotel, Araruama, RJ, Brasil, CEP 28.981-402.

³. Secretaria Municipal de Educação, Ciência, Tecnologia, Esporte e Lazer de Arraial do Cabo, Pça. do Sindicato, Praia dos Anjos, Arraial do Cabo, RJ, Brasil, CEP 28.930-000.

Email: lucianorapagna@id.uff.br “(*autor correspondente)”; jaquerapagna@yahoo.com.br; biancacardosobio@gmail.com; rodolfodicorrea@gmail.com; profgustavoborges@gmail.com; tcastros@hotmail.com; gabrielas_marques@hotmail.com; bio.julio@msn.com; ana.polycarpa@gmail.com; unilagosjosman@gmail.com.

Resumo. A espécie exótica invasora *Isognomon bicolor* (Bivalvia: Isognomonidae) foi amplamente registrada como dominante em costões rochosos do Sudeste brasileiro no final da década de 1990 e início dos anos 2000, especialmente em Arraial do Cabo, estado do Rio de Janeiro, Brasil. Estudos históricos documentaram elevadas densidades populacionais, ampla ocupação do mediolitoral e potenciais impactos sobre a estrutura

das comunidades bentônicas locais. Entretanto, a persistência temporal dessas populações tem sido pouco avaliada. O presente estudo integrou uma revisão sistemática da literatura sobre a ocorrência e densidade de *I. bicolor* em Arraial do Cabo com dados empíricos obtidos a partir de um levantamento visual realizado em 2025 no costão rochoso da Praia do Forno, um dos sítios clássicos de ocorrência da espécie. A amostragem foi conduzida por meio da metodologia de foto-quadrat, aplicada sistematicamente ao longo de todo o gradiente vertical do costão, do supralitoral ao infralitoral raso. Os registros históricos indicam que, entre 2000 e 2004, as densidades médias da espécie variaram aproximadamente entre 600 e 2.200 indivíduos m^{-2} , com pico populacional entre 2002 e 2003. Em contraste, o levantamento de 2025 não registrou a presença de *I. bicolor* em nenhuma das faixas amostradas, resultando em densidade média igual a zero indivíduos m^{-2} para a Praia do Forno. Esses resultados evidenciam um forte contraste temporal e sugerem um colapso populacional local da espécie nesse costão rochoso, destacando a importância de abordagens de longo prazo para a compreensão da dinâmica real das bioinvasões marinhas em ambientes naturais.

Palavras-chave: bioinvasão marinha; moluscos invasores; espécies não nativas; ressurgência costeira; dinâmica populacional.

POPULATION COLLAPSE OF AN INVASIVE SPECIES IN THE SOUTHWEST ATLANTIC: A CASE STUDY OF THE BIVALVE ISOGNOMON BICOLOR ON A ROCKY SHORE IN ARRAIAL DO CABO, BRAZIL. The invasive bivalve *Isognomon bicolor* (Bivalvia: Isognomonidae) has been widely reported as a dominant species on rocky shores of southeastern Brazil during the late 1990s and early 2000s, particularly in Arraial do Cabo, Rio de Janeiro State, Brazil. Historical studies documented high population densities, extensive mid-shore occupation and potential impacts on local benthic communities. However,

the long-term persistence of these populations has rarely been evaluated. This study integrated a systematic review of published data on the occurrence and density of *I. bicolor* in Arraial do Cabo with empirical data obtained from a visual survey conducted in 2025 on the rocky shore of Praia do Forno, a classical site of invasion by this species. Sampling was performed using a photo-quadrat methodology applied systematically along the entire vertical gradient of the rocky shore, from the supralittoral to the shallow infralittoral zone. Historical records indicate that mean densities ranged from approximately 600 to 2,200 individuals m⁻² between 2000 and 2004, with a population peak during 2002–2003. In contrast, the 2025 survey detected no individuals of *I. bicolor* in any of the sampled zones, resulting in a mean density of zero individuals m⁻² at Praia do Forno. These findings reveal a pronounced temporal contrast and indicate a local population collapse of *I. bicolor* at this rocky shore, emphasizing the importance of long-term monitoring to understand the true dynamics of marine biological invasions in natural coastal environments.

Keywords: marine bioinvasion; invasive mollusks; non-native species; population dynamics; rocky shores.

INTRODUÇÃO

As bioinvasões marinhas constituem um dos principais vetores de transformação dos ecossistemas costeiros contemporâneos, sendo amplamente reconhecidas como uma das maiores ameaças à biodiversidade marinha em escala global. O aumento do tráfego marítimo, a expansão de estruturas artificiais ao longo da costa e a intensificação de atividades antrópicas têm ampliado significativamente as oportunidades de transporte, introdução e estabelecimento de espécies não nativas em ambientes naturais, especialmente em zonas costeiras rasas e altamente conectadas (Carlton 2001, Carlton & Geller 1993, Havel et al. 2015, Thomaz et al. 2015).

Em costões rochosos, a introdução de espécies sésseis invasoras pode resultar em alterações profundas na estrutura e no funcionamento das comunidades bentônicas. Esses impactos incluem modificações nos padrões de zonação vertical, redução da disponibilidade de espaço para espécies

nativas e alterações nas interações competitivas. Bivalves invasores, em particular, frequentemente apresentam elevadas taxas de crescimento, alta fecundidade e capacidade de formar agregações densas, características que favorecem a exclusão competitiva de espécies nativas e a reorganização funcional do ecossistema (Burke et al. 2025).

No litoral brasileiro, o bivalve *Isognomon bicolor* (Bivalvia: Isognomonidae), originalmente distribuído no Caribe, tornou-se um dos exemplos mais emblemáticos de invasão marinha em ambientes naturais. Desde sua introdução, a espécie expandiu-se ao longo de diferentes setores da costa brasileira, sendo registrada tanto em estruturas artificiais quanto em costões rochosos naturais e ambientes entremarés, com maior concentração de registros no litoral Sudeste (Creed & Oliveira 200,; Domaneschi & Martins 2002).

Em Arraial do Cabo, estado do Rio de Janeiro, Brasil, *I. bicolor* passou a ser registrada em costões rochosos naturais a partir da década de 1990, apresentando rápida expansão espacial e elevadas densidades populacionais no início dos anos 2000. Estudos conduzidos nesse período documentaram dominância estrutural da espécie no mediolitoral, com formação de agregações densas e potenciais impactos sobre a comunidade bentônica local. Esses registros consolidaram Arraial do Cabo como um dos principais sítios de referência para o estudo da invasão de *I. bicolor* no Brasil (Fernandes et al. 2004, Rapagnã 2004, Rapagnã et al. 2025b).

Apesar da ampla documentação da fase de expansão de *Isognomon bicolor* no Sudeste brasileiro, ainda permanece pouco compreendido se essas populações mantiveram estabilidade demográfica ao longo das décadas subsequentes em costões rochosos naturais de Arraial do Cabo. Registros recentes indicam episódios de mortalidade em massa, seguidos por declínio populacional e ocorrências pontuais ao longo das últimas duas décadas, sugerindo que a dinâmica da invasão pode ter sido mais complexa do que um processo contínuo de expansão e estabelecimento permanente.

Nesse contexto, a questão central deste estudo é: as populações de *Isognomon bicolor* persistiram no longo prazo em um dos principais sítios históricos de invasão do litoral brasileiro? Responder a essa questão é particularmente relevante em Arraial do Cabo, região caracterizada

por fortes filtros ambientais associados à ressurgência costeira, fenômeno que promove a ascensão periódica de águas frias e ricas em nutrientes. Considerando que *I. bicolor* possui origem tropical no Caribe, essas condições ambientais podem impor restrições térmicas e ecológicas importantes à persistência da espécie em costões naturais submetidos a elevada variabilidade ambiental.

Diante desse cenário, o presente estudo teve como objetivo integrar registros históricos de ocorrência e densidade de *Isognomon bicolor* em Arraial do Cabo com dados empíricos obtidos a partir de um levantamento visual recente realizado no costão rochoso da Praia do Forno. Ao documentar a ausência da espécie em um dos sítios clássicos de sua invasão, este trabalho busca contribuir para a compreensão da dinâmica temporal das bioinvasões marinhas e para a avaliação dos limites ecológicos da persistência de espécies invasoras em ambientes naturais.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O estudo foi conduzido no costão rochoso da Praia do Forno, município de Arraial do Cabo, estado do Rio de Janeiro, Sudeste do Brasil (22°57'S; 42°00'W) (Figura 1). A área está inserida na Reserva Extrativista Marinha de Arraial do Cabo (RESEX-Mar), unidade de conservação federal criada com o objetivo de conciliar a conservação da biodiversidade marinha com o uso sustentável por comunidades tradicionais (Koblischek 2012).

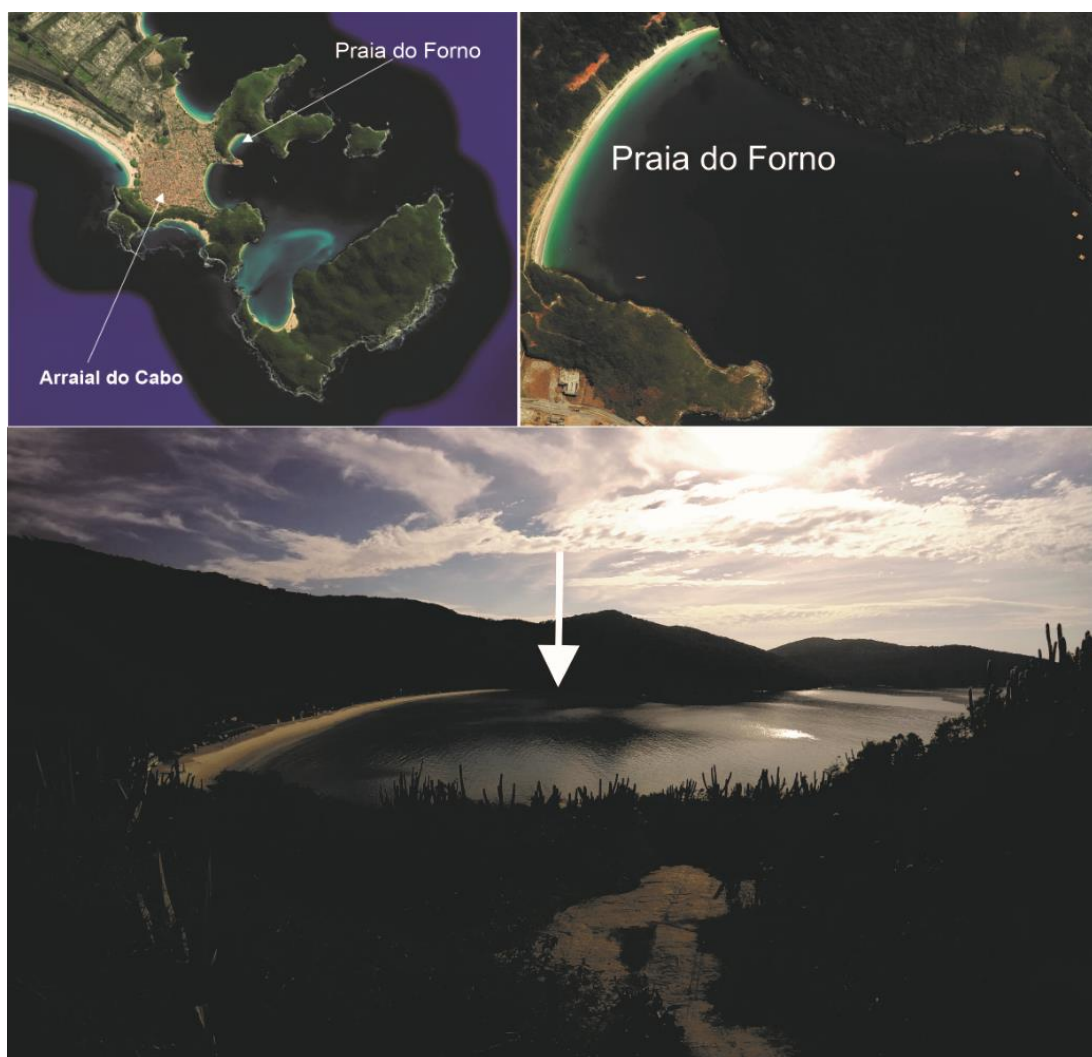


Figura 1. – Localização da área de estudo sobre a ocorrência de *Isognomon bicolor* na Praia do Forno, Arraial do Cabo, estado do Rio de Janeiro, Sudeste do Brasil, destacando o costão rochoso amostrado.

Figure 1. – Location of the study area on the occurrence of *Isognomon bicolor* at Forno Beach, Arraial do Cabo, Rio de Janeiro state, Southeastern Brazil, highlighting the sampled rocky shore.

Arraial do Cabo apresenta um dos sistemas de ressurgência costeira mais intensos do litoral brasileiro, caracterizado pela ascensão periódica de águas frias, ricas em nutrientes, provenientes de profundidades superiores a 200–300m. Esse fenômeno resulta em forte variabilidade térmica, elevada produtividade primária e intensos filtros ambientais para organismos bentônicos, especialmente espécies sésseis do entremarés e infralitoral raso (Albuquerque et al. 2012, 2014, Belem et al. 2013, Carbonel 1998, Castelao & Barth 2006, Sanders et al. 2014, Silva et al. 2023, Venancio et al. 2016).

A Praia do Forno possui aproximadamente 580 m de extensão, com orientação predominantemente protegida de ondas de alta energia, afloramentos rochosos contínuos e gradiente bem definido de zonação vertical, compreendendo os compartimentos supralitoral, mediolitoral e infralitoral raso. Essas características fizeram da área um dos principais sítios históricos de investigação sobre comunidades bentônicas e bioinvasões marinhas no município (Rapagnã et al. 2025a).

Delineamento amostral e procedimento de campo

A amostragem foi realizada em setembro de 2025 por meio de um censo visual sistematizado utilizando a metodologia de foto-quadrat ao longo do gradiente vertical do costão rochoso da Praia do Forno, em Arraial do Cabo (RJ). Esse método foi adotado por permitir o registro permanente da comunidade bentônica, minimizar impactos diretos sobre o substrato e possibilitar comparações com estudos anteriores conduzidos com quadrats tradicionais.

Para garantir representatividade espacial da área amostrada, foram estabelecidos três transectos verticais independentes, distribuídos ao longo do afloramento rochoso em setores distintos do costão. Cada transecto foi conduzido de forma contínua desde o limite inferior do supralitoral até o infralitoral raso, incluindo a zona de transição para o fundo arenoso adjacente.

Ao longo de cada transecto foram obtidos registros fotográficos sistemáticos a intervalos aproximados de 20 cm de desnível vertical, abrangendo as principais faixas de zonação do costão, incluindo supralitoral, mediolitoral superior, mediolitoral médio, mediolitoral inferior e infralitoral imediato.

As imagens foram registradas com câmera digital do tipo GoPro®, operada em modo subaquático e posicionada a uma distância padronizada do substrato, de modo a garantir enquadramento consistente entre os registros. Cada fotografia correspondeu a uma unidade amostral aproximada de 20×20 cm ($0,04$ m²) do substrato rochoso.

No total, foram obtidos 120 foto-quadrats distribuídos entre os três transectos, resultando em uma área amostral total $4,8$ m² ao longo do perfil vertical do costão. Esse esforço amostral

permitiu a cobertura sistemática de toda a zonação do entremarés e do infralitoral imediato no setor estudado.

Considerando as densidades historicamente elevadas registradas para *Isognomon bicolor* em Arraial do Cabo, frequentemente superiores a centenas ou milhares de indivíduos por metro quadrado, a ausência de indivíduos em todas as unidades amostrais analisadas indica um contraste marcante em relação aos registros históricos disponíveis para o local, reforçando a relevância ecológica do padrão observado.

Tratamento e análise dos dados

As imagens obtidas foram organizadas, tratadas e padronizadas no software CorelDRAW®, onde foram realizadas correções básicas de enquadramento, contraste e orientação, sem alteração do conteúdo biológico das fotografias. Cada imagem foi analisada visualmente com foco específico na detecção da presença de *Isognomon bicolor* ao longo de toda a zonação vertical do costão.

Todas as imagens foram examinadas independentemente pelos autores, com o objetivo de confirmar a ausência da espécie nas unidades amostrais analisadas e reduzir a possibilidade de erro de detecção associado à análise visual das fotografias. A densidade da espécie foi expressa como indivíduos por metro quadrado (ind. m⁻²), permitindo comparação direta com dados históricos disponíveis para Arraial do Cabo, obtidos por meio de quadrats convencionais de diferentes dimensões.

Integração com dados históricos

Para a contextualização temporal dos resultados, foi realizado um levantamento bibliográfico sistemático sobre a ocorrência, densidade e dinâmica populacional de *Isognomon bicolor* em Arraial do Cabo. A busca incluiu artigos científicos indexados, dissertações e teses acadêmicas, trabalhos de conclusão de curso e comunicações técnicas que apresentassem informações primárias ou análises específicas para o município.

O levantamento foi conduzido a partir de buscas em bases de dados científicas nacionais e internacionais, incluindo Google Scholar, Scopus e Web of Science, utilizando combinações de palavras-chave como *Isognomon bicolor*, “bioinvasão marinha”, “costões rochosos”, “Arraial do Cabo” e “densidade populacional”. Adicionalmente, foram consultadas listas de referências dos estudos selecionados, de modo a identificar trabalhos clássicos e documentos técnicos não indexados formalmente, mas amplamente citados na literatura regional.

Foram incluídos apenas estudos que apresentassem, de forma explícita, ao menos um dos seguintes critérios: (i) dados de densidade absoluta da espécie expressos em indivíduos por unidade de área; (ii) indicação clara do local ou ponto de amostragem em Arraial do Cabo; e (iii) período ou ano da coleta. Trabalhos que tratassem da espécie apenas em escala regional ou nacional, sem referência direta ao município, foram excluídos da análise comparativa.

As informações extraídas de cada estudo incluíram o período de amostragem, a localidade específica, o método de coleta empregado (por exemplo, quadrats tradicionais, transectos, raspagem total ou foto-quadrats), bem como os valores médios de densidade reportados. Quando necessário, os dados foram padronizados para permitir comparações diretas entre estudos conduzidos com diferentes metodologias e escalas espaciais.

Os dados históricos consolidados foram organizados em tabelas comparativas, permitindo a construção de uma síntese cronológica da invasão de *I. bicolor* em Arraial do Cabo, bem como a comparação direta entre os valores históricos de densidade e os resultados obtidos no presente estudo.

RESULTADOS

A síntese cronológica dos registros de *Isognomon bicolor* em Arraial do Cabo, baseada na compilação bibliográfica apresentada na Tabela 1, demonstra que a espécie passou a ser documentada em costões rochosos naturais do município a partir de meados da década de 1990.

O primeiro registro confirmado ocorreu em 1996, marcando o início da presença da espécie em ambientes entremarés locais. Nos anos subsequentes, especialmente entre 1999 e 2001, *I.*

bicolor apresentou estabelecimento populacional consistente na Praia do Forno e na Ponta da Fortaleza, com elevada frequência no mediolitoral.

Tabela 1. – Registro cronológico da ocorrência de *Isognomon bicolor* em Arraial do Cabo, estado do Rio de Janeiro, Brasil, com base em dados de literatura.

Table 1. – Chronological record of the occurrence of *Isognomon bicolor* in Arraial do Cabo, Rio de Janeiro state, Brazil, based on data from the literature.

Período	Local	Observações ecológicas	Referência
1970–1980 (inferido)	Plataformas offshore e áreas portuárias	Introdução presumida associada à bioincrustação e vetores marítimos; não há registros diretos em costões naturais nesse período	(Domaneschi & Martins, 2002)
1996	Registro geral	Primeira ocorrência documentada em costões entremarés naturais	(Ferreira et al., 2008)
1999–2002	Forno; Ponta da Fortaleza	Estabelecimento populacional; alta frequência no médio-litoral	(Ferreira et al., 2008)
2000	Ponta da Fortaleza	Densidades elevadas e agregações densas; domínio espacial no médio-litoral	(Fernandes et al., 2004)
2002–2003	Forno; Ponta da Fortaleza; Praia dos Anjos	Pico populacional local; dominância estrutural e competição com <i>Perna perna</i> e cracas	(Rapagnã, 2004)
2006	Registro geral	Presença ainda registrada	(Breves-Ramos et al., 2010)
2008	Registro geral	Presença ainda registrada, porém, com declínio e ausências pontuais	(Creed & Oliveira, 2008)
2010	Registro geral	Preferência por ambientes abrigados; baixo desempenho em áreas expostas	(López et al., 2014)
2016	Praia do Pontal	Registro pontual com densidades moderadas; ausência de dominância estrutural	(Quintanilha, 2017)
2023	Praia dos Anjos	Altas densidades locais no médio-litoral, de forma pontual	(Dias, 2023)
2025	Registro geral	Espécie tratada como invasora histórica, sem evidência de recuperação ampla no município	(Granthom-Costa et al., 2025)

No ano de 2000, foram registradas densidades elevadas da espécie na Ponta da Fortaleza, acompanhadas pela formação de agregações densas e ampla ocupação do mediolitoral. Em 2002, os registros indicaram expansão local da espécie, com aumento da ocupação do substrato rochoso tanto na Praia do Forno quanto na Ponta da Fortaleza. O intervalo entre 2002 e 2003 correspondeu

ao período de maior ocorrência da espécie no município, com registros simultâneos na Praia do Forno, Ponta da Fortaleza e Praia dos Anjos, caracterizados por elevadas densidades médias e ampla cobertura espacial ao longo dos costões amostrados.

A partir de 2003, *I. bicolor* passou a ser reconhecida como uma das principais espécies exóticas invasoras marinhas do município, em função de sua ampla distribuição e elevada abundância. Em 2006, foi registrada mortalidade em massa das populações locais. Nos anos subsequentes, os registros indicaram redução das densidades e restrição espacial da espécie, com ocorrências mais frequentes em costões considerados abrigados. Entre 2008 e 2010, os levantamentos disponíveis apontaram declínio populacional e ausências pontuais da espécie em áreas anteriormente ocupadas.

Registros posteriores documentaram a ocorrência de *I. bicolor* na Praia do Pontal em 2016 e na Praia dos Anjos em 2023. Nessas ocasiões, a espécie foi registrada de forma localizada, sem evidência de dominância estrutural em escala municipal, caracterizando distribuição espacial heterogênea ao longo do município.

A comparação entre as densidades médias registradas em diferentes estudos realizados entre 2000 e 2023 evidencia variação temporal expressiva na abundância de *I. bicolor* em Arraial do Cabo (Tabela 2). Considerando o conjunto de estudos disponíveis, as densidades médias registradas para a espécie variaram aproximadamente entre 600 e 3.218 indivíduos m⁻² ao longo das últimas duas décadas. Os maiores valores foram registrados em costões como Ponta da Fortaleza, Praia do Forno e Praia dos Anjos, onde a espécie chegou a formar agregações densas e estruturalmente dominantes no mediolitoral.

O valor máximo documentado corresponde a 3.218 indivíduos m⁻², registrado na Praia dos Anjos em 2023 (Dias 2023), evidenciando que, mesmo após o declínio observado ao longo dos anos 2000, a espécie ainda pode apresentar episódios pontuais de elevada abundância em determinados sítios do município.

Tabela 2. – Densidade média de *Isognomon bicolor* (Bivalvia: Isognomonidae) registrada em diferentes pontos de coleta de Arraial do Cabo, estado do Rio de Janeiro, Brasil, considerando estudos realizados entre 2000 e o estudo atual.

Table 2. – Mean- density of *Isognomon bicolor* (Bivalvia: Isognomonidae) recorded at different samplingsites in Arraial do Cabo, Rio de Janeiro State, Brazil, considering studies conducted between 2000 and the present study.

Referência	Período	Local	Método de amostragem	Densidade (ind. m ⁻²)
Fernandes et al. 2004	2000	Ponta da Fortaleza	Quadrats (área padronizada no médio-litoral)	≈ 2.200
Rapagnã 2004	2002–2003	Forno, Ponta da Fortaleza, Anjos	Quadrats (réplicas por faixa do costão)	≈ 1.500
Ferreira et al. 2008	1999–2001	Forno, Ponta da Fortaleza	Quadrats	≈ 1.200
Breves-Ramos et al. 2010	2002–2003	Ponta da Fortaleza, Anjos	Quadrats ao longo de transectos	≈ 950
López et al. 2014	2003–2004	Forno, Fortaleza, Anjos	Quadrats ao longo de transectos	≈ 600
Quintanilha 2017	2016	Praia do Pontal	Quadrats 20 × 20 cm	≈ 1.100
Dias 2023	2023	Anjos	Quadrats (20×20)	≈ 3.218
PRESENTE ESTUDO		Forno	Foto Quadrat (20 x 20)	0

No presente estudo, o levantamento realizado no costão rochoso da Praia do Forno não registrou a presença de indivíduos de *I. bicolor* em nenhuma das faixas amostradas ao longo do gradiente vertical do costão. A amostragem foi conduzida por meio da metodologia de foto-quadrat, aplicada sistematicamente ao longo de todo o perfil entremarés (Figura 2).

A análise incluiu 120 foto-quadrats distribuídos ao longo de três transectos verticais independentes, cobrindo sistematicamente as diferentes faixas de zonação do costão, desde o supralitoral até o infralitoral imediato. Cada unidade amostral correspondeu a uma área aproximada de 20 × 20 cm (0,04 m²), resultando em uma área amostral total de aproximadamente 4,8 m² ao longo do perfil vertical do costão.

Nenhum indivíduo da espécie foi detectado em qualquer uma das unidades amostrais analisadas, resultando em uma densidade média estimada de 0 indivíduos m^{-2} para o sítio avaliado. Considerando o valor máximo historicamente registrado para o município (3.218 indivíduos m^{-2}), a condição observada no presente levantamento representa uma redução de 100% na densidade local em relação ao maior valor documentado na literatura.

Ahead of print

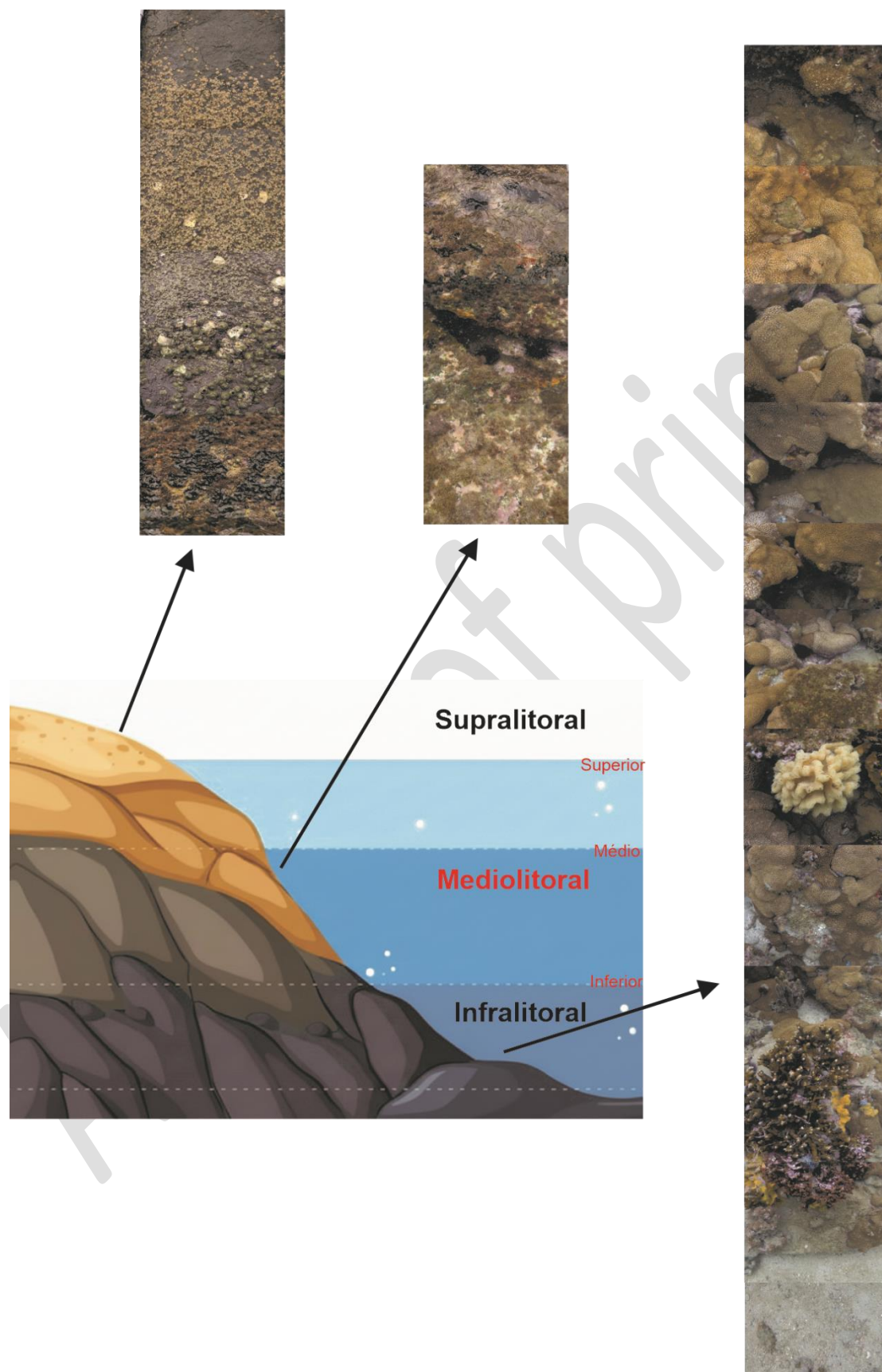


Figura 2. – Registro fotográfico da zonação vertical do costão rochoso da Praia do Forno, Arraial do Cabo, estado do Rio de Janeiro, Brasil, abrangendo os compartimentos supralitoral, mediolitoral e infralitoral.

Figure 2. – Photographic record of the vertical zonation of the rocky shore at Forno Beach, Arraial do Cabo, Rio de Janeiro state, Brazil, encompassing the supralittoral, midlittoral, and infralittoral zones.

A ausência de *I. bicolor* ao longo de toda a zonação do costão rochoso da Praia do Forno registrada no presente estudo contrasta fortemente com os registros históricos disponíveis para o mesmo local. Enquanto estudos anteriores documentaram elevadas densidades médias e ampla ocupação do mediolitoral, o levantamento atual não detectou indivíduos em nenhuma das unidades amostrais analisadas.

DISCUSSÃO

Os resultados do presente estudo sugerem que a invasão de *Isognomon bicolor* em Arraial do Cabo não se desenvolveu de forma linear nem necessariamente irreversível. Ao contrário, o padrão observado indica uma dinâmica marcada por forte variabilidade temporal, caracterizada por fases de rápida expansão populacional, períodos de dominância local e subsequente declínio, culminando na ausência da espécie no costão rochoso da Praia do Forno no momento do levantamento realizado neste estudo.

Esse padrão é compatível com o modelo *boom–bust*, amplamente discutido na literatura sobre invasões biológicas. Nesse modelo, populações invasoras podem apresentar rápido crescimento e elevada abundância inicial, seguidos por declínios populacionais significativos em resposta a fatores como filtros ambientais, instabilidade demográfica e mudanças nas interações bióticas (Agliari et al. 2018, Strayer et al. 2017).

Em Arraial do Cabo, registros históricos indicam que *I. bicolor* colonizou rapidamente os costões rochosos naturais a partir da década de 1990, alcançando densidades excepcionalmente elevadas no início dos anos 2000. Nesse período, a espécie passou a atuar como componente estrutural dominante do mediolitoral, competindo diretamente por espaço com organismos

nativos, como o mexilhão *Perna perna* e cracas do gênero *Tetracrita* (Amaral et al. 2019, Beltrão et al. 2024, Ferreira et al. 2008, Havel et al. 2015).

Entretanto, esse cenário de dominância não se manteve estável ao longo do tempo. A mortalidade em massa registrada em 2006 representou um ponto de inflexão na trajetória da invasão. A partir desse evento, diversos estudos passaram a registrar reduções nas densidades populacionais e uma fragmentação espacial da distribuição da espécie nos costões do município, sem evidências consistentes de retorno aos níveis de abundância previamente observados.

Nesse contexto, a ausência atual de *I. bicolor* na Praia do Forno, documentada no presente estudo, constitui uma evidência compatível com a hipótese de que a invasão tenha resultado em uma ocupação temporária do costão, potencialmente condicionada por restrições ecológicas locais, em vez de um estabelecimento permanente da espécie (López et al. 2014).

Essa interpretação é consistente com estudos recentes que demonstram que, embora *I. bicolor* apresente elevado potencial invasivo e capacidade de formar agregações densas em diferentes regiões do Atlântico e do Mediterrâneo, sua persistência em longo prazo depende fortemente do contexto ambiental local (Gatì et al. 2024). No Mediterrâneo central, por exemplo, foram registrados episódios recentes de rápida expansão e formação de extensas coberturas em substratos rasos, especialmente em ambientes antropizados, com indícios de competição com outros bivalves já estabelecidos. Esses registros indicam que o sucesso invasivo da espécie não é homogêneo e que sua permanência está associada à disponibilidade de habitats favoráveis e à intensidade das pressões ambientais (Angelidis et al. 2024, Gatì et al. 2024).

De forma complementar, estudos experimentais realizados no litoral brasileiro indicam que *I. bicolor* pode alterar significativamente a estrutura de comunidades bentônicas quando presente em altas densidades. No entanto, a magnitude e a direção desses efeitos variam entre diferentes localidades, refletindo a heterogeneidade ambiental e biológica dos sistemas costeiros (Souza et al. 2025). Esse conjunto de evidências sugere que a espécie pode atuar como um engenheiro de ecossistema contingente, capaz de modificar a estrutura das comunidades locais quando presente

em grandes abundâncias, mas cuja permanência e impacto dependem de condições ambientais específicas (Souza et al. 2009).

No caso de Arraial do Cabo, a combinação de forte hidrodinamismo, elevada variabilidade térmica associada à ressurgência costeira, instabilidade nos padrões de recrutamento e intensa competição por espaço no mediolitoral pode atuar como um conjunto de filtros ambientais capazes de limitar a sobrevivência e a reposição populacional de *I. bicolor*, especialmente em costões mais expostos. Esses fatores podem favorecer cenários de persistência intermitente e aumentar a probabilidade de extinções locais em determinados sítios (Rapagnã et al. 2025b).

Além dos fatores ambientais, aspectos demográficos e genéticos também podem contribuir para esse padrão. Evidências genéticas indicam que, embora algumas populações de *I. bicolor* apresentem estabilidade genética temporal e alcancem fases avançadas do processo invasivo, outras permanecem demograficamente vulneráveis, sugerindo a existência de um mosaico de populações fonte e sumidouro ao longo da costa brasileira. Esse padrão ajuda a explicar por que a conectividade regional não garante necessariamente a persistência local da espécie (López et al. 2014).

A interpretação dos resultados apresentados deve considerar, entretanto, algumas limitações metodológicas do presente estudo. A amostragem foi restrita a um único sítio e a um único momento temporal, o que impede a avaliação direta de flutuações sazonais e interanuais típicas de comunidades bentônicas entremarés. Além disso, embora a utilização de foto-quadrats represente uma abordagem metodologicamente robusta e amplamente empregada em estudos ecológicos de costões rochosos, esse método pode subestimar a presença de indivíduos juvenis, crípticos ou parcialmente recobertos por outros organismos sésseis quando comparado a métodos baseados em raspagem total do substrato (Pech et al. 2004, Sabino & Villaça 1999).

Ainda assim, a ausência completa de *I. bicolor* em todas as unidades amostrais analisadas sugere que tais limitações metodológicas não são suficientes, por si só, para explicar o contraste observado em relação aos dados históricos disponíveis para o local. Esse resultado indica que a

ausência atual da espécie no costão da Praia do Forno representa um fenômeno ecológico relevante, e não apenas um artefato amostral.

Diante desse cenário, torna-se evidente a necessidade de estratégias de monitoramento mais abrangentes para avaliar adequadamente a dinâmica populacional de *I. bicolor* em Arraial do Cabo. Estudos futuros devem incluir múltiplos sítios com diferentes níveis de exposição ao hidrodinamismo e à ressurgência costeira, bem como replicações sazonais e interanuais capazes de captar eventos episódicos de recrutamento, mortalidade ou recolonização.

A combinação de diferentes abordagens metodológicas, incluindo foto-quadrats, quadrats tradicionais e raspagem seletiva em áreas sentinela, pode aumentar a sensibilidade à detecção da espécie e reduzir potenciais vieses amostrais. Monitoramentos de longo prazo são particularmente importantes para distinguir entre flutuações transitórias, persistência em baixas densidades e processos de extinção local.

De forma mais ampla, os resultados apresentados reforçam que invasões marinhas aparentemente bem-sucedidas nem sempre resultam em estabelecimento permanente. A compreensão da dinâmica temporal dessas invasões é fundamental para o avanço do conhecimento sobre estabilidade, reversibilidade e legados ecológicos de espécies invasoras em ecossistemas costeiros altamente dinâmicos. Os resultados do presente estudo evidenciam um forte contraste entre as elevadas densidades historicamente registradas para *Isognomon bicolor* em Arraial do Cabo e a ausência da espécie observada no costão rochoso da Praia do Forno no levantamento realizado em 2025. Esse padrão sugere uma mudança significativa na abundância local da espécie ao longo das últimas décadas e é compatível com a hipótese de declínio populacional no sítio historicamente dominado pela invasora.

Embora a amostragem tenha sido restrita a um único local e a um único momento temporal, o contraste entre os registros históricos e os dados atuais indica que a invasão de *I. bicolor* na região pode ter seguido uma dinâmica não linear, possivelmente associada a processos ecológicos característicos de invasões do tipo boom–bust.

De forma mais ampla, esses resultados reforçam que invasões marinhas aparentemente bem-sucedidas nem sempre resultam em estabelecimento permanente, destacando a importância de monitoramentos ecológicos de longo prazo para compreender a persistência real de espécies invasoras em ambientes naturais. Estudos futuros que integrem séries temporais mais longas, múltiplos sítios de amostragem e diferentes abordagens metodológicas serão fundamentais para avaliar a estabilidade populacional de *I. bicolor* na região e compreender os fatores ambientais e demográficos que regulam sua ocorrência em costões rochosos do Atlântico Sudoeste.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Observatório Oceanográfico da Universidade Federal Fluminense (UFF) e à Universidade de Lagos (UNILAGOS) pelo apoio institucional e logístico que contribuíram para o desenvolvimento deste estudo. Reconhecemos também todos que colaboraram de forma indireta para a construção teórica e para as conclusões alcançadas neste trabalho.

Este estudo não contou com financiamento externo. Todos os custos relacionados à realização da pesquisa, incluindo trabalho de campo, análises e redação, foram integralmente arcados pelos próprios autores.

REFERÊNCIAS

- Agliari, A., Naimzada, A., & Pecora, N. 2018. Boom-bust dynamics in a stock market participation model with heterogeneous traders. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 91, 458–468. DOI: 10.1016/j.jedc.2018.04.007
- Albuquerque, A. L. S., Belém, A. L., Portilho-Ramos, R. C., Mendoza, U., & Barbosa, C. F. 2012. Projeto Ressurgência: Processos geoquímicos e oceanográficos no limite entre as bacias de Campos e Santos. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 20(1–2), 193–210.

- Albuquerque, A. L. S., Belem, A. L., Zuluaga, F. J. B., Cordeiro, L. G. M., Mendoza, U., Knoppers, B. A., Gurgel, M. H. C., Meyers, P. A., & Capilla, R. 2014. Particle fluxes and bulk geochemical characterization of the Cabo Frio upwelling system in Southeastern Brazil: Sediment trap experiments between spring 2010 and summer 2012. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 86(2), 601–620. DOI: 10.1590/0001-37652014107212
- Amaral, V. S. do, Simone, L. R. L., Tâmega, F. T. de S., Barbieri, E., Calazans, S. H., Coutinho, R., & Spotorno-Oliveira, P. 2019. New records of the non-indigenous oyster *Saccostrea cucullata* (Bivalvia: Ostreidae) from the southeast and south Brazilian coast. *Regional Studies in Marine Science*, 31, 100924. DOI: 10.1016/j.rsma.2019.100924
- Angelidis, A., Polyzoulis, G., & Gubili, C. 2024. Tropical Isognomonids in the Mediterranean Sea: When the West Atlantic met the Indo-Pacific region in the South Aegean Sea. *Thalassas: An International Journal of Marine Sciences*, 40(3), 1445–1459. DOI: 10.1007/s41208-024-00752-9
- Belem, A. L., Castelao, R. M., & Albuquerque, A. L. 2013. Controls of subsurface temperature variability in a western boundary upwelling system. *Geophysical Research Letters*, 40(7), 1362–1366. DOI: 10.1002/grl.50297
- Beltrão, M. C., Cunha, N. J. R. da, Oliveira Laaf, Y. de, Diehl, F. L., & Santos, T. D. dos. 2024. Molecular methods confirm the first report of the non-indigenous *Perna viridis* Linnaeus, 1758 (Mytilida, Mytilidae) in southern Brazil. *Check List*, 20(4), 859–867. DOI: 10.15560/20.4.859
- Breves-Ramos, A., Junqueira, A. O. R., Lavrado, H. P., Silva, S. H. G., & Ferreira-Silva, M. A. G. 2010. Population structure of the invasive bivalve *Isognomon bicolor* on rocky shores of Rio de Janeiro State (Brazil). *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 90(3), 453–459. DOI: 10.1017/S0025315409990919
- Burke, E., Goldstein, J., Gutzler, B., & Furey, N. 2025. Meter-scale movements of the invasive European green crab *Carcinus maenas* measured with acoustic telemetry in a Gulf of Maine estuary. *Marine Ecology Progress Series*, 763, 41–64. DOI: 10.3354/meps

- Carbonel, C. 1998. Modelling of upwelling in the coastal area of Cabo Frio (Rio de Janeiro-Brazil). *Revista Brasileira de Oceanografia*, 46(1), 1–17. DOI: 10.1590/S1413-77391998000100001
- Carlton, J. T. 2001. Introduced species in U.S. coastal waters: environmental impacts and management priorities. Arlington, VA: Pew Oceans Commission.
- Carlton, J. T., & Geller, J. B. 1993. Ecological roulette: the global transport of nonindigenous marine organisms. *Science*, 261(5117), 78–82. DOI: 10.1126/science.261.5117.78
- Castelao, R. M., & Barth, J. A. 2006. Upwelling around Cabo Frio, Brazil: The importance of wind stress curl. *Geophysical Research Letters*, 33(3), L03602. DOI: 10.1029/2005GL025182
- Creed, J. C., & Oliveira, A. E. S. 2008. *Isognomon bicolor* (C.B. Adams, 1845): Distribution extension on the Brazilian coast. *Check List*, 4(4), 386–388. DOI: 10.15560/4.4.386
- Dias, I. da C. 2023. O bivalve invasor *Isognomon bicolor* (C. B. Adams, 1845) em um costão rochoso de Arraial do Cabo-RJ. Master dissertation. Universidade Federal Fluminense. Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.12083/1229>
- Domaneschi, O., & Martins, C. M. 2002. *Isognomon bicolor* (C. B. Adams) (Bivalvia, Isognomonidae): primeiro registro para o Brasil, redescrição da espécie e considerações sobre a ocorrência e distribuição de *Isognomon* na costa brasileira. *Revista Brasileira de Zoologia*, 19(2), 611–627. DOI: 10.1590/S0101-81752002000200017
- Fernandes, F., Rapagnã, L., & Bueno, G. 2004. Estudo da população do bivalve exótico *Isognomon bicolor* (C. B. Adams, 1845) (Bivalvia, Isognomonidae) na Ponta da Fortaleza em Arraial do Cabo-RJ. In: *Água de lastro e bioinvasão*. pp. 133–141.
- Ferreira, C., Junqueira, A., Villac, M. C., & Lopes, R. 2008. Marine bioinvasions in the Brazilian coast: brief report on history of events, vectors, ecology, impacts and management of non-indigenous species. In: G. Rilov & J. A. Crooks (Eds.), *Biological invasions in marine ecosystems*. pp. 459–477. Berlin: Springer. DOI: 10.1007/978-3-540-79236-9_27

- Gatì, I. A., Ragusa, M., D'Alessandro, M., Giacobbe, S., & Esposito, V. 2024. Massive settlements of the alien oyster *Isognomon bicolor*, rapidly spreading in Mediterranean. *Biologia Marina Mediterranea*, 28(1), 156–159.
- Granthom-Costa, L. V., Messano, L. V. R. de, Altvater, L., Spotorno, P., & Coutinho, R. 2025. Non-native marine sessile benthic species from the coastal upwelling ecosystem of Arraial do Cabo, Brazil. *Aquatic Invasions*, 20(2), 181–198. DOI: 10.3391/ai.2025.20.2.147751
- Havel, J. E., Kovalenko, K. E., Thomaz, S. M., Amalfitano, S., & Kats, L. B. 2015. Aquatic invasive species: challenges for the future. *Hydrobiologia*, 750(1), 147–170. DOI: 10.1007/s10750-014-2166-0
- Koblischek, M. 2012. Resiliência da Resex-Mar Arraial do Cabo/RJ, Brasil, com ênfase na pesca artesanal. In: L. P. C. Rogério Valle (Ed.), pp. 27–27.
- López, M. S., Lavrado, H. P., & Coutinho, R. 2014. Structure of intertidal sessile communities before and after the invasion of *Isognomon bicolor* (C. B. Adams, 1845) (Bivalvia, Isognomonidae) in southeastern Brazil. *Aquatic Invasions*, 9(4), 443–455. DOI: 10.3391/ai.2014.9.4.04
- Pech, D., Condal, A., Bourget, E., & Ardisson, P.-L. 2004. Abundance estimation of rocky shore invertebrates at small spatial scale by high-resolution digital photography and digital image analysis. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 299(2), 185–199. DOI: 10.1016/j.jembe.2003.08.017
- Quintanilha, D. B. 2017. Estudo da população de *Brachidontes exustus* (Linné, 1758) (Bivalvia, Mytilidae) em um costão rochoso na desembocadura de um canal na Praia do Pontal, em Arraial do Cabo-RJ. Master dissertation. Universidade Federal Fluminense. Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.12083/673>
- Rapagnã, L. 2004. Estudo da estrutura das populações dos bivalves *Isognomon bicolor* (C. B. Adams, 1845), *Perna perna* (Linnaeus, 1758) e *Pinctada imbricata* (Röding, 1798) nos costões rochosos de Arraial do Cabo, RJ, Brasil. Master dissertation. Universidade Federal Fluminense.

- Rapagnã, L., Azeredo Rapagnã, J. P. de, Correa, R. D., Oliveira, G. B. de, Souza, T. C. de, Corrêa, T. D., Kron-Rodrigues, M. R., Silva Marques, G. da, França, J. F., 2025a. Multiplicadores em educação ambiental: uma experiência com a trilha interpretativa marinha na Praia do Forno (Arraial do Cabo, Rio de Janeiro). *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, 13.
- Rapagnã, L., Azeredo Rapagnã, J. P. de, Correa, R. D., Oliveira, T. C. de, Oliveira, G. B. de, Silva Marques, G. da, Santos, J. C. Q. P. dos, Carvalho, A. P. de A. M., Corrêa, T. D., & França, J. F. 2025b. Estratégias morfológicas e ocupação ecológica de bivalves em costões rochosos de Arraial do Cabo-RJ. *RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar*, 6, e6106864. DOI: 10.47820/recima21.v6i10.6864
- Sabino, C. M., & Villaça, R. 1999. Estudo comparativo de métodos de amostragem de comunidades de costão. *Revista Brasileira de Biologia*, 59(3), 407–419. DOI: 10.1590/S0034-71081999000300005
- Sanders, C. J., Caldeira, P. P., Smoak, J. M., Ketterer, M. E., Belem, A., Mendoza, U. M. N., Cordeiro, L. G. M. S., Silva-Filho, E. V., Patchineelam, S. R., & Albuquerque, A. L. S. 2014. Recent organic carbon accumulation (~100 years) along the Cabo Frio, Brazil upwelling region. *Continental Shelf Research*, 75, 68–75. DOI: 10.1016/j.csr.2013.10.009
- Silva, C. A. R. e., Godoy Fernandes, L. V. de, Souza, F. E. S. de, Marotta, H., Costa Fernandes, F. da, Mello, T. M. S., Monteiro, N. S. C., Rocha, A. A., Coutinho, R., Almeida Fernandes, L. D. de, Damasceno, R. N., & Santos, L. C. dos. 2023. Carbonate system in the Cabo Frio upwelling. *Scientific Reports*, 13(1), 5292. DOI: 10.1038/s41598-023-31479-x
- Souza, Á. P. S. L., Souza Filho, B. C. de, Sovierzoski, H. H., & Vital, M. V. C. 2025. Influence of *Isognomon bicolor*'s invasion on the structure of native bentonic communities. *Marine Ecology*, 46(5), e70052. DOI: 10.1111/maec.70052
- Souza, R. C. C. L. de, Calazans, S. H., & Silva, E. P. 2009. Impacto das espécies invasoras no ambiente aquático. *Ciência e Cultura*, 61(1), 35–41.
- Strayer, D. L., D'Antonio, C. M., Essl, F., Fowler, M. S., Geist, J., Hilt, S., Jarić, I., Jöhnk, K., Jones, C. G., & Lambin, X. 2017. Boom-bust dynamics in biological invasions: towards an

improved application of the concept. *Ecology Letters*, 20(10), 1337–1350. DOI: 10.1111/ele.12822

Thomaz, S. M., Kovalenko, K. E., Havel, J. E., & Kats, L. B. 2015. Aquatic invasive species: general trends in the literature and introduction to the special issue. *Hydrobiologia*, 746(1), 1–12. DOI: 10.1007/s10750-014-2150-8

Venancio, I. M., Gomes, V. P., Belem, A. L., & Albuquerque, A. L. S. 2016. Surface-to-subsurface temperature variations during the last century in a western boundary upwelling system (Southeastern Brazil). *Continental Shelf Research*, 125, 97–106. DOI: 10.1016/j.csr.2016.07.003

Submitted: 19 December 2025

Accepted: 24 April 2026

Published: 19 May 2026

Associate Editor: Sr. Marciel Elio Rodrigues