

MODULAÇÃO HIDRODINÂMICA DO SINAL TÉRMICO INTERMAREAL E SUA INFLUÊNCIA NA VARIABILIDADE DO NH_4^+ E NANO-FITOPLANCTÔN NO COMPLEXO ESTUARINO MACROMAREAL DO MARANHÃO

Sebastián Loyola^{1,2}, Claudia Klose Parise¹, Sandra Guevara^{1,2}

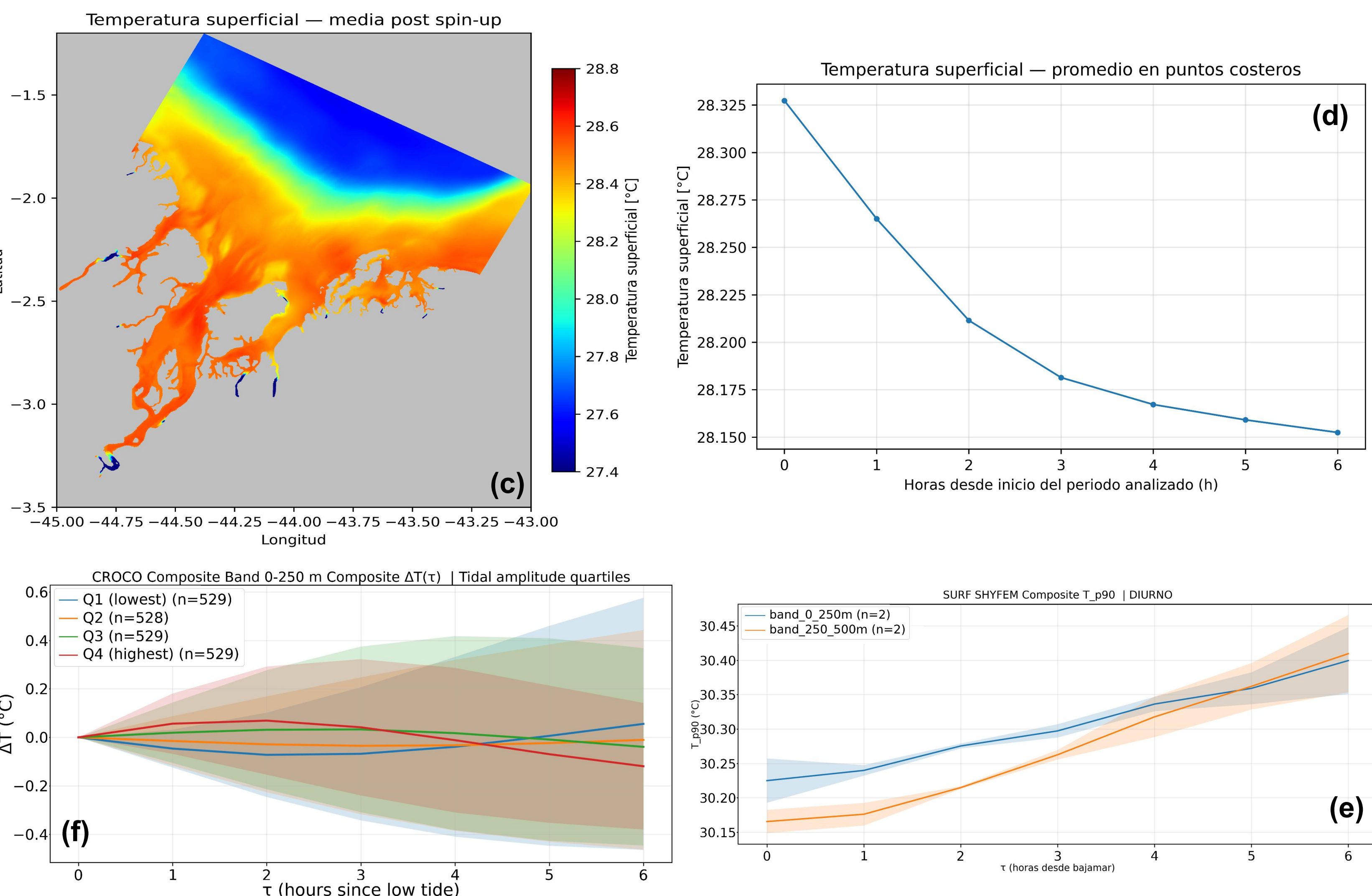
¹ Laboratório de Estudos e Modelagem Climática (LACLIMA), Universidade Federal do Maranhão, Brasil.

² Centro de Investigación Oceanográfica COPAS Coastal, Universidad de Concepción, Departamento de Oceanografía, Chile.

e-mail: sebastianloyola@oceanografia.udec.cl

Introdução

Sistemas costeiros tropicais dominados por hipermarés (>4m), como o Golfão Maranhense (Czizewski et al., 2020), geram extensas zonas intermareais sujeitas a ciclos bastante regulares de exposição e inundação (Dipper, 2022). No estofo da baixa-mar, especialmente em marés de sizígia e equinociais, a exposição do ambiente intermareal à incidência direta de radiação solar é ainda maior. Esse processo promove o acúmulo de calor na superfície sedimentar exposta, podendo ser transferido às águas costeiras durante a enchente da maré. Alguns efeitos do estresse térmico em organismos intermareais são reconhecidos (Helmuth et al., 2006), mas o papel da hidrodinâmica costeira é ainda pouco compreendido. Este estudo investiga como o sinal térmico intermareal, mediado por processos hidrodinâmicos, influencia a temperatura da água costeira e a variabilidade da biogeoquímica.



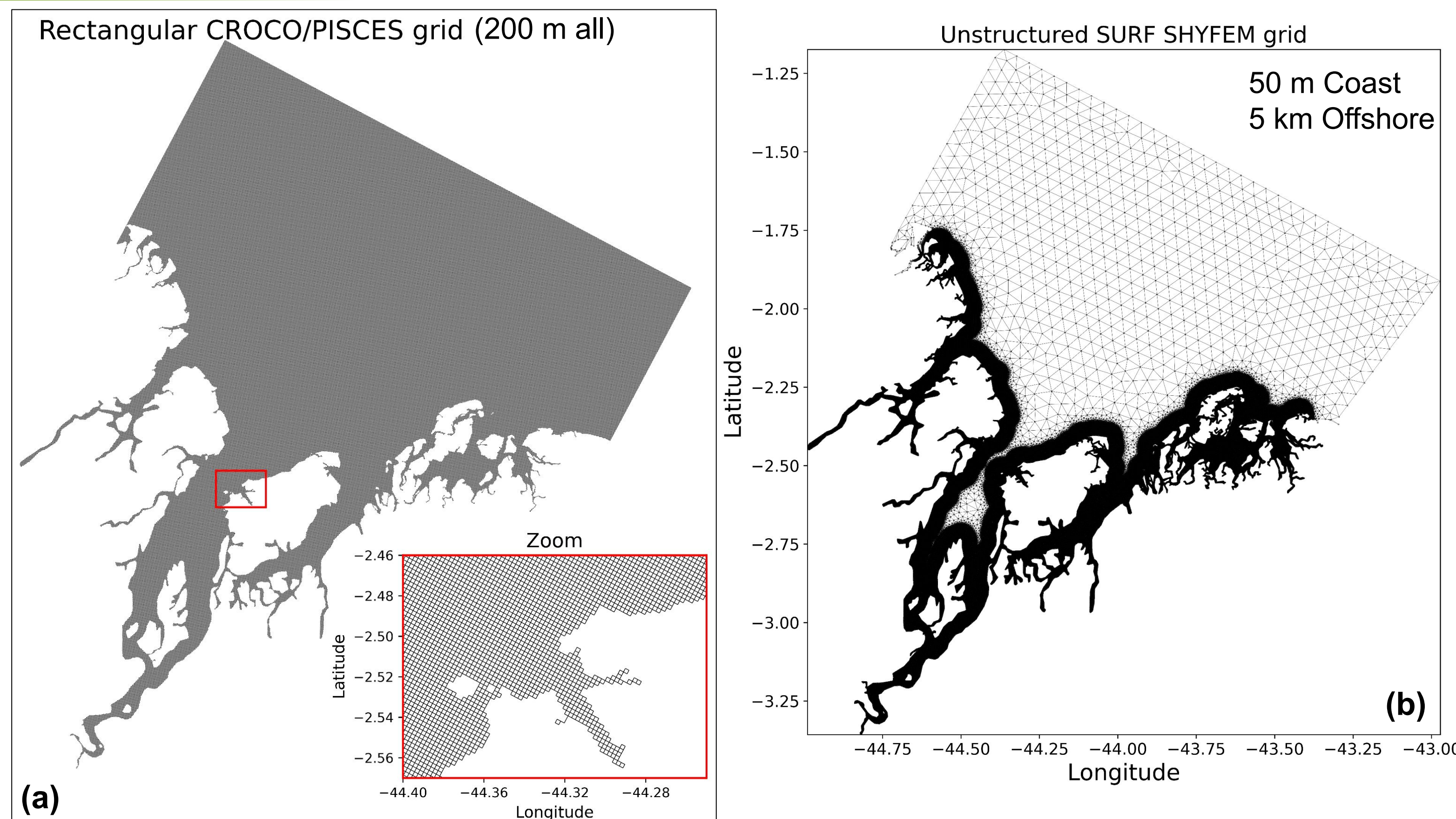
Resultados e Discussão

Os resultados encontrados neste estudo evidenciam uma modulação significativa da temperatura da água (Fig.c) costeira associada à dinâmica de marés no litoral maranhense, principalmente associada à linha da costa. Observa-se que os máximos de temperatura da água costeira ocorrem preferencialmente nas fases iniciais da enchente (Fig.d), especificamente nas primeiras 3-4 horas após o início do fluxo da maré, indicando a persistência de anomalias térmicas geradas durante a exposição intermareal (Fig.f). Esse efeito é mais pronunciado na faixa costeira mais próxima de 0 a 250 m perpendicular à linha da costa (Fig.e), onde a menor profundidade, e a reduzida difusão (ou mistura) vertical favorecem a retenção de calor e amplificam o sinal térmico observado. Análises compostas mostram um aumento progressivo da temperatura da água costeira desde o estofo da baixa-mar até o estofo da preamar, com gradientes mais intensos próximos à costa, com uma tendência de homogeneização nas faixas mais distantes. A comparação entre as faixas costeiras avaliadas neste estudo revela uma atenuação do sinal térmico em direção ao oceano aberto, sugerindo forte controle dos processos difusivos e advectivos na redistribuição de calor nessa área, além da possível influência do aquecimento do sedimento superficial exposto à atmosfera que transfere calor por condução para as massas de águas entrantes. As simulações acopladas hidrodinâmica-biogeoquímica mostraram que, além da resposta hidrodinâmica, existem variações na concentração de amônio (Fig.g) e nano-fitoplâncton (Fig.i) que têm correspondência temporal com as anomalias térmicas, indicando uma resposta de curto prazo do ecossistema associada ao sinal térmico intermareal (Fig.h,j). Esses resultados demonstram que o sinal térmico intermareal pode ser tanto advectado para o ambiente costeiro quanto dissipado por processos de mistura turbulenta, ambos processos influenciando temporariamente a estrutura térmica e ecológica do sistema.

Conclusão

Os resultados preliminares sugerem que o sinal térmico gerado no sedimento na zona intermareal influencia diretamente a dinâmica térmica das águas costeiras adjacentes por meio de processos hidrodinâmicos associados ao ciclo de maré. Foi evidenciada a persistência temporal e a propagação espacial de anomalias térmicas, mais intensas nas áreas rasas próximas à costa, além de sua relação com a variabilidade de curto prazo do NH_4^+ e biomassa nano-fitoplanctônica. A abordagem multiescala adotada permitiu representar tanto a variabilidade regional quanto os processos locais de alta resolução, fundamentais para compreender os mecanismos de advecção e mistura responsáveis pela redistribuição de calor na coluna d'água. Os padrões identificados sugerem que a zona intermareal atua como um reservatório térmico temporário, liberando calor para o ambiente durante os ciclos de maré. Esses resultados ajudam a ampliar a compreensão dos acoplamentos físico-biogeoquímicos em sistemas macromareais tropicais e fornecem subsídios para investigações futuras sobre sensibilidade climática e respostas ecossistêmicas costeiras.

Fontes de Apoio: 1) COAWST-MA: Desenvolvimento de um sistema acoplado de modelagem oceano-atmosfera-ondas em domínios aninhados sobre a Plataforma Continental do Maranhão – Golfão Maranhense – Baía de São Marcos (FAPEMA APP-09269/22); 2) PowerMEB: Estimativa do potencial de geração de energia de marés e ondas ao longo da Margem Equatorial Brasileira (CNPq FNDCT 444013/2024-5). 3) Apoio adicional de bolsas de Produtividade em Pesquisa: C.K.P. (Processo FAPEMA PQ-C-12646/25); 4) COPAS Coastal ANID FB210021.



Metodologia

Foi implementado um sistema de modelagem de altíssima resolução para o Golfão Maranhense, combinando o modelo regional CROCO (resolução ~200 m; Fig.a) acoplado ao modelo biogeoquímico PISCES, para analisar a dinâmica do amônio (NH_4^+) e sua assimilação pelo nano-fitoplâncton nas células adjacentes à interface terra-mar, comparado com o modelo hidrodinâmico SURF/SHYFEM (Fig.b) em malha não estruturada (resolução de 50 m na linha de costa), voltado a resolver processos de menor escala na zona intermareal. Ambos os modelos compartilharam batimetria GECOC2026, forçantes atmosféricas ERA5, maré TPXO10 e condições de contorno oceânicas do GLORYS12. O análise foi focado em setembro de 2015 por sua baixa nebulosidade, associada ao El Niño, e grande amplitude de maré na sizígia-equinocial do dia 23/09/15. As bandas foram definidas dinamicamente conforme a distância da costa (0-250 m e 250-500 m), com as fases da maré determinadas por previsões astronômicas (PyEphem) e pelo nível do mar simulado em cada modelo, permitindo analisar saídas horárias da temperatura, nano-fitoplâncton e NH_4^+ entre os estofo de baixa-mar e preamar para quantificar o sinal térmico associado à inundação intermareal e à intensificação da mistura vertical.

