

MODELAÇÃO DA CIRCULAÇÃO OCEÂNICA NA REGIÃO DO ARQUIPÉLAGO DE CABO VERDE

Nilton GOMES¹; Lúgia PINTO²; Ramiro NEVES³; Francisco J. CAMPUZANO⁴

RESUMO

Neste trabalho é descrita a implementação e validação de um sistema de modelos desenvolvido para estudar a maré e a circulação baroclínica na região do Arquipélago de Cabo Verde. Este sistema é baseado no modelo numérico MOHID e é constituído por um modelo bidimensional (2D), para simular a propagação da maré, e três modelos tridimensionais (3D) para estudar o escoamento baroclínico na região do Arquipélago de Cabo Verde. O modelo 2D, com uma resolução horizontal de 6 km, é forçado na fronteira aberta pelo modelo global de maré FES2004. O modelo 3D, com uma resolução horizontal de 6 km e 50 camadas na vertical, recebe as condições fronteira de nível obtidas pelo modelo 2D e os perfis de velocidade, temperatura e salinidade do modelo MyOcean. Este modelo tem ainda dois modelos 3D encaixados com uma resolução horizontal de 3 km.

Os resultados da circulação oceânica obtidos com o modelo foram comparados com os padrões de circulação característicos da zona em estudo. A temperatura da superfície do mar obtida com o modelo foi validada utilizando imagens de satélite e os resultados da temperatura e salinidade ao longo da coluna de água foram comparados com os perfis verticais obtidos pelas bóias Argo e com os resultados do modelo MyOcean. O modelo reproduz o padrão de circulação conhecido para a região em estudo, sendo possível identificar nos resultados as duas principais correntes marítimas, a corrente fria das Canárias e a corrente norte Equatorial. Através da análise dos diagramas T-S é possível identificar as duas principais massas de água que circulam na região, a Água Central do Atlântico norte e a Água Profunda do Atlântico norte. Os resultados do modelo mostram também que o vento tem influência sobre o escoamento à superfície.

Palavras-chave: Cabo Verde, modelação hidrodinâmica, maré, vento, modelo MOHID

¹ Mestre e Estagiário; Ministério do Ambiente, Habitação e Ordenamento do Território - Direção Nacional do Ambiente; Achada Santo António, C.P - 332-a, Praia, República de Cabo Verde; nilton.gomes@ist.utl.pt.

² Doutora e investigadora; MARETEC – Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa; Rua Rovisco Pais 1, 1049-001 Lisboa, Portugal; ligia.pinto@tecnico.ulisboa.pt, Telefone: +351 218419433.

³ Doutor e Professor Associado; MARETEC - Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa; Rua Rovisco Pais 1, 1049-001 Lisboa, Portugal; ramiro.neves@tecnico.ulisboa.pt, Telefone: +351 21 841 7397.

⁴ Mestre e investigador; MARETEC – Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa; Rua Rovisco Pais 1, 1049-001 Lisboa, Portugal; campuzanofj.maretec@tecnico.ulisboa.pt, Telefone: +351 21 84 19429.

1. INTRODUÇÃO

O arquipélago de Cabo Verde está localizado no Oceano Atlântico na costa ocidental africana e é constituído por dez ilhas. É um país com fraca pluviosidade tendo uma estação chuvosa muito irregular de cerca de três meses, entre Agosto e Outubro. A estação mais seca tem uma duração de 9 meses, de Dezembro a Julho, e é conhecida pela sua constante bruma seca proveniente do Saara. A sua posição geográfica permitiu que desde a sua descoberta, em 1460 por Diogo Gomes ao serviço da coroa portuguesa (Barcellos, 1908), o arquipélago fosse usado como base de apoio logístico das rotas de navegação do Atlântico. Para além dos portos, importantes para o comércio, o país também possui praias que são uma atração para o turismo. O comércio e o turismo são por isto os principais fatores que servem de alavanca para a economia do país e por conseguinte o mar é um recurso indispensável para o seu desenvolvimento económico.

O desenvolvimento sustentável desta região deve por conseguinte ser apoiado no conhecimento profundo da circulação oceânica à escala regional e à escala das zonas costeiras de cada uma das ilhas. As observações marítimas são no entanto escassas, principalmente em águas profundas. Os estudos de modelação existentes são baseados em modelos de larga escala validados com as observações globais de escala global (Aumont *et al.*, 1998). Um dos modelos de larga escala utilizado em estudos de oceanografia no arquipélago de Cabo Verde é o Mercator global Ocean, cujos resultados são fornecidos através de um sistema de previsão oceânica operacional de âmbito internacional (MyOcean, produto GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHYS_001_002). Os resultados dos modelos de grande escala são no entanto ferramentas essenciais para forçar modelos de escala local, os quais poderão fornecer dados importantes para o dimensionamento de obras costeiras e para a gestão de descargas de origem antropogénica (DGA, 2004).

2. OBJECTIVO

O presente trabalho tem como objetivo implementar na região do Arquipélago de Cabo Verde um sistema de modelos, baseado no modelo numérico MOHID (Neves, 2013), para simular a circulação oceânica à escala do Arquipélago e à escala das Ilhas (ilha do Sal, Boavista, Maio e Santiago) e também efetuar a validação desses modelos. O sistema de modelos implementado é constituído por 4 modelos encaixados, um bidimensional (2D) e três tridimensionais (3D).

O modelo hidrodinâmico bidimensional (2D), simula a propagação da maré no Arquipélago de Cabo Verde, foi utilizado no presente estudo para avaliar o papel do vento nos padrões de circulação local. Os resultados dos modelos 3D para além de fornecerem informação da maré também fornecem informação da circulação das correntes, da temperatura e salinidade ao longo da coluna de água. A configuração 3D possibilita fazer uma análise mais elaborada sobre a influência do vento na circulação das correntes marítimas superficiais e obter a perceção da distribuição da temperatura e salinidade na superfície do mar e ao longo da coluna de água.

O modelo calibrado e validado é uma ferramenta de suporte a estudos de monitorização, previsão da maré, gestão de exploração dos recursos marinhos, na perspetiva da sua

proteção ou da segurança dos agentes que promovem a sua exploração. A utilização dos resultados dos modelos permite também colmatar a escassez de dados.

3. METODOLOGIA

A implementação do modelo hidrodinâmico MOHID *Water Modelling System* para a região do arquipélago de Cabo Verde foi efetuada em duas etapas: na primeira foi implementado o modelo 2D para simular a propagação da maré na região e na segunda etapa foi implementado o modelo tridimensional, utilizando a metodologia de *downscaling* (Campuzano *et al.*, 2013) que consiste na simulação da hidrodinâmica na escala local com base em resultados de modelos de maior escala. A estrutura implementada utiliza modelos encaixados aqui designados por “níveis”.

Após a escolha do domínio de simulação foi criada a batimetria correspondente aos domínios de cálculo encaixados, nível 0 (retângulo vermelho na Figura 1), nível 1 (retângulo verde na Figura 1) e nível 2 (retângulos azuis na Figura 1). As batimetrias foram interpoladas dos dados disponíveis na base de dados da NASA SRTM 30 (*Shuttle Radar Topography Mission*) com uma resolução espacial de 30 segundos e a linha de costa foi obtida na base de dados do NGDC (*National Geophysical Data Center*) da Agência NOAA (*National Oceanic and Atmosphere Administration*).

O modelo de maior escala (nível 0) é um modelo 2D que envolve uma área com cerca de 1 000 000 km², com uma resolução horizontal de 6 km. O modelo nível 1 é um modelo encaixado, 3D, com uma resolução horizontal de 6 km e na vertical com 50 camadas (7 camadas sigma junto à superfície e 43 camadas cartesianas até ao fundo) e abrange uma área de cerca de 444 000 km². Os modelos encaixados de nível 2, com uma resolução horizontal de 3 km e com 50 camadas verticais, cobrem duas áreas: uma de 18 000 km², para a região da Ilha do Sal e Boavista, e outro da ordem de 14 000 km², para a região das ilhas de Santiago e Maio.

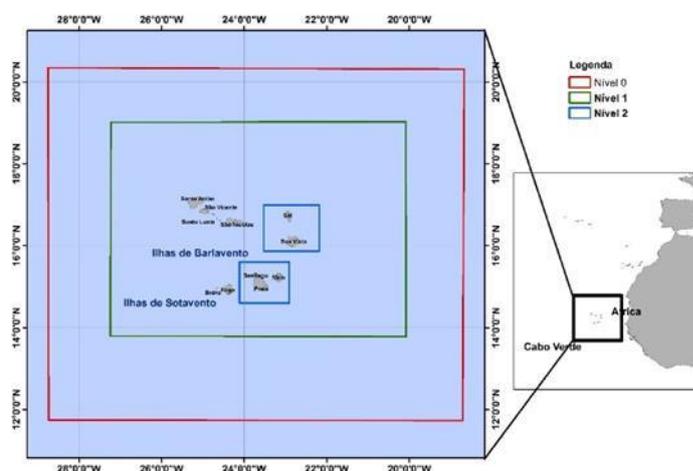


Figura 1. Representação dos domínios dos modelos de nível 0, nível 1 e nível 2

Para a visualização dos resultados do modelo baroclínico foram feitos cortes longitudinais verticais até aos 200 metros em três secções (Figura 2). A localização das secções foi escolhida considerando as duas principais correntes oceânicas que circulam na região, a corrente fria das Canárias no norte do arquipélago, a corrente Norte Equatorial do lado sul do arquipélago e as correntes no interior do arquipélago (Ilha do Sal). Nos 4 pontos (NO, NE, SO e SE) apresentados na Figura 2 foram extraídos os resultados de temperatura e salinidade do modelo ao longo da coluna de água.

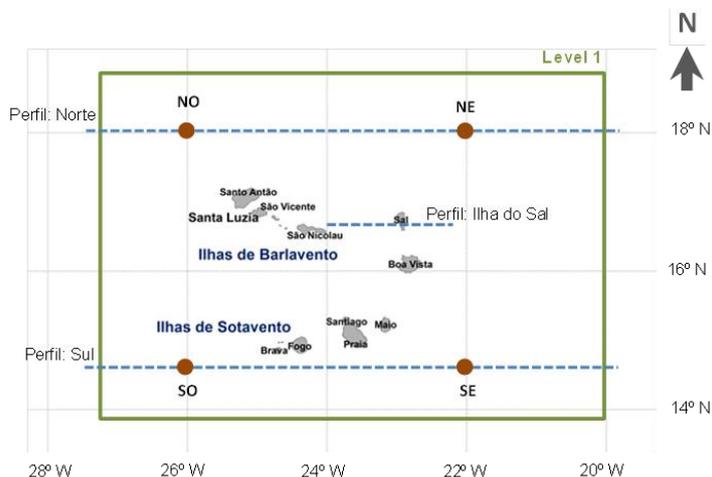


Figura 2. Localização das secções (perfil norte e perfil sul) para visualização dos resultados do modelo hidrodinâmico baroclínico e localização dos quatro pontos (NO, NE, SO, SE) para análise dos resultados dos perfis verticais.

4. ÁREA DE ESTUDO

O arquipélago de Cabo Verde (Figura 1) está localizado no Oceano Atlântico, na região subtropical, a oeste da costa Africana, entre 17°12'15" N e 14°48'00" N e 22°39' 20" W e 25°20 '00" W. O arquipélago inclui dez ilhas, nove das quais habitadas e vários ilhéus desabitados, divididos em dois grupos: as Ilhas de Barlavento no norte e as Ilhas de Sotavento no sul. As Ilhas de Barlavento incluem as ilhas de Santo Antão, São Vicente, Santa Luzia (ilha desabitada), São Nicolau, Sal e Boavista. As ilhas de Sotavento incluem as ilhas de Maio, Santiago, Fogo e Brava.

O arquipélago de Cabo Verde está situado na zona sub-saheliana sendo o clima do tipo subtropical seco. A estação chuvosa ocorre entre os meses de Julho a Outubro, com concentração de precipitação entre os meses de Agosto e Setembro, período durante o qual ocorre 60% e 80% da precipitação total (DGA, 2004). No arquipélago o clima é caracterizado por uma estação seca e fresca de Dezembro a Março, uma estação de transição de Abril a Maio e uma estação quente e húmida de Julho a Novembro. A temperatura média do ar varia entre 22°C e 27°C nas estações frias e quente respetivamente, com uma amplitude diária que raramente excede os 10°C (INDP, 2011).

As condições meteorológicas, na região de Cabo Verde, são dominadas pelos ventos alísios de nordeste que ocorrem ao longo do ano. Além dos ventos alísios ocorrem também dois tipos de ventos, os ventos de harmatão - vento quente e seco proveniente do Saara, que sopra da direção nordeste a leste, de Dezembro a Fevereiro em toda a África Ocidental

(Schwanghart e Schütt, 2008), e uma corrente de ar quente e húmida, com direção sudoeste, que inicia a época da chuva. Também existem ventos locais devido a eventuais diferenças de pressão.

O mar de Cabo Verde é conhecido por ser relativamente calmo, com pouca ondulação e com uma amplitude de maré de aproximadamente 1 m (Custódio *et al.*, 2005). Na região de Cabo Verde a temperatura da superfície do mar varia entre 21 e 22 °C na época fria (de Dezembro a Junho) e na época quente (de Julho a Novembro) varia entre 23 a 27 °C (DGA, 2004). Na região sul do arquipélago a temperatura da superfície do mar tende a ser superior devido à influência da contracorrente equatorial e na região norte tende a ser inferior devido à corrente fria das Canárias. A estratificação da temperatura na coluna de água é máxima nos primeiros 100 m. A camada de mistura tem uma espessura que varia entre 25 a 40 m e uma temperatura média de 25°C. A termoclina inicia-se a partir desta profundidade com uma taxa de variação térmica de 0.1 °C/m até aos 100 m de profundidade onde pode atingir valores entre 15 a 16° C. Aos 500 m de profundidade a temperatura da água do mar desce para cerca de 10 °C e aos 1000 m para cerca de 6 °C (Varela *et al.*, 2011; Monteiro *et al.*, 1997).

Segundo estudos anteriores (DGA, 2004), a região caracteriza-se pela presença de duas massas de águas superficiais: a primeira, até 150 a 200 m de profundidade, proveniente do Atlântico norte e com salinidade superiores a 36 e a segunda proveniente do Atlântico sul caracterizada por uma menor salinidade. Entre os 200 a 600 m de profundidade a salinidade é resultante da mistura das duas massas de água provenientes do norte e sul do Oceano Atlântico. Dos 600 aos 1000 m de profundidade encontra-se a massa de água intermédia Antártica e a partir dos 1000 m de profundidade a água profunda do Atlântico norte.

Em termos de circulação das correntes oceânicas, o lado norte do arquipélago de Cabo Verde é influenciado pela corrente fria das Canárias (CC), responsável pelo transporte de água mais fria da camada superior para o interior do arquipélago de Cabo Verde. Com uma velocidade média de 15 cm/s a CC estende-se ao longo da costa norte-ocidental africana nas regiões com profundidade entre 800-1000 m. A CC chega a Cabo Verde com direção sudoeste mas gira para oeste e nordeste, associando-se à Corrente Norte Equatorial (NEC). O lado sul do arquipélago é influenciado pela Corrente Norte Equatorial (NEC) e pela Contra Corrente Norte Equatorial (NECC). A sudoeste do arquipélago de Cabo Verde está localizado o Dome da Guiné (GD), sendo a sua forma de cúpula mais alongada na direção nordeste-sudoeste na época mais quente (Lázaro *et al.*, 2005).

Dependendo da posição da Zona de Convergência Intertropical (ZICT), ocorrem alterações no regime de ventos na área que afetam a circulação superficial até cerca de 200 metros de profundidade (Varela *et al.*, 2011, Monteiro *et al.*, 1997). Na época mais quente, a ZICT encontra-se mais a norte, na latitude 20°N aproximadamente e na época mais fria situa-se mais a sul do arquipélago. A circulação no arquipélago é afetada por estas correntes e pela sua interação com a batimetria, o vento e a circulação atmosférica local. Estes fatores proporcionam uma circulação hidrodinâmica complexa exortada pelas alterações sazonais na circulação oceânica (INDP, 2011).

5. SISTEMA DE MODELOS DO ARQUIPÉLAGO DE CABO VERDE

O sistema de modelos desenvolvido para estudar a maré e a circulação baroclínica na região do Arquipélago de Cabo Verde é baseado no modelo numérico MOHID. O modelo numérico Mohid (www.mohid.com) é um modelo de código aberto desenvolvido no MARETEC (www.maretec.org), um grupo investigação do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa. É um sistema de modelação modular baseado em volumes finitos que permite utilizar malhas verticais cartesianas, sigma ou uma combinação de ambas. A versatilidade da estrutura modular permite que o modelo possa ser utilizado em praticamente qualquer fluxo de superfície livre. O MOHID resolve as equações primitivas incompressíveis tridimensionais assumindo as aproximações hidrostática, de Boussinesq e a de Reynolds.

5.1 Condições de fronteira

Conforme descrito na secção da metodologia, o sistema de modelos encaixados é constituído por um modelo bidimensional (2D), para simular a propagação da maré, e três modelos tridimensionais (3D) para estudar o escoamento baroclínico na região do Arquipélago de Cabo Verde. O modelo 2D é forçado na fronteira aberta pelo modelo global de maré FES 2004 (Lyard *et al.*, 2006). O modelo 3D, com uma resolução horizontal de 6km e 50 camadas na vertical (7 sigma e 43 camadas cartesianas), recebe como condições de fronteira os níveis obtidos pelo modelo 2D e do modelo Mercator global Ocean (MyOcean produto GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHYS_001_002) os perfis de velocidade, temperatura e salinidade. O modelo 3D de nível 1 fornece ainda as condições de fronteira para dois modelos com uma malha horizontal mais refinada - os modelos da região da Ilha do Sal e Boavista e o modelo da região das ilhas de Santiago e Maio. Para a meteorologia foi imposto como condição fronteira os resultados da temperatura do ar, pressão atmosférica, radiação solar, humidade relativa e velocidade do vento do modelo meteorológico GFS (*Global Forecasting System*).

5.2 Validação do sistema de modelos

Os resultados do nível de maré foram comparados com os dados de uma estação maregráfica localizada no porto de Palmeira. Esta validação encontra-se descrita em Nilton *et al.* (2015), pelo que não será objeto do presente artigo.

A validação da temperatura da superfície do mar obtida com o modelo foi efetuada através da comparação dos resultados com imagens de satélite, disponibilizadas pela NASA (www.remss.com/measurements/sea-surface-temperature). A Figura 3 representa um exemplo da validação efetuada, a comparação da temperatura superficial entre os resultados do modelo (MOHID) e as imagens do satélite (*observations*) para o dia 16 de Janeiro de 2013. Para este dia, a comparação mostra que os resultados do modelo e as imagens de satélite têm um coeficiente de correlação de 83,9%, com um enviesamento de 0,062°C e RMSE de 0,469°C, mostrando que os resultados do modelo estão em concordância com as observações. A diferença entre os resultados do modelo e as observações mostra que no nordeste do arquipélago os resultados do modelo são ligeiramente superiores às observações e ligeiramente inferiores no sul (visível no mapa MOHID *minus Observations*).

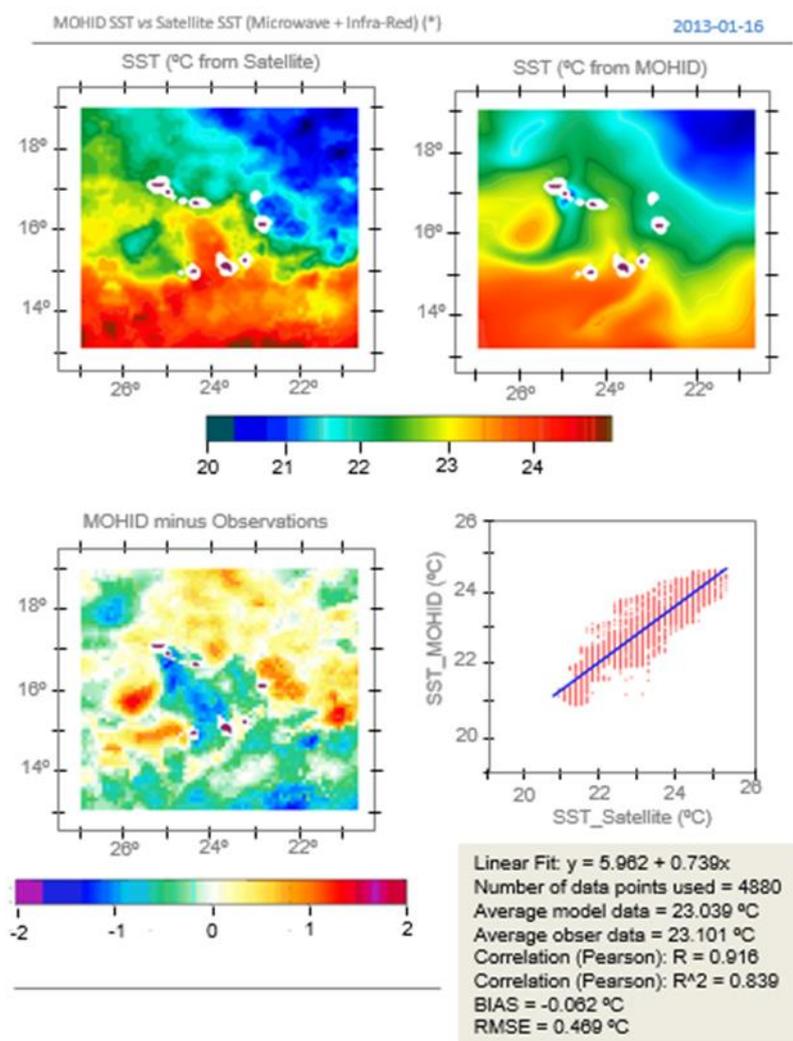


Figura 3. Comparação da temperatura da superfície do mar entre o resultado do modelo 3D e a imagem do satélite do dia 16 de Janeiro de 2013.

Os resultados da temperatura e salinidade ao longo da coluna de água foram comparados com os perfis verticais obtidos pelas bóias Argo (<http://www.argo.ucsd.edu>, <http://argo.jcommops.org>) e com os resultados do modelo MyOcean. No período entre Janeiro e Fevereiro de 2013, no domínio do modelo, estão disponíveis dados de 4 bóias Argo. Na Figura 4 apresenta-se a comparação entre os resultados do modelo e os dados de uma das quatro bóias Argo disponível no período em análise.

A análise dos resultados (Figura 4) mostra que ambos os modelos (MOHID e MyOcean) apresentam excelente concordância com as observações, e que os resultados do modelo MOHID apresentam uma correlação com os dados da bóia Argo de 99,6% em relação à temperatura e de 99,4% para a salinidade. Os resultados do MyOcean apresentam uma correlação de 99,5% para temperatura e 99,3% para a salinidade.

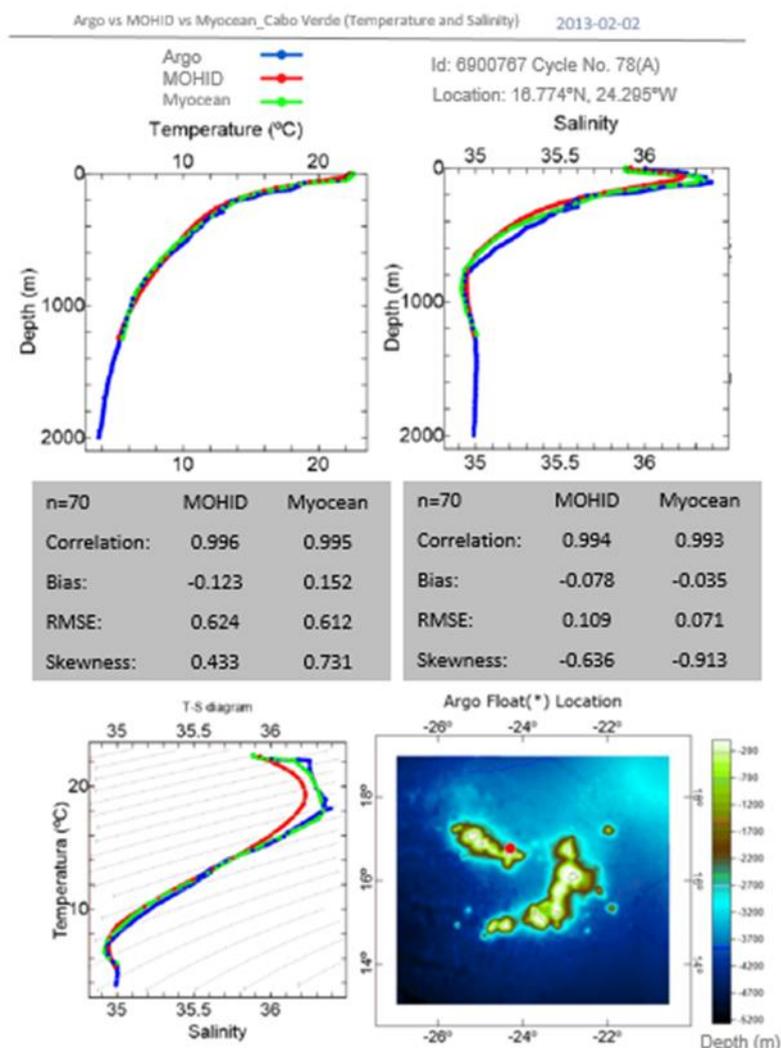


Figura 4. Comparação entre os resultados do modelo hidrodinâmico baroclínico, 3D, com os dados das bóias Argo do dia 02 de Fevereiro de 2013.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta secção serão mostrados resultados do sistema de modelos incluindo a velocidade das correntes à superfície e no fundo, a temperatura e a salinidade ao longo das secções longitudinais (norte, sul da Ilha do Sal) e os perfis de temperatura e salinidade em quatro pontos do domínio. A localização das secções longitudinais e dos quatro pontos encontra-se na Figura 2.

6.1 Velocidade instantânea

Na Figura 5 (a e b) estão representados dois instantes do campo da velocidade superficial obtidos com o modelo para o dia 10 de Fevereiro de 2013, às 12 e 15 horas, respetivamente. Nota-se que para estes instantes, de um modo geral, o fluxo das correntes superficiais têm uma orientação de nordeste - oeste. As ilhas comportam-se como barreiras ao fluxo, induzindo velocidades mais altas nos canais entre as ilhas e sobre os extremos dos grupos de ilhas. As velocidades máximas são da ordem de 50 cm/s nos canais entre a ilha

de São Vicente, Santa Luzia e São Nicolau. Nestes canais estreitos, tendo em conta o corte transversal, a velocidade tende a aumentar por forma a equilibrar a perda de largura e de profundidade. Também existem velocidades elevadas nas regiões a sul e sudoeste do arquipélago, que podem estar relacionadas com a intensidade dos ventos (Figura 6).

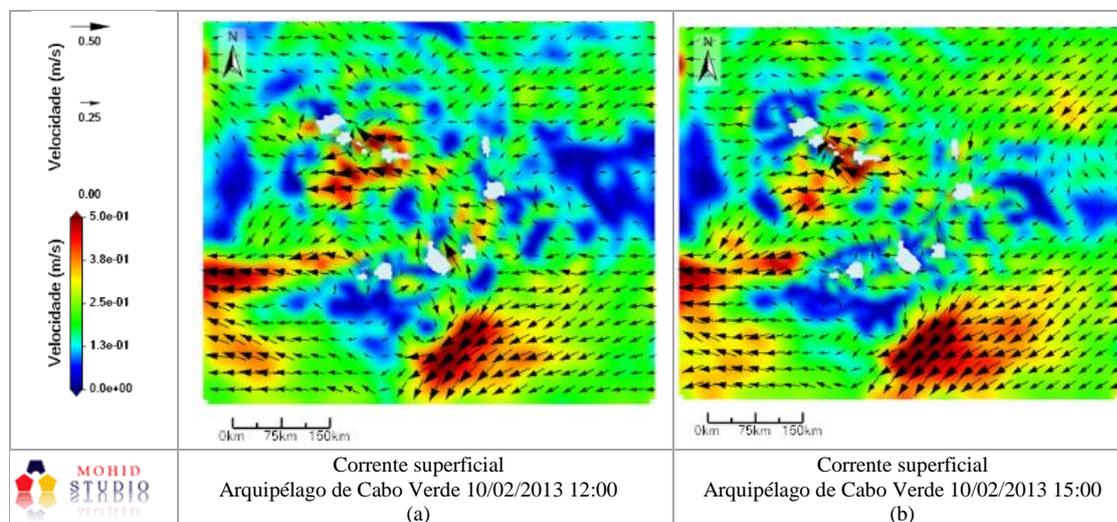


Figura 5. Perfil horizontal da velocidade das correntes superficiais no arquipélago de Cabo Verde no dia 10 de Fevereiro de 2013 às 12 horas (a) e 15 horas (b).

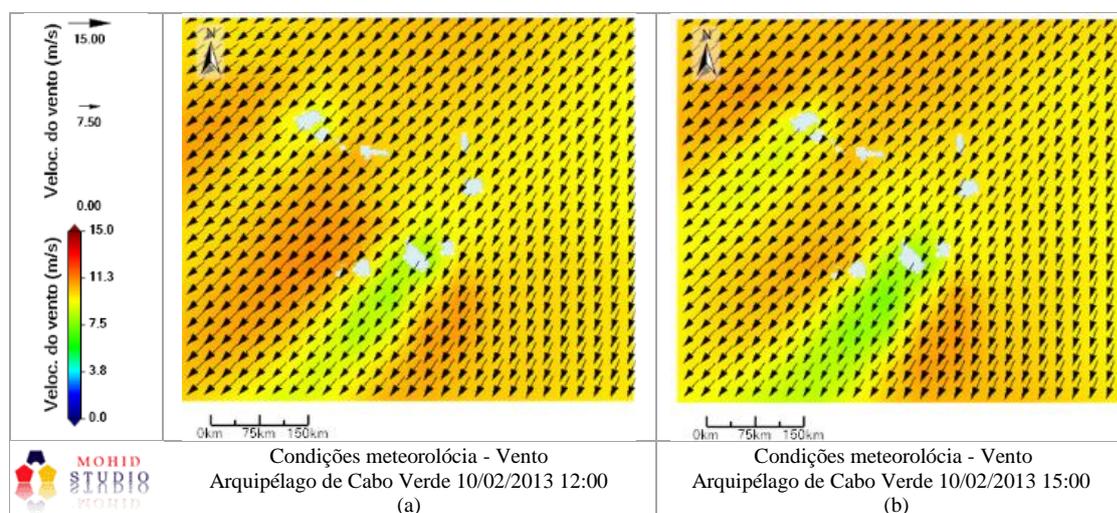


Figura 6. Forçamento meteorológico, vento (vetor e cor) impostas aos modelos nível 2 no dia 10 de Fevereiro de 2013 às 12 horas (a) e 15 horas (b).

A velocidade das correntes ao longo da secção longitudinal, da superfície até aos 200 metros de profundidade, para o dia 10 de Fevereiro às 15 horas está representada na Figura 7a e 7b, para a região norte e sul do arquipélago, respetivamente. As velocidades máximas da corrente observam-se junto à superfície, com uma diminuição da sua intensidade em profundidade, até cerca de 40 metros. As velocidades máximas estão associadas ao efeito do vento na superfície da água, efeito que diminui em profundidade. Observam-se zonas de convergência na direção das correntes na parte este do arquipélago de Cabo Verde, entre os 50 a 200 metros de profundidade (Figura 7).

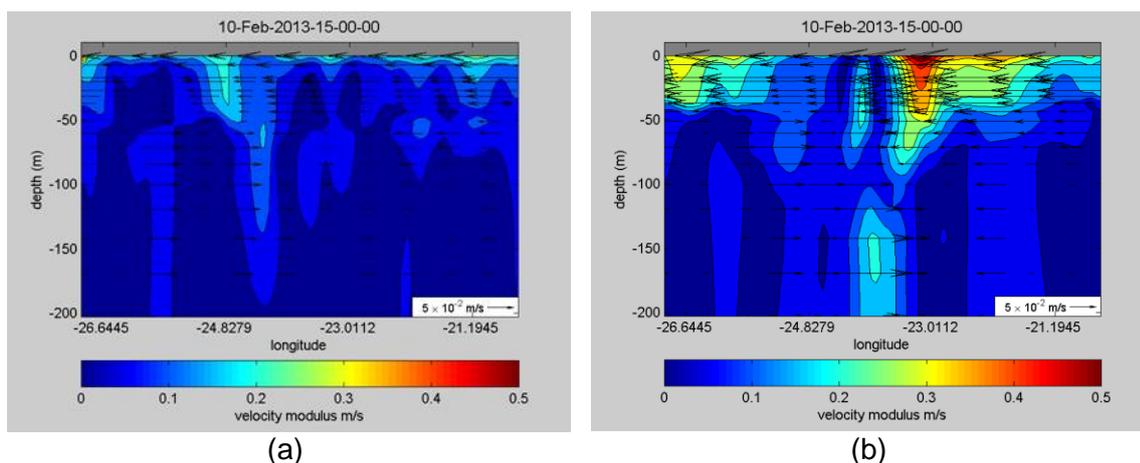


Figura 7. Velocidade das correntes para o dia 10 de Fevereiro na secção longitudinal localizada a: (a) norte do arquipélago; (b) sul do arquipélago.

Os campos de velocidade horizontal (Figura 5) e vertical (Figura 7) mostram que a velocidade, em geral, apresenta uma direcção nordeste-sudeste, coincidente com a direcção do vento predominante na região (vento alísio) mais intenso nesta época do ano. Em suma, a corrente superficial no arquipélago de Cabo Verde pode ser resultante da junção de dois efeitos, o *stress* devido ao vento e o efeito de Coriolis.

6.2 Corrente residual

Os resultados das correntes residuais geradas pelo modelo baroclínico (Figura 8) comprovam os resultados dos campos de velocidade instantânea. No norte do arquipélago é bem visível a presença da corrente fria das Canárias com direcção oeste. No sul do arquipélago nota-se a ocorrência de vórtices resultantes da interação entre a corrente das Canárias, a corrente norte equatorial e o efeito das ilhas (Figura 8). Estes vórtices são resultado do aumento da intensidade da corrente das Canárias que ao atingir o arquipélago de Cabo Verde sofre efeitos hidrodinâmicos complexos (INDP, 2011). Isto origina uma circulação em tubilhão de pequena escala, tanto anticiclónica (Figura 9, Lat. -23.0) em que os vetores de velocidade convergem originando a subsidência da massa de água, como ciclónica (Figura 10) em que os vetores de velocidade divergem perto da costa da ilha do Sal em resultado da ressurgência da massa de água.

Estes mecanismos permitem a mistura das águas superficiais ao longo do arquipélago e tem um papel importante na saída de água da região do arquipélago, predominantemente na direcção oeste. Tal como nos resultados do modelo hidrodinâmico 2D (Nilton *et al.*, 2015), existem velocidades mais elevadas na região noroeste e sudeste do arquipélago.

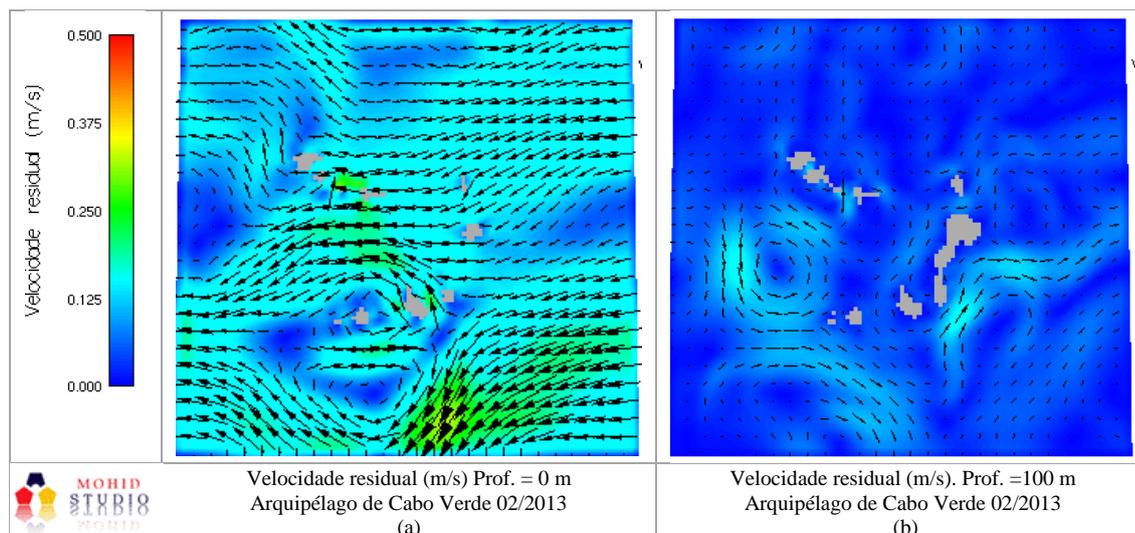


Figura 8. Mapa horizontal do fluxo residual das correntes (a) superficiais e (b) a 100 metros de profundidade (b) no arquipélago de Cabo Verde, Fevereiro de 2013.

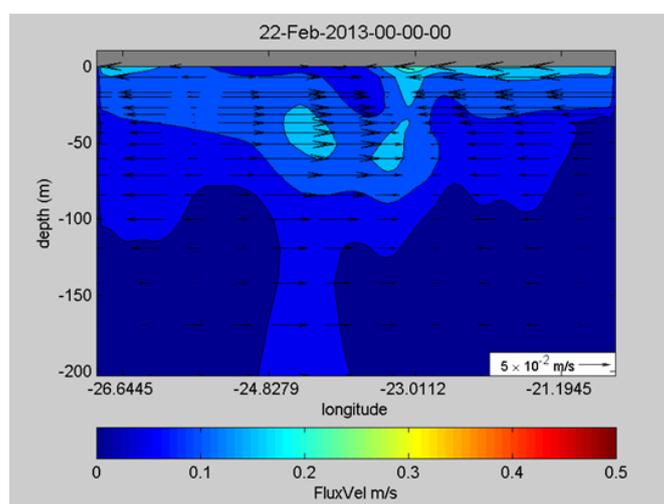


Figura 9. Velocidade residual das correntes, da superfície até aos 200 m de profundidade, na secção localizada a sul do arquipélago de Cabo Verde, Fevereiro de 2013.

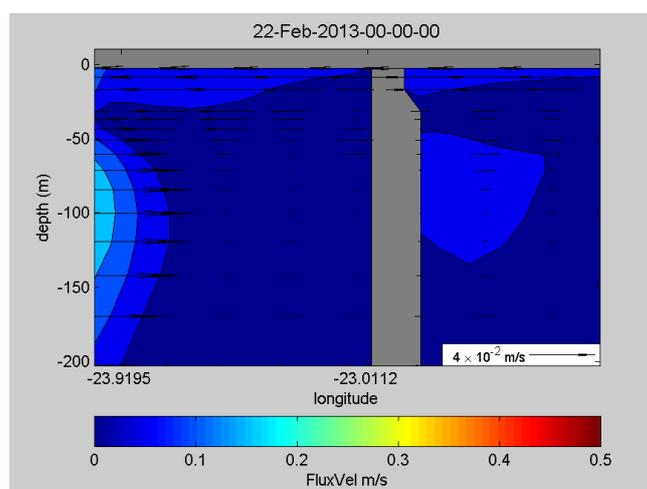


Figura 10. Velocidade residual das correntes, da superfície até aos 200 m de profundidade, na secção localizada na zona da ilha do sal, Fevereiro de 2013.

6.3 Temperatura e salinidade

A partir da análise dos resultados dos perfis médios mensais de temperatura e salinidade obtidos para o mês de Fevereiro de 2013 nos quatro pontos do domínio (NO; NE; SO e SE) foi possível identificar as principais massas de água presentes na região: a massa de água central do Atlântico norte - caracterizada por uma temperatura entre 8 e 18°C e uma salinidade entre 35,3 e 36,7 - e a massa de água profunda do Atlântico norte - caracterizada por uma temperatura entre 1,5°C e 1,4°C e uma salinidade entre 34,8 e 35,0. Para tal, os resultados obtidos foram representados em diagramas T-S (Figura 11), permitindo a identificação dos diferentes tipos de massa de água e a mistura que ocorre entre elas ao longo da coluna de água na região do arquipélago de Cabo Verde. Os pontos representados no diagrama T-S representam as combinações específicas de temperatura e salinidade e, por conseguinte, para uma densidade particular (Pickard, 1979). Desta forma um ponto é designado de “tipo” de água, a linha de “massa” de água, num determinado intervalo de temperatura e salinidade. No diagrama T-S, a parte superior dos perfis corresponde à camada superficial e a parte inferior ao fundo.

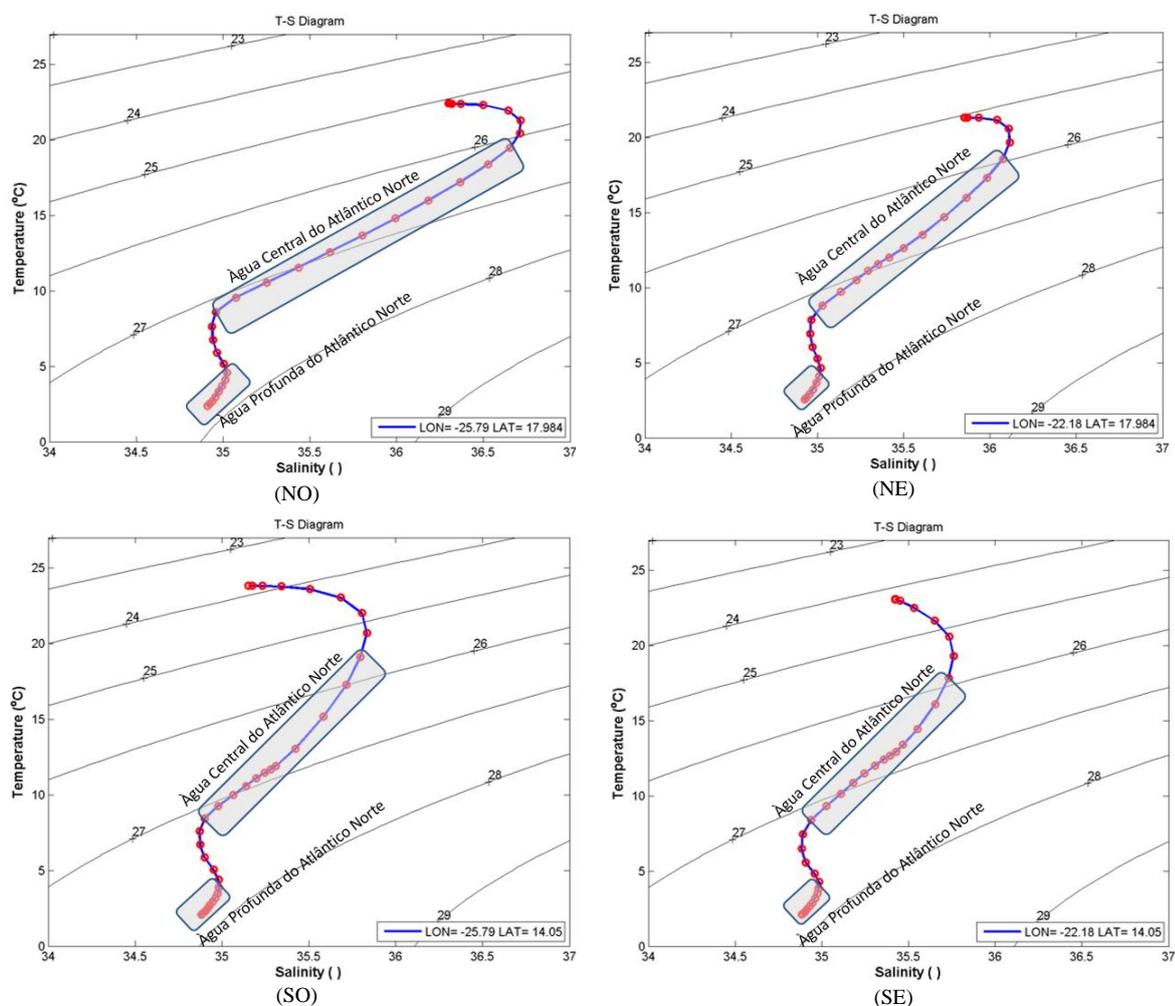


Figura 11. Diagrama T-S dos valores médios mensais de temperatura e salinidade do modelo obtidos no mês de Fevereiro em quatro pontos do domínio (NO, NE, SO, SE), entre a superfície e os 2500 metros de profundidade.

Na parte intermédia do perfil está situada a massa de água central do Atlântico norte, com uma melhor representação e estabilidade na parte norte do arquipélago, Figura 11 (NO e NE) em relação a parte sul do arquipélago, Figura 11 (SO e SE) em que os perfis apresentam uma massa de água com salinidade inferior a 36. Após a parte intermédia dos perfis até ao fundo está localizada a água profunda do Atlântico norte (DGA, 2004). Em geral os resultados do modelo representados no diagrama T-S estão de acordo com os valores teóricos, mostrando que o modelo consegue representar as principais massas de água presentes na zona de estudo.

7. CONCLUSÕES

Este trabalho representa um passo para uma compreensão mais abrangente da circulação oceânica na região de Cabo Verde. Na validação dos resultados do modelo foram utilizados todos os dados de campo disponíveis. Na ausência de dados de campo, a verificação dos resultados do modelo foi apoiada pela existência de processos físicos conhecidos. Particularmente importante foi o padrão de fluxo residual em torno das ilhas e grupos de ilhas, a modificação do padrão de fluxo pelo vento e as propriedades da água na superfície e ao longo da coluna de água.

As observações de maré da bóia localizada no porto da Palmeira, do ano de 2000, são a única fonte de dados disponíveis para a validação dos níveis de água calculados pelo modelo hidrodinâmico. Estes dados permitiram calcular as principais constituintes de maré, as quais foram utilizadas para avaliar as condições de fronteira, mas também para validar os resultados de maré dos modelos com menor resolução horizontal e dos modelos de maior resolução, com correlações de 95,7% e 95,4%, aproximadamente. Os resultados do modelo mostram que as correntes de maré junto das ilhas são determinadas pela morfologia do arquipélago, sendo máxima nos canais entre as ilhas.

O forçamento meteorológico é importante nas regiões onde o fluxo se limita à camada de superfície. Para estudar o efeito do vento na estratificação vertical, foi utilizado o modelo hidrodinâmico baroclínico 3D. Os resultados do modelo demonstraram que o vento exerce influência na camada superior até cerca de 40 metros de profundidade, o que corresponde à camada de mistura.

Os resultados do modelo baroclínico foram validados através da sua comparação com os dados das bóias Argo e com as imagens de temperatura da superfície do mar obtida por satélite e com algumas informações bibliográficas disponíveis sobre a circulação do oceano na região de Cabo Verde. A análise dos resultados das quatro bóias Argo encontradas no arquipélago permitiram validar os resultados da temperatura e salinidade ao longo da coluna de água nesses pontos. A temperatura da superfície do mar obtida através do modelo foi comparada com as observações das imagens dos satélites mostrando uma boa concordância entre os resultados e as imagens de satélite.

Através da análise dos resultados hidrodinâmicos do modelo baroclínico foi possível identificar as duas principais correntes marítimas que ocorrem no arquipélago de Cabo Verde, a corrente fria de Canárias e a corrente norte equatorial. Também foram identificadas as principais massas de água da região através da análise dos diagramas T-S.

Este estudo é um passo importante para a compreensão das características gerais das correntes de maré do arquipélago de Cabo Verde, que é um passo necessário para a compreensão da importância relativa de cada processo responsável pelo fluxo em estudos hidrodinâmicos mais abrangentes. O conhecimento do padrão de fluxo residual é importante para apoiar a gestão das descargas antrópicas, e globalmente os resultados são de grande importância para projetar as campanhas de campo que devem preceder qualquer estudo de qualidade da água ou para apoiar o ordenamento do território e de desenvolvimento do turismo em Cabo Verde.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aumont O., Orr J.C., Jamous D., Monfray P., Marti O., Madec G. (1998). A degradation approach to accelerate simulations to steady-state in a 3-D tracer transport model of the global ocean. *Climate Dynamics*, 14, 101-116.

Barcellos C.J.S. (1908). *Arquipélago de Cabo Verde*. Imprensa Lucas.

Campuzano F.J., Mateus M.D., Leitão P.C., Leitão P.C., Marín V.H., Delgado L.E., Tironi A., Pierini J.O., Sampaio A.F.P., Almeida P., Neves R.J. (2013). Integrated coastal zone management in South America: A look at three contrasting systems. *Ocean & Coastal Management*, 72, 22-35.

Custódio S., Fonseca J. F. B. D., Faria B. V. E., D'Oreye N. (2005). Tidal Modulation of seismic noise and volcanic tremor in Fogo island, Cape Verde. In *International Workshop on Ocean Island Volcanism*, Sal Island, Cape Verde Republic.

DGA (2004). *Livro Branco sobre o Estado do Ambiente em Cabo Verde*. Direcção Geral do Ambiente, Ministério do Ambiente Agricultura e Pescas, Cabo Verde, 65.

INDP (2011). *Cenários e orientações de estratégias de adaptação das políticas de pescas às mudanças climáticas para Cabo Verde até 2050*. Instituto Nacional de Desenvolvimento das Pescas.

Lázaro C., Fernandes M.J., Santos A.M.P., Oliveira P. (2005). Seasonal and interannual variability of surface circulation in the Cape Verde region from 8 years of merged T/P and ERS-2 altimeter data. *Remote Sensing of Environment*, 98, 45-62.

Lyard F., Lefevre F., Letellier T., Francis O. (2006). Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean Dynamics*, 56, 394-415.

Monteiro F. A., Solé-Cava A. M., Thorpe J. P. (1997). Extensive genetic divergence between populations of the common intertidal sea anemone *Actinia equina* from Britain, the Mediterranean and the Cape Verde Islands. *Marine Biology*, 129, 425-433.

Neves R. (2013). The MOHID concept. In *Ocean modelling for coastal management - Case studies with MOHID*. Eds. M. Mateus & R. Neves, pp 1-11.

Nilton G., Neves R., Kenov I.A., Campuzano F.J., Pinto L. (2015). Tide and Tidal Currents in the Cape Verde Archipelago. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 15(3):395-408.

Pickard G.L. (1979). *Descriptive physical oceanography: An introduction*. Oxford: Pergamon Press.

Schwanghart W., Schutt B. (2008). Meteorological causes of Harmattan dust in West Africa. *Geomorphology*, 95, 412-428.

Varela A., Delgado A., Cruz E., Lopes I. Correia M., Duarte O., Correia, S. (2011). Análise das instituições e políticas de pesca em Cabo Verde.