Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology

OPEN ACCESS

DOI: 10.5380/abclima

CICLO DIURNO E DINÂMICA DOS VENTOS EM BAIXOS NÍVEIS SOBRE O ESTADO DO CEARÁ

DAY CYCLE AND LOW-LEVEL WINDS DYNAMICS OVER THE STATE OF CEARÁ

ESTUDIO DE NORMAS Y DINÁMICA DE VIENTOS DE BAJO NIVEL SOBRE EL ESTADO DE CEARÁ

Gizelly Cardoso Lima
Universidade Estadual do Ceará
gizelly.lima@aluno.uece.br

Sérgio Sousa Sombra
Universidade Estadual do Ceará
sergiossombra@gmail.com

Antônio Carlos Santana dos Santos
Universidade Estadual do Ceará
calos.santana@uece.br

Augusto César Barros Barbosa
Universidade Estadual do Ceará
barbosaiag@gmail.com

Francisco Geraldo de Melo Pinheiro
Universidade Estadual do Ceará
francisco.pinheiro@uece.br

José Maria Brabo Alves
Universidade Estadual do Ceará
jose.brabo@uece.br

Resumo: Os padrões de Ventos de Baixos Níveis (VBN) no Litoral do Estado do Ceará (LC), costa Nordeste do Brasil (NEB), são modulados, ao longo de todo o ano, pela alternância diária entre brisa terrestre e marítima. Neste trabalho o ciclo diurno dos VBN é estudado utilizando observações e

modelagem, com destaque para a evolução da *Sea Breeze Front* (SBF). Serão utilizados dados de intensidade e direção dos ventos de Plataformas de Coleta de Dados (PCD), imagens de satélite e dados de radiação de ondas curtas e longas inferidos por satélite e modelagem regional de mesoescala utilizando o *Weather Research and Forecasting Model* (WRF). Por volta das 6h local (LST, UTC-3) a componente offshore do vento é mais intensa. Por volta das 12 LST, o gradiente térmico continente-oceano está bastante desenvolvido, a SBF se encontra no continente, nas vizinhanças da costa e avança para o interior do continente até o anoitecer, onde a costa tem um formato côncavo. Região preponderante na formação e avanço da SBF. O ciclo diurno dos ventos, o avanço da SBF e sua intercepção com a costa nas concavidades são bem reproduzidos pelo WRF, o que sugere que a modelagem possa ser uma ferramenta útil no estudo da estrutura vertical da dinâmica das brisas.
Palavras-chave: Modelagem atmosférica. Brisa. *Sea Breeze Front.*

Abstract: The Low-Level Wind (VBN) patterns on the coast of the State of Ceará (LC), Northeast coast of Brazil (NEB), are modulated, throughout the year, by the daily alternation between land and sea breezes. In this work, the diurnal cycle of VBN is studied using observations and modeling, with emphasis on the evolution of the Sea Breeze Front (SBF). It will be used wind intensity and direction data from Data Collection Platforms (PCD), satellite images and short and long wave radiation data inferred by satellite and regional mesoscale modeling using the Weather Research and Forecasting Model (WRF). At around 6 am local (LST, UTC-3) the offshore component of the wind is more intense. Around 12 LST, the continent-ocean thermal gradient is well developed, the SBF is found on the continent, in the vicinity of the coast and advances towards the interior of the continent until dusk, where the coast has a concave shape. Preponderant region in the formation and advancement of SBF. The diurnal wind cycle, the SBF advance and its interception with the coast in the concavities are well reproduced by the WRF, which suggests that the modeling can be a useful tool in the study of the vertical structure of the breeze dynamics.
Keywords: Atmospheric modeling. Breeze. Sea Breeze Front.

Resumen: Los patrones de vientos de bajo nivel (VBN) en la costa del estado de Ceará (LC), costa noreste de Brasil (NEB), están modulados, durante todo el año, por la alternancia diaria entre la brisa terrestre y marina. En este trabajo, el ciclo diurno VBN se estudia utilizando observaciones y modelos, con énfasis en la evolución del Sea Breeze Front (SBF). La intensidad del viento y los datos de dirección de las estaciones de análisis meteorológico (PCD'S), las imágenes de satélite y los datos de radiación de onda corta y larga inferidos por el modelado regional y satelital de mesoescala se usarán utilizando el Modelo de Investigación y Pronóstico del Tiempo (WRF). Alrededor de las 6 hora estándar local (LST, UTC-3) el componente eólico marino es más intenso. Alrededor de las 12 LST, el gradiente térmico continente-océano está bien desarrollado, el SBF se encuentra en el continente, en las proximidades de la costa y avanza hacia el interior hasta la noche, donde la costa tiene una forma cóncava. Región preponderante en la formación y avance del SBF. El ciclo del viento durante el día, el avance del SBF y su intercepción con la costa en las concavidades se reproducen bien por el WRF, lo que sugiere que el modelado puede ser una herramienta útil en el estudio de la estructura vertical de la dinámica de las brisas.
Palabras clave: Modelado atmosférico. Brisa. Ciclo diurno.

Submetido em: 07/02/2020
Aceito para publicação em: 18/11/2021
Publicado em: 22/11/2021

INTRODUÇÃO

As energias renováveis são temas de constantes debates em todo o planeta na atualidade, necessitando-se de ampliação e investimento, a fim de um crescimento sustentável e mitigação dos efeitos antropogênicos nas mudanças climáticas. Com relação às projeções climáticas para o final do século obtidas a partir de simulações com modelos dinâmicos do sistema climático, estudos apontam para um aumento da disponibilidade eólica globalmente (PRYOR *et al*., 2020) Entretanto, aspectos regionais dessas projeções evidenciam um aumento mais acentuado sobre a parte Norte e Centro Leste da América do Sul (REBOITA *et al.*, 2017), onde localiza-se o Nordeste Brasileiro e a Amazônia. Por outro lado, não se verificam mudanças claras na velocidade do vento sobre diferentes regiões costeiras e isso favorece a complementaridade entre energia eólica e energia hídrica, que é a principal modalidade de produção energética no país (PIMENTA *et al.*, 2019; SILVA *et al*., 2016).

O Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a fonte hídrica que responde por 65,2% da oferta interna. As fontes renováveis representam 84,8% da oferta interna de eletricidade no Brasil, sendo um dos países que apresenta grande capacidade de produzir eletricidade a partir de fontes renováveis de energia. De acordo com o Balanço Energético Brasileiro de 2021 a fonte eólica é de 8,8% e em 2020, na expansão da capacidade instalada, as centrais eólicas contribuíram com 1.753 MW ou seja 38% do total adicionado, e um expansão de 11,4%. (EPE, 2021). Segundo o mais recente Atlas Eólico e Solar do Ceará mais de três mil megawatts de geração eólica e solar estão em operação e construção no Ceará. O Estado figura como líder na geração distribuída, com 28% de toda potência instalada na região Nordeste. É também o território cearense um dos melhores potenciais do Brasil em geração eólica *onshore* (94 gigawatts), geração eólica *offshore* (117 gigawatts) e geração solar. (CEPEL, 2017)

O Estado do Ceará está situado na Região Nordeste do Brasil (NEB), um pouco ao sul da linha do Equador, numa posição nitidamente tropical entre 2º46'30'' e 7º52'15'' de latitude sul e 37º14'54'' e 41º24'45'' de longitude ocidental, cuja área é de 148.016 km² correspondendo a 1,74% em relação ao país e 9,57% em relação ao Nordeste (CEARÁ, 2019). No primeiro semestre, em que o clima é chuvoso, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) se aproxima do litoral, as chuvas se intensificam e os ventos ficam mais fracos,

soprando de Leste ou Sudeste. No segundo semestre, em que o clima é mais seco, a ZCIT se afasta do litoral em direção ao Equador, os ventos são mais intensos, espacialmente mais uniformes e soprando predominantemente de Nordeste (FUNCEME, 2009).

A exploração do potencial eólico no Estado do Ceará passa pela compreensão de dois processos: 1- a dinâmica dos ventos alísios, que determinam o ciclo sazonal dos ventos; 2- o fenômeno das brisas, terrestre e marítima, que modulam o ciclo diurno dos ventos de baixos e médios níveis. Estas dinâmicas estão descritas no Atlas do Potencial Eólico. (CEPEL, 2017). A modulação das variáveis atmosféricas pelas brisas em regiões costeiras tem sido exaustivamente estudada através de dados observacionais e de modelagem numérica, sendo o Sea Breeze Front (SBF) a componente do sistema de brisas mais estudada (MORAES, MARTON e PIMENTEL, 2014; CHEMEL e SHOKI, 2012; KUSAKA *et al*., 2012; SALAMANCA, MARTILLI E YAGÜE, 2012; LIN *et al*., 2008; TEIXEIRA, 2008).

A brisa marítima e a terrestre resultam do aquecimento e resfriamento diferenciais que se estabelecem entre o continente e o oceano (FEDORAVA, 2001). Durante o dia o continente se aquece mais rapidamente que o oceano adjacente, fazendo com que a pressão sobre o continente seja mais baixa do que sobre o oceano, gerando um vento denominado de brisa marítima (FERREIRA; GIOVANNI; MELLO, 2005). No período da noite o continente perde calor mais rapidamente que o oceano, gerando pressões maiores sobre o continente, fazendo com que o vento sopre do litoral para o oceano, vento esse chamado de brisa terrestre.

No LC a interação dos ventos alísios com as brisas terrestre e marítima determinam o ciclo diurno de ventos, a temperatura e a umidade. O desenvolvimento da brisa marítima inicia-se com o nascer do sol. O gradiente de pressão continente - oceano cresce continuamente e por volta das 11 ou 12 hora local (LST, UTC-3) a SBF se encontra no continente próxima à costa. As 15 ou 16 LST a SBF avançou de 70 a 100 km na direção do interior do continente e encontra a costa nos extremos leste e oeste do LC. Nestes extremos a costa tem um formato côncavo com curvaturas centradas em 37^0W e 41^0W, respectivamente, doravante mencionadas apenas como concavidades leste e oeste. O formato côncavo da costa nos extremos leste e oeste do LC tem papel preponderante no desenvolvimento e dinâmica da brisa marítima. O máximo avanço da SBF no continente, de 120 a 150 km, ocorre às 19:00 LST. A componente no continente da brisa marítima é

particularmente intensa no LC em razão do relevo pouco acidentado e a inclinação da costa relativa ao Equador (DA SILVA *et al*., 2017). As brisas estão também diretamente relacionadas à distribuição das chuvas no Ceará, e mesmo no período de forte atividade convectiva, continuam modulando o ciclo diurno dos ventos. Teixeira (2008) identifica a presença do ciclo diurno na precipitação, associado ao sistema de brisas e sistemas de grande escala, influenciando no aumento da frequência de eventos de chuva entre a madrugada e o início da manhã, e diminuição no período da tarde.

Resultados de estudos detalhados na região do LC demonstram grande potencial atual e futuro na geração de energia eólica. Camelo *et al.,* (2017) ressaltam que anualmente a velocidade dos ventos em relação ao solo atingem valores superiores a 7,5 m/s a uma altura de 50 metros. Foram identificados por Lima *et al*., (2011) ventos com velocidades entre 5m/s e 6 m/s para uma altura de 10 m e velocidades superiores a 7 m/s no caso de uma altura de 110 m.

Os trabalhos supracitados, utilizaram dados de torres até 10m e fazem uso de extrapolação dos recursos eólicos coletados para o caso de alturas maiores. É importante ressaltar que existe uma deficiência em relação a resolução espacial destes dados (poucas estações meteorológicas de superfície) e muitas vezes estas não se encontram próximas aos parques eólicos instalados. A técnica de *dynamical downscaling* utilizada na modelagem regional é uma ferramenta confiável no estudo da dinâmica dos ventos e pode preencher a lacuna da ausência sistemática de dados observacionais no LC.

A técnica de *dynamical downscaling* tem se mostrado útil no estudo dos ventos costeiros em regiões de atuação de brisas. Steele *et al.,* (2013) utilizam simulação idealizada com o WRF para estudar a dinâmica da brisa marítima no sul do Mar do Norte. Arrilaga *et al.,* (2016) estudam a brisa marítima na costa Norte da Espanha utilizando observações e o modelo WRF que reproduzi adequadamente o início da brisa, entretanto, falha ao representar certas características da brisa. Comin e Acevedo (2017) mostram que o WRF, com espaçamento de grade de 3 km, reproduz adequadamente a dinâmica das brisas.

Nos trópicos, modelos regionais como RAMS e WRF tem sido utilizado na simulação de brisas, fornecendo resultados concordantes com as observações. Herdies (1998) reproduz, utilizando o modelo atmosférico regional RAMS, a circulação de brisa terrestre e marítima no leste do NEB. RAMOS DA SILVA, UBARANA e GANDU (1996) utilizam o modelo

RAMS para reproduzir o ciclo diurno dos ventos sobre a capital do Estado do Ceará, Fortaleza.

ROSITA DEWI *et al.,* (2019) estudam a brisa marítima no Golfo de Jakarta e mostram que as simulações com o modelo WRF concordam com as observações de estações meteorológicas próximas à superfície. Da Silva *et al.,* (2017) o modelo RAMS reproduz com uma boa exatidão as tendências observadas em estações meteorológicas localizadas no centro do NEB. Teixeira (2008) em seu artigo mostra a atuação da brisa no LC e uma nebulosidade em forma de linha no período da tarde, tangencialmente paralela à costa, penetrando o continente, caracterizando a brisa marítima. Sendo a circulação da brisa influenciada positivamente devido ao aumento da amplitude térmica que se intensifica durante o dia.

Neste trabalho o ciclo diurno das brisas no LC é estudado utilizando informações derivadas de satélite e dados de ventos de Plataformas de Coleta de Dados (PCD). Uma simulação de ventos de baixo nível de uma previsão do tempo de curto alcance de cinco dias é comparada com os dados observados. O estudo numérico procura quantificar a capacidades do modelo regional WRF em reproduzir o ciclo diurno dos ventos litorâneos, assim como o avanço da frente de brisa no interior do continente no LC para o período de 01 a 05 de setembro de 2005.

MATERIAIS E MÉTODOS

Dados

A dinâmica dos ventos no LC é estudada utilizando-se dados observados e modelagem regional de mesoescala com modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF). Os dados observados, ou derivados de observações, utilizadas são: 1) imagens no visível do satélite GOES 16 (banda 2, 0,64 µm) (https://www.nasa.gov/content/goes); 2) *surface downward longwave irradiance* (DLI) (https://www.nasa.gov/content/goes); 3) *surface solar irradiance* (SSI) (https://www.nasa.gov/content/goes); e 4) intensidade e direção dos ventos de três PCD'S litorâneas e uma torre anemométrica mostrados (http://www.funceme.br/pcd) na Figura 1. O DLI e o SSI são derivados das imagens do satélite geoestacionário GOES-E e disponibilizadas de hora em hora pela EUMETSAT - *Ocean*

and Sea Ice Satellite Application Facility (OSI SAF) com resolução de 0,05°. O algoritmo de criação do DLI utiliza a saída do modelo numérico de previsão do tempo para calcular os dados de DLI, corrigido de acordo com informações de nuvem derivadas de satélite. O algoritmo do SSI utiliza parametrização física aplicada a cada pixel da imagem do satélite.

Posicionamento do SBF

A informação de satélite, ou derivada, é utilizada para identificar o posicionamento da SBF. A queda brusca de SSI e aumento de DLI, observados na fronteira que separa céu claro e cúmulos é utilizado para identificar a localização aproximada da SBF em relação à costa. Os dados de ventos das PCD's são utilizados para determinar a dinâmica do ciclo diurno modulado pelas brisas em VBN e validar o modelo WRF.

A fim de determinar os campos de ventos em alta resolução, utiliza-se a técnica de *dynamical downscaling*, no presente trabalho. O modelo numérico regional é inicializado nas fronteiras e alimentado no seu pela informação de grande escala proveniente da reanálise ERA-INTERIM. As configurações do modelo são apresentadas na Tabela 1. A modelagem objetiva quantificar a capacidade da técnica *downscaling* de reproduzir os padrões de ventos locais de baixos e médios níveis, induzidos pelo fenômeno de brisas e não resolvidos pela informação de grande escala que originalmente alimentam o modelo regional nas suas fronteiras.

Modelagem

No estudo numérico foi utilizado o modelo regional não hidrostático WRF. As informações de grande escala, iniciais e laterais, são provenientes da com a reanálise do ERA-INTERIM (ERAI), grade horizontal de 0.75º. O período simulado foi de 01 de setembro de 2005 a 05 de setembro de 2005, o *spin-up* e a resolução horizontal são, respectivamente, 6 h e 1,8 km. A configurações do modelo seguem os parâmetros da Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Configurações das simulações realizadas no WRF.

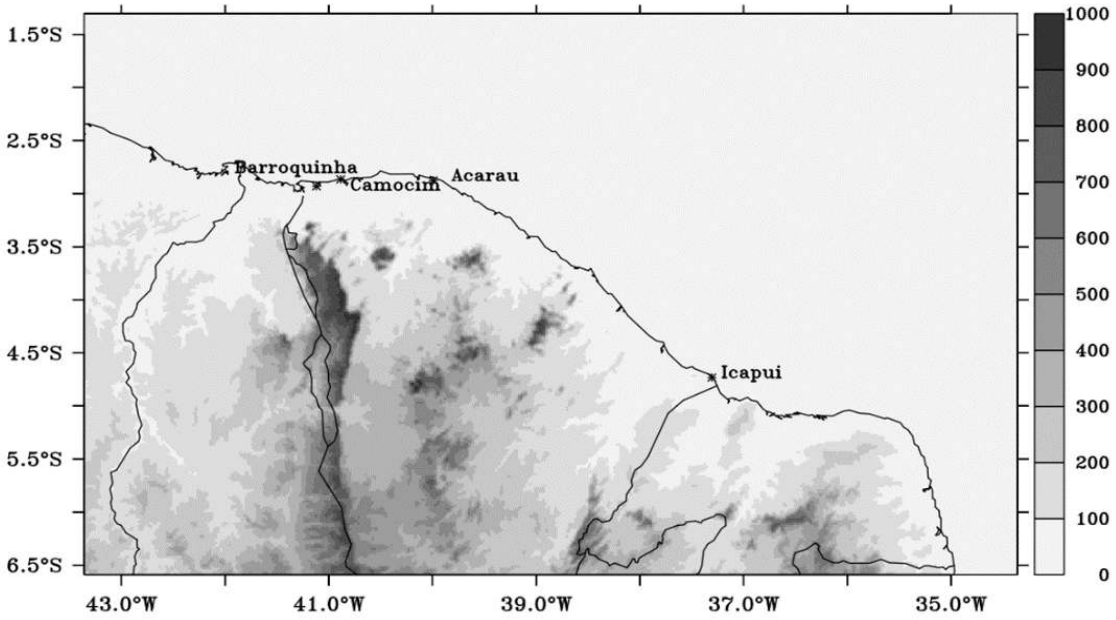
Período Simulado	**01 Sep 2005 00 UTC a 05 Sep 2005 23 UTC**
Passo de tempo	10 segundos
Resolução vertical	65 níveis com topo em 30mb
Escala de relaxamento newtoniano	6 horas
Parametrização Cúmulos	Não ligada
Microfísica	KESSLER (KESSLER, 1969)
Radiação ondas curtas/longas	RRTMG (IACONO, J., *et al.*, 2008)
Camada superficial	MM5 (PAULSON, 1970)
Trocas Superficiais	NOAH (NIU et al., 2011)
Turbulência	YONSEI (HONG; NOH e DUDHIA, 2006)

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Como não se utiliza aninhamento de grades, evitam-se os erros decorrentes das reflexões de ondas espúrias nas fronteiras das grades. O ano de 2005 foi escolhido porque as séries temporais de ventos das PCD's são mais confiáveis e apresentam menos lacunas. Neste ano, no entanto, as imagens de satélite para a região de interesse são escassas, não permitindo acompanhar a evolução da SBF durante a tarde. Isto não chega a ser um problema uma vez que esta evolução é parte do ciclo diurno e independe do ano estudado.

Apesar do fenômeno das brisas estarem presentes no LC mesmo no semestre chuvoso (primeiro semestre do ano), como se pode constatar dos dados de ventos das estações automáticas, a escolha do mês de setembro se deve à ausência de outros sistemas convectivos que dificultam a identificação da SBF por imagem de satélite. A região simulada é mostrada na Figura 1.

Figura 1 – Topografia e localização da área simulada do LC. Em destaque as PCD's de Icapuí, Acaraú e Barroquinha e a Torre Anemométrica de Camocim. Destaca-se o formato côncavo da costa nos litorais leste e oeste do CE com curvaturas centradas em 37^0W e 41^0W.



Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

A qualidade e confiabilidade da modelagem em reproduzir as características locais da brisa marítima é obtida da seguinte forma: 1) comparando a modelagem com as observações disponíveis nas PCD's (listadas na Figura 1), para isto utilizamos os índices estatísticos propostos por Fox (1981), Willmot (1982), Pielke (2002) e Wilks (2006), apresentados na Tabela 2 e, 2) avaliando qualitativamente a capacidade do modelo em reproduzir o avanço da frente de brisa em baixos níveis, através da comparação da modelagem com dados diretos e indiretos de satélite: imagens no canal visível, dados de DLI e SSI. O Erro Médio (BIAS), segundo Hallak e Pereira Filho (2011), mede a tendência de o modelo superestimar ou subestimar a variável em questão, apesar de não configurar informação dos erros individuais e, portanto, não pode ser usado como medida de acurácia da simulação, precisando assim corrigir com Erro Absoluto Médio (EBM) que é considerado preciso e robusto como medida da habilidade dos modelos numéricos em reproduzir a realidade (FOX, 1981).

Tabela 2 – Formulação dos índices e medidas de erro estatístico. P_{is}, P_{os} e N são, respectivamente, as séries temporais de dados simulados e observados e número de medidas

INDÍCE	FORMULAÇÃO
Mean Error (ME) ou BIAS	$ME = BIAS = \overline{d} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} d_i$
Mean Square Error (MSE)	$MSE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(P_{is} - P_{io})^2$
Root Mean Square Error (RMSE)	$RMSE = \left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(P_{is} - P_{io})^2\right]^{1/2}$
Correlation Coefficient (CC)	$\rho = \frac{COV(P_{is}, P_{io})}{\sigma_s \sigma_o}$
Index of Agreement (IA)	$IC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(P_{is} - P_{io})^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(\lvert P_{is} - \overline{P_{io}}\rvert + \lvert P_{io} - \overline{P_{io}}\rvert\right)^2}$

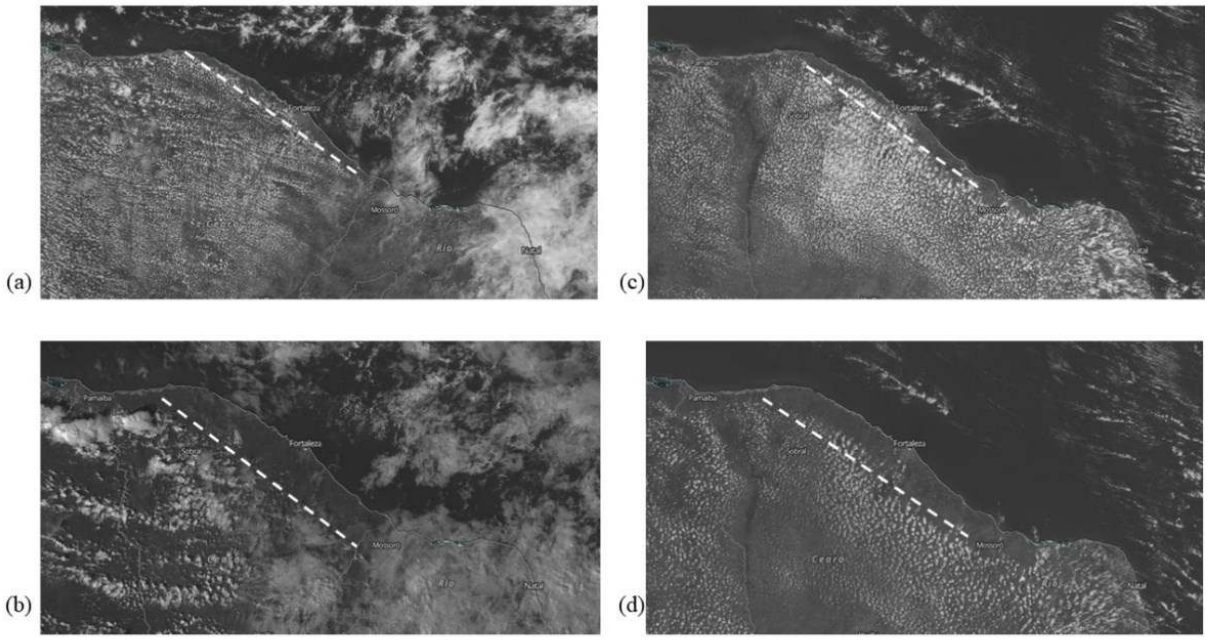
Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise das imagens do satélite GOES-Leste/ABI mostra que em qualquer período do ano, seja na época de chuva ou seca no Ceará, a SBF pode ser identificada por uma linha de nuvens quase paralela à costa. A linha de nuvens é mais facilmente identificada no segundo semestre do ano, quando a ZCIT está longe da costa e é rara a ocorrência de outros sistemas convectivos que dificultam sua visualização. Neste período, os gradientes continente/oceano se intensificam em razão da redução da cobertura de nuvens na costa. O fato dos ventos, neste período, soprarem preferencialmente de Nordeste para Sudoeste concorrem para intensificar o avanço da SBF para o interior do continente. A Figura 2 mostra a imagem no visível do satélite GOES-Leste/ABI disponibilizadas pela NASA - *Worldview Application (https://worldview.earthdata.nasa.gov/),* parte da *NASA - Earth Observing System Data and Information System* (EOSDIS), sendo (a) para o dia 12 de Janeiro de 2020 às 12 LST, (b) dia 12 de Janeiro de 2020 às 16 LST, (c) dia 01 de setembro 2019 às 12:40 LST e (d) dia 01 de setembro 2019 às 15 LST. Por volta das 12 LST a SBF se encontra no continente nas proximidades da costa, destacando a formação dos *Horizontal Convective Rolls* (HCRs) atrás da SBF, paralelos à costa e ao vento superficial médio. A SBF continua avançando para

o interior do continente durante a tarde e encontra a costa nos extremos leste e oeste do LC. Este ciclo diário do avanço da SBF pode ser facilmente identificado em qualquer dia do ano em que outros sistemas convectivos estejam ausentes através dos dados de DLI e SSI.

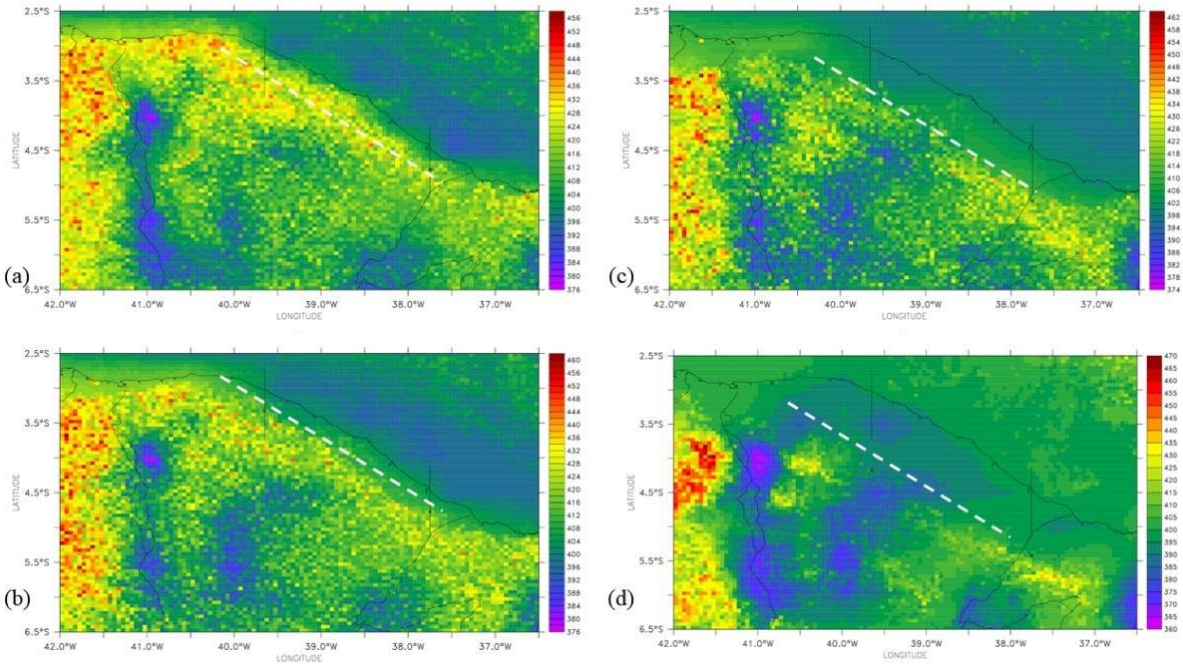
Figura 2 – Imagem GOES-Leste/ABI Canal Visível a) para o dia 12 de janeiro de 2020 às 12h LST, (b) dia 12 de janeiro de 2020 às 16h LST, (c) dia 01 de setembro 2019 às 12:40h LST e (d) dia 01 de setembro 2019 às 15h LST e o tracejado mostra SBF entrando no continente.



Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

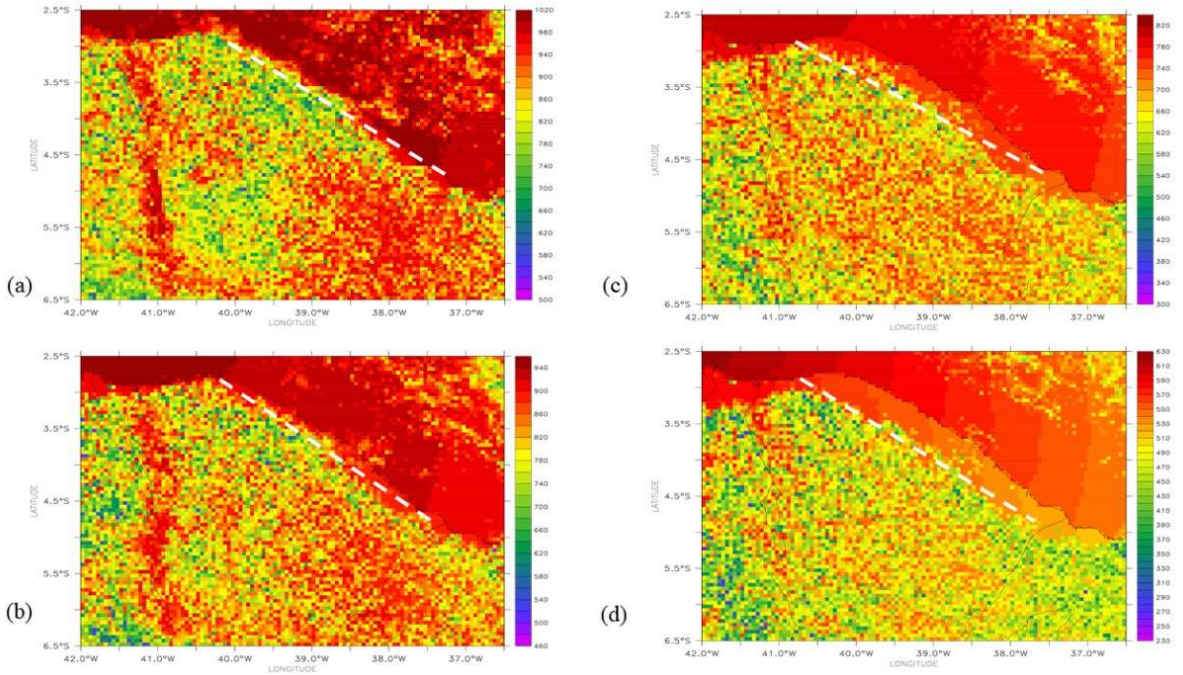
A Figura 3 mostra quatro quadros de DLI de um conjunto de imagens resultados de médias produzidas entre os dias 1 e 4 de setembro de 2005 nos horários (a)12, (b)14, (c)16 e (d)18 LST. A Figura 4 mostra quatro quadros de SSI, nas mesmas datas, e nos mesmos horários. Com dados de DLI e SSI, estimados da informação de cobertura de nuvens do GOES-E, é possível se inferir as distancias da SBF à costa durante seu avanço para o interior do continente. Por volta do 12h a SBF se encontra a menos de 30 km da costa. Analisando dados de DLI e SSI para dias diferentes, verifica-se que esta distância pode variar bastante de um dia para o outro. O avanço da SBF para o interior do continente se intensifica durante a tarde, com o aumento do gradiente térmico continente/oceano, e as 18 LST chega de 100 a 130 km da costa. Dados de DLI mostram que este avanço continua durante a noite, até as 19 ou 20 LST.

Figura 3 – Dados de Irradiância de Ondas Longas (DLI) por hora (a) 12h, (b) 14h, (c) 16h e (d) 18h LTS do satélite geoestacionário GOES-E utilizando algoritmos de parametrizações em massa e físico.



Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Figura 4 – Dados de Irradiância de Ondas Curtas (SSI) por hora (a) 12h, (b) 14h, (c) 16h e (d) 18h LTS do satélite geoestacionário GOES-E utilizando algoritmos de parametrizações em massa e físico.



Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

As Figuras 5 e 6 mostram a intensidade e direção dos ventos, observados, modelados e Reanálise (ERAI) para quatro localidades destacadas na Figura 1. A Figura 5 mostra todo o

período simulado, a Figura 6 mostra o ciclo diurno construído com os dados utilizados na construção da Figura 5. Os pontos, não ligados por linhas nas duas figuras e para as PCD's, correspondem à informação de grande escala (reanálise ERAI) que, originalmente, alimentaram o WRF para todo o período simulado. Nas Tabelas 3 e 4 são mostradas as principais estatísticas da intensidade e direção respectivamente para estas localidades. As estatísticas foram feitas com dados horários modelados e observados para todo o período simulado com a exclusão do tempo de *spin-up* de 6h (Tabela 1). O maior destaque destas figuras é a permanência do ciclo diurno observado das brisas (pontos escuros ligados por linhas das Figura 5 e 6): ventos mais fracos de leste ou sudeste ao amanhecer marcando o ápice da brisa terrestre, e ventos mais intensos de nordeste no final da tarde, marcando o ápice da brisa marítima, e que diminuem de intensidade ao anoitecer, com exceção do leste do LC, localidade de Icapuí/Aracati, onde os ventos se intensificam no final da tarde, em vez de se reduzirem à noite, como nas demais localidades (Figura 5e e Figura 6c). A razão desta excepcionalidade em Icapuí é, provavelmente, decorrente do formato côncavo da costa e da presença dos vales dos Rios Jaguaribe e Mossoró, o que provocaria afunilamento e intensificação dos ventos quando a SBF intercepta a costa na concavidade leste no final da tarde. Destaca-se o ganho de previsibilidade com o *downscalling*: apesar de não se mostrar, nesse trabalho, as estatísticas entre observações e Reanálise.

A análise das Figuras 5 e 6 (pontos não ligados por linhas) mostra que a Reanálise claramente não reproduz a amplitude das variações diárias da intensidade e direção dos ventos. Provavelmente em razão da sua baixa resolução espacial e temporal, 16km e 6h, respectivamente. O WRF, no entanto, captura as tendências observadas de ventos de baixos níveis.

Tabela 3 – Estatísticas para intensidade dos ventos.

	BIAS	MSE	RMSE	CC	IA
Icapuí	1,13	1,21	1,38	0,67	0,40
Acaraú	0,33	0,87	1,09	0,83	0,88
Barroquinha	0,59	0,86	1,06	0,88	0,90
Torre de Camocim	-0,35	1,41	1,74	0,88	0,91

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Tabela 4 – Estatísticas para direção dos ventos.

	BIAS	MSE	RMSE	CC	IA
Icapuí	-24,3	24,3	26,2	0,95	0,71
Acaraú	-3,60	6,60	9,00	0,87	0,91
Barroquinha	16,24	17,22	18,72	0,91	0,81
Torre de Camocim	-6,3	7,80	10,38	0,93	0,94

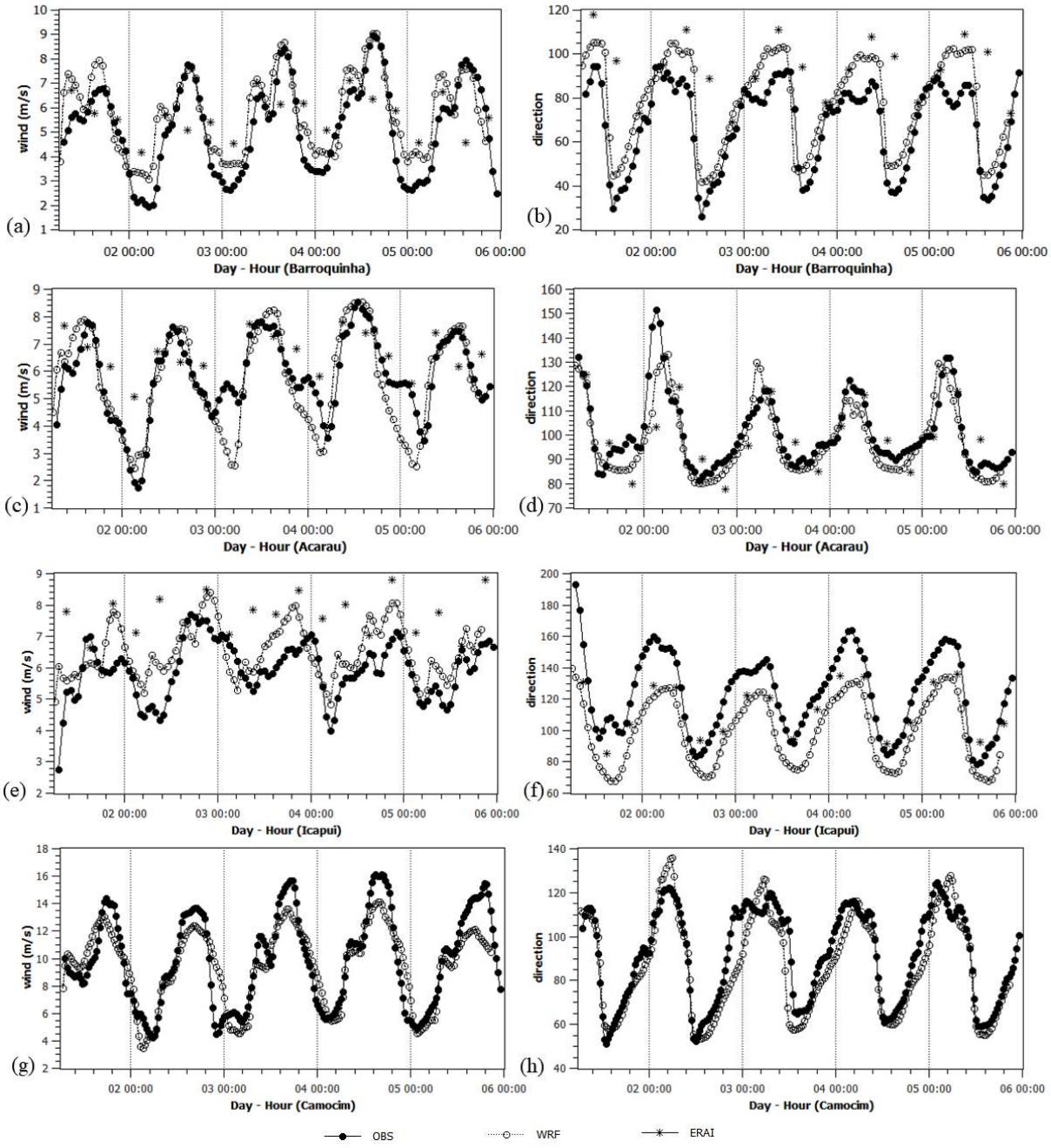
Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Analisando-se a Figura 5 e as correspondentes estatísticas (Tabelas 3 e 4) para as localidades das PCD's bem como a torre anemométrica, observa-se que o modelo tende a superestimar a intensidade dos ventos de baixos níveis, principalmente os valores mínimos, ou seja, o modelo erra mais destacadamente por volta das 6 LST, quando o vento é offshore. Isto ocorre talvez pela dificuldade do modelo em resolver as heterogeneidades superficiais no continente. Seria de esperar, portanto, que os erros se acentuem nos horários em que a componente continental do vento é máxima.

As piores estatísticas são para a intensidade e direção do vento em Icapuí, onde a componente oceânica é superestimada (ângulos menores que a observação, Figura 5f), e direção do vento em Barroquinha, onde a componente continental é superestimada (ângulos maiores que a observação, figura 5b). Destaca-se que Icapuí e Barroquinha estão localizadas nas concavidades leste e oeste, respectivamente.

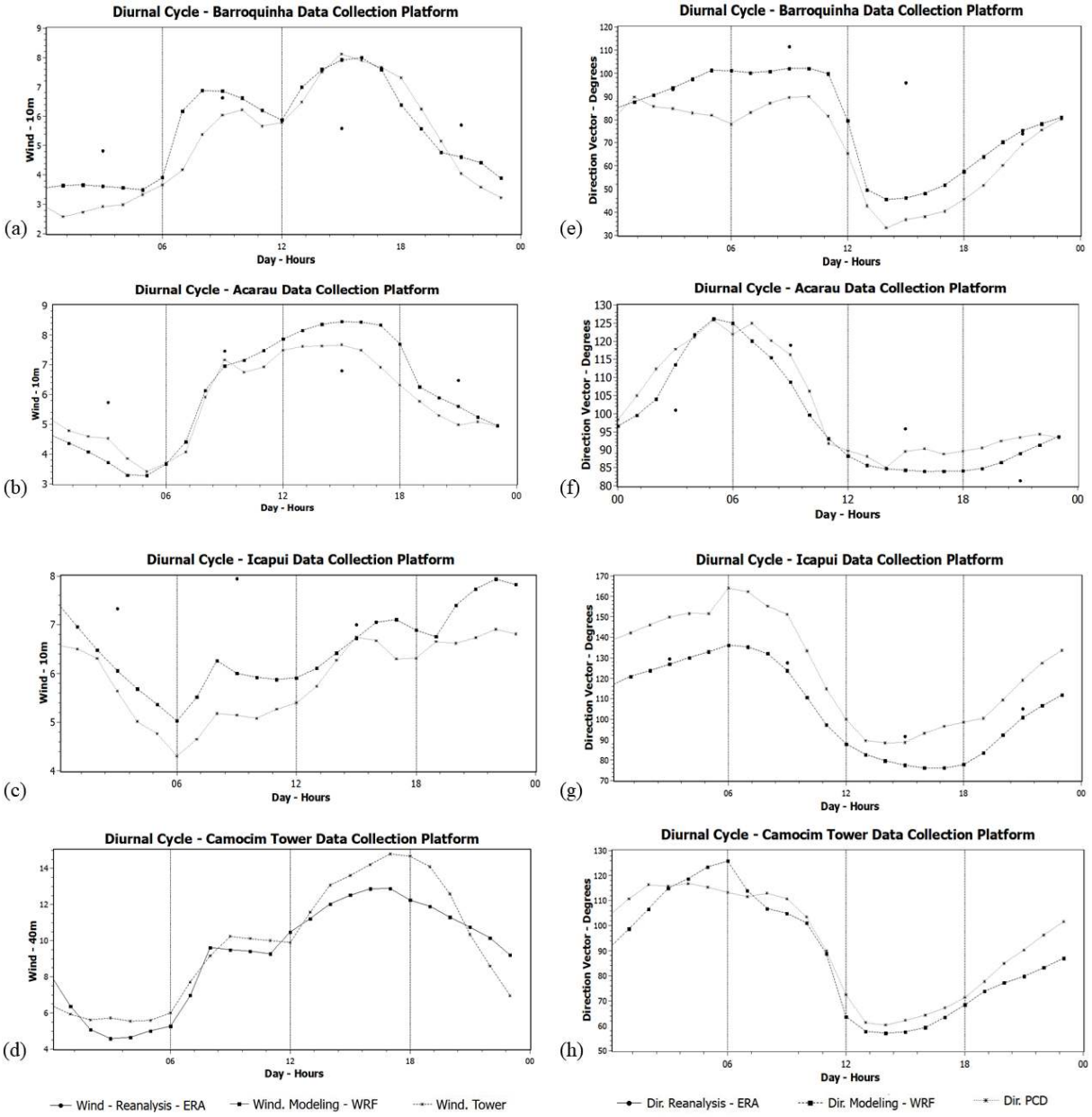
Observa-se que a modelagem captura, nas quatro localidades verificadas, o ciclo diurno induzido pela alternância entre brisas terrestre e marítima, o que mostra que a dinâmica das brisas é bem resolvida pelo WRF. Apesar das tendências observadas serem bem reproduzidas, o modelo não tem acurácia para os valores máximos e mínimos observados, uma deficiência persistente na modelagem atmosférica regional em geral. Esta imprecisão, na reprodução dos extremos, tem consequências negativas na construção do ciclo diurno dos ventos mostrados na Figura 6.

Figura 5 - Valores observados e modelados durante os seis primeiros dias de setembro de 2005 de intensidade (primeira coluna) e direções (segunda coluna) dos ventos para as localidades de Barroquinha, Acaraú, Icapuí (PCDS, 10m) e Camocim (torre, 40m).



Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Figura 6 - Valores observados e modelados de intensidade (primeira coluna) e direções (segunda coluna) durante 24 horas mostrando o ciclo diurno dos ventos para as localidades de Barroquinha, Acaraú, Icapuí (PCD's, 10m) e Camocim (torre, 40m).



Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

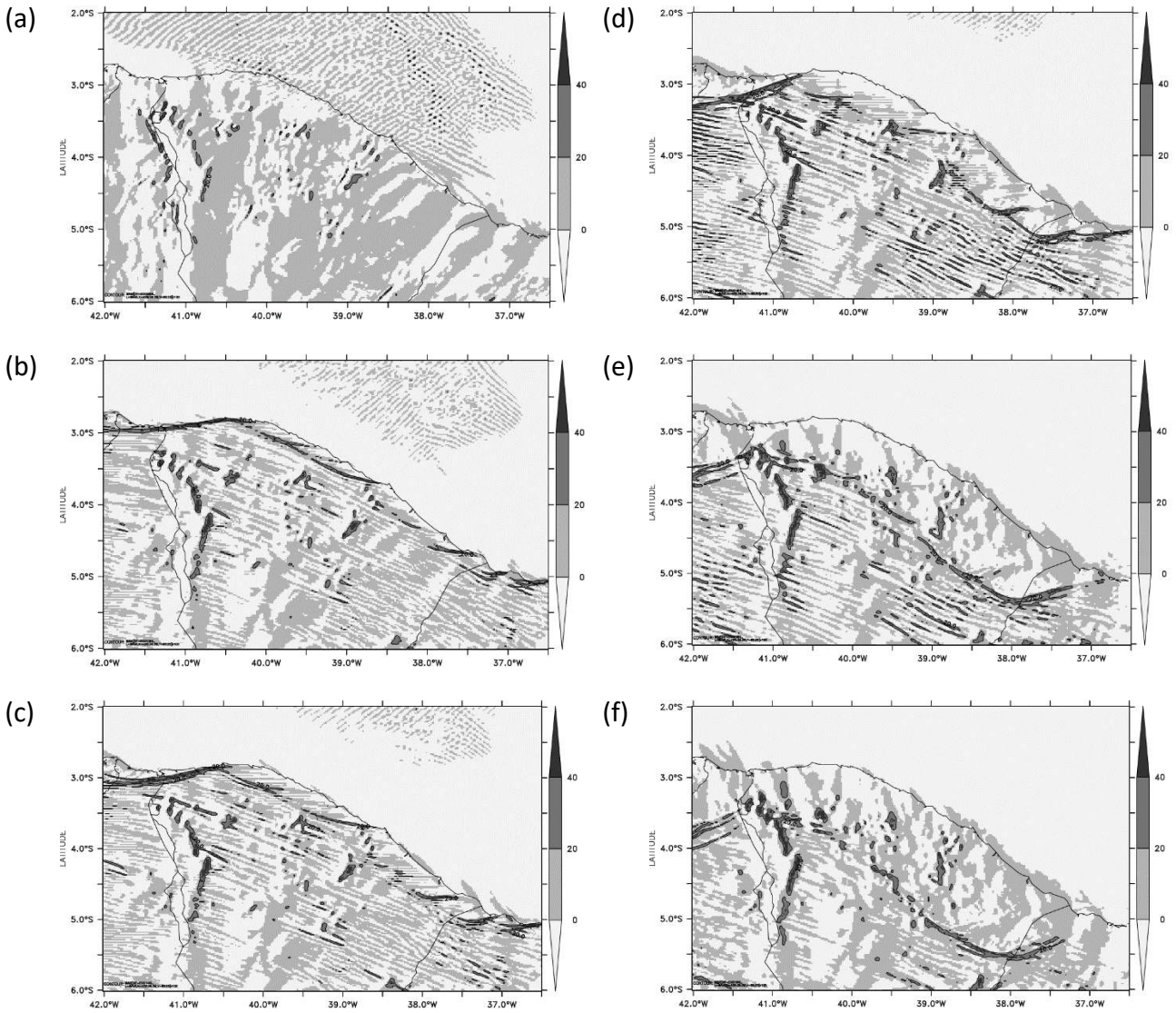
A análise do ciclo diurno, Figura 6, mostra que, com exceção de Icapuí, o vento superficial começa a diminuir de intensidade por volta das 16 ou 18 LST, continuando em queda até às 06 LST. Durante este período a componente *offshore* do vento se intensifica, caracterizando a brisa terrestre. Uma estabilidade atmosférica próxima à superfície provocada pelo esfriamento da superfície e a redução da componente oceânica dos ventos explicam a queda na intensidade do vento durante a noite. No leste do LC, em Icapuí, esta dinâmica se altera, pois os ventos se intensificam das 18 às 22 LST (Figura 6c). Nesta

localidade a SBF intercepta a costa no final da tarde em uma região de vales do Rio Jaguaribe provocando um afunilamento e intensificação dos ventos de brisa marítima. Por volta das 06 LST, com o desenvolvimento da brisa marítima, o vento começa a aumentar de intensidade e acentua-se a componente oceânica, atingindo o máximo de intensidade por volta das 15 ou 16 LST, horário em que a componente *onshore* é máxima.

Os padrões do ciclo diurno em setembro variam acentuadamente de uma PCD's para outra (espacialmente). Porém, para cada localidade, estes padrões são mantidos de um ano para outro com pequenas variações, principalmente nas direções (Figura 6 e, f, g e h). Verificam-se variações interanuais máximas, para cada horário e localidade, menores que 0,6 m/s e 25^0 para intensidade e direção, respectivamente. Esta baixa variabilidade interanual é esperada em setembro.

A Figura 7 mostra a velocidade vertical média modelada pelo WRF na camada entre 500 e 1000 m acima da superfície. A escala de cinza corresponde à velocidade positiva, ou seja, movimento ascendente na camada, e os trechos em branco indicam subsidência. Os contornos destacam velocidades ascendentes acima de 20 cm/s. As 06 LST a brisa terrestre se destaca, predominando a convecção sobre o oceano. Neste horário a alternância periódica entre vento ascendente e descendente, cinza e branco na figura, sugere a formação dos HCRs sobre o oceano (Figura 7a). Às 12 LST a SBF, identificada pela linha quase paralela à costa onde a velocidade vertical excede os 20 cm/s, encontra-se no continente, nas proximidades da costa. A SBF avança para o interior do continente durante a tarde e intercepta a costa nas concavidades leste e oeste. A área de subsidência sobre o oceano se amplia. Por volta das 16 LST (figura 7d), a alternância entre faixas cinzas e brancas atrás da SBF paralelas ao vento médio e que identificam os HCRs, está mais destacada. O avanço da SBF no continente persiste mesmo após o pôr do sol. A dinâmica modelada do avanço da SBF e da formação dos HCRs está em concordância com as observações das imagens de satélite e dados de DLI e SSI (Figuras 2, 3 e 4).

Figura 7 - Velocidade vertical média de 16m/s na camada entre 500 e 1000m acima da superfície nos horários de (a) 06, (b) 12, (c) 14, (d) 16, (e) 18 e (f) 19 LST.



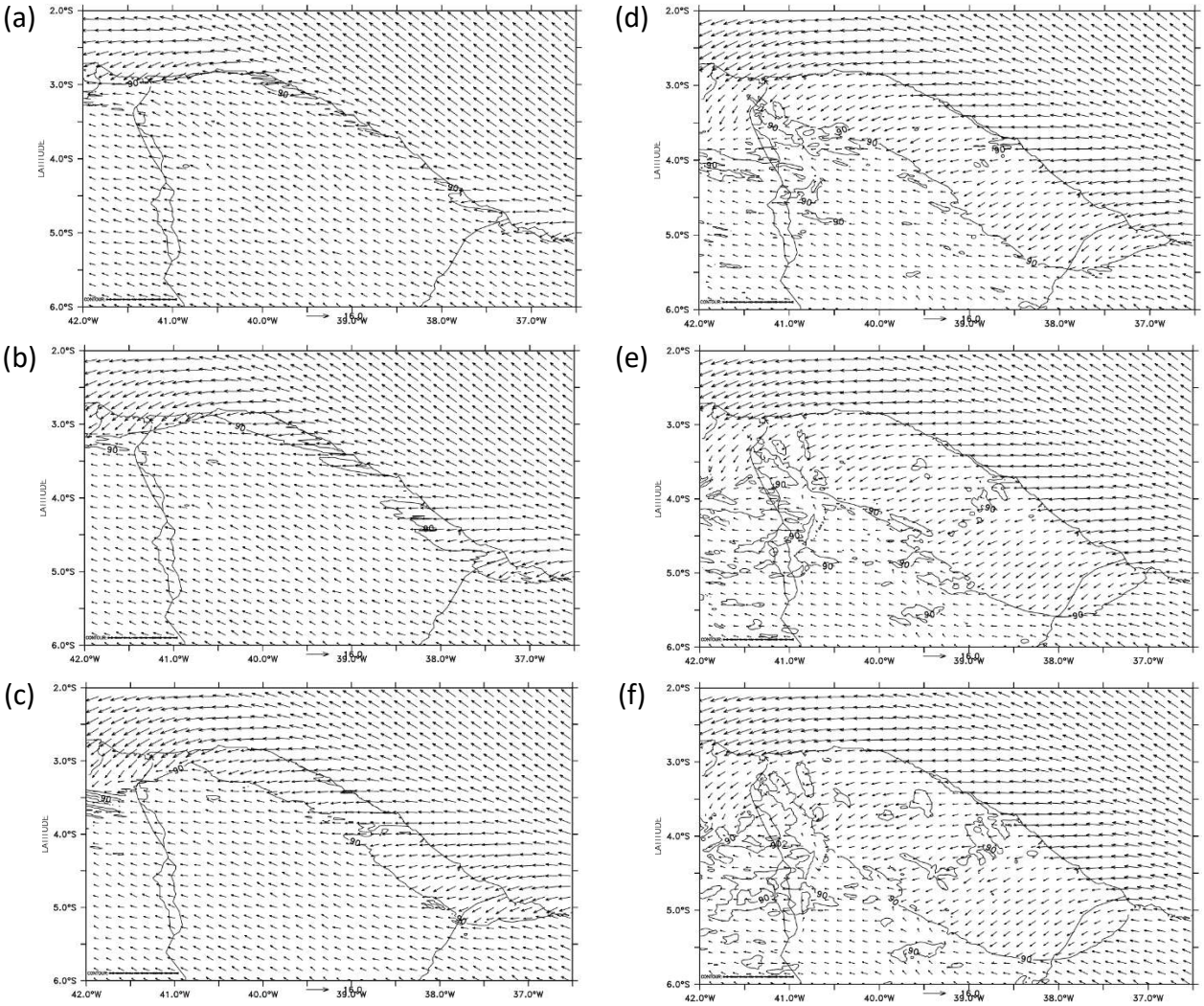
Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Os dados modelados exibidos na Figura 8 mostram que a mesma dinâmica se reproduz se considerarmos apenas os ventos superficiais.

A Figura 8 mostra o vento horizontal modelado a 10 m acima da superfície às (a) 6, (b) 12, (c) 14, (d) 16, (e) 18h e (f) 20 LST. A linha de contorno sobre o continente, destacada na figura, delimita os pontos onde o vento médio sopra de leste, separando os ventos de nordeste, acima da linha, dos ventos de sudeste, abaixo da linha. Esta linha pode ser considerada como a posição aproximada da SBF em baixos níveis. Às 6 LST, quando se inicia o gradiente térmico que dá origem a brisa marítima, o vento de baixos níveis converge inicialmente para o continente nas concavidades leste e oeste, soprando quase paralelo à

costa no restante do litoral. As 12 LST os ventos costeiros ainda sopram quase paralelo à costa, exceto nas concavidades, onde se intensifica o vento *onshore* (Figura 8a, 8b e 8c). Isto sugere que o avanço da SBF se inicia nas concavidades. A SBF continua avançando para o interior do continente durante a tarde, alcançando sua profundidade máxima por volta das 20 LST. A intersecção da SBF nos vales situados nas concavidades leste e oeste produz afunilamento dos ventos de baixos níveis, produzindo ventos mais fortes nessa região.

Figura 8 - Vetor direção e velocidade do vento vertical média em m/s na camada entre 500 e 1000m acima da superfície. Cada vetor equivale a médias de 16m/s.



Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

CONCLUSÃO

Os fenômenos de brisas terrestre e marítima determinam os padrões de ventos em baixos níveis no LC. Neste trabalho algumas características da componente marítima das

brisas são analisadas utilizando imagens de satélite, dados de ondas curtas e ondas longas derivados de imagens de satélites e dados de PCD's.

Verificou-se a capacidade da modelagem regional utilizando o modelo WRF em reproduzir estas características. Quando as condições meteorológicas são favoráveis e não existem outros sistemas convectivos atuando além das brisas, é possível identificar uma linha de nuvens, quase paralela à costa, e que avança para o interior do continente durante a tarde, a SBF. A evolução da SBF durante a tarde e sua dissipação no início da noite pode ser facilmente acompanhada por imagens de satélite.

Dados dos ventos de estações meteorológicas no litoral mostram que a alternância entre brisa terrestre e marítima modulam o ciclo diurno dos ventos no LC. Por volta das 6 LST a brisa terrestre está no seu apogeu, com ventos soprando de sudeste com a componente offshore do vento sendo máxima. Após o nascer do sol, o gradiente de pressão continente/oceano se intensifica gradualmente e por volta das 12 LST a SBF se encontra no continente, nas proximidades da costa. Simulações com o WRF mostram que o modelo captura as tendências observadas em escala diária nos ventos costeiros superficiais, ou seja, o ciclo diurno é bem reproduzido pelo WRF para todas as PCD'S utilizadas. O desempenho do modelo, no entanto, se reduz nas concavidades leste e oeste nos extremos do LC, provavelmente em decorrência da presença de heterogeneidades superficiais mal resolvidas pelo WRF. Estas concavidades têm um papel fundamental na evolução da brisa marítima. Imagens de satélite mostram que a SBF, ao avançar para o interior do continente durante a tarde, intercepta a costa nas concavidades.

Observou-se que a técnica do *dynamical downscaling* utilizando o modelo WRF resulta em ganho real de previsibilidade em relação a informação de grande escala (reanálise ERAI) que alimenta o modelo. O ERAI não resolve adequadamente o ciclo diurno dos ventos costeiros, provavelmente em função de sua baixa resolução. Observou-se, em comparações com imagens de satélite, que o modelo reproduz o avanço observado da SBF para o interior do continente durante a tarde, em baixos e médios níveis, e a intersecção da SBF com a linha da costa nas concavidades leste e oeste. O modelo reproduz também a formação dos HCRs: a alternância entre velocidade vertical positiva e negativa nas extremidades dos rolos. A modelagem não tem, no entanto, resolução espacial suficiente para capturar mais detalhes da dinâmica dos HCRs.

O modelo mostra que no início da evolução da brisa marítima, quando o sol nasce, os ventos costeiros sopram quase paralelos à costa e convergem gradualmente para o continente com o avanço da brisa marítima. Esta convergência inicia, e é mais acentuada, nas concavidades leste e oeste, sugerindo que a SBF evolui inicialmente a partir das concavidades. O bom desempenho do modelo WRF em reproduzir o ciclo diurno dos ventos modulados pela alternância entre brisa terrestre e marítima sugere que o modelo regional possa ser utilizado para estudar a estrutura vertical da brisa marítima durante seu avanço para o continente.

Conclui-se que o modelo WRF, com as configurações utilizadas neste trabalho, foi capaz de reproduzir as principais características observadas do ciclo diurno de cada localidade analisada, comprovando que a ferramenta útil na área de modelagem atmosférica para a região.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Curso de Mestrado Acadêmico em Ciências Físicas Aplicadas (CMACFA) e a Universidade Estadual do Ceará (UECE).

REFERÊNCIAS

ARRILLAGA, Jon A.; YAGÜE, Carlos; SASTRE, Mariano; ROMÁN-CASCÓN, Carlos. A characterisation of sea-breeze events in the eastern Cantabrian coast (Spain) from observational data and WRF simulations. **Atmospheric Research**, *[S. l.]*, v. 181, p. 265–280, 2016.

CAMELO, Henrique do Nascimento; VASCONCELOS, Ariane Eduarda; LUCIO, Paulo Sérgio; JUNIOR, João Bosco Verçosa Leal. Potência Eólica instalada no Estado do Ceará e Impacto em sua Matriz Energética. **Conexões - Ciência e Tecnologia**, *[S. l.]*, v. 11, n. 3, p. 100–112, 2017.

CEARÁ, Governo do Estado do. Diagnós**tico e Macrozoneamento Ambiental do Estado do Ceará:** Diagnóstico Geoambiental. v.1. Fortaleza: Convênio FCPC/Semace, 1998.

CEPEL, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (2017). **Atlas Eólico Brasileiro:** Simulações 2013. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica-CEPEL - Rio de Janeiro: Brasil. Disponível em: https://novoatlas.cepel.br/. Acesso em: 23 nov. 2018.

CHEMEL, Charles; SOKHI, Ranjeet S. Response of London's urban heat island to a marine air intrusion in an easterly wind regime. **Boundary-Layer Meteorology**, *[S. l.]*, v. 144, n. 1, p. 65–

81, 2012.

COMIN, Alcimoni Nelci; ACEVEDO, Otávio Costa. Numerical Simulation of Sea Breeze Convergence over Antarctic Peninsula. **Advances in Meteorology**, *[S. l.]*, v. 2017, 2017.

DA SILVA, Emerson Mariano; SOMBRA, Bruno Pires; LIRA, Marcos Antonio Tavares; ALVES, José Maria Brabo; DE LIMA, Francisco José Lopes. Evaluation of the Wind Fields in the Semi-Arid Region in Northeastern Brazil Using RAMS Model. **Revista Brasileira de Meteorologia**, *[S. l.]*, v. 32, n. 3, p. 485–494, 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional**. *[S. l.]*, 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br. Acesso em: 19 nov. 2018

FEDOROVA, NATALIA. **Meteorologia sinótica**. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas. Editora Universitária, v.1, p. 242. 2001.

FERREIRA, Antonio Geraldo; GIOVANNI, Namir; MELLO, Silva. PRINCIPAIS SISTEMAS ATMOSFÉRICOS ATUANTES SOBRE A REGIÃO NORDESTE DO BRASIL E A INFLUÊNCIA DOS OCEANOS PACÍFICO E ATLÂNTICO NO CLIMA DA REGIÃO. **Revista Brasileira de Climatologia**, *[S. l.]*, v. 1, n. 1, 2005.

FOX, Douglas G. Judging air quality model performance: a summary of the ams workshop on dispersion model performance, woods hole, mass., 8-11 de setembro de 1980. **Bulletin of the American Meteorological Society**, *[S. l.]*, v. 62, n. 5, p. 599-609, 1981.

FUNCEME. **Compartimentação Geoambiental do Estado do Ceará**. Fortaleza, 2009. 37 p.

HALLAK, Ricardo; PEREIRA FILHO, Augusto José. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, *[S. l.]*, v. 26, n. 4, p. 591–608, 2011.

HERDIES, D. L. A influência das caracteristícas físicas e geográficas no leste do Nordeste do Brasil utilizando o modelo RAMS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10., 1998, Brasilia-DF. **Anais [...]**, Rio de Janeiro: SBMET, 1998. Disponível em http://www.cbmet.com. Acesso em: 18 jan. 2018.

HONG, Song-You; NOH, Yign; DUDHIA, Jimy. Um novo pacote de difusão vertical com um tratamento explícito dos processos de arrastamento. **Revisão mensal do tempo** , *[S. l.]*, v. 134, n. 9, p.2318-2341, 2006.

IACONO, Michael J.; DELAMERE, Jennifer S.; MLAWER, Eli J.; SHEPHARD, Mark W.; CLOUGH, Shepard A.; COLLINS, William D. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, *[S. l.]*, v. 113, n. D13, p. 13103, 2008.

KESSLER, Edwin. On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulations. **On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulations**, *[S. l.]*, p. 1–84, 1969.

KUSAKA, Hiroyuki; CHEN, Fei; TEWARI, Mukul; DUDHIA, Jimy; GILL, David O.; DUDA, Michael G.; WANG, Wei; MIYA, Yukako. Numerical Simulation of Urban Heat Island Effect by the WRF Model with 4-km Grid Increment: An Inter-Comparison Study between the Urban Canopy Model and Slab Model. **Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II**, *[S. l.]*, v. 90B, n. B, p. 33–45, 2012.

LIMA, J. Francisco; Lopes; VALTER DE SOUZA GUEDES, Roni; NUNES DA SILVA, Ana Paula; MARIANO DA SILVA, Emerson. Avaliação do Potencial Eólico no Município de Jaguaruana, Litoral Cearense. **Ciência e Natura**, *[S. l.]*, v. 33, n. 1, p. 101–115, 2011.

LIN, Chuan Yao; CHEN, Fei; HUANG, J. C.; CHEN, W. C.; LIOU, Y. A.; CHEN, W. N.; LIU, Shaw C. Urban heat island effect and its impact on boundary layer development and land–sea circulation over northern Taiwan. **Atmospheric Environment**, *[S. l.]*, v. 42, n. 22, p. 5635–5649, 2008.

MORAES, Nilton Oliveira; MARTON, Edilson; PIMENTEL, Luiz Claudio Gomes. MM5 and WRF Performance Analysis Through Simulation of Surface Air Temperature in MRRJ. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 37, n. 2, p. 161-168, 2014.

NIU, Guo Yue et al. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, *[S. l.]*, v. 116, n. D12, p. 12109, 2011.

PAULSON, Ca A. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer**. Journal of Applied Meteorology and Climatology**, *[S. l.]*, v. 9, n. 6, p. 857-861, 1970.

PIELKE, Roger A. **Mesoscale meteorological modeling.** 2 ed. Rev. e atual. Estados Unidos da América: Academic Press, v. 78, 2002. 676 p. il. (International Geophysics Series) ISBN: 97-80-08049182-0

PIMENTA, Felipe M.; SILVA, Allan R.; ASSIREU, Arcilan T.; ALMEIDA, Vinicio de S. e; SAAVEDRA, Osvaldo R. Brazil Offshore Wind Resources and Atmospheric Surface Layer Stability. **Energies**, *[S. l.]*, v. 12, n. 21, p. 4195, 2019.

PRYOR, Sara C.; SHEPHERD, Tristan J.; VOLKER, Patrick J. H.; HAHMANN, Andrea N.; BARTHELMIE, Rebecca J. “Wind Theft” from onshore wind turbine arrays: Sensitivity to wind farm parameterization and resolution**. Journal of Applied Meteorology and Climatology**, *[S. l.]*, v. 59, n. 1, p. 153–174, 2020.

RAMOS DA SILVA, R.; UBARANA, V. N.; GANDU, A. W. Simulação da Circulação de Brisa em Fortaleza Usando o Modelo RAMS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 9., 1996, Campos do Jordão-SP. **Anais [...]**, Rio de Janeiro: SBMET, 1996. p. 1023-1027. Disponível em http://www.cbmet.com. Acesso em: 18 jan. 2018.

REBOITA, Michelle Simões; MARIETTO, Diogo Malagutti Gonçalves; SOUZA, Amanda; BARBOSA, Marina. CARACTERIZAÇÃO ATMOSFÉRICA QUANDO DA OCORRÊNCIA DE EVENTOS EXTREMOS DE CHUVA NA REGIÃO SUL DE MINAS GERAIS. **Revista Brasileira de Climatologia**, *[S. l.]*, v. 21, n. 0, 2017.

ROSITA DEWI, D. M. Per.; FATMASARI, D.; GUSTARI, I. Simulation of Sea Breeze Events in Gulf

of Jakarta under Different Synoptic Condition: An Application of WRF Model. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, *[S. l.]*, IOP Publishing., v. 303, n. 1, p. 1-11, 2019.

SALAMANCA, Francisco; MARTILLI, Alberto; YAGÜE, Carlos. A numerical study of the Urban Heat Island over Madrid during the DESIREX (2008) campaign with WRF and an evaluation of simple mitigation strategies. **International Journal of Climatology**, *[S. l.]*, v. 32, n. 15, p. 2372–2386, 2012.

SILVA, Allan Rodrigues; PIMENTA, Felipe Mendonça; ASSIREU, Arcilan Trevenzoli; SPYRIDES, Maria Helena Constantino. **Complementarity of Brazils hydro and offshore wind powerRenewable and Sustainable Energy Reviews** *[S. l.]*: Elsevier Ltd, 2016.

STEELE, C. J.; DORLING, S. R.; VON GLASOW, R.; BACON, J. Idealized WRF model sensitivity simulations of sea breeze types and their effects on offshore windfields. **Atmospheric Chemistry and Physics**, *[S. l.]*, v. 13, n. 1, p. 443–461, 2013.

TEIXEIRA, Raul Fritz Bechtel. O fenômeno da brisa e sua relação com a chuva sobre Fortaleza-CE. **Revista Brasileira de Meteorologia**, *[S. l.]*, v. 23, n. 3, p. 282–291, 2008.

WILKS, Daniel. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. 2 ed. Rev. e atual. Estados Unidos da América: Academic Press, v. 91, 2006. 627 p. il. (International Geophysics Series) ISBN: 978-0123850225

WILLMOTT, Cort J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, *[S. l.]*, v. 63, n. 11, p. 1309-1313, 1982.