



**Refratividade Atmosférica em Áreas Oceânicas Baseada em Dados
de Sondagem Atmosférica na Região da Ilha de Trindade**
Atmospheric Refractivity in Ocean Areas Based on Atmospheric
Sounding Data in the Trindade Island Region

Daniel Cremonini Baptista¹, Rogério Neder Candella¹,
José Francisco de Oliveira-Júnior² & Tânia Ocimoto Oda¹

¹Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira - IEAPM, Arraial do Cabo, RJ, Brasil.

²Instituto de Ciências Atmosféricas (ICAT), Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Maceió, AL, Brasil
cremonini@lamma.ufrj.br, r.candella@marinha.mil.br, junior_inpe@hotmail.com, tania.ocimoto@marinha.mil.br

Recebido em: 17/06/2020 Aprovado em: 01/09/2020

DOI: http://doi.org/10.11137/2020_3_444_454

Resumo

A região costeira do Brasil possui um intenso tráfego marítimo, composto de vários tipos de embarcações. A segurança da navegação é importante e, portanto, as embarcações são dotadas de equipamentos de comunicação e detecção, sendo o desempenho desses fortemente influenciado pelas condições da propagação eletromagnética na atmosfera. Condições anômalas na propagação eletromagnética são causadas por acentuados gradientes verticais da refratividade atmosférica, que podem ser avaliados com a utilização do índice de refratividade atmosférica M . O objetivo principal deste trabalho é avaliar as condições de refratividade atmosférica e estimar as alturas dos dutos atmosféricos baseado nesse índice, utilizando os dados de sondagens atmosféricas na região da Ilha da Trindade, entre os anos de 2005 e 2016. Os resultados obtidos mostraram a presença de 3348 dutos de superfície, sendo aproximadamente 65% das alturas abaixo de 220 m. As maiores médias de altura foram observadas nos meses de inverno, principalmente em junho e julho. Já os menores valores foram observados no mês de dezembro. Nos estudos de casos, a avaliação dos perfis termodinâmicos demonstrou que, nos dias com ocorrência de dutos, foram observadas camadas instáveis próximas à superfície oceânica e camadas estáveis acima dessas. As condições sinóticas foram caracterizadas pela presença de um sistema de alta pressão ou pela atuação da Alta Subtropical Atlântico Sul. No episódio com ausência de dutos de superfície, foi registrada a presença de um sistema frontal, bem como um gradiente vertical nulo de umidade e a presença de uma camada limite estável e, assim inibe a formação de dutos.

Palavras-chave: Propagação eletromagnética; Dutos atmosféricos; Caracterização climatológica

Abstract

The Brazilian coastal region has an intense maritime traffic, composed by several types of ships. The safety of navigation is important and therefore these ships are equipped with communication and detection equipment, and their performances are strongly influenced by the conditions of electromagnetic propagation in the atmosphere. Anomalous conditions in electromagnetic propagation are caused by sharp vertical gradients of atmospheric refractivity, which can be evaluated using the M index. Therefore, the main objective of this work is to evaluate atmospheric refractive conditions and estimate the heights of atmospheric ducts based on this index, using data from atmospheric soundings in the region of Trindade Island, from 2005 to 2016. The results showed the presence of 3348 surface ducts, being approximately 65% of the heights below 220 m. The highest averages of height were observed in the

winter months, especially in June and July. The lowest values were observed in December. In the case studies, the evaluation of the thermodynamic profiles showed that on the days with ducts, unstable layers near the ocean surface are presented, and stable layers above them were observed. The synoptic conditions were characterized by the presence of a high pressure system or by the influence of the Subtropical South Atlantic High. In the episode without surface duct, the presence of a frontal system was verified, as well as a null vertical gradient of humidity and the presence of a stable boundary layer, and thus inhibits the formation of ducts.

Keywords: *Electromagnetic propagation; Atmospheric ducts; Climatology characterization*

1 Introdução

O transporte aquaviário no Brasil é de suma importância para a economia, devido às relações de exportação e importação (Neto, 2010). Com isso, a região marítima do Brasil possui um intenso tráfego, composto por vários tipos de embarcações. Para garantir a segurança da navegação, tais embarcações são dotadas de equipamentos de comunicação e detecção como, por exemplo, rádios e radares. Esses equipamentos são capazes de detalhar as informações sobre o ambiente, tais como, posição de outros navios e aeronaves ao seu redor, assim como seus rumos e velocidades, bem como identificar relevos e acidentes geográficos (Miguens, 1996).

O RADAR (*Radio Detection And Ranging*) mede a intensidade de sinal retroespalhado por um alvo sobre o qual incidiu a energia eletromagnética transmitida pelo sistema (Moraes, 2011). O desempenho do RADAR é fortemente influenciado pelas condições da propagação eletromagnética na atmosfera, sendo que essa propagação é associada às condições de refratividade nas camadas próximas à superfície do mar e das variações verticais do vapor d'água na atmosfera (Oliveira Júnior *et al.*, 2005). Segundo Chaves Filho *et al.* (2013), variabilidades na intensidade e direção do vento, temperatura do ar e na umidade atmosférica podem refletir em condições anômalas de propagação eletromagnética, com isso aumentando ou reduzindo o alcance das comunicações. Assim, torna-se essencial considerar não apenas o ambiente de grande ou mesoescala, mas também os efeitos de microescala (Brooks *et al.*, 1999).

No Brasil, Chaves Filho *et al.* (2013) avaliaram a influência das condições atmosféricas na formação de dutos troposféricos no semiárido brasileiro, região de Petrolina, em Pernambuco. Para isso, os autores utilizaram dados de radiossondas coletados entre janeiro e outubro de 2007. No estudo, constataram que mudanças significativas no padrão da circulação atmosférica afetaram substancialmente a estrutura termodinâmica e a distribuição vertical do vapor d'água, o que mostrou uma forte relação entre as inversões de subsidência, com o elevado número de dutos de altitude no período de estiagem. Por fim, concluíram que eventos extremos na região estão associados com condições anômalas de refratividade, que podem afetar significativamente o sinal de radiopropagação.

Também na região de Petrolina, Pernambuco, Correia *et al.* (2018) avaliaram como a atuação do sistema sinótico denominado Vórtices Ciclônicos de Alto Níveis (VCAN) pode influenciar na estrutura da Camada Limite Atmosférica (CLA) e, ainda, gerar condições favoráveis à formação de dutos de superfície, exclusivamente para os meses de janeiro no período de 2000 a 2014. Os autores verificaram que os dutos de superfície foram significativamente maiores em meses com escassez de chuvas. No mês de janeiro de 2004, extremamente chuvoso, os dutos de superfície foram menos frequentes, em comparação àqueles observados em 2001 e 2007, anos caracterizados por uma grande redução no volume de chuva. A persistência e a posição geográfica do VCAN foram preponderantes na caracterização das mudanças no padrão de refração atmosférica e formação de dutos atmosféricos. Os autores constataram ainda que na ausência de atividades convectivas intensas, a influência das condições meteorológicas locais se torna dominante na formação dos dutos de superfície da região de Petrolina.

Zhang *et al.* (2016) realizaram um estudo sobre a variabilidade espacial e temporal dos dutos de evaporação no Golfo do Áden, situado no Mar de Omã, no norte do Oceano Índico, entre a Somália e o Iêmen, baseado em dados climatológicos do *National Centers for Environmental Prediction Climate Forecast System Reanalysis* (NCEP CFSR) - (1979 a 2009). Eles verificaram que a altura dos dutos de evaporação na região era fortemente influenciada pelos ventos monçônicos que se invertem sazonalmente. O estudo também revelou que a altura dos dutos na região, no período do verão, aumenta substancialmente no mar vizinho da Arábia, devido às reversões que as monções induzem nos fatores atmosféricos e oceânicos, sendo a variação desses fatores regulada pela flutuação sazonal do duto de evaporação. Por fim, os autores mostraram que a altura dos dutos tem um grande efeito no funcionamento do radar a bordo das embarcações no Golfo de Áden.

Assim, os dutos de evaporação são comuns em ambientes marítimos, podendo ter efeitos profundos na propagação de microondas e, dessa forma, afetar as operações navais envolvendo comunicações, vigilância, guerra eletrônica e detecção de mísseis de baixa altitude, navios de superfície ou periscópios submarinos. Diante disso, fica clara a importância de se avaliar a formação e intensificação dos dutos de evaporação e sua influência nas

comunicações em ambientes marítimos na costa brasileira (McKeon, 2013).

O objetivo deste trabalho é avaliar as condições de refratividade atmosférica, baseado no índice modificado (M), para a região da Ilha da Trindade. Para isso, foi realizada uma análise estatística dos dutos atmosféricos com base na estimativa das alturas predominantes. A altura dos dutos também foi avaliada sob o aspecto termodinâmico e diferentes condições sinóticas.

2 Metodologia

2.1 Caracterização e Localização da Área de Estudo

A Ilha da Trindade, com 9,2 km², está situada no oceano Atlântico, nas coordenadas 20,50°S e 29,31°W, Figura 1, aproximadamente no paralelo de Vitória-ES, a uma distância de 1140 km da costa. Segundo a Marinha do Brasil, o clima é do tipo oceânico tropical. A temperatura média anual é de 25,2°C, sendo o mês de fevereiro (30,2°C) o mais quente do ano e o de agosto (17,3°C) o mais frio. Entre os meses de abril a outubro, ocorrem passagens de frentes frias, com periodicidade aproximada de uma semana. De acordo com IEAPM, (2015), as águas que circundam Trindade e Martin Vaz são transportadas pela Corrente do Brasil e estão caracterizadas pela alta salinidade e temperatura de 25,37°C.

2.2 Índice de Refratividade Atmosférico (M)

A metodologia utilizada nas estimativas de ocorrência de dutos atmosféricos consistiu no cálculo e análises do perfil vertical do índice M. Os cálculos do índice

M foram desenvolvidos no software MATLAB versão R2015a, bem como das variáveis necessárias para sua estimativa: a pressão parcial de vapor d'água na atmosfera, e_a , em kPa (Equação 1) e a pressão de saturação de vapor d'água na atmosfera, e_s , também em kPa de acordo com a Equação 2.

$$e_a = \frac{UR \cdot e_s}{100} \quad (1)$$

$$e_s = 0,6108 \cdot 10^{\left[\frac{7,5T}{237,5+T}\right]} \quad (2)$$

onde UR é a umidade relativa do ar (%) e T a temperatura do ar (K).

O índice M é definido pela Equação 3.

$$M = N + \frac{z}{10^{-6} \cdot r_a} N + 0,157z \quad (3)$$

onde N é a refratividade dentro da camada mais baixa da atmosfera, z (km) é altura e r_a (km) é o raio da Terra. M é adimensional (Bean & Dutton, 1968). A umidade é a principal razão das variações de N, mas acima de 5 km de altura, a contribuição é totalmente afetada pelas flutuações de temperatura (Oliveira Júnior *et al.*, 2005). A partir desse fato, N (hPa.t⁻¹) é descrito em função das seguintes características termodinâmicas,

$$N = N_s + N_u \quad (4)$$

$$N_s = 776 \cdot (P/T) \quad (5)$$

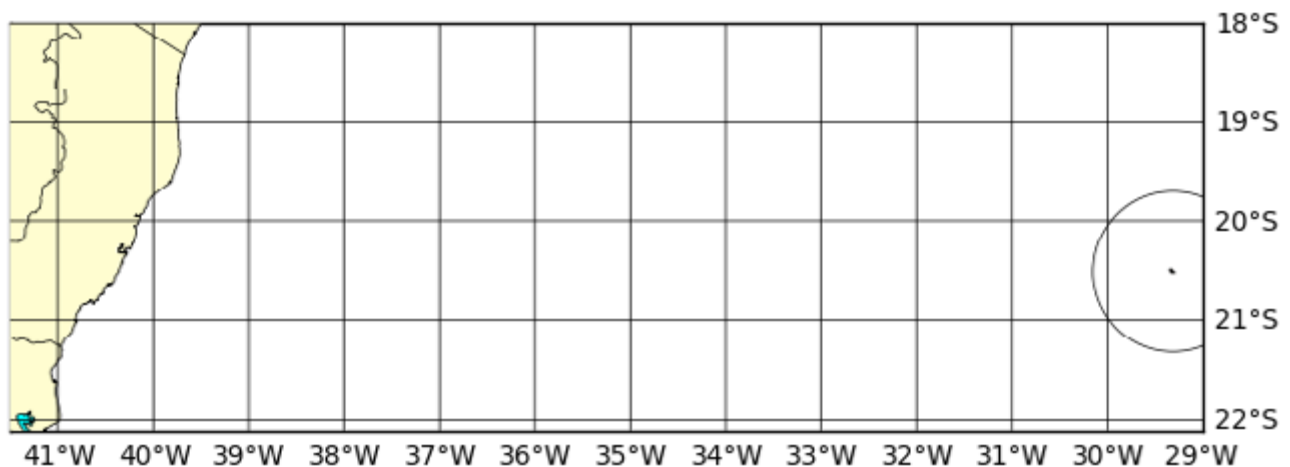


Figura 1 Região Oceânica da Ilha da Trindade (círculo preto).

$$N_u = 3,73 \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{e_a}{T^2}\right) \quad (6)$$

onde N_s ($\text{hPa} \cdot \text{t}^{-1}$) é referente ao caso seco, N_u ($\text{hPa} \cdot \text{t}^{-1}$) ao caso úmido, P é a pressão atmosférica (hPa) e T a temperatura do ar (K). Segundo Karimian *et al.* (2011), a vantagem de utilizar o índice de refração modificado é transformar um problema de propagação esférico em um plano. Tal transformação mapeia um meio estratificado esféricamente sobre uma Terra aproximadamente esférica para um meio estratificado plano sobre uma Terra plana. Esta transformação resulta em menos de 1% de erro para faixas menores que $r_a/3$, independente do comprimento de onda (Pekeris, 1946).

Os perfis de gradiente de M com a altura foram avaliados, para determinar os pontos onde ocorreram as inversões, determinar a presença de dutos e calcular suas estatísticas, uma vez que a presença de um gradiente negativo na refratividade modificada indica a existência de um duto (Babin, 1995; Craig, 2003; Brooks *et al.*, 1999).

Na avaliação de M para a região de estudo, foram utilizados dados observados do perfil atmosférico, extraídos das radiossondagens da estação meteorológica de altitude (EMA) do Posto Oceanográfico da Ilha da Trindade. As observações foram obtidas no horário UTC (*Universal Coordinated Time*), num total de 3377 medições. As análises contemplam 11 anos de dados consecutivos (2005-2016). Apesar de não representarem uma climatologia, na acepção do termo, são capazes de estimar, de forma razoável, as condições médias para região de estudo.

Embora a resolução vertical e temporal das radiossondagens não sejam as mais adequadas para a finalidade deste estudo, é importante ressaltar que esses dados são a única fonte disponível para realizar o estudo sobre o perfil vertical da atmosfera na região.

Após uma triagem, as sondagens que apresentaram valores inconsistentes ou não possuíam medidas nos níveis significativos importantes para os cálculos foram descartadas, a fim de evitar estimativas espúrias.

3 Resultados e Discussão

3.1 Estatísticas Descritiva e Exploratória Aplicadas a Série Temporal

Com base em 3377 sondagens atmosféricas realizadas na área de estudo, foram observados 3348 dutos de evaporação, correspondente a 99% da série temporal, sendo 2183 (64,6%) com altura menor que 220 m. Vale ressaltar que, em regiões oceânicas, a distribuição vertical de umidade e temperatura pode variar de forma abrupta, sendo dependente da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e da mistura turbulenta próxima à superfície. Portanto, as

alturas dos dutos atmosféricos são modeladas em função da estabilidade atmosférica, quando as condições próximas à superfície são consideradas instáveis (estáveis), em episódios em que a temperatura do ar for maior (menor) que a TSM. Essa situação favorece a turbulência e fluxos de calor e umidade do oceano para atmosfera (Twigg, 2007). Diante disso, os resultados obtidos sugerem que a maior ocorrência de situações de estabilidade atmosférica ocasionada por inversões térmicas na região da Ilha de Trindade, onde a TSM média da região é de 25,37°C (IEAPM, 2015), é o principal motivo para a ocorrência da formação de dutos atmosféricos.

A distribuição temporal das alturas dos dutos de superfície é observada na Figura 2. No estudo, foram identificadas três faixas de alturas: i) até 120 m (maior frequência), ii) entre 120 e 220 m e iii) de 800 a 900 m. Na Figura 3, é mostrada a probabilidade de ocorrência na formação de dutos atmosféricos na Ilha da Trindade, sendo 64,6% das alturas correspondentes a dutos de superfície menores ou iguais a 220 m.

A distribuição das alturas dos dutos atmosféricos na Ilha de Trindade (Figura 4) mostrou a ocorrência de duas classes mais frequentes, a primeira, entre 0 e 220 m e a segunda classe entre 800 e 1000 m de altura. Vale ressaltar que a altura do duto interfere drasticamente nas comunicações navais, considerando-se que a altura máxima em que a antena de rádio ou radar de um navio opera é de cerca 80 m.

Ao avaliar as alturas médias mensais, verifica-se que os maiores valores obtidos ocorreram nos meses de junho (125 m), julho (120 m) e agosto (114 m), correspondente à estação de inverno, enquanto os menores valores obtidos foram nos meses de março e abril, com alturas entre 98 e 102 m, respectivamente (Figura 5). As variações sazonais nas alturas dos dutos de superfície em regiões oceânicas ocorrem principalmente por variações na TSM, temperatura do ar e umidade relativa. Em condições estáveis, a altura do duto tende a aumentar, conforme o aumento da TSM (McKeon, 2013). Tal fato é justificado pela presença de inversões térmicas nos meses de inverno, em situações onde a TSM é maior do que o ar adjacente, favorecendo condições para a ocorrência de uma camada instável adjacente à superfície e, acima dela, uma camada inversão térmica elevada (Twigg, 2007). Quando a atmosfera se torna mais instável, o gradiente de umidade aumenta em magnitude e, com isso, ocorre a formação do duto atmosférico (Turton *et al.*, 1988; Chou & Kiang, 2014; Gürbüz, 2016).

A altura da inversão térmica é variável no tempo e espaço, isto é, desde dezenas de metros, em condições estaticamente estáveis, até alguns quilômetros, em condições altamente convectivas (Holton, 2004). Neste estudo, as maiores ocorrências de dutos foram observadas nos meses de dezembro e novembro, com 217 e 188, respectivamente,

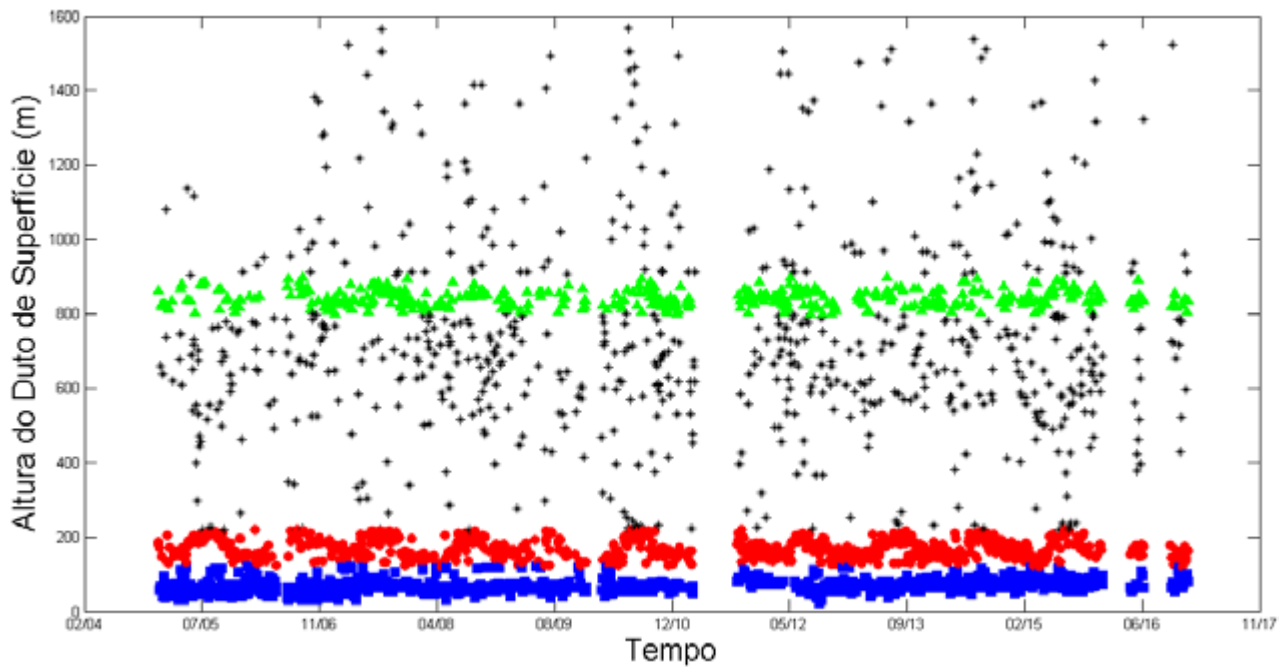


Figura 2 Altura dos dutos de superfície na Ilha de Trindade no período de 2005-2016, onde os pontos em azul representam alturas até 120 m, os pontos em vermelho correspondem a alturas entre 120 e 220 m e aqueles em verde, assinalam as alturas entre 800 e 900 m.

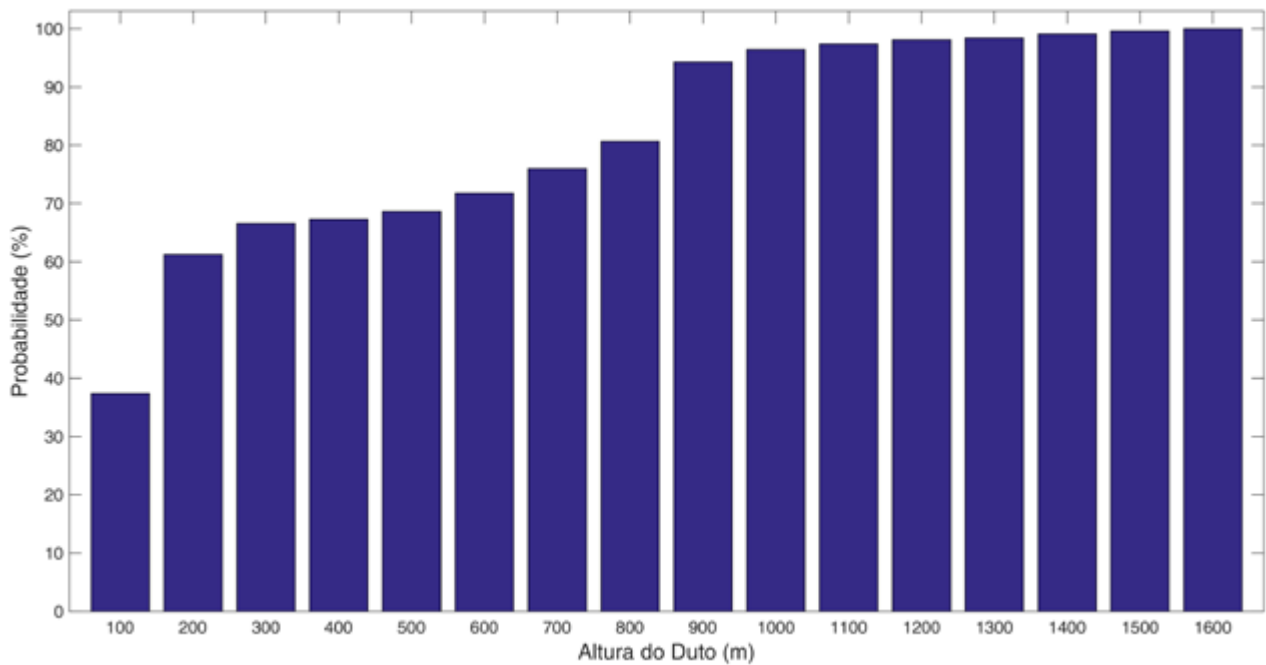


Figura 3 Distribuição de probabilidade de ocorrência (%) dos intervalos de classe das alturas dos dutos atmosféricos na Ilha de Trindade no período de 2005 -2016.

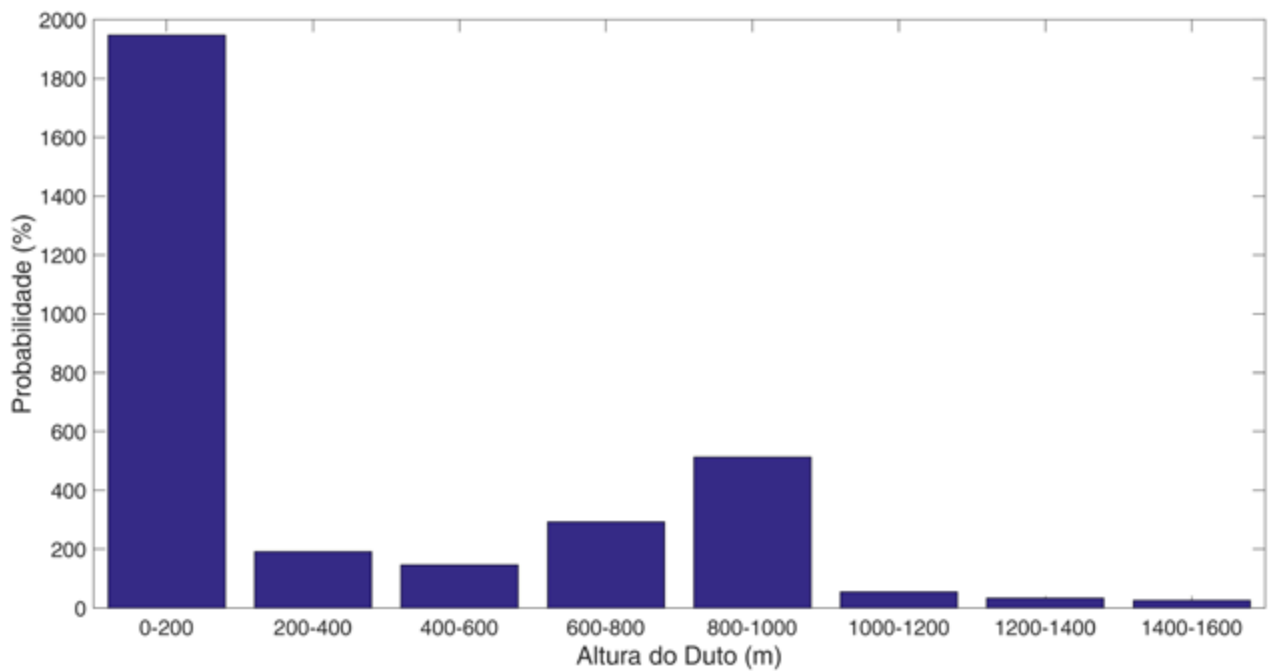


Figura 4 Distribuição da altura dos dutos de superfície na Ilha de Trindade no período de 2005-2016.

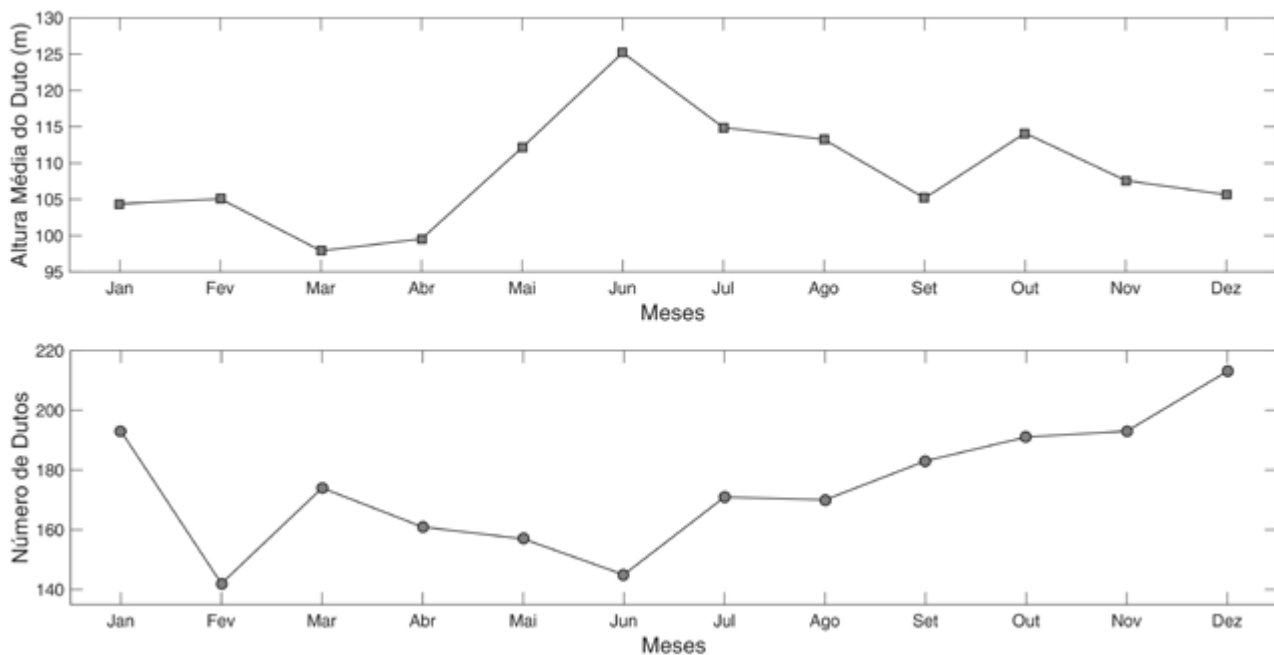


Figura 5 Distribuição das alturas médias mensais e contagem do número de dutos atmosféricos (m) na Ilha de Trindade no período de 2005-2016.

enquanto as menores ocorrências foram registradas nos meses junho (145) e fevereiro (138).

Para as médias mensais anuais, foram observadas alturas entre 70 e 160 m, nos anos de 2005 e 2012, respectivamente (Figura 6). Os meses que apresentaram as maiores médias foram junho de 2007 (160 m), junho de 2010 (160 m), maio de 2012 (160 m) e junho de 2015 (140 m).

Pode ser observado um aumento significativo nas alturas dos dutos ao longo dos anos estudados. Os resultados obtidos demonstram o efeito da sazonalidade ao longo de todo período, onde nos meses de inverno foram observadas as maiores alturas (160 m) e, ao mesmo tempo, registrado o menor valor (145 m). O oposto foi constatado no período do verão, com menores alturas médias observadas em dezembro (107 m) e maior número de ocorrências (217), seguido dos meses de março e abril, onde foram registrados os menores valores médios mensais, com 98 e 99 m, respectivamente. Vale ressaltar a alta variabilidade de ocorrência de dutos atmosféricos, principalmente no mês de dezembro de 2014, com 22 ocorrências, e no mês de março de 2008, com 5 ocorrências de dutos de superfície (Figura 6). Destaque para os anos de 2011 e 2016 que não foram contabilizados na série temporal, devido à ausência de dados, ou seja, com uma representatividade inferior a 40%.

3.2 Condições Termodinâmicas na Formação e Intensificação dos Dutos Atmosféricos: Estudos de Casos

Para caracterizar a formação e intensificação dos dutos de superfície na Ilha de Trindade, foram analisadas as condições termodinâmicas da atmosfera em diferentes condições: i) caso 1 - registro da maior altura de duto; ii) caso 2 - ausência de duto.

Caso 1: Dia 29/06/2010 (duto com altura de 212 m). As condições termodinâmicas para esse dia mostraram um decréscimo da temperatura potencial virtual com a altura no primeiro nível da sondagem atmosférica (4 m), favorecendo a existência de uma camada instável próximo à superfície (Figura 7, linha azul no painel esquerdo). Acima dessa camada, ocorreu uma inversão térmica, com um máximo gradiente registrado na altura do duto (212 m). Assim, houve a formação de uma camada estável acima desse nível. Na análise do perfil de umidade via razão de mistura (Figura 7, linha azul no painel direito), verifica-se um decréscimo da umidade com a altura. De forma similar ao gradiente de temperatura potencial, o máximo de intensidade do gradiente de umidade foi observado na altura do duto, embora com menor intensidade, o que demonstra que as condições do perfil de temperatura potencial modularam de forma mais eficiente a altura do duto para este caso.

Caso 2: Dia 14/07/2009 (dia com ausência de duto). As condições de estabilidade atmosférica para esse dia (Figura 7, linha vermelha no painel esquerdo) propiciaram a formação de uma camada neutra até o nível de 873 m e uma camada instável acima desse nível. Os dados do perfil atmosférico para esse dia não demonstram um gradiente intenso de temperatura potencial. O perfil de razão de mistura indicou uma variação quase nula da umidade com a altura, o que leva a um gradiente nulo de umidade (Figura 7, linha vermelha no painel direito).

3.3 Condições Sinóticas na Formação e Intensificação dos Dutos Atmosféricos: Estudos de Casos

As condições atmosféricas podem exercer um papel fundamental na formação e intensificação dos dutos atmosféricos (Chaves Filho *et al.*, 2013). As condições sinóticas que ocorreram na região de estudo, juntamente com os efeitos de micro e mesoescala, estabilidade atmosférica, inversões térmicas, circulações de brisa marítima/terrestre, entre outros, modulam as condições de formação e intensificação das condições de propagação eletromagnética na atmosfera (Karagianni *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2016). Diante disso, é apresentada, de forma sucinta, uma análise sinótica para os estudos de casos.

Caso 1: Na análise da carta sinótica de superfície do dia 29/06/2010 (Figura 8, painel esquerdo), se observa a presença de uma frente estacionária no Oceano Atlântico, a leste de Santa Catarina (SC), acoplada a um ciclone, com pressão mínima 982 hPa, localizado em 42°S; 29°W. Na região do estudo, é importante destacar a presença da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). Embora seu núcleo esteja fora do domínio da figura, sua circulação está atuando na região oceânica do sudeste do Brasil. Esse sistema atua de forma diferente no verão e no inverno, devido à mudança da sua posição, e contribui para formação de inversões térmicas no inverno (Reboita *et al.*, 2010; Brito *et al.*, 2016; Sobral *et al.*, 2018). Vale ressaltar que a ASAS inibe a formação de nuvens na região, como pode ser visto na Figura 8 (painel direito), bem como o aporte de umidade para os níveis superiores da atmosfera, devido aos movimentos descendentes. Essa situação favoreceu a presença de um gradiente negativo de umidade, uma das principais causas na formação de dutos de superfície.

Caso 2: Na análise da carta sinótica de superfície do dia 14/07/2009 (Figura 9, painel esquerdo), verifica-se a presença de um sistema frontal sobre o Atlântico, na altura do litoral norte do ES, já afastado do continente. Na retaguarda do sistema frontal, foi observada outra região de baixa pressão que também atua sobre o Atlântico. Um ciclone ocluso, com núcleo de 967 hPa, está em torno de 56°S; 39°W, fora do domínio da imagem. É possível

Refratividade Atmosférica em Áreas Oceânicas Baseada em Dados de Sondagem Atmosférica na Região da Ilha de Trindade
Daniel Cremonini Baptista, Rogério Neder Candella, José Francisco de Oliveira-Júnior & Tânia Ocimoto Oda

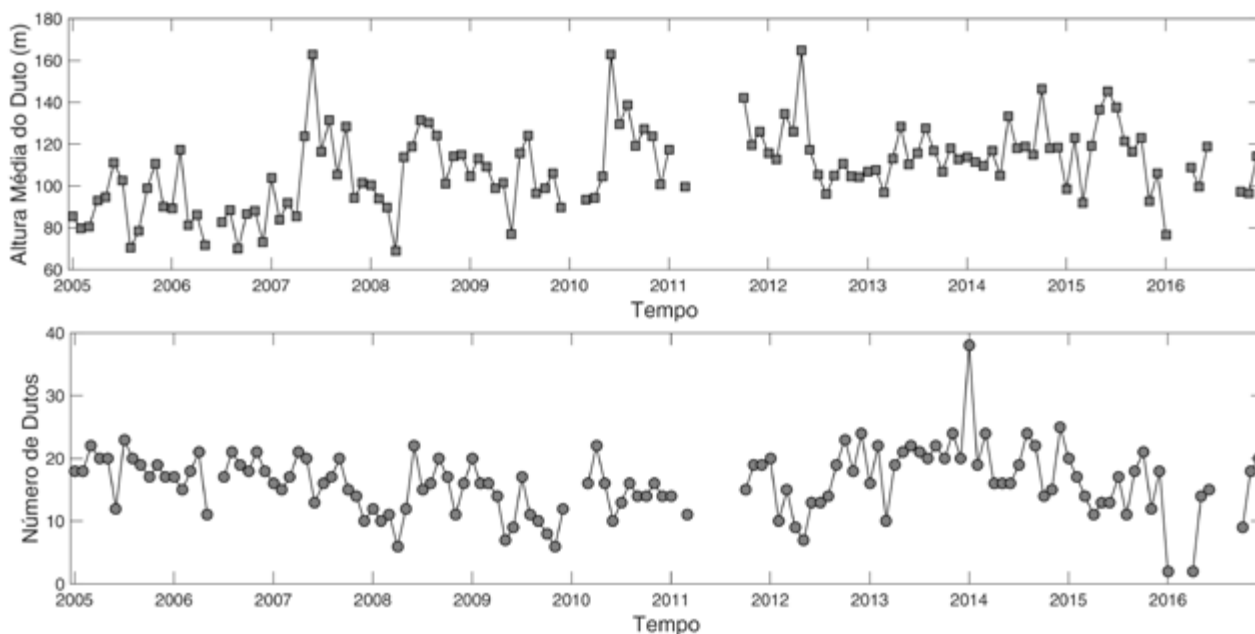


Figura 6 Distribuição das alturas médias mensais e número de ocorrência de dutos atmosféricos (m) na Ilha de Trindade no período 2005-2016.

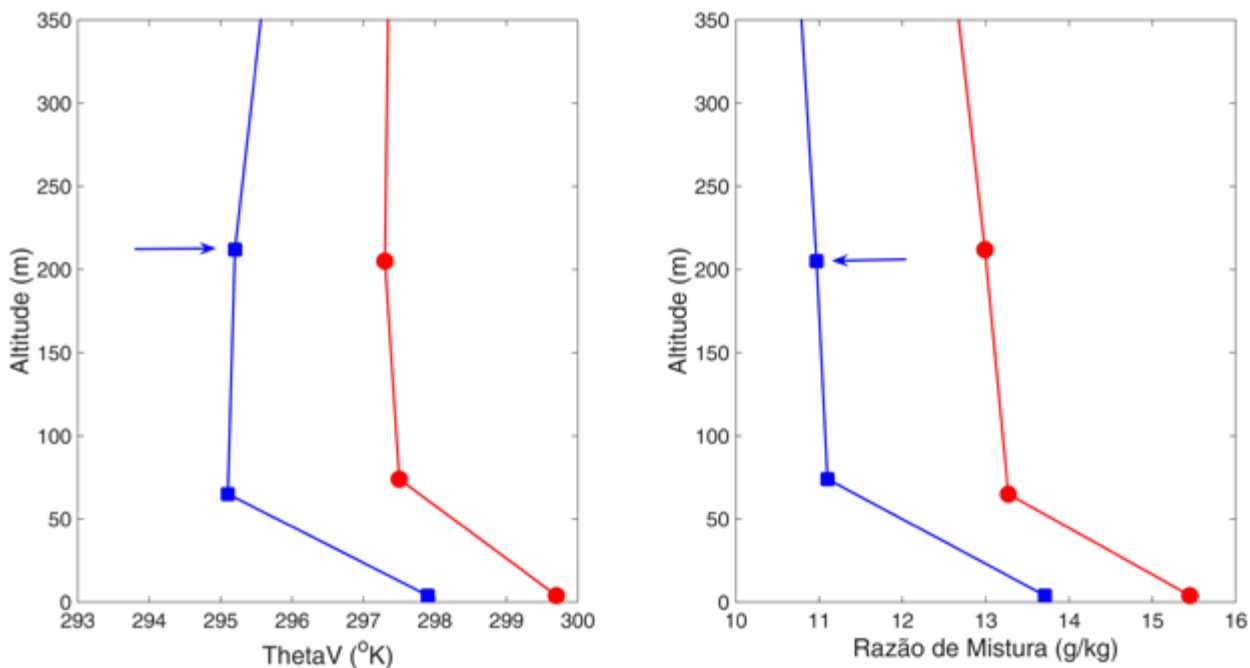


Figura 7 Perfil vertical da temperatura potencial virtual θ_v (K) (painel esquerdo) e da razão de mistura vertical q (g/kg) (painel direito) para os dois casos analisados. A linha azul é referente ao Caso 1 e seta azul indica o duto em 212 m. A linha vermelha é referente ao Caso 2.

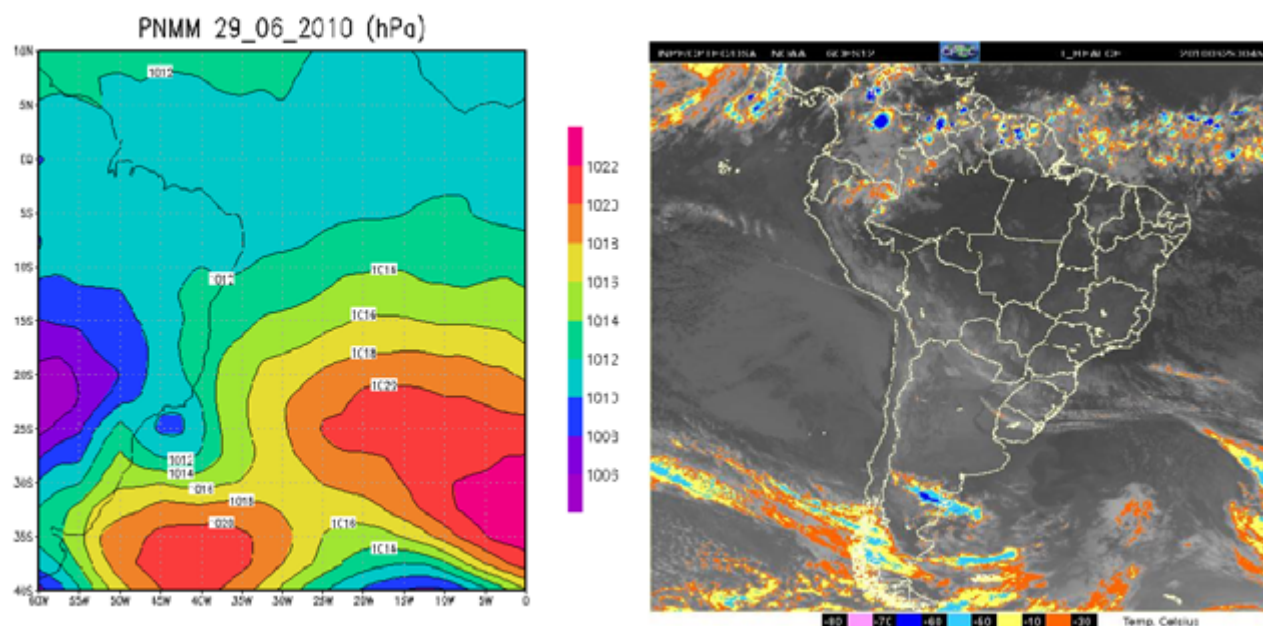


Figura 8 Carta sinótica (painel esquerdo) e imagem do satélite GOES12 (painel direito) para o Caso 1. (Fonte: CPTEC/INPE, 2019)

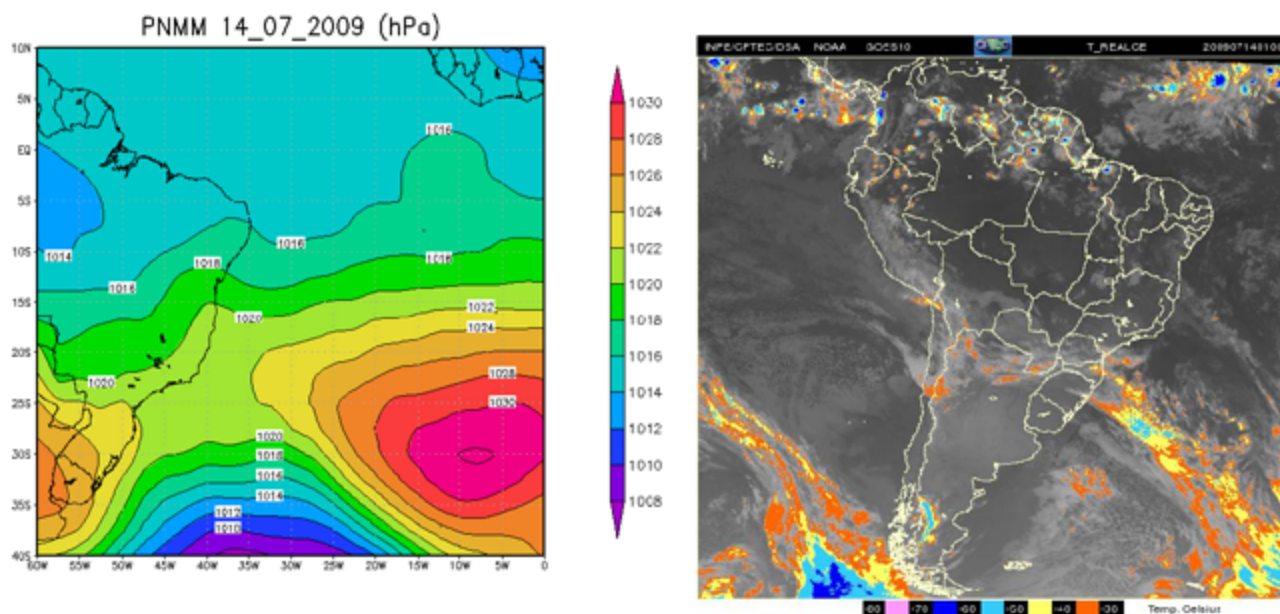


Figura 9 Carta sinótica (painel esquerdo) e imagem de satélite GOES12 (painel direito) para o Caso 2. (Fonte: CPTEC/INPE, 2019).

verificar, na imagem do satélite *Geostationary Operational Environmental Satellite 12* (Figura 9, painel direito), que o sistema frontal se deslocou para o oceano e, com isso, intensificou a nebulosidade sobre essa região, inibindo, assim, a formação de dutos de superfície. Vale destacar que

resultados semelhantes foram encontrados por Correia *et al.* (2018), que identificaram que as atividades convectivas são fatores que não favorecem a formação de dutos de evaporação.

4 Conclusões

As condições de refratividade atmosférica, obtidas a partir do índice modificado M, para Ilha de Trindade, no período de 11 anos, mostra três faixas de alturas de dutos de superfície. A faixa entre 120 e 220 m se sobressai entre as demais, sendo correspondente a 64,6% da série temporal, sendo essa a região mais influente nas comunicações navais.

A análise da altura média mensal dos dutos destaca os meses de inverno, tal fato é justificado pela presença frequente de inversões térmicas, sendo que, em condições estáveis, a altura do duto tende a aumentar, conforme o aumento da temperatura da superfície do mar. Em relação à ocorrência dos dutos atmosféricos, as ocorrências mais frequentes são observadas no verão, com exceção do mês de fevereiro. O efeito da sazonalidade é marcante na série temporal, sendo tal fato devido à passagem mais frequente de sistemas frontais na região de estudo entre os meses de abril e outubro, visto que a literatura mostra que os fenômenos transientes e atividades convectivas inibem a formação de dutos de evaporação.

No estudo de caso 1, é constada a presença de um duto atmosférico, sendo as condições sinóticas definidas pela atuação da ASAS. As condições termodinâmicas mostram a presença de uma camada instável próximo à superfície oceânica e uma camada estável acima do duto, sendo no seu topo verificado o máximo gradiente de umidade. Isso indica a influência dos fluxos turbulentos e da estabilidade atmosférica na formação e intensificação dos dutos. Já para o caso 2 (ausência de duto), é registrada a presença de um sistema frontal, que causa nebulosidade na região e, assim, favorece a presença de gradientes nulos de umidade e inibe a formação de dutos de superfície.

5 Referências

Babin, S.M. 1995. A case study of subrefractive conditions at Wallops Island, Virginia. *Journal of Applied Meteorology*, 34: 1028–1038.

Bean, B.B. & Dutton, E.J. 1968. *Radio Meteorology*. Boulder, Colorado, Dover Publications, 435p.

Brito, T.T.; Oliveira Júnior, J.F.; Lyra, G.B.; Gois, G. & Zeri, M. 2016. Multivariate analysis applied to monthly rainfall over Rio de Janeiro state, Brazil. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 129: 469–478.

Brooks, I.M.; Goroch, A.K. & Rogers, D.P. 1999. Observations of strong surface radar ducts over the Persian Gulf. *Journal of Applied Meteorology Climatology*, 58: 1293–1310.

Chaves Filho, J.B.; Correia, M.F.; Gurjão, C.D.S.; Barbieri, L.F.P. & Silva Aragão, M.R. 2013. Formação de Dutos Troposféricos no Semiárido Brasileiro: Um Estudo de caso em condições meteorológicas extremas. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 6: 932–944.

Chou, Y.H. & Kiang, J.F. 2014. Effect of Turbulence on Wave Propagation in Evaporation Ducts above a Rough Sea Surface. In: FORUM FOR ELECTROMAGNETIC RESEARCH METHODS AND APPLICATION TECHNOLOGIES, Taiwan, 2014. National Taiwan University, p. 1–13.

Correia, M.F.; Penaforte, A.G.; Medeiros, R.L.B. & Silva Aragão, M.R. 2019. Características de Dutos Atmosféricos de Superfície no Semiárido Brasileiro. *Anuário do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro*, 41(3):375–381.

Craig, K.H. 2003. Clear air characteristics of the troposphere. In: Propagation of Radio Waves, (ed.). Less Barclay Institution of Electrical Engineers, p. 103–128

Gürbüz, S.C. 2016. *Assessing evaporation duct variability in the eastern mediterranean sea in support of radar and radio communications*. Naval Postgraduate School, Dept. of Meteorology, M.S. thesis., 101p.

Holton, J.R. 2004. *An introduction to dynamic meteorology*. Seattle, Washington, Elsevier Academic press, 553p.

IEAPM. 2015. Sistema Tático de Fatores Ambientais (STFA). Versão 3.0, 2015. 01 CD.

Karagianni, E.A.; Mitropoulos, A.P.; Latif, I.T.; Kavousanos, A.G.; Koukos, J.A. & Fafalios, M.E. 2014. Atmospheric Effects on EM Propagation and Weather Effects on the Performance of a Dual Band Antenna for WLAN Communications, *Nausivios Chora*, 5: 29–45.

Karimian, A.; Yardim, C.; Gerstoft, P.; ; Hodgkiss W.S. & Barrios, A.E. 2011. Refractivity estimation from sea clutter: An invited review. *Radio Science*, 46: 1–16. doi: <https://doi.org/10.1029/2011RS004818>.

McKeon, B.D. 2013. *Climate analysis of evaporation ducts in the south china sea*. Naval Postgraduate School, Dept. of Meteorology, M.S. thesis, 111p.

Miguens, A.P. 1996. *Navegação a Ciência e a Arte*.: DHN, V.3 Navegação Eletrônica e em Condições Especiais. Rio de Janeiro, 538p.

Moraes, M.C.S. 2011. *Parâmetros de radar e distribuição do tamanho de gotas de chuva Continental ou marinha no leste do nordeste do Brasil: sua influência na estativa da vazão na Bacia do rio Mundaú*. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande, Tese (Doutorado em Meteorologia), 125p.

Neto, R.F. 2010. *Análise do Transporte de Carga Marítimo Brasileiro de Longo Curso com Relação a Participação e a Perda de Espaço no Cenário*. Instituto Alberto Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação Mestrado em Engenharia de Transportes, 106p.

Oliveira Júnior, J.F.; Kwon, B.H. & Oliveira, J.F. 2005. A Ocorrência de Dutos Atmosféricos em Ambiente Costeiro. *Revista Physicae*, 5: 23–32.

Pekeris, C.L. 1946. Accuracy of the Earth flattening approximation in the theory of microwave propagation. *Physical Review Journals Archive*, 70: 518–522.

Refratividade Atmosférica em Áreas Oceânicas Baseada em Dados de Sondagem Atmosférica na Região da Ilha de Trindade
Daniel Cremonini Baptista, Rogério Neder Candella, José Francisco de Oliveira-Júnior & Tânia Ocimoto Oda

- Reboita, M.S.; Gan, M.A.; Rocha, R.P. & Ambrizzi, T. 2010. Regimes de precipitação na América do Sul: Uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25(n2): 185-204. doi: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000200004>.
- Sobral, B.S.; Oliveira Júnior, J.F.; Gois, G.; Terassi, P.M.B. & Muniz Junior, J.G.R. 2018. Variabilidade espaço-temporal e interanual da chuva no estado do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Climatologia*, 22: 281-308. doi: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v22i0.55592>
- Turton, J.D.; Bennets D.A. & Farmer, S.F.G. 1988. An introduction to radio ducting. *Meteorology Magazine*, 117: 245-254.
- Twigg, K.L. 2007. *A smart climatology of evaporation duct height and surface radar propagation in the indian ocean*. Naval Postgraduate School, Dept. of Meteorology, M.S. thesis, 59 p.
- Zhang, Q.; Yang, K. & Shi, Y. 2016. Spatial and temporal variability of the evaporation duct in the Gulf of Aden. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 68 (1): 29792. doi: 10.3402/tellusa.v68.29792