

RESPOSTA DA IONOSFERA NA PROPAGAÇÃO DE SINAIS DE RÁDIO

IONOSPHERIC RESPONSE IN RADIO SIGNAL PROPAGATION

Ciências Exatas e da Terra • 13/06/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/781323291](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/781323291)

Gilmar Alves Silva¹

Emília Correia²

Fransuah Henrique Alves Silva³

Roberto Câmara de Araújo⁴

André Luíz Baptista Galvão⁵

RESUMO

Neste trabalho são apresentados resultados de investigação sobre o conceito de ondas eletromagnéticas e a prática de ensino, associando instrumentação, modelo de propagação e observação de usuários de rádio amador. O tópico abordado foi a propagação de sinais de rádio, observada durante um ano, entre novembro de 2024 a outubro de 2025 em frequências de 1,8 MHz, 14 MHz, 28 MHz e 50 MHz na região equatorial. O estudo foi realizado usando dados de digissonda, modelo de propagação VOACAP e receptores de rádio amador. O trabalho consiste na análise de sinais de rádio emitidos por duas estações transmissoras de rádio amador localizadas em Punta Arenas 53.15°S, 70.92°W; dip. latitude 39.37°N e em Nairóbi 1.28°S, 36.88°E; dip. latitude 10.74°N, sendo esses sinais de rádio registrados nas estações receptoras de rádio amador localizadas em Boa Vista 2.82°N, 60.76°W; dip. latitude 15,14°S, Campo Grande 20.5°S, 54.7°W; dip. latitude 16.99°N e São Luís 2.53°S, 44.30°W; dip. latitude 3,28°N localizadas na região da anomalia equatorial de ionização EIA e ao equador magnético no setor brasileiro. O estudo enfatizou a análise do parâmetro ionosférico, máxima frequência utilizável MUF e a relação sinal-ruído SNR em cada trajeto entre transmissor Tx e receptor Rx. Resultados indicam que a resposta da ionosfera foi diferente em relação aos sinais de rádio que se propagam dentro e fora da região equatorial.

Palavras-chave: Ensino; Ondas eletromagnéticas; Digissonda; Rádio amador; Equador magnético.

ABSTRACT

This paper presents research results on the concept of electromagnetic waves and teaching practice, associating instrumentation, propagation modeling, and observation of amateur radio users. The topic addressed was the propagation of

radio signals, observed over a year, between November 2024 and October 2025, at frequencies of 1.8 MHz, 14 MHz, 28 MHz, and 50 MHz in the equatorial region. The study was conducted using digisonde data, a propagation model VOACAP, and amateur radio receivers. This work consists of analyzing radio signals emitted by two amateur radio transmitting stations located in Punta Arenas 53.15°S, 70.92°W; dip. latitude 39.37°N and Nairobi 1.28°S, 36.88°E; dip. latitude 10.74°N, with these radio signals being recorded at amateur radio receiving stations located in Boa Vista 2.82°N, 60.76°W; dip. latitude 15.14°S, Campo Grande 20.5°S, 54.7°W; dip. latitude 16.99°N and São Luís 2.53°S, 44.30°W; dip. latitude 3.28°N located in the region of the equatorial ionization anomaly EIA and the magnetic equator in the Brazilian sector. The study emphasized the analysis of the ionospheric parameter, maximum usable frequency MUF, and signal-to-noise ratio SNR in each path between transmitter Tx and receiver Rx. Results indicate that the ionospheric response was different in relation to radio signals propagating inside and outside the equatorial region.

Keywords: Education; Electromagnetic waves; Digisonde; Amateur radio; Magnetic equator.

1. INTRODUÇÃO

A prática docente é um processo complexo, multifacetado e singular, que envolve a atuação do professor em sala de aula e sua interação com os alunos a comunidade escolar. É uma atividade que exige conhecimento, habilidades e atitudes específicas para promover a aprendizagem e o desenvolvimento dos estudantes. Para Araújo e Robaina. (2025), nenhum professor ensina da mesma forma que outro, assim como não há digitais, timbres ou íris idênticas. Nesse contexto, a observação feita pelo professor durante

suas próprias aulas, desperta a investigação da sua prática pedagógica ou o impacto na aprendizagem de seus alunos. Segundo Paixão e Rebouças (2025), todo professor deve ser pesquisador de suas próprias práticas para que o ensino e a aprendizagem respondam às demandas socioculturais e políticas de seus contextos de atuação.

Neste trabalho foi realizada uma pesquisa referente aos conceitos de Física Contemporânea estudados em sala de aula no Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física MNPEF na Universidade Federal de Roraima UFRR. O estudo traz análise de propagação de ondas eletromagnética, modelo de propagação simulação, instrumentação e de registros de comunicação de rádio amadores das capitais Boa Vista, Campo Grande e São Luís.

Alguns conceitos do estudo são aqui detalhados, como ionosfera, classificada pelas camadas D, E e F, que é parte da atmosfera compreendida entre 50 e 1000 km de altitude, a qual é composta por plasma ionizado que conduz eletricidade, sendo caracterizada pela presença de grande quantidade de elétrons livres e íons positivos, com densidades variando entre $10^8 - 10^{12}$ elétrons/m³ (Banks e Kockarts 1973).

A importância da ionosfera frente à propagação de sinais de rádio ocorre principalmente em frequências abaixo de 30 MHz, porém na região equatorial, propagação de ondas de rádio em 50 MHz tem sido utilizada por rádio amadores desde 1950 (Ferguson e Booker 1983). Comunicações em 50 MHz na América do Sul tem sido referenciado por Cohen e Bowles (1961), no Oceano Pacífico central por Nielson, (1969) e no Oceano Pacífico ocidental por Kuriki et al. (1972) e McNamara (1973). Essas comunicações foram chamadas de

propagação transequatorial TEP, é aproximadamente definida como propagação ionosférica de longo alcance milhares de quilômetros sobre um caminho que é dividido por meio do equador magnético, onde o espectro de frequências consideradas se estende desde comunicações de ondas curtas até cerca de 100 MHz, Nielson (1968a). As comunicações por meio da ionosfera ocorrem principalmente por refração e reflexão, pois quando uma onda rádio incide nas regiões ionosféricas, as suas camadas desviam a trajetória da onda permitindo que a mesma retorne à superfície da Terra estabelecendo a ligação de longa distância entre transmissor e receptor. A maior frequência possível que pode ser usada para reflexão na ionosfera é conhecida como Frequência Máxima Utilizável MUF (Shimazaki, 1955; Rush et al. 1974; Mudzingwa et al. 2013). Frequências superiores a MUF penetram na ionosfera e continuam no espaço. Frequências mais baixas do que a MUF tende a retornar a superfície da Terra (Shimazaki, 1955). A MUF está relacionada à densidade eletrônica da ionosfera e, portanto, varia de acordo com a hora do dia, estação do ano, localização geográfica e atividade solar (Davis; Groome, 1964). O Voice of America Coverage Analysis Program VOACAP usado neste trabalho, é um modelo probabilístico que prevê especialmente a propagação em HF entre um transmissor de rádio Tx e receptor Rx em dois pontos da Terra ao longo de um ciclo de 24 horas. O programa usa a teoria da camada parabólica e um banco de dados, que inclui variações dos parâmetros ionosféricos como frequência crítica da camada F2 foF2, altura máxima da camada F hmF2 para cada posição da ionosfera (Tanyer; Erol, 1998). O modelo VOACAP baseia-se em médias mensais de condições ionosféricas conhecidas por exemplo fenômenos sazonais, características do sistema Tx e Rx, antena, características ambientes, tipo de solo e ruídos artificiais. As condições ionosféricas são baseadas em estatísticas de um grande

número em torno de 35.000 estações de observações compiladas pelo *Comité Consultatif International des Radio Communications* CCIR, e The *International Union of Radio Science* URSI (Bilitza, 1990), utilizam número de manchas solares, fluxo solar de 10.7 cm e o índice planetário Kp de 3 horas do campo geomagnético, dentre outros parâmetros. O programa leva em consideração os ciclos de atividade solar. No entanto, como o VOACAP é principalmente um modelo empiricamente baseado em dados estatísticos, não prevê efeitos ocasionados por eventos solares associados à ejeção da massa coronal CME e outros fenômenos do clima espacial.

Na região de baixa latitude existe perturbações que influenciam na propagação de sinais de rádio, dentre eles o fenômeno da Anomalia Equatorial de Ionização EIA que é caracterizada pela distribuição latitudinal de ionização na região F, sendo mínima no equador magnético e máxima em baixas latitudes ± 17 de latitude magnética (Appleton, 1946). Sendo a ionosfera formada a partir do processo de fotoionização da radiação solar, logo se esperaria que a região equatorial apresentasse maior intensidade de densidade eletrônica, pois neste setor existe a maior incidência de fótons solares por unidade de área, entretanto este comportamento não ocorre. A resposta a este comportamento anômalo do plasma ionosférico é que, no equador o campo elétrico de polarização gerado na região E é mapeado sobe para a região F por meio das linhas de campo magnético. Dessa forma, ocorre então a difusão do plasma para baixo ao longo das linhas de magnético e para longe do equador devido à ação de gradiente de pressão e da gravidade.

Como resultado, a concentração de elétrons decai no equador magnético e aumenta nas latitudes em torno de $12^\circ - 20^\circ$ ao norte e ao sul magnético. Este processo é conhecido como efeito fonte,

onde se têm duas regiões de máxima densidade eletrônica em baixas latitudes, também conhecidas como cristas da EIA e a região de mínima densidade eletrônica no equador magnético (Ott, 1978; Kelley, 1989).

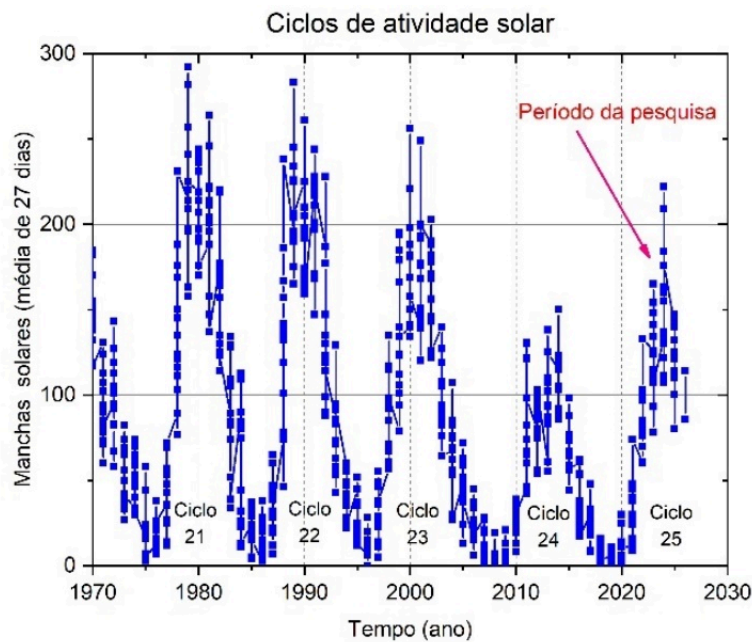
Este trabalho tem como objetivo caracterizar a ionosfera através de observações feitas com digissondas operando em Boa Vista 2.82°N , 60.76°W ; dip. latitude $15,14^{\circ}\text{S}$, Campo Grande 20.5°S , 54.7°W ; dip. latitude 16.99°N e São Luís 2.53°S , 44.30°W ; dip. latitude $3,28^{\circ}\text{N}$ no decorrer de um ano de novembro de 2024 a outubro de 2025, e de forma inédita, avaliar a qualidade das comunicações em frequências 1.8 MHz, 14 MHz, 28 MHz e 50 MHz recebidas por de rádio amadores nessas localidades. Para isso, o estado da ionosfera obtido por digissonda será avaliado com relação sinal ruído SNR dos sinais recebidos das estações de rádio transmissoras Punta Arenas 53.15°S , 70.92°W ; dip. latitude 39.37°N , Nairóbi 1.28°S , 36.88°E ; dip. latitude 10.74°N e comparados com as condições previstas pelo VOACAP. No estudo serão considerados 2 trajetos de propagação, um quase paralelo ao equador e outro transversal ao equador.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O ciclo de atividade de 11 anos é um dos fatores que afetam as propriedades da ionosfera, significativa na densidade de elétrons da região F ionosférica, onde o número de manchas solares tem uma boa relação com a frequência crítica da camada F2 f_oF2 Kane 1992. Este trabalho foi realizado durante o máximo solar do ciclo 25 (2019-2030) ainda em evolução, o qual apresenta poucas manchas solares quando comparado com o máximo de outros recentes ciclos solares 21, 22 e 23. Contudo, o ciclo solar 25 apresenta mais manchas do que o ciclo solar 24. Na Figura 1 é mostrado o número de manchas

solares entre 1970 e 2030, e a identificação de cada ciclo solar e o período da pesquisa deste trabalho.

Figura 1. Ciclos de atividade solar entre 1970 E 2030.



Fonte: Os Autores (2026).

A variação cíclica a cada onze anos observada na atividade solar, possui épocas de máximo e de mínimo de atividade. Quando o Sol está passando pelo mínimo deste ciclo, o chamado “mínimo solar”, o número de manchas em sua superfície é mínimo. Teoricamente, após cinco anos e meio, o Sol atinge o seu ponto máximo de atividade, o “máximo solar”, e na sua superfície há mais de 100 manchas solares. O número de manchas solares tem uma boa relação com a frequência crítica da camada F2 foF2 e consequentemente com a MUF.

2.1. Estações Transmissoras

Os sinais de rádio amador utilizados neste trabalho foram obtidos das estações transmissoras Nairóbi localiza na região equatorial e

Punta Arenas localizada em latitudes médias.

Três estações foram escolhidas para recepção dos sinais de rádio por estarem localizadas na região equatorial brasileira, sendo que, duas estações se encontram próximas da região da crista da EIA, Boa Vista ao sul e Campo Grande ao norte, e São Luís que está localizada próximo ao equador magnético.

A caracterização da ionosfera nas estações de Boa Vista, Campo Grande e São Luís se deu a partir da análise dos parâmetros ionosféricos foF2, hmF2 e MUF, obtidos de sondagem ionosférica utilizando digissonda.

Um mapa ilustrando a localização das estações é mostrado na Figura 2, onde os pontos vermelhos indicam as estações transmissoras, os pontos azuis indicam as estações receptoras de rádio, as linhas em azul representam latitudes magnéticas, sendo a linha ao centro o equador magnético, linha cinza o equador geográfico, o número próximo à estação indica o fuso horário local em relação ao horário universal e ao lado da linha vermelha está indicado a distância horizontal entre transmissora e receptora de rádio.

O Software VOACAP desenvolvido para fazer previsão de propagação (Sweeney et al., 1993; Lane, 2001; Teters, 1983) foi usado para estimar a MUF nas estações transmissoras e para o trajeto entre estações de rádio transmissoras e receptoras.

Os Transmissores de Múltiplas Frequências (Mitola; Maguire, 1999), que transmitem em várias frequências ao mesmo tempo, foram utilizados nas estações transmissoras para enviar os sinais de rádio em frequências 1.8 MHz, 14 MHz, 28 MHz e 50 MHz. Transceptor

Multibandas receptor de rádio, que opera em MF, HF e VHF Silver et al., 2014 foi usado na recepção de sinais 1.8 MHz, 14 MHz, 28 MHz e 50 MHz nas estações receptoras de rádio amador.

Foram utilizadas estações transmissoras com as mesmas características potência do transmissor, polarização, ganho da antena, tipo de antena e apontamento da antena, de modo que os efeitos ocorridos com os sinais de rádio serem apenas influência do meio de propagação. Foi analisado o parâmetro ionosférico MUF obtido por digissonda e pelo VOACAP e qualidade das comunicações dada pela análise considerando as condições de propagação para diferentes estações do ano, entre novembro de 2024 a outubro de 2025, dividido em inverno maio, junho, julho e agosto, equinócios março, abril, setembro e outubro e verão novembro, dezembro, janeiro e fevereiro, considerando-se apenas dias geomagneticamente calmos.

Figura 2. Estações transmissoras ponto vermelho, digissonda e estação receptora de rádio amador ponto azul, fuso horário local em relação ao horário universal, representação do equador magnético, distância entre transmissor e receptor linha vermelha e a posição de 20° norte e sul magnético.



Fonte: Os Autores (2024).

2.2. Máxima Frequência Utilizável MUF

A MUF3000, é a máxima frequência utilizável para transmissão em uma direção oblíqua de 3000 Km (Bilitza et al., 1979). Nas estações receptoras Boa Vista, Campo Grande e São Luís a MUF3000 foi obtida diretamente da digissonda. Com objetivo de validar o VOACAP na previsão da MUF3000, esse parâmetro foi estimado para as estações receptoras por meio da equação 1:

$$MUF = \frac{foF2}{\sqrt{1 - \left(\frac{a \cos \emptyset}{a + hmF2}\right)^2}}$$

Onde foF2 é frequência crítica da onda ordinária da camada F2, hmF2 é a altura do pico de máxima densidade eletrônica da ionosfera, a é o raio efetivo da Terra e \emptyset é o ângulo em radiano de elevação entre a superfície da Terra e a trajetória do sinal de rádio transmitido (Piquenard, 1974). Para estimar a MUF3000 por meio do VOACAP, os parâmetros foF2 e hmF2 foram obtidos de mapas globais do CCIR.

Nas estações transmissoras Punta Arenas e Nairóbi, como não há digissonda, a MUF3000 estimada usando da equação 1, utilizando os parâmetros foF2 e hmF2 obtidos de mapas CCIR.

2.2.1. MUF no Trajeto Transmissora Receptora

Outro conceito de grande importância na avaliação de propagação ionosférica é a MUF no trajeto entre transmissora e receptora. A MUF de trajeto é uma previsão gerada pelo o VOACAP, baseado em parâmetros bem estabelecido como distância, potência do transmissor, ganho da antena, número de manchas solares, tipo de superfície refletora, frequências críticas, atenuações e alturas das

camadas refletoras (Lane, 2001). Para estimar a MUF de trajeto MUF_T entre Tx e Rx é usada a equação 2:

$$MUF_T = [1 + (\frac{C_d}{C_{3000}})(B - 1)] \cdot foF2 + \frac{f_H}{2}(1 - \frac{d}{d_{m\acute{a}x}})$$

onde f_H é valor de girofrequência dos elétrons no ponto de reflexão 300-350 km, C_d , C_{3000} , $d_{m\acute{a}x}$, d e B são termos que dependem de localização de Tx e Rx. Os detalhes para calcular o MUF_T na região F2 podem ser encontrados em Lloyd et al. (1978), Lane (2001) e na Recomendação UIT-R P.533 ITU-R (2009).

2.3. Relação Sinal Ruído SNR Medido nas Estações Receptoras de Rádio Amador

A qualidade do sinal é especificada pela razão sinal/ruído Signal-to-Noise Ratio - SNR, dessa maneira, quanto maior for esta razão, melhor será a comunicação. Neste trabalho a relação sinal ruído para avaliar a propagação de sinais de rádio, foi medida por transceptores multibandas nas estações receptoras de rádio amador. Quando a SNR atinge valores a partir de 10 dB a comunicação é considerada estabelecida entre Tx e Rx.

Cada usuário de rádio amador tem um código internacional de identificação indicativo. Assim a estação transmissora emite durante 24 por dia, Beacons com sua respectiva identificação. Portanto, através do indicativo da transmissora é identificado na estação receptora de rádio amador quem está transmitindo o sinal. Dessa forma os registros da SNR medidos nas estações receptoras usando a condição da $SNR \geq 10 \text{ dB}$ estabelecem se ouve ou não a recepção do sinal no decorrer de 24 horas numa determinada frequência.

3. RESULTADOS OBSERVACIONAIS

3.1. MUF3000 nas Estações Receptoras Digissonda e VOACAP

A Figura 3 apresenta os valores médios diários de 24 horas da MUF 3000 em cada estação receptora Boa Vista, Campo Grande e São Luís para cada período sazonal inverno, equinócios e verão obtidos pela digissonda azul e estimados pelo VOACAP vermelho. O valor médio diário em relação a cada período sazonal obtido pela digissonda foi comparado com a previsão estimada pelo VOACAP. Na tabela 1 é apresentado o valor máximo do desvio percentual calculado para a noite e dia em cada período sazonal pela seguinte relação: $\frac{VOA - DPS4}{DPS4} \cdot 100$, onde “VOA” representa o valor da MUF3000 estimado pelo VOACAP e “DPS4” representa a medida da MUF3000 realizada pela digissonda.

Tabela 1. Desvio percentual máximo da MUF3000 estimada pelo VOACAP e medida pela digissonda.

Estação	Inverno		Equinócios		Noite
	Noite	Dia	Noite	Dia	
Boa Vista	10%	12%	12%	10%	20%
Campo Grande	20%	16%	18%	6%	17%
São Luis	18%	10%	20%	9%	10%

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: <https://revistatopicos.com.br/artigos/resposta-da-ionsfera-na-propagacao-de-sinais-de-radio?noblockage>

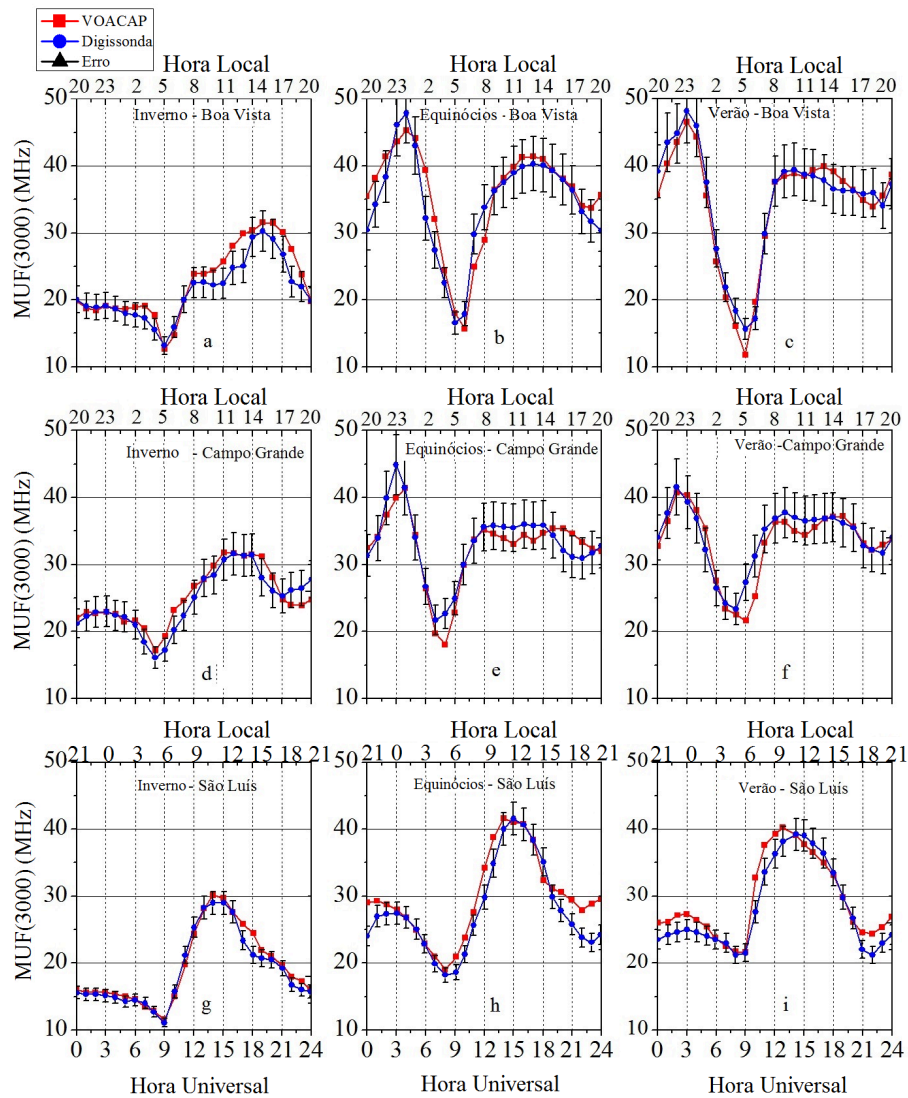
Fonte: Os Autores (2025).

Na tabela 1, na estação de Boa Vista, nota-se que o desvio da MUF 3000 estimado pelo VOACAP e a medida pela digissonda apresenta maior discrepância durante o verão sendo maior no período noturno é maior durante o período noturno nos equinócios e verão

Os valores previstos pelo VOACAP demonstram variações noturnas e diurnas semelhantes às medidas efetuadas pela digissonda, porém os valores estimados da MUF3000 estão mais afastados das medidas da digissonda ao amanhecer e à meia noite local, o que induz ao maior desvio percentual no período noturno em quase todos os períodos do ano em todas as estações receptoras. As previsões e as medidas levam a desvios percentuais que chegam até 20% no período noturno durante o verão em Boa Vista, porém nessa mesma estação do ano o desvio percentual é de 7% durante o dia. Nas outras estações do ano os desvios observados em Boa Vista estiveram entre 12% e 10% entre dia e noite.

Na estação Campo Grande as previsões e as medidas proporcionaram desvios percentuais maiores durante o inverno, o que resultou em 20% durante a noite e 16% durante o dia. Nos equinócios e verão os desvios percentuais em Campo Grande durante a noite estiveram em 16% e 18% respectivamente, mas durante o dia em foi 7% e 6% respectivamente para mesmas estações do ano, com os máximos ocorrendo durante a noite e mínima locais durante o dia local.

Figura 3. MUF3000 das estações receptoras Boa Vista 3a.3b, e 3c, Campo Grande 3d. 3e, e 3f, São Luís 3g, 3h e 3i, medida pela digissonda azul e estimada pelo VOACAP vermelho.



Fonte: Os Autores (2026).

A Figura 3a, b, c mostra a variação da MUF3000 na estação receptora Boa Vista. Durante o período noturno de inverno, a MUF3000 é de 20 MHz as 20 LT e 14MHz por volta de 05 LT e durante as horas diurnas tem seu valor máximo de 32 MHz por volta de 15 LT. Durante o período noturno de equinócios a MUF3000 alcança 46 MHz em torno de 23 LT e as 05 LT um valor mínimo de 16 MHz e durante as horas diurnas tem máximo de 40 MHz as 15 LT. Nas noites de verão em Boa Vista a MUF3000 atinge 49 MHz as 23 LT, 16 MHz as 05 LT e 40 MHz as 10 LT.

Em Campo Grande Figura 3d,e,f, a MUF3000 durante o inverno tem valor máximo de 30 MHz as 23 LT, e valor mínimo de 20 MHz as 05 LT e no período diurno atinge valor máximo de 31 MHz as 14 LT. No

período noturno dos equinócios a MUF3000 tem valor de 45 MHz as 23 LT e 22 MHz as 05 LT, já no período diurno tem valor máximo de 36 MHz as 14 LT. Para o verão, a MUF3000 em Campo Grande durante a noite é de 42 MHz as 22 LT e valor mínimo de 25 MHz as 05 LT, Já o máximo no período diurno é de 38 MHz por volta das 09 L.

Na Figura 3g, h, i está representada a variação da MUF3000 em São Luís. Durante o inverno é notado um valor máximo de 17 MHz por volta de 01 LT e valor mínimo de 12 MHz em torno de 05 LT, no período diurno a MUF3000 atinge 30 MHz às 12 LT. Nos equinócios durante o período noturno a MUF3000 tem valor máximo de 28 MHz por de 00 LT e valor mínimo de 19 MHz as 05 LT e para o período do dia, atinge valor máximo de 42 MHz as 12 LT. No verão, durante o período noturno, MUF3000 tem valor máximo de 25 MHz por volta de 23 LT e valor mínimo de 22 MHz as 03 LT, no período diurno alcança 40 MHz as 12 LT.

Nas estações Boa Vista e Campo Grande durante equinócios e verão, a MUF3000 alcança valores mais altos durante o período noturno por volta de 23 LT. Este pico na MUF3000 está associado ao pico de pré reversão da deriva vertical de plasma, observado entre as 20:00 e 00:00 LT por McNamara et al., (2008), efeito esse que é mais intenso nos equinócios e verão e desaparece no inverno. Isso ocorre porque as duas estações estão localizadas na região da crista da EIA (Fejer e Kelley, 1980; Batista et al., 1986).

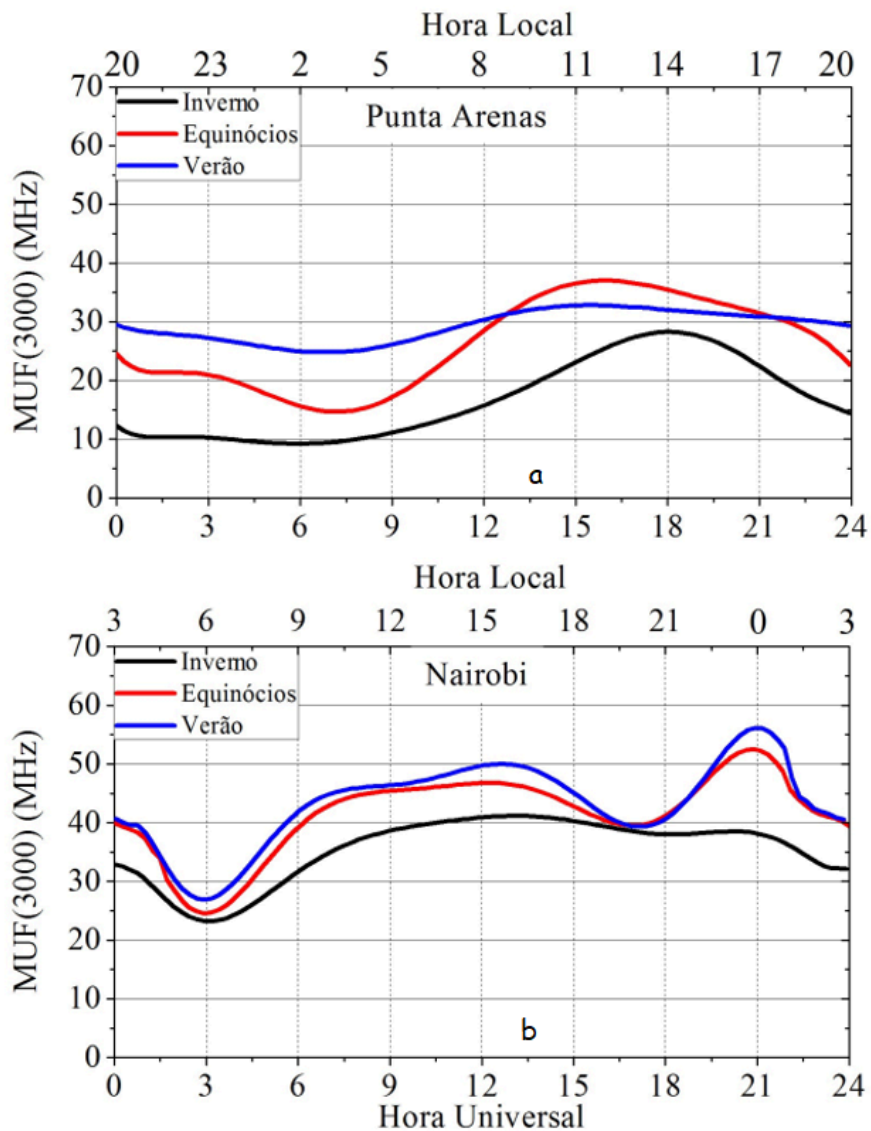
Em todas as estações do ano exceto o verão em São Luís, a MUF3000 atinge valores mínimos por volta de 05:00 LT. Durante noite e dia há semelhanças entre Boa Vista e Campo Grande para os horários que a MUF3000 atinge seu mínimo e máximo, o que indica que há uma boa relação entre a dinâmica da ionosfera e a intensificação do

plasma decorrente do efeito fonte observado nas duas estações. Por outro lado, em São Luís Figuras: 3g, 3h e 3i que está localizada próximo do equador magnético não se nota o fenômeno da EIA, o que está de acordo Batista et al., (1986). Em São Luís a MUF3000 tem valores mínimos durante a noite e valores máximos durante as horas do dia.

3.2. MUF3000 nas Estações Transmissoras

Na Figura 4 é ilustrado os valores médios diários de 24 horas da MUF 3000 estimada pela VOACAP para as estações transmissoras Punta Arenas e Nairobi, durante o inverno, equinócios e verão.

Figura 4. MUF3000 nas estações transmissoras Punta Arenas (a) e Nairobi (b), para o inverno, equinócios e verão.



Fonte: Os Autores (2026).

Em Punta Arenas localizada em latitudes médias Figura 4a, a MUF 3000 no inverno tem valor de 10 MHz as 03 LT. Durante o dia, a MUF 3000 em Punta Arenas vai aumentando até atingir o valor máximo de 28 MHz as 14 LT. Nos equinócios a MUF3000 varia entre 25 - 15 MHz entre 20 - 05 LT e por volta de 11 LT atinge seu valor máximo 38 MHz. Para o período de verão é observada pouca variação da MUF 3000, sendo 25 MHz durante a noite 03 LT e 35 MHz durante o dia 11 LT.

Na estação Nairobi Figura 4b, a MUF3000 no inverno apresenta valor mínimo de 24 MHz durante a noite 06 LT e máximo de 40 MHz durante o dia 15 LT. Durante os equinócios o valor atinge máximo de

52 MHz as 00 LT e mínimo de 25 MHz as 06 LT e, durante o dia máximo de 47 MHz as 15 LT. No verão MUF3000 durante a noite tem máximo de 56 MHz as 00 LT e mínimo de 28 MHz as 06 LT e, durante o dia máximo de 50 MHz as 15 LT.

Em termos gerais, a estação Nairóbi que está localizada próximo da região da crista da EIA, apresenta um máximo durante equinócios e verão por volta de 00 LT, como resultado do movimento da camada F equatorial que se move para cima quando os ventos mudam de sentido de leste para oeste, dando origem ao pico de pré-reversão da deriva vertical de plasma ExB, da interação entre campo elétrico E e campo magnético B terrestres (Rishbeth, 1971; Farley et al., 1986). Assim Nairóbi apresenta maiores valores da MUF3000 quando comparados com os valores observados na estação de Punta Arenas que está localizada em latitudes médias e não tem contribuição da EIA, conforme mostrado na Figura 2.

3.3. Análise da Relação Sinal Ruído SNR

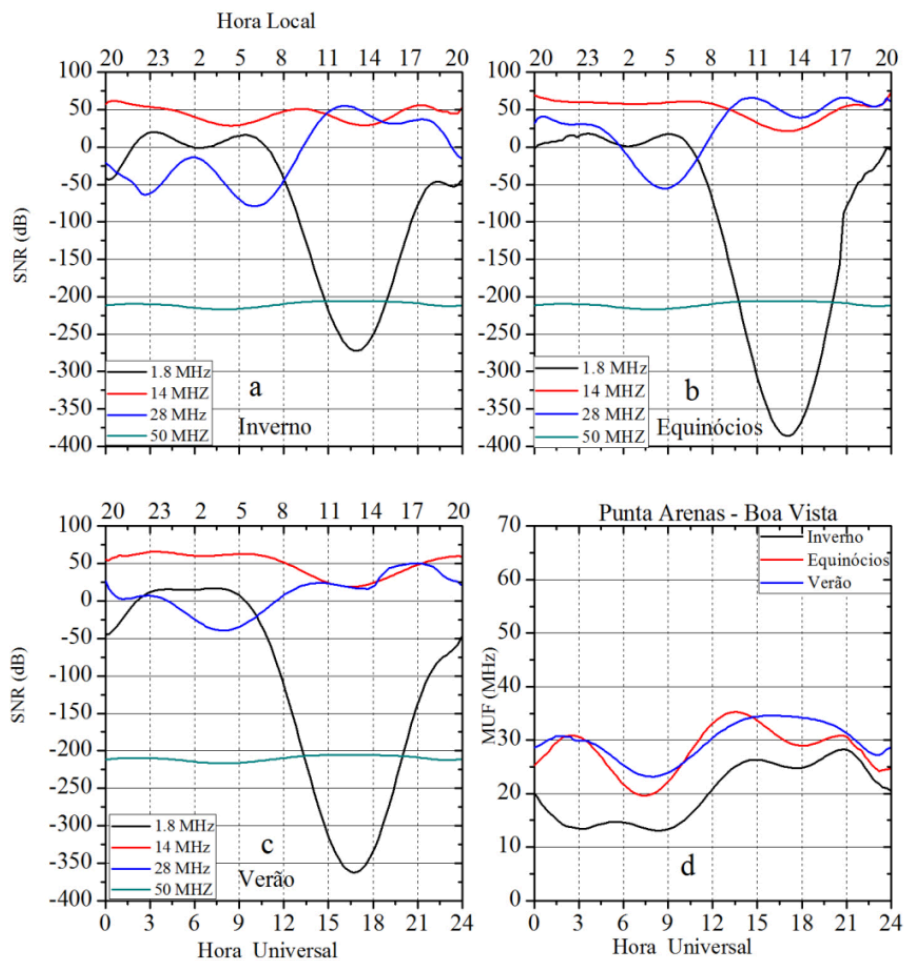
A análise da SNR foi realizada com os dados das estações de rádio amadores Boa Vista, Campo Grande e São Luís provenientes de sinais de rádio das estações transmissoras Punta Arenas e Nairóbi para as frequências 1.8, 14, 28 e 50 MHz. As Figuras 5a,b,c a 10a,b,c representam valores médios diários de 24 horas da SNR recebidos pelos rádio amadores em cada período sazonais e para cada frequência especificada, e as Figuras 5d a 10d mostram os valores médios diários de 24 horas da MUF de trajeto estimada pelo VOACAP para os trajetos entre Tx e Rx.

3.3.1. Análise da SNR em Boa Vista

A Figura 5a,b,c mostra a SNR em Boa Vista de sinais de rádio provenientes de Punta Arenas. A SNR para a frequência de 1.8 MHz segue o mesmo padrão no decorrer das 24 horas para todos os períodos sazonais, onde são observados valores positivos no intervalo entre 03 - 09 UT. A frequência de 14 MHz é detectada em Boa Vista em todas as estações do ano com intensidade chegando até 50 dB durante a noite. Já para a frequência de 28 MHz é notado a existência de valores positivos da SNR para todas as estações apenas entre 12 – 21 UT, e para 50 MHz não foi observado nenhum valor positivo no trajeto Punta Arenas – Boa Vista.

Os valores da MUF estimados pelo VOACAP para o trajeto Punta Arenas - Boa Vista são mostrados na Figura 5d onde estima-se que a máxima frequência deve estar em torno de 38 MHz no período diurno durante equinócios e verão. Para o inverno a MUF estimada é de 15 MHz durante a noite e 28 MHz durante o dia.

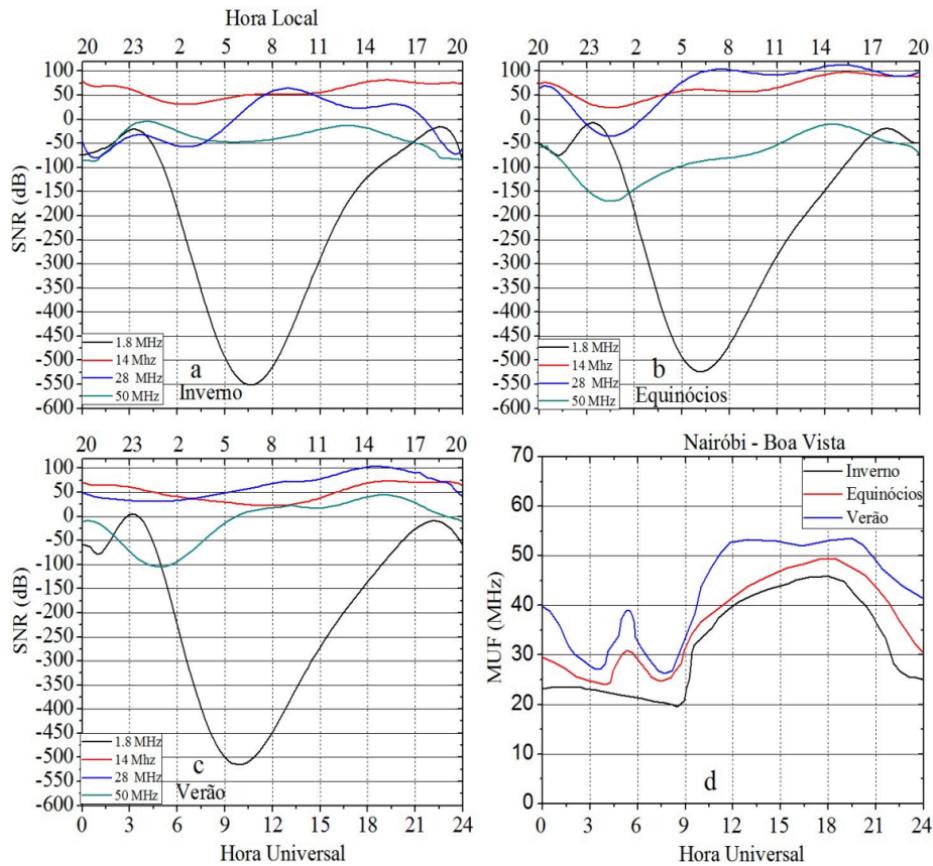
Figura 5. a, SNR durante inverno. b, SNR durante os equinócios. c, SNR durante o verão. d, MUF do trajeto entre Punta Arenas e Boa Vista.



Fonte: Os Autores (2025).

As Figuras 6a,b,c mostra a variação da SNR durante 24 horas no trajeto Nairobi – Boa Vista. A frequência de 1.8 MHz não obteve valores positivos durante o período em análise, mas em 14 MHz foi registrada com valores acima de 10 dB em todos os períodos sazonais, o mesmo não aconteceu para 28 MHz, onde foram observados valores negativos entre 04:00 – 08:00 UT durante o inverno e entre 02:00 – 08:00 UT durante os equinócios. Para 50 MHz, a SNR obteve valores positivos durante o verão acima de 10 dB entre 11:00 – 21:00 UT. A variação da MUF no trajeto Nairóbi - Boa Vista, durante verão são observados a MUF de 50 MHz por volta de 11:00 até 20:30 UT, como visto na Figura 6d.

Figura 6. a, SNR durante inverno. b, SNR durante os equinócios. c, SNR durante o verão. d, MUF do trajeto entre Nairóbi e Boa Vista.

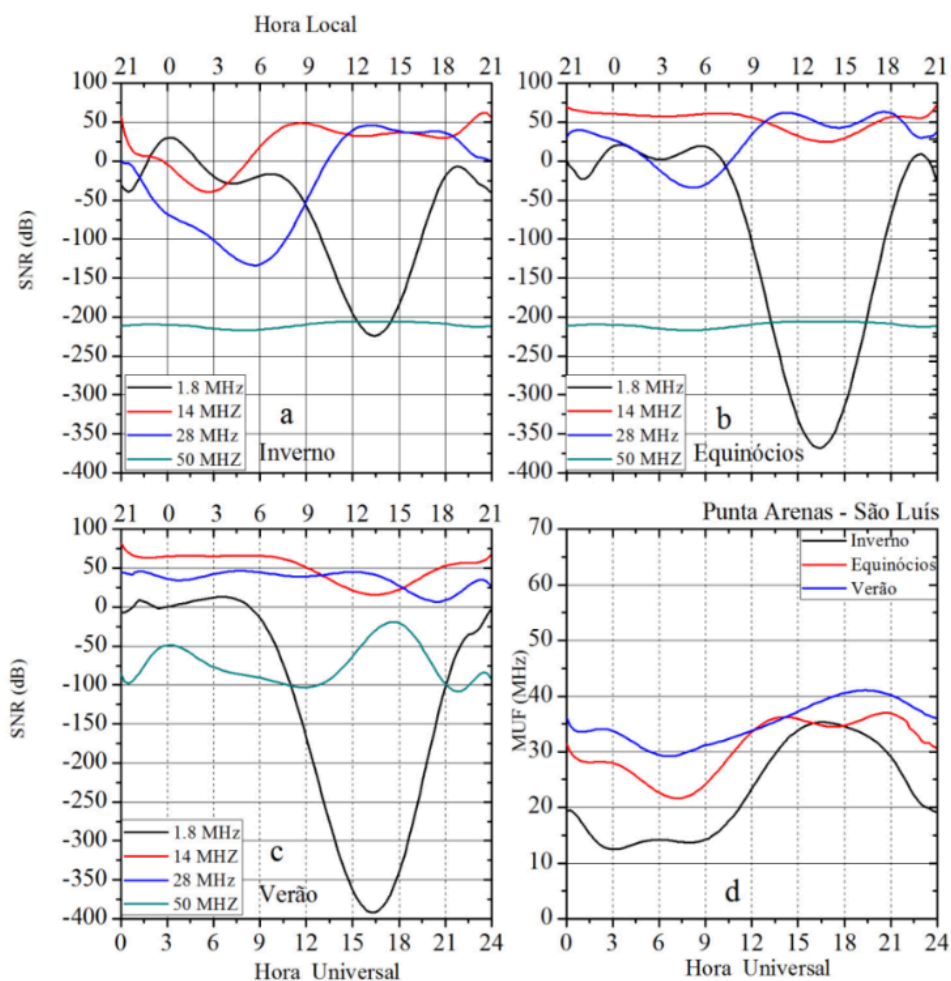


Fonte: Os Autores (2025).

3.3.2. Análise da SNR em São Luís

A Figura 7a,b,c mostra os valores da SNR em São Luís de sinais de rádio recebidos de Punta Arenas para as frequências 1.8, 14, 28 e 50 MHz. A frequência de 1.8 foi registrada com valores positivos por volta de 03:00 UT, 06:00 UT e 09:00 UT durante o inverno, verão e equinócios respectivamente. A SNR para frequência de 14 MHz foram registrados valores positivos acima de 10 dB em todos os períodos sazonais exceto entre 02:00 -08:00 UT durante o inverno. Em 28 MHz a SNR foi positiva durante todo o verão, contudo para os equinócios a SNR esteve com valores acima de zero apenas entre 11:00 – 03:00 UT. Já durante o inverno foram observados valores positivos entre 14:00 – 02:00 UT. Em 50 MHz não foi observado valores positivos da SNR recebidos de Punta Arenas. Por outro lado, os sinais recebidos de Nairóbi para a frequência de 50 MHz.

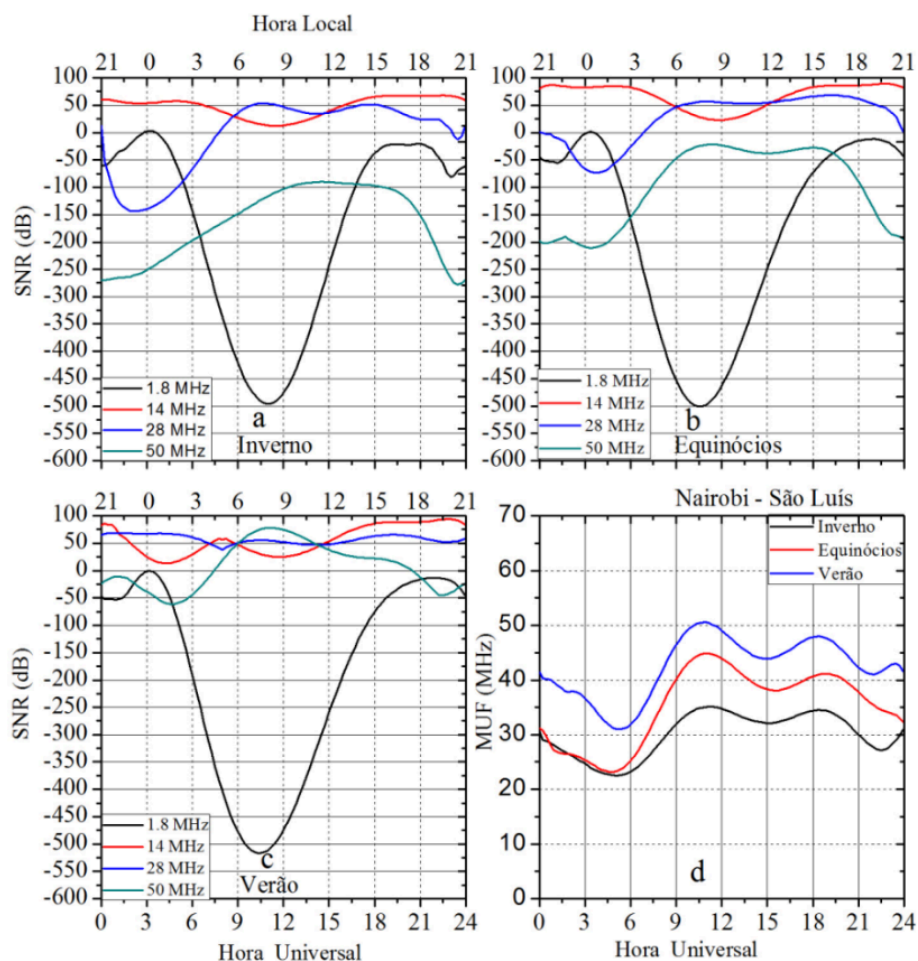
Figura 7. a, SNR durante inverno. b, SNR durante os equinócios. c, SNR durante o verão. d, MUF do trajeto entre Punta Arenas e São Luís. Fonte:



Os Autores (2025).

Figura 8a,b,c, mostra que foram observados valores positivos acima de 10 dB entre 09:00 – 16:00 UT durante o verão, já nas outras estações do ano os valores da SNR foram negativos. Em 28 MHz os sinais de rádio de Nairóbi recebidos em São Luís tiveram oscilações em valores negativos entre 23:00 – 09:00 durante equinócios e inverno, mas durante o verão se manteve com valores acima de 10 dB durante as 24 horas. A frequência de 14 MHz apresentou valores positivos em todos os períodos sazonais durante as 24 horas. A frequência de 1,8 MHz não foi registrada com valores positivos durante o inverno, verão ou equinócios, o que foi confirmado a MUF para esse trajeto Figura 8d.

Figura 8. a, SNR durante inverno. b, SNR durante os equinócios. c, SNR durante o verão. d, MUF do trajeto entre Nairóbi e São Luís.



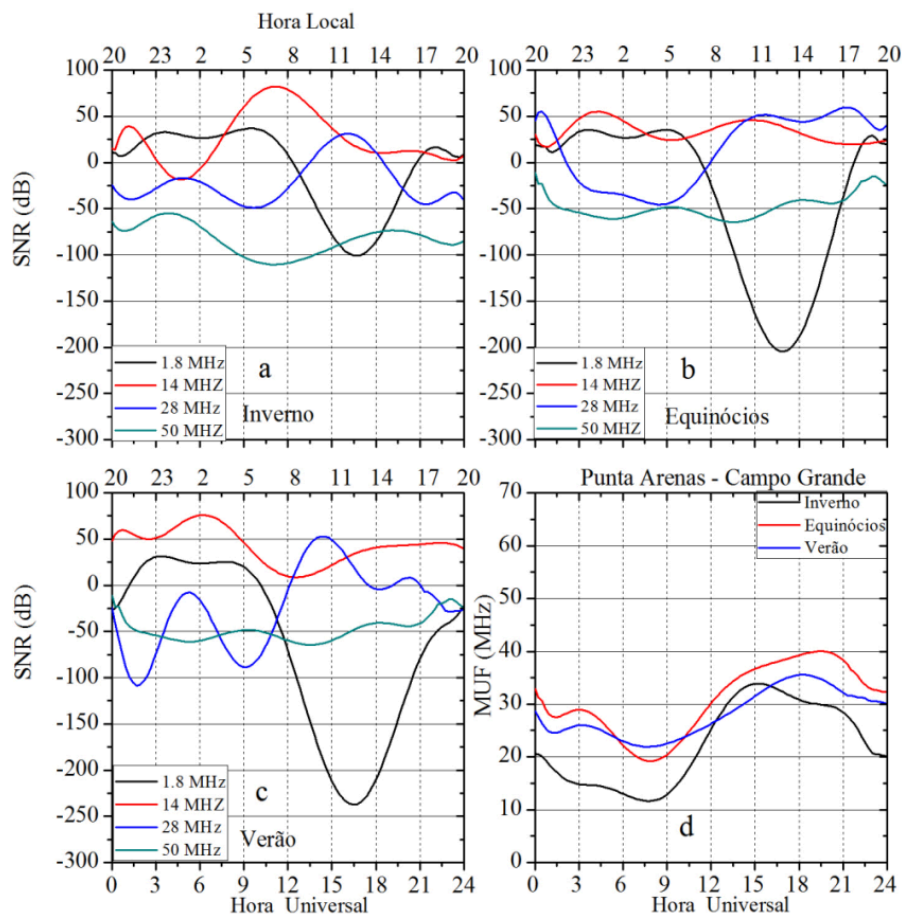
Fonte: Os Autores (2025).

3.3.3. Análise da SNR em Campo Grande

Para a estação Campo Grande, a Figura 9a,b,c representa a SNR referente aos sinais de rádio transmitidos de Punta Arenas. Nesse trajeto observa-se que, para 50 MHz, não foram registrados valores positivos da SNR. Por outro lado, a SNR para a frequência de 28 MHz, oscilou entre valores positivos e negativos, no entanto, foram registrados valores acima de 10 dB em torno de 15:00 UT no inverno e verão, e nos equinócios a frequência de 28 MHz permaneceu por mais tempo com valores acima de 10 dB 13:00 – 02:00 UT. Para 14 MHz, apenas durante o inverno entre 02:00 – 07:00 UT não foram registrados valores acima de 10 dB para esse trajeto. A frequência de

1.8 MHz esteve com valores da SNR acima de zero entre 02:00 – 10:00 UT em todos os períodos sazonais. A MUF para o trajeto Punta Arenas – Campo Grande Figura 9d, confirma os valores da SNR medidos em Campo Grande pelos receptores de rádio amador, porém não explica os altos valores da SNR para frequência de 14 MHz observados durante o inverno.

Figura 9. a, SNR durante inverno. b, SNR durante os equinócios. c, SNR durante o verão. d, MUF do trajeto entre Punta Arenas e Campo Grande.

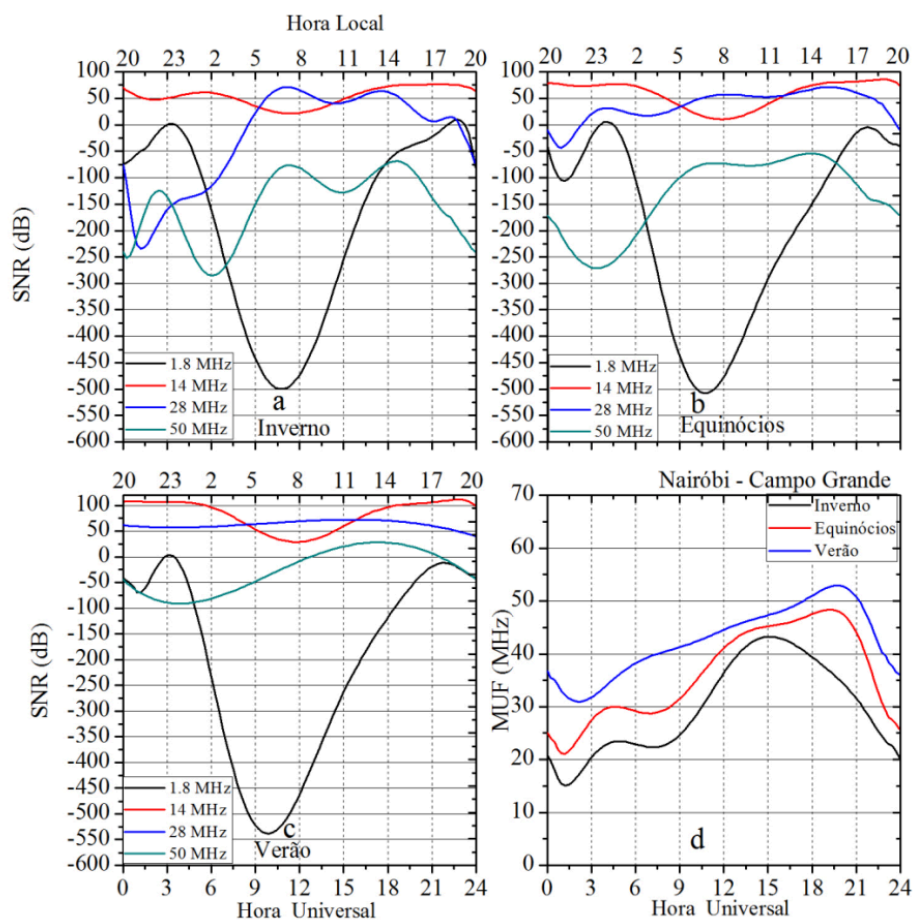


Fonte: Os Autores (2025).

Os sinais de rádio de origem da estação Nairóbi, Figura 10 mostram que a SNR para frequência de 1,8 MHz têm valores negativos em todas as estações do ano, e a frequência de 14 MHz oscila com valores da SNR acima de 10 dB. A frequência de 28 MHz apresenta

SNR > 10 dB apenas entre 10 - 20 UT enquanto que nos equinócios e verão a SNR é sempre maior que 10 dB. Para a frequência de 50 MHz são observados SNR > 10 dB durante o verão entre 15 - 21 UT. Na Figura 10d no trajeto Nairóbi – Campo Grande, nota-se que a MUF alcança 50 MHz entre 18 - 21 UT no verão.

Figura 10. a, SNR durante inverno. b, SNR durante os equinócios. c, SNR durante o verão. d, MUF do trajeto entre Nairóbi e Campo Grande.



Fonte: Os Autores (2025).

4. CONCLUSÃO

Na análise da SNR registrada nas estações de rádio amador, foi verificado para todas as estações do ano que a frequência de 14 MHz teve melhor qualidade de sinal e que a frequência de 28 MHz apresentou bons resultados na maioria dos trajetos. Uma explicação

é, o fato da MUF de trajeto apresentar valores que estão entre 10 – 20 MHz no período de 24 horas durante todo para todos os períodos sazonais e, na maioria dos trajetos, a MUF esteve acima de 30 MHz, o que possibilita a comunicação em 28 MHz. Para frequência de 1.8 MHz foi observado que houve boa qualidade do sinal $SNR > 15$ dB entre 00:00 e 10:00 UT horário noturno no trajeto Punta Arenas - Campo Grande para todos os períodos sazonais. É importante notar que 1.8 MHz é uma frequência de ondas médias e que durante as horas do dia com a presença da região D ionosférica, sinais de rádio que estejam dentro dessa faixa de frequência sofrem atenuação (Ribeiro, 2004), ou seja, quando maior for a energia solar, maior será a atenuação nas frequências de ondas médias, impossibilitando enlaces nos trajetos observados neste trabalho. A frequência de 50 MHz foi identificada com valores positivos da SNR apenas transmitidos de Nairóbi durante o verão. Isto se justifica, pois durante o verão a MUF de trajeto teve maiores valores entre Nairobi e as estações receptoras, ultrapassando 50 MHz. Por outro lado, os sinais de rádio de Punta Arenas, tiveram a MUF de trajeto estimada no máximo em 43 MHz durante o período de verão, como visto nas Figuras 5d a 10d, o que justifica não ser possível estabelecer comunicação em 50 MHz. Um fato importante é o valor da MUF em cada estação tanto transmissora quanto receptora, indicando que as estações localizadas na região das cristas da EIA têm maiores valores da MUF. Outro fato importante é o caminho entre Nairóbi e as estações receptoras de rádio amador, como visto na Figura 1, as reflexões entre Nairóbi e as estações Receptoras, podem ter ocorrido na região das cristas da EIA, com isso justificando a comunicação de 50 MHz. Portanto, a MUF de trajeto entre Tx e Rx é maior nos trajetos entre Nairobi e as estações receptoras do que nos trajetos entre Punta Arenas e as estações receptoras. Assim para MUF de trajeto ter ultrapassado 50 MHz foi necessário que os sinais de rádio tenham

sido refletidos nas regiões de mais alta densidade eletrônica (cristas da EIA), o que pode ter acontecido durante o verão nos trajetos a partir de Nairobi.

Platt; Dyson (1989), Apud Ferguson; Booke (1983), relatam que as propagações na região da ionosfera equatorial propagação transequatorial -TE podem alcançar milhares de quilômetros. Mas por que não foi observado propagação de sinais em 50 MHz durante o inverno? Segundo Rishbeth; Garriot (1969), Bagiya et al. (2009), Chauhan et al. (2011), a quantidade de elétrons presentes na ionosfera durante o inverno é menor que 10×10^{10} elétrons/m³. Portanto para esse valor de densidade eletrônica não seria possível reflexões em 50 MHz via ionosfera, o que conferiu com os resultados deste trabalho para a análise dos trajetos durante o inverno. Portanto a propagação de sinais de rádio em 50 MHz por meio da ionosfera equatorial pode ser possível quando a onda for refletida nas regiões das cristas da EIA.

Usando a correlação entre a MUF de trajeto estimada pelo software VOACAP e a SNR medida pelos transceptores nas estações receptoras de rádio amador, a contribuição deste trabalho foi mostrar a importância da EIA na propagação de sinais de rádio nas comunicações do rádio amadores. O que fica bem sugestivo a tabela 1, contendo informações que ocorreram enlaces entre os trajetos e que, possivelmente essa tabela possa ser útil futuramente para as comunicações nas frequências 1.8, 14, 28 e 50 MHz.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APPLETON, E. V. **Two anomalies in the ionosphere.** Nature. v. 157, p. 691, 1946.

ARAÚJO, Bruno Ferreira; ROBAINA, José Vicente Lima. **A Práxis Docente Como Epistemologia Viva: Religar Saberes no Ensino de Ciências.** Areté - Revista Amazônica de Ensino de Ciências, Manaus, v. 25, n. 39, e25034, ago./dez., 2025. <https://doi.org/10.59666/Arete.1984-7505.v25.n39.5076>.

BANKS, P.; KOCKARTS, G. **Aeronomy:** part A. London: Academic Press, 1973.

BATISTA, I. S.; MEDEIROS, R. T. de; ABDU, M. A.; SOUZA, J. R.; BAILEY, G. J.; PAULA, E. R. de. **Equatorial Ionospheric Vertical Plasma Drift Model Over the Brazilian Region.** Journal of Geophysical Research, v. 101, n. A5, p. 10887–10892, 1996.

BELITZA, D. **The importance of EUV indices for the International Reference Ionosphere.** Phys. Chem. Earth v. 25, p. 515–521, 2000.

BILITZA, D., SHEIKH, N.M., EYFRIG, R. **A global model for the height of the F2-peak using M3000 values from CCIR.** Telecommun. J. v. 46, p. 549–553, 1979.

BAGIYA, S.M.; JOSHI, H.P.; IYER, K.N.; AGGARWAL, M.; RAVINDRAN, S.; PATHAN, B.M. **TEC variations during low solar activity period 2005–2007 near the Equatorial Ionospheric Anomaly Crest Region in India.** Ann. Geophys. v. 27, p. 1047–1057, 2009.

CHAUHAN, V.; SINGH, O.P.; SINGH, B. **Diurnal and seasonal variation of GPS-TEC during a low solar period as observed at a low latitude station Agra.** Indian J. Radio Space Phys. v. 40, p. 26–36, 2011.

CRANE, R.K. **Ionospheric Scintillation**, proc. IEEE, v. 65, p. 180 - 199, 1977.

COHEN, R.; K. L. BOWLES. **On the nature of equatorial spread F**. Journal of Geophysical Research, v. 66, p. 1081-1106, 1961.

DAEHLER, M. **EINMUF: An HF MUF, FOT, LUF Prediction Program**, NRL Memorandum Report 6645, Washington D. C, 1990.

DAVIS, R. M.; GROOM, N. L.. **Variations of the 3000 km MUF in time and space**, Tech. Rep. 8496, Natl. Bureau of Stand., U.S. Gov. Print. Off., Washington, D. C, 1964.

FARLEY, D.T.; BONELLI, E.; FEJER, B.G.; LARSEN, M.F. **The prereversal enhancement of the zonal electric field in the equatorial ionosphere**. Journal of Geophysical Research v. 91, p. 13723, 1986.

FEJER, B. G.; KELLEY, M. C. **Ionospheric irregularities**. Reviews of Geophysics and Space Physics, v.18, n.2, p. 401-454, 1980.

FERGUSON, J. A.; BOOKER, H. G. **A scattering theory of VHF transequatorial propagation**. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, v. 45, n. 8/9, p. 641-657, 1983.

ITU-R. **“Method for the prediction of the performance of HF circuits”**, ITU-R Rec. P.533-10, 2009.

KANE, R. P. **Sunspots, solar radio noise, solar EUV and ionospheric foF2**. J. Atmos. terr. Phys. v. 54, p. 463-463, 1992.

KURIKI, I.; TANOHATA, K.; SAKAMOTO, T. I. M. **Propagational mode deduced from signal strength in the VHF band on the trans-**

equatorial path. J. Radio Res. Labs. Japan, v. 19, p. 175-195, 1972.

LANE, G.; RHOADS, F. J.; DEBLASIO, L. **Voice of America Coverage Analysis Program VOACAP: A Program Guide**, VOA B/ESA Report 01-93, 1993.

LANE, G. **Signal-to-noise predictions using VOACAP – A User's Guide**, Rockwell Collins Inc, USA, 2001.

LLOYD, J. L.; HAYDON, G. W.; LUCAS, D. L.; TETERS, L. R. **“Estimating the Performance of Telecommunication Systems Using the Ionospheric Transmission Channel; Volume I: Techniques for Analyzing Ionospheric Effects Upon HF Systems DRAFT”**. US Army CEEIA Technical Report EMEOPED-79-7, 1978.

MCNAMARA, Leo F.; RETTERER, John M.; ABDU, M.A.; BATISTA, Inez S.; REINISCH, Bodo W. **F2 Peak parameters, drifts and spread F derived from digisonde ionograms for the COPEX campaign in Brazil**. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, v. 70, p. 1144–1158, 2008.

MITOLA, J.; MAGUIRE, G. Q. **Cognitive Radio: making software radios more personal**. IEEE Person Commun. v. 6, p. 13-18, 1999.

MUDZINGWA, C.; NECHIBVUTE, A.; CHAWANDA, A.; AUTHOR, C. **Maximum useable frequency prediction using vertical incidence data**. Int. J. Eng. Res. Technol. V. 2, P. 2050–2056, 2013.

NIELSON, D. L., **A review of VHF transequatorial propagation, Scatter Propagation of Radio Waves**. AGARD Conf Proc. v. 37, p. 1-18, 1968a.

OTT, E. **Theory of Rayleigh-Taylor bubbles in the equatorial ionosphere.** Journal of Geophysical Research, v.83, n.A5, p. 2066-2090, 1978.

PAIXÃO, O. C. P.; REBOUÇAS, A. P. S. **Aprendizagem baseada em projetos no ensino de ciências: do lixo ao luxo.** Areté - Revista Amazônica de Ensino de Ciências, Manaus, v. 25, n. 39, e25056, ago./dez., 2025. <https://doi.org/10.59666/Arete.1984-7505.v25.n39.5112>

PLATT, I. G.; DYSON, P. L. **VHF Transequatorial Propagation Via Three Dimensional Waveguides.** Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. v. 51, n. 11/12. p. 911-928, 1989.

PIQUENARD, A. **Radio Wave Propagation.** New York: Wiley, p. 343. 1974. <https://doi.org/10.1007/978-1-349-01394-4>

RIBEIRO, J. A. J. **Propagação e Ondas Eletromagnéticas: Princípios e Aplicações.** 2. ed. São Paulo - SP: Editora Érica Ltda, v. 1. P. 127 – 129, 2004.

RISHBETH, Henry; GARRIOT, Owen K. **Introduction to Ionospheric Physics.** Academic Press, INC, 1969.

RISHBETH, H. **The F region dynamo.** Planetary and Space Science. v. 19, p. 263, 1971a.

RUSH, C. M.; MILLER, D.; GIBBS, J. **The relative daily variability of foF2 and hmF2 and their implications for HF radio propagation.** Radio Sci. v.2, p.749–756, 1974.

SILVER, W.; WIDIN, G.; HAYCOCK, D. **Your guide to selecting the right equipment.** ARRL, the national association for Amateur Radio,

Newington CT, USA. p. 19-23, 2014.

<https://www.arrl.org/files/file/On%20the%20Air/Choosing.pdf>

SHIMAZAKI, T. **World-wide variations in the height of the maximum electron density of the ionospheric F2 layer.** J. Radio Res. Labs. Japan, v. 2, n. 7, p. 85-97, 1955.

SWEENEY, N.; RHOADS, F. J.; BLASIO, L.; LANE, G. "**Voice of America Coverage Analysis Program A users guide for VOACAP,**". United States Information Agency, Bureau of Broadcasting/Pimning and Technology Assessment Division B/ESA Report 02-93, April 1993.

TANYER, S. G.; EROL, C. B. **Broadcast analysis and prediction in the HF band,** IEEE Transactions on Broadcasting. v. 44, p. 226–232, 1998.

TETERS, L.R.; LLOYD, J. L.; HAYDON, G. W.; LUCAS, D.L. **Estimating the Performance of Telecommunication Systems Using the Ionospheric Transmission Channel,** Institute for Telecommunication Sciences NTIA Report 83-127, July 1983.

¹ Docente do IFRR e do MNPEF polo 38 UFRR

² Pesquisadora Professora INPE/Mackenzie

³ Discente de Física da UFRR

⁴ Docente de Física da UFRR

⁵ Docente do Departamento de Medicina Veterinária da UFRR