



Análise da Recepção do Sinal VLF da Estação NAA (24.0 Khz) EUA na Pesquisa de Água Subterrânea no Estado do Ceará, Nordeste do Brasil

Walber Cordeiro¹, Vinicius Feijó Cordeiro², Elicius Feijó Cordeiro³
Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco⁴

Resumo: Durante as últimas décadas, vários autores têm demonstrado a utilidade dos levantamentos geofísicos VLF (Vey Low Frequency) como uma ferramenta rápida e poderosa para o estudo de estruturas geológicas (falhas, fraturas, diaclases, contatos, diques, etc.). Outras aplicações envolvem prospecção mineral, engenharia civil, identificação de contaminantes e principalmente na prospecção de águas subterrâneas. Durante a pesquisa apresentada neste trabalho constatou-se que a estação VLF NAA (24.0 kHz) tem sinal mais forte, estável e menos sujeito a ruídos, mesmo em áreas urbanas e atende a todas as variações de direção das zonas fraturadas no quadrante NW. Entretanto, ainda residem dúvidas quanto à utilização eficiente deste método, provocando questionamentos quanto a utilidade e confiabilidade dos sinais VLF transmitidos a longas distâncias. Em resposta à questão foi formulada a hipótese: “Os sinais VLF da estação NAA (24.0 kHz) transmitidos de Cutler, Maine-EUA podem ser usados de forma confiável na prospecção de água subterrânea, no território cearense?”. Assim, na tentativa de sustentação desta, são apresentados os resultados e a análise das observações da intensidade do sinal desta estação executadas no território cearense no período de 20/01/2001 a 28/12/2012, no qual foram realizados 768 perfis VLF para prospecção de água subterrânea em 78 municípios cearenses, totalizando 347,61Km de pesquisa geofísica utilizando o equipamento WADI construído pela empresa sueca ABEM. Estas observações foram também comparadas aos dados adquiridos pelo Observatório Moore através de um monitoramento contínuo da estação NAA. A revisão bibliográfica sobre o comportamento das ondas VLF demonstra que a propagação destas se dá na camada confinante formada pela ionosfera e a superfície da terra e que impede o sinal de ondas VLF escapar para o espaço, tornando possíveis os sinais VLF serem captados em distâncias superiores a 10 mil quilômetros dos transmissores. Com relação ao que foi apresentado e analisado pode-se concluir que: as ondas VLF se propagam a longas distâncias de forma consistente, com estabilidade e reprodutibilidade da amplitude

¹ FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos

² ANGLOGOLD ASHANTI Córrego do Sítio Mineração S.A.

³ GEOANÁLISE Serviços Técnicos Geológicos Ltda.

⁴ Departamento de Geologia – Universidade Federal do Ceará

Autor para correspondência: Walber Cordeiro

FUNCEME - Av. Rui Barbosa, 1246 – Aldeota - Fortaleza - CE - CEP 60115-221

E-mail: walberc@funceme.br

Recebido em 29 de Agosto de 2017 / Aceito em 23 de Outubro de 2017.

e fase do sinal; o sinal VLF transmitido pela estação NAA (24.0 kHz) é estável e reproduzível, mesmo a distâncias superiores a 10.000 km; os valores do indicador relativo de potência do sinal VLF da estação NAA (24.0 kHz) registrados pelo equipamento WADI no território cearense estão em 93,86% dos casos dentro do intervalo entre 10 e 35, considerado confiável pelo fabricante e os valores do sinal da estação NAA (24.0 kHz) obtidos no Ceará são proporcionais e apresentam fortes semelhanças com os obtidos no Observatório Moore, com uma frequência superior aos 90% no intervalo entre os valores 10 e 30. Desta forma, fica comprovado a confiabilidade da utilização do sinal VLF da estação NAA na prospecção de água subterrânea no território cearense, baseado no seu princípio de aplicação.

Palavras-chave: VLF, ondas, monitoramento.

Abstract: *During the last decades, several authors have demonstrated the usefulness of VLF (Very Low Frequency) geophysical surveys as a fast and powerful tool on surveying geological structures (faults, fractures, diaclasses, contacts, dikes, etc.). Other applications involve mineral prospecting, civil engineering, contaminants identification and especially groundwater prospecting. During this research, it was verified that VLF NAA station (24.0 kHz) has a stronger, stable and less noise-prone signal even in urban areas and meets all the direction variations of fractured zones in the NW quadrant. However, there are still doubts about the efficient use of this method, provoking questions about the usefulness and reliability of VLF signals transmitted over long distances. In response to that question, the hypothesis was put forward: "Can VLF signals from NAA station (24.0 kHz) transmitted from Cutler, Maine-USA be used reliably in groundwater surveying at Ceará's state? ". Thus, in the attempt to sustain this, results and analysis of signal intensity observations of this station executed at Ceará during the period from January 20, 2001 to December 28, 2012. In total, 768 VLF profiles groundwater prospecting were performed in 78 municipalities of Ceará, totaling 347.61 km of geophysical surveys using WADI equipment built by Swedish company called ABEM. These observations were also compared to data acquired by Moore Observatory through continuous monitoring of NAA station. The literature review on the behavior of VLF waves shows that the propagation of these waves occurs in the confining layer formed by ionosphere and Earth's surface and that prevents VLF wave signal from escaping into space, making it possible for VLF signals to be captured at higher distances up to 10 thousand kilometers of the transmitters. In relation to what was presented and analyzed it can be concluded that: VLF waves propagate at long distances consistently, with stability and reproducibility of signal amplitude and phase; The VLF signal transmitted from NAA station (24.0 kHz) is stable and reproducible, even at distances exceeding 10,000 km; The values of the relative power indicator of VLF signal of NAA station (24.0 kHz) recorded by WADI equipment Ceará's state are 93.86% of the cases within the range of 10 to 35, considered reliable by manufacturer and signal values of NAA station (24.0 kHz) obtained in Ceará are proportional and present strong similarities with those obtained at Moore Observatory, with a frequency higher than 90% in the interval between values 10 and 30. In this way, the reliability using VLF signal from NAA station at groundwater surveying at Ceará's state, based on its application principle, is proved.*

Keywords: VLF, waves, monitoring.

1. INTRODUÇÃO

Durante as últimas décadas, vários autores têm demonstrado a utilidade dos levantamentos geofísicos VLF como uma ferramenta rápida e poderosa para o estudo de estruturas geológicas tais como falhas, fraturas, diaclases, contatos, diques, etc. (Valtr *et al.*, 2006) e (Valtr e Hanžl, 2012). Outras pesquisas como na prospecção mineral (Antoniuk, 1985) e (Moradzadeh *et al.*, 2005); engenharia civil (Savvaidis *et al.*, 1999) e (Aigbedion, 2007); identificação de contaminantes (Benson *et al.*, 1997), (Al-Tarazi *et al.*, 2008) e (Tirone *et al.*, 2010) e principalmente na prospecção de águas subterrâneas (Cavalcante *et al.*, 2001), (Sultan *et al.*, 2006), (Monacchi e Zanini, 2009) e (Nascimento e Almeida, 2013). Entretanto ainda residem dúvidas quanto à utilização eficiente deste método, provocando alguns questionamentos e dentre estes destacam-se o seguinte: os sinais VLF transmitidos a longas distâncias chegam fortes o suficiente para serem usados de forma confiável?

Para dar resposta à questão foi formulada a hipótese: **“Os sinais VLF da estação NAA (24.0 kHz) transmitidos de Cutler, Maine-EUA podem ser usados de forma confiável na prospecção de água subterrânea, no território cearense?”**. Este trabalho tem o objetivo principal de demonstrar esta hipótese e para tanto será apresentada uma breve revisão sobre as ondas VLF destacando: o intervalo de frequência e comprimento de onda; suas trajetórias de propagação; as variações noturnas e diurnas; as interferências sofridas e sua capacidade de propagação.

Durante os trabalhos de pesquisa constatou-se que a frequência 24.0 kHz era a mais estável e menos sujeita a ruídos, mesmo em áreas urbanas e

atendia a todas as variações de direção das zonas fraturadas no quadrante NW, como já constatado em (Cordeiro, 2000).

Portanto, neste trabalho são apresentados os resultados e a análise das observações da intensidade do sinal da estação VLF NAA (24.0 kHz) executadas no território cearense no período de 20/01/2001 a 28/12/2012, quando foram realizados 768 perfis VLF perfazendo um total de 347,61Km de pesquisa geofísica exclusiva para a prospecção de água subterrânea. Estas observações serão também comparadas aos dados adquiridos pelo Observatório Moore e com a SID Monitoring Station através de um monitoramento contínuo da estação NAA.

1.1 As Ondas VLF

As ondas VLF correspondem a frequências entre 3 kHz e 30 kHz com comprimentos de onda entre 10 e 100 km e (Scherrer *et al.*, 2010) apresentam o espectro eletromagnético de frequência de rádio dividido em regiões, de acordo com os regulamentos de radiocomunicações da ITU (International Telecommunications Union) (Figura 1).

Na propagação das ondas VLF a ionosfera e a superfície da terra formam uma camada confinante que impede o sinal de VLF de escapar para o espaço, atuando de forma importante, pois é entre elas que trafega a maior parte destas ondas eletromagnéticas, muito embora somente a porção que trafega no subsolo é utilizada na prospecção (Figura 2). Isso torna possíveis os sinais VLF serem captados em distâncias superiores a 10 mil quilômetros dos transmissores e podem penetrar a água salgada até uma profundidade de algumas dezenas de metros por isso são usadas por militares para a comunicação com submarinos.

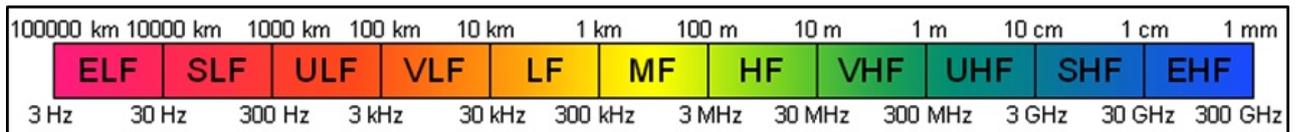


Figura 1 - Espectro de frequência de rádio dividido em regiões - Fonte: (Scherrer et al., 2010)

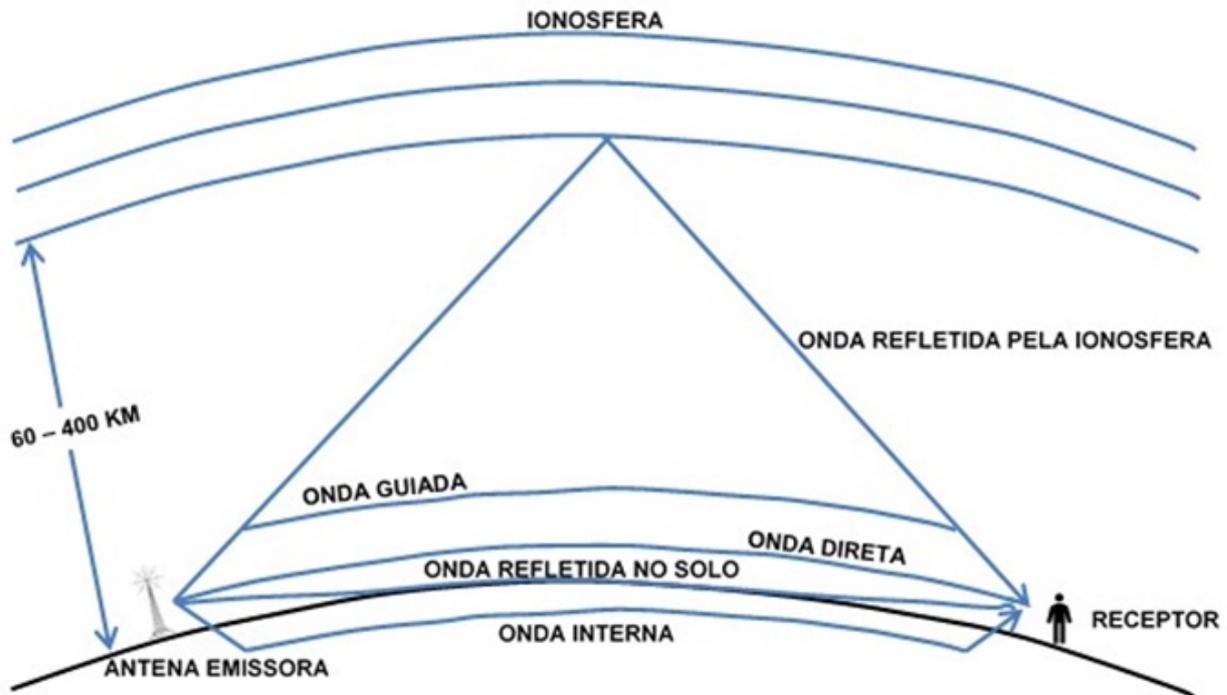


Figura 2 - Diferentes trajetórias das ondas VLF - Fonte: Modificado de Wright (1988) in (JORDANA & MARGALIDA, 1991)

Devido à interação com a ionosfera, o sinal VLF varia ao longo do dia com as variações diárias de altura da ionosfera, marcadas por diferentes camadas com densidades de ionização próprias. Durante o dia a ionosfera é fortemente ionizada pelo sol, criando as camadas D, E e F. Durante a noite a ionização é pequena e provocada somente pelos raios cósmicos, criando somente as camadas E e F mais elevadas, Figura 3 (Scherrer et al., 2010).

Além das flutuações diárias, a atividade do Sol pode causar mudanças bruscas, dramáticas para a ionosfera, o que ocorre quando a energia de uma tempestade solar atinge a Terra, a ionosfera torna-se de repente mais ionizada, alterando assim sua densidade e localização das camadas. Com o

aumento de ionização, os sinais VLF saltam a partir da camada inferior, D. Para tais eventos usa-se o termo "Sudden Ionospheric Disturbance" (SID).

1.2 Monitoramento da Ionosfera Através das Ondas VLF

Devido às características citadas anteriormente, as ondas de rádio VLF têm sido muito utilizadas como uma ferramenta de longo alcance no monitoramento da ionosfera. As mudanças nas propriedades elétricas da ionosfera causam alterações na recepção da fase e amplitude da onda de rádio. Comparando as observações experimentais com simulações baseadas nas mudanças previstas para a ionosfera permite entender o que está acontecendo e para tanto foram desenvolvidas antenas

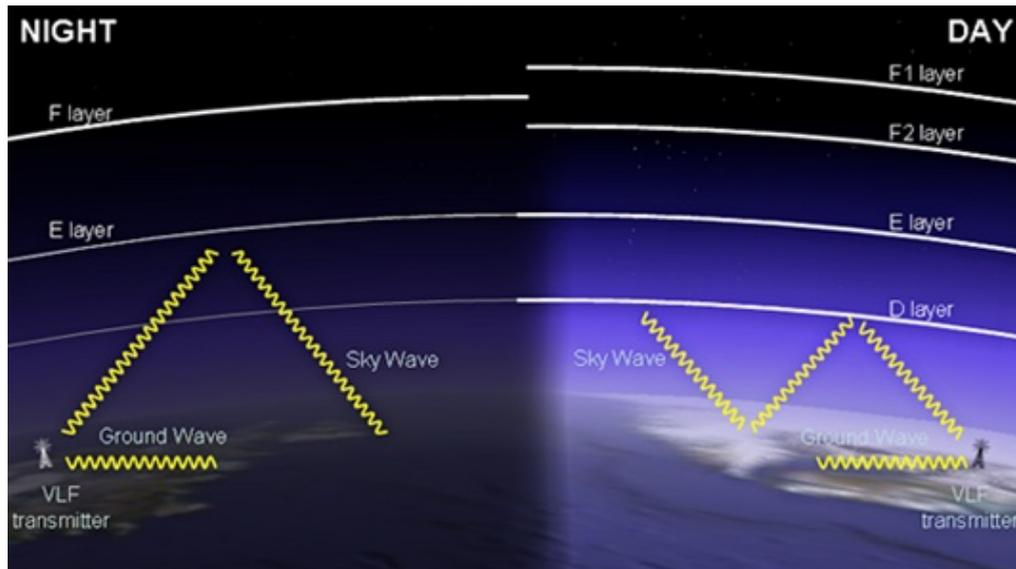


Figura 3 - Comportamento da propagação das ondas VLF nos períodos noturno e diurno

específicas para o monitoramento, (Kielkopf e Cowan, 2000) e (Scherrer *et al.*, 2010). Como exemplo destes monitoramentos destacam-se os seguintes receptores VLF: O Moore Observatory, localizado em Brownsboro, Louisville, Kentucky nos Estados Unidos, possui um receptor sintonizado com a estação VLF NAA (24.0 kHz) Cutler, Maine que está a ≈ 1.800 Km de distância. Esta estação de monitoramento recebe de forma automática o sinal de rádio a cada 15 segundos e grava as médias a cada minuto, atualizando o

gráfico a cada 10 minutos que é disponibilizado através do site (<http://moondog.astro.louisville.edu>) desde 05/01/1999. A Figura 4 apresenta os resultados da recepção de um período de 24 horas, onde pode ser observada a diferença da recepção do sinal na fase diurna mais constante e o da fase noturna cheio de ruídos, observa-se também a marcação clara do nascer e do pôr do sol e das perturbações súbitas provocada pelas explosões solares (SID) "Sudden Ionospheric Disturbance".

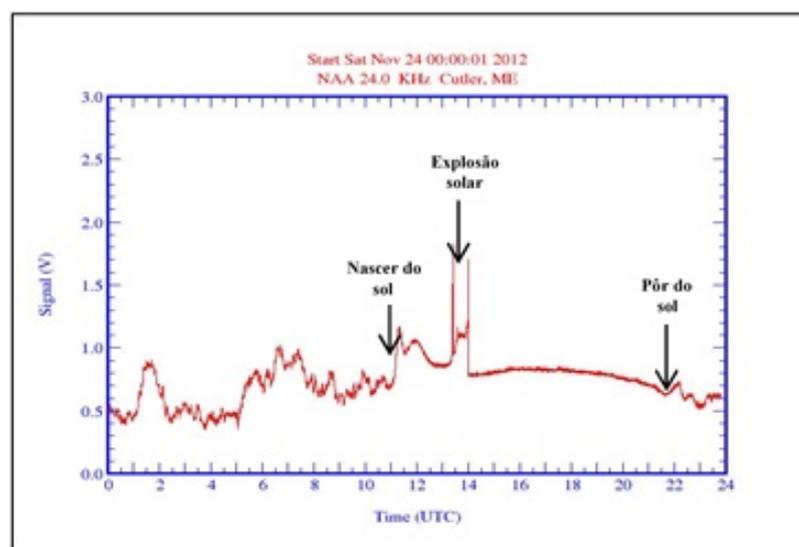


Figura 4 - Gráfico do monitoramento da onda VLF da estação 24.0, no dia 24 de novembro de 2012, no Moore Observatory - Fonte: (<http://moondog.astro.louisville.edu>)

Outra estação de monitoramento que merece destaque é a SID Monitoring Station, localizada no sul da França que está em operação desde 2006 (<http://sidstation.loudet.org/>). Embora seja um observatório amador, monitora nove estações entre 19,6 kHz e 77,5 kHz e fornece os dados para uma rede de observadores ao redor do mundo. A Figura 5 apresenta o resultado da recepção do sinal da estação VLF NAA

(24.0 kHz) Cutler, Maine-EUA, monitorado pela SID no sul da França (a ≈ 5.600 Km de distância) no mesmo dia dos dados do Moore Observatory (ver Figura 4). Comparando os dois gráficos observa-se que as perturbações provocadas pela ionosfera são específicas do local da estação de recepção e das atenuações sofridas ao longo do caminho entre o transmissor e receptor.

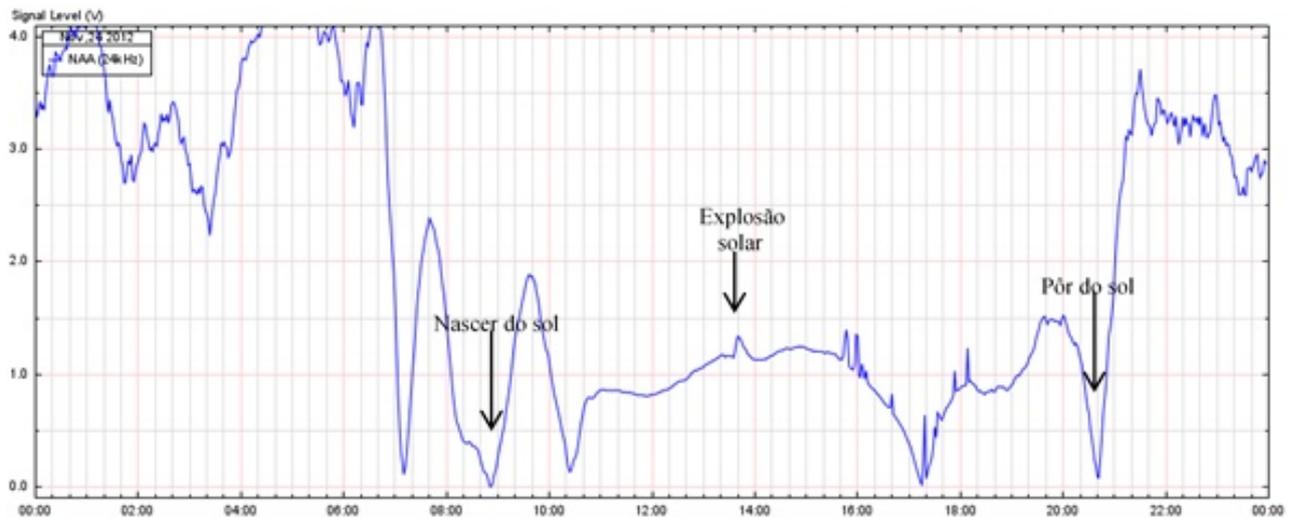


Figura 5 - Gráfico do monitoramento das ondas VLF da estação 24.0, no dia 24 de novembro de 2012, na SID Monitoring Station sul da França - Fonte: (<http://sidstation.loudet.org/>).

1.2.1 Capacidade de propagação das ondas VLF

A Capacidade de Propagação das Ondas Longas (LWPC – Long Wave Propagation Capability) é demonstrada em diversos estudos, dos quais destacam-se:

Segundo (Clilverd *et al.*, 1999), a variação diurna do sinal VLF propagado a longas distâncias (> 5.000 Km) foi observado pela primeira vez por Yokoyama e Tanimura em 1933. Aqueles autores apresentaram alguns interessantes estudos de propagação VLF de longo prazo (1990-1995) a uma grande distância (12.000 Km) Norte-Sul de Cutler, Mine (EUA), (transmissor NAA, 24 kHz) para Faraday na Antártida (Figura 6).

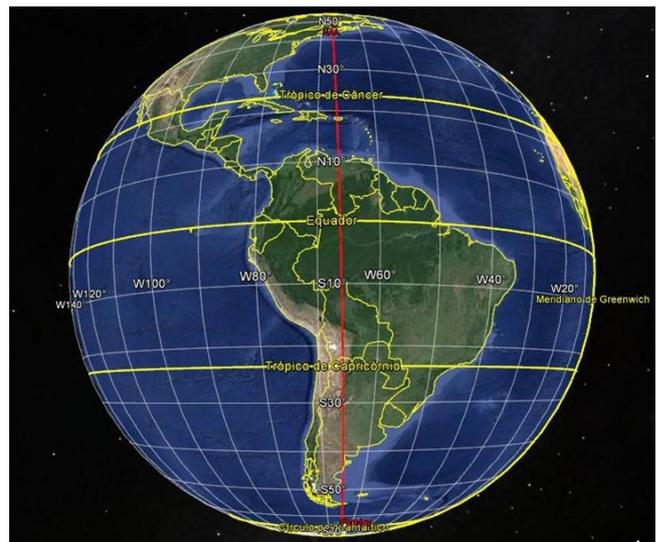


Figura 6 - Localização das estações transmissora NAA e receptora Faraday e o longo caminho de transmissão entre elas (12.000Km) linha vermelha – Fonte: Google (2014)

Os autores apresentaram ainda um estudo detalhado dos tempos da amplitude mínima observada no caminho entre NAA e Faraday (Figura 7).

Neste artigo os valores médios de amplitude em decibéis foram referenciados um arbitrário, porém constante nível de tensão do receptor onde 15 dB é equivalente a cerca

$50/\mu\text{V m}^{-1}$ nas antenas de loop verticais. Eles concluem também que a estabilidade e reprodutibilidade da amplitude e fase de sinais recebidos do transmissor de navegação VLF, fazem da propagação VLF uma ferramenta útil para a comunicação e sistema de navegação de longo alcance (Figura 8).

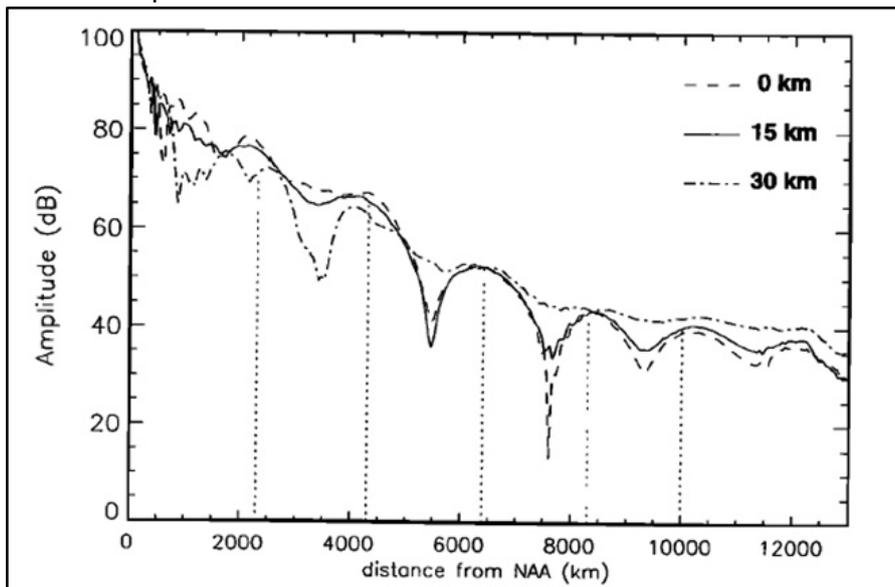


Figura 7 - Capacidade de propagação de ondas longas (LWPC) – dados de receptores em altitudes de 0, 15 e 30 km, ao longo do caminho entre NAA (Cutle, Mine) e Faraday na Antártica. Fonte:(Clilverd et al., 1999).

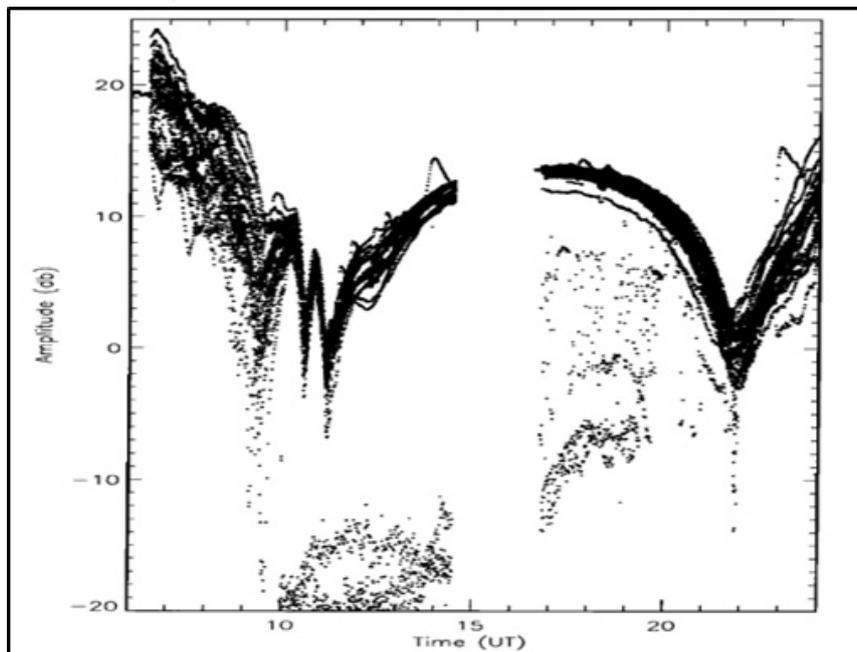


Figura 8 - Demonstração da estabilidade e reprodutibilidade dos dados de amplitude de NAA a Faraday observados no período de 1 a 20 de janeiro de 1994. Valores de -15 a -20 dB entre 10:00 e 15:00 (UT) representam níveis de ruído quando o transmissor está desligado. Fonte: (Clilverd et al., 1999).

Já Kumar (2009), realiza estudos com o objetivo de estimar os parâmetros da “waveguide” (camada limitada pela superfície da terra (terra ou mar) e a baixa ionosfera ($\approx 60\text{-}140$ km)) através das observações da frequência 19,8 kHz no mês de dezembro de 2006, em Suva (18.1o S, 178,5o E), Fiji. Este sinal é transmitido pela North West Cape, NWC (21,8o S, 114,1o E, 1MW) transmissor VLF que está a uma distância de 6.696 km e suas ondas se propagam principalmente na direção Oeste-Leste para Suva. O autor conclui que a análise dos dados das ondas VLF sobre o longo percurso de propagação, indica uma boa consistência entre os valores observados (Figura 9) e os calculados através do modelo.

1.3 A Estação VLF NAA (24.0 KHZ)

Durante as primeiras pesquisas VLF iniciadas em 1993 no estado do Ceará, foram utilizadas estações com 7 frequências diferentes, transmitidas por 12 estações VLF, entretanto, no desenvolvimento dos trabalhos foi observado que a frequência 24.0kHz era mais estável e menos sujeita a ruídos, mesmo em áreas urbanas, e atendia a todas as variações de direção das zonas fraturadas no quadrante NW, sendo, portanto, utilizada a partir de 1997 em todos os perfis VLF (Cordeiro, 2000). Durante a atual pesquisa (2001 a 2012) foram realizados 782 perfis VLF e para tanto 5 estações foram sintonizadas, entretanto em 98,21% dos casos, ou seja, 768 perfis foram executados com a estação VLF NAA (24.0 kHz), sendo esta, portanto, o foco central desse trabalho.

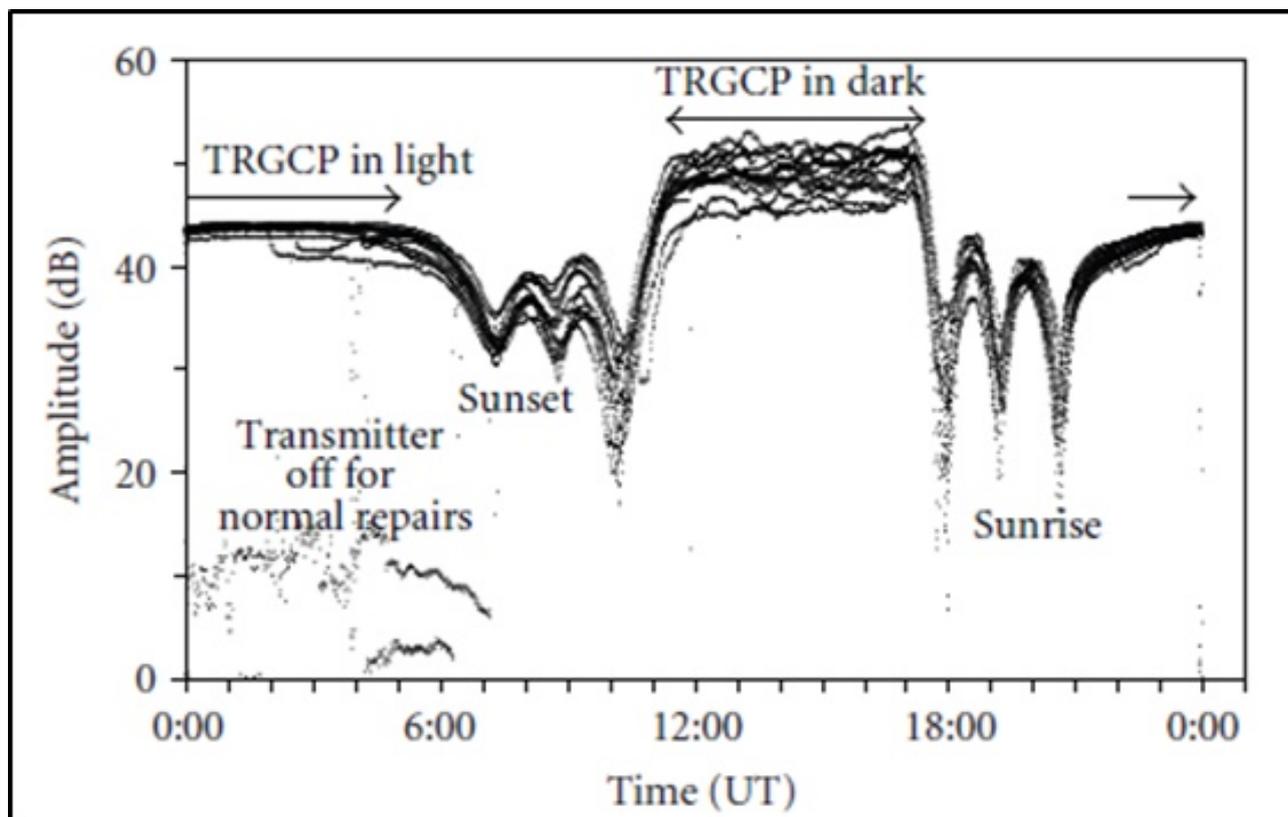


Figura 9 - Variações diurnas na amplitude da NWC em Suva, observadas durante 15 dias de dezembro de 2006. Os valores em torno de 10 dB ou menos são provocados pelo desligamento da estação para manutenção periódica. Fonte: (Kumar, 2009).

No final dos anos 1940, a Marinha dos EUA inicia a instalação de um transmissor de rádio de alta potência e baixa frequência, na costa leste dos EUA em Cutler, Maine, para estabelecer a comunicação com submarinos no Atlântico Norte e Ártico, iniciando sua operação em 1961. Esta estação opera na frequência de 24 kHz com um transmissor de 2.000 KW de potência e está localizada na Península de Sprague Neck a oeste da vila de Cutler, Maine (Figura 10), cobrindo uma área de aproximadamente 800 ha com 26 torres de antenas que variam de 240 a 300m de altura (Figura 11). Desde outubro de 2.000 essa estação é operada por pessoal civil e deixa de ser uma base estritamente militar e está a mais

6000km de distância do Ceará. (<http://www.globalsecurity.org/military/facility/cutler.htm>).

Embora a maioria dos autores consultados atribuam à estação NAA a frequência de 24.0 kHz, em (NAVELEX, 1972) sua frequência era de 17.8 kHz e 24.0 kHz e era transmitida pela estação NBA localizada em Summit na zona do Canal do Panamá. Já em dados do fabricante (ABEM Instrument AB, 1995) a NAA transmitia as frequências: 15.5; 17.8; 18.5; 18.6; 21.4; 22.3; 25.3 e 25.8 kHz e as estações NPM (Pearl Harbor – Hawaii); NBA (Balboa – Panamá); NSS (Washington – USA) e NLK (Oso Washington – USA) eram as que transmitiam a frequência de 24.0 kHz.



Figura 10 - Localização da estação NAA, com o posicionamento de suas 26 torres de antenas (triângulos vermelhos). Fonte: Google (2014).



Figura 11 - Detalhe das torres de antenas da estação NAA. Fonte: ELIZABETH MASTERSON in <https://ssl.panoramio.com/photo/48557186> (acesso em 22/02/2014).

Outra divergência entre os autores é quanto à potência de transmissão, que a grande maioria, inclusive as mais atualizadas, atribuem a NAA 1.000 KW, já o valor encontrado em (UNITED STATES NAVAL COMMUNICATIONS, 1961) e (NAVELEX, 1972) é de 2.000 KW sendo ambas, comunicações oficiais da marinha americana. Entretanto mesmo que atualmente ela transmita com uma potência de 1.000 KW, continua sendo a estação VLF mais potente do hemisfério norte, já que no hemisfério sul a estação NWC (North West Cape – Austrália) também tem potência de 1.000 KW.

1.3.1 Recepção dos dados da Estação VLF NAA (24.0 KHz) no Moore Observatory

O Moore Observatory realiza o monitoramento da estação VLF NAA (24.0 kHz) através de um receptor fixo e disponibiliza os dados de intensidade do sinal desde 05/01/1999 tanto no formato de arquivo de dados quanto como figuras no formato JPEG. Até o dia 19/12/2009 a escala de valores de intensidade do sinal

era arbitrada e só a partir de 29/12/2009 os valores passaram a ser exibidos em Volt (V), (Figura 12 (a) e (b)).

Os dados do Moore Observatory serão usados aqui para mostrar o padrão de comportamento da transmissão da estação NAA e para a análise comparativa com os dados recebidos no estado do Ceará.

1.3.1.1 Comportamento da estação NAA em 2012 com base nos dados do Moore

A análise dos dados do Moore do ano de 2012 foi utilizada para demonstrar o padrão de operação da estação NAA que sofreu desligamento para manutenção em 73 dias (20%), sendo a maioria nas segundas-feiras (73,36% destas), seguido das sextas-feiras que apresentaram desligamento em 21,15% destes dias. Destacaram-se neste ano os longos períodos de desligamento: 12 dias (30/01 a 10/02); 12 dias (02/04 a 13/04) e 5 dias (15/10 a 19/10). Do período de 22/01/2010 a 28/12/2012 foram selecionados os dados de intensidades

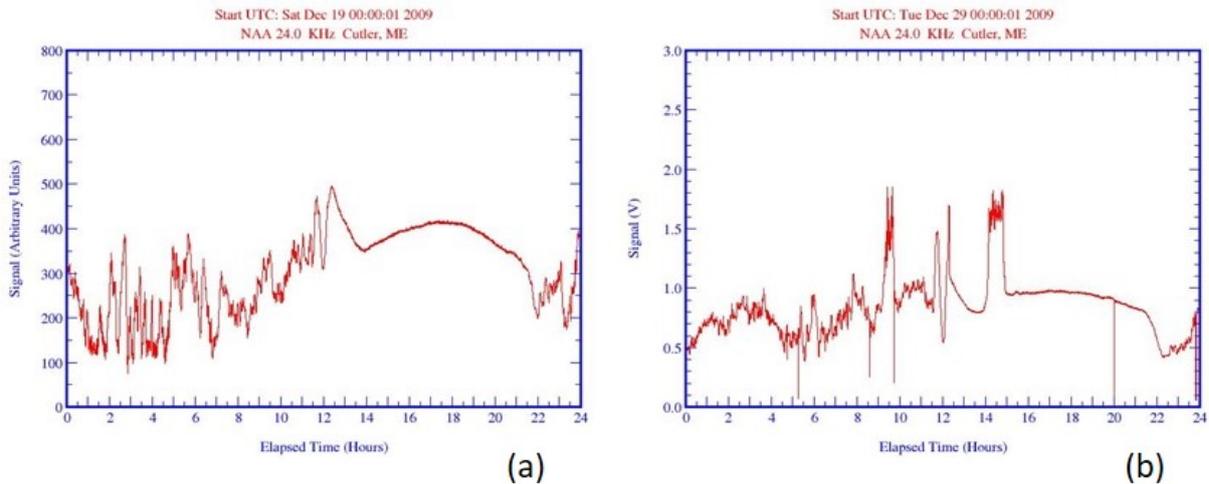


Figura 12 - Escala de valores do sinal em unidades arbitradas (a) e em valores em Volts (V) (b).

do sinal que correspondiam às datas e horários dos obtidos pelo equipamento WADI (ABEM) no estado do Ceará.

1.3.2 Recepção dos dados da Estação VLF NAA (24.0 KHz) no Estado do Ceará

A estação de recepção dos dados VLF no Ceará é o equipamento WADI construído pela empresa sueca ABEM (ABEM Instrument AB, 1989a), que diferentemente do receptor do Moore Observatory, não é fixo e não recebe

dados de forma contínua e automática. Todos os dados de intensidade do sinal VLF apresentados e analisados a seguir foram obtidos no território cearense durante campanhas de campo realizadas no período entre 20/01/2001 e 28/12/2012 quando foram executados 768 perfis VLF para a prospecção de água subterrânea, com uma distribuição anual muito variável, com a maior concentração nos anos 2005, 2007 e 2012 que somados acumulam 48,31% dos perfis VLF (Figura 13).

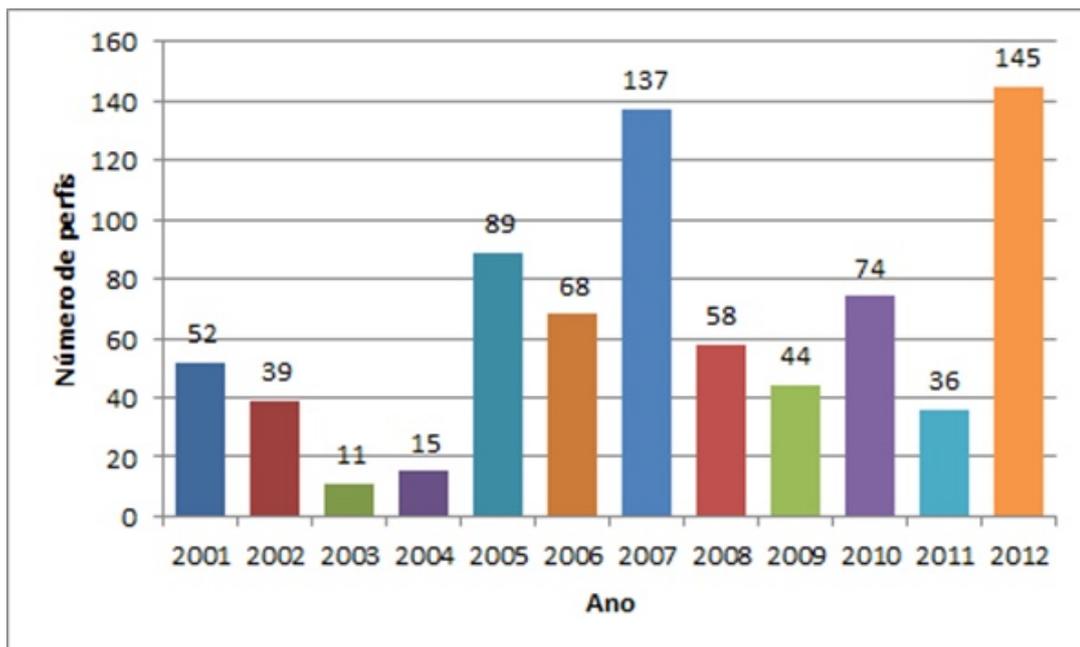


Figura 13 - Distribuição dos perfis VLF ao longo do período da pesquisa 2001 a 2012.

Os perfis VLF estão distribuídos em 78 municípios do Ceará (Tabela 1) com a maior concentração (76,00%) em 20 destes (Figura 14), onde se destacam Fortaleza com 12,11% e Itapipoca com 10,68%.

O WADI pode ser usado normalmente em distâncias que variam de 75 – 100 Km até cerca de 10.000 Km de distância de um transmissor VLF potente (ABEM Instrument AB, 1989b). Os valores lidos no WADI na operação de seleção da

estação VLF, indicam a intensidade do sinal naquele local e instantâneo e é um indicador relativo de potência de sinal VLF idealizado pelo fabricante que estabeleceu uma escala de valores (arbitrados) variando de 1 a 63 e que normalmente deve situar-se entre 15 e 30 para que o transmissor seja útil, com valores abaixo de 10 e acima de 50 torna-se difícil obter quaisquer medições confiáveis (ABEM Instrument AB, 1989a).

Tabela 1 - Relação dos municípios e o número de perfis VLF realizados no período entre 20/01/2001 e 28/12/2012 no território cearense.

Município	Nº de Perfis	Município	Nº de Perfis	Município	Nº de Perfis
FORTALEZA	93	SÃO GONÇALO DO AMARANTE	7	ITAPIÚNA	2
ITAPIPOCA	82	SOBRAL	7	JAGUARIBARA	2
AIUABA	50	CATARINA	6	JUCÁS	2
MORADA NOVA	43	HORIZONTE	6	MOMBAÇA	2
AQUIRAZ	38	IGUATU	6	REDENÇÃO	2
GUARAMIRANGA	31	BATURITÉ	5	RUSSAS	2
CAUCAIA	26	CASCAVEL	5	SENADOR POMPEU	2
CRATEÚS	26	CHOROZINHO	5	ALTO SANTO	1
SANTANA DO ACARAÚ	23	QUIXERAMOBIM	5	APUIARÉS	1
MARACANAÚ	22	ACOPIARA	4	CAMPOS SALES	1
AMONTADA	20	CANINDÉ	4	CARIDADE	1
QUIXADÁ	19	JAGUARUANA	4	CRATO	1
EUSÉBIO	18	QUIXERÉ	4	JATI	1
PARAMOTI	18	TAUÁ	4	MASSAPÉ	1
PACOTI	14	ARACATI	3	MAURITI	1
PENTECOSTE	14	ARACOIABA	3	MILHÃ	1
ITATIRA	12	ARATUBA	3	OCARA	1
MARANGUAPE	12	JAGUARETAMA	3	PARACURU	1
MULUNGU	12	JAGUARIBE	3	PARAIPABA	1
ITAITINGA	11	MERUOCA	3	PENAFORTE	1
IRAUÇUBA	9	PACATUBA	3	PINDORETAMA	1
BEBERIBE	8	TRAIRI	3	TAMBORIL	1
TABULEIRO DO NORTE	8	ACARAPE	2	TURURU	1
TARRAFAS	8	CAPISTRANO	2	UMIRIM	1
GUARACIABA DO NORTE	7	SÃO GONÇALO DO AMARANTE	7	URUBURETAMA	1
POTENGI	7	ITAPAJÉ	2	VÁRZEA ALEGRE	1

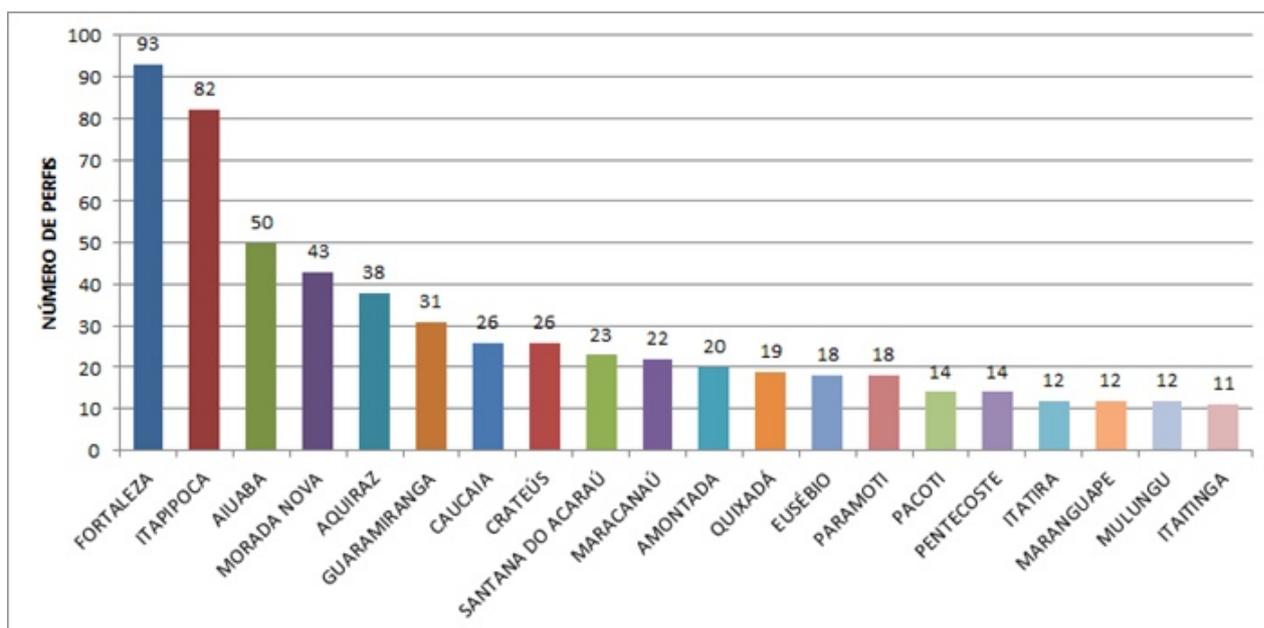


Figura 14 - Gráfico da distribuição dos perfis VLF nos 20 municípios com maior concentração.

Dos 768 perfis VLF executados, 685 (89,19%) tem registro dos valores de intensidade do sinal da estação NAA com uma variação entre 3 e 31 e valor médio de 15. O resumo estatístico destes valores está apresentado na Tabela 2. Para facilitar a análise destes dados foi construído um histograma de frequências (Figura 15) com uma divisão em sete classes com amplitude 5, que mostram uma distribuição normal com o pico dos valores na classe (15 | 20), com uma frequência relativa de 55,95% (383) e 93,86% posicionados entre as classes (10 | 15 e 30 | 35).

A Figura 16 apresenta estes dados na forma de gráfico, onde são observadas também as variações sazonais representadas pelas ondulações de ciclos mais longos da curva e pontuais representadas por 13 picos com valores superiores a 20, provocados possivelmente por explosões solares e 5 vales com valores menores ou iguais a 5, sendo quatro destes provocados por atenuações locais e um (17/10/2012 – 08:10) por desligamento da estação.

Tabela 2 - Resumo estatístico das variações da intensidade do sinal da estação VLF NAA (24.0 kHz), período 20/01/2001 e 28/12/2012, coletados no Ceará.

PARÂMETROS	CEARÁ
Média	15
Moda	17
Máximo	31
Mínimo	3
Desvio padrão (S)	3,27
Coeficiente de variação (Cv)	22,29%
Amostra (n)	685

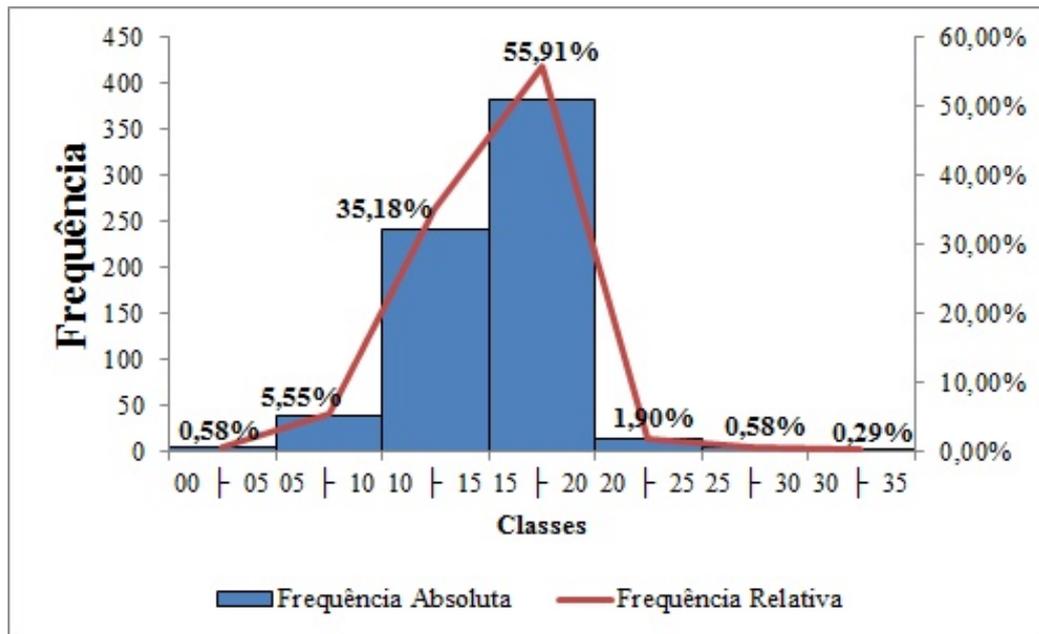


Figura 15 - Histograma da distribuição dos valores do sinal da estação VLF NAA, obtidos no Ceará através do equipamento WADI no período entre 20/01/2001 e 28/12/2012.

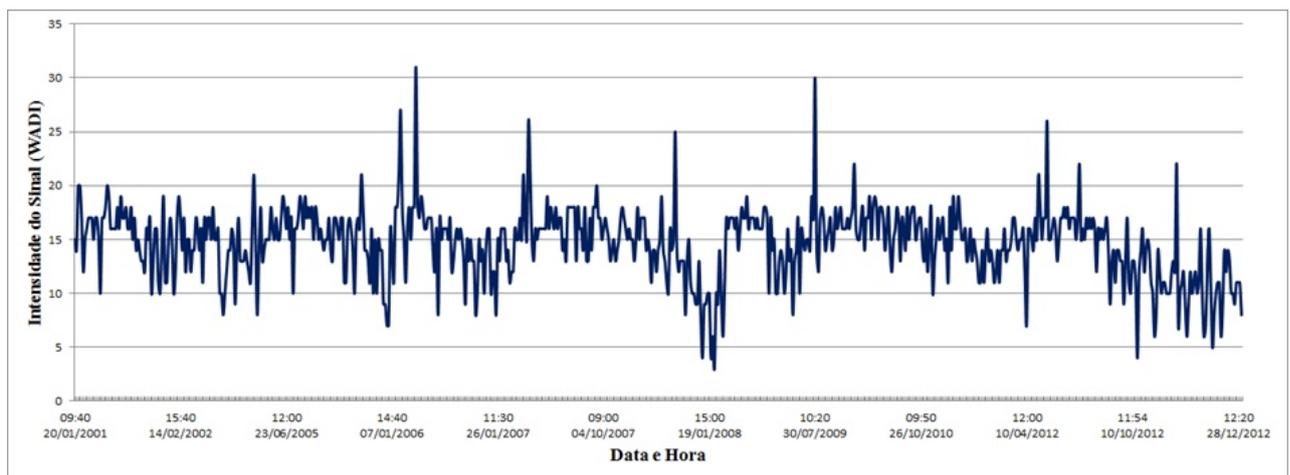


Figura 16 - Gráfico Variação da intensidade do sinal da estação VLF NAA (24.0 kHz) obtido através do equipamento WADI, no período de 22 de janeiro de 2001 a 28 de dezembro de 2012 no Estado do Ceará.

As variações diárias (diurnas) da intensidade do sinal da NAA observados no estado do Ceará são demonstradas na Figura 17, através da seleção de quatro datas com maior número de leituras do sinal da estação. Neste gráfico observa-se a tendência de todas as curvas a apresentarem valores baixos no início da manhã e no final da tarde e os valores mais altos nas horas em torno do meio dia com exceção da curva do município de Itatira que tem um valor menor às

11:30, resultado de atenuações provocadas pela variação topográfica da área. As curvas divergem em valores absolutos por terem sido obtidas em datas e lugares diferentes.

1.3.3 Monitoramento da Estação VLF NAA (24.0 KHz) no Estado do Ceará

Todos os dados de intensidade do sinal da estação NAA obtidos no período entre 2001 e 2012 foram durante a fase diurna entre o horário de 6:20 a 17:20.

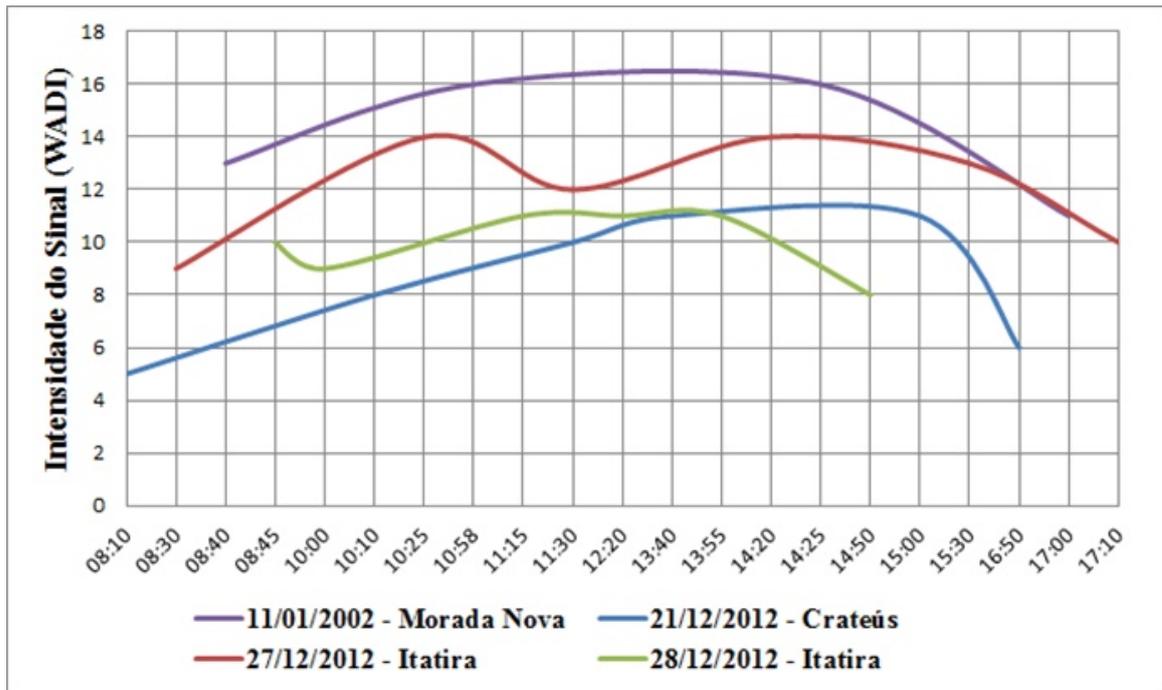


Figura 17 - Gráfico das Variações diárias (diurnas) da intensidade do sinal da estação VLF NAA (24.0 kHz) obtido através do equipamento WADI, em três municípios do Ceará em quatro datas diferentes.

Para suprir a ausência de dados de um ciclo completo de 24 horas foi realizado um monitoramento com leituras através do WADI obtidas de hora em hora no dia 25/01/2014 em Fortaleza, em local fixo com o equipamento posicionado a uma altura de 10 metros acima do nível do solo e em uma área altamente urbanizada. O gráfico dos dados do

monitoramento (Figura 18) mostra as variações de intensidade do sinal VLF entre os períodos noturnos e diurnos, com destaque para a marcação do nascer e do pôr do Sol. Os valores de intensidade do sinal do período diurno têm uma média de 11, para o máximo de 17, o mínimo de 8 e um coeficiente de

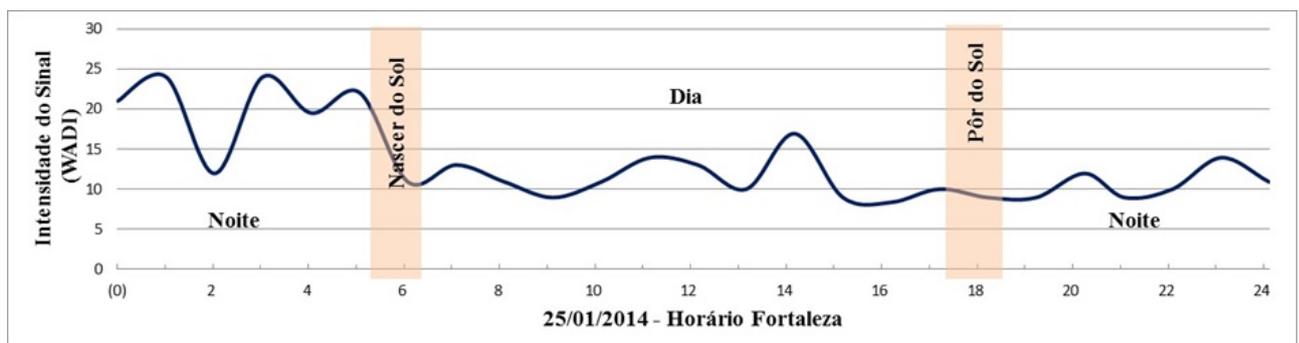


Figura 18 - Gráfico das Variações da intensidade do sinal da estação VLF NAA (24.0 kHz) obtido através do equipamento WADI, no dia 25/01/2014 em Fortaleza – CE.

1.3.4 Análise Comparativa dos dados da estação NAA do Estado do Ceará e do Moore

Para possibilitar uma análise comparativa com os valores de intensidade do sinal recebido no Ceará através do equipamento WADI, os dados do monitoramento do Observatório Moore foram selecionados de forma a coincidirem com a data e horário daqueles e também foram multiplicados por uma constante ($K = 19$) para colocar os valores do Moore apresentados em Volts (V) no mesmo patamar dos valores do WADI que são arbitrados.

O primeiro conjunto de dados escolhido para a análise comparativa está apresentado no gráfico da Figura 19, composto por duas séries de dados coletadas entre os dias 22/01/2010 e 28/12/2012 (maior intervalo com dados disponíveis em ambos os locais). Sendo a de cor azul formada de 235 dados do Ceará, e a de cor vermelha corresponde aos dados do Observatório Moore.

A análise visual do gráfico mostra uma forte semelhança entre os dados do Ceará e os do Moore, sendo divergentes totalmente somente nos valores de pico, que correspondem às variações causadas por mudanças bruscas na densidade da ionosfera, provocadas pelas atividades solares, sendo que estas variações não atingem toda a ionosfera de forma homogênea, portanto é de se esperar que estes eventos sejam detectados em uma área e em outras não ou tenham seus efeitos detectados em diferentes horários para diferentes locais.

A Tabela 3 apresenta a análise estatística destes dados onde se observa os do Ceará com valor médio igual a 14, máximo de 26, mínimo de 4 e um coeficiente de variação de 23,23% e os do Moore com valor médio de 15, máximo de 32, mínimo de 1 e coeficiente de variação de 29,43%.

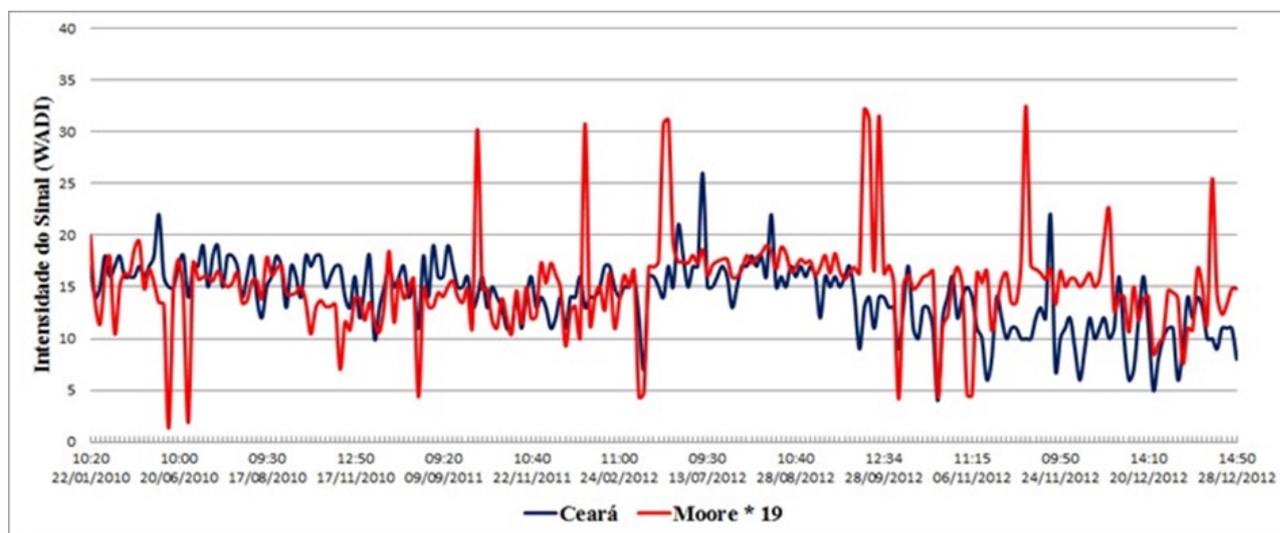


Figura 19 - Gráfico das Variações da intensidade do sinal da estação VLF NAA (24.0 kHz), período 22/01/2010 e 28/12/2012. A série de cor azul foi coletada com o equipamento WADI em vários locais do Estado do Ceará e a de cor vermelha coletada no Observatório Moore, localizado em Louisville, Kentucky – USA.

Tabela 3 - Resumo estatístico das Variações da intensidade do sinal da estação VLF NAA (24.0 kHz), período 22/01/2010 e 28/12/2012. Coletados no Ceará e no Observatório Moore.

PARÂMETROS	CEARÁ	MOORE
Média	14	15
Moda	16	15
Máximo	26	32
Mínimo	4	1
Desvio padrão (S)	3,28	4,46
Coefficiente de variação (Cv)	23,23%	29,43
Amostra (n)	235	235

Os histogramas de frequência construídos para a análise dos dados do Ceará e os do Moore apresentados nas Figuras 20 (a) e (b), também apresentam sete classes com amplitude 5, que mostram ambos uma distribuição normal com o pico dos valores na classe (15 | 20), com uma frequência relativa de 48,51% para o Ceará e 56,60% para o Moore. A maior frequência dos valores está posicionada entre as classes (10 | 15 e 25 | 30), com 92,34% dos dados do Ceará e 91,08% do Moore.

O segundo conjunto de dados foi o do monitoramento de hora em hora realizado no dia 25/01/2014 em Fortaleza e está apresentado no gráfico da Figura 21, curva de cor azul, para comparação com os dados do Moore, curva de cor vermelha. O gráfico apresenta as duas séries de dados para um período de 24 horas, onde se destacam o nascer do sol, que em Fortaleza se deu as 5:36h e em Louisville as 8:25h e o pôr do sol em Fortaleza as 17:39h e em Louisville as 21:08h (horários de Fortaleza).

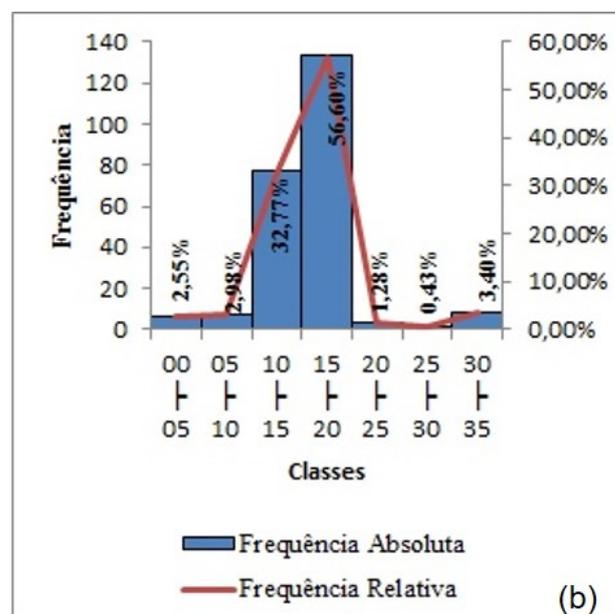
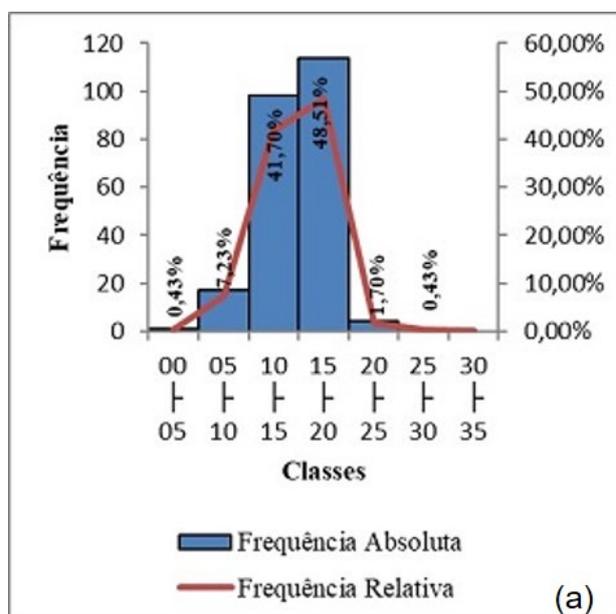


Figura 20 - Histogramas da distribuição dos valores do sinal da estação VLF NAA, obtidos no período entre 22/01/2010 e 28/12/2012. A série do Histograma (a) foi coletada com o equipamento WADI em vários locais do Estado do Ceará e a do histograma (b) coletada no Observatório Moore, localizado em Louisville, Kentucky – USA.

Tais quais os dados apresentados no gráfico da Figura 19 estes também apresentam semelhanças, principalmente nos períodos diurnos que só divergem muito nos picos provocados por

atividades solares que em Fortaleza ocorreu as 14:00h e em Louisville as 18:00h e nos períodos noturnos que antecedem ao nascer do sol.

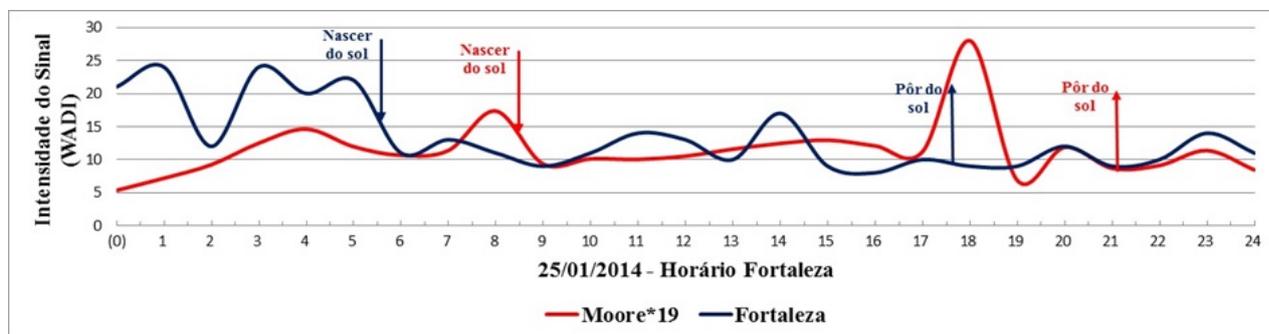


Figura 21 - Gráfico das Variações da intensidade do sinal da estação VLF NAA (24.0 kHz), obtido, no dia 25/01/2014 em Fortaleza – CE. UTM – 556010 E - 9586281 S. A série de dor azul foi coletada com o equipamento WADI em Fortaleza e a de cor vermelha coletada no Observatório Moore, localizado em Louisville, Kentucky – USA.

2. CONCLUSÕES

Com relação ao que foi apresentado e analisado no desenvolvimento deste trabalho pode-se concluir que:

- As ondas VLF se propagam a longas distâncias de forma consistente, com estabilidade e reprodutibilidade da amplitude e fase do sinal;
- O sinal VLF transmitido pela estação NAA (24.0 kHz) é estável e reprodutível, mesmo a distâncias superiores a 10.000 km;
- Os valores de intensidade do sinal VLF da estação NAA (24.0 kHz) registrados pelo equipamento WADI no território cearense estão em 93,86% dos casos dentro do intervalo entre 10 e 35, considerado confiável pelo fabricante;
- Os valores do sinal da estação NAA (24.0 kHz) obtidos no Ceará são proporcionais e apresentam fortes semelhanças com os obtidos no Observatório Moore, com uma frequência superior aos 90% no intervalo entre os valores 10 e 30.

Então se estas assertivas são

verdadeiras está comprovado que “Os sinais VLF da estação NAA (24.0 kHz) transmitidos de Cutler, Maine-EUA podem ser usados de forma confiável na prospecção de água subterrânea, no território cearense”

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEM Instrument AB. ABEM Printed Matter no 90282 – ABEM WADI VLF INSTRUMENT. 1989a. p. 47.
- ABEM Instrument AB. ABEM WADI Simple, state-of-the-art water prospecting instrument. 1989b.
- ABEM Instrument AB. WADI VLF International Frequency List - ABEM Printed matter no 93062. 1995.
- AIGBEDION I. Geophysical Investigation of Road Failure Using Electromagnetic Profiles along Opoji, Uwenlenbo and Illeh in Ekpoma -Nigeria. Middle-East J Sci Res. 2007;2:111–115.
- AL-TARAZI E, ABU RAJAB J, AL-NAQA A, EL-WAHEIDI M. Detecting leachate plumes and groundwater pollution at Ruseifa municipal landfill utilizing VLF

- EM method. *J Appl Geophys.* 2008; 65:121–131.
- ANTONIUK J. Electromagnetic investigations by the VLF method of the ore bearing veins in the Hornsund Fiord area. *polish.polar.pan.pl.* 1985;6:349–356.
- BENSON AK, PAYNE KL, STUBBEN MA. Mapping groundwater contamination using dc resistivity and VLF geophysical methods—A case study. *Geophysics. SEG;* 1997;62:80–86.
- CAVALCANTE IM, MARINHO JML, CORDEIRO W, VASCONCELOS SMS. Desempenho do método VLF na locação de poços em terrenos cristalinos de uma área do agreste do Estado de Pernambuco, Brasil. Salvador; 2001.
- CLILVERD M A., THOMSON NR, RODGER CJ. Sunrise effects on VLF signals propagating over a long north-south path. *Radio Sci.* 1999;34:939–948.
- CORDEIRO W. Aplicação do Método Geofísico VLF (Very Low Frequency) na Prospecção de Água Subterrânea em Diversos Tipos Litológicos Fraturados nas Bacias Hidrográficas Metropolitanas no Estado do Ceará. UFC. 2000.
- JORDANA & MARGALIDA S. Prospecció Electromagnètica VLF: Aplicació a L'Exploració D'Aigües Subterrànies. Barcelona: Universitat de Barcelona; 1991.
- KIELKOPF J, COWAN C. Low Frequency Receiver Circuit. 2000. p. 1–7.
- KUMAR S. Waveguide Parameters of 19.8 kHz Signal Propagating over a Long Path. *Res Lett Phys.* 2009;2009:1–4.
- MONACCHI A, ZANINI M. La Metodologia Geofísica Very Low Frequency (VLF) a Supporto Delle Ricerche Idriche. *Musciv Rovereto.* 2009;113–122.
- MORADZADEH A, DOULATI F, FALLAH S. An Investigation on the Environmental Effects of Sulphide Mines Using Geophysical Studies. 2005.
- NASCIMENTO C DO, ALMEIDA A de. Identificação de aquífero fissural por meio de VLF. 2013
- NAVELEX. VLF, LF, AND MF COMMUNICATIONS. 1972. p. 16.
- SAVVAIDIS AS, TSOKAS GN, VARGEMEZIS G, DIMOPOULOS G. Geophysical prospecting in the Akropotamos dam (N. Greece) by GPR and VLF methods. *J Balk Geophys Soc.* 1999; 2:120–127.
- SCHERRER D, MITCHELL R, HUYNH T, LORD W, LORD M. SuperSID Users Manual Space Weather Monitors. 2010.
- SULTAN M, SAUCK W, RAOUF OA, M. W. Developing Renewable Ground Water Resources in Arid Lands Pilot Case: The Eastern Desert of Egypt. *Int. Consult. EDP.* 2006.
- TIRONE BW, COVEL CL, HILLIER JE. Evaluating Chloride Contamination in Sand and Gravel Aquifers and Bedrock Fractures Using Terrain Conductivity and Very Low Frequency Geophysics. 2010;235–244.
- United States Naval Communications. World's Mightiest Voice The U.S. Navy 2.000.000 Watt Vlf Transmitter. 1961.
- VALTR V, HANŽL P. Geophysical cross-section through the Bogd fault system in the area of the Chandman rupture, SW Mongolia. *J Geosci.* 2012; 53:193–200.
- VALTR V, HANŽL P, HRDLÍPKOVÁ K. Geophysical Vertical Section Across Bogd Fault System on Eastern Foothill of Chandman Khayrkhan Mountain in SW. *caag.cz.* 2006;14.