

Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Ciências Atmosféricas

Tatyane Paz Dominguez dos Santos Alves

Investigação observacional da atmosfera e
da radioatividade natural emitida pelas areias
monazitas de Meaípe/Guarapari/ES – Brasil.

São Paulo

2021

Tatyane Paz Dominguez dos Santos Alves

Investigação observacional da atmosfera e
da radioatividade natural emitida pelas areias
monazitas de Meaípe/Guarapari/ES – Brasil.

VERSÃO CORRIGIDA

Dissertação apresentada ao Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Meteorologia
Orientador (a): Prof (a). Dr (a). Jacyra Soares

São Paulo

2021

Agradecimentos

Agradeço à minha orientadora Jacyra Soares, por ter enxergado potencial, me dado espaço, tempo e base para crescer. Por ter tido paciência, zelo, escuta, presença e entrega. Por ter sido uma orientadora genuína, e ter me dado a honra de desfrutar esses mais de dois anos de troca. Agradeço por ter me assegurado todos os direitos, me respaldado burocraticamente, e garantido que eu tivesse acesso a tudo, sendo incansável mesmo com todas as limitações que enfrentamos devido à pandemia. Por ser um ser humano fantástico que tive o privilégio de poder conhecer, conviver, e ser mentorada, bebendo da fonte do seu olhar científico e me estimulando a desenvolver uma perspectiva crítica sobre o mundo, sobre o que observamos, tocamos e fazemos.

Aos meus irmãos Dácio, Juju e Lu. Destinatários de todo meu maior amor, cuidado e apego. Meu chão tanto quanto meu céu, meu lugar de expansão, alegria e autodescoberta. Ao meu papai querido Reinaldo, por ser uma doce e maior inspiração na busca por conhecimento, pelo senso crítico, pelo saber cuidadoso e apurado. Pelo desenvolvimento da curiosidade e busca pelo novo sempre, por nos permitir um espaço de desenvolvimento do senso de autonomia e de exploração do mundo. À minha mãezoca Anete, pelo fornecimento de toda base e condições para crescer, buscar e construir minha narrativa de vida, por me dar segurança para ir adiante com a confiança de que tenho direito e merecimento de tudo que sou e conquisto. Agradeço a Mãecéia, Mãezinha (*in memoriam*) e Tia Kátia (*in memoriam*), pessoas com as quais tenho profundo vínculo afetivo, que fizeram parte da minha formação primordial e são parte do que sou hoje.

Aos meus amigos muito queridos, pessoas fundamentais na minha vida hoje além dos meus irmãos, e com as quais também cresço, me preencho, descubro o mundo, pessoas que me apoiaram, torceram, socorreram, e sem eles essa conquista não seria possível: Sheila Augusto, Raiza Oliveira, Beatriz Gesteira, Nilo Rogério, Fernanda Batista, Herik Oliveira, Ana Luísa Cruz, Izabella Costa, Alessandra Carbonel. Igualmente agradeço às minhas queridas primas Lelê, Tayssa e Nathália pela parceria, presença, conforto, vínculo e pelo afeto. À Anacris, minha primeira mentora de vida, segunda mãe e alma que tive afinidade imediata. Foi a pessoa que me enxergou na academia, me deu vida, luz e combustível para avançar a lugares jamais imaginados e que me pareciam impossíveis. Desde que ela me viu, meu mundo se abriu e nunca mais foi o mesmo. Ao Guilherme Franco pessoa que me ofereceu parceria, companheirismo, ternura, troca, me acompanhou, me ajudou, me instruiu, me deu apoio íntegro em situações essenciais, mas acima de tudo foi um presente que a vinda para São Paulo me ofereceu, e pelo qual me sinto grata de poder estar perto.

A toda equipe do meu laboratório LIAM, à Georgia Codato pelo suporte técnico incansável desde o início do mestrado até agora. Agradeço a Bete e aos rapazes do suporte de informática, Djalma, Sebastião e Samuel, sem os quais não teria tido prontamente as ferramentas em bom funcionamento para o desenvolvimento dos estudos e da pesquisa, me garantindo tranquilidade e pronta solução de problemas. Por fim, agradeço a toda a equipe de segurança e portaria do IAG.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Resumo

As areias da praia de Meáípe (Guarapari, ES) são monazitas, um tipo de areia com alta concentração natural de minerais pesados. O elemento radioativo tório (^{232}Th) é encontrado nessas areias e decai em vários núcleos filhos, sendo um deles o gás natural radioativo, incolor, inodoro e inerte denominado torônio (^{220}Rn). O efeito biológico associado a doses dessa radiação natural desperta controvérsia no meio científico e dessa forma torna-se importante entender e correlacionar as propriedades da atmosfera de Meáípe com o nível de radioatividade local. Para isso foram utilizados dados coletados, por cerca de 2 anos, pelo projeto colaborativo entre USP e a UFES “*Monazite sands of Meáípe, Guarapari, ES*”. Foram medidas intensidade e direção do vento, pressão barométrica, temperatura do ar e do solo, umidade do ar, e componentes do balanço de radiação. Esses dados, inéditos, serviram para caracterizar a atmosfera local. Além desses dados, foram medidas as intensidades da radioatividade gama local em dois níveis de altura diferentes (11 cm e 35 cm) como indicativo da presença do gás torônio. Através do perfil vertical da radiação gama, foi identificado que a radioatividade local decai exponencialmente com a altura, sendo mais intensa nos primeiros 1,25 m de altura. Os maiores coeficientes de correlação positivos de Spearman foram obtidos entre as radiações gama e três variáveis - temperaturas do solo e do ar e a radiação de onda longa emitida pela superfície - sendo as correlações altas para a radiação gama medida acima (35 cm) e moderadas para a radiação gama próxima a superfície. A precipitação mostrou uma correlação pequena, mas negativa, com as radiações gama.

Palavras – chave: Radiação gama, torônio, areia monazita, radioatividade natural, Meáípe, HNBRA, variáveis meteorológicas.

Abstract

The sands of Meaípe beach (Guarapari, ES) are monazites, a type of sand with a high concentration of natural heavy minerals. The radioactive element thorium (^{232}Th) is found in this sands and decays into several daughter nuclei, one of which is the radioactive, colorless, odorless and inert natural gas called thoron (^{220}Rn). The biological effects associated with doses of this natural radiation raises controversy in the scientific community and, therefore, it becomes important to understand and correlate the properties of Meaípe atmosphere with the level of the local radioactivity. For this, data was collected for about 2 years, by the collaborative project between USP and UFES “Monazite sands of Meaípe, Guarapari, ES”. Intensity and direction of wind, barometric pressure, air and soil temperatures, air humidity, and radiation balance components were measured. These unprecedented data served to characterize the local atmosphere. In addition to these data, local gamma radioactivity intensities were measured simultaneously at two different height levels (11 cm and 35 cm) as an indication of the presence of thoron gas. Through the vertical profile of gamma radiation, it was identified that the local radioactivity decays exponentially with height, being more intense in the first 1,25 m of height. The higher positive Spearman correlations were obtained between gamma radiation and three variables – soil and air temperatures and longwave radiation emitted by the surface–this correlation being high for gamma radiation measured above (35 cm) and moderate for gamma radiation near the surface. The precipitation showed a small but negative correlation with gamma radiation.

Keywords: Gamma radiation, thoron, monazite sands, natural radioactivity, Meaípe, HNBRA, meteorological variables.

Lista de abreviaturas e siglas

AS	América do Sul
ASAS	anticiclone subtropical do Atlântico Sul
E	direção Leste
ES	Espírito Santo
HNBRA	<i>High natural background radiation area</i>
HBRA	<i>High background radiation area</i>
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
ICRP	<i>International Commission On Radiological Protection</i>
N	direção Norte
NE	direção Nordeste
netOC	radiação líquida de onda curta
netOL	radiação líquida de onda longa
netRad	radiação líquida
NW	direção Noroeste
OCi	onda curta incidente
OCr	onda curta refletida
OLa	onda longa emitida pela atmosfera
OLs	onda longa emitida pela superfície
S	direção Sul
SE	direção Sudeste
SW	direção Sudoeste
Tar	temperatura do ar
Ts	temperatura do solo
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UNSCEAR	<i>United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation</i>
UR	umidade relativa
USP	Universidade de São Paulo
W	direção Oeste
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

Lista de símbolos

^{238}U	urânio 238
^{232}Th	tório 232
^{220}Rn	torônio/radônio 220
^{224}Ra	rádio 224
^{222}Rn	radônio 222
^{235}U	urânio 235
$^{\circ}\text{C}$	grau Celsius
mm	milímetro
s	segundo
α	partícula alfa
β	partícula beta
γ	raio gama
km	quilômetro
m	metro
Sv	sievert
J Kg^{-1}	joule por quilograma
Hz	hertz
ms^{-1}	metro por segundo
$^{\circ}$	grau
mmol mol^{-1}	milimol por mol
$\mu\text{mol mol}^{-1}$	micromol por mol
W m^{-2}	watts por metro quadrado
%	por cento
hPa	hectopascal
$\mu\text{Sv h}^{-1}$	microsievert por hora
min	minuto
h	hora
mSv ano^{-1}	milisievert por ano
cm	centímetro
CO_2	dióxido de carbono
H_2O	água
O_2	oxigênio
mmol^{-3}	densidade molar

Sumário

1. Introdução.....	7
1.1 Torônio	12
1.2 Objetivos.....	14
2. Local de estudo e dados utilizados.....	15
3. Metodologia	21
3.1 Correlações	22
4. Resultados.....	23
4.1 Variação horária.....	26
4.2 Variação mensal.....	35
4.3 Correlações	40
4.4 Estudos de caso	43
4.4.1 CENÁRIO 1 (02JUN2021).....	43
4.4.2 CENÁRIO 2 (05JUN2021).....	44
4.4.3 CENÁRIO 3 (19JUL2021).....	45
5. Discussão e conclusão	48
6. Trabalhos futuros	51
7. Referências	53

1. Introdução

Meaípe é uma região litorânea da cidade de Guarapari (ES/Brasil) cujas areias, contendo monazita, atraem interesse internacional desde o final do século XIX, quando amostras enviadas para a França, indicaram a presença de um mineral radioativo, o óxido de tório. Com o passar dos anos, a fama de suas areias terem propriedades radioativas deu origem a um turismo medicinal no final da década de 1930 (BOURGUIGNON, 2019), que segue até os dias atuais (GOMES; SILVA, 2021; MALANCA *et al.*, 1998).

Regiões de alta radioatividade natural, como ocorre em Meaípe, são consideradas HNBRAs (*High Natural Background Radiation Area*) e podem existir devido ao decaimento do urânio (^{238}U) e/ou do tório (^{232}Th). No caso de Meaípe a radiação natural ocorre devido ao elemento tório (^{232}Th), que é encontrado em suas areias e decai em vários núcleos filhos, os radionuclídeos. Um deles é um elemento natural gasoso, radioativo e inerte denominado torônio (^{220}Rn), proveniente do decaimento do isótopo radioativo rádio (^{224}Ra) que também é um dos radionuclídeos componentes desta série de decaimentos (SCHERY, 1990). Após decaimento do átomo de ^{224}Ra dentro do grão, o torônio emanado para fora do grão é transportado dentro do solo e em seguida é exalado para a atmosfera.

Aqui está sendo adotada a terminologia torônio para o isótopo (^{220}Rn) para evitar confusão com o radônio (^{222}Rn), que é um radionuclídeo filho pertencente à série de decaimentos do urânio (^{238}U). O radônio, proveniente do urânio é mais estudado na construção civil, em ambientes artificiais fechados, em função da presença de urânio em alguns compostos de materiais de construção (UNSCEAR, 2000, 2017).

O presente trabalho se concentra no volátil torônio ^{220}Rn em função da presença do seu elemento pai na areia da praia de Meaípe, o tório.

Isótopos ^{220}Rn são produzidos na crosta terrestre, e estão em muitos lugares do globo, em maior ou menor quantidade conforme a disponibilidade de átomos do elemento-pai, o tório, no substrato do solo (KANSE *et al.*, 2016). O tório está amplamente distribuído na natureza, estando presente na crosta terrestre combinado em compostos fosfatos, carbonatos, silicatos e minerais óxidos (D'AZEREDO ORLANDO *et al.*, 2021, RAMACHANDRAN, 2010).

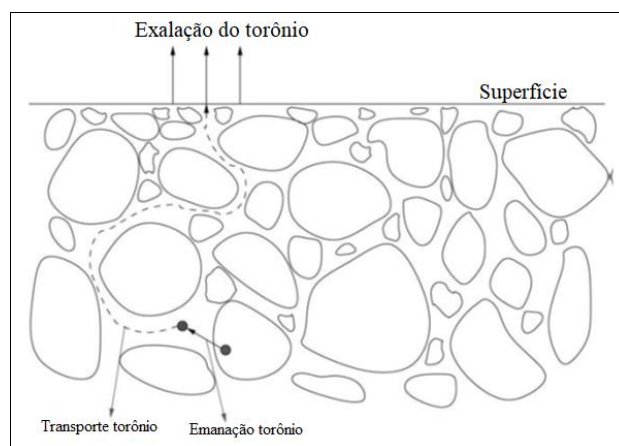
Em um local onde a presença de urânio seja desprezível e a de tório importante, como no caso de Meaípe, toda a radiação gama natural medida é proveniente da emissão do torônio.

O torônio entra na atmosfera pelo processo de exalação após sua formação por decaimento radioativo no interior do solo. A meia-vida muito curta do torônio permite pouco tempo para que ele seja carregado da superfície do solo para níveis mais altos da atmosfera, de modo que sua contribuição para a ionização atmosférica é feita principalmente nos poucos metros mais baixos da atmosfera.

Três processos físicos desempenham papel relevante desde o surgimento do átomo de torônio até seu lançamento na atmosfera. São eles emanação, transporte e exalação (Figura 1.1), conforme definido nos subitens a seguir:

- (a) Emanação - átomos de torônio formados a partir do decaimento do ^{224}Ra , que escapa para o espaço intersticial entre os grãos do solo;
- (b) Transporte - por difusão e/ou advecção, movimentando os átomos de torônio através do solo até a superfície;
- (c) Exalação - átomos de torônio que foram transportados para a superfície do solo e são, enfim, exalados para a atmosfera.

Figura 1.1: Processos que resultam na liberação do torônio para a atmosfera.



Fonte: Adaptado de International Atomic Energy Agency, 2013.

Considerando que o torônio é liberado na atmosfera, torna-se importante o conhecimento e caracterização da atmosfera local. Com esse intuito está sendo desenvolvido o projeto “*Monazite sands of Meaípe, Guarapari, ES*”, coordenado pela

Universidade de São Paulo e pela Universidade Federal do Espírito Santo (SOARES *et al.*, 2019a). Esse projeto objetiva medidas observacionais simultâneas de meteorologia e de intensidade da radioatividade local.

Existem poucos trabalhos prévios sobre o comportamento da atmosfera em Meaípe, principalmente baseados em dados observacionais coletados no local (RIBEIRO *et al.*, 2019; SOARES *et al.*, 2019b). Estudos encontrados na literatura caracterizando parâmetros meteorológicos consideram todo o estado do Espírito Santo. Pezzopane *et al.* (2004) investigaram a variação espacial da temperatura do ar no estado do ES, utilizando dados de 13 estações meteorológicas de superfície, do período de 1982 a 2000, estimaram médias mensais de temperatura do ar através de técnicas de interpolação. Nesse estudo foram obtidas, para toda a região norte do estado e toda a região litorânea, médias mensais de temperatura superiores a 24 °C no período de novembro a abril.

Pezzopane *et al.* (2010) utilizaram dados pluviométricos e de temperatura do ar de diversas estações meteorológicas e pluviométricas para realizar zoneamento do risco climático da produção de café no estado. Foram usados dados compreendendo o período de 1977 a 2006. Seus resultados, dentre outras coisas, corroboraram com outros estudos que apontavam que toda a região produtora da espécie de café que era foco da pesquisa, tinha limitação de produtividade devido ao déficit hídrico, ou seja, pouca chuva.

O relatório do Programa de Assistência Técnica e Extensão Rural, de responsabilidade do Instituto Capixaba de Pesquisa e Assistência Técnica e Extensão Rural, para o município de Guarapari relativo ao período 2020 – 2023 tem como objetivo apoiar e dar respaldo técnico aos agricultores familiares do estado do Espírito Santo, e por isso reúne algumas informações de caracterização agrometeorológica. Para isso foram utilizados dados de série histórica (1984 a 2014) de uma estação pluviométrica da Agência Nacional de Águas no município, e para dados de temperatura foi realizada regressão linear múltipla para a mesma localização do pluviômetro, usando como variáveis preditoras latitude, longitude, elevação e distância da costa. Nesse relatório técnico foi identificado o tipo de classe climática do município, a temperatura média (24°C) com maior média em fevereiro (26,8°C) e menor média em julho (21,2°C) e volumes pluviométricos anuais de 1.303,1 mm sendo o período de outubro a abril considerado o período chuvoso, e o período de maio a setembro o período menos chuvoso compreendendo 28,1% do total acumulado anual. O balanço hídrico do solo apresentado

revela um déficit no período de janeiro a agosto, e um excedente nos meses novembro e dezembro (INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISAS, ASSISTÊNCIA TÉCNICA DE EXPANSÃO RURAL, 2020).

Kanse *et al.* (2016) investigaram a correlação entre a taxa de radiação gama e a taxa de exalação do torônio nas praias de areias monazitas de Chavara - Neendakara (área de Kerala) e Chatrapur (área de Odisha), ambas na Índia, e verificaram uma correlação positiva entre essas taxas com R^2 de 0,888. Midhun *et al.* (2017a) obtiveram uma correlação de 0,96 entre a exalação do torônio e a radiação gama em áreas costeiras do distrito de Kollam, também sobre as areias monazitas da Índia. Dessa forma, neste trabalho a radiação gama será usada, qualitativamente, como substituta do gás torônio.

Para que o torônio adentre a atmosfera, é necessária sua exalação a partir da superfície, e para isso também é necessário que o radionuclídeo ^{224}Ra , antecessor do ^{220}Rn , também esteja próximo à superfície do substrato facilitando a exalação do torônio por difusão molecular. No caso da praia de Meaípe, a areia que contém tório está em ampla exposição ao longo da praia. Entretanto cabe ressaltar que outros processos físicos antecedem o processo de exalação. Antes de tudo, o torônio é emanado do grão que contém tório e ^{224}Ra , conforme os decaimentos. A emanação também é complexa, depende da quantidade de ^{224}Ra , e não só disso, depende também do tamanho do grão, do espaço entre os grãos, da distribuição dos átomos de ^{224}Ra dentro dos grãos e de outros fatores que ainda estão em processo de investigação, conforme apresentado no estudo de Danyłec *et al.* (2021).

Diversos trabalhos revelaram que o torônio ambiental apresenta variação temporal durante seu ciclo diurno e variação espacial, principalmente com a altura. Sua variação temporal no ambiente externo é atribuída, pela literatura, principalmente à mistura vertical turbulenta e à exalação do gás pela superfície do solo (FONTAN *et al.*, 1966; ISRAEL, 1965, 1966; ISRAELSSON *et al.*, 1973a; PÖRSTENDORFER, 1994; RAMACHANDRAN, 2010; WILKENING, 1959;). Alguns autores apontam inclusive a difusão turbulenta, que ocorre na camada limite atmosférica, como principal governante da variação diurna da radioatividade natural (AOSHIMA *et al.*, 2005; MALAKHOV *et al.*, 1966).

Outros autores, entretanto, consideram que o transporte atmosférico não exerce um papel relevante na distribuição do torônio na atmosfera (AMBROSINO *et al.*, 2021; CIGNA, 2005; FONTAN *et al.*, 1966), pois sua meia vida muito curta (~55,6 s) não permite sua ascensão vertical acima de uns poucos metros.

Os autores que consideram a turbulência atmosférica importante para a variação do torônio na atmosfera, em geral, estudaram regiões com a presença de ambos os gases, radônio e torônio. Cabe aqui lembrar que a meia vida do radônio (~3,8 dias) é bem maior do que a do torônio, permitindo, dessa forma, que o radônio alcance alturas mais elevadas na atmosfera e esteja sujeito aos processos que ocorrem na camada limite atmosférica.

Um estudo preliminar associou mortalidade por câncer em algumas cidades consideradas HBRAS, cidades com radioatividade natural oriundas do decaimento do urânio e outras oriundas do decaimento do tório. Veiga e Koifman (2005), usando dados de 1991 a 2000, detectaram uma tendência de elevada mortalidade por câncer em duas das cidades estudadas, uma delas Guarapari. Por outro lado, estudos de Orlando *et al.* (2014), realizados nas praias de Guarapari, apontaram uma correlação entre a menor incidência de câncer de mama em mulheres e as propriedades das areias do município.

Outro estudo recente mostrou que a radioatividade da areia monazita da praia de Meaípe não causou alterações antropométricas ou alteração da pressão arterial em experimentos realizados com ratas tipo Wistar (COUTINHO *et al.*, 2020). Chaudury *et al.* (2020) concentraram-se no inventário de artigos acerca dos isótopos de radônio e torônio e seus derivados, e alegaram ser inconclusiva a influência do torônio em carcinogênese pulmonar.

Apesar da existência de vários estudos, o comportamento espacial e temporal do torônio em ambientes naturais e seu efeito na saúde ainda não estão bem estabelecidos, necessitando maiores investigações.

1.1. Torônio

Becquerel (1903), motivado pelos raios de Röntgen e pelas ampolas fosforescentes de Crookes, nomeou essa propriedade da matéria que vinha sendo observada em seus experimentos com sais de urânio. Em seus trabalhos e de Mme. Curie (1904) havia interesse de estudo acerca de certa emissão de radiação por algumas substâncias, que ocorria de maneira espontânea, independente do tempo, sem a excitação prévia por fontes conhecidas e, ainda, com a capacidade de influenciar outros materiais à distância. Essa propriedade é o que conhecemos atualmente por radioatividade.

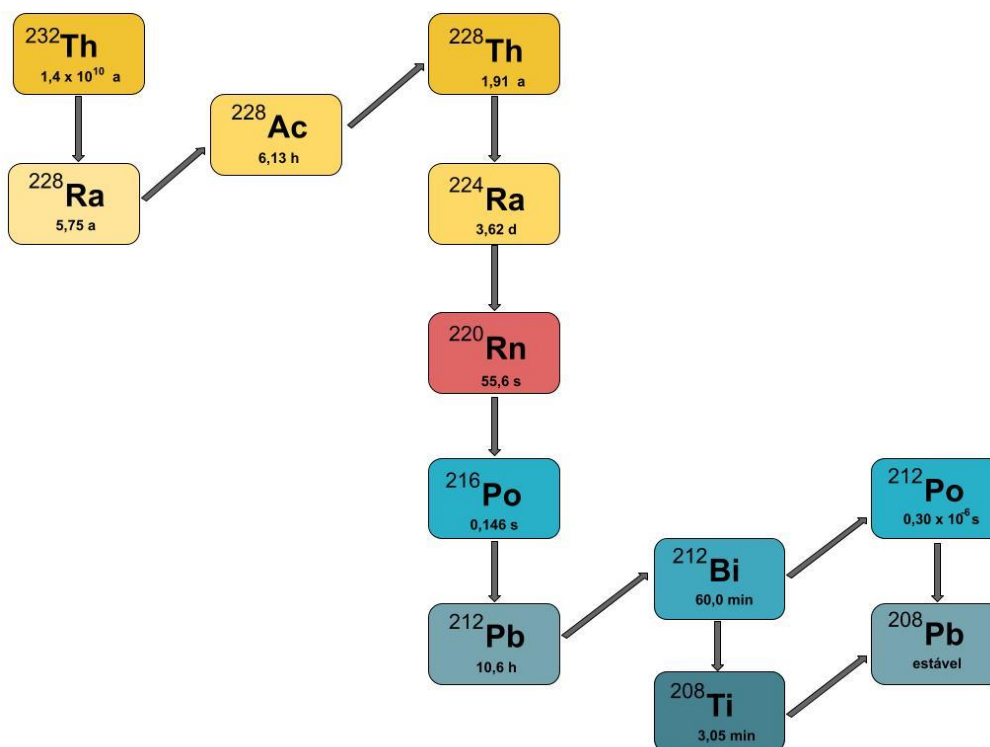
Enquanto Becquerel concentrava à época seus estudos em sais de urânio, o casal de cientistas Pierre e Mme. Curie concentrava seus esforços no minério de pechblenda e na tentativa de separar ao máximo as substâncias que o compunham, por já saberem previamente que esse material era composto por pelo menos três substâncias radioativas diferentes. O resultado disso foi a descoberta de dois novos elementos, o Polônio (Po) e o Rádio (Ra) ambos radioativos (CURIE, 1904).

Marie Curie trouxe a importante contribuição de constatar que não só o elemento urânio era radioativo, como também o Tório (CURIE, 1898), o principal elemento radioativo presente na composição da monazita. Em pouco tempo o torônio foi descoberto por Owens e Rutherford em 1899 (RAMACHANDRAN, 2010; SCHERY, 1990).

Com o passar dos anos, físicos e químicos aprofundaram estudos sobre a radioatividade e sua presença na natureza. Sabe-se atualmente que todo elemento radioativo ainda não está em equilíbrio, isso quer dizer que haverá sucessivos decaimentos (emissão de partículas alfa, beta e fóton gama) até que se chegue num elemento estável. Ao chegar no elemento estável a cadeia de decaimentos cessa e o átomo final não mais será radioativo. Portanto, pode-se entender que radioatividade é uma propriedade de átomos de elementos instáveis emitindo energia para se estabilizar.

De acordo com os relatórios científicos da *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* (UNSCEAR, 2000, 2017) existem três principais séries de decaimento radioativo de origem natural, o urânio (^{238}U e ^{235}U), e o tório (^{232}Th), esta última relevante ao trabalho apresentado, é ilustrada na figura 1.2.

Figura 1.2: Série de decaimento radioativo do Tório (^{232}Th).



Fonte: UNSCEAR 2017, adaptado pela autora.

Em cada decaimento, é irradiada alta quantidade de energia sob a forma de emissões de partículas alfa (α), beta (β) ou sob a forma de raios gama (γ). As emissões alfa, por exemplo, não têm potencial de atravessar o corpo humano, entretanto caso substâncias emissoras sejam inaladas ou ingeridas, tem potencial de dano; as emissões β têm potencial de atravessar a derme não sendo necessário contato com a substância emissora; emissões γ têm potencial de atravessar o corpo humano, blocos de concreto e alguns tipos de metais leves.

Em um local onde a presença de urânio seja desprezível e a de tório importante, toda a radiação gama natural medida nesse local é proveniente da emissão do torônio.

O torônio é um gás de vida curta, com meia-vida de cerca de 55,6 s, e sua concentração pode ser alta em lugares com grande quantidade de tório, como é o caso das areias de monazita de Meaípe (D'AZEREDO ORLANDO *et al.*, 2021).

1.2. Objetivos

Os objetivos principais desta pesquisa são caracterizar a atmosfera local e investigar a possível influência das variáveis meteorológicas no comportamento temporal do torônio.

Os objetivos específicos são:

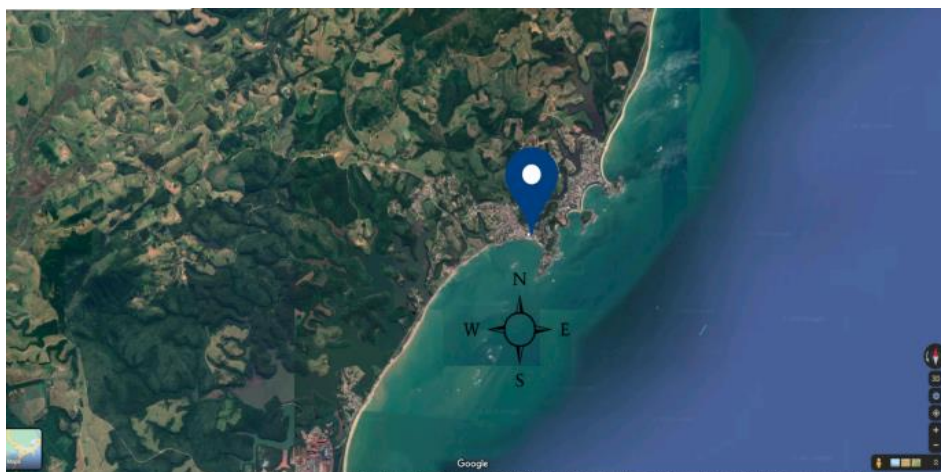
- Analisar os dados meteorológicos e de radiação gama;
- Obter os ciclos de variação temporal diurna e anual das variáveis medidas;
- Obter as correlações entre as variáveis medidas e a intensidade de radiação gama;
- Realizar estudos de casos.

2. Local de estudo e dados utilizados

A região de Meaípe ($20^{\circ}39'13''$ S, $40^{\circ}30'07''$ W) é uma região tropical costeira acima do trópico de capricórnio, localizada na América do Sul, sudeste do Brasil, na cidade de Guarapari/ES (Figura 2.1). O balneário de Meaípe tem 4 km de extensão e possui areias monazíticas com os minerais radioativos se estendendo por mais de 500 km ao longo do litoral do estado do Espírito Santo (MALANCA *et al.*, 1998).

A origem do mineral monazita na areia dessa região é semelhante à de Kerala e Odisha, na Índia (KANSE *et al.*, 2016). Rochas gnaisses localizadas nas montanhas pré-cambrianas sofreram lenta erosão e ao longo de milhões de anos o transporte fluvial carregou os detritos minerais - que não são solúveis em água -, do continente para o oceano, onde sofreram processos de concentração e depósito ao longo do litoral do Espírito Santo (KANSE *et al.*, 2016; VASCONCELOS *et al.*, 2013).

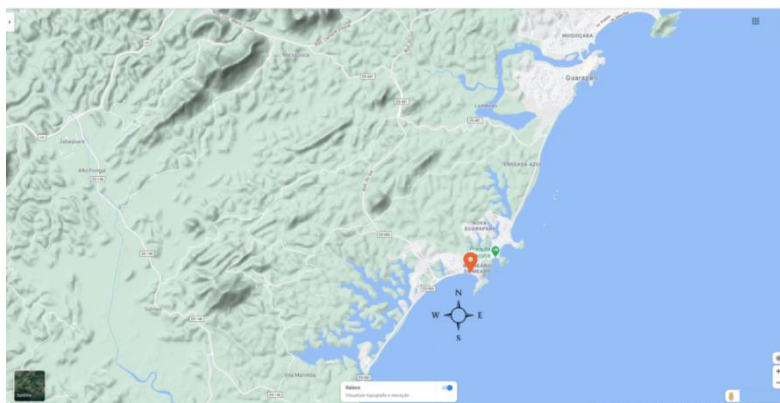
Figura 2.1: Localização da Praia de Meaípe, Guarapari, ES, Brasil.



Fonte: Google maps.

No mapa topográfico (Fig. 2.2) observa-se que a região não apresenta relevo pronunciado, com montanhas de baixa altitude - como o morro do Sarimoré, com 186 m de altitude, localizado a NW a 4 km de distância da região. Sendo assim, o regime de circulação de ventos e a dinâmica atmosférica local deve ser pouco influenciada por fatores orográficos.

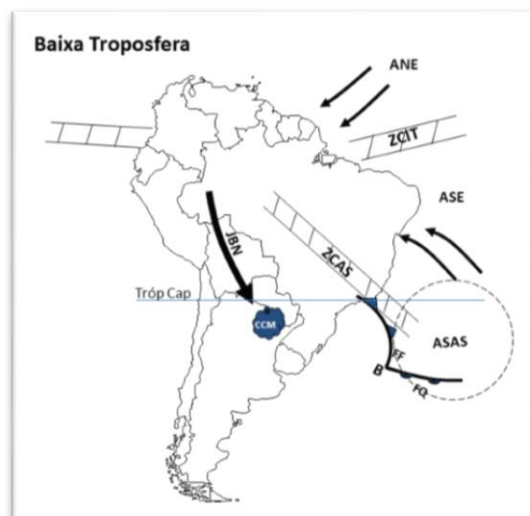
Figura 2.2: Mapa topográfico da região de Meaípe.



Fonte: Google maps.

Latitude, altitude, tipo de superfície, distância de oceanos e corpos d'água, e sistemas predominantes de vento e pressão são importantes controles climáticos (REBOITA *et al.*, 2012). A localização litorânea tropical da região de estudo, margeada pelo oceano Atlântico Sul, sugere que a circulação de brisa e o comportamento anual do anticiclone subtropical do Atlântico Sul são importantes na atmosfera local. Esta última transita por essa região, atuando com ventos mais fortes ou mais fracos conforme a estação do ano (REBOITA *et al.*, 2019). De acordo com esses mesmos autores, outros sistemas de baixos níveis passíveis de influenciar a circulação e eventos de precipitação nessa área são as linhas de instabilidade pré-frontais, sistemas frontais, brisa-marítima, ciclones subtropicais e extratropicais. Os principais sistemas sinóticos que atuam na América do Sul estão representados na figura 2.3.

Figura 2.3: Principais sistemas atmosféricos de baixos níveis que atuam na América do Sul.



Fonte: Adaptado de Reboita *et al.* (2012). Esquema representativo para o período do verão.

A região de Guarapari é uma região com grande concentração de tório de origem natural e é também a região com maior dose anual de radioatividade natural no Brasil (DA COSTA *et al.*, 2020; VASCONCELOS *et al.*, 2013; VEIGA *et al.*, 2005). A radioatividade elevada das areias do litoral de Guarapari, incluindo Meaípe, classifica o Brasil como um dos 9 países no mundo com maior radioatividade natural de fundo (UNSCEAR, 2000) e torna Guarapari uma importante HNBRA a nível global. O estudo de Vasconcelos *et al.* (2013) identifica a praia da Areia Preta, que fica a cerca de 9 km ao norte de Meaípe e que também é composta de monazita, como a maior HNBRA em praias do mundo, pois sua dose efetiva devido à quantidade de ^{232}Th é a maior dentre as médias globais. Em todo o litoral brasileiro de importantes regiões HNBRA, Meaípe é a 3ª com maior concentração de ^{232}Th em suas areias (VASCONCELOS *et al.*, 2013).

Neste trabalho a radiação gama é apresentada como dose de radiação, variável medida em Sievert (Sv), significando a energia radiativa que é absorvida por tecidos vivos. Sievert equivale à dose de radiação ionizante absorvida pelo corpo humano: $1\text{Sv} = 1\text{ Gray} = 100\text{ Rad} = 1\text{ J kg}^{-1}$.

Cada tecido e órgão do corpo humano apresentam uma vulnerabilidade distinta às determinadas doses de radiação, nesse caso a dose efetiva é uma medida do real dano a que um tecido está suscetível, já ponderada pela sensibilidade do mesmo a determinada dose de radiação (SCHERY, 1990).

No ano de 2018 pesquisadores da USP em parceria com pesquisadores da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), instalaram uma torre meteorológica na praia de Meaípe, e desde então, instrumentos adequados registram variáveis meteorológicas e espectrometria para detecção de radiação gama (SOARES *et al.*, 2019b; CODATO; SOARES, 2019).

A obtenção dos dados utilizados no trabalho foi realizada a partir de uma torre instrumentada (Fig. 2.4) com sensores das variáveis meteorológicas e de solo (amostradas desde 01/12/2018), e da intensidade da radiação gama (amostrada na torre desde 29/11/2019) na região costeira de Meaípe, até o presente.

Figura 2.4: Foto da torre (a) com os sensores em funcionamento e (b) com a distância até a linha d'água (praia de Meáipe/Guarapari/ES).



(a)



(b)

Fonte: Foto arquivo do Laboratório de Interação Ar – Mar, 2018.

Os dados atmosféricos estão sendo coletados com uma sequência de 0.05 Hz, acomodando os diferentes tempos de resposta dos instrumentos. Estão sendo amostrados: (i) temperatura e umidade do ar; (ii) pressão barométrica; (iii) temperatura do solo; (iv) radiação de onda curta incidente e refletida; (v) radiação de onda longa emitida pela atmosfera e pela superfície; (vi) precipitação; (vii) direção e (viii) intensidade do vento.

A radioatividade natural, em função da presença do gás torônio na região, está sendo medida através da detecção de radiação gama (γ), que é o tipo de onda eletromagnética emitida pelo gás ^{220}Rn . A tabela 2.1 sumariza informações sobre os sensores instalados na torre e o período de coleta dos dados utilizados neste trabalho.

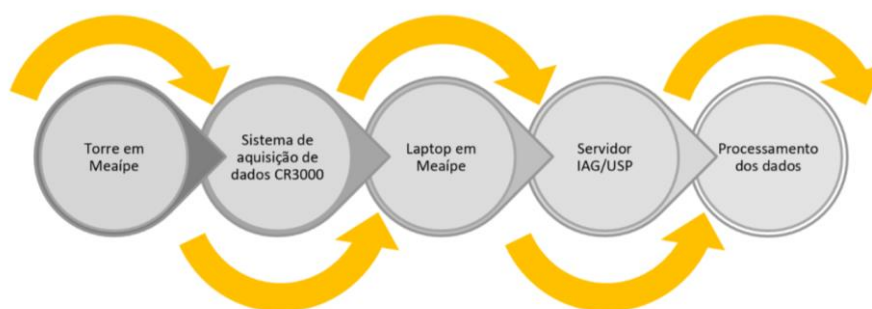
Tabela 2.1 – Equipamentos instalados na torre do projeto “Monazite sands of Meaípe”.

Variável	Unidade (SI)	Sensor/Modelo	Intervalo	Acurácia	Altura (m)	Período
Intensidade dos ventos	ms ⁻¹	RM Young Model Model 05103	0 – 100 ms ⁻¹	± 0,3 ms ⁻¹	4,31	26 nov 2019 – 30 set 2021
Direção dos ventos	(°)	RM Young Model Model 05103	0 – 360 °	± 3 °	4,31	26 nov 2019 – 30 set 2021
Densidade molar de vapor d'água	mmol mol ⁻¹	LICOR Gas Analyzer Model LI-7500 Open Path	0 a 60 mmol mol ⁻¹	< 1%	4,12	30 nov 2018 – 28 nov 2019
Densidade molar de dióxido de carbono	µmol mol ⁻¹	LICOR Gas Analyzer Model LI-7500 Open Path	0 a 3000 µmol mol ⁻¹	< 1%	4,12	30 nov 2018 - 28 nov 2019
Radiação de onda curta	Wm ⁻²	KippZonen Net Radiation Model CNR4	305 a 2800 nm	< 5%	3,94	30 nov 2018 - 30 set 2021
Radiação de onda longa	Wm ⁻²	KippZonen Net Radiation Model CNR4	4500 a 42000 nm	< 10%	3,94	30 nov 2018 - 30 set 2021
Temperatura	°C	HC2S3 Temperature and Relative Humidity Probe	-40 a +70	± 0,1°C a + 23°C	3,66	30 nov 2018 - 30 set 2021
Umidade relativa	%	HC2S3 Temperature and Relative Humidity Probe	0 a 100%	± 0,8% a + 23°C	3,66	30 nov 2018 - 30 set 2021
Precipitação	mm	HS Hyquest Solutions Model CS700- L	0 a 700 mm/h	1 ± 2% < 250 mm/h	2,4	26 nov 2019 - 30 set 2021
Pressão atmosférica	hPa	Vaisala Model PTB110	500 a 1100 hPa	± 0,6 hPa (@ 0° a 40°C)	0,55	30 nov 2018 - 30 set 2021
Temperatura do solo	°C	Campbell Model 109 - Sci.	50 a 70 °C	±0,1°C (0 a 70°C)	-0,05	30 nov 2018 - 30 set 2021
Radiação gama 11	µSv h ⁻¹	Gamma-Scout Standard	0,01 - 5000 µSv h ⁻¹	< 1%	0,11	10 abr 2021 - 30 set 2021
Radiação gama 35	µSv h ⁻¹	Gamma-Scout Standard	0,01 - 5000 µSv h ⁻¹	< 1%	0,35	29 nov 2019 - 30 set 2021
Radiação gama 299	µSv h ⁻¹	Gamma-Scout Standard	0,01 - 5000 µSv h ⁻¹	< 1%	2,99	17 out 2019 - 10 abr 2021
Sistema aquisição de dados	-	Datalogger CR3000	-	-	0,4	26 nov 2018 - 30 set 2021

O *datalogger* CR3000 é um sistema de aquisição de dados, que é alimentado por todos os sensores instalados na torre, como esquematizado na figura 2.5. Ele coleta as informações fornecidas pelos sensores, realizando um pré-processamento em Fortran. A frequência de medidas é de 20 s, em seguida são realizadas médias desses dados a cada 5 min.

As médias de 5 min são armazenadas a cada 30 minutos em um laptop ligado ao *datalogger* por um cabo serial, e transmitidos à nuvem do Laboratório de Interação Ar - Mar por um script batch que automatiza a entrada e envio dos dados (CODATO; SOARES, 2019).

Figura 2.5: Ilustração do sistema de aquisição de dados (praia de Meaipe).



Fonte: Elaborado pela autora.

Os dados são disponibilizados em tempo quase real, no servidor da USP/IAG, são tratados e organizados inicialmente pelo setor técnico do Laboratório de Interação Ar-Mar (<http://www.iag.usp.br/meteo/liam/data/MEA01.html>) através das linguagens Fortran e Python (CODATO; SOARES, 2019).

Os dados de radioatividade (radiação γ) são amostrados usando um detector “Gamma Scouter”, e armazenados a cada hora e está disponível em (http://www.iag.usp.br/meteo/liam/data/MEA01/MEA01_AVG_Rad.html).

3. Metodologia

Fazendo uso do software R (IHAKA; GENTLEMAN, 1996) como ferramenta de tratamento de dados, foram realizadas médias temporais (horária e mensal) para investigar o ciclo diurno e anual das variáveis estudadas (tabela 1).

Com os dados das 4 componentes de radiação foram estimadas as radiações líquidas. De acordo com Stull (2015) o fluxo radiativo líquido (R_n) consiste no balanço entre radiação curta incidente (O_{Ci}), radiação de onda curta refletida (O_{Cr}), radiação de onda longa emitida pela atmosfera (O_{La}), e radiação de onda longa emitida pela superfície (O_{Ls}), sendo determinada por:

$$R_n = O_{Ci} + O_{Cr} + O_{La} + O_{Ls} \quad (3.1)$$

Foram realizadas médias aritméticas simples (M), em todo conjunto amostral, para cada variável, exceto as radiações e precipitação:

$$M = \frac{1}{n} \sum_{1}^n \text{Var} \quad (3.2)$$

Onde n é o número de elementos do conjunto amostral composto das observações de 5 min (Var) e de 1 h para radiação gama. Foram obtidas médias mensais (variação anual) e médias horárias (variação diurna), usando os dados de 5min para todas as variáveis, e usando os dados horários de radiação gama. Para a variável precipitação foi realizada a média com valores de acumulados mensais, e na média horária as amostragens foram transformadas em acumulados horários.

As médias horárias e diárias dos componentes da radiação solar foram obtidas a partir dos valores médios integrados de 5 minutos ao longo do dia. As médias mensais foram realizadas utilizando os valores médios diários.

3.1. Correlações

Foram realizadas correlações de Spearman entre pares de radiação gama e as variáveis atmosféricas e do solo. Como a resolução temporal da variável gama é horária, todos os dados foram transformados em média horária para o cálculo de correlação.

A correlação Spearman é um teste não-paramétrico aplicável a conjuntos de variáveis que apresentam uma relação monotônica entre si (XIAO *et al.*, 2016). Não possui requisitos quanto à relação linear entre as variáveis, nem quanto à distribuição de frequências. Podendo, dessa forma, ser aplicada a funções lineares ou não, que descrevem a relação entre as variáveis.

O coeficiente de correlação de Spearman é definido como um coeficiente entre variáveis classificadas em postos (ou graus). Os dados de cada variável são ordenados de forma decrescente, em seguida é atribuído um número relativo à posição ocupada pelo dado dentro da sequência decrescente. As posições ocupadas pelas variáveis depois de ordenadas e enumeradas são utilizadas na expressão 3.3 (FIELD *et al.*, 2012).

Supondo n pares das variáveis x_i e y_i , o coeficiente de correlação de Spearman (ρ_s) pode ser escrito como:

$$\rho_s = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{ [R(x_i) - \overline{R(x)}] [R(y_i) - \overline{R(y)}] \}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [R(x_i) - \overline{R(x)}]^2 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [R(y_i) - \overline{R(y)}]^2}} \quad (3.3)$$

Onde, $R(x_i)$ corresponde à posição da variável x na observação n , $R(y_i)$ corresponde à posição da variável y na observação n , e $\overline{R(x)}$ e $\overline{R(y)}$ correspondem às médias dos postos considerando toda a distribuição das variáveis.

4. Resultados

Nesta seção serão apresentadas médias mensais (ciclo anual) e médias horárias (ciclo diurno) das variáveis investigadas e da radiação gama (Tabela 1.1), bem como as correlações instantâneas e com defasagem temporal entre algumas variáveis e a radiação gama. Por último, foram selecionados três dias representativos de situações meteorológicas distintas para configurar estudos de caso: i) dia sem precipitação, com céu claro e temperaturas elevadas; ii) dia com precipitação e iii) dia sem precipitação e com temperaturas do ar e do solo baixas.

Refere-se, daqui por diante, à hora local pela sigla h que de acordo com o padrão global de fuso horário, equivale a “*Greenwich Mean Time*” de - 3h.

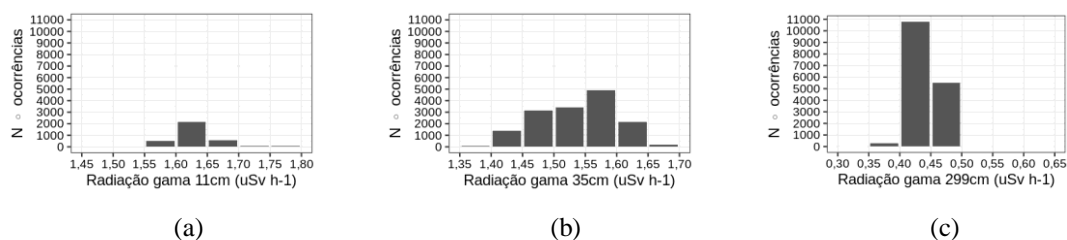
A convenção adotada para os sinais dos fluxos, neste trabalho, segue Stull (1988), positivas quando dirigidas da superfície para a atmosfera (emergente), negativas quando da atmosfera em direção à superfície (incidente), em concordância com a coordenada vertical z.

Valores máximos e mínimos são referentes aos valores absolutos, não considerando os sinais dos fluxos, os quais indicam o sentido dos mesmos. As barras verticais nos gráficos representam o erro estatístico da média.

A radiação gama amostrada a 2,99 m não exibiu variação significativa apresentando basicamente a mesma intensidade durante o ciclo diurno médio, entre 0,44 e 0,45 $\mu\text{Sv h}^{-1}$, e durante o ciclo anual médio entre 0,43 e 0,46 $\mu\text{Sv h}^{-1}$. Essa intensidade de radiação pode ser considerada como radiação de fundo do local, totalizando uma dose anual de aproximadamente 4,03 mSv ano^{-1} ao nível de 2,99 m de altura nessa região. De acordo com a UNSCEAR (2000), a dose natural típica de fundo (incluindo fonte externa, cósmica, inalação, ingestão) é em média 2,4 mSv ano^{-1} , ao nível médio do mar. A dose recomendada aos seres humanos é 1 mSv ano^{-1} para indivíduos em situação social usual, que não envolva preparo e treinamento para exposição à radiação ionizante, e não deve exceder 20 mSv ano^{-1} ao considerar situações excepcionais de exposição por benefício médico ou por trabalho, desde que haja monitoramento, treinamento e informação *International Commission On Radiological Protection (ICRP, 1991, 2017)*.

As distribuições das intensidades das radiações gama amostradas neste trabalho em 3 alturas diferentes, são ilustradas na figura 4.1, usando dados de 1 hora e classes de $0,05 \mu\text{Sv h}^{-1}$. Observa-se que os maiores valores são observados a 11 cm de altura e os de intensidade mais baixa a 299 cm de altura vertical. Conforme dito anteriormente, os valores da radiação a 299 cm se concentram no intervalo entre $0,4$ e $0,5 \mu\text{Sv h}^{-1}$. O maior intervalo de variação da radiação gama, de cerca de $0,25 \mu\text{Sv h}^{-1}$, é observado a 35 cm de altura, variando basicamente, entre $1,40$ e $1,65 \mu\text{Sv h}^{-1}$.

Figura 4.1: Histogramas radiação gama medida a (a) 11, (b) 35 e (c) 299 cm de altura.

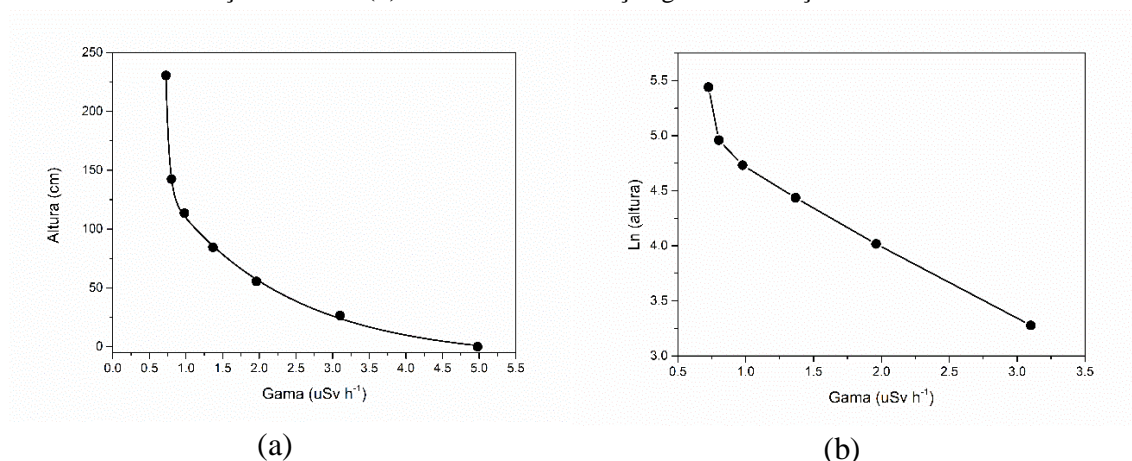


Fonte: Elaborado pela autora. Número de dados em (a) 3.400, (b) 15.212 e (c) 16.592.

Com o intuito de verificar a distribuição vertical da intensidade da radiação gama, foi realizada em 25/03/2021 uma sequência de medidas de radiação em alturas diferentes (Fig. 4.2a) e o resultado aponta que a radiação gama decai com a altura, tendo um comportamento exponencial até cerca de 1 metro de altura da superfície (Fig. 4.2b), acima da qual tende ao valor considerado aqui como valor da radiação de fundo (aproximadamente $0,45 \mu\text{Sv h}^{-1}$) do local estudado.

Esse resultado experimental corrobora com resultados de trabalhos anteriores com respeito à variação vertical da concentração do gás torônio (^{220}Rn) ambiental (CROZIER; BILES, 1966; IKEBE; SHIMO, 1972; ISRAEL, 1965; ISRAELSSON *et al.*, 1973; entre outros). Durante experimento realizado nos meses de verão (maio-junho) na Suécia, Israelsson *et al.* (1973b) encontraram variações da concentração de torônio somente até cerca de 1m de altura. Resultados recentes de Modibo *et al.* (2021) também mostram que a concentração de torônio diminuiu exponencialmente com a altura acima da superfície do solo.

Figura 4.2: (a) Perfil vertical da intensidade de radiação gama, realizado na data de 25 de março de 2021 e (b) intensidade da radiação gama em função do ln da altura.



Fonte: Elaborado pela autora.

A baixa altura vertical alcançada pelo torônio na atmosfera de Meaípe é consistente com as propriedades termodinâmicas do torônio, uma vez que esse gás é cerca de oito vezes mais pesado que o ar atmosférico (SINGH *et al.*, 2020), tendendo a se concentrar nas camadas atmosféricas mais baixas. Além disso, a curta meia vida do torônio (~55 s) limita a distância percorrida antes do seu decaimento, o que impede a existência do gás tempo suficiente para ascender longas distâncias verticais na atmosfera, o que explica a não detecção de variações importantes da radiação gama a 2,99 m de altura. Resultados semelhantes também foram encontrados nos trabalhos de Cigna (2005) e Fontan *et al.* (1966).

Outro resultado importante é que o valor da radiação gama aproximadamente constante acima de 1 m de altura da superfície, confirma a ausência de urânio na região, pois a presença de urânio geraria com seu decaimento o gás radônio (^{222}Rn), o qual tem uma meia vida da ordem de 3,8 dias, podendo alcançar, comparativamente, altas alturas na atmosfera. D'Azeredo Orlando *et al.* (2021) descrevem uma minuciosa análise físico-química das areias da praia de Meaípe e em seus resultados foram detectados somente traços de urânio, indicando que a radiação gama observada nas areias da região é proveniente basicamente do decaimento do tório, e não do urânio.

A partir da data 11 de abril de 2021 o espectrômetro gama que estava a 2,99 m de altura foi colocado em 11 cm de altura (Tabela 1.1), pois as medidas da radiação gama a 2,99 m, efetuadas por mais de 2 anos, mostraram alterações insignificantes ao longo das horas e dos meses investigados.

Dessa forma, as medições de radiação gama a 11 cm de altura foram efetuadas somente entre março e setembro de 2021, não contemplando os meses de verão, o que impossibilitou a estimativa do ciclo completo de variação anual.

No presente trabalho, serão apresentados e analisados com maior detalhamento, somente as radiações gama amostradas a 11 cm e a 35 cm de altura. Daqui em diante, a radiação gama medida a 11, 35 e 299 cm, será referida, respectivamente, como gama11, gama35 e gama299.

4.1. Variação horária

Conforme esperado, às 12 h (Fig.4.3) ocorrem máximas intensidades de radiação de onda curta incidente OCi ($753,2 \pm 0,5$) $W m^{-2}$ e refletida OCr ($105,4 \pm 0,5$) $W m^{-2}$. A radiação emitida pela superfície OLs apresenta seu máximo ($484,1 \pm 0,3$) $W m^{-2}$ às 13 h e mínimo às 6 h, concordando logo após o início de OCi no ciclo diurno. Há perda de calor pela superfície ao longo da noite, até que o retorno da exposição solar inicie o processo de aquecimento da superfície, elevando sua temperatura.

A radiação de onda longa emitida pela atmosfera OLa tem máximo de ($405,8 \pm 0,2$) $W m^{-2}$ às 14 h e mínimo às 6 h ($390,0 \pm 0,3$) $W m^{-2}$. Das componentes do balanço de radiação (OCi , OCr , OLs , OLa), a OLa , apresenta maior atraso de fase em relação às demais no ciclo diurno. A OLs apresenta um máximo, às 13 h, 1 h após o máximo da OCi .

A radiação líquida Rn , estimada conforme expressão (3.1), é dominada pelo saldo de radiação solar durante o dia, com máximo determinado pela OCi e, durante a noite, pelo saldo de radiação de onda longa netOL conforme figura 4.4. Quando Rn é positiva (negativa) observa-se um resfriamento (aquecimento) associado à superfície (YAMASOE; CORRÊA, 2016). O máximo na radiação líquida é obtido às 12 h, com valor absoluto de ($571,2 \pm 2,6$) $W m^{-2}$, desta forma pode-se dizer que há aquecimento durante o dia com máximo aquecimento superficial às 12 h, e resfriamento à noite.

Figura 4.3: Média horária da radiação de onda curta incidente (verde); refletida (azul), onda longa emitida pela superfície (laranja), e onda longa emitida pela atmosfera (vermelho).

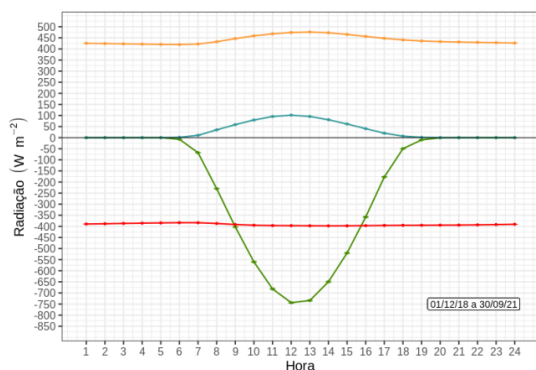
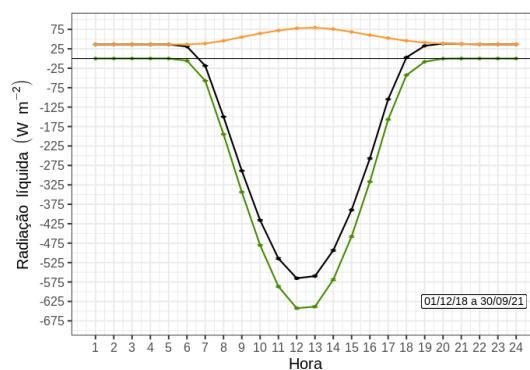


Figura 4.4: Média horária da radiação líquida de onda curta (verde), líquida de onda longa (laranja), e líquida total (preto).

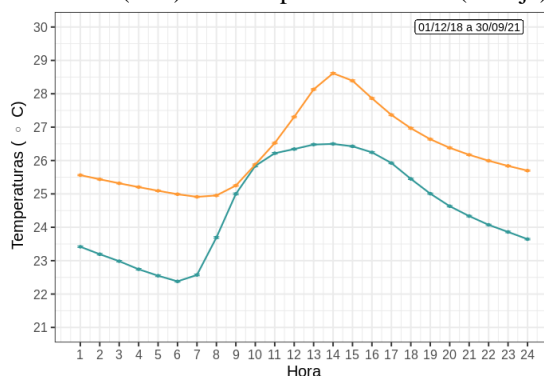


Fonte: Elaborado pela autora. Dados: OCi e OCr 293.512; OLa 292.480 e OLS 291.288.

O máximo no ciclo diurno da temperatura do ar (T_{ar}) tem valor de $(26,50 \pm 0,02)$ °C às 13 h, e mínimo de $(22,40 \pm 0,03)$ °C às 6 h (Fig. 4.5), respondendo ao ciclo diurno de aquecimento. A amplitude térmica, de cerca de 4°C, é característica da região tropical estudada, com temperaturas relativamente quentes durante todo o período.

O máximo da temperatura do solo, T_s , (Fig. 4.5) apresenta um atraso em relação ao máximo da temperatura do ar, ocorrendo às 14 h $(28,64 \pm 0,03)$ °C e mínimo às 7 h $(24,95 \pm 0,02)$ °C, sendo sempre mais alta do que a temperatura do ar, exceto às 10 h quando praticamente se igualam.

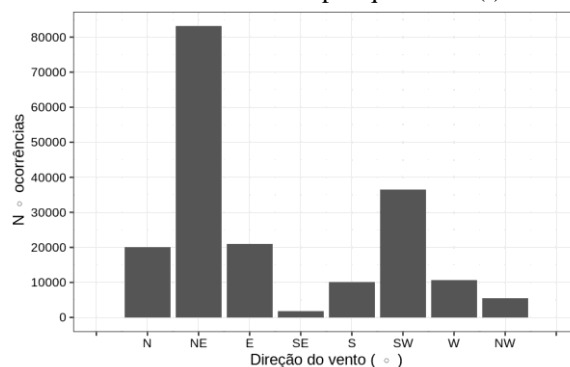
Figura 4.5: Médias horárias da temperatura do ar (azul) e da temperatura do solo (laranja).



Fonte: Elaborado pela autora. Dados: T_{ar} 292.049 e T_s 292.876.

Nota-se pelos histogramas da direção do vento (Fig. 4.6) que os ventos mais frequentes na região são do setor NE, e depois do setor SW.

Figura 4.6: Histograma de direção horária do vento por quadrante (°).



Fonte: Elaborado pela autora. Período de 01/12/2019 a 30/09/21, com 188.855 dados.

Os ventos médios sobre o local investigado são pouco intensos, apresentando um mínimo no início da manhã de $(0,94 \pm 0,01) \text{ ms}^{-1}$, conforme figura 4.7. O período de ventos mais intensos $(3,00 \pm 0,02) \text{ ms}^{-1}$ ocorre às 14 h e está associado ao escoamento de leste (Fig.4.8), que pela localização geográfica da região (Fig. 1.2), reporta um escoamento proveniente do mar, característico de um regime de circulação de brisa marítima. O vento do setor NE está associado à atuação do anticiclone subtropical do Atlântico Sul no litoral de estudo.

Figura 4.7: Média horária da intensidade do vento.

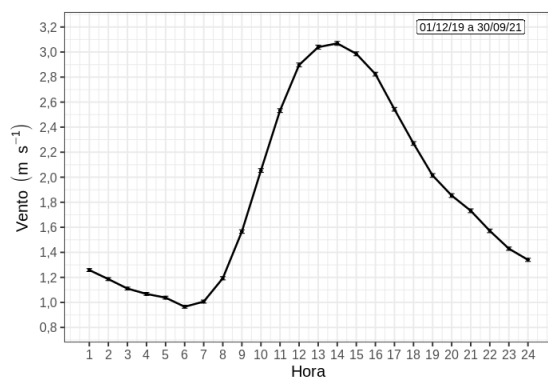
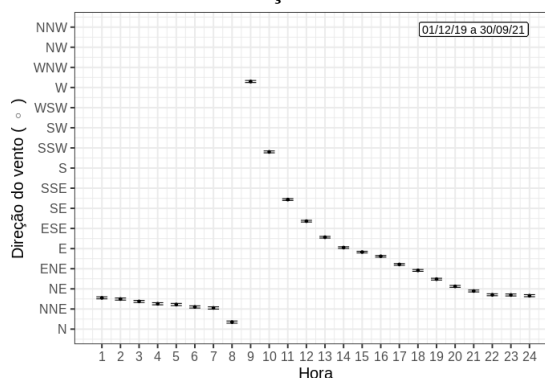


Figura 4.8: Média horária da direção do vento.



Fonte: Elaborado pela autora. Dados: 188.855.

Ao longo do período noturno, das 22 h às 8 h da manhã (Fig. 4.8), a direção do vento predominante é do setor NE. Entre 9 h e 15 h o regime médio de ventos de W muda para E, passando por componentes de S.

Os ventos provenientes dos setores W a WSW caracterizam escoamentos do interior do continente, que em geral são mais secos, podendo contribuir para a queda da umidade do ar (Fig. 4.9). Outro fator que pode estar relacionado aos menores valores médios de

UR durante o dia (9 h às 18 h) é o fato de a umidade relativa ter relação inversa com a temperatura do ar (quanto maior a temperatura do ar, maior a pressão parcial de saturação). A umidade relativa é um índice relacionado mais com a saturação do ar ambiente devido sua termodinâmica, do que com a quantidade de vapor d'água no ar.

No local investigado a precipitação é baixa, conforme visto pelo total horário acumulado ao longo do ano de 2020 (Fig. 4.10). Foi utilizado apenas o ano de 2020 de precipitação devido à incompletude dos dados em 2019 e 2021. Verifica-se uma tendência à formação de sistemas precipitantes no período da noite, possivelmente relacionados ao vento preferencial do setor NE (Fig. 4.8). Ventos de NE advectam umidade do mar, seguido de atrito com a superfície do continente podendo gerar movimento vertical ascendente e formação de nuvens.

Figura 4.9: Média horária da umidade relativa.

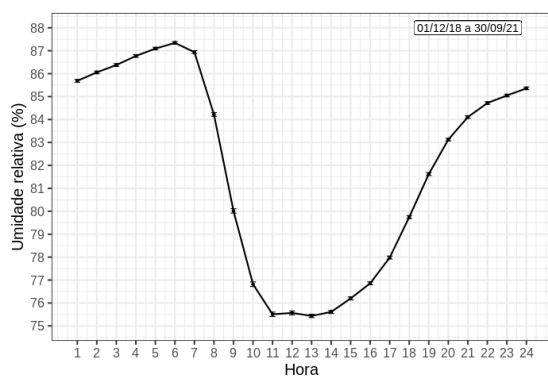
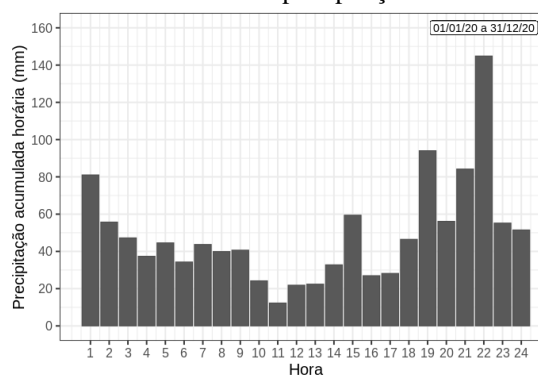
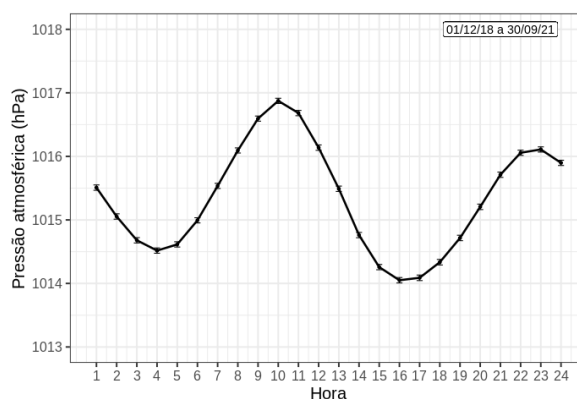


Figura 4.10: Acumulado horário da precipitação.



Fonte: Elaborado pela autora. Dados: 292.046 e 8.761 respectivamente.

Apesar de estar ao nível do mar, o local investigado apresenta pressão atmosférica média relativamente alta, sempre superior a 1014 hPa na variação diurna média (Fig. 4.11). Verifica-se que a pressão atmosférica exibe um ciclo diurno de padrão senoidal com dois máximos, um de $(1016,98 \pm 0,05)$ hPa ocorrendo às 10h e outro de $(1016,26 \pm 0,05)$ hPa às 23 h, e dois mínimos, um às 4 h $(1014,71 \pm 0,05)$ hPa e outro às 16 h $(1014,18 \pm 0,05)$ hPa. Esse padrão caracteriza um ciclo semidiurno de amplitude em torno de 2 hPa, podendo se apresentar dessa forma como uma resposta às variações de temperatura em níveis superiores. Tais variações perturbam o regime de ventos em altos níveis, e estes, por sua vez, perturbam a distribuição das superfícies isobáricas (KULATHILAKA; GUNARATNE, 2010). Nesse caso a variação do campo de pressão em Meaípe no seu ciclo diurno parece responder às variações de maior escala.

Figura 4.11: Média horária da pressão atmosférica.

Fonte: Elaborado pela autora. Dados: 292.868.

Maior densidade molar de vapor d'água (Fig. 4.12) às 13h sugere maior índice de evaporação nesse período, que pode estar relacionada tanto à temperatura do ar elevada (Fig. 4.5), quanto à maior intensidade do vento (Fig. 4.7). O fluxo de vapor d'água exibe um ciclo diurno marcado pelo aumento durante o dia e redução no período da noite, semelhante à curva de variação diurna de temperatura. Nesse caso é possível que o principal fator governante do ciclo diurno do vapor d'água seja a temperatura, intensificando a evaporação de dia, e reduzindo à noite.

O dióxido de carbono (CO_2) exibe uma redução de seu valor durante o dia, das 7 h às 17 h, e aumento no período noturno (Fig. 4.13). Muitas forçantes naturais e antrópicas atuam na exalação de CO_2 para a atmosfera e é possível que seu ciclo diurno esteja governado nessa região pela fotossíntese realizada pelas microalgas marinhas, e, conseqüentemente pelos fluxos de CO_2 entre a interface ar-mar.

De acordo com Frankignoulle (1988), o fluxo de CO_2 na interface ar-mar é influenciado pelo gradiente de pressão parcial de CO_2 (ΔP_{CO_2}) entre os dois meios. A solubilidade do CO_2 na água do mar depende de temperatura e salinidade, sendo mais solúvel em águas mais geladas e salinas. A supersaturação do oceano em relação à atmosfera ou vice-versa determina o sentido de ΔP_{CO_2} e conseqüentemente os períodos em que os níveis de CO_2 atmosférico serão maiores por estarem atuando como sorvedouro de CO_2 do oceano (FONSECA, 2013). Por outro lado, a produção de CO_2 pela flora marinha também é governada pelos ciclos biológicos, fatores químicos e ambientais às quais esses organismos respondem. Assim, o ΔP_{CO_2} depende da velocidade do ar, interferindo na turbulência na interface ar-mar, da produção biológica e reações químicas

locais, da temperatura e salinidade da água, e da circulação oceânica que é responsável por transportar água com propriedades físico-químicas diferentes das locais.

Aparentemente, o ciclo diurno do CO_2 responde ao saldo noturno de respiração celular, onde há “consumo” de O_2 e produção de CO_2 , e ao saldo diurno entre respiração celular e fotossíntese, onde nesta última há assimilação de CO_2 pela célula vegetal durante o período de disponibilidade de luz solar. A variação diurna média do CO_2 obtida para a região (Fig. 4.13) é similar aos perfis exibidos em Oke (2002), e por isso pode ser considerada como típica. Parazoo *et al.* (2008) discutem que a existência, à noite, de uma camada limite atmosférica estável atua confinando o CO_2 , e esse confinamento gera significativa variação nas medidas de CO_2 quando comparado com o período do dia. Durante o dia a mistura turbulenta tende a reduzir os gradientes verticais de CO_2 . Por isso é justificável que o erro estatístico seja maior nas médias representativas de horários noturnos e menor nas médias de horários do dia, principalmente entre 9 h e 17 h.

Figura 4.12: Média horária da densidade molar de H_2O .

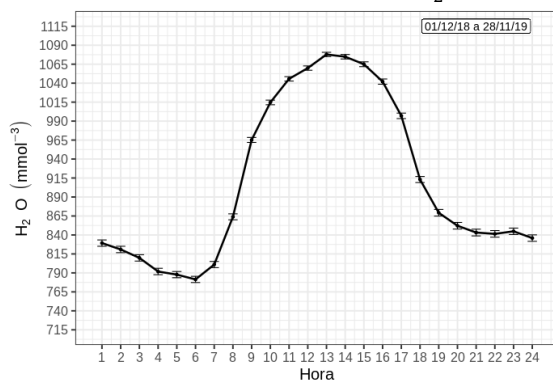
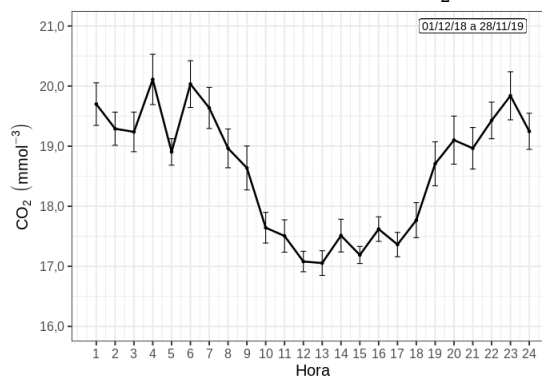


Figura 4.13: Média horária da densidade molar de CO_2 .



Fonte: Elaborado pela autora. Dados: 136.164 e 140.761 respectivamente.

A gama11 exibe uma amplitude diurna de cerca de $0,056 \mu\text{Sv h}^{-1}$, com o máximo de $(1,677 \pm 0,006) \mu\text{Sv h}^{-1}$ às 12 h, mínimo de $(1,621 \pm 0,002) \mu\text{Sv h}^{-1}$ às 9 h (Fig. 4.14 e 4.15). Durante a maior parte do tempo, das 14 h às 10 h, o valor da radiação se mantém praticamente constante, em torno de $1,62 \mu\text{Sv h}^{-1}$, exibindo intensa variação no intervalo de tempo de 4 h, com os valores máximos entre 10 h e 14 h (Fig. 4.15). O máximo de gama11 (Fig. 4.15) ocorre perto do máximo aquecimento da atmosfera (Fig. 4.5).

Figura 4.14: Média horária da radiação gama11, gama35 e gama299.

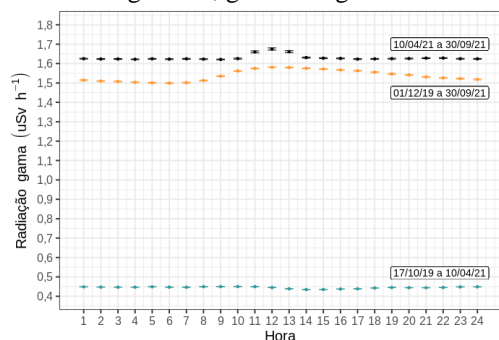
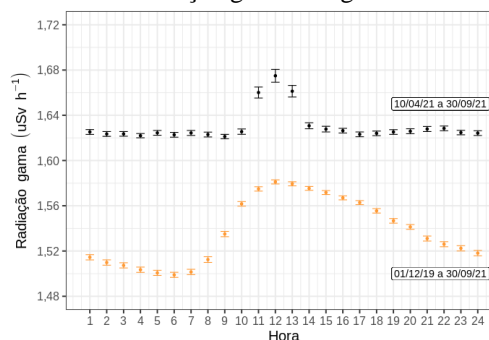


Figura 4.15: Média horária da radiação gama11 e gama35.



Fonte: Elaborado pela autora. Gama11 (preto), gama35 (laranja) gama299 (azul). Dados: gama11, 3.400; gama35, 15.212 e gama299, 16.801.

Durante o ciclo diurno, gama35 (Figs. 4.14 e 4.15) apresenta intensidades menores do que gama11, porém sua variação é maior do que a observada em 11 cm, tendo uma amplitude de cerca de $0,085 \mu\text{Sv h}^{-1}$. Um máximo de $(1,582 \pm 0,002) \mu\text{Sv h}^{-1}$ é observado às 12 h e um mínimo de $(1,497 \pm 0,002) \mu\text{Sv h}^{-1}$ às 6 h. O ciclo diurno de gama35 segue o ciclo diurno da temperatura do ar (Fig. 4.5), sugerindo uma influência positiva da temperatura do ar na exalação de torônio no local estudado. Simion *et al.* (2012, 2013) também destacam a importância da temperatura do ar e do solo na concentração do torônio da atmosfera, por atuarem no processo dominante que causa variação temporal do torônio além de seu decaimento, a exalação.

A radiação gama299 (Fig. 4.14) oscila pouco durante o ciclo diurno, cerca de $0,002 \mu\text{Sv h}^{-1}$, apresentando valores entre $(0,449 \pm 0,001)$ às 10 h $\mu\text{Sv h}^{-1}$ e $(0,447 \pm 0,002) \mu\text{Sv h}^{-1}$ às 7 h, basicamente o valor de radiação de fundo encontrado no local de estudo.

Medidas mostraram que a concentração do torônio poucos centímetros acima do solo é uma ordem de magnitude maior do que a concentração do torônio a 1 m de altura (UNSCEAR, 2000). No caso de Meaípe resultado semelhante foi observado, com a radiação gama sendo mais intensa próxima à superfície.

A tabela 4.1 sumariza os valores médios e extremos encontrados no ciclo diurno das radiações gama medidas nos 3 níveis ao longo de todo o período de estudo.

Tabela 4.1: Resumo do ciclo diurno de radiação gama amostrada em diferentes alturas.

	Máximo ($\mu\text{Sv h}^{-1}$) e horário	Mínimo ($\mu\text{Sv h}^{-1}$) e horário	Amplitude ($\mu\text{Sv h}^{-1}$)	Média ($\mu\text{Sv h}^{-1}$)
Gama11	$1,677 \pm 0,006$ 12 h	$1,621 \pm 0,002$ 9 h	0,056	$1,6300 \pm 0,0006$
Gama35	$1,582 \pm 0,002$ 12 h	$1,497 \pm 0,002$ 6 h	0,085	$1,5400 \pm 0,0005$
Gama299	$0,449 \pm 0,001$ 10 h	$0,447 \pm 0,002$ 17 h	0,002	$0,4480 \pm 0,0002$

No trabalho de Malakhov *et al.* (1966), realizado em Moscou/Rússia com medidas de exalação de torônio, observou-se um ciclo diurno com máximo à noite e mínimo de dia, exceto no verão onde foi encontrado o contrário, uma redução noturna e um aumento diurno. Esse aumento durante o dia, nos meses de verão Russo, é similar ao encontrado em Meaípe, que é um lugar cuja temperatura média é sempre relativamente alta (Fig. 4.5).

Nos experimentos de Israel (1965) medidas de torônio realizadas na cidade de Aachen/Alemanha, durante o verão local (24/jul a 2/set de 1964), exibiram aumento na concentração do gás durante o dia e redução à noite. Dessa forma, o comportamento do torônio ambiental em Meaípe se assemelha ao comportamento do torônio no período do verão de algumas regiões de alta latitude.

Há outros fatores que impactam na exalação de torônio para a atmosfera. Em Etiope e Martinelli (2002) um gás dentro dos poros do solo se propaga por advecção e por difusão, e o processo de transporte por advecção é mais importante que a difusão caso a porosidade do meio seja muito alta. De acordo com esses autores, o comprimento de difusão descreve a distância que o gás consegue migrar nos espaços do solo através do processo de difusão. Portanto, a redução no comprimento de difusão de um gás dentro do solo é traduzida como a dificuldade de sua migração para longe do grão de origem.

De acordo com Ye *et al.* (2020) o aumento da umidade no solo gera redução do coeficiente de difusão do torônio dentro do solo, e por consequência, do comprimento de difusão do torônio, que é aqui definido como a distância média percorrida pelos átomos no espaço do solo até antes de seu decaimento. Se o comprimento de difusão for pequeno o átomo percorre uma distância curta e acaba decaindo sem conseguir chegar na atmosfera.

De acordo com Midhun *et al.* (2017a, 2017b) a exalação do torônio varia de acordo com o conteúdo de umidade no solo. Estudos de Kumar *et al.* (2018) e Hosoda *et al.* (2007) relatam um aumento da exalação do torônio para a atmosfera com o aumento de umidade em até cerca de 8% da capacidade total do solo, e em seguida a esse valor crítico, conforme a umidade aumenta a exalação do torônio passa a decrescer. De acordo com Kumar *et al.* (2018), após atingido o valor crítico de umidade, a água passa a obstruir os espaços vazios do solo, impedindo o livre transporte do torônio emanado do grão, ilustrando o mesmo processo de redução do comprimento de difusão descrito por Ye *et al.* (2020) e Etiope e Martinelli (2002).

De acordo com Ramachandran e Sahoo (2009) o torônio é solúvel em água, com o índice de solubilidade decaindo com a elevação da temperatura (0,51 a 0°C; 0,25 a 20°C e 0,14 a 50°C), o que retrata outro possível efeito da presença de água na redução do torônio, pelo fato de uma quantidade moderada acabar se dissolvendo em contato com a água.

Schery e Petschek (1983) destacam que devem ser considerados os efeitos da variação da temperatura no conteúdo de umidade do solo. Dessa forma em Meaípe, o aumento da temperatura durante o dia (Fig.4.5) aumenta a evaporação (Fig. 4.12), que deve reduzir a umidade do solo. A redução de umidade do solo pode favorecer então a exalação do torônio nesse período, pois é reduzida a presença de um agente solúvel, e também pelo aumento do comprimento de difusão.

No período noturno, com a queda de temperatura há favorecimento da condensação e retenção de umidade no solo, o que reduziria a exalação de torônio. Já a precipitação parece exercer dois papéis, o de lavagem atmosférica e, portanto, de redução da concentração do torônio já exalado na atmosfera, e o de interferência negativa na exalação uma vez que a água tenha percolado no solo. Provavelmente esses dois fenômenos físicos atuam simultaneamente no solo de Meaípe, tornando a exalação do torônio maior durante os horários diurnos do que durante a noite.

4.2. Variação mensal

Os máximos valores absolutos das componentes do balanço de radiação solar ocorrem entre dezembro e fevereiro para a OCi, com máximo em janeiro ($293,6 \pm 2,8$) W m^{-2} , conforme a figura 4.16. A OCr também apresenta seu máximo no mesmo período com valor de ($39,3 \pm 0,4$) W m^{-2} . Esses resultados concordam com o esperado para a região, cujo verão compreende o período dezembro-janeiro-fevereiro, concordante com a máxima intensidade média mensal da radiação solar. Quanto às componentes de radiação de onda longa, máximos são identificados em fevereiro para OLs ($461,6 \pm 0,2$) W m^{-2} e OLa ($415,5 \pm 0,1$) W m^{-2} ; apresentando médias mensais com menor variação anual do que OCi.

No ciclo anual das radiações líquidas (Fig. 4.17), nota-se que o padrão da radiação líquida (netRad) segue a radiação líquida de onda curta, netOC, com máximo em janeiro e mínimo em junho, significando que a atmosfera local se aquece ao longo do ano todo, mais no verão e menos no inverno. A amplitude do ciclo anual da netRad é pequena, de cerca de -124 W m^{-2} . Verifica-se perda de radiação da superfície para a atmosfera pela componente do balanço de onda longa, netOL, durante todos os meses do ano.

Figura 4.16: Média mensal da radiação de onda curta incidente (verde); refletida (azul), onda longa emitida pela superfície (laranja), e onda longa emitida pela atmosfera (vermelho).

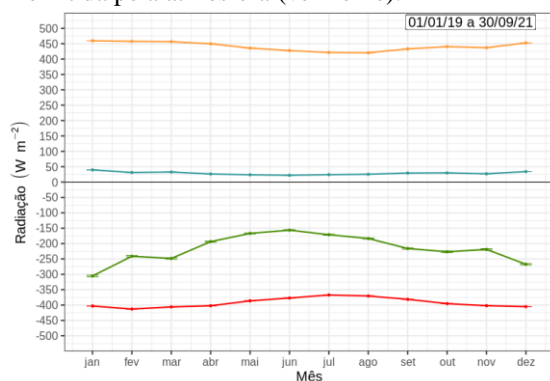
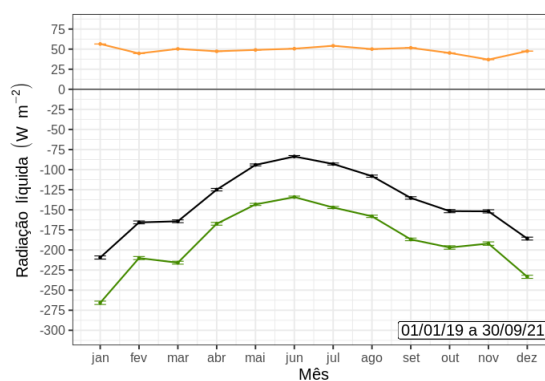


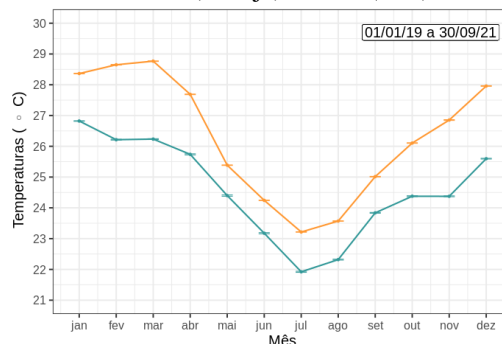
Figura 4.17: Média mensal da radiação líquida de onda curta (verde), líquida de onda longa (laranja), e líquida total (preto).



Fonte: Elaborado pela autora.

As temperaturas do ar e do solo (Fig. 4.18) são mais elevadas no verão e primavera com máximos de Tar em janeiro ($26,82 \pm 0,01$) °C, de Ts em março ($28,76 \pm 0,01$) °C, e menores no outono e inverno, com mínimas temperaturas mensais em julho ($21,87 \pm 0,01$ e $23,18 \pm 0,02$) °C. Durante todo o ano, a Ts é superior a Tar. A amplitude térmica anual de Tar e Ts são relativamente pequenas com valores respectivos de 5 °C e 5,6 °C.

Figura 4.18: Média mensal das temperaturas do solo (laranja) e do ar (azul).



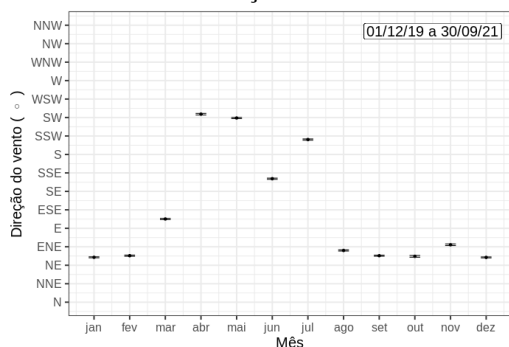
Fonte: Elaborado pela autora.

A direção do vento médio é do setor NE praticamente todo período primavera-verão (Fig. 4.19), e esse escoamento pode ser função da predominância da periferia do anticiclone subtropical do Atlântico Sul nesses meses, que é também o período climatológico onde a mesma tende a se afastar do continente da América do Sul.

De abril a julho os ventos médios adquirem componentes de sul, sendo principalmente do setor SW relacionados à atuação de sistemas transientes que no caso da região são frentes frias e sistemas de baixa pressão (OLIVEIRA; QUARESMA, 2018) de ocorrência preferencial no inverno.

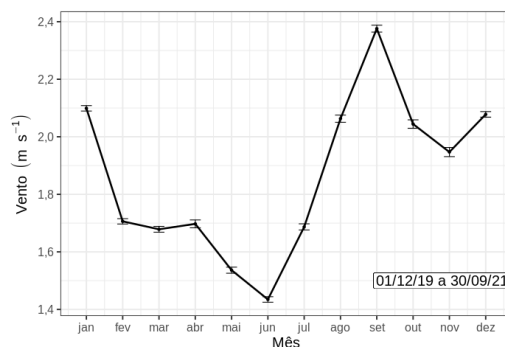
Tanto os ventos do setor NE quanto os do setor SW na localidade do estudo, são escoamentos vindos do mar, porém ventos de NE advectam ar de latitudes mais baixas, e conseqüentemente mais quentes, e ventos de SW advectam ar de latitudes mais altas, portanto mais frios. A magnitude do vento sobre a região (Fig.4.20) é pouco intensa com o vento médio mais intenso ocorrendo em setembro ($2,36 \pm 0,01$) ms^{-1} e relacionado a NE, e o vento menos intenso em junho ($1,42 \pm 0,03$) ms^{-1} , relacionado a SE, que conforme detalhado no estudo de Oliveira e Quaresma (2018) também está associado a sistemas transientes.

Figura 4.19: Média mensal da direção do vento.



Fonte: Elaborado pela autora.

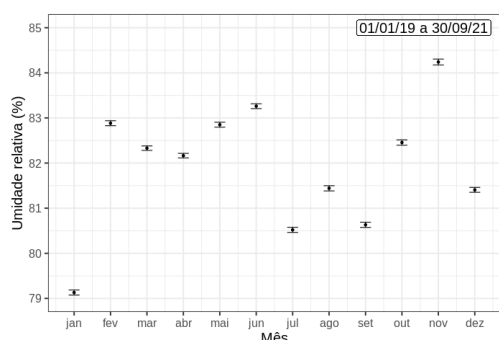
Figura 4.20: Média mensal da intensidade do vento.



A umidade relativa (Fig. 4.21) mínima em janeiro pode estar associada ao máximo de temperatura (Fig. 4.18). Ao longo do ano a umidade mensal média anual oscila entre 80% e 85 %, característica de regiões costeiras.

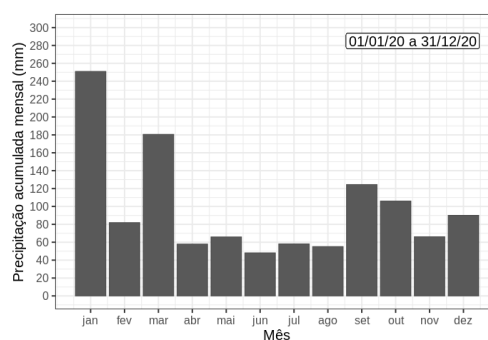
O acumulado de precipitação mensal (Fig. 4.22) mostra que o verão é o período chuvoso, com considerável menos chuva durante outono e inverno. Setembro exhibe aumento no acumulado devido, provavelmente, ao anticiclone subtropical do Atlântico Sul se expandir e se afastar do continente, com ventos de quadrante NE (Fig. 4.19). Esse aumento da precipitação a partir de setembro concorda com Oliveira e Quaresma (2018) e Reboita *et al.* (2019) que sinalizam o período de outubro a abril do ano seguinte, como a estação chuvosa no estado, em parte por ser o período favorável à formação de Zona de Convergência do Atlântico Sul. O acumulado anual de precipitação para o período de 2020 foi de 1185,5 mm.

Figura 4.21: Média mensal da umidade relativa.



Fonte: Elaborado pela autora.

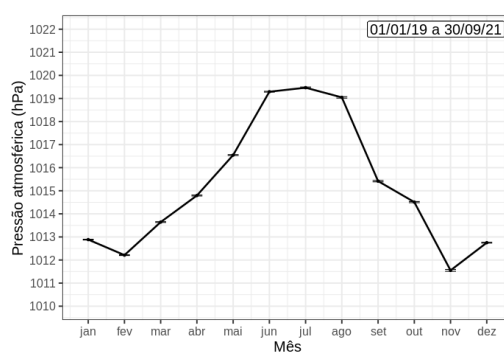
Figura 4.22: Acumulado mensal da precipitação



Os meses de outono e inverno na costa leste da América do Sul em latitudes médias são marcados pelo deslocamento do anticiclone subtropical do Atlântico Sul, adentrando mais o continente e atingindo sua posição mais a oeste do que nas outras estações

(PEIXOTO; OORT, 1992; REBOITA *et al.*, 2010; REBOITA *et al.*, 2019). Esse deslocamento pode ser identificado no ciclo anual de pressão (Fig.4.23), com máximo em julho ($1019,43 \pm 0,04$) hPa, e pressões mais baixas no período de novembro a março. Esse período está dentro do período típico favorável ao desenvolvimento da Zona de Convergência do Atlântico Sul na América do Sul, que é de setembro a abril. Dessa forma, as pressões maiores estão relacionadas à presença do anticiclone subtropical e as pressões menores observadas de outubro a março estão mais relacionadas à Zona de Convergência sobre o litoral do Espírito Santo e passagem de sistemas transientes.

Figura 4.23: Média mensal da pressão atmosférica.



Fonte: Elaborado pela autora.

O ciclo anual do fluxo de vapor d'água (Fig. 4.24) demonstrou intensa variação dificultando a identificação de um padrão claro, entretanto exibiu maiores valores em meses quentes e menores em meses mais frios, com exceção de dezembro. É possível que outros processos além da evaporação local influenciem a região, transportando ar úmido ou dificultando que a evaporação ocorra mesmo a elevadas temperaturas, explicando, por exemplo, o baixo fluxo encontrado em dezembro de 824 mmol. Valores mais elevados de fluxo de vapor em meses de verão e primavera são resultados esperados uma vez que a temperatura alta facilita o processo de evaporação.

No caso do ciclo anual do CO₂ (Fig. 4.25), caso processos locais fossem predominantes, seria esperada uma diminuição do CO₂ atmosférico no período primavera-verão e aumento no outono-inverno, pois como discutido em Oke (2002), o fluxo de CO₂ é fortemente acoplado ao padrão de entrada de radiação solar, e à disponibilidade de organismos realizadores de fotossíntese. Então, usualmente, com o aumento da radiação solar ao longo do ano (primavera e verão), espera-se que a fotossíntese aumente, o que levaria a uma redução de CO₂ na atmosfera pois este estaria

sendo assimilado por células vegetais de maneira mais intensa. Nesse caso, como no ciclo anual de CO_2 em Meaípe foi observado um aumento no período do verão, provavelmente além dos fatores locais de produção, atuam também mecanismos de transporte devido à presença de sistemas transientes. Parazoo *et al.* (2008) discutem o papel de frentes, ciclones, sistemas de baixa pressão e outros transientes em gerar variações consideráveis no CO_2 de um local pelo transporte de ar de características diferentes do ar local. Em Meaípe fenômenos transientes presentes na região no período de novembro a março parecem transportar mais CO_2 do que a produção local.

Figura 4.24: Média mensal da densidade molar de H_2O .

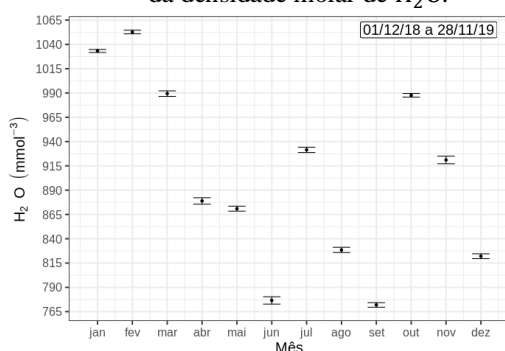
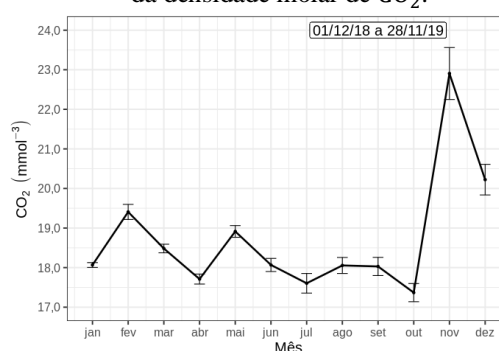


Figura 4.25: Média mensal da densidade molar de CO_2 .



Fonte: Elaborado pela autora.

O ciclo anual da radiação gama (Fig. 4.26) exibiu decréscimo com a entrada das estações mais frias (outono e inverno) e aumento no período de primavera e verão. Gama11 não possui amostragem suficiente para gerar um ciclo anual, mas apresenta sutil declínio de abril a setembro.

Considerando todo o período de medidas, gama35 apresentou média total de $1,54 \mu\text{Sv h}^{-1}$, tendo maior intensidade em dezembro e janeiro, com gradativo declínio, e mínimo em julho (Fig. 4.27).

Como introduzido anteriormente, gama299 é praticamente constante, em torno de $0,45 \mu\text{Sv h}^{-1}$, o ano todo.

A maior intensidade da radiação gama nos períodos quentes e menor nos períodos frios indica que no ciclo anual, assim como no diurno, as variáveis temperatura do ar e do solo são importantes para a exalação do torônio. No trabalho de Midhun *et al.* (2017b) a exalação de torônio medido na atmosfera, a 7 cm de altura da areia, em diversas localidades da região costeira de Kerala na Índia, atingiu valores máximos também no

período de verão. Entre os principais fatores de variação do torônio nas localidades investigadas, eles destacaram a temperatura do ar e o conteúdo de umidade do local.

Figura 4.26: Média mensal da gama11 (preta), gama35 (laranja) e gama299 (preta).

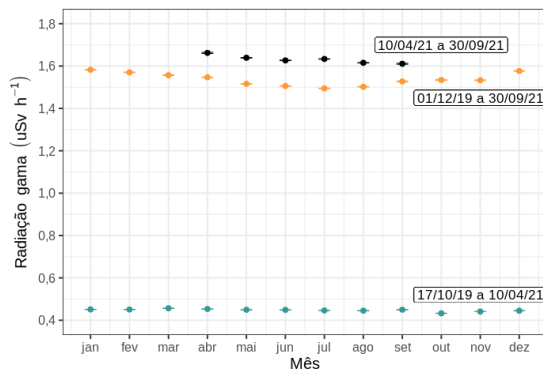
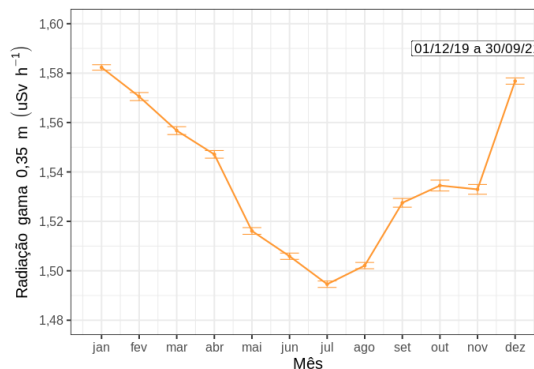


Figura 4.27: Média mensal da gama35.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.3. Correlações

Para investigar uma possível correlação entre as variáveis pesquisadas e a radiação gama, foram calculados índices de correlação de Spearman (FIELD *et al.*, 2012), utilizando dados de valores médios horários. O nível de confiança estabelecido foi de 95% para todos os testes.

A gama299 não exibiu correlação significativa com nenhuma das variáveis investigadas ($< 0,2$) e não será apresentada. No caso das outras alturas serão discutidas somente as três variáveis com maiores coeficientes de correlação com as radiações gama. Para gama35 foram omitidos os resultados com correlações menores do que 0,7 e para gama11 menores do que 0,3.

Além das três variáveis com maior índice de correlação, também será discutido a correlação entre as radiações gama e a precipitação, pois alguns estudos anteriores (FONTAN *et al.*, 1966; HOSODA *et al.*, 2007; ISRAEL *et al.*, 1965) sugerem que a precipitação tem efeito sobre o torônio, gerando diminuição da sua concentração na atmosfera.

A tabela 4.2 sintetiza os principais resultados da correlação e o número de pares de dados utilizados na estatística.

Tabela 4.2- Índice de correlação Spearman, entre variáveis investigadas e gama11 e gama35. O número de pares utilizados na estatística está entre parênteses. Período geral de dados utilizados foi de 01/01/2019 a 30/09/2021, exceto o período da precipitação que foi de 01/01/2020 a 31/12/2020.

Variável	Gama11	Gama35
Tar	0,37 (3.398)	0,80 (15.091)
Ols	0,39 (3.342)	0,79 (15.055)
Ts	0,34 (3.398)	0,72 (15.160)
Precipitação	-0,21 (196)	-0,18 (1.096)

Conforme se pode observar, as radiações gama, principalmente a gama35 tem alta correlação positiva com as temperaturas do ar e do solo (Tabela 4.2). Cuculeanu *et al.* (2011) também encontraram boa correlação positiva entre a concentração do torônio na atmosfera e a temperatura do ar usando valores médios mensais. Eles concluíram que a taxa de expiração do gás é o principal fator que contribui para a concentração do torônio na atmosfera e não a difusão turbulenta atmosférica, a qual não está totalmente desenvolvida na camada de ar perto do solo. Isso reduz uma possível contribuição da difusão para a dinâmica das concentrações do torônio.

As temperaturas do solo e do ar apresentaram coeficientes de correlação de mesmo sinal e valores próximos (Tabela 4.2). Esse resultado também confirma a ideia de que a concentração do torônio é determinada principalmente pela taxa de emissão do solo e não pelo processo de transporte e de difusão turbulenta.

A radiação de onda longa emitida pela superfície - proporcional à temperatura da superfície do solo- desempenha papel importante e exibe forte correlação com gama35.

Gama11 não apresenta correlação alta com nenhuma das variáveis medidas.

Os índices de correlação entre as variáveis e a radiação gama diminuíram usando defasagens no tempo (de 1, 2 e 3h), exceto no caso da precipitação, que apresentou ligeiro aumento (Tabela 4.3). A existência de uma demora no tempo de resposta da diminuição do torônio em relação à precipitação já havia sido sugerida em Fontan *et al.* (1966).

Tabela 4.3 - Índice de correlação Spearman entre as variáveis meteorológicas e radiação gama, com defasagem no tempo em 1, 2 e 3 horas. Período: 01/01/2019 a 30/09/2021.

Variável	Gama11				Gama35			
	-	+ 1 h	+ 2 h	+3 h	-	+ 1 h	+ 2 h	+3 h
OLs	0,39	0,38	0,35	0,30	0,79	0,80	0,77	0,71
Tar	0,37	0,36	0,33	0,29	0,80	0,78	0,74	0,68
Ts	0,34	0,30	0,26	0,23	0,72	0,69	0,64	0,59
Precipitação	-0,21	-0,23	-0,24	-0,24	-0,18	-0,21	-0,21	-0,21

4.4. Estudos de caso

Nesta subseção serão investigados alguns cenários envolvendo as variáveis (Tar, Ts e OLs) que exibiram maior coeficiente de correlação com as radiações gama, além da precipitação. Foram consideradas as médias horárias das variáveis dos dias escolhidos. Os seguintes cenários foram selecionados:

CENÁRIO 1: dia de céu claro sem precipitação (02JUN2021) com as temperaturas do ar e do solo exibindo um padrão semelhante ao ciclo diurno médio,

CENÁRIO 2: dia com nebulosidade e precipitação em torno das 12 h (05JUN2021) e temperaturas do ar e do solo relativamente altas e

CENÁRIO 3: dia com nebulosidade, sem precipitação e com temperaturas do ar e do solo relativamente baixas (19JUL2021).

4.4.1. CENÁRIO 1 (02JUN2021)

O balanço de radiação do cenário 1 reflete um dia sem nebulosidade com máxima radiação de onda curta incidente às 12 h, de cerca de 700 W m^{-2} (Fig. 4.28).

As temperaturas do ar e do solo (Fig. 4.29) apresentam comportamento similar ao do ciclo diurno médio (Fig. 4.5), mas não são muito elevadas por se tratar de um dia do final do outono.

Figura 4.28: OCi (verde); OCr (azul), OLs (laranja), e OLa (vermelho).

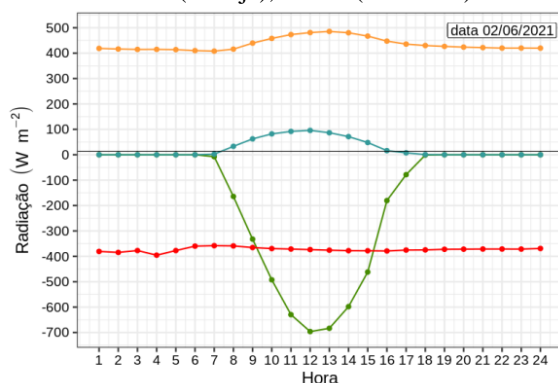
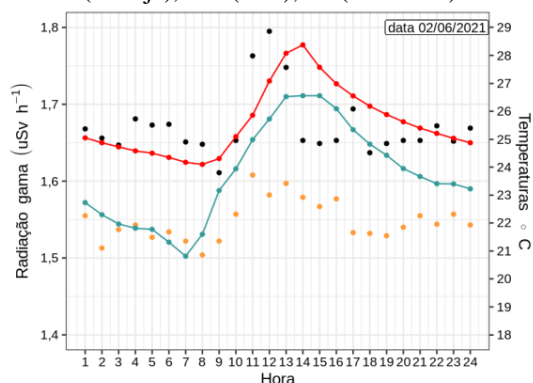


Figura 4.29: gama11 (preto) e gama35 (laranja), Tar (azul), Ts (vermelho).



Fonte: Elaborado pela autora.

A temperatura do ar apresenta amplitude de cerca de 5°C e a temperatura do solo, com valores sempre superiores à Tar, tem amplitude de aproximadamente 4°C (Fig. 4.29), comportamento similar ao obtido no ciclo diurno médio do período (Fig. 4.5).

Na radiação gama, com escala à esquerda da Fig. 4.29, vê-se gama11 sempre superior à gama35, e nesse dia com magnitude superior à sua média (Tabela 4.4), com máximo de $1,8 \mu\text{Sv h}^{-1}$ às 12 h, período em que tanto Tar quanto Ts exibiam intensa elevação, porém antes dessas variáveis atingirem seus máximos. A intensidade média de gama11 e gama35, durante o dia investigado, foi de, respectivamente, $(1,670 \pm 0,008)$ e $1,550 \pm 0,005) \mu\text{Sv h}^{-1}$, ambas superiores às suas médias gerais.

4.4.2. CENÁRIO 2 (05JUN2021)

A presença de nebulosidade pode ser verificada através do balanço de radiação (Fig. 4.30), com diminuição expressiva da onda curta incidente na superfície.

Após o início da precipitação também se verifica um expressivo decréscimo da amplitude de temperatura quando comparado ao ciclo diurno médio (Fig. 4.5).

Figura 4.30: precipitação (barra), OCi (verde); OCr (azul), OLs (laranja), e OLa (vermelho).

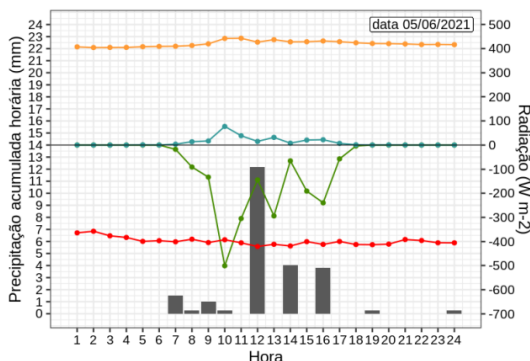
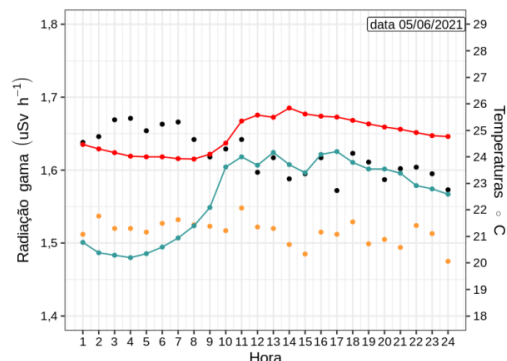


Figura 4.31: gama11 (preto) e gama35 (laranja), Tar (azul), Ts (vermelho).



Fonte: Elaborado pela autora.

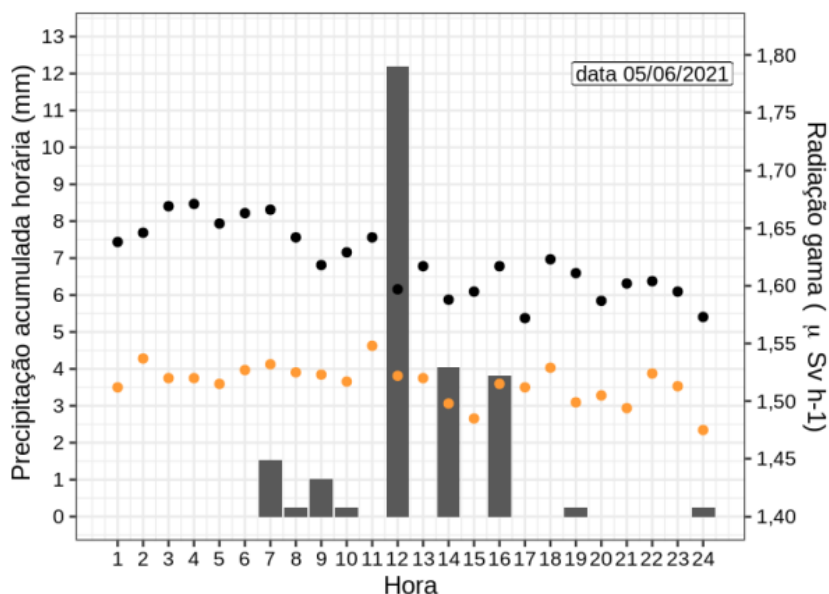
Gama11 e gama35 (Fig. 4.32, com escala à direita), exibem curvas diferentes do seu ciclo diurno médio (Fig. 4.15) com queda das suas intensidades no período do dia em que pelo ciclo diurno médio espera-se elevação e máximos. Observa-se queda de intensidade de gama11 e gama35 em quase todos os horários de ocorrência de precipitação, exceto das 7 h e das 16 h cuja queda ocorreu com defasagem na hora seguinte.

Gama11 cujo máximo no ciclo diurno médio é de $1,67 \mu\text{Sv h}^{-1}$ às 12 h apresentou nesse dia máximo de $1,67$ às 4 h, seguido de queda intermitente, e gama35 cujo máximo no ciclo diurno médio é de $1,58 \mu\text{Sv h}^{-1}$ às 12 h obteve máximo de $1,55 \mu\text{Sv h}^{-1}$ às 11 h

também seguido de queda intermitente. Durante esse dia, a intensidade média de gama11 e gama35 foi de, respectivamente, $(1,620 \pm 0,006)$ e $(1,520 \pm 0,003) \mu\text{Sv h}^{-1}$, inferiores às suas médias gerais (Tabela 4.4).

A precipitação acumulada de 12,4 mm ocorrida às 12 h reduziu a intensidade da radiação gama, aproximadamente em $0,05 \mu\text{Sv h}^{-1}$ para gama11 e $0,03 \mu\text{Sv h}^{-1}$ para gama35 em relação à medida no horário anterior, das 11 h.

Figura 4.32: Precipitação (barra), gama11 (preto) e gama35 (laranja).



Fonte: Elaborado pela autora.

4.4.3. CENÁRIO 3 (19JUL2021)

O cenário 3 descreve um dia sem precipitação, mas com ocorrência de nebulosidade durante todo o dia (Fig.4.33). Durante esse dia, Tar e Ts exibem baixas amplitudes (Fig. 4.34) ambas de cerca de $1,5^{\circ}\text{C}$, a menor dentre os três cenários investigados.

Gama11 e gama35 (Fig. 4.34) também não tiveram comportamento semelhante às suas curvas médias (Fig. 4.15), gama11 exibiu um registro máximo às 5 h de $1,64 \mu\text{Sv h}^{-1}$ e durante o restante do dia seus valores oscilaram em torno de $1,6 \mu\text{Sv h}^{-1}$, valor abaixo da sua média horária (Tabela 4.1). Gama35 apresentou máximo às 19 h e valores ao longo do dia sempre abaixo do seu valor médio de $1,54 \mu\text{Sv h}^{-1}$ (tabela 4.1).

Durante esse dia gama11 e gama35 apresentaram, respectivamente, média similar e inferior a sua média geral (Tabela 4.1).

Figura 4.33: OCi (verde); OCr (azul), OLS (laranja), e OLa (vermelho).

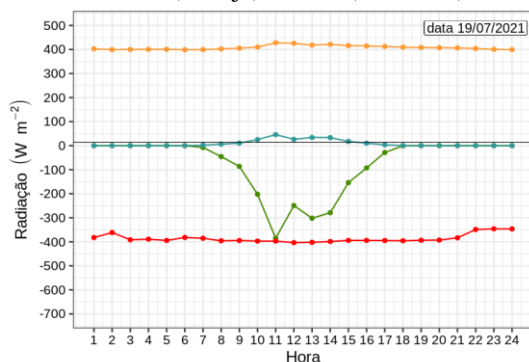
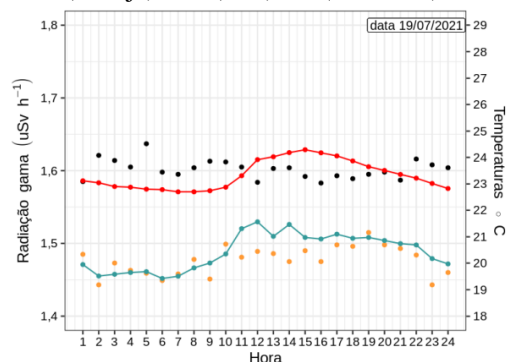


Figura 4.34: gama11 (preto) e gama35 (laranja), Tar (azul), Ts (vermelho).



Fonte: Elaborado pela autora.

No cenário 3 as temperaturas do ar e do solo parecem ter sido as responsáveis por influenciar o comportamento de radiação gama. Comparando com o ciclo diurno médio (Fig. 4.34) o comportamento esperado de radiação gama foi diferente, não exibindo picos máximos, como no caso do ciclo diurno médio.

Tabela 4.4 - Médias de Tar, Ts, gama11 e gama35 para os diferentes cenários.

Cenário	Gama11 ($\mu\text{Sv h}^{-1}$)	Gama35 ($\mu\text{Sv h}^{-1}$)	Tar ($^{\circ}\text{C}$)	Ts ($^{\circ}\text{C}$)
1	$1,670 \pm 0,008$	$1,550 \pm 0,005$	$23,8 \pm 0,4$	$25,6 \pm 0,3$
2	$1,620 \pm 0,006$	$1,520 \pm 0,003$	$22,5 \pm 0,3$	$24,8 \pm 0,1$
3	$1,630 \pm 0,004$	$1,500 \pm 0,005$	$20,4 \pm 0,1$	$23,3 \pm 0,1$
Ciclo diurno médio	$1,6300 \pm 0,0006$	$1,5400 \pm 0,0005$	$*22,46 \pm 0,01$	$*23,670 \pm 0,005$

*Médias obtidas para os meses junho – julho – agosto de toda a amostragem.

Nos três cenários investigados, a temperatura do solo foi sempre superior a temperatura do ar, seguindo o padrão observado no ciclo diurno médio das temperaturas.

No cenário 1 (dia de céu claro), as médias das intensidades da radiação gama desse dia foram superiores às médias do ciclo diurno médio. Nos cenários 2 (precipitação) e 3 (temperaturas relativamente baixas), as médias foram menores ou iguais à média do ciclo diurno de intensidade de radiação.

Comparando os três cenários, verifica-se que o aumento de temperatura gera um aumento na intensidade da radiação gama, exceto na gama11 quando na presença de precipitação (cenário 2). No cenário 2 as temperaturas do ar e do solo, apesar da precipitação, se mantêm mais elevadas do que as temperaturas do cenário 3 (sem precipitação), a gama11 do cenário 2 é superior a gama11 do cenário 3, mas inferior à sua média do ciclo diurno geral. Dessa forma, há indicação de que a intensidade da radiação gama medida em níveis mais próximos à superfície é mais afetada pela precipitação, provavelmente devido à mudança nas características do solo que podem afetar a exalação do torônio. Em contrapartida, a radiação gama a 35 cm de altura parece ser mais afetada pela temperatura do que pela precipitação apesar de, provavelmente, estar sujeita a impactos devido à lavagem do torônio na atmosfera.

5. Discussão e conclusão

Este trabalho caracterizou, pela primeira vez, a meteorologia de Meaípe com dados medidos in loco. Também é a primeira vez que medidas de intensidade da radiação gama de origem natural são realizadas continuamente por um período superior a dois anos em Meaípe.

A obtenção de variação horária e mensal das variáveis medidas permitiu observar que Meaípe é uma região quente, com temperaturas do solo sempre superiores às temperaturas do ar.

A incidência de radiação solar é alta ao longo de todo o ano, o que já era esperado por ser uma região de baixa latitude. Observou-se através do saldo de radiação que a superfície local está sempre sendo aquecida.

Mesmo sendo um lugar de litoral, chove pouco em comparação a outras regiões litorâneas. A justificativa para a pouca chuva pode estar relacionada à combinação de fatores de maior escala e a ausência de topografia pronunciada no local.

O escoamento local é predominante de NE, o que é representativo de ar vindo do mar para o continente. No ciclo diurno é possível identificar a existência de um regime de circulação característico de brisa marítima a partir das 10 h, que tende a transportar ar mais úmido para o interior.

A pressão atmosférica é mais alta no período outono - inverno, fato que unido à evidência do escoamento de NE podem ser indicativos da atuação do anticiclone subtropical conforme identificado por estudos sinóticos sobre a América do Sul.

A variação diurna do dióxido de carbono é comandada pela disponibilidade de radiação solar, que dispara e atua como controlador do processo de fotossíntese. Na variação anual observa-se que há fatores externos contribuindo para o CO₂ atmosférico, provavelmente advecção de regiões com maior produção de CO₂, que nesse caso podem ser regiões mais urbanizadas, regiões com grande escala de desmatamento, queimadas, ou com alta injeção industrial, entre outros.

Neste trabalho foi utilizada a intensidade da radiação gama como substituto do gás torônio, uma vez que trabalhos anteriores mostraram que há uma alta correlação entre a radiação gama e o gás torônio em regiões com radiação natural proveniente do tório.

Em experimento realizado em um único dia, o qual pode não ser representativo de todos os dias do ano, verificou-se que a intensidade da radiação gama apresenta um decaimento exponencial a partir da superfície do solo, até aproximadamente 1,20 m de altura. Esse resultado corrobora com os resultados de estudos anteriores em regiões onde a radiação gama natural é oriunda da presença exclusiva de tório. Verificou-se, nesse dia, que abaixo de 1,25 m a radiação gama é superior a $1 \mu\text{Sv h}^{-1}$, o qual é considerado um valor de dose alta pois contabilizará um valor de dose anual acima do recomendado pelo ICRP (1991).

Estudos prévios identificaram as propriedades do solo como importantes para a exalação do torônio para a atmosfera, principalmente a umidade do solo. No presente estudo, infelizmente, não foram realizadas medidas de umidade do solo. As medidas de precipitação, entretanto, permitiram identificar a existência de uma queda na intensidade de radiação gama após a ocorrência de chuva. A umidade do solo, provavelmente devido à precipitação, atingiu seu valor crítico refletindo assim na diminuição da exalação do gás torônio.

Resultados, obtidos neste trabalho, indicaram uma forte correlação positiva entre a intensidade da radiação gama na atmosfera e as temperaturas do ar e do solo. Correlação pequena e negativa foi obtida entre a precipitação e a intensidade de radiação nas alturas investigadas. A 35 cm de altura, a intensidade da radiação responde mais às temperaturas do que a precipitação. No caso da gama medida a 11 cm, isso parece não ocorrer. Próximo à superfície a precipitação parece ser mais importante do que temperatura do ar e do solo, talvez indicando que a umidade do solo seja fator de grande importância na exalação do torônio perto da superfície.

Observou-se que gama11 em comparação a gama35 apresenta uma intensidade maior e um ciclo diurno com menor variação, o que leva à hipótese da gama11 não ser tão influenciada pelas variáveis meteorológicas, talvez por responder mais às propriedades do solo.

Por ser medida mais próxima à fonte, gama11 parece ter sido mais suscetível aos processos de exalação do torônio, ao contrário de gama35 onde a distância a ser percorrida pelo gás é maior.

Espera-se que a caracterização temporal da intensidade da radiação gama local contribua com estudos focados em impactos na saúde da população local devido à presença da radiação ionizante.

6. Trabalhos futuros

Os resultados obtidos neste trabalho levantaram algumas questões que precisam de uma investigação mais detalhada. Podemos destacar:

- Obtenção dos ciclos diurno e anual dos perfis verticais de intensidade da radiação gama;
- Obtenção da exalação ou da concentração do torônio fora do solo para permitir análises mais precisas quanto à presença desse gás na atmosfera;
- Obtenção da variação temporal da umidade do solo;
- Obtenção de perfis verticais de temperatura e umidade do solo.
- Caracterização das propriedades do solo onde está instalada a torre;
- Caracterização espacial (horizontal e vertical) do torônio e/ou da radiação gama.

Agradecimentos

- Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (**FAPES**) [n 021/2018 (Universal) e 098/2019];
- Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (**CAPES**), programa Proex.

7. Referências

AMBROSINO, Fabrizio et al. Study of Surface Emissions of ^{220}Rn (Thoron) at Two Sites in the Campi Flegrei Caldera (Italy) during Volcanic Unrest in the Period 2011–2017. **Applied Sciences**, v. 11, n. 13, p. 5809, 2021. DOI: 10.3390/app11135809.

AOSHIMA, H. et al. A study of atmospheric radon transport as a tracer of pollutants over the Japan Sea. In: **Radioactivity in the Environment**. Elsevier, 2005. p. 567-572. DOI: 10.1016/S1569-4860(04)07068-8.

BECQUEREL, Antoine H. On radioactivity, a new property of matter. **Les prix Nobel**, 1903.

BOURGUIGNON, Leonardo Nascimento. Meaípe, breve histórico. **Blucher**, p. 22-30, 2019. DOI 10.5151/wcacem-19

CHAUDHURY, Debajit et al. Lung damage by thoron progenies versus possible damage redemption by lung stem cells: a perspective. **International Journal of Radiation Biology**, v. 96, n. 11, p. 1362-1373, 2020. DOI: 10.1080/09553002.2020.1820597.

CIGNA, Arrigo A. Radon in caves. **International Journal of Speleology**, v. 34, n. 1, p. 1-18, 2005. DOI: 10.5038/1827-806X.34.1.1.

CODATO, G.; SOARES, J. Observational Campaign of the FluTuES project-Torre Meaípe. **Blucher**, p. 36-39, 2019. DOI: 10.5151/wcacem-07.

COUTINHO, Joao Victor da Silva et al. Evaluation of induced biological effects in rats by continuous and natural gamma radiation using a physical simulator. **International Journal of Radiation Biology**, v. 96, n. 11, p. 1473-1485, 2020. DOI: 10.1080/09553002.2020.1812760.

CROZIER, W. D.; BILES, Norman. Measurements of radon 220 (thoron) in the atmosphere below 50 centimeters. **Journal of Geophysical Research**, v. 71, n. 20, p. 4735-4741, 1966. DOI: 10.1029/JZ071i020p04735.

CUCULEANU, Vasile et al. Dynamics, deterministic nature and correlations of outdoor ^{222}Rn and ^{220}Rn progeny concentrations measured at Bacău, Romania. **Journal of environmental radioactivity**, v. 102, n. 7, p. 703-712, 2011. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2011.04.005.

CURIE, Marie. Radium and radioactivity. **The Century Magazine**, v. 67, p. 461-66, 1904.

CURIE, Marie Sklodowska. Rayons émis par les composés de l'uranium et du thorium. **Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris**, v. 126, p. 1103, 1898/ CURIE, Marie Sklodowska. Rays emitted by compounds of uranium and of thorium. **Comptes Rendus** 126, 1101-3, 1898. / **Resonance**, v. 6, n. 3, p. 94-96, 2001.

DA COSTA DANTAS, Richelly *et al.* Natural radioactivity in Brazil: a systematic review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 1, p. 143-157, 2020. DOI: 10.1007/s11356-019-06962-6.

DANYŁEC, Karolina et al. Influence of various factors on the value of thoron emanation coefficient. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, p. 1-6, 2021. DOI: 10.1007/s10967-021-07967-7.

D'AZEREDO ORLANDO, Marcos Tadeu et al. Physicochemical characterization of monazite sand and its associated bacterial species from the beaches of southeastern Brazil. **Environmental Science and Pollution Research**, p. 1-16, 2021. DOI:10.1007/s11356-021-16523-5.

ETIOPE, G.; MARTINELLI, G. Migration of carrier and trace gases in the geosphere: an overview. **Physics of the earth and planetary interiors**, v. 129, n. 3-4, p. 185-204, 2002. DOI: 10.1016/S0031-9201(01)00292-8.

FIELD, Andy; MILES, Jeremy; FIELD, Zoë. **Discovering statistics using R**. 2012.

FONSECA, Fábio Luís Alves da. **Variação diurna do fluxo de CO₂ na interface ar-mar do Oceano Atlântico Equatorial**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2013. 56p.

FONTAN, Jacques et al. Measurement of the diffusion of radon, thoron and their radioactive daughter products in the lower layers of the Earth's atmosphere. **Tellus**, v. 18, n. 2-3, p. 623-632, 1966. DOI: 10.3402/tellusa.v18i2-3.9206.

FRANKIGNOULLE, Michel. Field measurements of air-sea CO₂ exchange 1. **Limnology and Oceanography**, v. 33, n. 3, p. 313-322, 1988. DOI: 10.4319/lo.1988.33.3.0313.

GOMES, Celso SF; SILVA, João BP. Psammotherapy or Arenotherapy. In: **Minerals latu sensu and Human Health**. Springer, Cham, p. 501-515, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-65706-2_12.

HOSODA, Masahiro et al. Effect of soil moisture content on radon and thoron exhalation. **Journal of nuclear science and technology**, v. 44, n. 4, p. 664-672, 2007. DOI: 10.1080/18811248.2007.9711855.

IHAKA, Ross; GENTLEMAN, Robert. R: a language for data analysis and graphics. **Journal of computational and graphical statistics**, v. 5, n. 3, p. 299-314, 1996. DOI: 10.2307/1390807.

INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISAS, ASSISTÊNCIA TÉCNICA DE EXPANSÃO RURAL/SECRETARIA DA AGRICULTURA, ABASTECIMENTO, AQUICULTURA E PESCA. **Programa de assistência técnica e extensão rural - Proater 2020–2023: Guarapari. Planejamento e programação de ações**. 2020, 61p. Disponível em <https://incaper.es.gov.br/media/incaper/proater/municipios/Guarapari.pdf>.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY 2013, **IAEA Annual Report 2013**, 2013. 121p.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60**. Oxford: Pergamon Press, 1991.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137** Annals of the ICRP 46(3/4). SAGE Publications Ltd, Los Angeles, 2017.

ISRAËL, Gerhard W. Thoron (Rn-220) measurements in the atmosphere and their application in meteorology. **Tellus**, v. 17, n. 3, p. 383-388, 1965. DOI: 10.1111/j.2153-3490.1965.tb01430.x.

ISRAËL, Gerhard W. Meteorological influences on the thoron (Rn220) content of the atmosphere. **Tellus**, v. 18, n. 2-3, p. 633-637, 1966. DOI: 10.3402/tellusa.v18i2-3.9205.

ISRAELSSON, S.; KNUDSEN, E.; UNGETHÜM, E. Simultaneous measurements of radon (Rn222) and thoron (Rn220) in the atmospheric surface layer. **Tellus**, v. 25, n. 3, p. 281-290, 1973. DOI: 10.3402/tellusa.v25i3.9662.

ISRAELSSON, S.; KNUDSEN, E.; UNGETHÜM, E. On the natural β -activity of the air in the atmospheric surface layer. **Atmospheric Environment (1967)**, v. 7, n. 11, p. 1127-1137, 1973. DOI: 10.1016/0004-6981(73)90221-7.

KANSE, S. D. et al. A study of thoron exhalation from monazite-rich beach sands of High Background Radiation Areas of Kerala and Odisha, India. **Environmental Earth Sciences**, v. 75, n. 23, p. 1-10, 2016. DOI: 10.1007/s12665-016-6279-9.

KULATHILAKA, H. A. N. C.; GUNARATNE, H. S. Determination of possible factors that affect the diurnal variation of atmospheric pressure. 2010.

KUMAR, MB Karthik et al. Study on influence of soil and atmospheric parameters on radon/thoron exhalation rate in the Bangalore University campus, Bengaluru. **Radiation Protection and Environment**, v. 41, n. 1, p. 8, 2018. DOI: 10.4103/rpe.RPE_9_18.

MALAKHOV, S. G. et al. Diurnal variations of radon and thoron decay product concentrations in the surface layer of the atmosphere and their washout by precipitations. **Tellus**, v. 18, n. 2-3, p. 643-654, 1966. DOI: 10.3402/tellusa.v18i2-3.9203.

MALANCA, A.; DE PIERI, R.; GAZZOLA, A. Radiogenic heavy minerals in Brazilian beach sand. **Journal of radioanalytical and nuclear chemistry**, v. 230, n. 1-2, p. 257-260, 1998. DOI: 10.1007/bf02387474

MIDHUN, M. et al. Comparison of thoron (^{220}Rn) content and gamma radiation level in high background radiation area of Kollam district in Kerala, India. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 314, n. 1, p. 177-185, 2017a. DOI 10.1007/s10967-017-5378-8.

MIDHUN, M. et al. The in situ measurement and calculation of exhalation rates of radon and Thoron in Alappad region of Kollam district, Kerala, India. **Int J Pure Appl Phys**, v. 13, p. 172-178, 2017b.

MODIBO, Oumar Bobbo et al. Long-Term Measurements of Radon and Thoron Exhalation Rates from the Ground Using the Vertical Distributions of Their Activity Concentrations. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 4, p. 1489, 2021. DOI: 10.3390/ijerph18041489.

OLIVEIRA, Kyssyenne Samihra Santos; DA SILVA QUARESMA, Valéria. Condições Típicas de vento sobre a região marinha adjacente à costa do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, 2018.

OKE, Timothy R. **Boundary layer climates**. Routledge, 2002.

ORLANDO, M. T. D. et al. Correlation between Breast Cancer and Radiation Level of Guarapari City-ES-Brazil. **Blucher Physics Proceedings**, v. 1, n. 2, p. 41-43, 2014. DOI 10.5151/phypro-ecfa-020.

PARAZOO, N. C. et al. Mechanisms for synoptic variations of atmospheric CO₂ in North America, South America and Europe. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 8, n. 23, p. 7239-7254, 2008. DOI: 10.5194/acp-8-7239-2008

PEIXOTO, José Pinto; OORT, Abraham H. **Physics of climate**. 1992.

PEZZOPANE, José Eduardo Macedo et al. Espacialização da temperatura do ar no Estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 12, n. 1, p. 151-158, 2004.

PEZZOPANE, José Ricardo Macedo et al. Zoneamento de risco climático para a cultura do café Conilon no Estado do Espírito Santo. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, p. 341-348, 2010. DOI: 10.1590/S1806-66902010000300004.

PORSTENDÖRFER, J. Properties and behaviour of radon and thoron and their decay products in the air. **Journal of Aerosol Science**, v. 25, n. 2, p. 219-263, 1994. DOI: 10.1016/0021-8502(94)90077-9.

RAMACHANDRAN, T. V.; SAHOO, B. K. Thoron (220 Rn) in the indoor environment and work places. **Indian Journal of Physics**, v. 83, n. 8, p. 1079-1098, 2009. DOI: 10.1007/s12648-009-0086-z.

RAMACHANDRAN, T. V. Environmental thoron (220Rn): A review. **Iranian journal of radiation research (IJRR)**, 8(3):129-147, 2010.

REBOITA, Michelle Simões et al. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista brasileira de meteorologia**, v. 25, p. 185-204, 2010. DOI: 10.1590/S0102-77862010000200004.

REBOITA, M. S.; KRUSCHE, N.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. da. Entendendo o tempo e o clima na América do Sul. *Terrae Didatica*, Campinas, SP, v. 8, n. 1, p. 34-50, 2012. DOI: 10.20396/td.v8i1.8637425.

REBOITA, Michelle Simoes et al. The South Atlantic subtropical anticyclone: present and future climate. **Frontiers in Earth Science**, v. 7, p. 8, 2019. DOI: 10.3389/feart.2019.00008.

RIBEIRO, F. N. D.; CODATO, G.; SOARES, J. Numerical Investigation of the Coastal Atmosphere and Ocean at Meaípe. **Blucher**, 1-6, 2019. DOI: 10.5151/wcacem-15

SCHERY, S. D. Thoron in the environment. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 40, n. 4, p. 493-497, 1990. DOI: 10.1080/10473289.1990.10466704.

SCHERY, S. D.; PETSCHKEK, A. G. Exhalation of radon and thoron: the question of the effect of thermal gradients in soil. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 64, n. 1, p. 56-60, 1983. DOI: 10.1016/0012-821X(83)90052-3.

SIMION, E. et al. Estimation and prediction of the outdoor ^{222}Rn and ^{220}Rn progeny concentrations using meteorological variables. In: **Paper presented at the First East European Radon Symposium–FERAS**. 2012.

SIMION, Florin et al. Modeling the ^{222}Rn and ^{220}Rn progeny concentrations in atmosphere using multiple linear regression with meteorological variables as predictors. **Romanian Reports in Physics**, v. 65, n. 2, p. 524-544, 2013.

SINGH, Bhupender et al. Quantification of radon/thoron exhalation rates of soil samples collected from district Faridabad of Southern Haryana, India. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 326, n. 1, p. 831-843, 2020. DOI: 10.1007/s10967-020-07365-5.

SOARES J., ORLANDO M.T.D. and GOUVEA S.A. Project “Monazite sands of Meaípe, Guarapari, ES”. In: São Paulo: **Blucher**, 38-41, 2019. DOI: 10.5151/wcacem-22.

SOARES, J.; RIBEIRO, F.N.D. and CODATO G. Investigation of the surface-atmosphere interaction on the coastal region of the monazite sands of Meaípe, Guarapari (ES) - preliminary results. In: São Paulo: **Blucher**, 33-37, 2019. DOI: 10.5151/wcacem-21.

STULL, Roland B. **An introduction to boundary layer meteorology**. Springer Science & Business Media, 1988.

STULL, Roland B. et al. **Practical meteorology: an algebra-based survey of atmospheric science**. 2015.

UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. **Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly**. Vol I: Sources. Health Phys, 79 (3), 314. 2000, 659 p. Disponível em: [unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR_2000_Report_Vol.I.pdf](https://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR_2000_Report_Vol.I.pdf).

UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION et al. **Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 2016 Report: Report to the General Assembly, with Scientific Annexes**. United Nations, 2017. 512 p. Disponível em:

https://www.unscear.org/docs/publications/2016/UNSCEAR_2016_Report-CORR2.pdf
 VASCONCELOS, Danilo C. et al. Modelling natural radioactivity in sand beaches of Guarapari, Espírito Santo State, Brazil. **World Journal of Nuclear Science and Technology**, p. 65-71, 2013. DOI: 10.4236/wjnst.2013.32011.

VEIGA, R. et al. Measurement of natural radioactivity in Brazilian beach sands. **Radiation measurements**, v. 41, n. 2, p. 189-196, 2005. DOI: 10.1016/j.radmeas.2005.05.001.

VEIGA, Lene HS; KOIFMAN, Sérgio. Pattern of cancer mortality in some Brazilian HBRAs. In: **International Congress Series**. Elsevier, 2005. p. 110-113. DOI: 10.1016/j.ics.2004.11.046.

WILKENING, Marvin H. Daily and annual courses of natural atmospheric radioactivity. **Journal of Geophysical Research**, v. 64, n. 5, p. 521-526, 1959. DOI: 10.1029/JZ064i005p00521.

XIAO, Chengwei et al. Using Spearman's correlation coefficients for exploratory data analysis on big dataset. **Concurrency and Computation: Practice and Experience**, v. 28, n. 14, p. 3866-3878, 2016. DOI: 10.1002/cpe.3745.

YAMASOE, Marcia Akemi; DE PAULA CORRÊA, Marcelo. **Processos radiativos na atmosfera**. Oficina de Textos, 2016.

YE, Yongjun et al. A laboratory method for concurrently determining diffusion migration parameters and water saturation effects of thoron in uranium tailings. **Chemosphere**, v. 249, p. 126520, 2020. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.126520.