Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe

A Influência de condições meteorológicas na concentração de gás radônio em uma área de Mata atlântica dunar no Nordeste do Brasil

V A Dantas¹; C M Santos e Silva²; T F C Campos³; J J Hoelzemann² e G F B Chagas

[1] Doutoranda em Ciências Climáticas, Departamento de Ciências Atmosféricas e Climáticas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil. [2] Departamento de Ciências Atmosféricas e Climáticas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil. [3] Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil. Correspondência para: V.A. Dantas (vanessalmeida24@gmail.com)

Artigo recebido em 17/03/2016 e aceito em 15/05/2016

RESUMO

O Radônio (Rn-222) é um gás nobre radiativo, denso, incolor, inodoro, insípido, altamente solúvel na água, com uma fração molar de solubilidade de $1,67 \times 10^{-4}$ a 25° C e 1 Atm. Com exceção do dióxido de carbono, é o gás com maior capacidade de solubilidade no ar atmosférico normal. Pouco se sabe sobre o comportamento Rn-222, no que diz respeito à distribuição nos diferentes níveis da baixa troposfera nas áreas de florestas naturais, a exemplo da Mata Atlântica Dunar. Assim, o objetivo deste estudo é investigar a relação entre variáveis meteorológicas, as concentrações atmosféricas de Rn-222 e íons atmosféricos para o período caracterizado como seco, em dezembro de 2013, no município de Parnamirim-RN. A área da coleta de dados se encontra inserida no bioma da Mata Atlântica Dunar Nordestina, que abrange cerca de 19.427 km², as medidas foram realizadas a 1,5 m do solo. Coletaram-se dados de temperatura do ar, umidade relativa, velocidade e direção do vento e pressão atmosférica bem como concentrações de Rn-222 e de íons atmosféricos. Os resultados mostraram um padrão bimodal no comportamento diário da concentração de Rn-222, nas primeiras horas manhã observado em todos os dias. Comportamento semelhante foi observado para a concentração de íons entre 04:00 e 05:00 horas da manhã. Através do modelo de regressão linear múltipla via análise de componentes principais as variáveis meteorológicas que se mostraram mais correlacionadas com a concentração de Rn-222, com explicação de 88% foi a umidade relativa, velocidade do vento e a radiação solar global.

Palavras-chave: Gás Radônio, Íons atmosféricos, Mata atlântica Dunar.

The influence of weather conditions in the concentration of Radon gas in an Atlantic Forest area of dunes in northeastern Brazil

ABSTRACT

The Radon (Rn-222) is a radioactive noble gas, dense, colorless, odorless, tasteless, and highly soluble in water, with a mole fraction solubility of 1.67×10^{-4} at 25 ° C and 1 atm. With the exception of carbon dioxide, the gas is greater solubility capacity in normal atmospheric air. Little is known about the Rn-222 behavior, with regard to the distribution at different levels of ground-level ozone in the areas of natural forests, such as the Atlantic Forest Dune. The objective of this study is to investigate the relationship between meteorological variables, atmospheric concentrations of Rn-222 and atmospheric ions to the period prescribed characterized as dry, in December 2013, in the municipality of Parnamirim-RN. The area of data collection is inserted in the Atlantic Forest biome Dune Northeast, which covers about 19,427 square kilometers; the measurements were taken at 1.5 m above the ground. Collected from the air temperature data, relative humidity, wind speed and direction, atmospheric pressure and Rn-222 and atmospheric ion concentrations. The results showed bimodal pattern in the daily cycle of the concentration of Rn-222, in the early morning hours observed in every day. Similar cycle was observed for the concentration of ions between 04:00 and 05:00 in the morning. Through the multiple linear regressions model via principal component analysis the meteorological variable that were more correlated with the concentration of Rn-222, with 88% explanation was the relative humidity, wind speed and solar radiation.

Keywords: radon gas, atmospheric ions, Atlantic Forest.

Introdução

O Radônio-222 (Rn-222) é um gás radioativo geogênico (relativo a geologia) que esta presente em rochas, solo, ar e água e é gerado pelo decaimento do urânio (U-238) e Tório (Th-232). A alta atividade deste gás está intimamente associada com altas concentrações de urânio, Tório e seu descendente Rádio, em certos tipos de rochas, como rochas vulcânicas ácidas, granitos, fosfato ricos em matéria orgânica sedimentar; além de rochas metamórficas derivada das rochas anteriores. Essas rochas e os seus solos pode conter mais do que 100 ppm de Urânio (Faure, 1991). Geoquimicamente é uma fração do Urânio-Tório contido na rocha formadora de mineral que é mais facilmente dissolvida pela água subterrânea, contaminando o aquífero com sais de urânio (Gabelman, 1977; Tiet, 1975 Adams *et al*, 1959).

Apesar dos níveis de Urânio variar muito, porque eles dependem da litologia de cada região. Considera-se como concentrações anormais de Urânio, se maior que 4 µg/g. Em regiões semiáridas, as concentrações podem exceder várias centenas µg/g (Bowie e Plant, 1983). A existência de gás Radônio na atmosfera é devido ao transporte desse gás no ar e dissolvido na água subterrânea por evapotranspiração árvore, uma vez que a radiação alfa e beta da desintegração de gás Radônio que emana diretamente dos solos e rochas tem pouco poder de penetração na atmosfera (Jayaratne, *et al*. 2011).

A principal fonte de Radônio no ambiente externo é a umidade do solo. Uma importante fonte de elevadas concentrações de Radônio no ambiente interno de uma casa é água subterrânea. A ingestão dessas águas com altos níveis de Rádio e/ou Radônio, também são prejudiciais à saúde (ICRP, 1993). De acordo com o Conselho Nacional de Proteção Contra Radiações (NCRP), as concentrações de Radônio na faixa de solo de 30.000 a 100.000 Bq/m³, enquanto na atmosfera são cerca de 8 Bq/m³.

O U-238 não é o agente mais importante como fator de risco para a saúde humana, deixando esse papel para Rn-222. Qualquer possível risco direto de câncer ou outros problemas de saúde causados pela exposição ao urânio é provavelmente inferior a

0,005%, em comparação com o risco de 0,2% - 3,0% associada à inalação de gás Radônio produzida a partir da decomposição de U-238 (Taylor e Taylor, 1997).

Como é solúvel em água e outros líquidos, o Radônio pode estar presente em concentrações significativas em cavernas calcárias, onde geralmente se observa urânio ou Tório. O Radônio apresenta concentrações relativamente baixas no ar e seus átomos têm uma taxa de deposição baixa, em comparação com os átomos de gás mais pesados. As variações de concentração do gradiente de Radônio são fortemente influenciadas por fatores meteorológicos, como velocidade e direção do vento, umidade e temperatura. A deposição do solo ocorre através dos processos de precipitação, porque os produtos de decaimento do Radônio são isótopos de metais pesados que podem se ligam a partículas de aerossóis no ar (ICRP, 1993), que servem como núcleos de condensação de nuvens.

A dispersão de poluentes, bem como os aerossóis, baseia-se no conceito de advecção, sendo dependente do fluxo atmosférico médio, e um mecanismo de difusão turbulenta devido à forçantes térmica e / ou mecânico (Stull, 1988). Estes processos dependem da interação entre os mecanismos que ocorrem na atmosfera, tais como estratificação térmica, o regime de vento, topografia, tais como efeitos de elevação orográfica e bloqueio atmosférico, bem como taxas de emissão (Oke, 1992).

Na baixa atmosfera esses poluentes podem sofrer transformações e reações fotoquímicas que levam a poluentes secundários. Depois de serem emitidos para a atmosfera os poluentes primários são submetidos a processos complexos de transporte, mistura e processamento químico, que dá origem a uma distribuição espacial e temporal altamente variável das suas concentrações na atmosfera. Basicamente, a distribuição das concentrações de poluentes na atmosfera depende das condições de emissão do tempo. Alguns poluentes podem ser transportados a distâncias de longo alcance, antes de serem quimicamente transformada ou depositada sobre a superfície (Elsom, 1989).

Muitos estudos trazem informações sobre medições de Radônio em diferentes tipos de solos e ambientes. Por exemplo: Sroor *et al*. (2001) em estudo sobre o solo no Egito;

Szegvary *et al.* (2007) mapeamento de solo em 63 localidades na Suíça, Alemanha e Finlândia; Zhuo *et al.* (2009) em solo na China; Griffiths *et al.* (2010), Jayaratne *et al.* (2011) em área de floresta na Austrália.

Por outro lado, no Brasil, poucos estudos publicados sobre as concentrações Rn-222, como o que foi realizado na Amazônia por Martens *et al.* (2004), onde neste estudo, os autores utilizaram o Radônio como traçador para observar taxas de trocas gasosas entre a atmosfera e o dossel de uma floresta primária. A acumulação de Rn-222 durante a noite e a diminuição da sua concentração durante o dia pode ser observada.

Do ponto de vista dos íons e da condutividade, a atmosfera pode ser dividida em atmosfera inferior (correspondente à troposfera), média atmosfera (estratosfera e mesosfera) e atmosfera superior (acima de 85 km de distância, termosfera). A atmosfera inferior e a média atmosfera são fracamente condutoras por apresentarem pouca concentração de íons. Nessas regiões, os íons são criados pela ionização de moléculas neutras do ar (geralmente moléculas de nitrogênio e oxigênio), por raios cósmicos primários e secundários, por partículas e radiação produzida pelo decaimento radioativo de substâncias no solo, tal qual o urânio e o Tório, e no ar, como gás Radônio. Como resultado da ionização das moléculas, elétrons livres e íons positivos são gerados. Os elétrons ligam-se rapidamente a outras moléculas neutras produzindo íons negativos. A produção de íons por raios cósmicos varia com a altitude e a latitude (Pinto *et al.*, 2000).

Os aglomerados de íons na Atmosfera são formados principalmente pela ação da radiação cósmica, da radiação Gama proveniente da superfície terrestre e da radiação Alfa advinda do Radônio e seus produtos de decaimento de curta duração existentes no Ar. Portanto, admite-se que a concentração de aglomerados de íons esteja diretamente relacionada com o nível de Radônio na Atmosfera. Como foi demonstrado por Sas *et al.* (2006) em um estudo sobre a exalação de Radônio em cavernas da república Checa e por Jayaratne *et al.* (2011) nas florestas australianas, em que constatou-se uma forte correlação entre os níveis de Radônio e os íons positivos ($R^2 = 0,89$) e íons negativos ($R^2 = 0,96$) na baixa atmosfera.

Este fato também foi identificado por Ling *et al.* (2010), que mediram a concentração aglomerados de íons em zonas florestais (725 cm^3) e verificaram que esses valores eram significativamente superiores relativamente às áreas abertas (269 cm^3). Estes valores elevados em zonas florestais e que se encontram razoavelmente afastadas das atividades humanas, estão de acordo com os valores excepcionalmente altos encontrados em locais de florestas mais remotas. Por exemplo, valores acima de 1000 cm^3 foram regularmente identificados nas florestas boreais no norte da Europa (Hirsikko *et al.*, 2005; Vana *et al.*, 2006; Tammet *et al.* 2006; Vartiainen *et al.*, 2007) e de mais 4000 cm^3 em floresta de eucalipto no NSW da Austrália (Sun *et al.*, 2008). Estes últimos autores sugeriram que estas concentrações de aglomerados de íons excepcionalmente altas foram devido a uma forte exalação de Radônio vindo dos solos em torno desta floresta, mas não puderam confirmar categoricamente esta causa, devida a pouca informação sobre as concentrações de Radônio na atmosfera florestal (Jayaratne *et al.*, 2011).

Neste artigo, o objetivo é apresentar evidências da influência de fatores meteorológicos (temperatura, umidade e velocidade do vento) na variação diurna do Rn-222 em um ambiente de Mata Atlântica Dunar durante a estação seca. Além disso, quantifica-se a concentração de íons atmosféricos nessa região.

Material e métodos

Caracterização da região de estudo

Base de dados

Parnamirim é um município brasileiro localizado no estado do Rio Grande do Norte e pertencente à Região Metropolitana de Natal, na mesorregião do Leste Potiguar e à microrregião de Natal. Situa-se a 12 km ao sul da capital estadual e ocupa uma área de 120.202 km^2 . Em 2012 sua população era de 214.199 habitantes segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), sendo, portanto, o terceiro município mais populoso do estado, Figura 01.

O clima de Parnamirim é tropical chuvoso (do tipo As segundo Köppen), com

verão seco e estação chuvosa atrasando-se para o outono e temperatura média anual de 27,1°C, tendo invernos amenos, em comparação ao resto do ano, e verões com predomínio de temperaturas altas. O mês mais quente, janeiro, tem temperatura média de 27,0°C. O mais frio, julho, possui média aproximada 24,2°C. O período chuvoso de Parnamirim e região, em média, ocorrem entre fevereiro e julho. A umidade relativa do ar é de 79% e o tempo de insolação chega a 2.700 horas anuais segundo dados da Fundação Cearense de Meteorologia (FUNCEME).

Os dados do experimento foram coletados no período seco, especificamente entre os dias 11 e 16 de dezembro de 2013. Não foram executadas medidas no período chuvoso de Parnamirim por falta de financiamento e segurança dos equipamentos na localidade para a execução mesmo. As coletas foram horárias tanto das variáveis meteorológicas como das concentrações de Rn-222 bem como dos íons atmosféricos. Houve falhas de medidas dos íons, uma vez que o instrumento de medida era

manual e sem o auxílio de um datalog tornou-se inviável as leituras durante a madrugada, entretanto as medidas meteorológicas e de Radônio previstas foram executadas.

O intervalos de 5 dias de medições para o experimento em questão se deu baseado na literatura em relação as medições de Radônio e íons atmosféricos, uma vez que a meia-vida do Rn-222 é de aproximadamente 3,82 dias; portanto, a amostragem é consistente a outros estudos (Jayaratne *et al.* 2011).

Medição do gás Radônio (Rn-222)

As medidas de Rn-222 foram feitas a partir de um emanômetro espectrométrico portátil modelo AlphaGuard® da Genitron (Alemanha) que é a peça central de um sistema de medição portátil e compacto para a determinação contínua de sua concentração no ar e seus descendentes, bem como as variáveis meteorológicas: Temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica.

Figura 1- Localização da área de estudo.

O AlphaGuard pode ser operado independente de rede eléctrica. A bateria recarregável embutida permite que as principais operações possam ser utilizadas independentes de 10 a 15 dias. Usando o princípio comprovado da câmara de ionização de pulso (espectroscopia alfa), ele impressiona por sua alta eficiência de detecção de Radônio, resposta rápida aos gradientes de concentração, bem como sua operação de longo prazo sem necessidade de manutenção.

No modo de operação padrão de medição do gás, o processo é feito por difusão através de um filtro de fibra de vidro de superfície grande para a câmara de ionização. Ou seja, através do filtro de fibra de vidro apenas o gás Rn-222 pode passar, enquanto os seus descendentes são impedidos de entrar na câmara de ionização. Ao mesmo tempo, o filtro protege o interior da câmara de contaminação por partículas de poeira.

Figura 2 - Parte da área escolhida (A) e estrutura montada (B) para a coleta de dados em no período seco em Parnamirim-RN.

Medições de aglomerados iônicos

As medições de aglomerados iônicos na Atmosfera baixa foram realizadas no interior dos biomas a serem estudados, a cerca de 1,5 m da superfície do solo. Para tal foram usados contadores de íon de ar modelo AlphaLab. Este instrumento opera na faixa de de medição entre 10 a 10^6 íons/cm³. A concentração de carga mínima detectável de 10 íons/cm³ e tempo de resposta de 2s, com uma taxa de amostragem de volume de 0,8 por segundo. Uma desvantagem do instrumento é que ele só tem a capacidade de monitorar íons positivos e negativos separadamente, mas não simultaneamente. Consequentemente usaram-se dois instrumentos, um para medir os os íons positivos e outro par aos negativos. Cada par de medidores de íons funcionaram

interconectados a um computador portátil, que registraram os dados em tempo real em intervalos de 1 s. Como citado por (Jayaratne *et al.*, 2011).

Medidas das variáveis meteorológicas

Os dados do experimento em Parnamirim foram concentrados no período seco de 2013. As medições de Temperatura, Umidade, Velocidade do Vento, Ponto de Orvalho, Velocidade e Direção do Vento, Radiação Solar, Espectro UV foram realizadas através de uma estação meteorológicas portátil modelo VANTAGE PRO 2 (DAVIS INC). A transmissão sem fio da estação ao console é de 300 m e a fonte de energia é através de um painel solar.

Análise estatística: Análise de Componente principal e regressão linear múltipla

Com o propósito de avaliar a possível correlação entre as concentrações de Rn-222 e as variáveis meteorológicas utilizamos o modelo de Regressão Linear Múltipla. Antes de aplicar o modelo de regressão a análise de componentes principais (ACP) foi utilizada para transformar o grupo de variáveis correlacionadas aqui apresentado em variáveis independentes, denominadas componentes principal. Na ACP, combinações lineares das variáveis são formadas. A primeira componente principal é a combinação que explica a maior contribuição para a variância na amostra. A segunda componente principal explica a segunda maior contribuição para a variância, sem estar correlacionada com a primeira. Sucessivas componentes explicam porções progressivamente menores da variância da amostra total, sem apresentar correlação com as componentes anteriores (Hair Jr *et al.*, 2005).

A análise de regressão é uma importante técnica estatística, que tem sido utilizada em aplicações de diversas áreas e é adequada quando se deseja estudar o comportamento de uma variável resposta em relação a outras (explicativas) que são responsáveis pela sua variabilidade (Azevedo, 1997). Sua base estatística vem da regressão linear simples, que se restringe a duas variáveis e a apenas uma equação funcional do primeiro grau ($Y = a + bX$). A análise de regressão linear múltipla é uma metodologia estatística de previsão de valores de uma ou mais variáveis de resposta (Dependentes) através de um conjunto de variáveis explicativas (Independentes).

Esta metodologia pode ser utilizada também para a avaliação dos efeitos das variáveis explicativas como previsoras das variáveis de resposta; isto é, serve para contribuir na obtenção de respostas a perguntas do tipo “Qual é o melhor estimador para ...?”. Sua aplicação é especialmente importante, pois permite que se estime o valor de uma variável com base num conjunto de outras variáveis. Quanto mais significativo for o peso de uma variável isolada, ou de um conjunto de variáveis explicativas, tanto mais se poderá afirmar que alguns fatores afetam mais o comportamento de uma variável de

resposta especificamente procurada, do que outros (Johnson, 1992).

Segundo Wilks (2006) a definição matemática do modelo de regressão múltipla incide de uma função linear:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (\text{Eq. 01})$$

Em que Y é a variável dependente; β_0 corresponde a um coeficiente técnico fixo, a um valor de base a partir do qual começa Y ;

β_k corresponde aos coeficientes técnicos atrelados às Variáveis Independentes;

X_k as Variáveis Independentes e ε é o erro aleatório.

Para o caso aqui apresentado, teremos que: $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}$ são os dados horários das concentrações de Rn-222; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ são parâmetros ou coeficientes da regressão (variáveis meteorológicas); ε são os erros aleatórios.

Assim como na regressão linear simples, as suposições do modelo descritas precisam ser aferidas para que os resultados obtidos realmente sejam válidos. Para esse fim, é realizada a análise dos resíduos em que é validado um conjunto de técnicas para investigar a adequabilidade do modelo. Além disso, quando estamos lidando com mais de uma variável preditora, precisamos diagnosticar se há colinearidade ou multicolinearidade entre elas.

Para um modelo de regressão linear múltiplo alguns pressupostos devem ser satisfeitos:

- ✓ A média dos erros deve ser zero ($E[\varepsilon_i] = 0$);
- ✓ Os erros devem apresentar independência ($\text{Var}[\varepsilon_i] = \sigma^2, i=1, \dots, n$);
- ✓ Os erros devem apresentar uma distribuição normal padrão ($\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2), i=1, \dots, n$).

O Software estatístico R foi usado em todo o processo citado acima (R Core Team, 2014) assim como nas funções sequenciais para a verificação da qualidade do ajuste do modelo onde foi usado o critério de inclusão ou exclusão de uma variável independente em cada passo baseado no Critério de Informação de Akaike (AIC), que é um método de avaliação geral da qualidade do ajuste de

modelos. Assim, para uma regressão linear múltipla baseada em k variáveis preditoras, o AIC é definido por:

$$AIC = n \ln\left(\frac{SQRE_k}{n}\right) + 2(k + 1) \quad (02)$$

Em que n é número de observações; SQRE é a soma dos quadrados dos resíduos.

Resultados e discussão

Estatística descritiva dos dados

A priori realizou-se uma análise descritiva das medidas meteorológicas e do Rn-222, apresentadas na Tabela 01. A temperatura máxima e mínima no período de estudo foi de 33,4°C e 23,2°C respectivamente. A variabilidade da temperatura média é coerente com a incidência de radiação solar. Nos dias com maior radiação solar incidente (~360 W/m²) a temperatura média diária chega a ultrapassar 35,0°C. Os valores máximos e mínimos de umidade relativa registrados foram de 89,5% e 52,5%.

L.

Tabela 1 – Estatística descritiva para o Rn-222 e variáveis meteorológicas, na Mata Atlântica Dunar em Parnamirim-RN, no período estudado.

Variáveis	Máximo	Mínimo	Média	D.Padrão
Temp.Ar (°C)	33,40	23,20	27,62	2,22
U. Relativa (%)	89,51	52,50	78,03	7,68
V.Vento (m/s ²)	2,50	0	0,70	0,52
Radiação Solar (W/m ²)	1055	0,5	319	360
Rn-222 (Bq/m ²)	13,65	0,52	5,15	2,14

Para uma melhor visualização as variáveis medidas do período foram agrupadas, assim se pode perceber que a variabilidade da umidade relativa, velocidade e direção do vento foram fatores preponderantes para a dispersão e acúmulo do Rn-222 na atmosfera local. Percebemos através das Figuras 03D que, a velocidade do vento apresenta um comportamento inverso na maioria do tempo em relação à concentração de Rn-222. Com um pico acentuado do Rn-222 por volta das 05:00 HL, quando podemos concluir que a turbulência gerada pelo cisalhamento do vento impõe uma maior exalação do gás para a camada próxima à superfície. No que se refere ao aumento ou diminuição na concentração de Rn-222 na região de estudo foi evidenciado uma variação distinta entre os períodos diurno e noturno. No período de maior disponibilidade de energia solar (12:00 HL às 16:00 HL) a maior quantidade de radiação incidente observada em Parnamirim foi de 1055 W/m² às 12:00 HL do dia 16 implicando em uma maior insolação, maior temperatura e menor umidade relativa, favorecendo concentrações mais elevadas do Rn-222 como podemos verificar nas Figuras 03a, 03b e 03c.

Comportamento diário

Observa-se no comportamento diário da velocidade do vento um aumento em sincronia com o aquecimento diurno, que também controla o comportamento da temperatura. Assim, observando o comportamento diário da temperatura e da velocidade do vento, percebe-se que quando ocorre aumento na temperatura por volta das 11:00 HL ocorrem as maiores velocidades do vento. Este comportamento foi similar em todo período estudado.

As maiores velocidades registradas foram no horário entre 09:00 HL e 14:00 HL. Os maiores picos de velocidade do vento ocorrem no período da manhã (2 m/s²) e início da tarde (2,5 m/s²), o que pode ter como causa as mudanças de temperatura, uma vez que durante a madrugada devido à ausência de radiação solar a temperatura tende a ter pouca variação. No entanto, durante a manhã com uma maior incidência solar este equilíbrio é quebrado, favorecendo ao aumento de turbulência na atmosfera e ao aumento da velocidade do vento e como consequência temos menores valores de concentração tanto de íons atmosféricos como de Rn-222 (Figura 04).

Figura 3 - Distribuição das variáveis meteorológicas durante o período seco, em Parnamirim-RN. a) Temperatura do ar (°C), b) Umidade relativa (%), c) Radiação solar global (W/m²) e d) Velocidade do vento (m/s).

Figura 4 - Comportamento diário da velocidade do vento (m/s), temperatura do ar e umidade relativa (%) em Parnamirim-RN.

Figura 5 – Comportamento diário de Rn-222 e íons atmosféricos observado na mata atlântica Dunar, durante o período seco em Parnamirim-RN.

As medições das concentrações de íons atmosféricos em Parnamirim - RN, mostraram um comportamento diário semelhante ao do Rn-222, com um máximo nas primeiras horas da manhã 1,12 íons/cm³ positivo e 1,23 íons/cm³ negativo, observado durante as primeiras horas do dia, seguido por um máximo secundário durante a noite por volta das 20:00 HL, Figura 05. Valores máximos as 06:00 HL e mínimo próximo as 17:00 HL 0,78 íons/cm³ e 0,88 íons/cm³ positivo e negativos respectivamente, está de acordo com outros estudos sobre a variação diurna de íons, como observado por (Hirsikko, *et al* 2007; Retalis, *et al* 2009; Kolarz, *et al* 2009). Outro estudo em

uma floresta boreal mostrou que a taxa de produção de íons, estimada a partir da concentração de Rn-222 e radiação externa, foi mínima próximo ao meio dia e depois aumentaram durante tarde. Estes últimos autores sugeriram que concentrações de aglomerados de íons excepcionalmente altas foram devido a uma forte exalação de Radônio vindo dos solos em torno da floresta, mas não puderam confirmar categoricamente esta causa, devida a pouca informação sobre as concentrações de Radônio na atmosfera florestal (Jayaratne *et al*, 2011).

Análise de regressão linear múltipla

Para os dados do período seco em Parnamirim, a variação da variável dependente Rn-222 teve uma explicação de 88% pelas variáveis incluídas no modelo estatístico usado (Tabela 2). As variáveis que apresentaram maiores contribuições foram a umidade relativa e a radiação global, com correlação positiva. Após o ajuste feito somente com as variáveis significativas a velocidade do vento, não mostrou correlação direta com a concentração de Rn-222, acreditando ser pelo fato de variabilidade ser muito pequena (em média $1,5 \text{ ms}^{-2}$), considerado como calmo na maioria do período. Entretanto, pela análise subjetiva visual do comportamento do vento no comportamento diário observamos uma relação entre as duas variáveis.

$$Y = -0.292780 \cdot \text{Temp_Seco_P} + 0.1610011 \cdot \text{UR_Seco_P} + 0.004227 \cdot \text{Rg_Seco_P} + \varepsilon$$

Rg_Seco_P + ε

todas as variáveis introduzidas no modelo, a umidade relativa e a radiação global, foram as variáveis mais importantes e com relação positiva, juntamente com a temperatura mas com relação negativa indicando que quanto mais elevada for, menores serão as concentrações de Rn-222. A

Tabela 2 - Análise de regressão múltipla para as concentrações de Rn-222, observadas na mata atlântica, no período seco em Parnamirim-RN.

Variáveis	Coef. Estimados	Std. Erro	P-valor
Temp_Seco_P	-0.292780	0.078026	0.000281 ***
UR_Seco_P	0.161001	0.025404	5.27e-09 ***
Rg_Seco_P	0.004227	0.001045	9.81e-05 ***

* Nível de Significância: 5%

Através da Tabela 02 percebemos que o modelo aplicado foi útil para encontrar as relações entre o Rn-222 e as variáveis meteorológicas pois

No Figura 06, observamos as probabilidades esperadas, onde o valor da função de distribuição para cada resíduo são representados no eixo das ordenadas e no eixo das abscissas representam-se os resíduos padronizados, a análise de resíduos nos dá evidência de que a distribuição dos erros é normal. Dessa forma,

A temperatura do ar, a umidade relativa e a radiação global Figura 09, foram as variáveis mais importantes e com relação positiva, já a temperatura com relação negativa indicou que quanto mais elevada for, menores serão as concentrações de Rn-222. A radiação solar também contribuiu com relação positiva, indicando que períodos com menos radiação levam a maiores concentrações de Rn-222. Entre a variável dependente Rn-222 e as concentrações de íons não foi possível introduzir os dados no modelo, pois os dados não tinham o mesmo comprimento para o período em questão.

com relação positiva, indicando que períodos com menos radiação levam a maiores concentrações de Rn-222. Entre a variável dependente Rn-222 e as concentrações de íons não foi possível introduzir os dados no modelo, pois os dados não tinham o mesmo comprimento para o período em questão.

o valor-p do teste F foi menor que 0,05, deixando evidente a relação entre as mesmas.

estes modelos podem ser melhorados, existindo a probabilidade de que outros fatores possam estar influenciando estas concentrações de Rn-222, que não foram o foco deste estudo, principalmente, as quantidades de Rn-222 e íons atmosféricos emitidos durante a evapotranspiração das plantas ou a partir do solo.

Figura 8 - Análise residual verso os valores ajustados (a) das concentrações de Rn-222 com as variáveis meteorológicas e gráfico da normal (b) evidenciando que os resíduos são normais para o período seco em Parnamirim-RN

Conclusões

O conjunto de dados aqui apresentado fornece uma confirmação das novas percepções sobre o comportamento Rn-222 no bioma de Mata Atlântica Dunar, mostrando que os aspectos geológicos e meteorológicos têm uma forte influência sobre o comportamento da concentração de Rn-222 na camada de ar próximo da superfície. A influência dominante de características ambientais durante o dia pôde ser observada, com concentrações mais elevadas no início da manhã e menores concentrações perto de meio-dia, com uma correlação inversa com a temperatura do ar.

Dentre as variáveis meteorológicas que se mostraram mais correlacionadas com a concentração de Rn-222, destacaram-se a temperatura do ar, umidade relativa e a radiação solar global. Os íons atmosféricos se mostraram coerente com outros estudos, mostrando tendência semelhante as concentrações de Rn-222 havendo somente uma defasagem entre ambos que é observada claramente no comportamento diário.

Em relação aos resultados a partir do modelo de regressão, podemos inferir que, embora as regressões de algumas variáveis possam apresentar baixo poder explicativo, elas foram suficientes para verificar o objetivo central da pesquisa que era o de encontrar relação entre as concentrações de Rn-222 com as variáveis meteorológicas.

Agradecimentos

À CAPES pela concessão da bolsa e ao Projeto de Apoio ao Desenvolvimento de Recursos Humanos em Clima e Eventos Extremos provocados pelas mudanças climáticas globais. Cooperação Técnica entre o MCTI e o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) e a

Dra. Neusa Paes Leme, coordenadora do laboratório Lavat no INPE-CRN pela colaboração nas campanhas de campo.

Referências

- Chandrashekar, M. S.; Sannappa, J.; Paramesh, L. 2006, Studies on atmospheric electrical conductivity related to radon and its progeny concentrations in the lower atmosphere at Mysore. *Atmos. Environ.* 40, 87–95.
- Corrêa, J. N. 2006. Avaliação da concentração de Radônio em ambientes de convívio humano na região metropolitana de Curitiba. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. Curitiba.
- Elsom, D., 1989: Atmospheric pollution: Causes, effects and control policies, Basil Blackwell Ltd, Oxford, United Kingdom.
- Faure, G, 1991: Principles and Application of Inorganic Geochemistry, New York, MacMillan Publishing Cia., pp. 626.
- Griffiths, A. D.; Zahorowski, W.; Element, A. 2010. Werczynski, S. A map of radon flux at the Australian land surface. *Atmos. Chem. Phys. Discuss* 10, 14,313–14,346.
- Hair Junior, J. F.; Anderson, R. E.; Tatham, R. L.; Black, W. C. 2005. Análise multivariada de dados. Tradução de Adonai Schlup Sant'Anna e Anselmo Chaves Neto, 5. ed. Porto Alegre: Bookman, pp. 593.
- Hirsikko, A.; Juuti, T. Y.; Nieminen, T.; Vartiainen, E.; Laakso, L.; 2007. Hussein, T.; Kulmala, M. Indoor and outdoor air ions and aerosol particles in the urban atmosphere of Helsinki: characteristics, sources and formation. *Boreal Environ. Res.* 12, 295–310.

- Hirsikko, A.; Laakso, L.; Horrack, U.; Aalto, P.; Kerminen, V.; Kulmala, M. 2005. Annual and size dependent variation of growth rates and ion concentrations in boreal forest. *Boreal Environ. Res.* 10, 357–369.
- Holton, J. R. An Introduction to Dynamic Meteorology. 1992. San Diego, Academic Press, 3a ed., pp.186.
- ICRP - International Commission on Radiological Protection. 1993. ICRP 65 – Protection Against Radon-222 at Home and at Work. Oxford: Pergamon Press 23, 2.
- Jayarathne E.R., Ling X., and Morawska L. 2011. Role of Vegetation in Enhancing Radon Concentration and Ion Production in the Atmosphere. *Environ. Science Technology*, 45, 6350–6355.
- Johnson, R.A. & Wichern, D.W. 1992. Applied Multivariate Statistical Analysis (Third Edition), New Jersey : Prentice Hall.
- Kolarz, P. M.; Filipovic, D. M.; Marinkovic, B. P. 2009. Daily variations of indoor air-ion and radon concentrations. *Appl. Radiat. Isot.* 67, 2062–2067.
- Kraner H.W.; J.A. Adams. 1964. Measurements of the effects of atmospheric variables on Rn-222 flux and soil-gas concentration (Ed.), *The Natural Radiation Environment*, University of Chicago Press, Chicago, pp. 191–215.
- Ling, X.; Jayarathne, E. R.; Morawska, L. 2010. Air ion concentrations in various urban outdoor environments. *Atmos. Environ* 44, 2186–2193.
- Martens, C.S., Shay, T.J., Mendlovitz, H.P., Matross, D.M., Saleska, S.R., Wofsy, S.C., Woodward, W.S., Menton, M.C., De Moura, J.M.S., Crill, P.M., De Moraes, O.L.L., Lima, R.L. 2004. Radon fluxes in tropical forest ecosystems of Brazilian Amazonia: nighttime CO₂ net ecosystem exchange derived from radon and eddy covariance methods. *Global Change Biol.* 10 (5), 618–629.
- Oke, T. R. 1992. *Boundary Layer Climates*. 2d ed. University Press, Cambridge, pp. 435.
- Pinto Junior, O. e Pinto, I. R. C. de A. 2000. *Tempestades e Relâmpagos no Brasil*. Belo Horizonte: [s.e.], pp.193.
- Retalis, A.; Nastos, P.; Retalis, D. 2009. Study of small ions concentration in the air above Athens, Greece. *Atmos. Res.* 2009, 91, 219–228. (35) Kolarz, P. M.; Filipovic, D. M.; Marinkovic, B. P. Daily variations of indoor air-ion and radon concentrations. *Appl. Radiat. Isot.*, 67, 2062–2067.
- Sas, D.; Sladek, P.; Navratil, O. 2006. Radon and air ion balance. *Czech. J. Phys.*, 56, 141–148.
- Stull, R. B. 1991. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers,
- Szegvary, T.; Leuenberger, M. C.; Conen, F. 2007. Predicting terrestrial Rn-222 flux using gamma dose rate as a proxy. *Atmos Chem Phys* 7, 2789–2795.
- Suni, T.; Kulmala, M.; Hirsikko, A.; Bergman, T.; Laakso, L.; Aalto, P. P.; Leuning, R.; Horrack, U.; Mirme, S.; Mirme, A.; Twining, J.; Tardos, C.; Cleugh, H.; Zegelin, S.; Hughes, D.; Gorsel, E.; van, Kitchen, M.; Vana, M. 2008. Formation and characteristics of ions and charged aerosol particles in a native Australian Eucalypt forest. *Atmos. Chem. Phys* 8, 129–139.
- Tammet, H.; Horrack, U.; Laakso, L.; Kulmala, M. 2006. Factors of air ion balance in a coniferous forest according to measurements in Hyytiälä, Finland. *Atmos. Chem. Phys* 6, 3377–3390.
- Taylor D. M, Taylor S. K. *Urânio ambiental e da saúde humana*. *Rev Environ Saúde* 1997 Julho-setembro 12 (3), 147-157.
- Vana, M.; Tamm, E.; Horrack, U.; Mirme, A.; Tammet, H.; Laakso, L.; Aalto, P. P.; Kulmala, M. 2006. Charging state of atmospheric nanoparticles during the nucleation burst events. *Atmos. Environ* 40, 536–546.
- Vartiainen, E.; Kulmala, M.; Ehn, M.; Hirsikko, A.; Junninen, H.; Petaja, T.; Sogacheva, L.; Kuokka, S.; Hilamo, R.; Skorokhod, A.; Belikov, I.; Elansky, N.; Kerminen, V. 2007. Ion and particle number concentrations and size distributions along the Trans-Siberian railroad. *Boreal Environ. Res* 12, 375–396.
- Zhuo, W.; Guo, Q.; Chen, B.; Cheng, G. 2008. Estimating the amount and distribution of radon flux density from the soil surface in China. *J. Environ. Radioact* 99, 1143–1148.