



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS GEOGRÁFICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

**DEYVSON NATANAEL DOS SANTOS LIMA**

**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS ARENOSOS SOB CULTIVO DE  
CANA-DE-AÇÚCAR NOS TABULEIROS COSTEIROS**

Recife

2021

DEYVSON NATANAEL DOS SANTOS LIMA

**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS ARENOSOS SOB CULTIVO DE  
CANA-DE-AÇÚCAR NOS TABULEIROS COSTEIROS**

Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós- Graduação em Geografia-PPGEO- UFPE como parte dos requisitos para titulação de Mestre em Geografia.

**Área de concentração:** Regionalização e Análise Regional

**Orientadora:** Profa. Dra. Eugênia Cristina Gonçalves Pereira

**Coorientadora:** Dra. Andrezza Karla de Oliveira Silva

Recife

2021

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Maria do Carmo de Paiva, CRB4-1291

L732c Lima, Deyvson Natanael dos Santos.

Caracterização química de solos arenosos sob cultivo de cana-de-açúcar nos Tabuleiros Costeiros / Deyvson Natanael dos Santos Lima. – 2021.  
80 f. : il. ; 30 cm.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Eugênia Cristina Gonçalves Pereira.

Coorientadora: Dr<sup>a</sup>. Andrezza Karla de Oliveira Silva.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, CFCH.  
Programa de Pós-Graduação em Geografia, Recife, 2021.

Inclui referências.

1. Geografia. 2. Tabuleiros costeiros. 3. Solos – Manejo. 4. Solos arenosos. I. Pereira, Eugênia Cristina Gonçalves (Orientadora). II. Silva, Andrezza Karla de Oliveira (Coorientadora). III. Título.

910 CDD (22. ed.)

(BCFCH2021-214)

DEYVSON NATANAEL DOS SANTOS LIMA

**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS ARENOSOS SOB CULTIVO DE  
CANA-DE-AÇÚCAR NOS TABULEIROS COSTEIROS**

Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós- Graduação em Geografia-PPGEO- UFPE aprovado na data de 24 de fevereiro de 2021 como parte do requisito para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Dissertação em:

**BANCA EXAMINADORA**

---

Profa. Dra. Eugênia Cristina Goncalves Pereira (Orientadora)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Dra. Andrezza Karla de Oliveira Silva (Coorientadora)  
Pós-doutoranda da Universidade Federal de Pernambuco

---

Dra. Mônica Cristina Barroso Martins  
Pós-doutoranda da Universidade Federal de Pernambuco

---

Dr. Rodrigo Santana Macedo  
Instituto Nacional do Semiárido - INSA

*A minha menininha e aos meus pais pelo apoio;  
Aos meus colegas e amigos, em especial a  
Andrezza Karla e a professora Eugênia Pereira.*

DEDICO

## AGRADECIMENTOS

A minha menininha que é minha filha Maria Valentina, que foi e é o meu maior tesouro e o que sempre venho lutando e é a minha força de hoje e sempre para crescer em tentos momento difíceis, além dela as minhas sobrinhas e toda a minha família.

A minha orientadora professora Dra. Eugênia Cristina Gonçalves Pereira, pela oportunidade de trabalhar no grupo de pesquisa e pela imensa compreensão em todos os momentos.

A minha coorientadora Dra. Andrezza Karla de Oliveira Silva, pela amizade, paciência e confiança e tudo que sou hoje devo em especial a minha amiga antes de tudo.

Ao professor Dr. Nicácio Henrique Silva por disponibilizar as instalações do Laboratório de Produtos Naturais.

Ao professor Dr. Elvis Joacir de França, pela disponibilizar as instalações e equipamentos analíticos para melhor observação dos problemas a frente realizados do entro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste, CRCN-NE.

Aos Departamentos de Ciências Geográficas e de Bioquímica por permitirem a utilização dos Laboratórios para a execução dos experimentos.

Aos professores do departamento de Ciências Geográficas.

Ao Núcleo de Estudo do Meio Ambiente – NEMA e ao Laboratório de Geografia Ambiental - LAGEAM, aos e integrantes que deram apoio ao desenvolvimento deste trabalho. Aos meus colegas de classe e aos meus amigos, Bruno Fonseca da Silva, Juliane Sales, Kécia Santana, Margarida Ferreira, Iwelton Madson e aos demais integrantes NEMA e do Laboratório de Produtos Naturais.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela bolsa de mestrado.

Muito obrigado a todos que ajudaram em todas as etapas deste trabalho.

“A maior glória em viver não está em jamais cair, mas em nos levantar cada vez que caímos.”

Nelson Mandela

## RESUMO

A intensificação e expansão dos espaços agrícolas vêm comprometendo os ecossistemas naturais, principalmente pelo cultivo da cana-de-açúcar em solos de baixa fertilidade química natural e elevada suscetibilidade à degradação. A utilização de fertilizantes fosfatados, enriquecidos em elementos químicos tóxicos e radionuclídeos, pode acarretar impactos significativos à biodiversidade. Nesse contexto, teve como objetivo monitorar os teores elementares de elementos maiores e trações de solos arenosos cultivados com cana-de-açúcar nos Tabuleiros Costeiros dos estados de Pernambuco e Paraíba. Amostras de solos foram coletadas em seis áreas (Ponto 1 - Itapissuma/PE; Ponto 2 - Goiana/PE; Ponto 3 - Goiana/PE; Ponto 4 - Pedras de Fogo/PB; Ponto 5 - Santa Rita/PB; Ponto 6 - Mamanguape/PB e uma considerada controle sob de vegetação nativa (Ponto 7 - Mamanguape/PB). Foram realizadas as análises químicas: pH, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Al<sup>3+</sup>, H<sup>+</sup>, P e MOS. Em adição realizaram-se análises de fluorescência de raios-X por dispersão de energia (EDXRF) para quantificar os teores elementares de Mn, Fe, Cu, Ti, Mg, Si e V e por espectrometria gama de alta resolução (EGAR) dos radionuclídeos das séries de meia-vida do tório-232 (228Th e 228Ra) e do urânio-238 (226Ra). Constatou-se que houve aumento de pH, P, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> e MOS, especificamente nos pontos onde as práticas agrícolas são mais intensivas (P1, P3, P5, P6). Os dados de EDXRF revelaram maiores teores de Mn, Fe e Ti, notadamente na área com agricultura intensiva e fertirrigação. Ratificou-se a existência de radioatividade natural de 228Th, 228Ra e 226Ra devido a formação geológica das áreas, que tem sido intensificada pelo uso de fertilizantes e/ou fertirrigação. Constata-se assim, que o local com fertirrigação constitui na área de maior impacto ambiental e ecológico.

**Palavras-chave:** Solos arenosos, tabuleiros costeiros, cana-de-açúcar.

## ABSTRACT

The intensification and expansion of agricultural spaces have been compromising natural ecosystems, mainly due to the cultivation of sugarcane in soils with low natural chemical fertility and high susceptibility to degradation. The use of phosphate fertilizers, enriched with toxic chemical elements and radionuclides, can have significant impacts on biodiversity. In this context, it aimed to monitor the elemental contents of larger elements and traction of sandy soils cultivated with sugar cane in the Coastal Tablelands of the states of Pernambuco and Paraíba. Soil samples were collected in six areas (Point 1 - Itapissuma / PE; Point 2 - Goiana / PE; Point 3 - Goiana / PE; Point 4 - Pedras de Fogo / PB; Point 5 - Santa Rita / PB; Point 6 - Mamanguape / PB and one considered under native vegetation (Point 7 - Mamanguape / PB). Chemical analyzes were carried out: pH, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Al<sup>3+</sup>, H<sup>+</sup>, P and MOS. In addition, analysis of X-ray fluorescence by energy dispersion (EDXRF) were carried out to quantify the elemental terraces of Mn, Fe, Cu, Ti, Mg, Si and V and by high resolution gamma spectrometry (EGAR) of the radionuclides from the thorium-232 (<sup>228</sup>Th and <sup>228</sup>Ra) and uranium-238 (<sup>226</sup>Ra) half-life series. It was observed an increase of pH, P, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> and MOS, specifically in points with more intensive agricultural practices (P1, P3, P5, P6). Data from EDXRF showed highest content of Mn, Fe and Ti, emphasizing areas of intensive agriculture and ferti-irrigation. The existence of natural radioactivity by <sup>228</sup>Th, <sup>228</sup>Ra and <sup>226</sup>Ra due to geological constitution of the areas, was constated, what has been intensified by fertilizers and/or ferti-irrigation. This way, it was verified that points with ferti-irrigation practices causes highest environmental and ecological impacts.

**Keywords:** Sandy soils, contaminated soils, coastal trays, sugar cane.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Produção de cana de açúcar nas regiões brasileiras no mês de abril, entre os anos de 2007 a 2020.....	18
Figura 2 -	Mapa com identificação dos pontos de coleta dos solos arenosos em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa em Tabuleiros Costeiros dos estados da Paraíba e Pernambuco.....	27
Figura 3 -	Detector Espectral Gama de Alta Resolução utilizado para quantificação de radionuclídeos em amostras de solos arenosos coletados em área de Tabuleiro Costeiro nos estados de Pernambuco e Paraíba. Realizada no Centro Regional de Ciências Nucleares (CRCN), Recife, PE.....	28
Figura 4 -	Equipamento EDX-720 da Shimadzu utilizado para quantificação de elementos químicos em amostras de solos arenosos coletados em área de Tabuleiro Costeiro nos estados de Pernambuco e Paraíba. Realizado no Centro Regional de Ciências Nucleares (CRCN), Recife, PE.....	29
Figura 5 -	Forno mufla utilizado para queima da matéria orgânica em amostras de solos arenosos coletados em área de Tabuleiro Costeiro nos estados de Pernambuco e Paraíba. No Centro Regional de Ciências Nucleares (CRCN), Recife, PE.....	30
Quadro 1 -	Caracterização dos pontos de coleta de solos arenosos em Tabuleiro Costeiro nos estados de Pernambuco e Paraíba, em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa.....	32
Figura 6 -	Mapa de distribuição dos pontos de coleta de solos arenosos em Tabuleiro Costeiro nos estados de Pernambuco e Paraíba, em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa.....	33
Figura 7 -	Mapa de símbolos pontuais proporcionais dos elementos químicos fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg), hidrogênio (H), quantificados de amostras de solos arenosos coletados em área de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa nos estados de Pernambuco e Paraíba.....	38

Figura 8 -	Mapa de símbolos pontuais proporcionais dos valores da capacidade de troca catiônica (CTC), matéria orgânica (MO), hidrogênio (H), potencial hidrogeniômico (pH), quantificados de amostras de solos arenosos coletados em área de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa nos estados de Pernambuco e Paraíba.....	39
Figura 9 -	Matriz de correlação <i>heatmaps</i> dos elementos químicos quantificados de amostras de solos arenosos coletados em área de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa nos estados de Pernambuco e Paraíba.....	41
Figura 10 -	Mapa fatorial da contribuição dos elementos químicos quantificados em amostras de solos arenosos em Tabuleiro Costeiro nos estados de Pernambuco e Paraíba em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa.....	41
Figura 11 -	Dendrograma do agrupamento dos pontos amostrais de solos arenosos em Tabuleiro Costeiro nos estados de Pernambuco e Paraíba em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa para elementos químicos.....	42
Figura 12 -	Matriz de correlação dos pontos amostrais de solos arenosos em Tabuleiro Costeiro nos estados de Pernambuco e Paraíba em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa.....	43
Figura 13 -	Mapa de símbolos pontuais proporcionais dos valores de manganês (Mn), ferro (Fe), cobre (Cu), titânio (Ti), quantificados por fluorescência de raios-X em amostras de solos arenosos coletados em área de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa nos estados de Pernambuco e Paraíba.....	45
Figura 14 -	Mapa de símbolos pontuais proporcionais dos valores de magnésio (Mg), silício (Si), vanádio (V), quantificados por fluorescência de raios-X em amostras de solos arenosos coletados em área de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa nos estados de Pernambuco e Paraíba.....	46

Figura 15 -	Matriz de correlação <i>heatmaps</i> dos elementos químicos quantificados por fluorescência de raios-X em amostras de solos arenosos coletados em área de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa nos estados de Pernambuco e Paraíba.....	49
Figura 16 -	Mapa fatorial da contribuição dos elementos químicos quantificados por fluorescência de raios-X em amostras de solos arenosos coletados em área de cultivo de cana-de-açúcar e/ou vegetação nativa nos estados de Pernambuco e Paraíba.....	49
Figura 17 -	Dendrograma do agrupamento para os pontos amostrais dos elementos químicos quantificados por fluorescência de raios-X de solos arenosos coletados em área de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa nos estados de Pernambuco e Paraíba.....	51
Figura 18 -	Mapa de símbolos pontuais proporcionais dos valores dos radionuclídeos tório (Th-228) e rádio (Ra-228 e Ra-226), quantificados em amostras de solos arenosos coletados em área de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa nos estados de Pernambuco e Paraíba.....	53
Figura 19 -	Mapa fatorial da contribuição dos radionuclídeos tório (Th-228) e rádio (Ra-228 e Ra-226), quantificados em amostras de solos arenosos coletados em área de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa nos estados de Pernambuco e Paraíba.....	55
Figura 20 -	Matriz de correlação dos radionuclídeos tório (Th-228) e rádio (Ra-228 e Ra-226), quantificados em amostras de solos arenosos coletados em área de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa nos estados de Pernambuco e Paraíba.....	55
Figura 21 -	Dendrograma do agrupamento dos pontos amostrais de solos arenosos em tabuleiro costeiro nos estados de Pernambuco e Paraíba em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa para os radionuclídeos tório (Th-228) e rádio (Ra-228 e Ra-226).....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise dos elementos químicos de solos arenosos de Tabuleiro Costeiro nos estados de Pernambuco e Paraíba, coletados em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa.....	36
--	----

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>14</b>
2.1	FLORESTA ATLÂNTICA.....	14
2.2	A CANA-DE-AÇÚCAR.....	16
2.3	SOLOS ARENOSOS E RADIOATIVIDADE.....	19
2.4	FERTILIZANTES QUÍMICOS.....	23
2.5	IMPACTOS DA UTILIZAÇÃO DE FERTILIZANTES QUÍMICOS APLICADOS NO CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM SOLOS ARENOSOS.....	23
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>26</b>
3.1	MAPEAMENTO DE SOLOS ARENOSOS EM ÁREA DE TABULEIRO COSTEIRO COM CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR NOS ESTADOS DE PERNAMBUCO E PARAÍBA.....	26
3.2	QUANTIFICAÇÃO DE RADIONUCLÍDEOS POR ESPECTROMETRIA GAMA DE ALTA RESOLUÇÃO – EGAR.....	27
3.3	ANÁLISE DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X POR DISPERSÃO DE ENERGIA (EDXRF).....	28
3.4	MATÉRIA ORGÂNICA DAS AMOSTRAS DE SOLO.....	29
3.5	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO SOLO.....	30
3.6	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	31
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>31</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>58</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>59</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A Floresta Atlântica é considerada um *hotspot* de biodiversidade, pois é habitat de diversas espécies endêmicas. A dinâmica desta floresta depende de diversos fatores como relevo, distribuição de chuvas e tipos de solo, sendo considerada uma das mais ameaçadas do Brasil, pois a sua distribuição geográfica é, em sua maior parte, na faixa litorânea brasileira (RIZZINI, 1997). No Nordeste brasileiro esse bioma tem sofrido diversos impactos relacionados às atividades antrópicas ao longo dos anos, por meio da expansão das cidades e da agroindústria, principalmente da monocultura da cana-de-açúcar (TABARELLI et. al. 2012).

A intensificação da atividade canavieira em relevo ondulados, também conhecidos como Mares de Morros, e várzeas tende a acarretar processos erosivos, principalmente pela introdução de sistema de manejo mecanizado. Essas áreas apresentam faixas de solos argilosos e arenosos, formando ambientes suscetíveis à degradação devido a exploração excessiva, que ocasiona perda de fertilidade e acidificação dos solos (EMBRAPA, 2015).

Em contraponto às áreas de relevo movimentado, os Tabuleiros Costeiros são propícios para o manejo mecanizado, dada sua geomorfologia plana com solos argilosos e/ou arenosos de origem sedimentar (MARAFON e ENDRES, 2011). Nos estados de Pernambuco e Paraíba essas áreas são intensamente exploradas para o cultivo da cana-de-açúcar, sobre solos arenosos, tais como os Neossolos Quartzarênicos e Espodossolos Ferrihumilúvicos, e Argissolos Vermelho-Amarelo (EMBRAPA, 2015). As manchas de cerrado existentes nos Tabuleiros Costeiros abrigam espécies únicas em sua área core, divergindo das áreas canavieiras que a circunda. Esse fato releva sua especificidade e seu grau de suscetibilidade, quando se observa a existência de inúmeras fontes de degradação tais como: adubação nitrogenada e fosfatada, fertirrigação, mecanização e homogeneização de espécies (TABARELLI et. al. 2012).

O manejo inadequado, a disposição de rejeitos e o uso intensivo a partir da monocultura, promovem impactos negativos na fertilidade e produtividade do solo, na segurança alimentar, na concentração e disponibilidade de metais pesados e elementos tóxicos (KOPITKE et al., 2019). A deterioração e o esgotamento dos recursos contribuem para o declínio significativo da produção agrícola, devido a perda da qualidade do solo, diminuição da disponibilidade de nutrientes e decomposição da matéria orgânica, inviabilizando seu uso sustentável (OLIVEIRA FILHO et al., 2017). Esse fato demonstra a necessidade de monitoramento e conservação dos seus atributos físicos, químicos e biológicos, sendo um dos

parâmetros a avaliação do teor de carbono orgânico do solo e da matéria orgânica do solo (MOS) (CONCEIÇÃO et al., 1999), por favorecer a estabilidade dos agregados, fertilidade, aumento do potencial produtivo e redução de risco à erosão (BRONICK e LAL, 2005; LUCA et al., 2008).

Deste modo, tornam-se necessários estudos que busquem compreender os impactos ambientais das atividades antrópicas em cerrados edáficos de áreas dos Tabuleiros Costeiro, especificamente em solos arenosos, que apresentam maior grau de suscetibilidade aos processos erosivos. Assim, identificar as fontes de degradação, os efeitos da descaracterização dos solos em detrimento ao equilíbrio ecológico e o nível de contaminação por metais pesados e/ou radionuclídeos se reverte em um diagnóstico essencial para a manutenção desse ecossistema de característica singular. A presente pesquisa teve como objetivo monitorar os teores elementares de elementos maiores e trações de solos arenosos cultivados com cana-de-açúcar nos Tabuleiros Costeiros dos estados de Pernambuco e Paraíba. Como objetivos específicos, propôs-se: (i) quantificar os elementos químicos, matéria orgânica e radionuclídeos Ra-226, Ra-228 e Th-232 nas áreas selecionadas de solos degradados pelo cultivo da cana-de-açúcar em Tabuleiros Costeiros e na área de vegetação nativa (controle); (ii) mapear a distribuição dos elementos químicos e radionuclídeos nas áreas de estudo; (iii) analisar comparativamente a similaridade ou dissimilaridade entre as áreas, a partir de análises de agrupamentos (dendrograma), mapas *heatmaps* (correlogramas) e mapas fatoriais.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 FLORESTA ATLÂNTICA**

A Floresta Atlântica representa um conjunto de formações florestais, composta por diferentes configurações como os campos naturais, restingas, manguezais e vegetações diversas, formando um mosaico de biodiversidade (CAMPANILI e SCHAFFER, 2010). No Brasil, se estende pela costa do país ou em enclaves isolados, com aproximadamente 1.400.000 km<sup>2</sup>, sendo mais de 75% da sua área formada por florestas, podendo representar 8% da biodiversidade mundial, apresentando uma extrema diversificação de flora e fauna (GALINDO-LEAL et al., 2005). Entretanto, é um dos biomas brasileiros mais fragmentados, restando apenas 11 a 16 % de sua área original, dado os altos níveis de conversão em terras agrícolas (RIBEIRO et al., 2009).

É constituída por diferentes formações florestais e associação de ecossistemas, sendo classificados em: Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Aberta, Floresta Ombrófila Mista, Floresta Estacional Semidecidual, Floresta Estacional Decidual, Cerrados edáficos, Formações Pioneiras e Refúgio Vegetacional (CAMPANILI e SCHAFFER, 2010).

As configurações vegetacionais encontrada ao longo da Mata Atlântica, tem diversas características como a Floresta Ombrófila Densa caracterizada por estar presente em áreas de elevada umidade, apresentando uma rica diversidade epifítica com árvores de grande porte, atingindo 30 metros de altura e formação de estratos (MAGNAGO et al., 2007). A Floresta Ombrófila Aberta possui um maior espaçamento entre as árvores e menores estratos arbustivos (CAMPANILI e SCHAFFER, 2010). A Floresta Ombrófila Mista se destaca pela presença de *Araucaria angustifolia*, ocorrendo intercaladamente com áreas savânicas e campos (SONEGO et al., 2007). A Floresta Estacional Semidecidual possui influências das estações secas e chuvosas, fazendo com que ocorra um repouso fisiológico, tendo uma porcentagem considerável de árvores caducifólias (CAMPANILI e SCHAFFER, 2010). A Floresta Estacional Decidual, popularmente conhecida como Matas Secas, são constituídas por formações arbóreas ocorrentes em regiões com as estações chuvosas e secas bem definidas (GONÇALVES, 2015).

A conservação da Mata Atlântica é um assunto de grandes debates. No Brasil, a crescente expansão urbana e industrialização acarretaram um drástico desmatamento deste bioma, possuindo apenas 11% de sua cobertura florestal original, distribuídas em pequenos fragmentos (SOBRAL-SOUZA et al., 2018). Mesmo sendo um *hotspot* de biodiversidade, a implementação de áreas protegidas, aumento de áreas regeneradas e maior fiscalização ambiental a partir das leis ocasionaram um maior ganho líquido da biomassa vegetal da Mata Atlântica, no entanto, os incêndios florestais ainda se encontram como um desafio conservacionista (GUEDES et al., 2020). Em relação aos impactos causados em sua fauna, 15% das espécies presentes no bioma estão ameaçadas de extinção, como as aves saíra-apunhalada (*Nemosia rourei*), guigó-do-nordeste (*Callicebus coimbrai*) e entufado-baiano (*Merulaxis stresemanni*) (PAGLIA e PINTO, 2010). No Nordeste brasileiro, o bioma perdeu grande parte de sua estrutura original para expansão do cultivo de cana-de-açúcar, se tornando a segunda maior região produtora de cana do país (CAVALCANTI et al., 2020).

O Brasil realizou uma grande promessa no Pacto de Restauração da Mata Atlântica, em 2009, se comprometendo em recuperar 12 milhões de hectares de vegetação nativa entre 2020 e 2030, possuindo um crescente sucesso no seu comprometimento. Entretanto, a intensificação das ferramentas de monitoramento e políticas públicas são necessárias

(CROUZEILLES et al., 2019). Estes fatores apontam para a importância de monitoramento do bioma, tendo em vista sua crescente perda de áreas e consequente biodiversidade.

No Nordeste brasileiro a expansão da indústria canavieira foi fator decisivo para redução das áreas de Mata Atlântica. As mudanças no uso e manejo do solo levaram à perda de habitat, formação de enclaves de vegetação, cujos fragmentos restantes compreendem feições de <10 a 1000 ha (RANTA et al., 1998). A conversão de vegetação nativa-pastagem-cana-de-açúcar e/ou vegetação nativa-cana-de-açúcar ocasionou severas consequências ecológicas nas características da paisagem (RODA, 2006), na perda da biodiversidade (SILVA e TABARELLI, 2000), nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (SCHIESARI e CORRÊA, 2016), no funcionamento do ecossistema (RODRIGUES et al., 2004), principalmente em áreas de maior vulnerabilidade ambiental como os cerrados edáficos existentes nos Tabuleiros Costeiros nordestinos, devido à presença de espécies endêmicas estabelecidas nas mesclas de solos arenosos. O setor agroindustrial se configura como o principal responsável pela redução de floresta, que se encontra restrita a pequenos enclaves, nos estados de Pernambuco e Paraíba (Nordeste do Brasil).

## 2.2 A CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma gramínea de metabolismo fotossintético C4, utilizada como fonte principal para produção do açúcar e etanol, tendo seus primeiros registros a 326 anos a.C., sendo suas origens prováveis da Nova Guiné e Índia (ALTPETER e ORABY, 2010). O gênero *Saccharum* é dividido em seis espécies, sendo quatro cultiváveis para comercialização (*S. officinarum*, *S. barberi*, *S. sinense* e *S. edule*) e duas selvagens encontradas em Nova Guiné e sul da Ásia (*S. spontaneum* e *S. robustum*) (BRUMBLEY et al., 2009). A produção de cana ocorre, principalmente de forma assexuada, pela propagação dos brotos laterais, por meio de uma seção de colmos (cana-planta), sendo estes possuidores da capacidade de gerar novos colmos, definidos como soca (cana-soca) (RAE et al., 2014). O desenvolvimento da cana-de-açúcar foi estudado por Aude (1993) e pode ser descrito em:

- Do plantio para brotação das gemas: as gemas são responsáveis pela estruturação de uma nova planta, sendo encontradas na região do nó da cana. A sua propagação ocorre por pedaços de colmos (chamados de toletes de cana) com 3-4 gemas;
- Brotação das gemas ao final do perfilhamento: Com a brotação das gemas há início do perfilhamento, através do desenvolvimento dos rizomas (semelhantes a colmos aéreos, com entrenós mais curtos). Sua estrutura é de colmos, onde os

primeiros são denominados primários, posteriormente os secundários e, por fim, terciários, dando a formação da touceira;

- Final do perfilhamento para a acumulação inicial do açúcar: após a formação de todos os perfilhos, ocorre o crescimento da cana, caracterizado por intensa divisão, diferenciação e alongamento celular, ocasionando o aumento do tamanho e da matéria seca. Os entrenós jovens, primeiros a serem formados, possuem grandes quantitativos de açúcares redutores, como glicose e frutose, em que os maduros contêm pouco e sua estrutura;
- Início da acumulação do açúcar à maturação: ao completar o ciclo, ocorre a diminuição de assimilação de glicose e frutose, acarretando a paralização do crescimento e acumulação do açúcar. As folhas superiores se tornam amarelas e as inferiores secam.

A produção de mudas de cana-de-açúcar a partir da propagação (cultura micropropagada) *in vitro*, se encontra em expansão no Brasil, tendo como objetivo uma cultura mais saudável por meio de cultivares novos melhorados para as características ambientais (ROCHA et al., 2013). Este modo de produção, a partir de culturas de tecidos se torna eficiente devido a necessidade de mecanização da coleta de cana, substituindo as queimadas, fazendo com que ocorra danificação dos colmos, impactando no rebrotamento (HASNER et al., 2019).

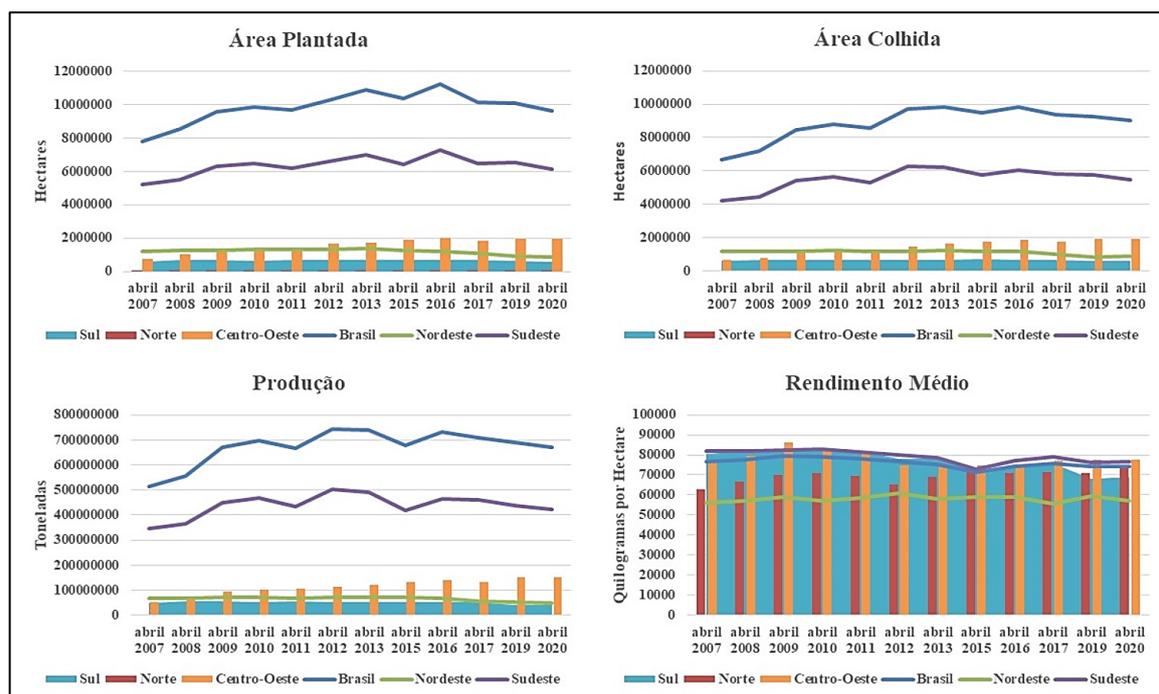
O cultivo da cana pode ser realizado em dois períodos de 18 meses (plantação dos meses de janeiro a março) ou 12 meses (plantio dos meses de outubro a novembro) (SILVA et al., 2015). Os sistemas produtivos da cana-de-açúcar foram descritos por Silva et al. (2017), sendo apresentadas as seguintes recomendações:

- A topografia do terreno deve ser plana a levemente inclinada, com solos férteis e bem drenados. Áreas abertas com boa insolação e circulação de ar;
- Utilização da aração para rompimento das camadas compactadas do solo e correção da fertilidade, principalmente de fósforo, caso necessário;
- A realização de calagem do solo, elevando sua saturação por base a 60%, caso haja déficit;
- A adubação da cana-planta deve ocorrer no fundo do sulco de plantio, após a abertura, todavia, a da cana-soca deverá ocorrer em ambos os lados da linha de cana ou superficialmente;

- A variedade escolhida deve atender às condições climáticas do local, capacidade produtiva e qualidade elevada, alto teor de açúcar e resistência às doenças e pragas.

Nos anos de 2017 e 2018 a produção de cana-de-açúcar na Índia superou o Brasil, se tornando o maior país produtor da cultura. Entretanto, apesar disso, ainda permanece tendo uma alta importância no mercado mundial, sustentando uma possível queda de preços por ampliar a utilização da cana na produção de etanol (FAO, 2019). A cana-de-açúcar possui um histórico antigo no mercado mundial, desde o período colonial, se destacando no Brasil os estados de Pernambuco, São Paulo e Rio de Janeiro (RAMOS, 2007). A maior produtividade de cana, no país, está concentrada na região Sudeste (Figura 1).

Figura 1- Produção de cana de açúcar nas regiões brasileiras no mês de abril, entre os anos de 2007 a 2020.



Fonte: IBGE (2020).

Andrade (2011) ressalta que houve uma queda produtiva da cana-de-açúcar no Nordeste do Brasil. Este fato pode estar correlacionado às dificuldades dos custos de competição com o Centro-Sul do país, bem como as políticas governamentais de subsídios desde a última década do século XX (ANDRADE, 2001). Estudos realizados apontam que a

produtividade da cultura na região nordestina possui relação direta com as condições climáticas, nutricionais do solo e da modernização tecnológica (GOES et al., 2011).

No Nordeste esse cultivo agrícola representa um importante produto para a economia regional, sendo Alagoas, Pernambuco, Paraíba e Bahia os principais estados produtores (LEÃO e LIMA, 2018). A região, atualmente, se apresenta como uma das mais competitivas na produção de açúcar e álcool no mundo, perdendo internamente para o Centro-Sul brasileiro (VIDAL, 2018). Deste modo, a necessidade de um amplo monitoramento ambiental, torna-se essencial, pois seu cultivo ocasiona intenso desmatamento, queimadas, mudanças no manejo e uso da terra, que podem se configurar em graves impactos ambientais.

### 2.3 SOLOS ARENOSOS E RADIOATIVIDADE

O solo é definido como uma camada não consolidada centimétrica com material mineral e/ou orgânico de granulação fina, com ou sem elementos grosseiros e porções cimentadas, mostrando evidências claras de intemperismo químico para seu desenvolvimento (CERTINI e UGOLINI, 2013). Em adição, o *U.S. Department of Agriculture* (USDA) define o solo como um copo natural, composto de sólidos minerais e/ou orgânico, líquido e gases, que ocorrem na superfície terrestre, sendo caracterizado por um ou dois fatores: I- horizontes ou camadas que possuem distinção com o material de origem; II- capacidade de apoiar plantas enraizadas em um ambiente natural (USDA, 2014).

Os fatores de formação do solo foram descritos por Hillel (2008), sendo constituídos: (i) Material de origem: a principal forma de desenvolvimento do solo é a partir do intemperismo das rochas (solos residuais), porém, os solos podem se desenvolver também de material não consolidado (transportado), pelas ações da água, ar ou geleiras; (ii) Clima: a temperatura e umidade afetam as taxas de dissolução, composição química, lixiviação ou deposição de componentes do solo; (iii) Comunidade biótica: a vegetação, atrelado ao clima e ao material de origem, tem influência crucial no desenvolvimento da matéria orgânica do solo. Os variados organismos (minhocas, formigas, cupins, entre outros) e microrganismos (fungos, protozoários e bactérias), também são responsáveis pelo desenvolvimento e transporte da matéria orgânica. Esses conseguem influencia no movimento de água, ar, migração de partículas e solutos; (iv) Topografia: influencia a dinâmica da água, energia e erosão do solo, condicionando, em associação com os demais fatores, a formação de solos rasos ou profundos; (v) Tempo: escala temporal necessária para a formação do solo, por meio de processos eventuais, poderá originá-lo em um período de séculos ou milênios; (vi)

Intervenção humana: as ações humanas a partir do desmatamento, queimadas e afins acarretam mudanças no ecossistema, ocasionando a degradação do solo através da erosão, poluição e perda de matéria orgânica.

Os solos são classificados, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, em ordens, subordens, grandes grupos, subgrupos, famílias e séries, sendo a primeira categoria dividida em 13 grupos: Argissolos, Cambissolos, Chernossolos, Espodossolos, Gleissolos, Latossolos, Luvisolos, Neossolos, Nitossolos, Organossolos, Planossolos, Plintossolos, Vertissolos, sendo esta classificação elaborada pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, tendo como norte o sistema internacional de classificação de solos (SANTOS et al., 2018). Dentro deste grupo de classificação, os principais tipos de solos utilizados para o cultivo da cana-de-açúcar no Brasil são: Latossolos, Nitossolos, Argissolos, Neossolos e Vertissolos (DEMATTE, 2004). No Nordeste brasileiro, a cana é cultivada principalmente em Argissolos, Latossolos. Em detrimento da necessidade de expansão das fronteiras agrícolas houve a inserção do cultivo em solos arenosos Espodossolos, Gleissolos e Neossolos, deste último se destacam os Neossolos Quartzarênicos (DONAGEMMA et al., 2016).

Os Neossolos Quartzarênicos (NQ) são, em sua maioria, solos sem contato lítico, com sequência de horizontes A-C, apresentando textura areia ou areia franca em todos os horizontes, tendo as frações areia grossa e areia fina 95% ou mais de quartzo, calcedônia e opala (SANTOS et al., 2018). Em relação a sua fertilidade, ocorre a necessidade de manejo com adubação (FRAZÃO et al. 2008). Apresenta baixa capacidade nutricional (teores baixos de Ca, Mg, K e P, bem como, baixa CTC- Capacidade de Troca de Cátions e SB- Soma de Bases) e maiores teores de H+Al (acidez potencial) e Al (Alumínio), com potencial à degradação (CARVALHO et al., 2015). Corrêa et al. (2016) ressaltam a suscetibilidade ambiental dos solos arenosos, destacando a elevada quantidade de frações de silte e areia fina, o que condiciona a necessidade de um manejo adequado a fim de evitar processos erosivos (destacamento e transporte de partículas). A matéria orgânica dos Neossolos Quartzarênicos, diante de um manejo adequado, proporciona melhorias na concentração do carbono orgânico total (COT). Contudo, alterações na dinâmica do ácido fúlvico podem ser ocasionadas através de sua redução, indicando perda da fração solúvel, sendo mineralizada e/ou lixiviada para a subsuperfície do solo (CAETANO et al., 2013).

Um importante fator a ser avaliado nos Neossolos Quartzarênicos é sua radioatividade, uma vez que os radionuclídeos  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$ , estão presentes nos ecossistemas expostos (LIU e LIN, 2018). A presença de radioatividade de ocorrência natural por meio de

radionuclídeos primordiais tem origem na formação do planeta. Suas meias-vidas são comparáveis à idade da Terra, como o  $^{40}\text{K}$ , o  $^{87}\text{Rb}$  e, às três séries de elementos radioativos que têm sua origem nos precursores  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ . A série de decaimento existente do tório-232 tem como principais o  $^{228}\text{Ra}$  ( $t_{1/2} = 5,7$  anos) e o  $^{228}\text{Th}$  ( $t_{1/2} = 1,9$  anos). Já para o  $^{238}\text{U}$  são observados vários radionuclídeos de meia-vida como  $^{234}\text{U}$  ( $t_{1/2} = 2,45 \times 10^5$  anos),  $^{230}\text{Th}$  ( $7,7 \times 10^4$  anos),  $^{226}\text{Ra}$  (1622 anos) e  $^{210}\text{Pb}$  ( $t_{1/2} = 22,3$  anos) (EISENBUD e GESELL, 1997; VASCONCELOS, 2010).

Concentrações elevadas de radioatividade podem ser causadas por anomalias na distribuição dos elementos primordiais urânio e tório, que tendem a ser acumulados em rochas, especificamente granito e fosforita (COWART e BURNETT, 1994; MACIEL NETO, 2017). Altos níveis de radiação foram associados à presença de concentrações elevadas de minerais radioativos existentes em rochas ígneas e mais reduzidos nas formações sedimentares, sendo possível também serem encontrados em altas proporções em rochas metamórficas (UNSCEAR, 2000). Esse fato revela que a formação geológica e os processos geoquímicos são fatores condicionantes para a exposição. As fontes de radiação ionizante podem ter origens naturais e/ou antrópica (UNSCEAR, 2000).

A introdução de radionuclídeos de caráter artificial tem como vetor a aplicação de fertilizantes na agricultura (GARCÊZ, 2016). Os fertilizantes agrícolas, principalmente os fosfatados, possuem em sua constituição radionuclídeos, como  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{226}\text{Ra}$ , podendo aumentar suas concentrações no solo devido à fertilização intensa (SAUEIA e MAZZILLI et al., 2006), ocasionar impactar a cadeia alimentar, principalmente organismos vivos e corpos hídricos (FERNANDÉZ et al. 2017).

Destaca-se que no Nordeste brasileiro, em sua faixa litorânea, a existência de rochas fosfáticas distribuída no trecho sul do município de Olinda (Pernambuco) até o extremo norte do estado da Paraíba com extensão de 150 km e largura média de 4 km (CNEN/DNPM, 1985), em que foram constatadas concentrações de urânio variando de 30 a 530  $\text{mg Kg}^{-1}$  e, tório de 1 a 30  $\text{mg Kg}^{-1}$  (AMARAL, 1987; SILVA, 2014). Avaliar as concentrações de radionuclídeos no solo se torna crucial para um controle dos processos ambientais (LIU e LIN, 2018; FILQUEIRAS et al., 2020).

## 2.4 FERTILIZANTES QUÍMICOS

A falta de determinados nutrientes no solo torna necessária a utilização de adubação, com uso na maioria dos casos, de fertilizantes químicos. Para o intervalo de 2010-2014 se

verificou que houve um crescente aumento do uso de fertilizantes por unidade de área no Brasil, sendo os principais em ordem decrescente nitrogenados<fosfatados<potássicos (IBGE, 2016). Simões Neto et al. (2012) expõem que a adubação fosfatada é uma das mais empregadas na lavoura de cana-de-açúcar, principalmente em solos arenosos com déficit de nutrientes, em que a agroindústria canavieira tende a incorporar também a fertirrigação e técnicas de correção para obtenção de maior produtividade.

As práticas de manejo do solo utilizadas no cultivo da cana-de-açúcar requerem a aplicação de fertilizantes sintéticos NPK, micronutrientes e em alguns casos reciclagem de subprodutos relacionados à produção de etanol e açúcar como fertilizantes orgânicos (MUTTON et al., 2010). A adição da vinhaça provoca mudanças na comunidade microbiana, nas propriedades químicas do solo (CHAVES et al., 2019) e decomposição da matéria orgânica (MOS) (RESENDE et al., 2006). Na constituição química da vinhaça o principal componente não aquoso é a matéria orgânica na forma de glicerol e ácidos orgânicos, possuindo alta concentração de potássio, cálcio e enxofre, média de magnésio e micronutrientes, porém baixo teor de nitrogênio (CHRISTOFOLETTI et al., 2013). Por isso, é procedida sua associação com fertilizantes nitrogenados para aumento da produtividade da cana-de-açúcar (CHAVES et al., 2019).

O uso intenso da terra e as formas de manejo convencional da monocultura canavieira se tornam motivo de observação, pois tendem a promover a degradação do solo em seus aspectos físicos (CHERUBIN et al., 2016), propriedades químicas (MARASCA et al., 2016) e biológicas (FRANCO et al., 2017). A avaliação e monitoramento da qualidade do solo, a partir do uso de indicadores, permite verificar os impactos e as alterações ocasionadas em ambientes agrícolas e áreas consideradas vegetação nativa, porém circundada por matrizes canavieiras.

Conceição e Bonotto (2005) destacam que a correção dos solos a partir do uso de fertilizantes químicos fosfatados e corretivos agrícolas, que podem conter metais pesados e radionuclídeos, deve ser realizada com esses produtos aplicados em doses recomendadas. Dessa forma, há menores riscos de incremento nos teores desses elementos nos solos, alcançando níveis indesejáveis a curto e médio prazo.

A utilização de fertilizantes químicos em larga escala é uma preocupação global, devido aos impactos causados ao meio ambiente, afetando os solos, ar e os recursos hídricos (EXPÓSITO e VELASCO, 2020). Estudos apontam a entrada de elementos tóxicos a longo prazo pela utilização intensa de fertilizantes fosfatados, destacadamente o Cd (SILVA et al., 2017). Uma avaliação das concentrações de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn em áreas de cana-de-

açúcar apontaram uma incorporação de Cd pela fertilização, considerando também o Pb como uma fonte mista de ocorrência (processos naturais e fertilização) (SILVA et al., 2016). Estudos com solos fertilizados com ureia, bem como os não fertilizados, não apresentam ricos radiológicos. Contudo, ao realizar a fertilização com fosfato monoamônico, os riscos a eutrofização pelo elemento fosfatado nos solos foram contínuos em longo intervalo de tempo (BRAMKI et al., 2018). Freitas et al. (2009) realizam pesquisa em solos cultivados com milho e diferentes fertilizantes fosfatados, tendo como principal ponto de observação Cd e Pb. Destacaram que ao longo das aplicações em solo e planta houve aumento na quantificação, principalmente a partir do uso de fertilizante natural fosfatado de Gafsa. Estas questões reforçam a necessidade de uma avaliação constante dos solos, que possuem intensivas incorporações de fertilizantes devido os possíveis impactos com elementos tóxicos e/ou possivelmente tóxicos.

## 2.5 IMPACTOS DA UTILIZAÇÃO DE FERTILIZANTES QUÍMICOS APLICADOS NO CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM SOLOS ARENOSOS

As paisagens naturais vêm, ao longo dos séculos, sendo transformadas em virtude do aumento da população mundial e, conseqüente, pela necessidade de uso dos espaços físicos, deteriorando os ecossistemas e causando a perda e/ou redução da biodiversidade. A produção crescente de alimentos, de combustíveis biológicos e, a expansão urbana e industrial vêm ocorrendo em detrimento dos espaços naturais e, a conseqüente desnaturaçã dos solos. Esse fato é observado com intensidade no Nordeste brasileiro devido a cultura canavieira, que se configura como a força motriz econômica para a produção sucroalcooleira, sendo destaque nos estados de Alagoas e Pernambuco (RODRIGUES e ORTIZ, 2006). Essa prática agrícola se tornou fortemente dependente da adubação química, em que é tradicionalmente empregada a fosfatada, aplicada no plantio e/ou na soqueira (EMBRAPA, 2015).

A intensificação e o aumento da produção canavieira tendem a acelerar processos de degradação, principalmente em áreas de Mata Atlântica (TABARELLI et al. 2012). É possível verificar um mosaico de vegetação, em função das variações físicas do ambiente, como o relevo, solo e padrões de precipitação. Dentre as formações geológicas e geomorfológicas na costa do Nordeste estão os tabuleiros resultantes do afloramento do arenito da Formação Beberibe, em superfície plana a suave ondulada. Essa formação proporciona a existência de um solo arenoso, em que a água resultante da precipitação se infiltra facilmente devido à porosidade da areia predominante, ficando retida na camada argilosa basal (CPRH, 2003).

A expansão da cana-de-açúcar, de caráter mecanizado, para solos arenosos em áreas de tabuleiro costeiro tende a provocar processos de compactação do solo devido a elevada pressão imposta, associada às condições de umidade favoráveis à degradação física (PACHECO e CANTALICE, 2011). A compactação do solo ocasiona significativas restrições ao desenvolvimento da planta, por causa da elevação à resistência mecânica à penetração das raízes, motivada pelo uso intenso de máquinas e determinados elementos existentes em fertilizantes que é utilizado sem controle (LIMA et al., 2013). Nos talhões essa resistência se configura em maior grau, ultrapassando 15 cm de profundidade (OLIVEIRA FILHO et al., 2015), provocando alterações na densidade do solo, porosidade e macroporosidade, em maior intensidade em solos arenosos como Neossolo Quartzarênico (SOUZA et al., 2005).

A utilização de formas alternativas e sustentáveis de uso dos recursos naturais tem se tornado essencial para a manutenção da biodiversidade. Dentre elas se verifica o uso da palhada como substrato em áreas de cultivo de cana-de-açúcar sem queima, em que houve o aumento do teor e no estoque de matéria orgânica em Latossolo Vermelho e Neossolo Quartzarênico, permitindo elevação da estabilidade dos agregados (LUCA et al., 2008). Em avaliação do estoque de carbono em Neossolo Quartzarênico após nove anos de cultivo com cana-de-açúcar sem queima prévia, Oliveira Filho et al. (2017) observaram que a faixa de profundidade de 0 a 30 cm é beneficiada com o aumento do carbono orgânico total, devido a assimilação do material orgânico pela decomposição do sistema radicular da planta. Simões et al. (2015) ressaltam que a adubação orgânica do solo tem sido utilizada em substituição aos fertilizantes químicos, sendo aplicada de forma isolada, ou associada a adubos minerais, favorecendo a retenção de umidade, fornecimento de nutrientes e, aumento da microbiota e estrutura do solo.

A eutrofização dos habitats por ação de fertilizantes químicos aplicados em solos ditróficos e de baixa produtividade, sobretudo naqueles com altos teores de nitrogênio e fósforo, tem efeitos adversos de organismos, por vezes endêmicos. A extensão de áreas cultivadas com cana-de-açúcar nos tabuleiros costeiros, demandando altas aplicações de fertilizantes químicos. Xavier et al. (2012) alertam que os teores de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e P disponível em superfície e os de  $\text{Na}^+$  em profundidade, são fortemente influenciados pela fertirrigação. Entretanto, o acréscimo de sódio, devido a sua mobilidade, pode acarretar um risco potencial para a salinização. Além disso, são observadas consequências para as biotas de tabuleiros adjacentes a essas áreas cultivadas que recebem parte desses produtos químicos, prejudicando o funcionamento desses habitats (VASCONCELOS, 2013).

Como medidas de melhoramento das condições químicas e biológicas dos solos ácidos e de baixa fertilidade dos tabuleiros arenosos, as técnicas mais comumente empregadas são a adição de fertilizantes químicos e calagem de solos. Em alguns casos, sobretudo no cultivo da cana-de-açúcar, utiliza-se a fertirrigação, a partir do emprego do vinhoto (ou calda), resultante dos processos fermentativos da cana, como um adjuvante para o enriquecimento do solo. Nesse sentido, a existência de concentrações anômalas de elementos químicos tóxicos torna o solo inadequado para cultivos, por interferir na absorção de nutrientes e, diminuir as atividades microbianas. A acumulação nos produtos agrícolas traz sérios riscos aos organismos vivos (MARWA et al., 2012). Grant (2011) destaca a influência dos elementos fosfatados em fertilizantes, no acúmulo de Cd (cádmio) em solos agrícolas, ocasionando impactos diretos no ecossistema natural, por meio da bioacumulação em plantas.

Conceição et al. (2013) enfatizam a ação antrópica no aumento dos elementos de metais pesados Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn em solos com plantio de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, a partir da aplicação de fertilizantes NPK, ocasionando impactos no ecossistema terrestre e aquático. Atrelado a isso, a presença natural de radionuclídeos em teores elevados acarreta impactos ambientais e a saúde humana (ERIKSSON et al., 2005). Estudos detectaram elevadas concentrações dos isótopos de rádio (Ra-226), tório (Th-232) e potássio (K-40) em fertilizantes fosfatados (CHAUHAN et al., 2013).

Apesar da aplicação indiscriminada de fertilizantes químicos ser preocupante, eles ainda são os mais utilizados na produção agrícola e sua aplicação é de suma importância para manter o nível nutricional da solução do solo, principalmente com relação à disponibilidade de um elemento químico pouco disponível e essencial para as culturas, como a cana-de-açúcar (ZHANG et al., 2019). Por outro lado, as rochas fosfáticas, usadas para a produção de fertilizantes fosfatados, apresentam concentrações significativas de oligoelementos (micronutrientes), elementos químicos tóxicos, elementos químicos terras raras e radionuclídeos em sua constituição (EL-BAHI et al., 2017; OGUNLEYE et al., 2002), sendo aconselhada uma intensiva monitoração dos locais que aplicam esses insumos. Estudos realizados apontaram o risco da contaminação dos solos com a utilização dos fertilizantes fosfatados no Brasil, devido às suas concentrações significativas de metais tóxicos (SILVA et al., 2016; SILVA et al., 2017; SILVA et al., 2019).

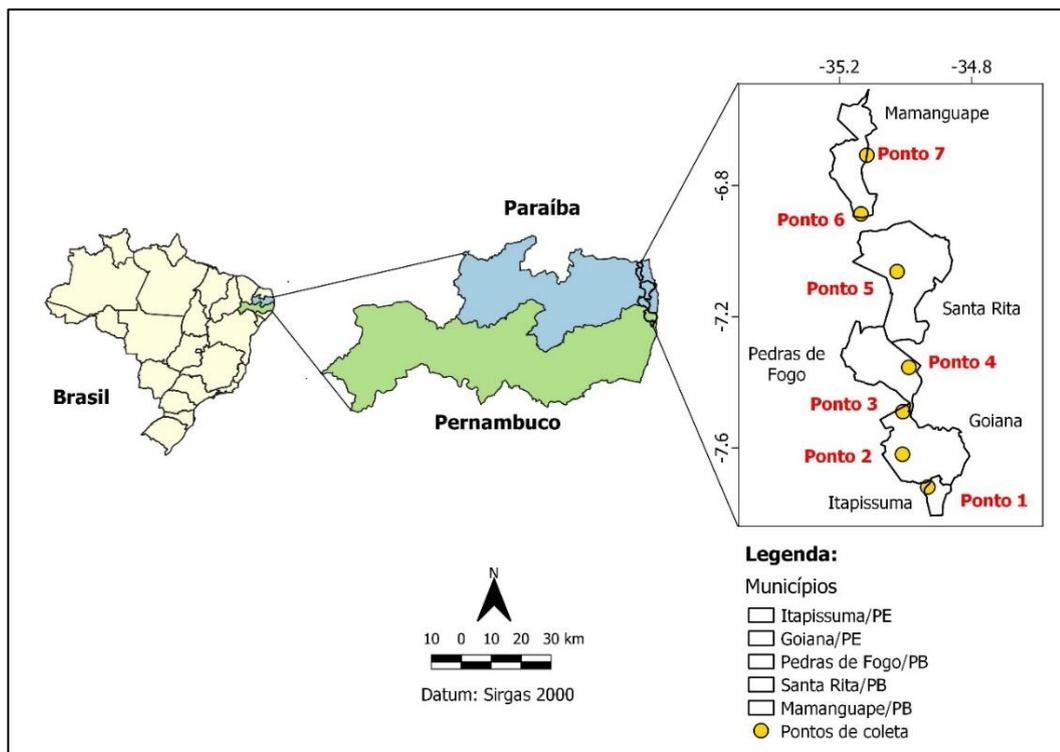
### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 MAPEAMENTO DE SOLOS ARENOSOS EM ÁREA DE TABULEIRO COSTEIRO COM CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR NOS ESTADOS DE PERNAMBUCO E PARAÍBA

Para identificação dos solos arenosos em área de Tabuleiro Costeiro com cultivo de cana-de-açúcar nos estados de Pernambuco e Paraíba foi realizado, inicialmente, levantamento nos seguintes bancos de dados: (i) mapa de solos desenvolvido pela Embrapa; (ii) mapa de solos fornecido pelo IBGE; (iii) Zoneamento Agroecológico do Nordeste brasileiro; (iv) Zoneamento Agroecológico do Estado de Pernambuco; (v) Zoneamento Pedoclimático do Estado da Paraíba. Após a seleção das áreas a partir das coordenadas geográficas, foram utilizadas imagens de satélite fornecidas pelo Google Earth para ratificação dos locais selecionados e corroborar com os dados observados nos institutos acima citados, que melhor auxiliou esta seleção. Foram identificados seis locais, Espodossolos Ferrihumilúvicos e/ou Neossolos Quartzarênicos, nos Tabuleiros Costeiros com cultivo de cana-de-açúcar. Foi utilizado como ponto controle solo de área de vegetação nativa conservada próximo a Reserva Biológica Guaribas (Figura 2).

As áreas selecionadas para coleta, foram verificadas a partir de visita de campo para confirmação da existência de solos arenosos e caracterização diante dos aspectos: uso e manejo do solo (principalmente com aspectos de cultivo canavieiro) e processos de degradação ambiental. Cinco pontos formando um X foram delimitados em uma área de 1 ha. Amostras simples coletadas nesses pontos (0-20 cm) foram homogeneizadas para compor uma amostra por localidade. Detalhes metodológicos podem ser encontrados em Santos et al. (2015). No Laboratório as amostras foram secas ao ar e passadas em peneira com malha de 2,0 mm.

Figura 2 – Mapa com identificação dos pontos de coleta dos solos arenosos em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa em Tabuleiros Costeiros dos estados da Paraíba e Pernambuco.



Fonte: IBGE (2016), adaptado pelo autor. Legenda: Ponto 1 (Itapissuma); Ponto 2 (Goiana); Ponto 3 (Goiana); Ponto 4 (Pedras de Fogo); Ponto 5 (Santa Rita); Ponto 6 (Mamanguape); Ponto 7 Solo em área de vegetação nativa (Mamanguape).

Foram realizados *in loco*, observações fisionômicas da paisagem a partir de atributos ecossistêmicos e de impactos da monocultura canavieira a estes sistemas observados. Os atributos foram: uso e manejo do solo, tipos de sistema de irrigação e coleta das produções, corpos hídricos, diversidade biológica visível e ação antrópica. Também foi observado a compactação dos solos a partir da técnica de manejo desse solo, onde os principais atributos para essa observação foram: uso de maquinário ou não e irrigação, além de rotação de culturas.

### 3.2 QUANTIFICAÇÃO DE RADIONUCLÍDEOS POR ESPECTROMETRIA GAMA DE ALTA RESOLUÇÃO – EGAR

As amostras de solo foram secas em estufa de circulação forçada à temperatura de 60°C, até obtenção de peso constate. Em seguida, foram maceradas em almofariz com pistilo

de porcelana para redução da granulometria para 3,0 mm. Porções analíticas de cada ponto, com aproximadamente 30 g, foram transferidas para placas de Petri vedadas com adesivo a base de silicone, para evitar o escape do  $^{222}\text{Rn}$ , e deixadas em equilíbrio secular de 21 dias. Realizou-se a quantificação da radioatividade natural por detector de Germânio Hiper-puro (HPGe) da Canberra, modelo GC4018 (Figura 3). A curva de eficiência foi obtida por meio da dopagem de um padrão interno de solo fornecido pela Agência Internacional de Energia Atômica – IAEA-314. As concentrações das atividades de tório ( $\text{Th}_{228}$ ), rádio 226 e 228 ( $\text{Ra}_{226}$  e  $\text{Ra}_{228}$ ) e potássio 40 ( $\text{K}_{40}$ ), foram quantificadas utilizando o software Genie da Canberra (PAIVA et al., 2016).

Figura 3 – Detector Espectral Gama de Alta Resolução utilizado para quantificação de radionuclídeos em amostras de solos arenosos coletados em área de Tabuleiro Costeiro nos estados de Pernambuco e Paraíba. Realizada no Centro Regional de Ciências Nucleares (CRCN), Recife, PE.



Fonte: autor, 2019.

### 3.3 ANÁLISE DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X POR DISPERSÃO DE ENERGIA (EDXRF)

Essa análise foi realizada no Centro Regional de Ciências Nucleares (CRCN). O solo foi macerado e peneirado em peneira de tecido de "nylon" tipo voal (porosidade de  $0,1 \text{ mm}^2$ ). Posteriormente, foram transferidos 1g de solo para tubos de polietileno vedados com filme de polipropileno. Utilizou-se o equipamento EDX-720 da Shimadzu constituído de tubo de raios-

X de ródio e detector de Si(Li) para a quantificação dos raios-X característicos (Figura 4). Os materiais de referência IAEA-SOIL-7 e SRM 2709 *San Joaquin Soil*, produzidos pelo *National Institute of Standard and Technology* – NIST e pela Agência Internacional de Energia Atômica – IAEA, foram analisados juntamente com as amostras. A quantificação elementar de elementos maiores e traços foi obtida a partir de curvas analíticas geradas com o material de referência (FERNANDES et al., 2017). Foi utilizada voltagem de 15 kV para a determinação dos elementos químicos de número atômico < 22 e, 50 kV para os demais.

Figura 4 - Equipamento EDX-720 da Shimadzu utilizado para quantificação de elementos químicos em amostras de solos arenosos coletados em área de Tabuleiro Costeiro nos estados de Pernambuco e Paraíba. Realizado no Centro Regional de Ciências Nucleares (CRCN), Recife, PE.



Fonte: autor, 2018.

### 3.4 MATÉRIA ORGÂNICA DAS AMOSTRAS DE SOLO

Amostras de solo foram secas em estufa a 105°C por 24h para perda da umidade. Em seguida as amostras foram colocadas em forno mufla para incineração de 550°C por 8h (Figura 5). Após esse procedimento as amostras foram repesadas e, o resultado inserido em fórmula para obtenção do teor de matéria orgânica (GOLDIN, 1987).

$$\text{MO (\%)} = (P - (T - C) \times 100) / P \quad (1)$$

Em que:

MO = matéria orgânica

P = peso da amostra em gramas depois de aquecida em estufa a 105°C

C = peso do cadinho

T = peso da amostra e do cadinho em gramas após incineração em forno mufla

Figura 5 – Forno mufla utilizado para queima da matéria orgânica em amostras de solos arenosos coletados em área de Tabuleiro Costeiro nos estados de Pernambuco e Paraíba. No Centro Regional de Ciências Nucleares (CRCN), Recife, PE.



Fonte: autor, 2018.

### 3.5 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO SOLO

Foi realizada análise da fertilidade do solo nas amostras dos diferentes pontos coletados para verificação e quantificação dos elementos químicos como fósforo (P), pH em H<sub>2</sub>O, cálcio (Ca), magnésio (Mg), sódio (Na), potássio (K), alumínio (Al), hidrogênio (H), de acordo com o Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizante, onde foi quantificado os elementos totais presente nas amostras, sendo estabelecido pela Embrapa (SILVA et al., 2009). As análises químicas foram realizadas no Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA).

### 3.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

A média, mediana, máximo e mínimo foram calculados usando o Microsoft Excel 365®. A matriz de correlação *heatmaps* foi realizada por meio do programa do *software* R, versão 3.6.4, e da ferramenta Rstudio. Neste caso, fez-se uso das variáveis quantitativas com valores de 1 a -1, onde as cores de cada correlação indicam a força das interações entre os elementos químicos dos pontos avaliados. A análise multivariada, por meio dos agrupamentos obtidos pela distância Euclidiana, em forma *cluster* (dendrograma), dos valores elementares obtidos para cada ponto foram utilizados para análise hierárquica, baseada na similaridade das variáveis e a diferença entre os membros de classes distintas (RODRÍGUEZ-OROZ et al., 2018). Para a matriz dispersão e correlação, foi utilizado os valores dos atributos e elementos químicos. Essas variáveis quantitativas foram cruzadas entre si para obtenção dos mapas fatoriais para verificação da qualidade da representação para as variáveis e a contribuição das variáveis para os componentes.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

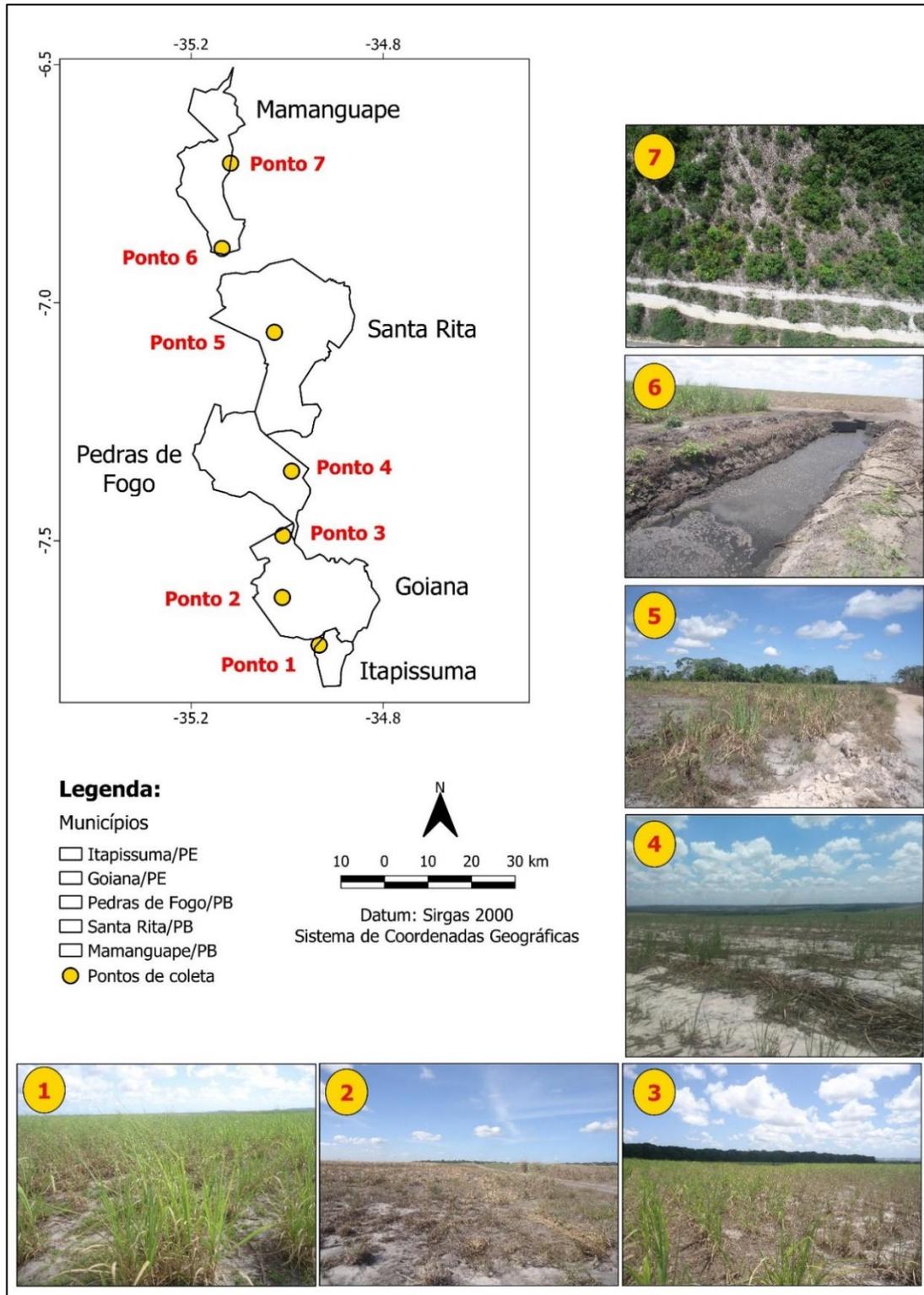
Os impactos ambientais nos solos, provenientes do mal uso de técnicas agrícolas, vêm ao longo dos anos agravando a situação e, aumentando a vulnerabilidade a processos degradantes irreversíveis. Em alguns casos, deixando diversos hectares de terras antes agricultáveis, totalmente improdutivos. Podem ser enfatizados o desmatamento, utilização de agrotóxicos e corretores de fertilização inorgânica que ocasionam diminuição dos fungos e outros microrganismos presentes nos solos (FAO, 2015).

A caracterização dos solos apresentou singularidades entre eles, principalmente pelo uso e manejo do solo (Quadro 1). Esse fato é mais evidente nas áreas de agricultura intensiva da cultura canavieira, presença de maquinário para revolvimento do solo e formação de covas alinhadas e canais de fertirrigação (Figura 6). Evidencia-se que as áreas de solos arenosos sob cultivo de cana-de-açúcar possuem similaridades entre si, sendo o ponto 7 diferenciador, tendo em vista ser uma área de vegetação nativa conservada.

Quadro 1 – Caracterização dos pontos de coleta de solos arenosos em Tabuleiro Costeiro nos estados de Pernambuco e Paraíba, em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa.

<b>Ponto/Município/Estado</b>	<b>Coordenadas geográficas</b>	<b>Características</b>
Ponto 1 - Itapissuma/PE	07°43'9.60''S 34°55'59.82''W	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Agricultura intensiva (monocultura canavieira);</li> <li>▪ Solo arenoso compactado, possivelmente pelo uso agrícola;</li> </ul>
Ponto 2 - Goiana/PE	07°37'10.02''S 35°0'36.07'' W	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cultivo de cana-de-açúcar intermitente;</li> <li>▪ Solo arenoso compactado, possivelmente pelo uso agrícola;</li> </ul>
Ponto 3 - Goiana/PE	07°29'21.39''S 35°0'31.19''W	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Agricultura intensiva (monocultura canavieira);</li> <li>▪ Solo arenoso compactado, possivelmente pelo uso agrícola;</li> </ul>
Ponto 4 - Pedras de Fogo/PB	07°21'14.89''S 34°58'1.76''W	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Agricultura intensiva (monocultura canavieira);</li> <li>▪ Solo arenoso compactado, possivelmente pelo uso agrícola;</li> </ul>
Ponto 5 - Santa Rita/PB	07°3'44.31''S 35°1'35.46''W	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Rotação de culturas (cana-de-açúcar e mandioca);</li> <li>▪ Intercalação de solos arenosos e argiloso;</li> </ul>
Ponto 6 - Mamanguape/PB	06°53'10.45''S 35°8'8.29''W	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Agricultura intensiva (monocultura canavieira);</li> <li>▪ Fertirrigação (vinhoto);</li> <li>▪ Solo arenoso compactado, possivelmente pelo uso agrícola;</li> </ul>
Ponto 7 - Mamanguape/PB	06°42'25.50''S 35°7'4.43''W	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Área de vegetação nativa de cerrado edáfico;</li> <li>▪ Heterogeneidade biológica;</li> <li>▪ Solo arenoso não compactado;</li> </ul>

Figura 6 – Mapa de distribuição dos pontos de coleta de solos arenosos em Tabuleiro Costeiro nos estados de Pernambuco e Paraíba, em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa.



Legenda: IBGE (2016), adaptado pelo autor, 2020. Ponto 1 - Itapissuma/PE; Ponto 2 - Goiana/PE; Ponto 3 - Goiana/PE; Ponto 4 - Pedras de Fogo/PB; Ponto 5 - Santa Rita/PB; Ponto 6 - Mamanguape/PB; Ponto 7 - Mamanguape/PB (solo vegetação nativa).

A conversão de florestas em agricultura tende a diminuir o armazenamento de carbono no solo, que pode refletir na quantidade de matéria orgânica existente e alterar a fixação de elementos químicos no solo. Com isso, a utilização intensiva, principalmente de solos arenosos, leva à inserção de fertilizantes para suprir as necessidades das culturas. As alterações nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo podem afetar os processos bioquímicos, influenciar a fertilidade e o crescimento das plantas (SILVA et al., 2012). Esse fato é observado quando se comparam os atributos químicos de solos arenosos em áreas de cultivo de cana-de-açúcar, seja de caráter intermitente ou não, com o solo de vegetação nativa de Tabuleiro Costeiro (cerrado edáfico).

Observou-se um aumento significativo P,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e, conseqüentemente da capacidade de troca catiônica (CTC) dos solos (Tabela 1). Constatou-se que, solos com uso de corretivos agrícolas tendem a possuir reação moderada a alcalinidade fraca. Em contraponto, a área considerada como controle com solo de vegetação nativa (ponto 7) possui pH com acidez forte a média, juntamente com o ponto 4 que está relacionado ao uso da área. Malavolta (1980) expõe que solos naturalmente ácidos motivados pelo seu material de origem, possuem baixas concentrações de magnésio, potássio e sódio e/ou, devido aos processos de intemperismo, que resultam em maiores teores de hidrogênio e alumínio no complexo de troca.

O fósforo é um dos macronutrientes do solo, cuja presença é essencial para o desenvolvimento vegetal. Sua concentração pode ser afetada pela textura e mineralogia do solo. Assim, quando seu teor se encontra em valores muito baixo são utilizadas fontes externas de fósforo para enriquecimento. Borges et al. (2019) ressaltam que solos em ambientes tropicais são altamente intemperizados e quando inseridas práticas agrícolas nesses há uma necessidade de aplicação de adubação. Salientam que existe uma relação direta entre a disponibilidade de P e a produção da safra para as culturas desenvolvidas, principalmente de cana-de-açúcar.

No Brasil a taxa média de aplicação de P nas lavouras é de  $25 \text{ Kg ha}^{-1}$ , entretanto mundialmente se faz uso de  $12 \text{ Kg ha}^{-1}$  (LU e TIAN, 2017). Os solos de agricultura tropical requerem grandes demandas de adubação fosfatada, onde a disponibilidade desse elemento está interligada a sua capacidade de biodisponibilização, que é geralmente baixa, de 10 a 20% a curto prazo (RODRIGUES et al., 2016; CHIEN et al., 2019). O P apresentou maiores concentrações em P1 (Itapissuma) e P3 (Goiana) com  $62 \text{ mg dm}^{-3}$ . Em contrapartida, o P7 (Mamanguape/controle) apresentou teor de P de  $2 \text{ mg dm}^{-3}$ , juntamente com os pontos P2 (Goiana) e P4 (Pedras de Fogo) que também apresentaram baixos valores de fósforo -  $8 \text{ mg}$

dm<sup>-3</sup> (Tabela 1). Entretanto, são concentrações inferiores aos pontos P1, P3, P5 e P6, o que pode estar associado ao uso de fertilizantes com baixo teor de fósforo, ou mesmo sua absorção e/ou lixiviação. Evidenciou-se que naturalmente os solos arenosos de Tabuleiro Costeiro possuem reduzida concentração de cálcio. No ponto 7 o teor foi de 0,25 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, entretanto todos os demais pontos apresentaram valores superiores, especificamente o P2 com 4,6 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> (Tabela 1). A área referência também apresentou os menores teores de Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> e Na<sup>+</sup>.

Moore e Ouimet (2014) destacam que a calagem em solos ácidos e pobres em bases ocasionou antagonismo nutricional de Mg<sup>2+</sup> por K<sup>+</sup>. Em adição, Rodrigues et al. (2004) observaram um comportamento linear para pH em CaCl<sub>2</sub>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, acidez potencial (H+Al), capacidade de troca catiônica (CTC) e significância com a matéria orgânica do solo, constatando que a calagem influencia no comportamento químico do solo. É possível que os pontos avaliados de cultivo agrícola façam uso da calagem para correção da acidez, que em associação com adubação química intensificam a fertilidade dos solos. Mthimkhulu et al. (2016) ressaltam que cátions trocáveis, especificamente cálcio e magnésio e, pH são significativamente afetados pela aplicação de fertilizantes. Esse fato ratifica os resultados obtidos, destacando-se a efetiva relação do pH para os solos agrícolas avaliados, pois a maior acidez ativa corresponde à elevação da atividade de íons de hidrogênio (P4). Já a alcalinidade do solo ocasionou redução do teor de hidrogênio (P6) (Tabela 1).

A avaliação da fertilidade do solo é diretamente relacionada à disponibilidade dos nutrientes às plantas. A conversão de pastagem e/ou floresta nativa em campos agricultáveis de cana-de-açúcar, tende a resultar em queda no estoque de carbono orgânico e da matéria orgânica do solo (MOS). Em adição, práticas tradicionais empregadas no cultivo da monocultura canavieira como a queima antes da colheita, torna-se prejudicial para a estabilidade dos agregados do solo e disponibilidade de nutrientes com perda de matéria orgânica, por meio dispersão de partículas ou volatilização (MTHIMKHULU et al., 2016). No Brasil estudos realizados com cana-de-açúcar submetida à queima por intervalo de 5 anos consecutivos evidenciou redução na quantidade de fósforo orgânico ligado ao ácido húmico (ROSSI et al., 2013), no teor de carbono orgânico total do solo em 50 % (SOUZA et al., 2012) e, aumento da presença de compostos aromáticos (ROSSI et al., 2016). Esse fato, possivelmente pode ser observado no ponto 2, em que é utilizada a queima como recurso para corte da cana no processo de colheita, o que justificaria o maior teor de MOS (0,66 %). Verificou-se que as maiores concentrações de matéria orgânica foram observadas nos pontos P2 e P6, especificamente o ponto 6 que se destaca pela utilização do vinhoto como produto

para fertirrigação. Já os pontos P4 e P7 apresentaram as menores taxas de MOS, estando P4 com valores semelhantes ao controle de campo (Tabela 1 e Figura 7).

Tabela 1 – Análise dos elementos químicos de solos arenosos de Tabuleiro Costeiro nos estados de Pernambuco e Paraíba, coletados em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa.

Pontos *	pH	P	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup>	SB	CTC	MOS
	H <sub>2</sub> O	mg dm <sup>-3</sup>	----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----					-----		%	
P1	6,2	62	2,2	0,5	0,04	0,08	0	3,71	2,8	6,5	0,40
P2	6,6	8	4,6	0,8	0,04	0,03	0	3,3	5,5	8,8	0,66
P3	6,6	62	3,2	0,8	0,05	0,11	0	1,98	4,2	6,1	0,57
P4	5,5	8	1,5	0,9	0,04	0,07	0,05	4,90	2,5	7,5	0,20
P5	6,1	31	2,8	0,5	0,04	0,04	0	2,88	3,4	6,3	0,35
P6	7,4	43	2,5	1	0,06	0,38	0	0,82	3,9	4,8	0,65
P7	5,4	2	0,25	0,5	0,02	0,02	0,05	1,76	0,8	2,6	0,21

\*Ponto 1 - Itapissuma/PE; Ponto 2 - Goiana/PE; Ponto 3 - Goiana/PE; Ponto 4 - Pedras de Fogo/PB; Ponto 5 - Santa Rita/PB; Ponto 6 - Mamanguape/PB; Ponto 7 - Mamanguape/PB (solo vegetação nativa). SB; soma de bases; CTC; capacidade de troca catiônica à pH7.0; MOS: matéria orgânica do solo.

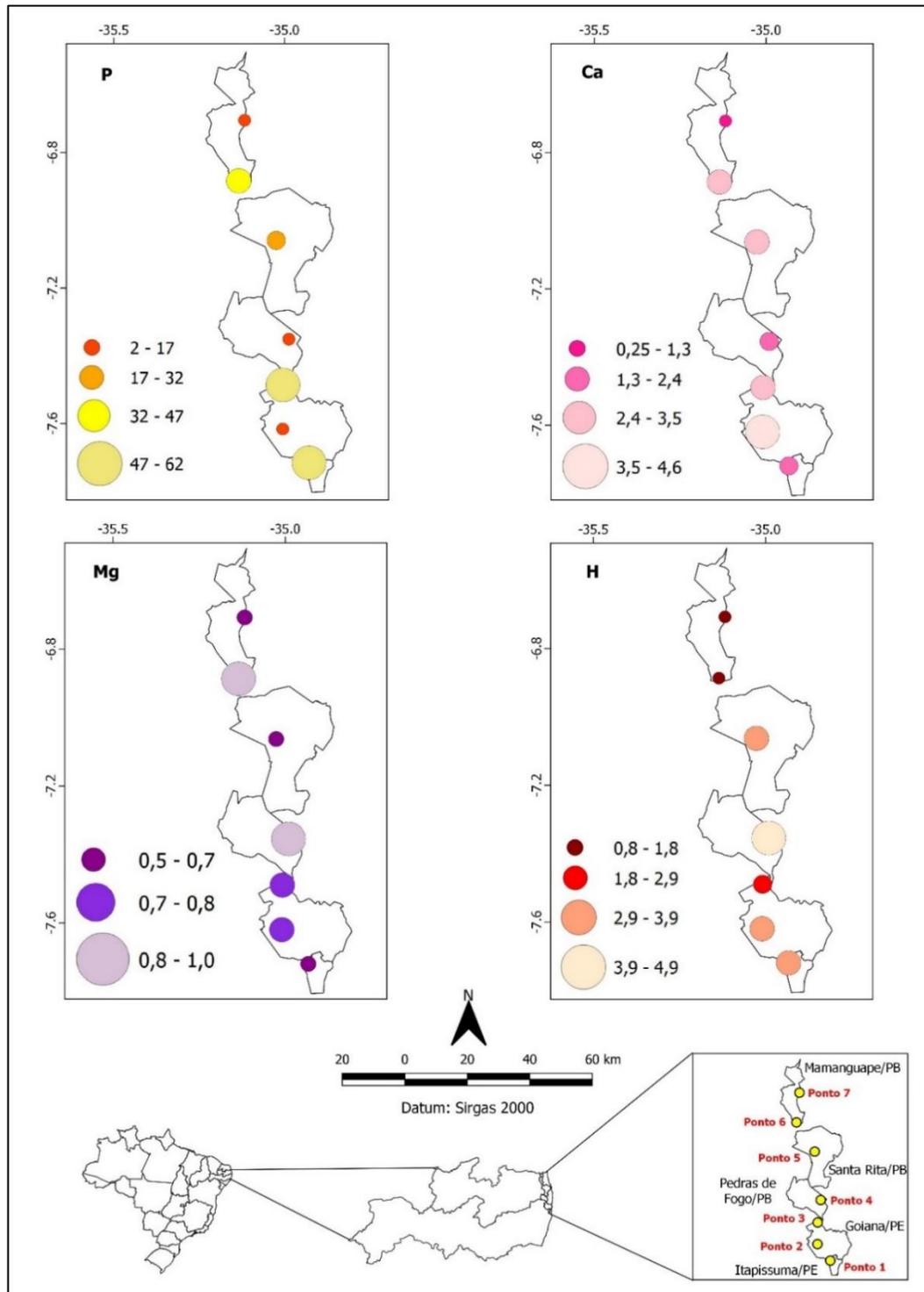
Borges et al. (2019) evidenciam que o setor sucroenergético se utiliza dos subprodutos gerados no processo industrial como corretivos do solo para aumentar a produtividade da cana-de-açúcar obtido da purificação como vinhaça (efluente líquido do processo de destilação) e torta de filtro. A vinhaça tem sido utilizada pelo setor como fertilizante devido ao seu baixo custo e composição química enriquecida de nutrientes, podendo aumentar o pH do solo e as concentrações de fósforo, potássio, cálcio, magnésio, e a capacidade de troca catiônica na camada superficial do solo (0-20 cm de profundidade) (BARROS et al., 2010; SANTOS et al., 2020). Ratificam-se assim os dados obtidos, em específico para o ponto 6. Este possui efetivamente a aplicação da vinhaça nas áreas de cultivo de cana, apresentando aumento de pH (7,4), P (43 mg dm<sup>-3</sup>), Ca (2,5 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Mg (1 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), K (0,38 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), CTC (3,9 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), MOS (0,65 %) e redução de Al (0 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), quando comparado ao ponto 7 considerado como área de vegetação nativa (controle) (Tabela 1, Figuras 7 e 8). Em virtude, do P7 ser uma área próxima a Reserva Biológica Guaribas possui concentrações de elementos químicos inferiores aos pontos de agricultura, principalmente em relação ao P6. Por se tratar de um ponto em que a fertirrigação se faz presente.

Neste contexto, German et al. (2020) expõem que a produção de grande quantidade de vinhaça tem sido atrelada às mudanças nas propriedades físico-químicas do solo e corpos

d'água, e efeitos tóxicos em organismos aquáticos por lixiviação para córregos e rios, com consequente acidificação, poluição orgânica, aumento na demanda biológica de oxigênio e bactérias coliformes (WWF, 2016). Esses fatos ocasionam a contaminação do solo a partir da presença de determinadas substâncias tóxicas derivadas das ações humanas, que comprometem a sua qualidade e função, podendo acarretar na degradação, danificação das funções básicas, prejudicando a saúde populacional e ambiental (SUN et al., 2019). As práticas agrícolas culminaram em séria contaminação do solo, por meio do lançamento de metais, da utilização de pesticidas e fertilizantes químicos e/ou fertirrigação (ANDRADE et al., 2019).

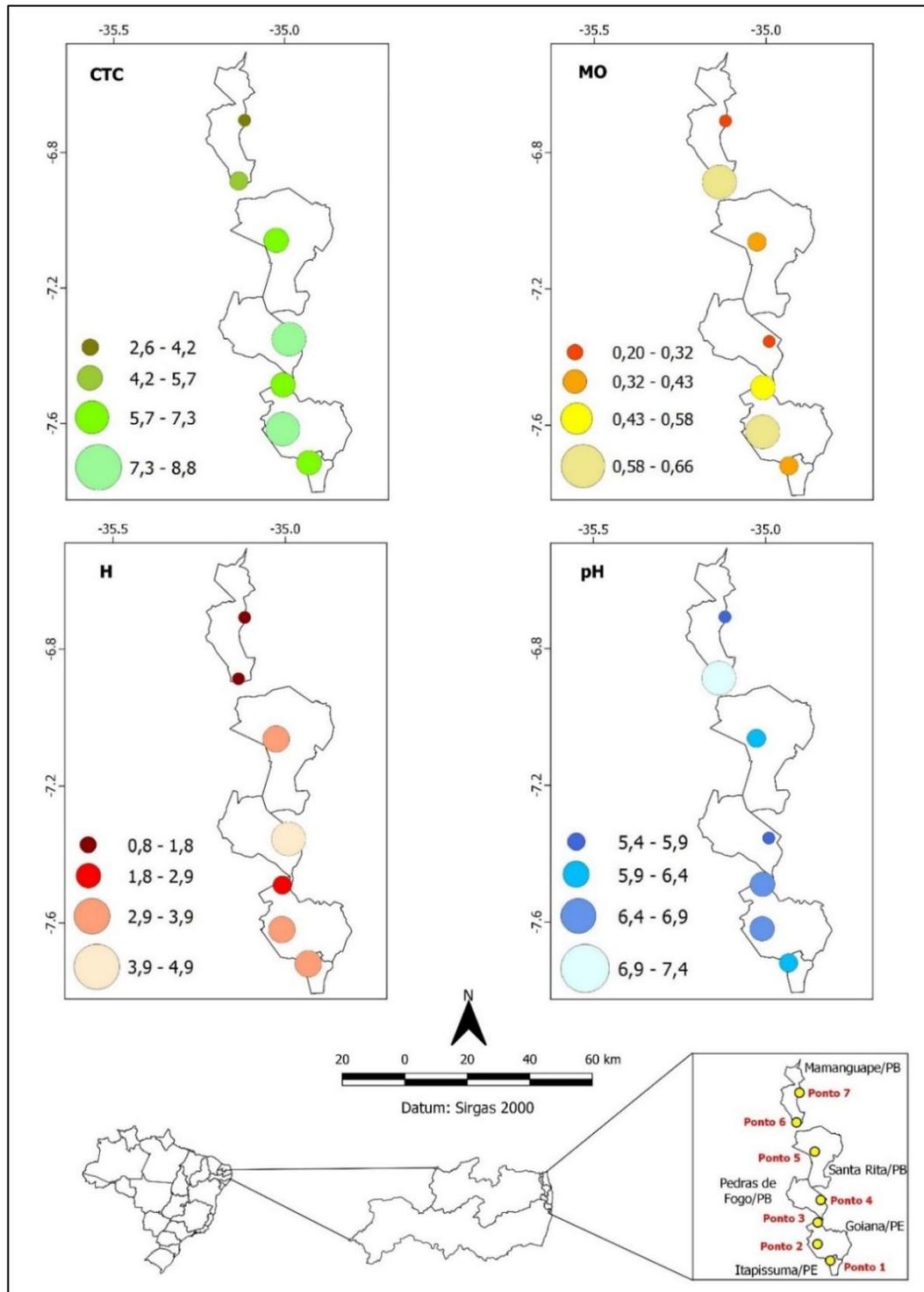
Silva et al. (2014) evidenciam que no Brasil para cada litro de etanol produzido, em média são gerados 10-15 litros de vinhaça, onde sua aplicação, a partir da fertirrigação em solos tratados com fertilizantes nitrogenados sintéticos, pode levar ao aumento das emissões de  $N_2O$ , que afeta diretamente as vantagens do uso do etanol de cana-de-açúcar para reduzir as emissões de gases do efeito estufa de combustíveis fósseis (CARMO et al., 2013). Arelado a esse fato se encontra o processo de acúmulo de potássio no solo, produto também encontrado na vinhaça e nos fertilizantes NPK, e sua consequente lixiviação para águas subterrâneas e superficiais (MORAES et al., 2010; FREITAS e ROCHA, 2011). Desta forma, se constata os possíveis impactos gerados pela aplicação da vinhaça em práticas repetitivas e quantidades excessivas, evidenciados dentre as amostras avaliadas o ponto 6, que além da elevação dos elementos químicos, houve aumento de ferro (Figura 13) e de radionuclídeos ( $^{228}Th$  e  $^{228}Ra$ ) (Figura 18).

Figura 7 – Mapa de símbolos pontuais proporcionais dos elementos químicos fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg), hidrogênio (H), quantificados de amostras de solos arenosos coletados em área de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa nos estados de Pernambuco e Paraíba.



Legenda: Ponto 1 - Itapissuma/PE; Ponto 2 - Goiana/PE; Ponto 3 - Goiana/PE; Ponto 4 - Pedras de Fogo/PB; Ponto 5 - Santa Rita/PB; Ponto 6 - Mamanguape/PB; Ponto 7 - Mamanguape/PB (solo vegetação nativa).  
Unidades de medidas: P ( $\text{mg dm}^{-3}$ ); Ca, Mg, H ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ).

Figura 8 – Mapa de símbolos pontuais proporcionais dos valores da capacidade de troca catiônica (CTC), matéria orgânica (MO), hidrogênio (H), potencial hidrogeniômico (pH), quantificados de amostras de solos arenosos coletados em área de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa nos estados de Pernambuco e Paraíba.

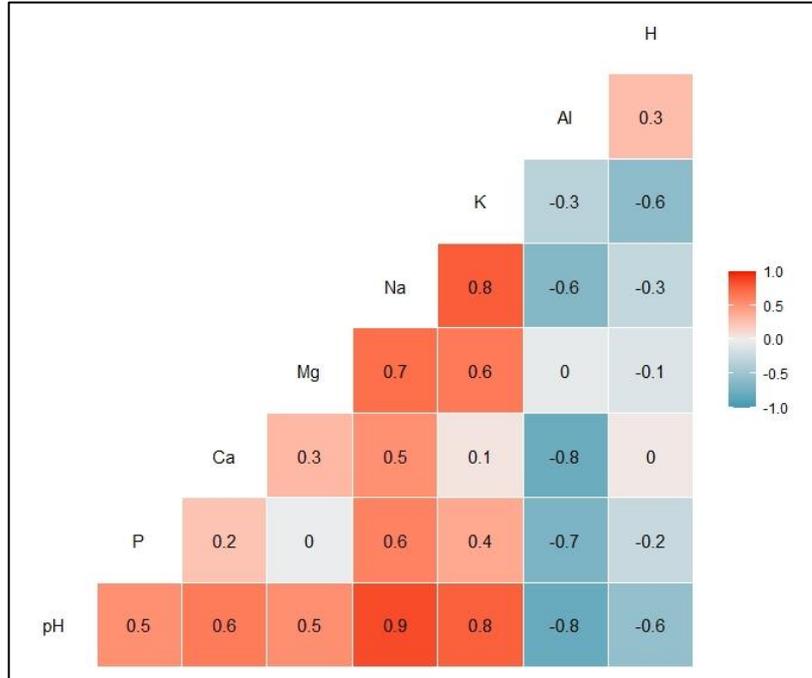


Legenda: Ponto 1 - Itapissuma/PE; Ponto 2 - Goiana/PE; Ponto 3 - Goiana/PE; Ponto 4 - Pedras de Fogo/PB; Ponto 5 - Santa Rita/PB; Ponto 6 - Mamanguape/PB; Ponto 7 - Mamanguape/PB (solo vegetação nativa).  
Unidades de medias: CTC e H (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>); MOS (%); pH (H<sub>2</sub>O).

Foram encontradas correlações positivas fortes (1 a 0,7) entre: Na com pH,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ , pH e  $K^+$ . Destacam-se também as correlações positivas de médio grau de similaridade com variação de 0,6 a 0,5 entre  $Na^+$  com P e  $Ca^{2+}$ ; pH com P,  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  e  $K^+$ . Em adição, são verificadas correlação positivas baixas e próximas a neutralidade, salientando a pouca similaridade de força entre os  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$  e P (Figura 9). Esse fato demonstra que tais elementos químicos para a análise elementar expressada no estudo possuem baixo poder de interação. Ressalta-se, ainda, que estes foram os elementos químicos que apresentaram maiores variações nas concentrações para as amostras de solos em área de cultivo de cana-de-açúcar, quando comparados ao controle (solo de vegetação nativa – P7). Correlação negativa alta (-0,8 a -0,7) foi observada de  $Al^{3+}$  com  $Ca^{2+}$ , pH, P e  $Na^+$ , ao passo que correlações negativas médias (-0,6): ocorrem entre  $Al^{3+}$  e  $Na^+$ ; e  $H^+$  com  $K^+$  e pH.

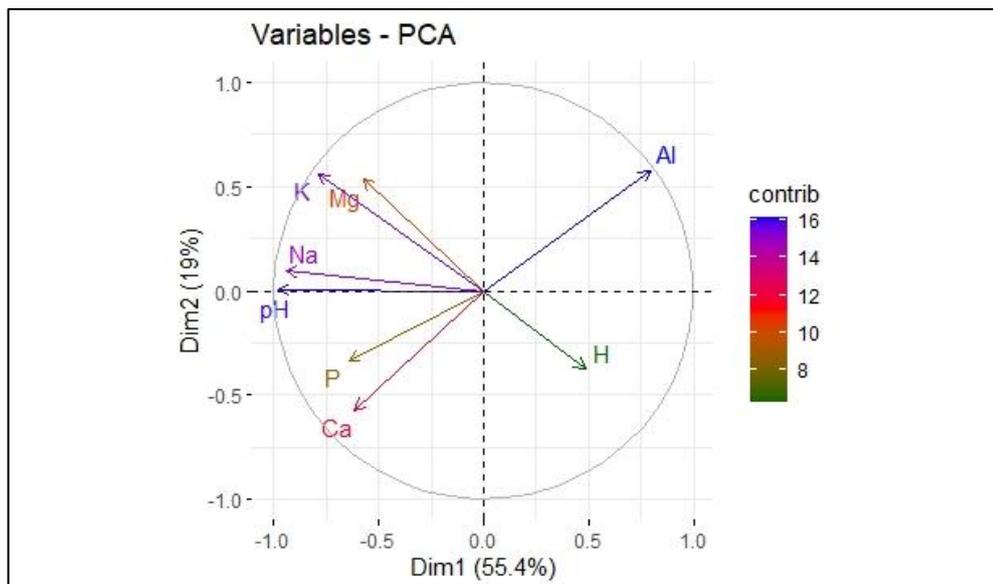
O mapa fatorial da contribuição permite revelar as maiores significâncias e associações entre os elementos químicos e atributos das amostras de solos arenosos em área de cultivo agrícola da monocultura canavieira e vegetação nativa. Constatou-se que o mapa fatorial ratifica os dados evidenciados pela matriz de correlação, destacando as principais variáveis  $Al^{3+}$ ,  $K^+$  e pH (Figura 10). A PCA explica 55% da variação dos dados, agrupando no quadrante positivo  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ , P,  $Ca^{2+}$  e pH e hidrogênio e alumínio no quadrante negativo. Verificou-se a partir da PCA a separação dos cátions de reação ácida dos básicos (Figura 10). Destaca-se que cálcio e fósforo se encontram opostos ao alumínio, bem como hidrogênio se apresenta contrário a magnésio, potássio e sódio. Ressalta-se que, em comparação aos valores obtidos para a área de vegetação nativa,  $Ca^{2+}$  e P foram os elementos químicos com maiores variações nas concentrações. É possível que tais alterações estejam diretamente associadas ao manejo do solo pela aplicação de fertilizantes, calagem, fertirrigação e queima da cana-de-açúcar.

Figura 9 - Matriz de correlação *heatmaps* dos elementos químicos quantificados de amostras de solos arenosos coletados em área de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa nos estados de Pernambuco e Paraíba.



Legenda: H<sup>+</sup> (hidrogênio); Al<sup>3+</sup> (alumínio); K<sup>+</sup> (potássio); Na<sup>+</sup> (sódio); Mg<sup>2+</sup> (magnésio); Ca<sup>2+</sup> (cálcio); P (fósforo); pH (potencial hidrogeniômico).

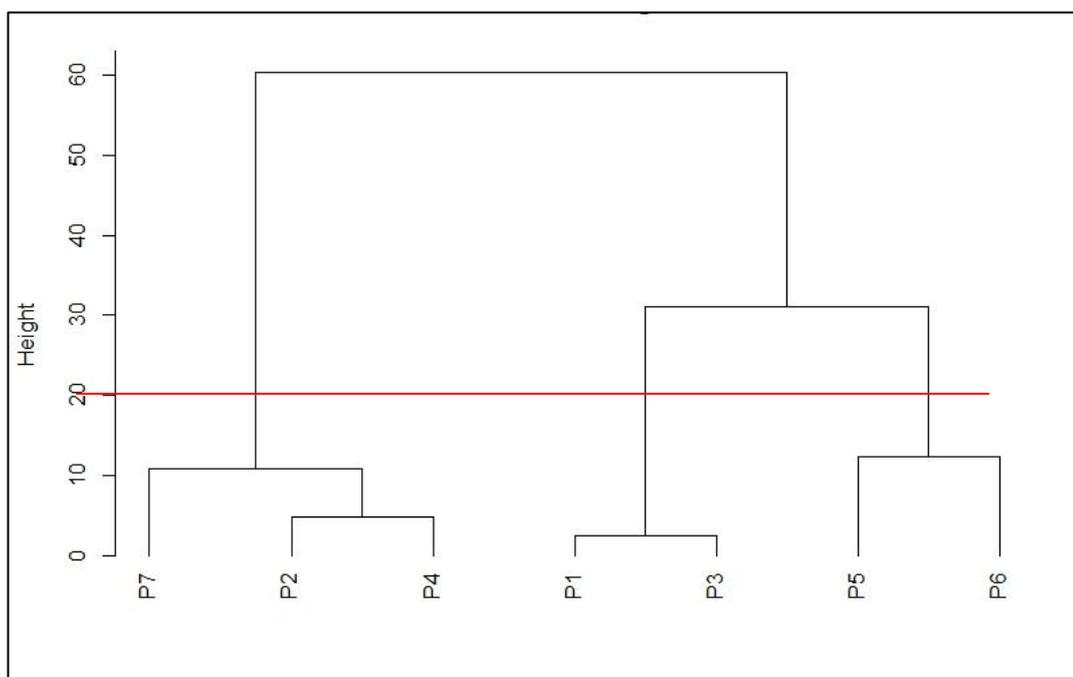
Figura 10 – Mapa fatorial da contribuição dos elementos químicos quantificados em amostras de solos arenosos em Tabuleiro Costeiro nos estados de Pernambuco e Paraíba em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa.



Legenda: H<sup>+</sup> (hidrogênio); Al<sup>3+</sup> (alumínio); K<sup>+</sup> (potássio); Na<sup>+</sup> (sódio); Mg<sup>2+</sup> (magnésio); Ca<sup>2+</sup> (cálcio); P (fósforo); pH (potencial hidrogeniômico).

A análise do agrupamento por similaridade para as amostras de solos arenosos demonstrou a formação de três *clusters*, a saber: (i) ponto 7 (solo de vegetação nativa) em associação com os pontos 2 e 4, entretanto esse agrupamento possui divergência, tendo em vista que P7 se distancia de P2 e P4, formando um subgrupo separado, em virtude do quantificação menor de P nas amostras; (ii) o agrupamento estabelecido por P1 e P3 ratificam a forte similaridade entre essas áreas, em virtude da quantificação maior de P nas amostras; (iii) o *cluster* formado pelos pontos 5 e 6 é o que apresenta menor grau de semelhança entre os observados, tendo se associado por não se enquadrarem nos opostos estabelecidos pelos demais agrupamentos (Figura 11). Deste modo, P5 e P6 se configuram como áreas de cultivo intensivo de cana-de-açúcar, entretanto não possuem, possivelmente os mesmos padrões de manejo do solo evidenciados nos pontos P1 e P3. Destaca-se que os agrupamentos formados no dendrograma estão, possivelmente, associados aos teores de fósforo nos pontos avaliados, sendo menores no *cluster* (i); maiores no agrupamento (ii) e intermediário na intersecção (iii).

Figura 11 – Dendrograma do agrupamento dos pontos amostrais de solos arenosos em Tabuleiro Costeiro nos estados de Pernambuco e Paraíba em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa para elementos químicos.

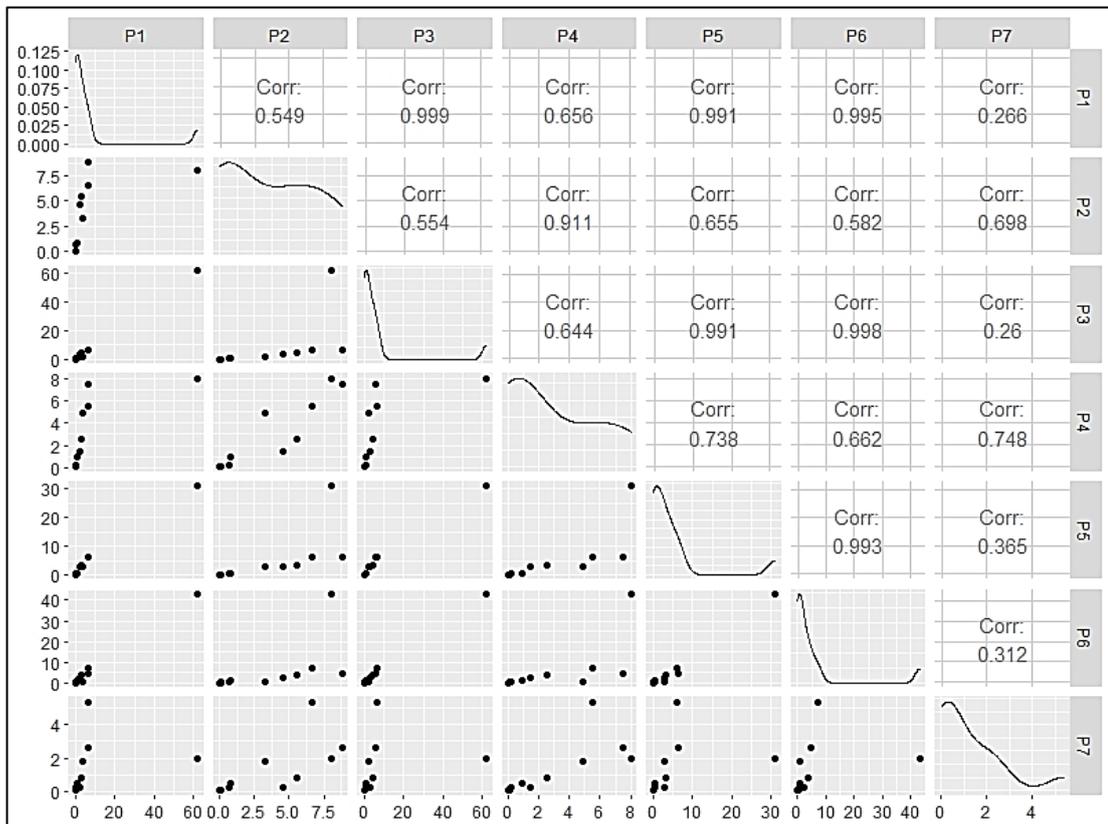


Legenda: Ponto 1 - Itapissuma/PE; Ponto 2 - Goiana/PE; Ponto 3 - Goiana/PE; Ponto 4 - Pedras de Fogo/PB; Ponto 5 - Santa Rita/PB; Ponto 6 - Mamanguape/PB; Ponto 7 - Mamanguape/PB (solo vegetação nativa).

A matriz de correlação para os pontos amostrais enfatiza os dados obtidos por meio do dendrograma, expressando numericamente o nível de força de semelhança entre os pontos

analisados (Figura 12). Ratificou-se a formação de um núcleo de similaridade dentre os pontos P1, P3, P5 e P6, onde as correlações são superiores a 0,990. Isso demonstra a existência de um padrão de associação, que apesar de geograficamente distantes são quimicamente semelhantes em relação ao P. Em contrapartida, os pontos P2 e P4 se encontram interligados entre si com correlação de 0,911, entretanto quando são comparados aos seus pares evidenciam diferenciações entre si. Para P2 é constatado menor gradiente de correlação que varia entre 0,549 (P2-P1) e 0,655 (P2-P5). Já o ponto P4 possui maior valor de similaridade estabelecida por 0,644 (P4-P3) a 0,738 (P4-P5). Esse fato demonstra que P2 e P4 estão mais correlacionados a P5, dentre os pontos de agricultura. Em adição, quando se verifica sua interligação com o ponto P7 (solo de vegetação nativa) é perceptível a existência de correlações próximas aos valores obtidos para as áreas de cultivo de cana-de-açúcar, sendo 0,698 (P2) e 0,748 (P4), demonstrando propriedades químicas com as características de um solo de ambiente conservado.

Figura 12 – Matriz de correlação dos pontos amostrais de solos arenosos em Tabuleiro Costeiro nos estados de Pernambuco e Paraíba em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa.



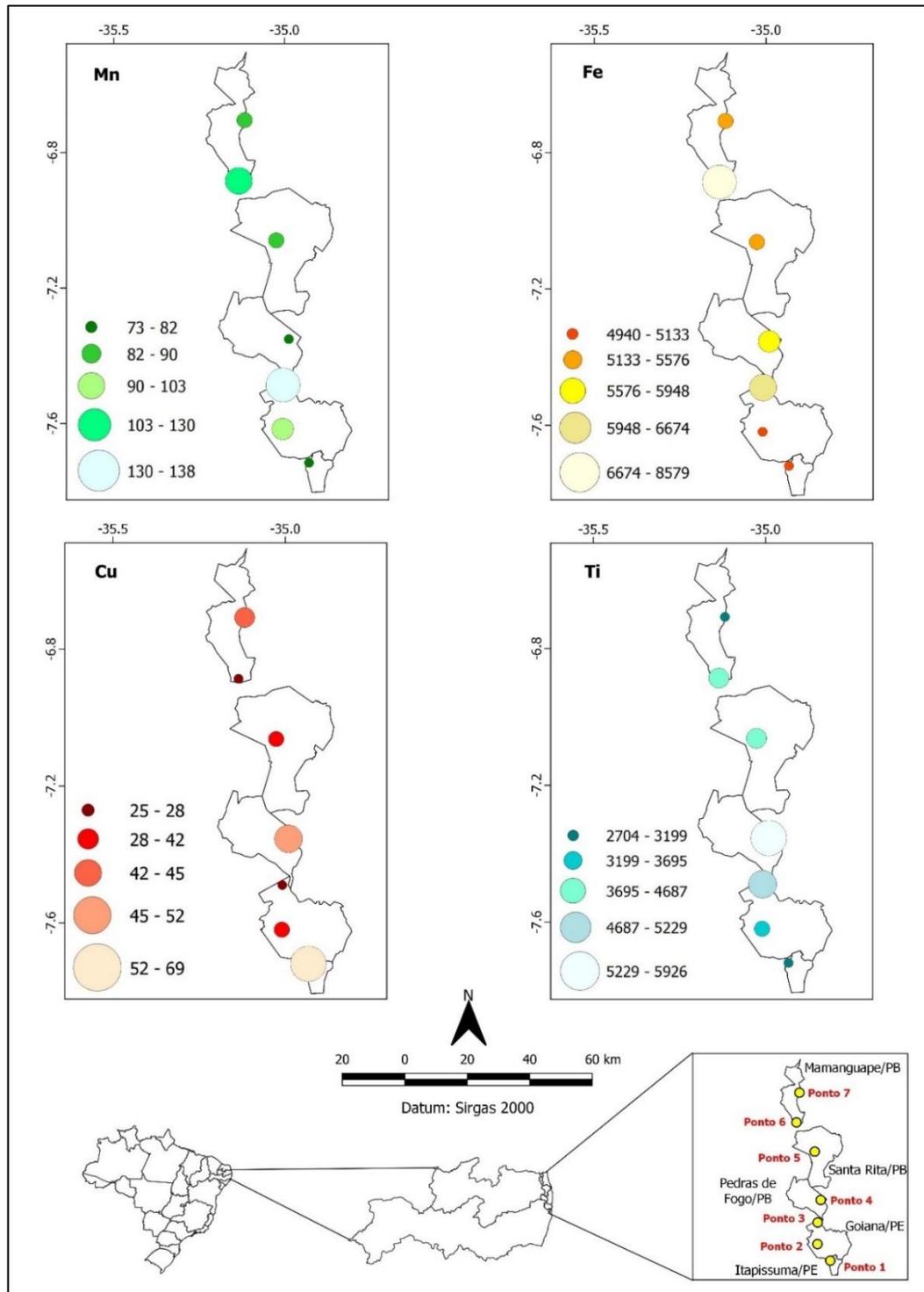
Legenda: Ponto 1 - Itapissuma/PE; Ponto 2 - Goiana/PE; Ponto 3 - Goiana/PE; Ponto 4 - Pedras de Fogo/PB; Ponto 5 - Santa Rita/PB; Ponto 6 - Mamanguape/PB; Ponto 7 - Mamanguape/PB (solo vegetação nativa).

Izidorio et al. (2005) expõem que o cálcio e magnésio possuem perdas de até 320 Kg ha<sup>-1</sup> e 80 Kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, em solos arenosos. Evidencia-se, conseqüentemente uma tendência às perdas catiônicas, ocasionando sua acidificação, aumento da solubilidade do alumínio e diminuição da disponibilidade de fósforo (GHIBERTO et al., 2009). A ausência ou baixas concentrações de fósforo no solo influenciam no desenvolvimento das plantas, tendo em vista que realizam associação com elementos químicos abundantes no solo tais como Fe, Si, Ca (BORGES et al., 2019). Solos arenosos por sua constituição de maior porosidade e textura predominante de classes de areia (DICK et al., 2009; OLIVEIRA FILHO et al., 2017), predomínio de Si (silício) e Fe (ferro) (Figuras 13 e 14).

Constatou-se, a partir da quantificação elementar por fluorescência de raios-X por dispersão de energia (EDXRF), que as áreas de agricultura canavieira, por suas práticas de manejo do solo promovem a elevação das concentrações dos elementos químicos, principalmente nos pontos em que existe uma produção tanto intensiva quanto extensiva (P1, P3, P5, P6) para Mn, Fe, Cu, Si. O ponto P4 pode ser considerado como exceção, pois apesar de se enquadrar em área agrícola, possui dinâmica diferenciada apresentando valores superiores para Ti e V.

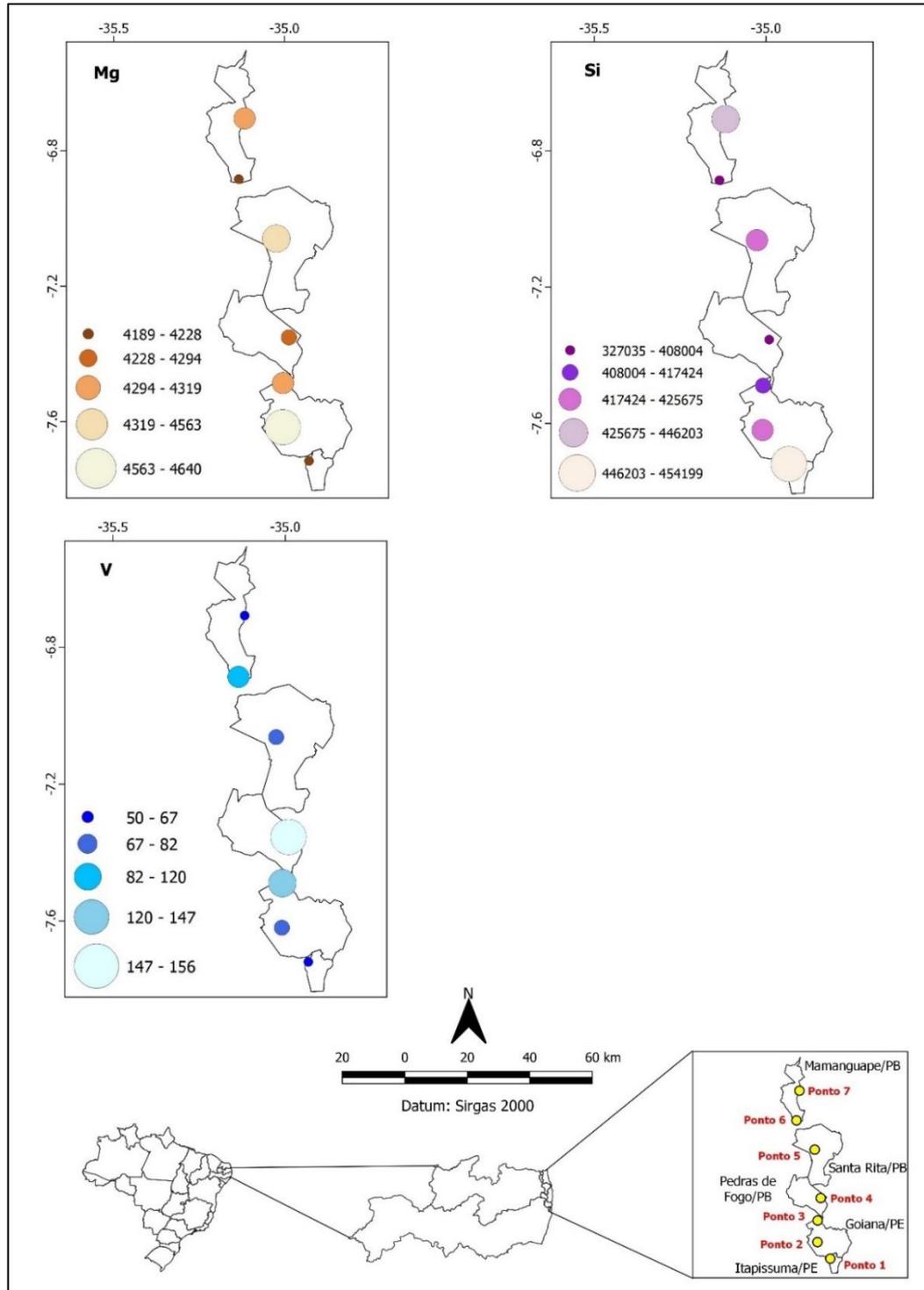
Verificou-se que o ponto 7 (solo vegetação natural) obteve teores acentuados para alguns dos elementos químicos quantificados, especificamente Cu e Si (Figuras 13 e 14). O silício é um dos principais constituintes no processo de formação dos solos, representando em média 5 a 40% da composição, sendo o óxido de silício considerado o mineral mais predominante nos solos (MA et al., 2001). Destaca-se que a presença de silício se deve à constituição mineralógica dos solos arenosos existentes nos tabuleiros costeiros, com abundância de quartzo em sua constituição.

Figura 13 – Mapa de símbolos pontuais proporcionais dos valores de manganês (Mn), ferro (Fe), cobre (Cu), titânio (Ti), quantificados por fluorescência de raios-X em amostras de solos arenosos coletados em área de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa nos estados de Pernambuco e Paraíba.



Legenda: Ponto 1 - Itapissuma/PE; Ponto 2 - Goiana/PE; Ponto 3 - Goiana/PE; Ponto 4 - Pedras de Fogo/PB; Ponto 5 - Santa Rita/PB; Ponto 6 - Mamanguape/PB; Ponto 7 - Mamanguape/PB (solo vegetação nativa).  
Unidade de medida:  $\text{mg kg}^{-1}$ .

Figura 14 – Mapa de símbolos pontuais proporcionais dos valores de magnésio (Mg), silício (Si), vanádio (V), quantificados por fluorescência de raios-X em amostras de solos arenosos coletados em área de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa nos estados de Pernambuco e Paraíba.



Legenda: Ponto 1 - Itapissuma/PE; Ponto 2 - Goiana/PE; Ponto 3 - Goiana/PE; Ponto 4 - Pedras de Fogo/PB; Ponto 5 - Santa Rita/PB; Ponto 6 - Mamanguape/PB; Ponto 7 - Mamanguape/PB (solo vegetação nativa).  
Unidade de medida: mg kg<sup>-1</sup>.

A matriz de correlação para amostras de solos arenosos, cujos elementos químicos foram quantificados por fluorescência de raios-X por dispersão de energia evidenciou relações de força entre os elementos químicos com predominância de correlações negativas (Figura 15). São observadas correlações positivas fortes (1 a 0,7) estabelecidas entre: (i) Ti e V; (ii) Mn e Fe. Constatam-se também correlações positivas médias (0,6 a 0,5): (iii) Cu e Si; (iv) Fe com V e Ti. Em contrapartida, são verificadas correlações negativas de elevado grau de força (0,9): (v) Fe e Si; (vi) Mn e Cu; e médias (0,6 a 0,5): (vii) Si com V, Ti e Mn; (viii) Fe e Cu (Figura 15). Destaca-se que o silício, apesar de não ser um nutriente, é importante para determinadas culturas, principalmente gramíneas como a cana-de-açúcar, sendo fator influenciador para o desenvolvimento dessa prática agrícola em solos arenosos (RAIJ, 2017). Em adição, solos ricos em sílica ou carbonatos tendem a possuir baixo teor de cobre. Contudo, se evidencia que cobre e silício formam uma correlação positiva, em que ambos apresentam relação direta no crescimento das concentrações (Figuras 15 e 16).

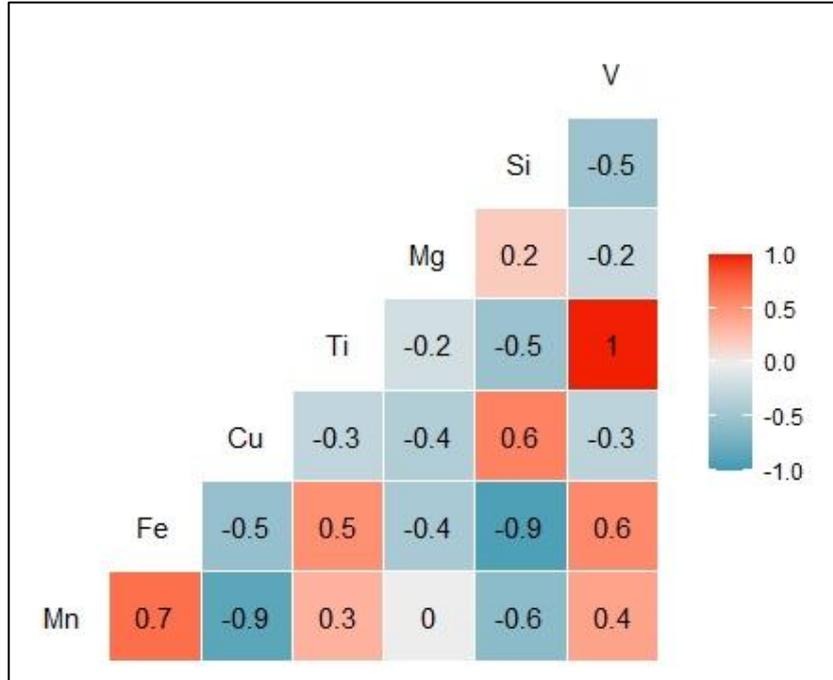
O mapa fatorial de contribuição reforça e enfatiza as interações entre os elementos químicos, expondo a presença de Cu e Si no primeiro quadrante da PCA, que se encontra em oposição direta a Mn, Fe, Ti e V (Figura 16). Salienta-se que o cobre foi o elemento químico com maior capacidade de contribuição dentro do mapa fatorial. De acordo com Jorge (1983), o teor de cobre nos solos arenosos é de 1 a 30 mg Kg<sup>-1</sup>. Entretanto, os pontos P1, P4, P5 e P7 apresentaram valores superiores ao padrão estabelecido, se incluindo a área de vegetação nativa com 45 mg Kg<sup>-1</sup> de cobre. Santos (2015) afirma que a textura do solo é um dos fatores que influenciam a disponibilidade de Cu, ressaltando que em solos arenosos, como os dos tabuleiros costeiros do Nordeste brasileiro, apresentam maior tendência a serem deficientes desse elemento. Porém, esse fato não foi observado nas amostras de solos avaliadas, principalmente para P1, P4, P5 e P7, que tiveram teores superiores aos máximo determinado por Jorge (1983). Ressalta-se que elevadas concentrações de Cu podem ocasionar aumento desproporcional na raiz da planta, inibindo seu crescimento e prejudicando o transporte para os brotos (SANTOS, 2015; RAIJ, 2017). Verificou-se que houve uma relação entre a concentração de Cu e a porcentagem de MOS, onde os pontos com maior presença de MOS (P2, P3, P6) tiveram valores de cobre inferiores a 29 mg Kg<sup>-1</sup>. É possível que o Cu tenha sido complexado e fixado nos compostos do solo.

Constata-se que o ferro é o micronutriente em maior teor nos solos brasileiros com variação entre 2 a 40%, calculado como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Os teores de ferro nos solos pobres se situam por volta de 200 mg kg<sup>-1</sup> (MALAVOLTA, 1980). Observou-se que a concentração de Fe nos pontos avaliados é superior a 4940 mg Kg<sup>-1</sup> (P2), fato que coloca as amostras de solo

analisadas com valores baixos. É possível que o Fe presente seja proveniente de minerais secundários de rochas cristalinas e/ou pela matéria orgânica, quelatos com ácidos fúlvicos e húmicos, e outros compostos orgânicos solúveis (MALAVOLTA, 1980). Salienta-se que nas áreas de cultivo agrícola os teores de ferro  $8579 \text{ mg kg}^{-1}$  (P6), apresentando-se ligeiramente superior ao ponto 7 (solo de vegetação nativa). O excesso de Fe no solo pode gerar nas plantas sintomas de toxicidade, destacando-se crescimento e desenvolvimento reduzido, folhas amareladas, raízes curtas, grossas, pouco ramificadas e de coloração avermelhada (FERREIRA e CRUZ, 1991). Em adição, se expõe que o ponto P7 também apresentou valor de Fe significativo  $5155 \text{ mg Kg}^{-1}$ , sendo possível sua existência devido à presença de organismos biológicos como os líquens (PEREIRA et al., 2019), que liberam a partir de suas hifas substâncias fenólicas (NASH, 2003) permitindo modificações químicas em solos arenosos (VASCONCELOS, 2009; SILVA, 2018).

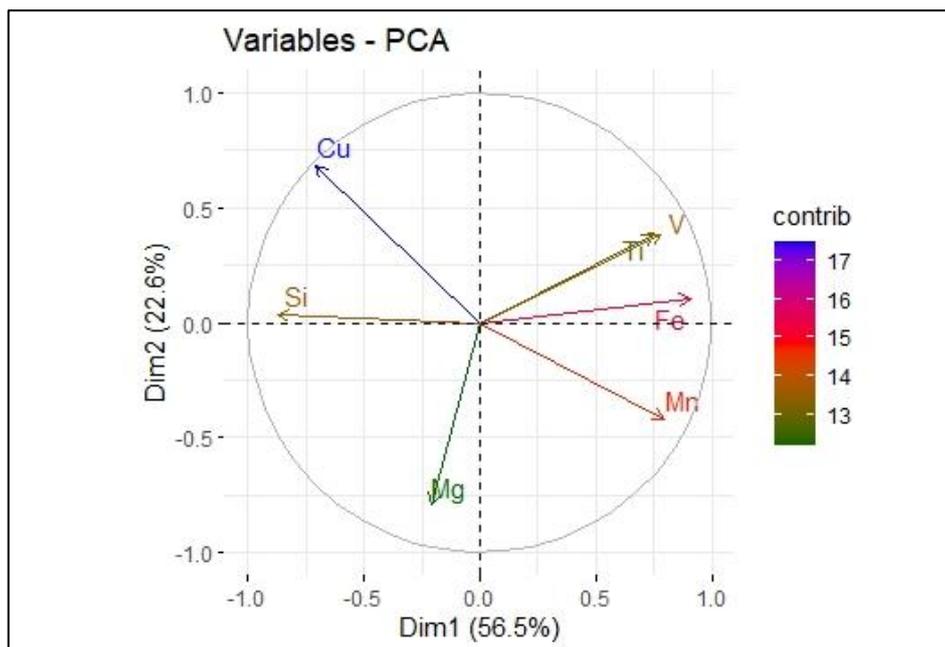
Evidencia-se a alta similaridade entre ferro e manganês, sendo que o Mn tem maior mobilidade. Esse fato ratifica os resultados obtidos, em que Fe e Mn exercem correlação positiva forte (0,7) entre si (Figura 15) e possuem eixo de contribuição próximo no mapa fatorial da PCA (Figura 16). Devido a mobilidade, a disponibilidade desse elemento pode variar bastante, incidindo em deficiência ou toxicidade às plantas (BORKERT, 1991; SOUZA, 2015). Nos solos, a concentração de manganês geralmente está na faixa de 20 a  $3000 \text{ mg kg}^{-1}$ , com a média de  $600 \text{ mg kg}^{-1}$  (SOUZA, 2015). Em relação aos valores obtidos nas amostras de solos arenosos de cultivo de cana-de-açúcar e solo de vegetação nativa, as concentrações mais elevadas foram encontradas nos pontos P3 ( $138 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e P6 ( $129 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Esse fato evidencia o contraste positivo existente dentre Mn e Fe, em que esses foram os pontos com maiores teores de ferro. Constata-se que todos os pontos analisados apresentaram valores de Mn dentro da faixa de normalidade para solos.

Figura 15 - Matriz de correlação *heatmaps* dos elementos químicos quantificados por fluorescência de raios-X em amostras de solos arenosos coletados em área de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa nos estados de Pernambuco e Paraíba.



Legenda: V (vanádio); Si (silício); Mg (magnésio); Ti (titânio); Cu (cobre); Fe (ferro); Mn (manganês).

Figura 16 – Mapa fatorial da contribuição dos elementos químicos quantificados por fluorescência de raios-X em amostras de solos arenosos coletados em área de cultivo de cana-de-açúcar e/ou vegetação nativa nos estados de Pernambuco e Paraíba.



Legenda: V (vanádio); Si (silício); Mg (magnésio); Ti (titânio); Cu (cobre); Fe (ferro); Mn (manganês).

A análise do agrupamento por similaridade para as amostras de solos arenosos a partir da quantificação por fluorescência de raios-X demonstrou a formação de três *clusters*: (i) ponto 6 isolado dos demais agrupamentos, evidenciando sua baixa similaridade (Figura 17). Esse fato pode estar relacionado aos elevados teores de Mn ( $129 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Fe ( $8579 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Ti ( $4686 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e reduzidas concentrações de Cu ( $25 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e Si ( $327.035 \text{ mg kg}^{-1}$ ), tornando-o um ponto com características diferenciadas, possivelmente motivado pelas formas de manejo do solo.

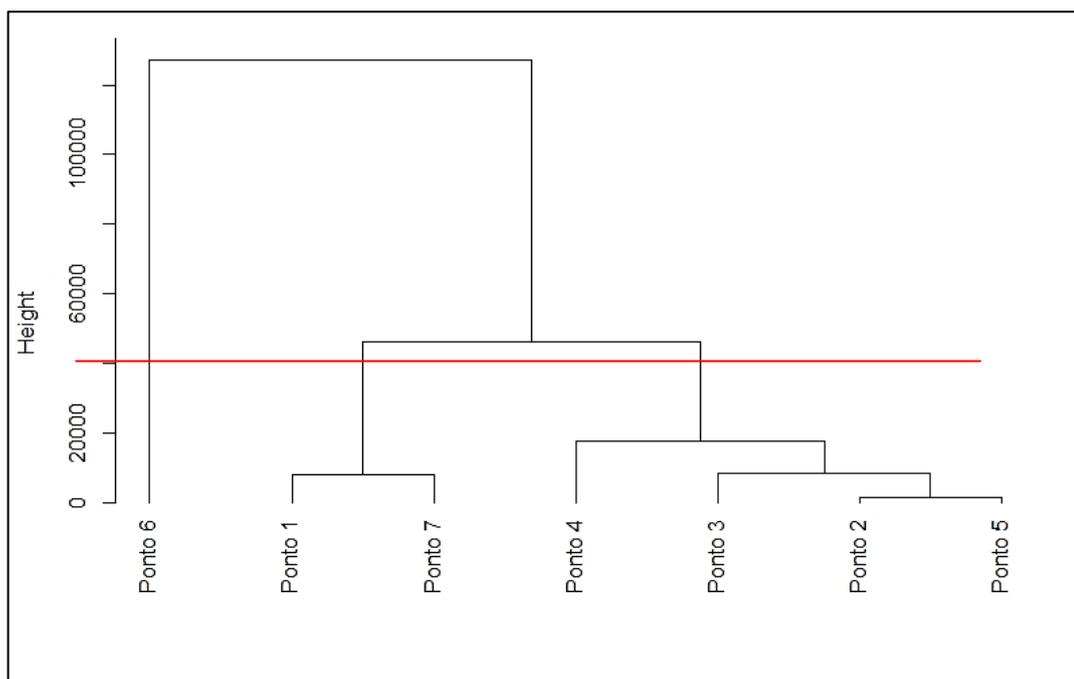
Ressalta-se que o teor de ferro encontrado em P6 pode estar associado à utilização da fertirrigação, onde a redução de  $\text{Fe}^{3+}$  para  $\text{Fe}^{2+}$ , por ação bacteriana, pode refletir no aumento significativo da solubilidade do nutriente no solo (RAIJ, 2017). Em adição, Chaves et al. (2019) salientam que a presença de acidobacteria em solo de cana-de-açúcar, em que são utilizados fertilizantes nitrogenados e vinhaça, pode impulsionar a disponibilidade de nutrientes no solo, especialmente cálcio, magnésio, alumínio, boro e zinco.

Destaca-se que P6 obteve elevada porcentagem de MOS (0,65 %), o que pode ter relação direta com o valor de ferro encontrado, pois o comportamento desse elemento metálico está intimamente ligado às ciclagens de oxigênio, enxofre e carbono (RAIJ, 2017), uma vez que a MOS está envolvida em diversos aspectos físicos, processos químicos e biológicos, sendo muito sensível às práticas de manejo e uso do solo, afetando diretamente a produtividade (MARTÍNI et al., 2020); (ii) o agrupamento estabelecido por P1 e P7 diverge do padrão, uma vez que é verificada uma correlação de semelhança entre pontos com estruturas de paisagem e uso do solo opostos (Figura 17). Entretanto, se constata proximidade entre os valores dos elementos químicos Mn (P1 –  $73 \text{ mg kg}^{-1}$  e P7 –  $83 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Fe (P1 –  $5132 \text{ mg kg}^{-1}$  e P7 –  $5155 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Cu (P1 –  $69 \text{ mg kg}^{-1}$  e P7 –  $45 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Ti (P1 –  $3198 \text{ mg kg}^{-1}$  e P7 –  $2704 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Si (P1 –  $454.199 \text{ mg kg}^{-1}$  e P7 –  $446.203 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Destaca-se que, apenas para Mn e Fe os teores de P7 (solo de vegetação nativa) se apresentaram superiores ao ponto 1 (área de agricultura de cana-de-açúcar).

Raij (2017) expõe que o manganês é um dos micronutrientes que devido ao intemperismo pode sofrer rápida oxidação ou redução, sendo sua forma solúvel  $\text{Mn}^{2+}$ , um cátion trocável existente na solução de solos ácidos. (iii) o *cluster* formado pelos pontos 4, 3, 2 e 5 demonstra que há uma convergência maior entre P2 e P5, principalmente para Mn (P2 –  $102 \text{ mg kg}^{-1}$  e P5 –  $89 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Ti (P2 –  $3694 \text{ mg kg}^{-1}$  e P5 –  $3788 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Mg (P2 –  $4640 \text{ mg kg}^{-1}$  e P5 –  $4563 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Si (P2 –  $424.188 \text{ mg kg}^{-1}$  e  $425.675 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Evidenciou-se a existência de um subgrupo constituído por P3 e P4, em que esses se aproximam estatisticamente de P2 e P5. Entretanto, se configuram com maior similaridade entre si,

especificamente nas concentrações de Ti (P3 – 5229 mg kg<sup>-1</sup> e P4 – 5926 mg kg<sup>-1</sup>), Mg (P3 – 4318 mg kg<sup>-1</sup> e P4 – 4293 mg kg<sup>-1</sup>), Si (P3 – 417.424 mg kg<sup>-1</sup> e P4 – 408.004 mg kg<sup>-1</sup>).

Figura 17 – Dendrograma do agrupamento para os pontos amostrais dos elementos químicos quantificados por fluorescência de raios-X de solos arenosos coletados em área de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa nos estados de Pernambuco e Paraíba.



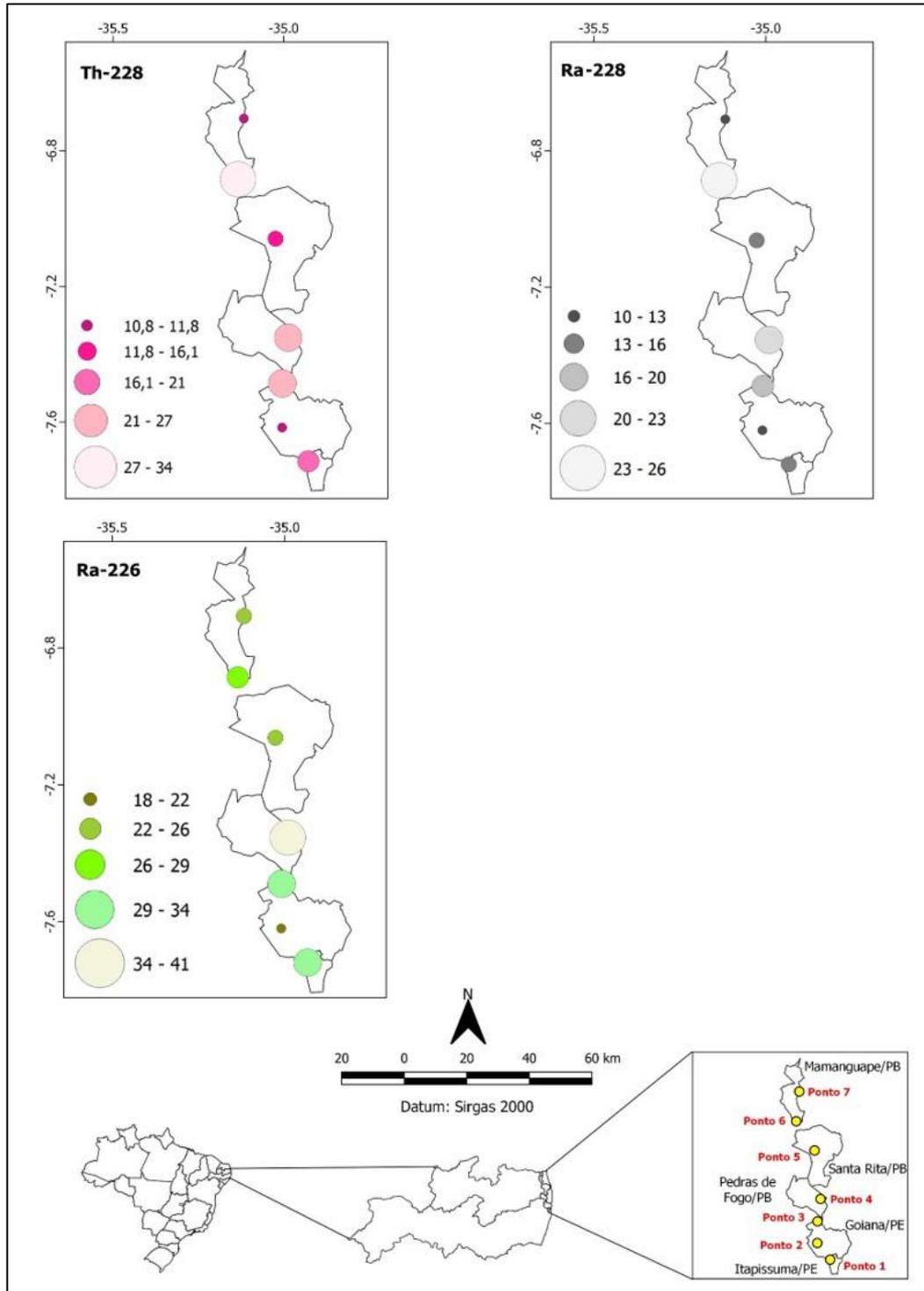
Legenda: Ponto 1 - Itapissuma/PE; Ponto 2 - Goiana/PE; Ponto 3 - Goiana/PE; Ponto 4 - Pedras de Fogo/PB; Ponto 5 - Santa Rita/PB; Ponto 6 - Mamanguape/PB; Ponto 7 - Mamanguape/PB (solo vegetação nativa).

Constatou-se que nas amostras de solos arenosos de cultivo de cana-de-açúcar e em área de solo com vegetação nativa a presença de radionuclídeos (Figura 18). Foram detectadas concentrações acima dos padrões observados, especificamente para <sup>228</sup>Th no ponto 6 (34 Bq/kg). Verifica-se que para os radionuclídeos quantificados de forma decrescente se obteve a seguinte distribuição: (i) <sup>228</sup>Th – P6 > P3 > P4 > P1 > P5 > P7 > P2; (ii) <sup>228</sup>Ra – P6 > P4 > P3 > P1 > P5 > P2 > P7; (iii) <sup>226</sup>Ra – P4 > P1 = P3 > P6 > P5 > P7 > P2.

É possível evidenciar que dentre a série de decaimento do <sup>226</sup>Ra, <sup>228</sup>Ra e <sup>228</sup>Th, o ponto 6 apresentou os maiores valores (34 Bq/kg e 26 Bq/kg, respectivamente). Em adição, os pontos 2 e 7 foram os que tiveram os menores níveis de radioatividade dentre os avaliados. Em contrapartida, para a série do <sup>238</sup>U observada por meio do <sup>226</sup>Ra, o ponto 4 demonstrou os maiores níveis, possivelmente associado aos fatores de formação geológica da área.

Monitoramento da radioatividade foram realizados em municípios do estado da Paraíba, que evidenciaram a presença de urânio em quantidades não significativas em blocos rochosos aflorantes e pontuais em Pocinhos (COSTA, 2014), pontos anômalos de urânio e tório, condicionados pela geologia dos afloramentos em São Mamede (CHARFUELÁN, 2014), níveis de radioatividade natural superior à média global em matérias primas de olarias nos municípios de São José Sabugí e Santa Luiza (ARAÚJO, 2014). Verifica-se que dentre os pontos avaliados todos se encontram dentro dos valores normais para as características físico-ambientais das áreas, a exceção do ponto 6 para  $^{228}\text{Th}$ .

Figura 18 – Mapa de símbolos pontuais proporcionais dos valores dos radionuclídeos tório (Th-228) e rádio (Ra-228 e Ra-226), quantificados em amostras de solos arenosos coletados em área de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa nos estados de Pernambuco e Paraíba.



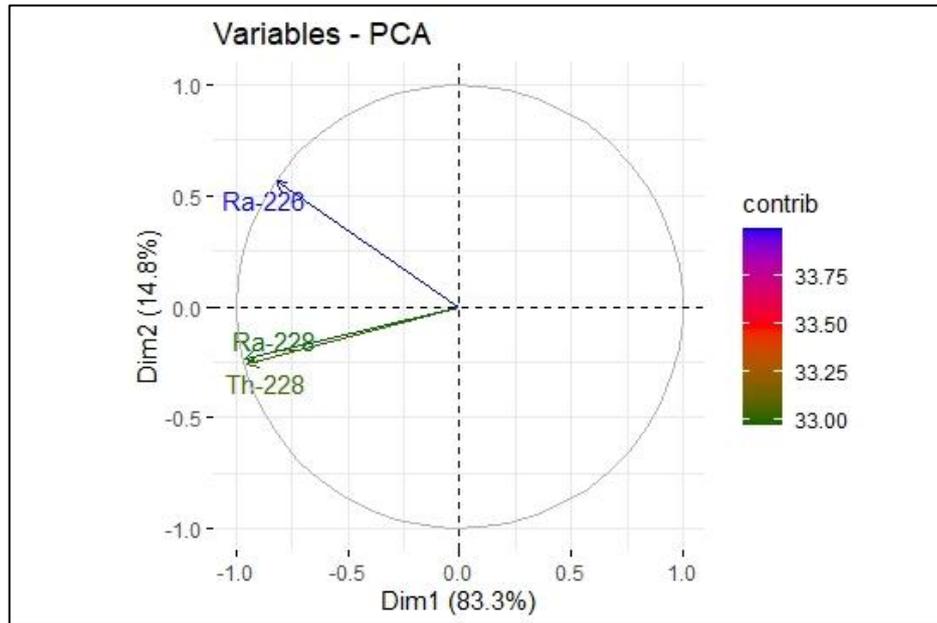
Legenda: Ponto 1 - Itapissuma/PE; Ponto 2 - Goiana/PE; Ponto 3 - Goiana/PE; Ponto 4 - Pedras de Fogo/PB; Ponto 5 - Santa Rita/PB; Ponto 6 - Mamanguape/PB; Ponto 7 - Mamanguape/PB (solo vegetação nativa).  
Unidade de medida: Bq/kg.

O mapa fatorial da contribuição dos radionuclídeos  $^{228}\text{Th}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{226}\text{Ra}$  em amostras de solos arenosos de tabuleiro costeiro com práticas agrícolas da monocultura canavieira e em área de solo de vegetação nativa, ratificou a semelhança existente entre os elementos de mesma série radioativa (Figura 19). Constatou-se que  $^{228}\text{Th}$  e  $^{228}\text{Ra}$  se encontram próximos, entretanto possuem baixa contribuição. Silva (2006) expõe que o  $^{228}\text{Ra}$  possui similaridade química com cálcio, por estarem localizados na família dos metais alcalino-terrosos e, podem ser facilmente absorvidos.

Evidencia-se que o  $^{226}\text{Ra}$  teve maior carga de importância dentro de mapa fatorial. É possível que isso seja influenciado pelas concentrações obtidas, tendo em vista que dentre os três radionuclídeos quantificados o  $^{226}\text{Ra}$  apresentou os maiores valores, principalmente no ponto 4 (41 Bq/kg). Salienta-se que esse arranjo foi ressaltado pela matriz de correlação, corroborando a forte similaridade entre  $^{228}\text{Th}$  e  $^{228}\text{Ra}$  (0.941), sendo os agrupamentos formados com o  $^{226}\text{Ra}$  inferiores a 0,66 (Figura 20).

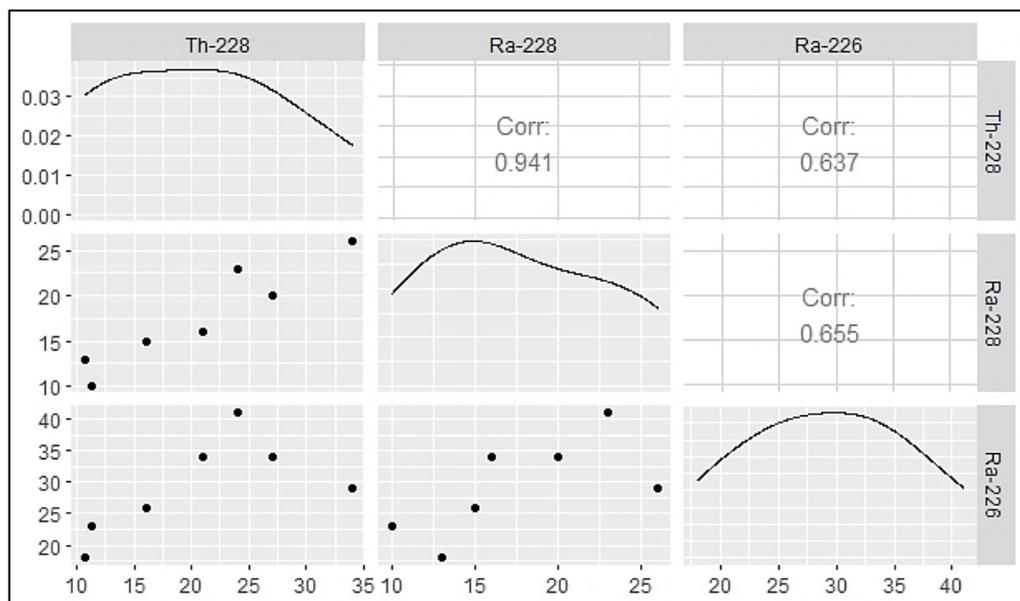
Silva (1995) destaca que o  $^{226}\text{Ra}$ , por emissão alfa, forma o  $^{222}\text{Rn}$  que é responsável por mais de 2/3 da dose média anual recebida pelo ser humano. Por ser uma série geradora do  $^{210}\text{Pb}$ , metal pesado e emissor beta, condiciona alta radiotoxicidade. A quantidade de radiação emitida pelas rochas pode ocasionar problemas no desenvolvimento das plantas e na biodiversidade, por este motivo, o monitoramento dos elementos radionuclídeos é de suma importância para o desenvolvimento sustentável e equilíbrio ecológico destes ambientes.

Figura 19 – Mapa fatorial da contribuição dos radionuclídeos tório (Th-228) e rádio (Ra-228 e Ra-226), quantificados em amostras de solos arenosos coletados em área de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa nos estados de Pernambuco e Paraíba.



Legenda: Ponto 1 - Itapissuma/PE; Ponto 2 - Goiana/PE; Ponto 3 - Goiana/PE; Ponto 4 - Pedras de Fogo/PB; Ponto 5 - Santa Rita/PB; Ponto 6 - Mamanguape/PB; Ponto 7 - Mamanguape/PB (solo vegetação nativa).

Figura 20 – Matriz de correlação dos radionuclídeos tório (Th-228) e rádio (Ra-228 e Ra-226), quantificados em amostras de solos arenosos coletados em área de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa nos estados de Pernambuco e Paraíba.

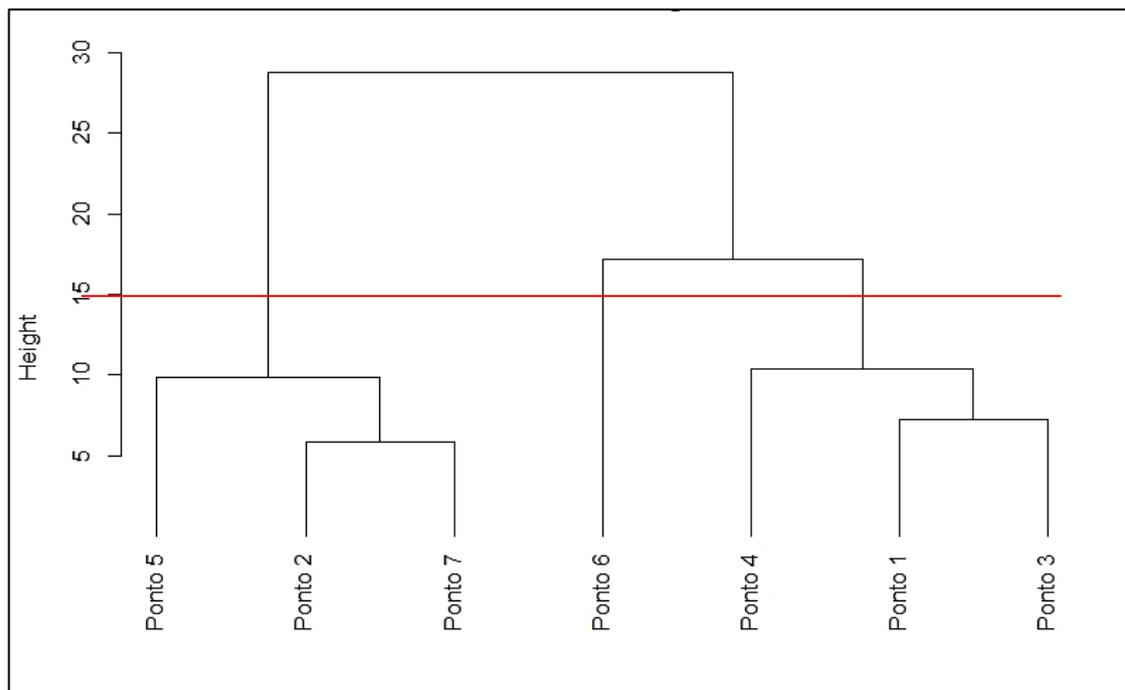


Legenda: Ponto 1 - Itapissuma/PE; Ponto 2 - Goiana/PE; Ponto 3 - Goiana/PE; Ponto 4 - Pedras de Fogo/PB; Ponto 5 - Santa Rita/PB; Ponto 6 - Mamanguape/PB; Ponto 7 - Mamanguape/PB (solo vegetação nativa).

As rochas ao sofrerem intemperismo liberam radionuclídeos para o ambiente (água, solo, atmosfera), que podem ser acumulados e serem alterados no sistema água-solo por processos geoquímicos. Esses podem ser transportados pela solubilidade, grau de adsorção e/ou por processos de trocas de íons entre os constituintes do solo e da água, sendo capazes de interferir na cadeia alimentar por assimilação pelos organismos vivos (CAMARGO, 1994). No solo, a curto prazo, os radionuclídeos podem ser incorporados e serem modificados quimicamente por valência elementar, migração vertical ou adsorção pelas raízes das plantas. Assim sua biodisponibilidade pode afetar diretamente os processos ecológicos e a ciclagem dos nutrientes (DAVIS et al., 1999).

A análise do agrupamento por similaridade para as amostras de solos arenosos utilizados para cultivo agrícola ou não, por meio da quantificação de radionuclídeos evidenciou a formação de três *clusters* (Figura 21): (i) foi estabelecido um agrupamento de semelhança entre os pontos 5, 2 e 7. Ressalta-se que, apesar de P5 estar inserido nesse *cluster* se constata uma baixa similaridade e maior distância Euclidiana, em relação a P2 e P7; (ii) observou-se um segundo eixo de formação do dendrograma, no qual houve o estabelecimento de P6 isolado dos demais pontos analisados. Esse fato pode estar relacionado aos valores elevados de  $^{228}\text{Th}$  e  $^{228}\text{Ra}$ , que podem ser motivados pela formação geológica local e/ou influência do uso de fertilizantes em associação com os subprodutos gerados pela atividade canavieira; (iii) o terceiro eixo do *cluster* é formado pelos pontos 4, 1 e 3, possivelmente essa configuração grupal foi estabelecida pela semelhança da concentração de  $^{226}\text{Ra}$  evidenciadas nas amostras, 41 Bq/kg (P4), 34 Bq/kg (P1 e P3) (Figura 21).

Figura 21 – Dendrograma do agrupamento dos pontos amostrais de solos arenosos em tabuleiro costeiro nos estados de Pernambuco e Paraíba em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e vegetação nativa para os radionuclídeos tório (Th-228) e rádio (Ra-228 e Ra-226).



Legenda: Ponto 1 - Itapissuma/PE; Ponto 2 - Goiana/PE; Ponto 3 - Goiana/PE; Ponto 4 - Pedras de Fogo/PB; Ponto 5 - Santa Rita/PB; Ponto 6 - Mamanguape/PB; Ponto 7 - Mamanguape/PB (solo vegetação nativa).

Garcêz (2016) ao determinar as concentrações de radionuclídeos em fertilizantes minerais comercializáveis, evidenciou que os fertilizantes fosfatados apresentaram valores médios de 435 Bq/kg ( $^{228}\text{Ra}$ ) e 429 Bq/kg ( $^{226}\text{Ra}$ ), sendo parâmetros considerados normais. Já os fertilizantes NPK (nitrogênio/fósforo/potássio) apresentaram concentrações médias de 142,9 Bq/kg ( $^{228}\text{Ra}$ ) e 98,7 Bq/kg ( $^{226}\text{Ra}$ ). Observa-se assim, que os fertilizantes fosfatados foram os que obtiveram os maiores teores de radionuclídeos. Esse fato revela a intensidade que os fertilizantes fosfatados possuem, por serem um dos mais utilizados no cultivo da cana-de-açúcar. Dessa forma, se revertem como possíveis agentes potencializadores da radiação ionizante no ambiente e no ser humano. Em contraponto, estudos desenvolvidos no estado de Pernambuco em áreas de manguezais (PAIVA et al., 2015), em amostras ambientais de areais minerais (FARIAS, 2011) e perfis de solo no sertão do Pajeú e Moxotó (MACIEL NETO, 2017) revelaram baixas concentrações de  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{226}\text{Ra}$ , demonstrando que esses ambientes avaliados não apresentam anomalias radioativas.

## 5 CONCLUSÕES

- Constatou-se que os pontos de agricultura canavieira em solos arenosos nos estados de Pernambuco e Paraíba possuem formas de uso e manejo diferenciados, sendo os pontos 1 (Itapissuma/PE), 3 (Goiana/PE), 5 (Santa Rita/PB) e 6 (Mamanguape/PB) caracterizados como de práticas agrícolas intensivas e extensivas.
- Solos sob cultivo de cana, notadamente quando fertirrigados apresentam maiores teores de P,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , CTC e MOS, quando comparados ao solo de área de vegetação nativa.
- Evidenciou-se, a partir dos dados de fertilidade do solo, que os pontos 1, 3, 5 e 6 possuem elevada similaridade entre os dados apresentados na pesquisa, demonstrando semelhanças químicas apesar de geograficamente distantes.
- Verificou-se que as práticas de manejo em áreas agrícolas aumentaram os teores de Mn, Fe, Cu, Ti, Mg, Si e V no solo, principalmente nos pontos 1, 3 e 6, evidenciando as correlações positivas entre Mn, Fe, Ti e V, sendo opostas ao Cu e Si, em virtude do uso de técnicas de fertirrigação e correção do solo.
- Corroboraram-se os padrões de correlações existentes entre Cu e MOS (negativa), constatadas nos pontos 1, 4, 5 e 7, além de Fe e Mn (positiva) efetivadas por P3 e P6.
- Ratificou-se por meio de determinação radiométrica a existência de radionuclídeos em todos os pontos avaliados, sendo tanto de caráter natural (formação geológica) quanto intensificado pela inserção de fertilizantes, com ênfase aos fosfatados, e/ou fertirrigação, especificamente no ponto 6.
- Constatou-se que as práticas de uso e manejo do solo para o cultivo da cana-de-açúcar no ponto 6 (Mamanguape/PB) condicionaram ser área considerada de maior impacto ambiental e ecológico.

## REFERÊNCIAS

- ALTPETER, F.; ORABY, H. Sugarcane. In: KEMPKEN, F.; JUNG, C. (Eds.). **Genetic Modification of Plants**. Biotechnology in Agriculture and Forestry. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. v. 64p. 453–472.
- AMARAL, R. S. **Determinação de Urânio na Fosforita por Meio de Medidas Radiométricas e Análise por Ativação**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia Nuclear), Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1987, 143 p.
- ANDRADE, M. C. DE. Espaço e tempo na agroindústria canavieira de Pernambuco. **Estudos Avançados**, v. 15, n. 43, p. 267–280, dez. 2001.
- ANDRADE, M. B.; SOUSA, R. L. F.; COUTINHO, E. L. M.; et al. Multivariate analysis and modeling of soil quality indicators in long-term management systems. **Science of The Total Environment**, v. 657, p. 457–465, 2019.
- ARAÚJO, E. E. N. **Avaliação da Atividade do Rádio Equivalente na Matéria-Prima das Olarias do Sertão Paraibano**. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014, p. 82.
- AUDE, M. I. DA S. Estádios de desenvolvimento da cana-de-açúcar e suas relações com a produtividade. **Ciência Rural**, v. 23, n. 2, p. 241–248, ago. 1993.
- BARROS, R.P.et al. Alterações em atributos químicos de solo cultivado com cana-de-açúcar e adição de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. 40, 341–346. 2010.
- BORGES, B. M. M. N. et al. Organomineral phosphate fertilizer from sugarcane byproduct and its effects on soil phosphorus availability and sugarcane yield. **Geoderma** 339 (2019) 20–30
- BORKERT, C.M. **Micronutrientes no solo**. Piracicaba: POTAFOS, p.173-190, 1991.
- BRAMKI, A.; RAMDHANE, M.; BENRACHI, F. Natural radioelement concentrations in fertilizers and the soil of the Mila region of Algeria. **Journal of Radiation Research and Applied Sciences**, v. 11, n. 1, p. 49–55, jan. 2018.
- BRONICK, C.J.; LAL, R. Soil structure and management: A review. **Geoderma**, 124:3-22, 2005.
- BRUMBLEY, S. M. et al. Sugarcane. **Compendium of Transgenic Crop Plants**, p. 1-58, 2009.
- CAETANO, J. O. et al. Dinâmica da matéria orgânica de um neossolo quartzarênico de cerrado convertido para cultivo em sucessão de soja e milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 5, p. 1245–1255, out. 2013.

CAMARGO, I. M. C. **Determinação da concentração dos isótopos naturais de urânio e tório em amostras de água.** Dissertação de mestrado. IPEN/USP, São Paulo, 1994.

CAMPANILLI, M.; SCHAUFFER, W. B. **Mata Atlântica: Manual de adequação ambiental.** Brasília: MMA/ SBF. 2010.

CARMO, J. B. et al. Infield greenhouse gas emissions from sugarcane soils in Brazil: effects from synthetic and organic fertilizer application and crop trash accumulation. **GCB Bioenergy** 2013;5:267–80.

CAVALCANTI, R. Q. et al. Soil physical changes induced by sugarcane cultivation in the Atlantic Forest biome, northeastern Brazil. **Geoderma**, v. 370, p. 114353, jul. 2020.

CERTINI, G.; UGOLINI, F. C. An updated, expanded, universal definition of soil. **Geoderma**, v. 192, p. 378–379, jan. 2013.

CHAUHAN, P.; CHAUHAN, R. P.; GUPTA, M. Estimation of naturally occurring radionuclides in fertilizers using gamma spectrometry and elemental analysis by XRF and XRD techniques. **Microchemical Journal**, v. 106, p. 73–78, 2013.

CHARFUELÁN, J. M. J. **Caracterização de Material Radioativo de Ocorrência Natural (Norm) no Município de São Mamede – Paraíba.** Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014, 78 p.

CHAVES, M. G. et al. Acidobacteria Subgroups and Their Metabolic Potential for Carbon Degradation in Sugarcane Soil Amended With Vinasse and Nitrogen Fertilizers. **Frontiers in Microbiology**. July 2019. Volume 10. Article 1680. 1-16.

CHERUBIN, M. R. et al. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma** 267 (2016) 156–168.

CHIEN, S.H., PROCHNOW, L.I., CANTARELLA, H. Chapter 8 recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts. **Advances in Agronomy**, 1st ed. Elsevier Inc, 2009.

CHRISTOFOLETTI, C. A. et al. **Sugarcane vinasse: environmental implications of its use.** Waste Manag. 33, 2752–2761. 2013

CNEN/DNPM – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Projeto recursos de urânio nos fosforitos do Nordeste.** Rio de Janeiro, 1985. Relatório técnico.

CONCEIÇÃO, M. et al. **Estudo comparativo de métodos de determinação do teor de matéria orgânica em solos orgânicos do Estado do Rio de Janeiro.** In: Ministério da Agricultura e Abastecimento. N° 3, agosto 1999, p.1-5.

CONCEIÇÃO, F. T.; BONOTTO, D. M. Transferência de radionuclídeos, metais pesados e flúor para solos agrícolas na bacia do Rio Corumbataí (SP). **Geociências (São Paulo)**, v. 24, p. 67-76, 2005.

CONCEIÇÃO, F. T.; NAVARRO, G. R. B.; SILVA, A. M. Anthropogenic Influences on Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn Concentrations in Soils and Sediments in a Watershed with Sugar Cane Crops at São Paulo State, Brazil. **Int. J. Environ. Res.**, 7(3):551-560, 2013.

CORRÊA, E. A.; MORAES, I. C.; PINTO, S. A. F. Qualidade física de solos arenosos submetidos a diferentes usos da terra. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 05, p. 1501-1512, 2016.

COSTA, M. C. A. **Determinação de radionuclídeos e estimativa da dose ao ar livre no município de Pocinhos - PB**. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014, 70 p.

COWART, J. B.; BURNETT, W. C. The distribution of uranium and thorium decay-series radionuclides in the environment – a review. **Journal of Environmental Quality**, v. 23, p. 651-662, 1994.

CPRH. Companhia Pernambucana de Recursos Hídricos. **Diagnóstico socioambiental - litoral Norte/ o meio físico da área/ geologia e relevo** (Capítulo 2). Publicações CPRH / MMA - PNMA11. Recife, 2003.

CROUZEILLES, R. et al. There is hope for achieving ambitious Atlantic Forest restoration commitments. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 17, n. 2, p. 80–83, abr. 2019.

DAVIS, P.A. et al. An international test of the performance of environmental transfer models. **J. Environ. Radioact.**, v. 42, p. 117-130, 1999.

DEMATTE, J. L. I. Manejo e conservação de solos, na cultura da cana. **Visão agrícola**, v. 1, p. 8-17, 2004.

DICK, P. D. et al. Química da matéria orgânica do solo. In: MELLO, V. F.; ALLEONI, R. F. (Eds.). **Química e mineralogia do solo**. 1. ed. Viçosa: SBCS, 2009, v. 2, cap. 1, p. 1-55.

DONAGEMMA, G. K. et al. Characterization, agricultural potential, and perspectives for the management of light soils in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1003–1020, set. 2016.

EISENBUD, M., T.; GESSEL, P. **Environmental Radioactivity from Natural, Industrial and Military Sources**. 4th ed. New York: Academic Press, 656 p., 1997.

EL-BAHI, S. M.; SROOR, A.; MOHAMED, G. Y.; et al. Radiological impact of natural radioactivity in Egyptian phosphate rocks, phosphogypsum and phosphate fertilizers. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 123, p. 121–127, 2017.

EL-RAMADY, H. R. et al. Soil Quality and Plant Nutrition. In: OZIER-LAFONTAINE, H.; LESUEUR-JANNOYER, M. (Eds.). **Sustainable Agriculture Reviews 14**. Sustainable Agriculture Reviews. Cham: Springer International Publishing, 2014. v. 14p. 345–447.

EMBRAPA. **Manejo da Adubação Fosfatada para Cana-de-Açúcar no Cerrado**. 2015.

EMBRAPA. **Sistema de classificação brasileiro de solos**. 3º ed. rev ampl. - Brasília, DF, 2013. 353 p.

EMBRAPA TABULEIROS COSTEIROS. **Delimitação da área de atuação da Embrapa Tabuleiros Costeiros**. Relatório técnico. 2014

ERIKSSON, M.; OSÁN, J.; JERNSTRÖM, J.; et al. Source term identification of environmental radioactive Pu/U particles by their characterization with non-destructive spectrochemical analytical techniques. **Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy**, v. 60, n. 4, p. 455–469, 2005.

EXPÓSITO, A.; VELASCO, F. Exploring environmental efficiency of the European agricultural sector in the use of mineral fertilizers. **Journal of Cleaner Production**, v. 253, p. 119971, abr. 2020.

FAO. World Fertilizer Trends and Outlook to 2020: Summary Report. 2017.

FAO. Sugar. In: **Agricultural Outlook 2019-2028**, OECD-FAO, 12p, 2019.

FARIAS, E. E. G. **Determinação de  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  em amostras ambientais por espectrometrias alfa e gama**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2011.

FERNÁNDEZ, Z. H. et al. EDXRF as an alternative method for multielement analysis of tropical soils and sediments. **Environmental monitoring and assessment (DORDRECHT. ONLINE)**, v. 189, p. 447, 2017.

FILGUEIRAS, R. A. et al. Baseline, mapping and dose estimation of natural radioactivity in soils of the Brazilian state of Alagoas. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 167, p. 108332, fev. 2020.

FRANCO, A. L. C. et al. Relating the visual soil structure status and the abundance of soil engineering invertebrates across land use change. **Soil Tillage Res.** 173, 49–52. 2017.

FRAZÃO, L. A. et al. Propriedades químicas de um Neossolo Quartzarênico sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado mato-grossense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 5, p. 641–648, maio 2008.

FREITAS E. C.; ROCHA, O. Acute and chronic effects of sodium and potassium on the tropical freshwater cladoceran *Pseudosida ramosa*. **Ecotoxicology** 2011;20:88–96.

FREITAS, E. V. S.; NASCIMENTO, C. W. A.; GOULART, D. F. SILVA, J. P. S. Disponibilidade de cádmio e chumbo para milho em solo adubado com fertilizantes fosfatados. In: **Revista brasileira de ciências do solo**, 33:1899-1907, 2009

FERREIRA, E. M.; CRUZ, M.C.P. da. **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: 1991. 734 p

GALINDO-LEAL, C.; CÂMARA, I. DE G.; LAMAS, E. R. **Mata Atlântica: biodiversidade, ameaças e perspectivas**. São Paulo; Belo Horizonte: Fundação SOS Mata Atlântica; Conservação Internacional, 2005.

GARCÊZ, R. W. D. **Determinação das Atividades Específicas de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{40}\text{K}$  em Amostras de Fertilizantes Minerais**. Dissertação (Mestrado em Programa de Energia Nuclear), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016, 67 p.

GERMAN, L. A. et al. The environmental effects of sugarcane expansion: A case study of changes in land and water use in southern Africa. **Applied Geography**. 121 102240, 2020

GHIBERTO, P. J. et al. Leaching of nutrients from a sugarcane crop growing on an Ultisol in Brazil. **Agric Water Manag.** 96:1443–8, 2009

GRANT, C. A. Influence of Phosphate Fertilizer on Cadmium in Agricultural Soils and Crops, in: **Japanese Society of Pedology**. 143-155. 2011

GOES, T. et al. Sugarcane in Brazil Current technologic stage and perspectives. **Revista de Política Agrícola**, v. 20, n. 1, p. 52-65, 2011.

GONÇALVES, T. S. A floresta estacional decidual no Brasil: distribuição geográfica e influência dos aspectos pedogeomorfológicos na vegetação. **Revista Monografias Ambientais**, v. 14, n. 1, p. 144-153, 2015.

GUEDES, B. J. et al. Vulnerability of small forest patches to fire in the Paraíba do Sul River Valley, southeast Brazil: Implications for restoration of the Atlantic Forest biome. **Forest Ecology and Management**, v. 465, p. 118095, jun. 2020.

HASNER, C.; LIMA, A. A. DE; WINTER, E. Technology advances in sugarcane propagation: A patent citation study. **World Patent Information**, v. 56, p. 9–16, mar. 2019.

HILLEL, D. SOIL FORMATION. In: **Soil in the Environment**. [s.l.] Elsevier, 2008. p. 15–26.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (ED.). **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2ª edição revista e ampliada ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE, 2012.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Indicadores de Desenvolvimento Sustentável**. 2016.

INACIO, S. R. F. Produção e comercialização de insumos para produção de fertilizantes: Um panorama mundial e os paradigmas do Brasil. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2013.

IZIDORIO R. et al. Perdas de nutrientes por erosão e sua distribuição espacial em área sob cana-de-açúcar. **Eng Agrícola**. 2005;25:660–70.

JORGE, J.A. **Solo manejo e adubação**. 2ª ed: Nobel São Paulo, 1983

KOPITTKE, P. M.; MENZIES, Neal W.; WANG, Peng; et al. Soil and the intensification of agriculture for global food security. **Environment International**, v. 132, p. 105078, 2019.

LEÃO, H. C. R. S.; LIMA, Y. C. Produção de cana-de-açúcar no Nordeste. **Banco do Nordeste**, n. 181, 2018.

LIMA, R. P.; LEON, M. J. SILVA, A. R. Comparação entre dois penetrômetros na avaliação da resistência mecânica do solo à penetração. **Revista Ceres**, v.60, p. 577-581, 2013.

LIU, X.; LIN, W. Natural radioactivity in the beach sand and soil along the coastline of Guangxi Province, China. **Marine Pollution Bulletin**, v. 135, p. 446–450, out. 2018.

LUCA, E. F. et al. Avaliação de atributos físicos e estoques de carbono e nitrogênio em solos com queima e sem queima de canavial. **R. Bras. Ci. Solo**, 32:789-800, 2008

LU, C., TIAN, H. Global nitrogen and phosphorus fertilizer use for agriculture production in the past half century: shifted hot spots and nutrient imbalance. **Earth Syst. Sci. Data** 9, 181–192, 2017.

MA, J.F.; MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Silicon as a beneficial element for crop plants, In: DATNOFLF, L.E.; SNYDER, G.H.; KORNDÖRFER, G.H. (Eds). **Silicon in Agriculture**. The Netherland, Elsevier Science, p.17-39. 2001.

MACIEL NETO, J. A. **Avaliação de radionuclídeos primordiais em solos nativos com diferentes atividades agrícolas no estado de Pernambuco**. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2017.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. Ceres, São Paulo 1980. 251p.

MARAFON, A. C.; ENDRES, L. Adubação silicatada em cana-de-açúcar. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2011

MARASCA, I. et al. Chemical Properties of Ultisol in Different Tillage Systems Under Sugarcane Cultivation. 31. pp. 200–206. 2016.

MARTÍNI, A. F. et al. Is soil quality a concern in sugarcane cultivation? A bibliometric review. **Soil & Tillage Research** 204 (2020) 104751.

MARWA, E. M. M.; MEHARG, A. A.; RICE, C. M. Risk assessment of potentially toxic elements in agricultural soils and maize tissues from selected districts in Tanzania. **Science of The Total Environment**, v. 416, p. 180–186, 2012.

MORAES, M.M.G.A. et al. Joint water quantity–quality management in a biofuel production area — integrated economic–hydrologic modeling. **J Water Resour Plan Manag.** 2010;136:502–11.

MOORE, J. D.; OUIOMET, R. Effects of two types of Ca fertilizer on sugar maple nutrition, vigor and growth after 7 years. **Forest Ecology and Management**. 320 (2014) 1–5.

MTHIMKHULU, S. et al. The effect of 72 years of sugarcane residues and fertilizer management on soil physico-chemical properties. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. 225 (2016) 54–61.

MUTTON, M. A. et al. **Agricultural use of stillage**. Sugarcane Bioethanol. R&D for Productivity and Sustainability, Vol. 1, ed. L. A. B. Cortez (São Paulo), 423–440. 2010.

NASH III, T. H. **Lichen Biology**. Cambridge: Cambridge University Press/USA, 2003. 303 p.

OGUNLEYE, P. O.; MAYAKI, M. C.; AMAPU, I. Y. Radioactivity and heavy metal composition of Nigerian phosphate rocks: possible environmental implications. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 62, n. 1, p. 39–48, 2002

OLIVEIRA, J.C. M. et al. Nitrogen dynamics in a soil–sugar cane system. **Sci Agric** 2000; 57:467–72.

OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Cambissolo Háplico, sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1103-1112, 2013.

OLIVEIRA FILHO, F. X. et al. Zona de manejo para o preparo do solo na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. V.19, n.2, p. 186-193, 2015.

OLIVEIRA FILHO, J. S. et al. Organic matter labile fractions and carbon stocks in a typical Quartzipsamment cultivated with sugarcane harvested without burning. **Rev. Caatinga**, Mossoró, v. 30, n. 1, p. 24 – 31, jan. – mar., 2017

OLIVEIRA FILHO, J. S. et al. Organic matter labile fractions and carbon stocks in a typical quartzipsamment cultivated with sugarcane harvested without burning. **Rev. Caatinga**, Mossoró, v. 30, n. 1, p. 24 – 31, jan. – mar., 2017.

PACHECO, E. P.; CANTALICE, J. R. B. Compressibilidade, resistência a penetração e intervalo hídrico ótimo de um Argissolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos tabuleiros costeiros de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p. 403-4015, 2011.

PAGLIA, A. P.; PINTO, L.P. Biodiversidade da Mata Atlântica. In: E. Marone, D. Riet, & T. Melo (Orgs.). **Brasil Atlântico – um país com a raiz na mata**. Rio de Janeiro: Instituto BioAtlântica, p. 102-129, 2010.

PAIVA, J. D. S. et al. Natural radionuclides in mangrove soils from the State of Pernambuco, Brazil. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry** (Print), v. 307, p. 883-889, 2016.

PEREIRA, E. C. et al. Interaction of Cladoniaceae Lichens With Quartzarenic Neosols in Northeastern Brazil: A Mini Review. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, p. 2302-2312, 2019.

RAE, A. L.; MARTINELLI, A. P.; DORNELAS, M. C. Anatomy and morphology. In: **Sugarcane: physiology, biochemistry & functional biology** [S.l: s.n.], 716p., 2014.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. 2 ed. Piracicaba: International Plant Institute, 2017. 420 p.

RAMOS, P. Os mercados mundiais de açúcar e a evolução da agroindústria canavieira do Brasil entre 1930 e 1980: do açúcar ao álcool para o mercado interno. **Economia Aplicada**, v. 11, n. 4, dez. 2007.

RANTA, P. et al. The fragmented Atlantic rain forest of Brazil: size, shape and distribution of forest fragments. **Biodivers. Conserv.** 7, 385–403. 1998.

RESENDE, A. S. et al. Long-term effects of pre-harvest burning and nitrogen and vinasse applications on yield of sugar cane and soil carbon and nitrogen stocks on a plantation in Pernambuco, N.E. Brazil. **Plant Soil**. 281, 339–351. 2006

RIBEIRO, M. C. et al. Brazilian Atlantic forest: how much is left and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biol. Conserv.** 142, 1141–1153. 2009.

RIZZINI, C. T. **Tratado de fitogeografia do Brasil – Aspectos ecológicos**. São Paulo: Hucitec Edusp. vol. 2º. 1997. 747p.

ROCHA, P. S. G. DA; OLIVEIRA, R. P. DE; SCIVITTARO, W. B. Sugarcane micropropagation using light emitting diodes and adjustment in growth-medium sucrose concentration. **Ciência Rural**, v. 43, n. 7, p. 1168–1173, jul. 2013.

RODA, S.A. Aves. In: Porto, K.C., Almeida-Cortez, J.S., Tabarelli, M. (Eds.). **Diversidade Biológica e Conservação da Floresta Atlântica ao Norte do Rio São Francisco**. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, DF, pp. 279–302. 2006

RODRIGUES, R. C. et al. Calagem e disponibilidade de nutrientes após a incubação de um Neossolo Quartzarêmico. B. **Indústr.anim.**, N. Odessa, v.61, n.1, p.31-38, 2004

RODRIGUES, D.; ORTIZ, L. **Em Direção à Sustentabilidade da Produção de Etanol de Cana-de-açúcar no Brasil**. 2006. Disponível em:  
<[http://www.vitaecivilis.org.br/anexos/etanol\\_sustentabilidade.pdf](http://www.vitaecivilis.org.br/anexos/etanol_sustentabilidade.pdf)>

RODRIGUES, M. et al. Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savanna. **Sci. Total Environ.** 542, 1050–1061, 2016.

RODRIGUEZ-OROZ, M. C. et al. Initial clinical manifestations of Parkinson's disease: features and pathophysiological mechanisms. **Lancet Neurol.** 2009 Dec;8(12):1128-39.

ROSSI, C.Q. et al. Fósforo em cronosequência de cana-de-açúcar queimada no cerrado goiano: análise de ácidos húmicos por RMN de <sup>31</sup>P. **Química Nova** 36 (8), 1126–1130. 2013.

ROSSI, C.Q. et al. Effects on the composition and structural properties of the humified organic matter of soil in sugarcane straw burning: a chronosequence study in the Brazilian Cerrado of Goiás state. **Agric. Ecosyst. Environ.** 216, 34–43. 2016.

SANTOS, L. G. **Micronutriente cobre**. In: Micronutrientes no sistema solo-planta: sintomas de deficiência e toxidez. PRIMO, D. C.; MENEZES, R. S. C.; SAMPAIO, E. V. S. B. Novas edições acadêmicas. 2015

SANTOS, R. C. M.; PÁGLIA, A. Mata Atlântica: características, biodiversidade e a história de um dos biomas de maior prioridade para conservação e preservação de seus ecossistemas. **Acervo da Iniciação Científica**, p. 1-31, jun. 2010.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SANTOS, O. A. Q. et al. Fire lead to disturbance on organic carbon under sugarcane cultivation but is recovered by amendment with vinasse. **Science of the Total Environment**. 739 (2020) 140063

SAUEIA, C. H. R.; MAZZILLI, B. P. Distribution of natural radionuclides in the production and use of phosphate fertilizers in Brazil. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 89, n. 3, p. 229–239, jan. 2006.

SCHIESARI, L.; CORRÊA, D. Consequences of agroindustrial sugarcane production to freshwater biodiversity. **GCB Bioenergy** (2016) 8, 644–657.

SILVA, E. V. **Chumbo-210 e polônio-210 em águas subterrâneas da região fosfática de Pernambuco**. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1995.

SILVA, C. M. **Ra-226 e Ra-228 na dieta de bovinos leiteiros do agreste semi-árido de Pernambuco e a avaliação de riscos decorrentes do consumo de leite por uma população potencialmente exposta**. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

SILVA, A. A. **Dosimetria Radioecológica na Ocorrência Uranífera de São José de Espinharas-PB**. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014, 66 p.

SILVA, J. B. S. **Interação e dinâmica de substâncias produzidas por *Cladonia substellata* (líquen) com Neossolos Quartzarênicos de Tabuleiros costeiros do Nordeste**. Dissertação de Mestrado em Geografia. Universidade Federal de Pernambuco, 2018.

SILVA, J.M.C.; TABARELLI, M. Tree species impoverishment and the future flora of the Atlantic forest of northeast Brazil. **Nature**. 404, 72–74. 2000.

SILVA, F. C. et al. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes / editor técnico, Fábio Cesar da Silva. - 2. ed. rev. ampl. - Brasília, DF : Embrapa Informação Tecnológica, 2009.

SILVA, D. K. A. et al. Soil microbial biomass and activity under natural and regenerated forests and conventional sugarcane plantations in Brazil. **Geoderma** 189–190 (2012) 257–261

SILVA, W. P. et al. Monitoramento da salinidade de águas subterrâneas em várzea cultivada com cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça. **Rev Bras Eng Agrícola Ambient** 2014;18:394–401.

SILVA, F. C. et al. Avaliação da produtividade agrícola da cana-planta e cana-soca sob diferentes espaçamentos entre plantas para produção de açúcar e etanol. **Embrapa Informática Agropecuária-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**, 89p, 2015.

SILVA, F. B. V. et al. Assessing heavy metal sources in sugarcane Brazilian soils: an approach using multivariate analysis. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 188, n. 8, p. 457, ago. 2016.

SILVA, Y. J. A. B.; NASCIMENTO, C. W. A.; SILVA, Y. J. A. B.; et al. Rare Earth Element Concentrations in Brazilian Benchmark Soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, n. 0, 2016.

SILVA, F. B. V.; NASCIMENTO, C. W. A.; ARAÚJO, P. R. M. Environmental risk of trace elements in P-containing fertilizers marketed in Brazil. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 17, n. 3, p. 635–647, 2017.

SILVA, S. D. A. et al. Sistema de produção de cana-de-açúcar para agricultura familiar. **Embrapa Clima Temperado-Capítulo em livro técnico (INFOTECA-E)**, 9p, 2017.

SILVA, F. B. V.; NASCIMENTO, C. W. A.; ALVAREZ, A. M.; et al. Inputs of rare earth elements in Brazilian agricultural soils via P-containing fertilizers and soil correctives. **Journal of Environmental Management**, v. 232, p. 90–96, 2019.

SIMÕES, G. L. et al. Manejo de adubação e atributos físicos de Neossolo Quartzarênico cultivado com milho. **Colloquium Agrariae**, v. 11, n.1, Jan-Jun. 2015, p.01-10. DOI: 10.5747/ca.2015.v11.n1.a113

SIMÕES NETO, D. E. et al. Características agroindustriais da cana-de-açúcar em função da adubação fosfatada, em solos de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 4, p. 347-354, 2012.

SOBRAL-SOUZA, T. et al. Efficiency of protected areas in Amazon and Atlantic Forest conservation: A spatio-temporal view. **Acta Oecologica**, v. 87, p. 1–7, fev. 2018.

SONEGO, R. C.; BACKES, A.; SOUZA, A. F. Descrição da estrutura de uma Floresta Ombrófila Mista, RS, Brasil, utilizando estimadores não-paramétricos de riqueza e rarefação de amostras. **Acta Botanica Brasilica**, v. 21, n. 4, p. 943–955, dez. 2007.

SOUSA, E. E. et al. Qualidade nas análises químicas de matrizes biológicas pela fluorescência de raios-x por dispersão de energia. **International Nuclear Atlantic Conference – INAC**, Recife, 2013.

SOUZA, U. O. **Micronutriente manganês**. In: Micronutrientes no sistema solo-planta: sintomas de deficiência e toxidez. PRIMO, D. C.; MENEZES, R. S. C.; SAMPAIO, E. V. S. B. Novas edições acadêmicas. 2015

SOUZA, E. D. et al. Atributos físicos de um Neossolo Quartzarênico e um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.40, n.11, p.1135-1139, nov. 2005.

SOUZA, R.A. et al. Effects of sugarcane harvesting with burning on the chemical and microbiological properties of the soil. **Agriculture. Ecosystems and Environment** 155, 1–6 2012.

SUN, Y.; QIU, T.; GAO, M.; et al. Inorganic and organic fertilizers application enhanced antibiotic resistome in greenhouse soils growing vegetables. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 179, p. 24–30, 2019.

TAIZ, L. et al. (EDS.). **Plant physiology and development**. Sixth edition ed. Sunderland, Massachusetts: Sinauer Associates, Inc., Publishers, 2015.

TABARELLI, M.; AGUIAR, A. V.; RIBEIRO, M. C.; METZGER, J. P. A conversão da floresta atlântica em paisagens antrópicas: lições para a conservação da diversidade biológica das florestas tropicais, vol. 37, núm. 2, febrero, pp. 88-92, **In: Asociación Interciencia**, Venezuela, 2012.

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing. **United Nations Publication**. New York, 2010.

U. S. D. A. **Keys to soil taxonomy - twelfth edition**. 2014.

VARJABEDIAN, R. Lei da Mata Atlântica: Retrocesso ambiental. **Estudos Avançados**, v. 24, n. 68, p. 147–160, 2010.

VASCONCELOS, T. L. **Influência do fósforo na produção de substâncias transformadoras do solo sob *Cladonia verticillaris* (Raddi) Fr.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Geografia. Universidade Federal de Pernambuco, 2009. 74 p.

VASCONCELOS, D.C. **Estudo da radioatividade natural em areias de praias do extremo sul da Bahia utilizando métodos de análises nucleares**. Tese (Doutorado em Ciências e Técnicas Nucleares), Programa de Pós-graduação em Ciências e Técnicas Nucleares da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010, 213 p.

VIDAL, M. F. Setor sucroenergético nordestino. **Banco do Nordeste**, n. 25, 2018.

XAVIER, F. A. S. et al. Efeitos da irrigação localizada na granulometria e em atributos químicos de um Neossolo Quartzarênico cultivado com coqueiro anão. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 1, p. 55-63, jan-mar, 2012

WWF. **Water in the Zambian economy: Exploring shared risks and opportunities in the Kafue flats**. Lusaka: World Wildlife Foundation. 2016

ZHANG, Y.; XIE, D.; NI, J.; et al. Optimizing phosphate fertilizer application to reduce nutrient loss in a mustard (*Brassica juncea* var. *tumida*)-maize (*Zea mays* L.) rotation system in Three Gorges Reservoir area. **Soil and Tillage Research**, v. 190, p. 78–85, 2019.