



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

ANDREZZA KARLA DE OLIVEIRA SILVA

**AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO MUNICÍPIO DE CABROBÓ – PE, COM ÊNFASE
AOS NÍVEIS DE DEGRADAÇÃO DA VEGETAÇÃO E BIORREMEDIAÇÃO DO
SOLO NA ILHA DE ASSUNÇÃO**

Recife

2018

ANDREZZA KARLA DE OLIVEIRA SILVA

**AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO MUNICÍPIO DE CABROBÓ – PE, COM ÊNFASE
AOS NÍVEIS DE DEGRADAÇÃO DA VEGETAÇÃO E BIORREMEDIAÇÃO DO
SOLO NA ILHA DE ASSUNÇÃO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutora em Geografia.

Área de concentração: Regionalização e Análise Regional

Orientadora: Profa. Dra. Eugênia Cristina Gonçalves Pereira

Coorientadora: Profa. Dra. Rocío Santiago Tejero

Recife

2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves Silva CRB4-1260

- S586a Silva, Andrezza Karla de Oliveira.
Avaliação ambiental do município de Cabrobó – PE, com ênfase aos níveis de degradação da vegetação e biorremediação do solo na ilha de assunção / Andrezza Karla de Oliveira. – 2018.
226 f. : il.; 30 cm.
- Orientador(a): Profa. Dra. Eugênia Cristina Gonçalves Pereira.
Coorientador(a): Profa. Dra. Rocío Santiago Tejero.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, CFCH.
Programa de Pós-graduação em Geografia, Recife, 2018.
Inclui referências.
1. Geografia. 2. Ácido úsnico. 3. Caatinga. 4. Catástrofe ambientais 5. Salinização de solos. 6. Líquen. I. Pereira, Eugênia Cristina Gonçalves (Orientadora). II. Tejero. Rocío Santiago(Coorientadora). III. Título.

910 CDD (22. ed.)

UFPE (BCFCH2019-204)

ANDREZZA KARLA DE OLIVEIRA SILVA

**AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO MUNICÍPIO DE CABROBÓ – PE, COM ÊNFASE
AOS NÍVEIS DE DEGRADAÇÃO DA VEGETAÇÃO E BIORREMEDIAÇÃO DO
SOLO NA ILHA DE ASSUNÇÃO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Geografia.

Aprovada em: 19/12/2018.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Elvis Joacir de França (Examinador Externo)
Comissão Nacional de Energia Nuclear

Prof. Dr. Ranyére Silva Nóbrega (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Maria de Lourdes Lacerda Buriel (Examinadora Externa)
Pós-doutoranda da Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Josiclêda Domiciano Galvêncio (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho ao meu pai, Alberto Leopoldino da Silva, por todo esforço e dedicação incondicional em todos os momentos. Aos meus queridos amigos Deyvson Natanael, Kécia Santana, Sávyo Aguiar, Margarida Ferreira, Beatriz Teixeira e Victor Pina, sem ajuda de vocês não existiria uma linha dessa tese.

AGRADECIMENTOS

A construção desses agradecimentos não se refere, somente, aos quase 5 anos no Curso de doutorado em Geografia, vai muito além disso. Configura-se como um fechamento de um ciclo, que se iniciou bem antes do ingresso na Universidade em 2008. Ao manifestar minha gratidão nestas poucas palavras e, diretamente, a algumas pessoas não vai retratar todo o sentimento que se estabelece na finalização desse ciclo acadêmico.

Agradeço, imensamente, a força Divina que me fez seguir, mesmos nos momentos que já não havia esperança, permitindo a continuidade, o recomeço, o aprendizado. A mão de Deus foi meu sustento e me deu forças para resistir e, finalizar o que parecia impossível para uma realidade familiar, social e econômica tão contrária ao padrão.

Ao meu pai, Alberto Leopoldino da Silva, minha maior gratidão por todo esforço, incentivo, luta e dedicação, que me fez ser quem sou hoje. Por acreditar e nunca duvidar. Por ser o alicerce que me sustentou, quando os obstáculos surgiram. Pela compreensão dos meus limites, das minhas angústias e aflições no processo de construção dessa tese.

À professora Eugênia Pereira por representar um exemplo de profissional e pessoa. Expresso de forma muito humilde toda a minha gratidão pelo incentivo, confiança, apoio, dedicação e amizade ao longo desses quase 11 anos. Agradeço, imensamente, por ter acreditado em mim e auxiliado meu crescimento, permitindo que me tornasse uma profissional e uma pessoa melhor.

Ao professor Fernando Mota por toda a paciência, auxílio, convívio e conhecimento transmitido. Pela sua constante disponibilidade em auxiliar nos trabalhos de campo, pelos conselhos e sugestões, que sempre enriqueceram minhas pesquisas. Um exemplo de geógrafo completo capaz de interligar diferentes visões.

Toda minha gratidão aos meus queridos amigos do Laboratório de Geografia Ambiental (Lageam), Deyvson Natanael, Kécia Santana, Sávyo Aguiar, Margarida Ferreira, Beatriz Teixeira e Victor Pina, sem a ajuda de vocês essa tese não existiria. Essa tese é parte de cada um de vocês, cada coleta de campo, cada análise em laboratório. O resultado dessa tese é fruto de uma união, baseada em amizade e solidariedade. Tudo o que tenho hoje eu devo, principalmente, a vocês que compreenderam minhas dificuldades, limitações, porém mesmo assim acreditaram e seguiram ao meu lado.

A Iwelton Pereira, amizade que se firmou na graduação e foi se consolidando a cada dia no convívio.

Aos amigos do Laboratório de Geografia Ambiental Gustavo Alves, Steffane Silva, Edvaldo Dias, Hugo Vieira, Juliane Barbosa e, aqueles que seguiram novos caminhos Jefferson Assis e Lucas André, por toda amizade, união, ajuda, momentos de aprendizado e descontração. Por ser o laboratório mais feliz e companheiro do Departamento de Ciências Geográficas. O meu carinho especial a Emely Christine, que mesmo não sendo do laboratório, sua presença sempre nos alegra o coração.

Ao meu querido amigo Bruno Fonseca pela amizade, carinho, companheirismo, amigo sempre presente e disposto a ajudar.

A Matheus Vilaça e Jonatas Malaquias por todo o auxílio nos trabalhos de campo em Cabrobó para levantamento das espécies da Caatinga, a ajuda de vocês foi essencial.

As amigas que a graduação em Geografia me possibilitou encontrar, que mesmo na distância estão sempre presentes Andreza Kelly Vasconcelos e Nyanne Macêdo de Moraes. Muito obrigada por toda atenção, confiança, amizade, carinho e apoio em todos os momentos.

Ao professor Dr. Nicácio Henrique da Silva um exemplo incansável de dedicação profissional e sabedoria, que compartilha com seus alunos todos os dias o conhecimento adquirido ao longo de anos de pesquisa.

A professora Talitha Vasconcelos por ter me conduzido para o Lageam, sendo a responsável pelo início de minha trajetória nesse grupo de pesquisa.

Ao Sr. Rozalves Novaes e ao Sr. Valdemar Joaquim da Silva (Demar), moradores do município de Cabrobó, sempre com grande disposição e interesse em receber, e compartilhar conhecimento. Foram pessoas fundamentais na efetivação da pesquisa não mediram esforços para auxiliar.

Ao Sr. Raimundo, motorista da Universidade Federal de Pernambuco, que sempre com muito cuidado e atenção nos conduziu por essas estradas para realização do trabalho de campo. Agradeço por se mais que um motorista, por fazer parte da pesquisa, por todo auxílio que foi muito além de sua função.

Aos professores, pesquisadores, alunos e funcionários da Universidade Federal de Alagoas, Campus do Sertão/Delmiro Gouveia, que durante minha permanência como professora substituta me receberam com todo o carinho e afeto, em especial as professoras do curso de Geografia Francisca Vasconcelos e Sara Fernandes. Apesar do curto período que estive na UFAL, essa foi a melhor e maior experiência de ensino, com alunos maravilhosos para os quais guardo com muito carinho e saudade todos os momentos compartilhados, o conhecimento adquirido, muito mais por mim do que por eles.

Ao professor Elvis Joacir França por permitir a realização das análises de fluorescência de raios-x no Centro de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN), pelo conhecimento e aprendizado.

Ao professor Ranyére Silva Nóbrega pelas valiosas contribuições ao longo de minha trajetória universitária, sempre presente nos fechamentos dos meus ciclos acadêmicos monografia, dissertação e tese.

À professora Josiclêda Domiciano Galvínio por aceitar tão gentilmente participar como membro da banca avaliadora.

Aos integrantes e pesquisadores do Laboratório de Produtos Naturais Maria de Lourdes Lacerda Buriel, Mônica Barroso Martins, Hallysson Douglas, Bruna Cordeiro, Ana Paula Sant'Anna.

A minha coorientadora Rocío Santiago por toda atenção, ensinamento, auxílio em campo, paciência e conselhos para engrandecimento da tese.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, à Coordenação e aos funcionários Eduardo Vêras e Pablo, que sempre com muita atenção estão dispostos a auxiliar na resolução dos problemas.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa para desenvolvimento da pesquisa.

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pela concessão da bolsa de finalização de doutorado (BFD), essencial para concretização da etapa final da tese.

Meus sinceros agradecimentos!

RESUMO

A monitoração do processo de degradação ambiental no semiárido nordestino, especificamente no estado de Pernambuco, possibilita a construção de diagnósticos e propostas que visem o eficiente manejo do solo, permitindo formas de recuperação de áreas inutilizadas pelo processo de salinização de solos. Neste sentido, objetivou-se analisar e avaliar o processo de degradação ambiental no município de Cabrobó, Pernambuco, e propor técnicas de biorremediação para Neossolo Flúvico salinizado pelo uso e manejo agrícola. Para análise ambiental do município, imagens dos satélites Landsat TM 5 e Landsat OLI 8 foram adquiridas em intervalos quinquenais de 1989 a 2016, durante o período seco e úmido de cada ano analisado. As imagens foram processadas para obtenção dos Índices de vegetação NDVI, SAVI, IAF e Temperatura da superfície. Como área-foco para experimentação, selecionou-se a ilha de Assunção, no mesmo município, onde foi realizada seleção de remanescente/fragmento de vegetação em diferentes estágios de degradação. Foram delimitadas 21 unidades amostrais, com distância de 250 m entre cada parcela. Realizou-se identificação das espécies lenhosas vivas, medição do diâmetro da base rente ao solo (≥ 3 cm) e caule, além da altura (≥ 1 m). A partir desses dados foi feita a classificação estrutural da vegetação, o índice de biomassa lenhosa, e parâmetros fitossociológicos. Para estudos de técnicas de biorremediação, seis experimentos com Neossolo Flúvico foram montados com uso do líquen *Cladonia substellata* ou seu extrato etéreo, em associação ou não com adubo orgânico produzido em laboratório, além da utilização da radiação gama. Os experimentos tiveram duração de seis meses cada, sendo compostos de três réplicas e diferentes tratamentos. Foram realizadas análises de fenóis do talo, percolados e/ou incorporados ao solo, fertilidade química do solo e fluorescência de raios-x por dispersão de energia. Os resultados demonstraram que a vegetação de Caatinga é influenciada por fenômenos climáticos com expansão de áreas com solo exposto, em eventos de seca, restringindo a vegetação lenhosa a enclaves. Durante o intervalo úmido, há disseminação da vegetação densa/culturas irrigadas. Na análise de campo, foram contabilizados 964 indivíduos lenhosos constituídos por 13 espécies, com dominância de *Mimosa tenuiflora*. A classificação estrutural da vegetação é de porte arbustivo subarbóreo, com presença de feições subarbustiva. Evidenciou-se nos experimentos com Neossolo Flúvico que houve quelação das substâncias produzidas por *C. substellata*, sendo Ca e Mg os elementos químicos de maior suscetibilidade. Constatou-se que a interação Neossolo Flúvico, matéria orgânica e extrato etéreo, em experimento de coluna de solo conseguiu reduzir o teor de Na, tornando-o

ligeiramente sódico. Concluiu-se que no município de Cabrobó a incidência de eventos de seca tende a aumentar a susceptibilidade à desertificação e, interfere na diversidade florística e porte das espécies. Comprovou-se a capacidade de biorremediação do extrato etéreo de *C. substellata*, em associação com matéria orgânica, em ensaios de laboratório.

Palavras-chave: Ácido úsnico. Caatinga. Degradação ambiental. Salinização de solos. *Cladonia substellata*.

ABSTRACT

Monitoring of environmental degradation process in northeastern semi-arid region, specifically in Pernambuco (PE) state, makes it possible to construct diagnoses and proposals that aim at efficient soil management, allowing recovery forms in areas rendered unusable by soil salinization process. In this sense, the aim was to analyze and evaluate environmental degradation process in Cabrobó municipality - PE, proposing bioremediation techniques for salinized Fluvisols by the use and agricultural management. In order to perform environmental analysis of the municipality, images from satellites Landsat TM 5 and Landsat OLI 8 were obtained at five-year intervals from 1989 to 2016, during dry and humid period of each year analyzed. The images were processed to obtain NDVI, SAVI, IAF vegetation and surface Temperature Indices. As an experimentation focus area, island of Assunção was selected in the same municipality, where vegetation remnant/fragment selection was performed in different degradation stages. Twenty-one sample units were delineated, with distance of 250 m between each plot. Living woody species and diameter measurement of the basis to the ground (≥ 3 cm) and stem, besides height (≥ 1 m) were identified. From these data, vegetation structural classification, woody biomass index, and phytosociological parameters were performed. For bioremediation technique studies, six experiments with Fluvisols were assembled, using lichen *Cladonia substellata* or its ethereal extract, or in combination or not with organic fertilizer, produced in laboratory, in addition to gamma radiation use. Experiments lasted six months each, being composed of three replicates and different treatments. Stalk phenol analyzes, percolated and/or incorporated to the soil, chemical fertility of soil, and x-ray fluorescence by energy dispersion were performed. Results showed that Caatinga vegetation is influenced by climatic phenomena, with expansion of exposed soil areas, in drought events, restricting woody vegetation to enclaves. During wet interval, there is dense vegetation/irrigated crop spread. In field analysis, 964 woody individuals composed of 13 species, with dominance of *Mimosa tenuiflora* were counted. Vegetation structural classification is bushy subarboreal, with presence of subshrub features. It was evident, in the experiments with Fluvisols that there was chelation of substances produced by *C. substellata*, being Ca and Mg the chemical elements of greatest susceptibility. It was found that the interaction, Fluvisols, organic matter, and ethereal extract, in soil column experiment were able to reduce Na content, making it slightly sodic. It was concluded that in Cabrobó municipality, incidence of drought events tends to increase susceptibility to desertification and interfere with floristic diversity and

species. Bioremediation capacity of organic extract ethereal composition of *C. substellata*, in association with organic matter, in laboratory was verified.

Keywords: Usnic acid. Caatinga. Environmental degradation. Soils salinization. *Cladonia substellata*.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Modelo esquemático de geossistema proposto por Bertrand (2004).....	30
Figura 2 -	Desertificação, causas e consequências.....	38
Quadro 1 -	Classificação dos fatores de degradação das terras.....	39
Quadro 2 -	Indicadores da desertificação no Nordeste brasileiro propostos por Vasconcelos Sobrinho (1978a).....	42
Quadro 3 -	Indicadores do processo de desertificação no Nordeste brasileiro sugeridos por Vasconcelos Sobrinho baseados em Reining (1978).....	43
Quadro 4 -	Indicadores da desertificação para o Nordeste brasileiro propostos por Matallo Junior.....	45
Figura 3 -	Núcleos de desertificação do Nordeste brasileiro.....	49
Figura 4 -	Núcleos de desertificação estabelecidos pela classificação do INSA.....	50
Figura 5 -	Núcleo de desertificação de Cabrobó, Pernambuco.....	51
Figura 6 -	Mapa de localização da área de Caatinga selecionado para estudo na ilha de Assunção, município de Cabrobó, Pernambuco.....	68
Figura 7 -	Esquema da delimitação das parcelas no remanescente/fragmento da ilha de Assunção, município de Cabrobó (PE).....	69
Figura 8 -	Área de coleta de Neossolo Flúvico salinizado na ilha de Assunção, município de Cabrobó – PE.....	77
Figura 9 -	Área de coleta do líquen <i>Cladonia substellata</i>	78
Figura 10 -	Sistema de construção de biodecompositor orgânico para geração de matéria orgânica.....	80

Figura 11 -	Fluxograma dos experimentos de recuperação de Neossolo Flúvico salinizado.....	82
Figura 12 -	Distribuição dos tratamentos em experimento com Neossolo Flúvico salinizado associado à matéria orgânica e seus subprodutos, provenientes de biodecompositor.....	84
Figura 13 -	Balanço hídrico para o município de Cabrobó, Pernambuco, ao longo do ano de 1994.....	91
Figura 14 -	Balanço hídrico para o município de Cabrobó, Pernambuco, ao longo do ano 2000.....	92
Figura 15 -	Balanço hídrico para o município de Cabrobó, Pernambuco, ao longo do ano de 2001.....	93
Figura 16 -	Balanço hídrico para o município de Cabrobó, Pernambuco, ao longo do ano 2005.....	94
Figura 17 -	Balanço hídrico para o município de Cabrobó, Pernambuco, ao longo do ano de 2006.....	95
Figura 18 -	Balanço hídrico para o município de Cabrobó, Pernambuco, ao longo do ano de 2009.....	96
Figura 19 -	Balanço hídrico para o município de Cabrobó, Pernambuco, ao longo do ano de 2015.....	97
Figura 20 -	Balanço hídrico para o município de Cabrobó, Pernambuco, ao longo do ano de 2016.....	98
Figura 21 -	Mapa de solo do município de Cabrobó e da ilha de Assunção, Pernambuco.....	99
Figura 22 -	Mapas NDVI para o município de Cabrobó e ilha de Assunção durante o período úmido.....	107
Figura 23 -	Mapas NDVI para o município de Cabrobó e ilha de Assunção durante o período seco.....	108
Figura 24 -	Mapas do SAVI para o município de Cabrobó e ilha de Assunção durante o período úmido.....	111
Figura 25 -	Mapas do SAVI para o município de Cabrobó e ilha de Assunção durante o período seco.....	112
Figura 26 -	Mapas IAF para o município de Cabrobó e ilha de Assunção durante o período úmido.....	116

Figura 27 -	Mapas IAF para o município de Cabrobó e ilha de Assunção durante o período seco.....	117
Figura 28 -	Mapas da temperatura da superfície para o município de Cabrobó (PE) e ilha de Assunção durante o período úmido.....	120
Figura 29 -	Mapas da temperatura da superfície para o município de Cabrobó (PE) e ilha de Assunção durante o período seco.....	121
Figura 30 -	Pontos de mensuração de área de remanescente/fragmento na ilha de Assunção, Cabrobó, Pernambuco.....	124
Figura 31 -	Diversidade de espécies lenhosas vivas encontradas em áreas de remanescente/fragmento na ilha de Assunção, Cabrobó, Pernambuco.....	125
Figura 32 -	Zoneamento da diversidade de espécies lenhosas vivas encontradas nas parcelas inventariadas na ilha de Assunção, município de Cabrobó, Pernambuco.....	126
Quadro 5 -	Espécies amostradas, por família, no inventário de vegetação lenhosa em uma área de remanescente/fragmento de Caatinga, da ilha de Assunção, Cabrobó – PE.....	127
Quadro 6 -	Características ecológicas das espécies inventariadas em uma área de remanescente/fragmento de Caatinga, da ilha de Assunção, Cabrobó – PE.....	127
Gráfico 1 -	Curva de estimativa de riqueza em remanescente/fragmento na ilha de Assunção, município de Cabrobó – PE, a partir dos estimadores Jackknife e Chao de segunda ordem.....	131
Figura 33 -	Dendrograma do número de indivíduos identificados em remanescente/fragmento de Caatinga na ilha de Assunção, município de Cabrobó – PE.....	137
Figura 34 -	Correlograma das espécies identificadas em remanescente/fragmento de Caatinga na ilha de Assunção, município de Cabrobó – PE.....	139

Figura 35 -	Dendrograma de correlações das espécies identificadas em remanescente/fragmento de Caatinga na ilha de Assunção, município de Cabrobó – PE.....	141
Figura 36 -	Eixo de ordenação das espécies e parcelas produzido pela análise de correspondência, baseado na distribuição das espécies identificadas em 21 parcelas em remanescente/fragmento de Caatinga, na ilha de Assunção, município de Cabrobó – PE.....	142
Figura 37 -	Ordenamento da altura média por parcela dos indivíduos lenhosos inventariados em remanescente/fragmento na ilha de Assunção, município de Cabrobó – PE.....	144
Figura 38 -	Ordenamento do diâmetro médio por parcela dos indivíduos lenhosos inventariados em remanescente/fragmento na ilha de Assunção, município de Cabrobó – PE.....	145
Gráfico 2 -	Curva analítica do ácido úsnico puro de <i>Cladonia substellata</i>	153
Gráfico 3 -	Concentração de ácido úsnico em talos de <i>Cladonia substellata</i> sobreposto a Neossolo Flúvico em diferentes tratamentos submetidos ou não à irradiação gama.....	155
Figura 39 -	Dendrograma de correlações da concentração de ácido úsnico de talos de <i>Cladonia substellata</i> sobreposta a Neossolo Flúvico em diferentes tratamentos submetidos ou não a irradiação gama.....	155
Gráfico 4 -	Concentrações de ácido úsnico produzido por <i>Cladonia substellata</i> e percolado para Neossolo Flúvico em diferentes tratamentos submetidos ou não a irradiação gama.....	157
Figura 40 -	Dendrograma de correlações da concentração do ácido úsnico produzido por <i>Cladonia substellata</i> e percolado para Neossolo Flúvico em diferentes tratamentos submetidos ou não a irradiação gama.....	158

Figura 41 -	Correlograma dos elementos químicos de amostras de Neossolo Flúvico em experimento com talos de <i>Cladonia substellata</i> sobrejacente ao solo em diferentes tratamentos submetidos ou não a radiação gama.....	160
Figura 42 -	Análise de componentes principais de amostras de Neossolo Flúvico em experimento com talos de <i>Cladonia substellata</i> sobrejacente ao solo em diferentes tratamentos submetidos ou não a radiação gama, a partir de quantificação de EDXRF.....	162
Gráfico 5 -	Concentração de ácido úsnico incorporado ao Neossolo Flúvico em tratamentos com extrato etéreo de <i>Cladonia substellata</i> em forma de pó e diluído em DMSO.....	163
Figura 43 -	Dendrograma de correlações da concentração de ácido úsnico incorporado ao Neossolo Flúvico em tratamentos com extrato etéreo de <i>Cladonia substellata</i> em forma de pó e diluído em DMSO.....	164
Figura 44 -	Correlograma dos elementos química das amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso do extrato etéreo de <i>Cladonia substellata</i> diluído ou em pó incorporados ao solo em diferentes tratamentos.....	167
Figura 45 -	Análise de componentes principais de amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso do extrato etéreo de <i>Cladonia substellata</i> diluído ou em pó incorporados ao solo em diferentes tratamentos, a partir de quantificação por EDXRF.....	168
Figura 46 -	Correlograma dos elementos químicos das amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso de matéria orgânica e seus subprodutos líquidos produzidos a partir de biodecompositor, em diferentes quantidades.....	173
Figura 47 -	Análise de componentes principais de amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso de matéria orgânica e seus subprodutos líquidos produzidos a partir de biodecompositor, em diferentes quantidades.....	175

Gráfico 6 -	Concentração de ácido úsnico em talos de <i>Cladonia substellata</i> sobrepostos ao Neossolo Flúvico associado com matéria orgânica e seus subprodutos em diferentes tratamentos.....	177
Figura 48 -	Dendrograma de correlações da concentração de ácido úsnico em talos de <i>Cladonia substellata</i> sobrepostos ao Neossolo Flúvico associado com matéria orgânica e seus subprodutos em diferentes tratamentos.....	178
Gráfico 7 -	Concentração de ácido úsnico produzido por <i>Cladonia substellata</i> e percolados para Neossolo Flúvico com adição de matéria orgânica e seus subprodutos em diferentes tratamentos.....	179
Figura 49 -	Dendrograma de correlações da concentração de ácido úsnico produzido por <i>Cladonia substellata</i> e percolados para Neossolo Flúvico com adição de matéria orgânica e seus subprodutos em diferentes tratamentos.....	180
Figura 50 -	Correlograma dos elementos química das amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso matéria orgânica e seus subprodutos, e, talos de <i>Cladonia substellata</i> sobrepostos ao solo em diferentes tratamentos.....	183
Figura 51 -	Análise de componentes principais das amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso matéria orgânica e seus subprodutos, e, talos de <i>Cladonia substellata</i> sobrepostos ao solo em diferentes tratamentos.....	185
Gráfico 8 -	Concentração de ácido úsnico incorporado ao Neossolo Flúvico associado com matéria orgânica e seus subprodutos em tratamentos com extrato etéreo de <i>Cladonia substellata</i> em diferentes formas de aplicação no solo.....	187
Figura 52 -	Dendrograma de correlações da concentração de ácido úsnico incorporado ao Neossolo Flúvico associado com matéria orgânica e seus subprodutos com extrato etéreo de <i>Cladonia substellata</i> em diferentes formas de aplicação.....	187

Figura 53 -	Correlograma dos elementos química das amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso matéria orgânica e seus subprodutos com extrato etéreo de <i>Cladonia substellata</i> em pó e/ou diluído incorporado ao solo em diferentes tratamentos.....	190
Figura 54 -	Análise de componentes principais das amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso matéria orgânica e seus subprodutos com extrato etéreo de <i>Cladonia substellata</i> em pó e/ou diluído incorporado ao solo em diferentes tratamentos.....	192
Gráfico 9 -	Concentração de ácido úsnico produzido por talos de <i>Cladonia substellata</i> sobreposta ao Neossolo Flúvico associado com matéria orgânica, simulando período seco e úmido.....	193
Gráfico 10 -	Concentração de ácido úsnico em experimento com Neossolo Flúvico com uso matéria orgânica e talo e/ou extrato etéreo de <i>Cladonia substellata</i> em pó e/ou diluído incorporado a colunas de solo em diferentes tratamentos.....	194
Figura 55 -	Dendrograma de correlações da concentração de ácido úsnico em experimento com Neossolo Flúvico com uso matéria orgânica e talo e/ou extrato etéreo de <i>Cladonia substellata</i> em pó e/ou diluído incorporado a colunas de solo em diferentes tratamentos.....	196
Figura 56 -	Correlograma dos elementos químicos das amostras de Neossolo Flúvico em experimento de coluna com uso matéria orgânica e talo e/ou extrato etéreo de <i>Cladonia substellata</i> em pó e/ou diluído incorporado a colunas de solo, simulando período úmido e seco.....	200
Figura 57 -	Análise de componentes principais das amostras de Neossolo Flúvico em experimento de coluna com uso matéria orgânica e talo e/ou extrato etéreo de <i>Cladonia substellata</i> em pó e/ou diluído incorporado a colunas de solo, simulando período úmido e seco.....	202

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Tipos de clima segundo a amplitude de variação do Índice de Aridez (P/ET).....	34
Tabela 2 -	Classes de suscetibilidade à desertificação.....	35
Tabela 3 -	Classificação das diferentes áreas de acordo com o Comprimento de Período de Crescimento (CPC).....	35
Tabela 4 -	Insidência dos cinco fatores causadores da degradação por região (percentagem de área degradada).....	37
Tabela 5 -	Descrição das bandas e faixas espectrais correspondentes ao Landsat TM 5, coeficientes de calibração mínimo (a) e máximo (b), irradiância solar espectral ($K\lambda$) no topo da atmosfera (TOA).....	66
Tabela 6 -	Índice de porte da biomassa para as diferentes classes.....	70
Tabela 7 -	Índices de recobrimento da biomassa para as diferentes subclasses de vegetação.....	70
Tabela 8 -	Identificação das classes de cobertura do solo para os Índices de vegetação NDVI e SAVI para o município de Cabrobó e ilha de Assunção (PE), em escala temporal de 27 anos, durante o período seco e úmido.....	102
Tabela 9 -	Identificação das classes de cobertura da vegetação para o Índice de área foliar (IAF) para o município de Cabrobó e ilha de Assunção (PE), em escala temporal de 27 anos, durante o período seco e úmido.....	113
Tabela 10 -	Parâmetros fitossociológicos e estruturais das espécies de plantas em remanescente/fragmento na ilha de Assunção, Cabrobó – PE.....	134
Tabela 11 -	Classificação estrutural dos indivíduos lenhosos inventariados por parcela em área de remanescente/fragmento de Caatinga na ilha de Assunção, Cabrobó – PE.....	146

Tabela 12 -	Análise química das amostras de Neossolo Flúvico em experimento com talos de <i>Cladonia substellata</i> sobrejacente ao solo em diferentes tratamentos submetidos ou não à radiação gama.....	159
Tabela 13 -	Análise química das amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso do extrato etéreo de <i>Cladonia substellata</i> diluído ou em pó incorporados ao solo em diferentes tratamentos.....	166
Tabela 14 -	Análise química das amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso de matéria orgânica e seus subprodutos líquidos produzidos a partir de biodecompositor, em diferentes quantidades.....	171
Tabela 15 -	Análise química das amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso matéria orgânica e seus subprodutos, e talos de <i>Cladonia substellata</i> sobrepostos ao solo em diferentes tratamentos.....	182
Tabela 16 -	Análise química das amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso matéria orgânica e seus subprodutos com extrato etéreo de <i>Cladonia substellata</i> em pó e/ou diluído incorporado ao solo em diferentes tratamentos.....	189
Tabela 17 -	Análise química das amostras de Neossolo Flúvico em experimento de coluna com uso matéria orgânica e talo e/ou extrato etéreo de <i>Cladonia substellata</i> em pó e/ou diluído incorporado a colunas de solo, simulando período úmido e seco.....	199

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	25
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	28
2.1	ESTUDOS INTEGRADOS DA PAISAGEM.....	28
2.2	DESERTIFICAÇÃO E SEUS IMPACTOS SOBRE O ECOSSISTEMA.....	32
2.3	DESERTIFICAÇÃO SEUS INDICADORES.....	40
2.4	NÚCLEOS DE DESERTIFICAÇÃO NO NORDESTE BRASILEIRO E A DEGRADAÇÃO AMBIENTAL NO BIOMA CAATINGA.....	48
2.5	REMEDIÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS.....	54
2.6	AÇÃO DOS LIQUENS SOBRE ROCHAS E SOLOS.....	56
2.6.1	Ação de Substâncias Liguênicas Sobre a Degradação de Rochas.....	58
2.6.2	Ação de Substâncias Liguênicas na Modificação da Composição Química de Solos.....	60
2.6.3	Ação das Substâncias Liguênicas como Biorremediadoras de Solos Salinizados de Núcleos de Desertificação em Pernambuco.....	62
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	63
3.1	MAPEAMENTO ESPECTRAL.....	63
3.1.1	Balço de Radiação.....	64
3.1.1.1	Calibração Radiométrica.....	64
3.1.1.2	Reflectância.....	65
3.1.1.3	Índices de Vegetação.....	66
3.1.1.4	Emissividade da Superfície.....	67
3.1.1.5	Temperatura da Superfície.....	68
3.2	LEVANTAMENTO E CLASSIFICAÇÃO DA ESTRUTURA DA VEGETAÇÃO EM REMANESCENTE/FRAGMENTO DE CAATINGA NA ILHA DE ASSUNÇÃO, CABROBÓ, PERNAMBUCO.....	68
3.2.1	Delimitação dos Pontos.....	68

3.2.2	Levantamento das Espécies Lenhosas Vivas.....	69
3.2.3	Análise dos Indicadores de Biomassa de Vegetação Lenhosa e dos Índices de Porte e Recobrimento.....	69
3.2.4	Classificação Estrutural da Vegetação.....	70
3.2.5	Análise da Estrutura Vegetal.....	71
3.2.5.1	Densidade Absoluta e Relativa.....	71
3.2.5.2	Frequência Absoluta e Relativa.....	71
3.2.5.3	Dominância Absoluta e Relativa.....	72
3.2.5.4	Índice de Valor de Importância (IVI).....	72
3.2.5.5	Índice de Valor de Cobertura (IVC).....	73
3.2.6	Diversidade.....	73
3.2.6.1	Índice de Diversidade de Shannon (H').....	73
3.2.6.2	Equabilidade de Pielou (J').....	74
3.2.6.3	Dominância de Simpson (D).....	74
3.2.7	Medidas de Riqueza de Espécies.....	75
3.2.7.1	Estimativas Não Paramétricas de Riqueza de Espécies.....	75
3.2.7.2	Estimador Jackknife.....	75
3.2.7.3	Estimador Chao.....	76
3.3	EXPERIMENTOS EM LABORATÓRIO COM NEOSSOLO FLÚVICO SALINIZADO.....	76
3.3.1	Coleta e Processamento de Neossolo Flúvico Salinizado.....	76
3.3.2	Coleta e Processamento do Material Liquênico.....	77
3.3.2.1	Coleta e Caracterização de <i>Cladonia substellata</i>	77
3.3.3	Procedimento de Obtenção do Extrato Etéreo de <i>Cladonia substellata</i>.....	78
3.3.4	Purificação do Ácido Úsnico de <i>Cladonia substellata</i>.....	79
3.3.5	Irradiação Gama das Amostras de Neossolo Flúvico e Talos de <i>Cladonia substellata</i>.....	79
3.3.6	Procedimento Para Obtenção do Material Orgânico em Biodecompositores.....	79
3.3.7	Quantificação do Teor de Carbono Orgânico Total do Solo.....	80
3.3.8	Matéria Orgânica do Solo.....	81
3.3.9	Montagem dos Experimentos.....	81

3.3.9.1	Experimento 1 – Neossolo Flúvico Salinizado Sobreposto a Talos de <i>Cladonia substellata</i> Submetida à Radiação Gama.....	82
3.3.9.2	Experimento 2 – Extrato Orgânico de <i>Cladonia substellata</i> Incorporado ao Solo.....	83
3.3.9.3	Experimento 3 – Neossolo Flúvico Salinizado e Matéria Orgânica Produzida por Biodecompositor.....	83
3.3.9.4	Experimento 4 – Neossolo Flúvico salinizado Associado com Matéria Orgânica e seus Subprodutos a Talos de <i>Cladonia substellata</i>	85
3.3.9.5	Experimento 5 – Extrato Orgânico das Substâncias Produzidas por <i>Cladonia substellata</i> Incorporado a Neossolo Flúvico e Adição de Matéria Orgânica com seus Subprodutos.....	86
3.3.9.6	Experimento 6 – Neossolo Flúvico Salinizado Associado à Matéria Orgânica em Experimento de Coluna de Solo com uso de Talos de <i>Cladonia substellata</i> e/ou seu Extrato Orgânico Simulando Períodos Secos e Úmidos.....	86
3.3.9.7	Quantificação dos Fenóis Liquênicos do Talo, Percolados ou Incorporados ao Solo.....	87
3.3.9.8	Análise Química de Neossolo Flúvico.....	87
3.3.9.8.1	<i>pH em água</i>	87
3.3.9.8.2	<i>Determinação de fertilidade química do solo</i>	88
3.3.9.8.3	<i>Análise de fluorescência de raios-x por dispersão de energia (EDXRF)</i>	88
3.4	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	88
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	90
4.1	ANÁLISE AMBIENTAL DO MUNICÍPIO DE CABROBÓ, PERNAMBUCO, A PARTIR DE MAPEAMENTO ESPECTRAL.....	90
4.2	ANÁLISE E CLASSIFICAÇÃO DA ESTRUTURA DA VEGETAÇÃO EM ÁREA DE REMANESCENTE/FRAGMENTO DE CAATINGA EM REGENERAÇÃO NA ILHA DE ASSUNÇÃO, CABROBÓ – PE.....	123

4.3	BIORREMEDIAÇÃO DE NEOSSOLO FLÚVICO SALINIZADO PELAS SUBSTÂNCIAS ORGÂNICAS DO LÍQUEN <i>CLADONIA</i> <i>SUBSTELLATA</i>	150
5	CONCLUSÕES	204
	REFERÊNCIAS	206

1 INTRODUÇÃO

A degradação das terras áridas, semiáridas e subúmidas secas motivadas por ações humanas, associada às condições climáticas, tem intensificado o processo de desertificação (UCCD, 1994). Esse fenômeno ocasiona perda da biodiversidade, degradação dos solos e dos recursos hídricos, tendo como efeito a formação de áreas com elevado grau de degradação ambiental. Deste modo, formam-se os núcleos de desertificação, existentes no semiárido do Nordeste brasileiro, que são considerados os níveis mais elevados de degradação com características a expandirem-se por áreas circunvizinhas aumentando o seu raio de influência.

Vasconcelos Sobrinho (1983) aborda como as ações do ser humano interferem no equilíbrio do ecossistema, principalmente no bioma Caatinga, iniciadas pela deflagração de uma sucessão de processos de degradação do solo e da cobertura vegetal, como o manejo inadequado do solo, lavoura itinerante, criação extensiva, queimadas, destruição dos estoques de sementes das plantas nativas e dos agentes polinizadores, bem como os fatores socioeconômicos relacionados aos fluxos migratórios.

O semiárido nordestino apresenta uma extensão territorial de 1.554.387,7 km², em que cerca de 180.000 km² são áreas em processo de degradação com níveis muito graves e graves (MMA, 2007). Entretanto, com a Resolução n°115, de 23 de novembro de 2017, houve o acréscimo de 73 municípios à relação originalmente aprovada pela Resolução Conselho Deliberativo da Sudene (CODEL) n° 107, de 27 de julho de 2017. Isso faz com que a área territorial do semiárido brasileiro tenha sido expandida.

O bioma Caatinga é o único complexo vegetacional exclusivamente brasileiro, possui mais de 932 espécies de vegetais superiores, bem como uma grande diversidade de espécies de peixes (185), répteis e anfíbios (156), aves (358) e mamíferos (148), demonstrando assim sua rica biodiversidade, ainda pouco estudada pelos pesquisadores (CASTELLETTI *et al.*, 2003). O desmatamento e as culturas irrigadas estão levando à salinização de solos, aumentando ainda mais a evaporação da água contida neles e acelerando o processo de desertificação. Estima-se que a área coberta por atividades agrícolas na região é 201.786 km², o que corresponde a 27,47% da área da Caatinga (CASTELLETTI *et al.*, 2003). Leal *et al.* (2003) advertem que as áreas sem influência das atividades humanas na região semiárida nordestina formam arquipélagos, compostos por “ilhas” de diferentes tamanhos, cercados por uma complexa área alterada, criando mosaicos paisagísticos. Desta forma, torna-se

fundamental o mapeamento e o gerenciamento ambiental das mudanças ocorridas na paisagem de ambientes de elevada fragilidade ambiental.

Galvêncio e Silva (2012) destacam que a utilização do sensoriamento remoto se reverte em uma ferramenta que facilita a identificação e a extração de informações contidas nas imagens, dentre elas as modificações na paisagem, sendo eficiente para o manejo e monitoramento dos recursos naturais e desenvolvimento urbano (SINGH, 1989; MACLEOD e CONGALTON, 1998). Estudos para detecção das alterações na região semiárida têm como base de análise as mudanças na cobertura vegetal (MALDONADO, 1999), que vão interferir nas respostas espectrais, na reflectância dos alvos.

A retirada da cobertura vegetal em ambiente semiárido acaba por gerar sérios danos à sua biodiversidade, acarretando no desnudamento do solo, fazendo surgir inúmeras condições restritivas limitantes do meio, implicando na dificuldade de infiltração de água e aumento no número de escoamento superficial (VASCONCELOS SOBRINHO, 2000). Tal fato tem como consequência a degradação do solo que está relacionada à perda da produtividade, ou seja, da utilização real ou potencial motivada por fatores naturais ou antropogênicos. Por isso, está estreitamente associada ao declínio da capacidade do solo de produzir bens econômicos e executar funções ecológicas.

O grau de degradação do solo depende da susceptibilidade do ambiente. Fatores climáticos, hidrológicos, geológicos, geomorfológicos e vegetacionais, além dos impactos gerados pela utilização insustentável do solo, poderão determinar a capacidade de resistência do solo para se recuperar as condições favoráveis de uso da terra. Essa recuperação tem como fator primordial o intervalo de tempo para que o solo consiga regenerar seus atributos físicos, químicos e biológicos que poderão ter atingido níveis críticos de degradação.

A qualidade do solo é baseada nos atributos inerentes e depende do equilíbrio entre degradação e processos de recuperação. Lal (1993) expõe que os processos de degradação estão relacionados à erosão do solo, anaerobiose, compactação e aparecimento de crostas de sal no solo, esgotamento de nutrientes e consequentes desequilíbrios como a perda da fertilidade, redução da biodiversidade, deterioração da estrutura do solo e, perturbações no ciclo hidrológico. Tais fatores versam sobre os impactos do aumento da pressão demográfica e a escassez mundial de terras agrícolas aptas para o cultivo.

Os processos de degradação dos solos no semiárido nordestino, muitas vezes, estão pautados na utilização de modelos agrícolas sem planejamento e gerenciamento adequados. A prática da agricultura irrigada está inserida nesse contexto, uma vez que, ao mesmo tempo em que promove vários benefícios nos aspectos socioeconômicos de uma região, sua inadequada

utilização também pode gerar interferências negativas ao meio ambiente, estabelecendo efeitos contrários ao seu objetivo original. O uso de técnicas de irrigação mal supervisionadas tanto em perímetros irrigados quanto em áreas de cultivo na região semiárida brasileira é o que mais tem condicionado o processo de salinização, tornando grandes áreas de solo inutilizadas para o cultivo (SILVA, 2014). Uma alternativa para recuperação de áreas degradadas pela salinização no semiárido nordestino é a incorporação de matéria orgânica ao solo, que atua como agente ligante formando complexos com átomos metálicos (MIRANDA *et al.*, 2013). A capacidade de quelação da matéria orgânica interfere de maneira positiva nos atributos físicos, aumentando a condutividade hidráulica e a infiltração da água. Em solos salinos e sódicos, efeitos da matéria orgânica podem ser bastante positivos ao promover maior agregação às partículas do solo, com diminuição da dispersão promovida pelo sódio. Tal fato pode estar relacionado à liberação de CO₂ e ácidos orgânicos durante a decomposição da matéria orgânica, além de atuarem como fontes de cálcio e magnésio, em detrimento do sódio (FREIRE; FREIRE, 2007). Em adição, as substâncias liquênicas de natureza fenólica (CULBERSON *et al.*, 1977) estão envolvidas nos mecanismos de decomposição e desagregação física da rocha (ADAMO; VIOLANTE, 2000) consolidadas através da quelação, solubilizando seus cátions (JONES, 1988), atuando como agentes complexantes (RUNDEL, 1978).

Portanto, esta pesquisa teve como objetivo analisar e avaliar o processo de degradação ambiental no município de Cabrobó, Pernambuco, e propor técnicas de biorremediação para Neossolo Flúvico salinizado pelo uso e manejo agrícola. Como objetivos específicos, propôs-se quantificar em escala temporal o processo de degradação ambiental no município de Cabrobó a partir do uso dos índices de vegetação NDVI, SAVI, IAF e Temperatura da superfície do solo em imagens Landsat TM 5 e Landsat OLI 8; analisar a estrutura vegetal de área em regeneração de Caatinga na ilha de Assunção, a partir do levantamento de espécies lenhosas vivas e classificação em função da estrutura da vegetação; analisar a capacidade de biorremediação das substâncias produzidas por *Cladonia substellata* e seu extrato orgânico na modificação da composição química de solos degradados pela salinização; analisar a capacidade de biorremediação de substâncias liquênicas e adubo orgânico produzido por biodecompositor, associados ou não ao biofertilizante, na recuperação química do solo.

Dessa forma, os resultados obtidos podem, além de indicar formas sustentáveis de manejo e uso do ambiente, contribuir também para a inserção social, através do repasse de técnicas simples ao pequeno agricultor, com vistas ao melhoramento de suas terras.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 ESTUDOS INTEGRADOS DA PAISAGEM

O conceito de paisagem pode variar de acordo com a perspectiva de análise e a abordagem teórico-metodológica. Neste contexto Besse (2006, p. 66) destaca que a paisagem pode ser compreendida como o “produto das interações, das combinações entre um conjunto de condições e de restrições naturais (geológicas, morfológicas, botânicas, etc.) e um conjunto de realidades humanas, econômicas, sociais e culturais”.

A paisagem pode ser considerada um elo entre fenômenos que se relacionam. Esta é uma característica essencial dentro da Geografia, que encontra sua unidade e especificidade dentro do estudo do caráter das áreas (HARTSHORNE, 1978). Dessa forma, a paisagem é observada como um mosaico em que, individualmente, os constituintes espaciais, regionais e humanos desempenham o seu papel, deixando a sua impressão e tornando cada ambiente único.

Hartshorne (1978) aborda que as inter-relações não precisam ser constituídas especificamente entre aspectos humanos e naturais, pois as diferenças climáticas que causam alterações na paisagem são bastante significantes para o ser humano. Assim, qualquer fenômeno, quer da natureza, quer do homem, é significativo em Geografia, compreendido por meio de suas inter-relações com os fenômenos presentes nos lugares ou nas variações das áreas.

Moreira (2011a) descreve que para se compreender a relação “homem-meio” é necessário observar as categorias, conceitos e princípios lógicos da Geografia por meio da sua matriz epistemológica. Para tal, essas categorias devem se estruturar na combinação da paisagem, do território e do espaço. Tais estruturas possuem um entrelaçamento em forma de cadeia que terão margem da análise, através dos princípios lógicos: localização, distribuição, extensão, distância, posição e escala. Essa construção possibilita descrever os fatores na paisagem para analisá-los em termos do território e compreendê-lo no espaço.

A paisagem inicialmente era observada e descrita pelos viajantes naturalistas. Alexander Von Humboldt apresentava a paisagem por aspectos descritivos da vegetação e do território, exaltando a fisionomia do terreno, os aspectos da vegetação e do clima, o que denominou de a corologia da paisagem (MOREIRA, 2011b). A partir da necessidade de um caráter epistemológico as conceituações de paisagem começaram a se afastar da descrição

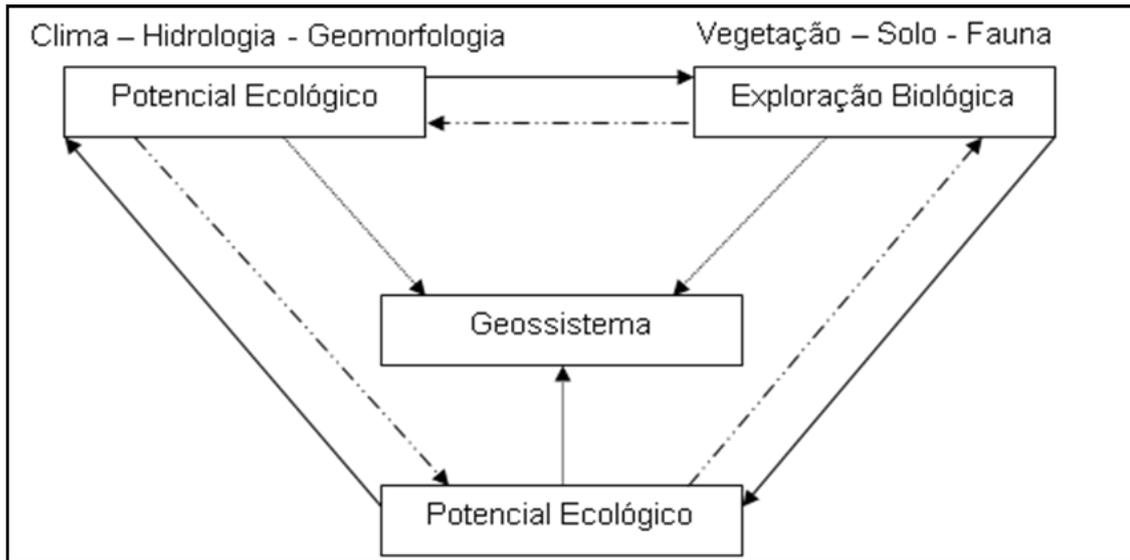
fisionômica e passaram a se deter na análise da dinâmica das unidades, na busca por uma metodologia voltada para a morfologia e o entendimento dos fenômenos de forma integrada.

Dessa forma, enfatizaram-se as trocas de matéria e energia dentro do sistema (complexo físico-químico-biológico), passando a ter uma abordagem sistêmica. Os dois primeiros conceitos que vão influenciar a compreensão da paisagem são o de Ecossistema exposto por A. G. Tansley, em 1934, como unidade básica que reúne todos os seres vivos que habitam uma determinada área ou região, com as condições físicas ou ambientais que o caracterizam, e o de Geossistema apresentado por V. S. Sotchava, em 1963 (GUERRA *et al.*, 2010). Nimer (1988) ressalta que cada ecossistema possui certa homogeneidade natural em um ambiente, onde os seres vivos e o meio físico realizam interações, entre os seres vivos e entres estes e o meio. Destaca ainda, que esta relação desperta o interesse de muitos ecólogos devido à homogeneidade simultânea entre os aspectos climático, topográfico, botânico, zoológico, hidrológico e geoquímico.

Sotchava (1978) apresentou a abordagem geossistêmica como um modelo teórico e conceitual destinado a identificar, interpretar e classificar a paisagem terrestre, vista como uma classe peculiar dos sistemas dinâmicos abertos e hierarquicamente organizados. O autor identifica os geossistemas como sistemas ambientais físicos, abertos e não necessariamente homogêneos. Considera a Terra como sendo um geossistema planetário dividido em inúmeros domínios e propôs uma classificação bilateral de geossistemas, partindo do binômio homogeneidade e diferenciação que seriam considerados princípios fundamentais de análise. Nesta apreciação, Sotchava buscou compreender as conexões existentes na paisagem. Desta forma, não se restringindo à morfologia da paisagem e às subdivisões, tentou conceituar uma abordagem que analisasse a dinâmica, a estrutura funcional e as conexões existentes no ambiente. Essa combinação incluía, ainda, os fatores econômicos e sociais, que exercem influência na estrutura. Por isso, devem ser considerados durante o estudo e a descrição de uma paisagem.

Bertrand (2004, p. 141) definiu paisagem como o “resultado da combinação dinâmica, portanto instável, em uma determinada porção do espaço, de elementos físicos, biológicos e antrópicos, os quais, reagindo dialeticamente, uns sobre os outros, fazem dela um conjunto único e indissociável, em perpétua evolução”. O referido autor destaca que essa forma de abordagem embasa como modelo teórico o potencial ecológico, a exploração biológica e a ação antrópica (Figura 1).

Figura 1 – Modelo esquemático de geossistema proposto por Bertrand (2004).



Fonte: Bertrand, 2004.

Bertrand (2004) propôs um sistema de classificação da paisagem baseado em seis níveis temporo-espaciais divididos em duas unidades, superior e inferior. As unidades superiores correspondem às grandes zonas climato-botânicas: 1) Zona – relacionada ao conceito de zonalidade planetária (zona temperada, zona tropical); 2) Domínio – corresponde às unidades de segunda grandeza (domínio cerrado, domínio caatinga); 3) Região Natural – situa-se entre a 3ª e 4ª grandeza (região dos cocais). As unidades inferiores representam a subdivisão da Região Natural, em três unidades: 4) Geossistema – situa-se entre a 4ª e a 5ª grandeza temporo-espacial; é a unidade em que se observa a maior parte dos fenômenos de interferência entre os elementos da paisagem e suas combinações dialéticas; 5) Geofácies – é uma subdivisão do geossistema, corresponde a um setor fisionomicamente homogêneo da paisagem; 6) Geótopo – é a menor unidade geográfica homogênea diretamente discernível no terreno.

Em 1950, Carl Troll expõe sua abordagem sobre a paisagem, por meio da Ecologia das Paisagens, como sendo o estudo da mais complexa conexão causal entre as comunidades de vida e seu ambiente; esta visão procura articular a paisagem natural e a paisagem cultural para formar um sistema ambiental (GUERRA *et al.*, 2010). Dentro da análise da ecologia das paisagens, Troll destaca que todos os geofatores se encontram em interação, dentre eles os econômicos e culturais, em uma dimensão sócio-ecológica.

Rodriguez *et al.* (2002) constatam que a ecologia das paisagens surge diante da busca para entender a paisagem como uma expressão espacial dos ecossistemas por meio de um

mosaico. Esta visão reporta a estrutura da paisagem como sendo as relações entre os sistemas bióticos e o espaço físico.

Wu (2006) observa que a ecologia das paisagens é uma proposta de integração entre a abordagem geográfica e estrutural e a abordagem ecológica e funcional, e estas abordagens possuem caráter complementar. Desta forma, o estudo da ecologia das paisagens requer uma visão interdisciplinar e transdisciplinar, hierárquica e pluralista em diferentes domínios da ciência. Essa característica demonstra sua relevância para com as questões ambientais na perspectiva de integração entre os fatores sociais e econômicos da paisagem para atender às necessidades de compreensão e resolução dos problemas de gestão e planejamento.

Turner (2005) salienta que o estudo em ecologia das paisagens tem auxiliado para entender as causas e consequências da heterogeneidade espacial. Esse conceito surgiu a partir de uma nova perspectiva oferecida pelas fotografias aéreas, permitindo a observação da paisagem por meio de uma abordagem sistêmica, como ferramenta de análise para a geografia regional e as ciências naturais. Essa visão consente a interação recíproca entre heterogeneidade espacial e processos ecológicos, por uma conexão holística, espacial e funcional dos sistemas natural e cultural.

Tricart (1977) sugeriu uma metodologia para classificar o ambiente com base nos estudos da dinâmica ecótopos, estudo que denominou ecodinâmica. O conceito de ecodinâmica está relacionado ao conceito de ecossistema, baseado na abordagem sistêmica e enfoca as relações mútuas entre os diversos componentes da dinâmica e os fluxos de energia e matéria no ambiente. O método de análise proposto por Tricart se refere à relação morfogênese/pedogênese que expressaria a instabilidade/resolução temporal. O autor identifica três grandes tipos de ambientes morfodinâmicos, em função da intensidade dos processos: ambientes estáveis; ambientes intergrades e os ambientes fortemente instáveis.

Vitte (2007) destaca que no Brasil, a maior contribuição aos estudos sobre as paisagens naturais foi de Ab'Saber, que promoveu uma renovação metodológica e instrumental nas pesquisas geomorfológicas desenvolvidas no território nacional. Recuperando o conceito de fisiologia da paisagem, Ab'Saber compreendeu a paisagem como sendo o resultado de uma relação entre os processos passados e os atuais. Assim, os processos passados foram os responsáveis pela compartimentação regional da superfície, enquanto que os processos atuais respondem pela dinâmica atual das paisagens.

Ab'Saber (2003) compreende a paisagem como um conjunto de elementos naturais ou artificiais sempre atrelados à herança. Este caráter de herança é estabelecido por processos de atuação antigos e recentes, que remodelam a topografia diante de forças da natureza em uma

escala de tempo de milhões a dezenas de milhões de anos. A magnitude espacial do território brasileiro propicia um mosaico bastante completo das principais paisagens e ecologias tropicais. Deste modo, o entendimento dessas potencialidades é constituído a partir dos domínios morfoclimáticos e fitogeográficos compreendidos como um conjunto espacial de certa ordem de grandeza territorial, onde estejam integradas as feições de relevo, tipos de solos, formas de vegetação e condições climático-hidrológicas para formação de complexos fisiográficos e biogeográficos homogêneos e extensivos. Tais complexos podem ser estruturados em arranjos poligonais possuidor de áreas *core*. Estas áreas possuem domínios de transição e de contato, que podem formar competências com combinações físico-ambientais diferenciadas com expressão regional, além dos enclaves distinguidos por sua própria natureza.

Christofolletti (1999) expõe que o meio natural é constituído pelos sistemas e estes interferem e condicionam as atividades econômicas, políticas e sociais do homem, diante de uma organização geográfica dos elementos da natureza, que forneceram matéria e energia, nutrindo os sistemas socioeconômicos e de forma dialética recebendo seus resultados.

As inter-relações sistêmicas nos sistemas naturais ocorrem por interconexão e interação. Portanto, a interferência do homem ocorre através de cortes, desmatamentos em uma pequena escala e no seu modelo produtivo em grandes escalas. Esse debate associa-se à compreensão da ocorrência de novas estruturas em desordem se readaptando (CASSETTI, 1991).

Essa abordagem holística permite compreender tanto um componente vertical, desde o clima atmosférico até aquíferos, quanto um elemento horizontal, solos, terrenos e elementos de uso da terra e hidrológico. Atualmente, essa visão representa a abordagem utilizada pela maioria dos estudos de classificação de unidades de paisagem na busca de entender a ordem de um sistema, de acordo com seus padrões de regularidade ou aleatoriedade para discutir a complexidade da funcionalidade das paisagens em diferentes graus de humanização.

2.2 DESERTIFICAÇÃO E SEUS IMPACTOS SOBRE O ECOSISTEMA

O processo de desertificação começou a ser discutido pelo pesquisador francês Louis Lavauden no final da década de 1930, entretanto foi com Andre Aubreville durante os anos de 1940, que este processo teve maior visibilidade. Aubreville discutiu a desertificação em sua obra, intitulada *Climats, Forêts et Désertification* (1949); sua pesquisa leva à reflexão sobre os locais onde a desertificação pode ocorrer, realizando estudos nas florestas tropicais da África

com a utilização das isoietas como parâmetro de análise. Tal método possibilitou ao pesquisador a observação da existência de isoietas de 700 a 1.500 mm, sendo que nestas localidades estavam surgindo desertos devido à elevada taxa de destruição, resultante das atividades humanas (GLANZT; ORLOVSKY, 1983).

Na década de 1930, alguns estados do meio oeste dos Estados Unidos sofreram com uma forte seca entre os anos de 1929 e 1932 (SCHENKEL; MATALLO JUNIOR, 2003). No entanto, a desertificação só passou a ter visibilidade como um fenômeno mundial durante a seca de seis anos entre 1968-1973, na região de Sahel, África (MMA, 2007).

A partir deste momento, iniciou-se o despertar mundial para a desertificação. Em 1972, foi realizada a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente, em Estocolmo, que resultou no relatório de Estudo do Impacto Humano no Clima (Study on Man's Impact on Climate – SMIC). Este documento serviu de base para a realização, em 1977, pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), da Conferência das Nações Unidas sobre Desertificação, em Nairóbi, que teve a finalidade de ampliar e divulgar a desertificação como um problema mundial (JALFIM, 2004; CONTI, 2008).

Durante a Conferência de Nairóbi, 1977, a desertificação foi descrita como:

"... A diminuição ou a destruição do potencial biológico da terra, que pode finalmente conduzir a condições desérticas. É um aspecto da deterioração generalizada dos ecossistemas, e diminui ou destrói o potencial biológico, ou seja, plantas e produção animal, para fins de uso múltiplo, em um momento em que o aumento da produtividade é necessário para suportar as populações que crescem em busca do desenvolvimento de fatores importantes na sociedade contemporânea - na luta pelo desenvolvimento e o esforço para aumentar a produção de alimentos, e para adaptar e aplicar modernas tecnologias, contra o crescimento da população e mudanças demográficas, numa rede de causa e efeito. Em geral, a busca cada vez maior da produtividade intensificou a exploração e levou a perturbação pelo homem em terras menos produtivas e mais frágeis. Superexploração dá origem à degradação da vegetação, do solo e da água, a três elementos que servem como fundamento natural para a existência humana. Nos ecossistemas extremamente frágeis, tais como aqueles à margem do deserto, a perda de produtividade biológica, através da degradação dos recursos vegetais, animais, solo e água pode facilmente tornar-se irreversíveis e redução permanente de sua capacidade de sustentar a vida humana. Desertificação é um processo de auto-aceleração, alimentando-se de si mesmo, e à medida que avança, os custos de reabilitação tende a subir exponencialmente. Ação de combate à desertificação é necessária com urgência antes que os custos do aumento de reabilitação, além da possibilidade prática, ou antes, da oportunidade do ato seja perdido para sempre (Conferência das Nações Unidas de Combate à Desertificação, 1977, p. 88)".

De acordo com o Plano de Ação para Combater a Desertificação (PACD), resultante da mesma Conferência, a desertificação pode ser compreendida como a “degradação progressiva dos ecossistemas naturais de uma área, resultante de fatores naturais ou da ação do homem, e geralmente de ambos conjuntamente” (VASCONCELOS SOBRINHO, 1983 p.

20). Em 1992, no Rio de Janeiro foi realizada a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD), a Rio 92, que buscou dentre outras questões alertar a comunidade mundial para o avanço da desertificação e para os perigos que lhe são inerentes. Durante a realização da Conferência foi criado um programa de ação, um documento consensual para o qual contribuíram governos e instituições da sociedade civil de 179 países, a Agenda 21 (SCHENKEL e MATALLO JUNIOR, 2003; JALFIM, 2004).

A Conferência das Nações Unidas de Combate à Desertificação (UNCCD), em 1994, em seu artigo 1º definiu que

“por combate à desertificação entende-se as atividades que fazem parte do aproveitamento integrado da terra nas zonas áridas, semiáridas e sub-úmidas secas, a preservação e/ou redução da degradação das terras, a reabilitação de terras parcialmente degradadas e a recuperação de terras degradadas”.

Glanzt e Orlovsky (1983) advertem para a compreensão do conceito de desertificação. Esclarecem que alguns pesquisadores consideram a desertificação como um processo de mudança, enquanto outros compreendem como o resultado final de uma alteração. Deste modo, a desertificação pode ser entendida como um processo contínuo de transformação em ecossistemas áridos, semiáridos e subúmidos ou como um evento caracterizado pela criação de condições desérticas como o resultado de um processo de modificação.

Os parâmetros propostos no Plano de Ação de Combate à Desertificação, elaborado pelas Nações Unidas, ocorreu em 1977, para classificação das zonas áridas, semiáridas e subúmidas secas, baseadas na classificação climática de Thorntwaite em 1941. A metodologia de análise de Thorntwaite é fundamentada no Índice de Aridez (IA), constituindo-se na relação entre a precipitação média anual (P) e a evapotranspiração potencial total anual (ETP), com variação entre $< 0,05$ a $> 0,65$ (Tabela 1).

Tabela 1 – Tipos de clima segundo a amplitude de variação do Índice de Aridez (P/ET).

Clima	Amplitude do Índice de Aridez (IA)
Hiperárido	$< 0,05$
Árido	0,05 - 0,20
Semiárido	0,21 – 0,50
Subúmido seco	0,51 – 0,65
Subúmido e úmido	$> 0,65$

UNEP (1991).

Segundo Saadi (2000) o grau de aridez de uma região depende do volume de precipitação (P) e capacidade de perda de água pela evaporação e transpiração (ETP). A partir do Índice de Aridez é possível indicar o grau de susceptibilidade de uma região à desertificação (Tabela 2).

Tabela 2 – Classes de suscetibilidade à desertificação.

Grau de suscetibilidade	Índice de Aridez
Muito alto	0,03 – 0,20
Alto	0,21 – 0,50
Moderado	> 0,50

Fonte: SAADI (2000).

Araújo *et al.* (2008) destacam essa classificação adotada pela UNESCO, afirmando que essa relação de precipitação (P) e Evapotranspiração (ETP) fornece apenas a noção de aridez ou umidade do clima. Contudo, essa proposta não leva em consideração o potencial agrícola ou de pastoreio da região, fatores estes que terão relação com suprimento de água, por meio da precipitação ou armazenamento no solo, como parâmetro para estimar-se há quantidade suficiente para o crescimento das culturas ou da vegetação. Neste sentido, a FAO (1984) diante dos estudos sobre Zonas Agroecológicas desenvolveu o conceito de Comprimento de Período de Crescimento (CPC) (LGP – *Length of Growing Period*) (Tabela 3). O Comprimento de Período de Crescimento terá início a partir do momento que a precipitação exceder metade da evapotranspiração potencial e terminará quando a precipitação for inferior à metade da evapotranspiração, acrescido do período necessário para evapotranspirar 100 mm de água.

Tabela 3 – Classificação das diferentes áreas de acordo com o Comprimento de Período de Crescimento (CPC).

Classificação	CPC
Hiperáridas (deserto)	< 1 dia
Áridas	< 75 dias
Semiáridas (secas)	> 75 - < 120 dias
Semiáridas (úmidas)	> 120 - < 180 dias

FAO (1984).

A FAO (1986) estabelece que a desertificação é somente um aspecto extremo da deteriorização dos ecossistemas disseminado sob a pressão combinada do clima adverso e da exploração agrícola. Glantz e Orlovsky (1983) ressaltam que a desertificação ou o seu avanço possuem influência das flutuações climáticas e estas podem ocorrer em qualquer variável atmosférica (precipitação, temperatura, velocidade de direção dos ventos, evaporação, entre outras), sendo que o resultado dessas variações pode se refletir em alterações sobre o ecossistema. Desta forma, mesmo flutuações de curto prazo dos fatores climáticos, quando combinados com as práticas de uso do solo impróprias, exercem influência nas atividades socioeconômicas desenvolvidas para a exploração da produtividade biológica.

De acordo com a Avaliação Global de Degradação dos Solos ANO (GLASOD – *Global Assessment of Soil Degradation*), o processo de degradação dos solos não está relacionado à fragilidade do ecossistema, mas à existência de um balanço entre a resistência natural dos solos associado à cobertura vegetal e a influência climática, associado aos distúrbios provocados pelas intervenções humanas. São estabelecidas duas categorias para analisar o processo de degradação dos solos: a primeira se refere ao deslocamento do solo, que pode ser compreendido em dois tipos; a erosão pela força da água (erosão hídrica) e pela força do vento (erosão eólica); a segunda pela degradação/deteriorização *in situ* químico ou físico do solo:

1- Erosão hídrica: o deslocamento da camada do solo pode ter consequências severas, devido à remoção da camada superficial do solo, horizonte mais fértil, o que reduz a capacidade produtiva do solo.

2- Erosão eólica: a erosão pela força do vento quase sempre é causada pela diminuição da cobertura vegetal sobre o solo, pelo sobrepastoreio ou para propósitos agrícolas.

3- A deterioração/degradação química pode ser constituída em: (a) perda de nutrientes do solo (especificamente nitrogênio, fósforo e potássio) ou matéria orgânica, estes nutrientes são perdidos pelo esgotamento do solo devido à prática agrícola em solos pobres ou moderadamente férteis; (b) salinização ou concentração de sais na camada superior do solo, que pode ocorrer por causa de: (i) técnica de irrigação inadequada para regiões áridas ou alta concentração de sais na água de irrigação ou um deficiente sistema de drenagem; (ii) invasão da água do mar ou águas subterrâneas salinas em reservas de água de boa qualidade; (iii) atividades humanas que aceleram evaporação em solos salinos ou com a água do lençol freático; (c) acidificação, que pode ocorrer pela aplicação excessiva de fertilizantes ácidos ou pela drenagem; (d) poluição de diversas origens relacionada à acumulação de lixo, utilização

de pesticidas ou fertilizantes, derramamento de óleo, estes fatores podem diminuir o potencial agrícola do solo.

4- No processo de deterioração/degradação física do solo são conhecidos três fatores: (a) compactação do solo resultante do uso de máquinas pesadas em solos ou pisoteio do gado, isso pode ocasionar um selamento e encrostamento, geralmente causados pelo impacto das gotas de chuva; (b) elevação do lençol freático até a zona radicular das plantas, motivado pela entrada excessiva de água em relação à capacidade de drenagem do solo; (c) subsidência de solos orgânicos, que pode ter como fatores a drenagem e a oxidação (ISRIC/UNEP, 1991).

Estudos desenvolvidos pelo GLASOD evidenciam que um total de 240 milhões de hectares do mundo são afetados pela degradação química dos solos, enquanto que aproximadamente 12% da área total são afetadas por este tipo de degradação motivada, principalmente, por interferências humanas. Na América do Sul, 29% dos solos degradados estão relacionados à degradação química. Observa-se que esse total é quase todo influenciado pelo resultado da perda de nutrientes e a perda de matéria orgânica (Tabela 4).

Tabela 4 – Insidência dos cinco fatores causadores da degradação por região (percentagem de área degradada).

	Desmatamento (%)	Superpastoreio (%)	Atividades agrícolas (%)	Superexploração da vegetação (%)	Indústrias
África	14	49	24	13	-
América do Norte e Central	11	24	57	7	-
América do Sul	41	28	26	5	-
Ásia	40	27	26	6	-
Oceania	12	80	8	-	-
Europa	38	23	29	-	9

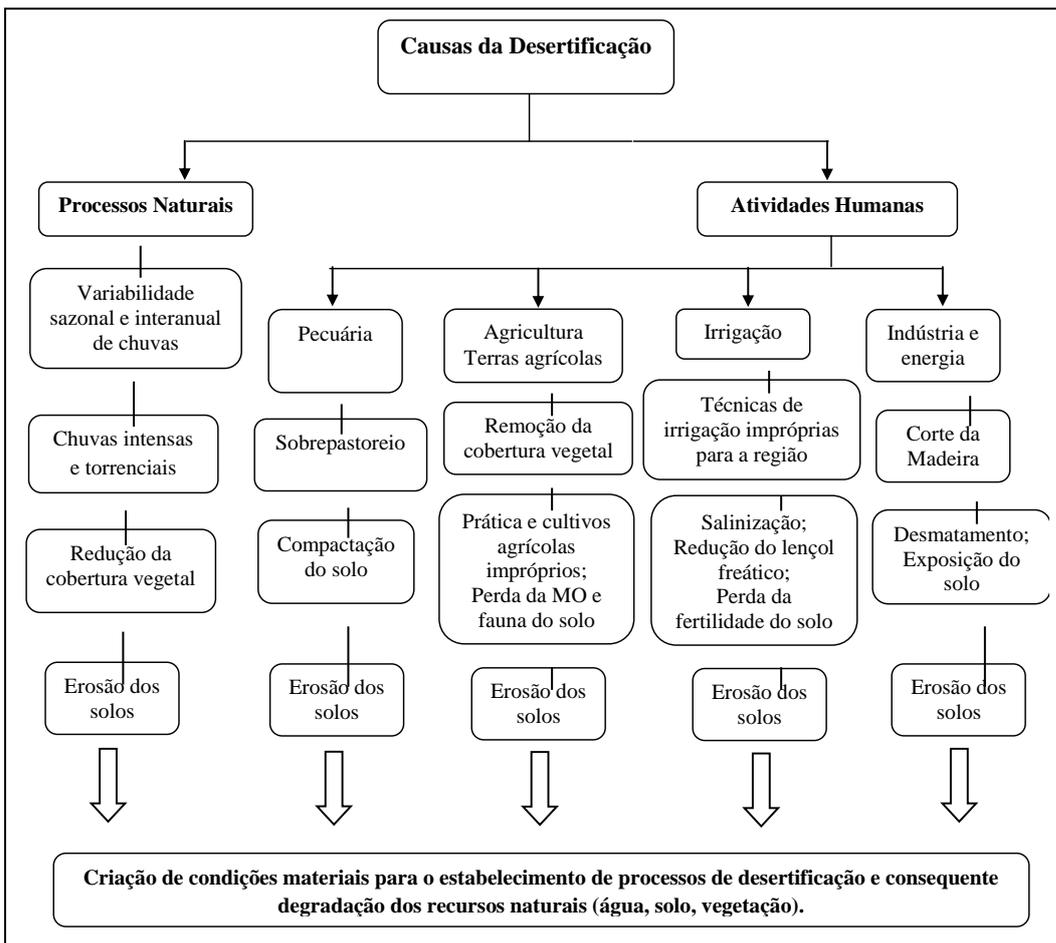
Fonte: ISRIC/UNEP, 1991. Dados fornecidos em hectares (M ha). Legenda: (-) indica sem valores.

A degradação das terras tem afetado diretamente cerca de 250 milhões de pessoas nos países desenvolvidos (REYNOLDS *et al.*, 2007), devido à redução ou perda da produtividade biológica e econômica (PRINCE *et al.*, 2007; REYNOLDS *et al.*, 2002; WWF, 2008; VERÓN *et al.*, 2010), resultante de uma degradação progressiva dos ecossistemas naturais, influenciada por fatores naturais e pela ação humana, e geralmente de ambos conjuntamente (REYNOLDS *et al.*, 2002, 2007; VASCONCELOS SOBRINHO, 1983). A desertificação é

um processo dinâmico fechado em ciclos viciosos, numa cadeia de eventos, que tem como amplitude, causas que podem se converter em consequências (SAMPAIO *et al.*, 2003).

Os efeitos da desertificação englobam fatores biogeofísicos, biogeoquímicos e sociais em diferentes escalas temporais e espaciais. Tais efeitos são produtos de interações complexas entre elementos biofísicos (clima, solo, biota) e humanos (demográfico, econômico, político) e podem sofrer influência de variáveis internas e externas (REYNOLDS *et al.*, 2002; 2007). Analisar, de forma integrada, os cenários da desertificação, estabelecidos na paisagem como resultado da combinação dinâmica, instável, de elementos físicos, biológicos e antrópicos (BERTRAND, 2004), propicia compreender suas consequências a partir da observação de seus indicadores (BERTILLER *et al.*, 2002). Dentre as diferentes formas de degradação, está a remoção da vegetação natural para a introdução da agricultura (VERÓN *et al.*, 2010), a erosão eólica e laminar, que reduz a infiltração e aumenta a lixiviação dos nutrientes do solo (OKIN *et al.*, 2009), acarretando a diminuição da fertilidade (REYNOLDS *et al.*, 2007) e a salinização (AMEZKETA, 2006) (Figura 2).

Figura 2 - Desertificação, causas e consequências.



Fonte: Aquino *et al.* (2012), adaptado pela autora.

Araújo *et al.* (2008) estabelecem que os riscos de erosão podem depender tanto das condições naturais quanto dos métodos de uso da terra; ressaltam também a influência climática como fatores importantes a serem observados, sobretudo a intensidade das chuvas, as características das encostas, a cobertura vegetal e a natureza do solo. A FAO (1980) aborda que existem fatores que causam impactos diretamente sobre o meio (fatores diretos) e aqueles que interferem indiretamente (fatores facilitadores) do processo de degradação (Quadro 1). Assim, a erosão pode ter sua causa direta de ação a erosão hídrica ou eólica e como indireta tanto atividades antrópicas (retirada da cobertura vegetal, corte de encostas, sobrepastoreio, técnicas agrícolas) quanto naturais (chuvas torrenciais, declividade, textura do solo, composição do solo).

Quadro 1 – Classificação dos fatores de degradação das terras.

	Ações antrópicas	Condições naturais
Fatores facilitadores	<ul style="list-style-type: none"> - desmatamento - permissão de superpastoreio - uso excessivo da vegetação - taludes de corte - remoção da cobertura vegetal para o cultivo 	<ul style="list-style-type: none"> - topografia - textura do solo - composição do solo - cobertura vegetal - regimes hidrográficos
Fatores Diretos	<ul style="list-style-type: none"> - uso de máquinas - condução do gado - encurtamento do pousio - entrada excessiva de água/ drenagem insuficiente - excesso de fertilização ácida - uso excessivo de produtos químicos - deposição de resíduos doméstico-industriais 	<ul style="list-style-type: none"> - chuvas fortes - alagamentos - ventos fortes

Fonte: FAO (1980).

O GLOSAD destaca ainda cinco diferentes tipos de atividades humanas que têm causado a degradação de solos: desmatamento para a agricultura ou pastagem; sobrepastoreio;

práticas agrícolas; superexploração da vegetação; e atividades industriais (ISRIC/UNEP, 1991). A degradação ambiental gera impactos acentuados em escala mundial. De acordo com a FAO (1992), aproximadamente 25 bilhões de toneladas de solo (17 toneladas por hectare cultivado) são erodidos a cada ano. Os impactos da degradação podem possuir semelhanças a nível global, porém a nível regional, os fatores-causa apresentarão diferenciações. Os efeitos sobre o ambiente irão variar de região para região, dependendo dos tipos de culturas agrícolas, da exploração da produtividade biológica, da técnica e do manejo, do grau de desmatamento, das políticas públicas e dos recursos naturais (geomorfológico, pedológico, fitogeográfico, climático, hidrológico).

2.3 DESERTIFICAÇÃO SEUS INDICADORES

A UNCCD (1994) considera o Nordeste do Brasil como sendo uma área potencialmente propícia ao processo de desertificação. A região semiárida brasileira caracteriza-se por ser um ambiente em equilíbrio instável (VASCONCELOS SOBRINHO, 1983; SCHENKEL e MATALLO JUNIOR, 2003; SAMPAIO *et al.*, 2003), e interferências nesse ecossistema podem ocasionar uma sucessão de impactos na cobertura vegetal e no solo. Dentre as formas de degradação estão lavouras itinerantes, criação extensiva, queimadas (VASCONCELOS SOBRINHO, 1983), manejo inadequado do solo e utilização de cultivos agrícolas inapropriados para as características climáticas e pedológicas da região. A região semiárida do Nordeste brasileiro caracteriza-se por um regime de distribuição irregular de chuvas, que variam entre 268 e 800 mm anuais com elevadas taxas de evaporação (AB' SABER, 2003; MMA, 2007) e solos rasos, pedregosos, com tendência a salinidade e sodicidade, alta concentração de material mineral e baixa capacidade de drenagem (EMBRAPA, 1999).

Vasconcelos Sobrinho (2000) destaca a fenomenologia da desertificação no Nordeste do Brasil, expondo que a região conhecida como o Polígono das Secas está sujeita ao fenômeno. Estabelece ainda, duas causas fundamentais para o processo nesta área: o equilíbrio instável da área, resultante de fatores do clima e do solo, e a ação humana, abordando que:

“enquanto não há interferência, esse periclitante equilíbrio entre flora e fauna e o meio hostil, vai se mantendo a duras penas. Mas vem o homem e ocupa a área; derruba e queima a cobertura vegetal, quebrando um dos elos da cadeia de condicionantes, e dá-se a ruptura do complexo: o solo foge perdendo a fertilidade, assoreando os rios, sua superfície resseca-se e impermeabiliza-se; a cobertura vegetal perde a pujança e degrada-se; a atmosfera desidrata-se e aquece-se,

dificultando as precipitações; as reservas de água das profundidades do solo míngum, as fontes estancam-se e os rios tornam-se intermitentes” (VASCONCELOS SOBRINHO, 2000, p. 10)

Reis (1988) expõe que essa questão é favorecida pela pressão exercida pelo homem em ecossistemas de baixa estabilidade considerados frágeis ou suscetíveis, como sendo ambientes em equilíbrio instável, onde o rompimento dessa estrutura acarreta o desgaste, que tende a se processar de modo rápido e acentuado. A quebra desse equilíbrio pode ser manifestada, mediante a exploração irracional dos componentes, pelo uso inadequado do suporte físico, que ocasiona a diminuição da biota e da capacidade produtiva dos solos, exaurindo as nascentes e assoreando os mananciais. Tais ações têm como consequência a quebra do equilíbrio natural.

Reining (1978 *apud* MABBUTT, 1986) propôs a utilização de sinais ou indicadores para avaliação do processo de desertificação, identificando como possíveis indicadores: solo, água, reflectância relativa, vegetação, animais, terra e uso da água, mudanças nos padrões de assentamentos, parâmetros biológicos humanos e parâmetros do processo social. Estas variáveis de análise foram integradas nos seguintes indicadores: físico, biológico/agricultura, social, sendo levada em consideração a escolha dos indicadores de acordo com o local de análise.

Mabbutt (1986) ressalta que para compreender o processo de desertificação, a partir dos seus indicadores é necessário diferenciá-los em diretos e indiretos. Os indicadores diretos são constituídos por elementos de diagnóstico diante de um conjunto inter-relacionado ou um sistema de fenômenos específicos, que determinam uma condição ambiental. Os indicadores indiretos refletem elementos secundários ou consequentes interações de sistemas adjacentes. O autor adverte que devido à desertificação estar associada a condições ambientais complexas, um indicador indireto pode integrar e generalizar efeitos ao fenômeno.

Vasconcelos Sobrinho (1978a) estabelece que para entender o processo da desertificação é necessária a mensuração e a aplicação de indicadores, físicos, biológicos e sociais. Estes podem ser compreendidos a partir de suas variáveis (Quadro 2).

Vasconcelos Sobrinho (1978b), a partir do trabalho desenvolvido por Reining em 1978, foi o primeiro pesquisador brasileiro a propor indicadores como método de análise do processo de desertificação, tendo como foco de avaliação suas observações nas seis áreas-piloto distribuídas pelo Nordeste brasileiro.

1 - Área-Piloto 1: Piauí, municípios de Gilbués, Simplício Mendes, Cristino Castro, Ribeiro Gonçalves, Corrente e municípios vizinhos;

2 - Área-Piloto 2: Ceará, municípios de Tauá, Arneiroz, Mombaça, Aiuaba, Catarina, Saboeiro, Irauçuba e municípios vizinhos;

3 - Área-Piloto 3: Rio Grande do Norte, municípios de Currais Novos, Acari, Parelhas, Equador, Carnaúba dos Dantas, Jardim do Seridó e municípios vizinhos;

4 - Área-Piloto 4: Paraíba, municípios de Juazeirinho, São João do Cariri, Serra Branca, Cabaceiras, Camalaú, Piauí e municípios vizinhos;

5 - Área-Piloto 5: Pernambuco, municípios de Salgueiro, Parnamirim, Cabrobó, Itacuruba, Belém do São Francisco, Petrolina, Afrânio, Ouricuri, Araripina e municípios vizinhos;

6 - Área-Piloto 6: Bahia, municípios de Uauá, Macuré, Chorrochó, Abaré, Rodelas, Curaçá, Glória, Jeremoabo, Juazeiro e municípios vizinhos.

Foram propostos 36 indicadores distribuídos em seis categorias de parâmetros (Quadro 2 e 3). As seis categorias foram subdivididas da seguinte forma: físico (9 indicadores), biológico/agrícola (8 indicadores), sociais/uso da terra (7 indicadores), tipos de assentamentos nas populações rurais (4 indicadores), parâmetros biológicos humanos (3 indicadores) e parâmetros de processo social (5 indicadores).

Quadro 2 – Indicadores da desertificação no Nordeste brasileiro propostos por Vasconcelos Sobrinho (1978a).

Indicadores	Variáveis
Físicos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Climatologia ▪ Pluviometria ▪ Temperatura ▪ Vento (velocidade do vento) ▪ Umidade relativa ▪ Evaporação e evapotranspiração ▪ Tipo de clima/Zoneamento árido ▪ Características geomorfológicas ▪ Hidrologia ▪ Hidrografia

Indicadores	Variáveis
Biológicos – Agrícolas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vegetação
Sociais	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Densidade demográfica ▪ Uso da terra ▪ Tipos de assentamentos ▪ Parâmetros biológicos humanos ▪ Migração ▪ Circulação de dinheiro

Fonte: VASCONCELOS SOBRINHO (1978a).

Quadro 3 - Indicadores do processo de desertificação no Nordeste brasileiro sugeridos por Vasconcelos Sobrinho baseados em Reining (1978).

Categorias	Indicadores
Físicos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Salinização e alcalinização do solo ▪ Profundidade das águas subterrâneas ▪ Qualidade da água ▪ Número de tormentas de pó e de areia ▪ Presença de crostas no solo ▪ Quantidade e teor de matéria orgânica ▪ Sedimentos nas correntes de água ▪ Turbidez das águas superficiais ▪ Albedo
Biológicos/Agrícolas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cobertura vegetal ▪ Biomassa acima da superfície ▪ Espécies vegetais; distribuição e frequência ▪ Espécies animais chave ▪ População de animais domésticos ▪ Composição dos rebanhos ▪ Produção ▪ Rendimento (colheita)

Categorias	Indicadores
Sociais/Usos da terra	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Agricultura por irrigação ▪ Agricultura de sequeiro ▪ Pastoreio ▪ Corte da cobertura vegetal para combustível e construções
Sociais/Usos da terra	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mineração ▪ Produção ▪ Instalações de turismo e de recreio
Tipos de assentamentos nas populações rurais	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Assentamento recente ▪ Expansão do assentamento ▪ Diversificação do assentamento ▪ Abandono do assentamento
Parâmetros biológicos humanos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estrutura da população e taxas demográficas ▪ Medições da situação em matéria de nutrição ▪ Índice de saúde pública
Parâmetros de processo social	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Conflito ▪ Migração ▪ Esquema de redistribuição ▪ Marginalização ▪ Circulação de dinheiro relativamente à subsistência

Fonte: VASCONCELOS SOBRINHO (1978b).

Os indicadores sugeridos por Vasconcelos Sobrinho (1978b) receberam reconhecimento pela sua divisão em categorias, distinguindo o aspecto integralizado da desertificação e expondo indicadores de desertificação reais e não apenas potenciais. Fato este que facilitou o desdobramento de pesquisas e a elaboração de um número de indicadores para cada categoria, possibilitando a constatação de que cada localidade possui características singulares.

Rodrigues (1992) buscou elaborar um método de identificação de indicadores físicos e socioeconômicos para a desertificação que permitisse uma maior aproximação e seleção das áreas de estudo. Para tal, a região Nordeste foi dividida em oito microrregiões, englobando os Estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia. Foram identificadas e selecionadas para as microrregiões, informações sobre: área de decapeamento, erosão, salinização, uso de defensivos agrícolas e mecanização, qualidade de água, redução de fertilidade, estagnação econômica, pecuarização, atividade humana (mineração, agricultura de sequeiro e irrigada, pecuária de bovinos, caprinos e ovinos), dados populacionais, tempo de ocupação e sistema de propriedade da terra. A partir das informações foi possível construir uma matriz de indicadores, por meio das relações entre as microrregiões indicadas e as variáveis causas e consequências da desertificação. A matriz revela somente a presença ou ausência das variáveis na microrregião, tendo como parâmetros de separação das microrregiões em muito grave (>80% de presença), grave (60 a 80% de presença) e moderada (>60% de presença).

Matallo Junior (2001) descreve o processo de organização dos países da América Latina e Caribe para formulação de indicadores do processo de desertificação. No tocante ao Brasil, em 1995, foi confeccionado um documento com os indicadores da desertificação, que contou com a participação de diferentes pesquisadores como: Valdemar Rodrigues e Deocleciano Guedes Rodrigues (Instituto Desert), Marcos Leandro Kazmiecziak (Fundação Cearense de Meteorologia - FUNCEME), Georges André Fotius (Centro de Pesquisa do Trópico Semiárido), Ana Lúcia Galvão (Centro de Sensoriamento Remoto do Instituto Brasileiro de Meio Ambiente - IBAMA), José Bueno Conti (Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo - USP) e Eduardo Mendoza Torrico (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE). O resultado dessa reunião foi a formulação de 19 indicadores, divididos em aspectos físicos, biológicos e socioeconômicos com suas respectivas variáveis de análise (Quadro 4).

Quadro 4 – Indicadores da desertificação para o Nordeste brasileiro propostos por Matallo Junior.

Indicadores	Variáveis
1. Erosão	Percentual de solo erodido Intensidade e tipo
2. Salinização	Condutividade elétrica

	Sodicidade/Alcalinização
Indicadores	Variáveis
3. Perda de fertilidade	CTC/pH/Aluminização
4. Cobertura vegetal	Percentual de cobertura
5. Índice de vegetação	Método específico de sensoriamento remoto
6. Produtividade agrícola	kg/ha
7. Produtividade pecuária	kg/ha
8. Disponibilidade de água de superfície	Vazão
9. Disponibilidade de água subterrânea	Profundidade dos lençóis
10. Qualidade da água	Conteúdo salino
11. Coeficiente de uso	Demanda atual de mão de obra/Demanda potencial de mão de obra
12. Coeficiente de excesso	Oferta atual de mão de obra/Demanda atual de mão de obra
13. Coeficiente de saturação	Demanda atual de mão de obra/Demanda potencial de mão de obra
14. Ingresso	Renda <i>per capita</i>
15. Estrutura etária	Distribuição de idades
16. Migrações	Crescimento líquido da população
17. Densidade demográfica	hab/km ²
18. Nível de educação	Tempo de escolaridade
19. Dinâmica demográfica	Densidade demográfica e migrações

Fonte: MATALLO JUNIOR (2001).

Os indicadores formulados foram anexados aos demais grupos de trabalho para preparação do documento final destinado a FAO – *Metodología Unificada para la Evaluación y Monitoreo de la Desertificación en America Latina*, sob a coordenação do pesquisador Fernando Santibañez. Matallo Junior (2001) ressalta alguns questionamentos realizados sobre a efetivação desses indicadores para formulação de uma metodologia unificada ao nível

regional: i) a grande quantidade de indicadores (52 indicadores); ii) a dificuldade em trabalhar com essa quantidade de indicadores; iii) os problemas para integrar os indicadores físicos, biológicos e socioeconômicos por meio de uma abordagem sistêmica; iv) a alta complexidade do sistema e a dificuldade de implantação em regiões de grande heterogeneidade entre os países; v) a necessidade da conciliação entre os indicadores e seu caráter metodológicos associado a epistemologia do tema.

Sampaio e Sampaio (2002) sugeriram a construção de dois índices, como mais uma ferramenta de análise, um relacionado para estimar a propensão ou susceptibilidade à desertificação e outro para avaliar a ocorrência da desertificação. O índice de propensão é composto por cinco subíndices: 1) redução na cobertura da vegetação; 2) degradação ambiental; 3) deterioração da agricultura; 4) declínio econômico; 5) complicações sociais. Cada subíndice é formado por indicadores específicos, que auxiliaram na construção das principais variáveis locais. Os autores salientam que os indicadores de propensão são semelhantes aos indicadores de desertificação, sendo estes avaliados quanto a sua mudança no tempo. Como causas mais frequente da existência deste fenômeno, podem ser indicadas algumas atividades humanas: sobrepastoreio, irrigação, desmatamento, mineração e cultivo excessivo, além do sistema de propriedade da terra e da superpopulação.

Vasconcelos Sobrinho (1983, p. 30) ressalta que como:

“... espelho do meio, a vegetação que recobre o solo de uma área é o indicador mais evidente e seguro da sua vocação ecológica. Nas regiões semiáridas essa vocação ecológica tende espontaneamente para a desertificação. Contudo, é a presença do homem que se rompe esse equilíbrio, deflagrando os processos de degradação ambiental que, uma vez iniciados, tendem a se agravar em um processo dinâmico auto propelido, difícil de ser contido”.

Assim, a vegetação de Caatinga constitui-se um espelho das condições: restritivas, limitantes do ambiente: solo, regime hídrico, temperatura e luminosidade. Vasconcelos Sobrinho (2000) destaca que o Nordeste não é a região-problema. O problema é o homem que a habita, que erradamente planeja, e insiste em ignorar as limitações ecológicas dos seus recursos.

A recuperação das áreas críticas constitui-se de uma ação necessária por meio da implantação de medidas de contenção/minimização para conter o processo de desertificação, sendo fundamental o sábio manejo dos recursos naturais. Ressaltam-se as pesquisas desenvolvidas por Le Houérou, onde se menciona que a “cura da desertificação é conhecida desde longo tempo: consiste em fazer reverter o procedimento, isto é, conduzir à recuperação

biológica das condições ambientais pelos processos naturais ou induzidos artificialmente” (VASCONCELOS SOBRINHO, 2000, p. 44).

A desertificação é um fenômeno complexo e a construção de indicadores auxilia na tentativa de compreender os fatores causas e consequências para tentar propor ações mitigadoras. Rodrigues (1992) expõe que a desertificação deve ser entendida como um fenômeno integrador de processos econômicos, sociais e naturais e/ou induzidos que destroem o equilíbrio do solo, da vegetação, do ar e da água, bem como a qualidade de vida humana, nas áreas sujeitas a uma aridez edáfica e/ou climática. Neste sentido, o monitoramento e a recuperação das áreas críticas se constituem de uma ação necessária por meio da implantação de medidas de contenção/minimização para conter o processo de desertificação, sendo fundamental o correto manejo dos recursos naturais.

2.4 NÚCLEOS DE DESERTIFICAÇÃO NO NORDESTE BRASILEIRO E A DEGRADAÇÃO AMBIENTAL NO BIOMA CAATINGA

O semiárido do Nordeste do Brasil apresenta uma extensão territorial de 1.554.387,7 km² e, destas cerca de 180.000 km² são áreas em processo de degradação entre parâmetros muito graves e graves (MMA, 2007). Nestas condições encontram-se extensas áreas em processo de desertificação, divididas segundo sua localização e denominadas de núcleos de desertificação, que são considerados os níveis mais elevados de degradação com características a expandirem-se por áreas circunvizinhas aumentando o seu raio de influência (VASCONCELOS SOBRINHO, 1983).

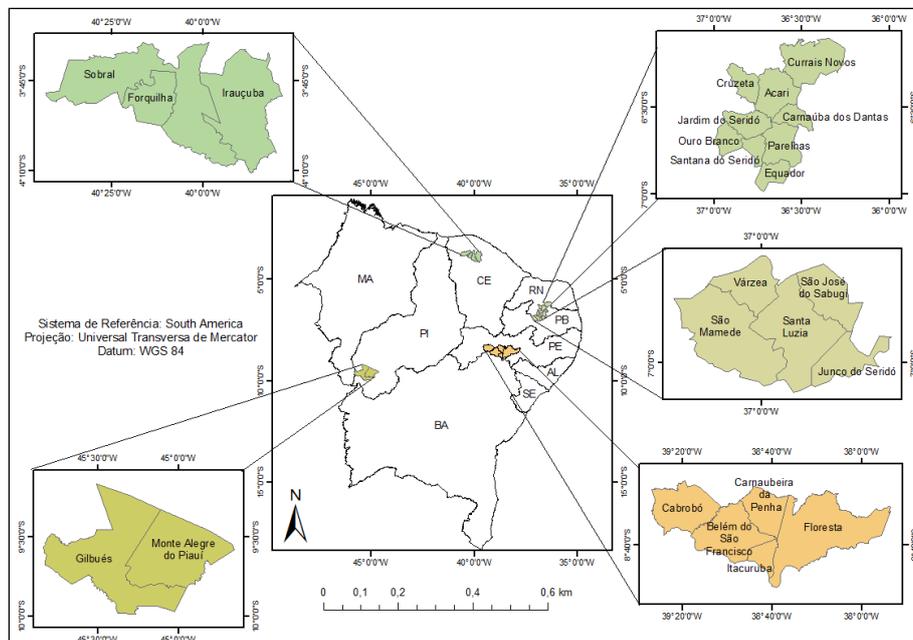
No Nordeste brasileiro, a condição de semiaridez dominante faz com que se desencadeiem processos naturais de retrogressão biótica nos períodos de secas prolongadas que, associados à antiga e intensa pressão antrópica, tem levado à formação de núcleos de degradação edáfica e biótica de caráter às vezes irreversível (RODRIGUES, 1992).

Em 1977, Vasconcelos Sobrinho, juntamente com a SUDENE, iniciaram um estudo para identificar as áreas em processo de desertificação. Tal estudo visou distinguir e selecionar as áreas mais críticas do fenômeno, como áreas pilotos. Neste sentido, Vasconcelos Sobrinho selecionou seis áreas piloto para observação e posterior mapeamento da desertificação no Nordeste brasileiro. Posteriormente, o Núcleo Desert, da Universidade Federal do Piauí – UFPI, fez novos estudos na década de 1990, a partir dos dados expostos por Vasconcelos Sobrinho, com o apoio do Ministério do Meio Ambiente e da Embrapa Semiárido (MMA, 2005). Esses estudos trouxeram novas evidências sobre as áreas

submetidas ao processo de desertificação, constatando que uma das principais causas para a intensa degradação dessas áreas é referente à substituição da caatinga pela agricultura e pecuária, como também pela mineração (Gilbués), extração de argila de solos aluviais (Seridó) e retirada de madeira para lenha e carvão. Essas áreas foram caracterizadas pelo alto risco ao processo de desertificação, sendo conhecidas como núcleos de desertificação (MMA, 2005). Os núcleos de desertificação ocupam uma área de 18.740 km², compreendidos os núcleos de Gilbués (PI), Irauçuba (CE), Seridó (RN e PB), Cabrobó (PE) (MMA, 2007) (Figura 3). A nova classificação dos núcleos de desertificação estabelecida pelo Instituto Nacional do Semiárido – INSA em níveis de degradação moderada, grave e muito grave pode ser observada na Figura 4.

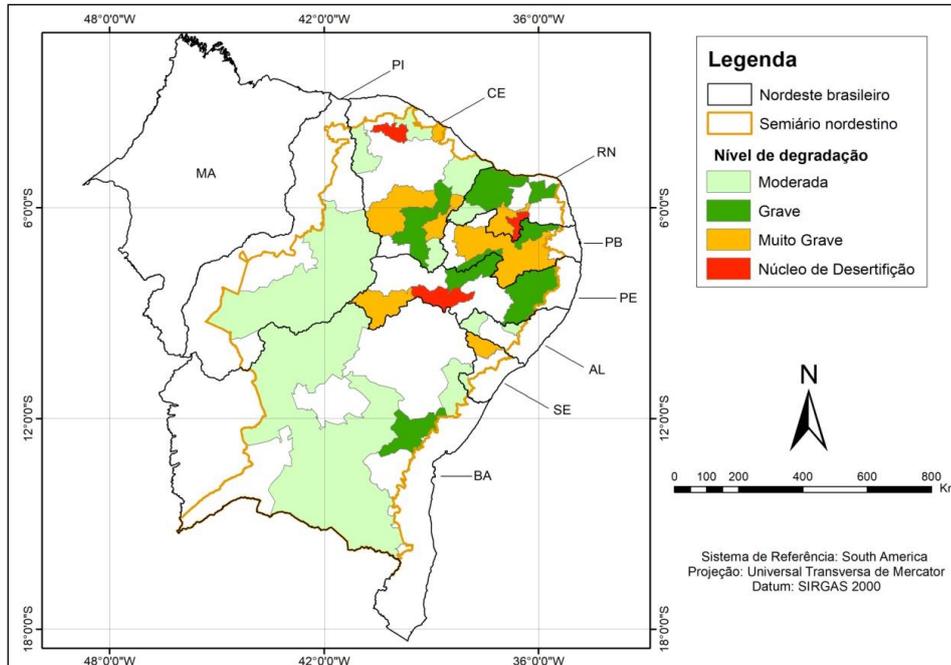
Cada núcleo possui uma característica própria, se distinguindo pela formação geológica e pelos aspectos pedológicos. Entretanto, alguns impactos são semelhantes como a erosão, salinização, queimadas, mecanização, pecuária extensiva, compactação de solos, sobrepastoreio, desmatamento, perda da fertilidade do solo e diminuição da produção agrícola. As exceções ficam por conta dos núcleos de Gilbués (PI) e Seridó (RN e PB) com a exploração mineral de diamantes, cassiterita e berilo, respectivamente. Tal atividade exerceu grande papel econômico para as regiões, mas também contribuiu fortemente na ampliação do processo de desertificação (MMA, 2005).

Figura 3 – Núcleos de desertificação do Nordeste brasileiro.



Fonte: IBGE, 2001; MMA, 2007. Elaborado pela autora. Licença ArcGis 9.3 fornecida por DCG/UFPE.

Figura 4 – Núcleos de desertificação estabelecidos pela classificação do INSA.



Fonte: IBGE, 2001; INSA, 2017. Elaborado por Victor Pina. Licença ArcGis 9.3 fornecida por DCG/UFPE.

O núcleo de desertificação de Cabrobó, em Pernambuco, é formado por cinco municípios: Belém do São Francisco, Cabrobó, Carnaubeira da Penha, Floresta e Itacuruba (Figura 5).

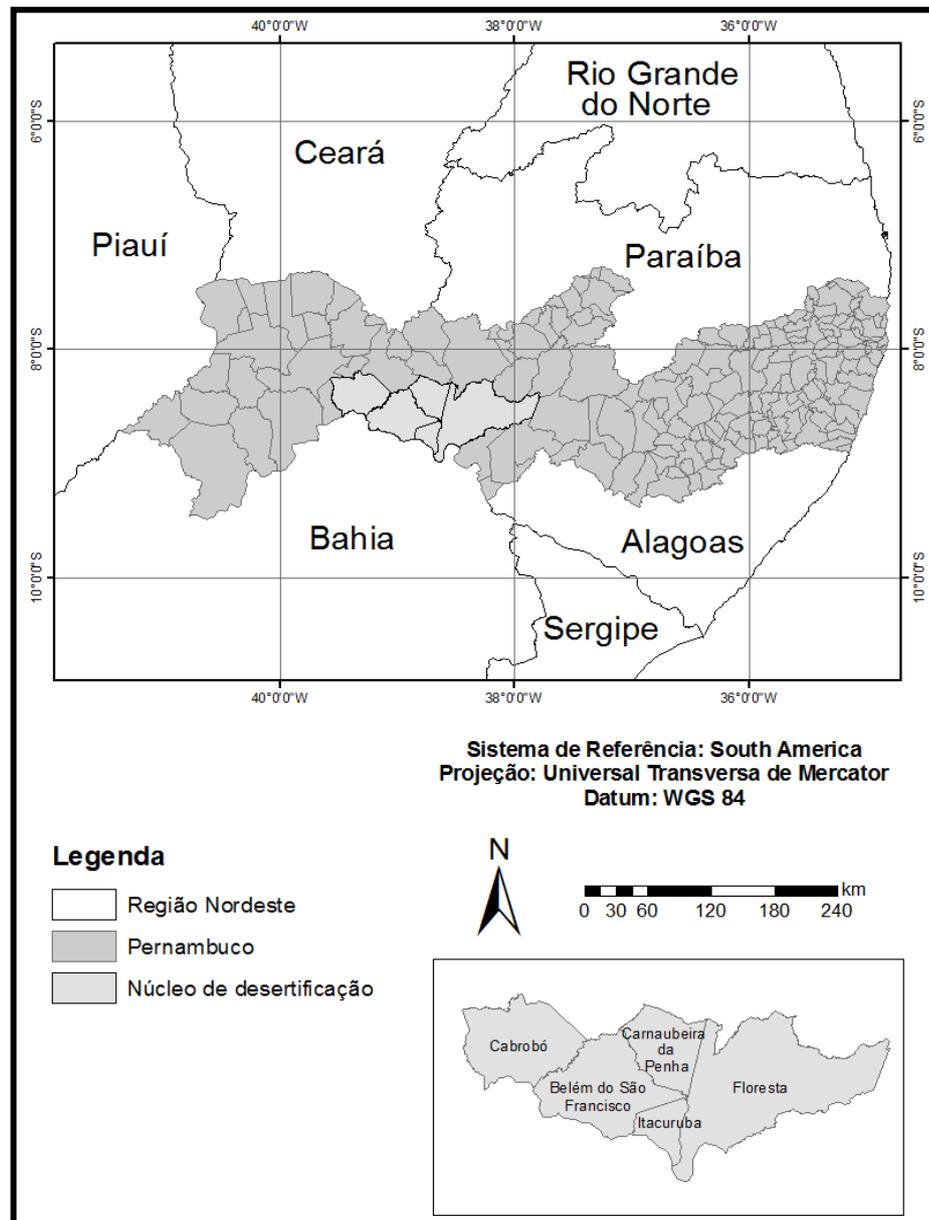
O município de Cabrobó está localizado às margens do rio São Francisco, na Mesorregião do São Francisco e na Microrregião de Petrolina, no Estado de Pernambuco. Possui na sua localidade a ilha de Assunção, que se configura como principal núcleo agrícola, habitada pela população indígena Truká. A região passou por vários conflitos pela posse da terra entre os indígenas, a igreja católica e os fazendeiros.

Andrade-Lima (2007) ressalta que as diferentes zonas fitogeográficas encontradas em Pernambuco são partes ou repetições das grandes zonas fitogeográficas do Brasil. O autor afirma que o referido Estado é dividido em quatro zonas fitogeográficas e suas subzonas, dentre elas: litoral, mata, cerrado e caatinga. A zona da caatinga é a maior zona fitogeográfica pernambucana, caracterizada por uma vegetação de porte médio a baixo, com espécies tropófilas (decíduas), formada de pequenas folhas ou espinhos, com presença de cactáceas e bromeliáceas.

Apresentando-se em grandes áreas heterogêneas, a Caatinga agrupa-se em diferentes zonas fitogeográficas encontradas no território Pernambucano, sendo oriunda de repetições das grandes zonas fitogeográficas do Brasil. Andrade-Lima (2007) descreve que o Estado de

Pernambuco divide-se em quatro zonas fitogeográficas e suas subzonas, litoral, mata, cerrado e caatinga, e é compreendida em duas subzonas: agreste e sertão. A subzona sertão pode ser ainda subdividida em Sertão Central; Sertão dos Chapadões Areníticos; Sertão do São Francisco; Sertão de Jatinã e Sertão do Araripe. É considerada a maior zona fitogeográfica pernambucana, sendo a 37ª maior região natural do planeta (MMA, 2003).

Figura 5 – Núcleo de desertificação de Cabrobó, Pernambuco.



Fonte: IBGE, 2001. Elaborado pela autora. Licença ArcGis 9.3 fornecido por DCG/UFPE.

A caatinga é um bioma de elevada biodiversidade e inúmeros endemismos. Leal *et al.* (2003) expõem que a caatinga é uma região de características áridas cercada de biomas

tropicais, enquadrando esse bioma como uma anomalia climática detentora de variedades de plantas, invertebrados e vertebrados adaptados a um regime de chuvas espaçadas. De acordo com Tabarelli e Silva (2003), a Caatinga tem aproximadamente 800.000 km², e abrange oito dos nove Estados que compõem a região Nordeste (não sendo encontrado apenas no estado do Maranhão) e ao norte de Minas Gerais. É o único ecossistema, totalmente, brasileiro, possuindo 4,3% de aves e 57% de peixes endêmicos, porém mesmo com essas características, cientificamente, é um dos ecossistemas menos conhecidos da América do Sul. Essa falta de conhecimento que existe sobre a Caatinga faz com que ela seja um ecossistema bastante ameaçado.

Castelletti *et al.* (2003), estimam que a área alterada por ações humanas na Caatinga pode variar de 223.100 km² (30,38%) a 379.565 km² (51,68%). Essa devastação ocorre devido ao processo de “ilhamento” da vegetação, decorrentes das estradas que cortam a região do semiárido. Os autores determinam esse processo de “zona do efeito da estrada”. Essas “ilhas” tornam a Caatinga muito fragmentada, ocasionando riscos de perda da diversidade desse bioma, pois fauna e flora ficam isoladas nessas “ilhas”, fazendo com que a sua reprodução fique atrelada aos indivíduos da mesma área, reduzindo a disseminação das sementes e tornando a vegetação menos resistente às pragas e eventos severos do clima.

A modificação da Caatinga dá-se pela exploração de seus recursos físicos, principalmente por meio da agricultura, tendendo a agravar os problemas ambientais e acelerar o processo de desertificação. Esse Bioma é considerado um dos ecossistemas brasileiros mais modificados, só perdendo para a Floresta Atlântica e o Cerrado.

Os componentes espaciais existentes na Caatinga fazem com que se sobressaiam à presença de estrutura vegetacional de pequeno porte intercalada com feições de média a alta, para as características ambientais do Bioma. Estas, em algumas estações do ano, se exibem secas pela estiagem, mostrando um ambiente formado por vegetações espinhosas, que se adaptaram a pouca disponibilidade de água e elevada transpiração. Dessa maneira, grande parte da vegetação perde suas folhagens na estação seca, se mantendo latentes, secas e retorcidas aparentando morbidez, porém permanecem vivas obtendo água do subsolo a partir de suas raízes, a exemplo inúmeras bromeliáceas e cactáceas encontradas na região (COIMBRA-FILHO e CÂMARA, 1996).

Dentre os métodos de monitoramento ambiental está a utilização das geotecnologias como ferramentas importantes para análises e interpretações do espaço geográfico. Deste modo, o geoprocessamento e o sensoriamento remoto estão, cada vez mais, se tornando ferramentas utilizadas por vários órgãos públicos e privados, principalmente, para as questões

de ordenamento territorial e monitoramento ambiental. Desta forma, as informações contidas nas imagens permitem a interpretação, de acordo com a temática a ser pesquisada, dentre elas as relativas às mudanças ambientais, sendo um excelente recurso para o manejo e monitoramento de recursos naturais e desenvolvimento urbano (GALVÍNCIO e SILVA, 2012).

Estudos com a aplicação de imagens de satélite para avaliação ambiental, empregadas por Sá *et al.* (2006) com imagens Landsat TM 5 datada no ano de 2002, indicaram que o município de Belém do São Francisco se configura como uma área com níveis de degradação entre baixo, acentuado e severo. Em adição Ribeiro (2016) fez o monitoramento ambiental a partir de parâmetros biofísicos (albedo, emissividade, temperatura da superfície, Índice de vegetação) da bacia do rio Pajeú e observou que sua porção centro-sul apresenta território considerável de solos expostos, com indicação de elevado grau de susceptibilidade à erosão, principalmente na foz. Assim, fica demonstrada a eficácia dos parâmetros biofísicos para a compreensão da dinâmica dos padrões espaciais, temporais e espectrais de ambientes semiáridos como o do sertão nordestino.

As folhas de uma vegetação são os elementos que mais contribuem para a detecção por sensores orbitais. Entretanto, suas características espectrais podem mudar em função de doenças, ataques de insetos, variações de umidade e temperatura (CAMPBELL, 1996). Devido à relevância da vegetação para estudos com uso de sensores acoplados em satélites, foram desenvolvidos índices de vegetação a partir da utilização de números digitais na radiância ou reflectância no topo da atmosfera ou na superfície. A combinação desses valores em diferentes regiões do espectro através de adições, subtrações, divisões e multiplicações, originam a construção dos índices de vegetação, permitindo remeter ao estado ou à quantidade de vegetação em uma dada área em diferentes escalas temporais (CAMPBELL, 1996; VERSTRAETE e PINTY, 1996; LIANG, 2004; SILVA *et al.*, 2012).

A Caatinga necessita de conservação para manutenção de sua biota, cujas espécies são vitais para o bioma que é, majoritariamente, endêmico. Barbosa (1998), afirma que uma das grandes adversidades enfrentadas pelo semiárido é a degradação vegetacional para a ocupação agrícola e pecuária com retirada total e parcial da sua cobertura vegetal.

Vasconcelos Sobrinho (2000) aponta que a subtração em série da cobertura vegetal, bem como seus respectivos usos e ocupações indevidas acabam por gerar sérios danos à biodiversidade do semiárido, acarretando no desnudamento do solo, fazendo surgir inúmeras condições restritivas limitantes do meio, implicando na dificuldade de infiltração de água e aumento no número de escoamento superficial. Este, por sua vez, remove os nutrientes

existentes, comprometendo a produtividade dos solos e, conseqüentemente, a economia da região baseada na produção agrícola.

Barbosa (1998) ressalta que o principal motivo que permeia a degradação ambiental em áreas de caatinga é a ausência de conhecimento qualitativo e quantitativo sobre a riqueza natural existente, sendo essa ameaçada pelo uso inadequado de seus recursos, causando a extinção de espécies antes mesmo de serem (re)conhecidas. Tabarelli e Vicente (2003) apontam que menos de 2% da Caatinga está realmente segura em unidades de conservação analisando que mais de 90% desses foram tomados pela desertificação e salinização, havendo o perigo iminente das áreas mais produtivas perderem seu rendimento, bem como a redução da vegetação endêmica da região, refletindo na perda da biodiversidade pelo modo insustentável de vida.

2.5 REMEDIAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS

O aumento populacional e a pressão econômica pela produção de alimentos têm resultado na elevação de áreas de solos degradados por salinidade e sodicidade, em virtude da expansão das áreas irrigadas em terras marginais, do uso de águas salinas na irrigação, do manejo inadequado da água e do solo e da ausência de drenagem, com grandes prejuízos para a economia regional do Nordeste brasileiro (RIBEIRO, 2010).

Neste sentido, estão sendo desenvolvidas técnicas para remediação/redução de impactos ambientais suscitados pela salinidade e sodicidade dos solos, que tem como consequência a perda da fertilidade e da matéria orgânica e diminuição da produção agrícola. Dentre as técnicas empregadas para recuperação de áreas degradadas por sais estão à lavagem dos sais e a aplicação de compostos químicos. Por outro lado, existem técnicas auxiliares tais como: mecânicas através da aração profunda, da subsolagem, e da mistura com areia para aumentar a macroporosidade e permeabilidade; técnicas biológicas: aplicação de resíduos orgânicos, cultivos de elevada evapotranspiração para rebaixamento do lençol freático (CAVALCANTE *et al.*, 2010), bem como o uso de organismos biológicos e plantas.

A biorremediação consiste na utilização de organismos vivos tais como: microrganismos, fungos, plantas, algas verdes ou suas enzimas, tendo como finalidade reduzir ou remediar compostos orgânicos tóxicos ao ambiente. O processo de biodegradação atua diante da introdução de processos biológicos, que aceleram e incrementam a velocidade do processo natural de degradação dos compostos tóxicos (MARIANO, 2006).

Ueta *et al.* (1999) expõem que a biorremediação é um dos campos mais promissores da biotecnologia, devido à utilização de microrganismos na remediação de áreas contaminadas por agroquímicos. Os microrganismos presentes no solo são capazes de degradar e mineralizar substâncias tóxicas. Tal fato permite a remediação biológica ou biorremediação de uma área pela incorporação/ação de microrganismos.

Dentro do contexto da remediação de solos se constata a fitorremediação, que consiste na utilização de plantas e sua microbiota, associada a práticas agrícolas para removerem, imobilizarem ou tornarem os contaminantes inofensivos ao ambiente. A vegetação empregada é composta normalmente por halófitas, que têm a capacidade de absorver e acumular elementos químicos dispersos no solo (QADIR *et al.*, 2001). A fitorremediação consiste na fitoextração, absorção e acumulação de contaminantes nos tecidos das plantas; fitoabsorção com a absorção do contaminante no sistema radicular, tornando os contaminantes inertes; fitoestabilização relacionada à adição de materiais ao solo que podem imobilizar os contaminantes; fitoestimulação que tem o efeito de estimular a biorremediação por meio de fungos e outros microrganismos localizados no sistema solo-raiz (BAÑUELOS, 2000).

A fitorremediação é uma técnica empregada em solo salino sódico com espécies vegetais hiperacumuladoras de sais como o cloreto de sódio. Estudos estão sendo desenvolvidos na tentativa de recuperação/redução da sodicidade em solos afetados pela salinização como a utilização de gesso e calcário (BARROS *et al.*, 2004) e da planta *Atriplex nummularia* como alternativa para fitorremediação, constatando que esta pseudohalófito é hiperacumuladora de sódio (LEAL *et al.*, 2008).

Leal (2005) avaliou a capacidade de remediação de *A. nummularia* associada ao gesso de jazida na fitorremediação de solo salino-sódico. Constatou que quando incorporado o gesso a espécie vegetal potencializa a capacidade de fitoextração. Tais dados foram observados a partir de 100 dias, período que foi possível verificar a transferência de sódio para a planta.

Souza (2010) observou em quatro tipos diferentes de tratamentos que a espécie *A. nummularia* foi capaz de fito extrair sódio, cloreto e potássio de Neossolo flúvico de caráter salino-sódico. Estes dados foram ratificados por Santos (2012) que comprovou o potencial hiperacumulador de espécie vegetal, constatando que a aplicação de gesso favorece a qualidade física do solo por meio do incremento da condutividade hidráulica e diminuição do teor de argila dispersa em água.

Miranda (2013) verificou em experimentos com *A. nummularia* em Perímetro Irrigado de Custódia (PE), em áreas degradadas pela salinidade e sodicidade, que em camadas mais

profundas do solo houve um aumento dos teores de sódio. O autor destaca que essa elevação nos valores de sódio pode estar condicionada à água utilizada, que se encontra com valores de sódio com risco moderado de toxicidade para as plantas. Tal estudo ressalta ainda, que a *A. nummularia* associada à aplicação de polímero e esterco ovino foi capaz de reduzir os valores da condutividade elétrica, sódio solúvel e cloreto, principalmente na camada superficial do solo.

A biorremediação revela-se como uma proposta de otimização do processo de degradação de solos contaminados a partir de reações bioquímicas através de microrganismos presentes no ambiente (ATLAS, 1981). As propriedades químicas e físicas do solo podem influenciar no processo de biorremediação (BEŠKOSKI *et al.*, 2011), ou pela biodegradação de hidrocarbonetos e metais pesados associada à radiação ultravioleta (CHEN *et al.*, 2011). Nesse contexto, a ação de ácidos orgânicos pode estimular a atividade microbiana envolvida na biorremediação (DERCOVÁ *et al.*, 2007). Colla *et al.* (2008) comprovaram essa capacidade ao utilizar fungos dos gêneros *Aspergillus*, *Penicillium* e *Trichoderma* na biorremediação de áreas contaminadas por pesticidas triazínicos, demonstrando que os locais contaminados funcionam como meio seletivo para os microrganismos, de tal forma que existe um processo de adaptação das espécies ao local que se utilizam do contaminante como fonte de nutrientes.

2.6 AÇÃO DOS LIQUENS SOBRE ROCHAS E SOLOS

A ação dos líquens sobre as rochas é fundamental no processo de pedogênese para a formação dos solos. As substâncias liquênicas iniciam o processo de intemperismo biogeoquímico e biogeoquímico, tornando disponíveis minerais antes consolidados na rocha matriz (SEAWARD, 1977). Rundel (1978) destaca o importante papel ecológico das substâncias liquênicas pela capacidade dos compostos produzidos agirem como agentes complexantes. Silva (2007) reporta que a partir da decomposição química realizada pelos líquens é criado um substrato orgânico para o desenvolvimento de outros seres por meio da sucessão ecológica, além de serem capazes de repassar suas substâncias, que exercem influência na população microbiana do solo. Leinz e Amaral (1980) referem que através de suas rizinas os líquens podem manter relações com seu substrato, liberando seus fenóis e outras substâncias resultantes do seu metabolismo, como gás carbônico e nitratos.

Adamo e Violante (2000) enfatizam que a adesão íntima dos líquens sobre a rocha é estabelecida pela penetração das hifas em áreas fraturadas da rocha, provocando uma

desagregação física e fragmentação da superfície mineral. Rundel (1978) se refere a essa capacidade dos líquens, analisando a solubilidade dos ácidos liquênicos que pode ser fortemente facilitada pela presença de grupos polares, como —OH, —CHO e —COOH. Iskandar e Syers (1972) descobriram que substâncias liquênicas conseguem formar complexos solúveis com biotita, cálcio, magnésio, ferro e alumínio. Em adição, Adamo e Violante (2000) destacam que dependendo da natureza dos minerais presentes na rocha e do padrão de decomposição, podem ser formados processos de biossolubilização, principalmente quando analisada a interface rocha-líquen, com a segregação/liberação pelo micobionte do ácido oxálico. Salter (1856) em estudos pioneiros confirmou ser o ácido oxálico o principal agente responsável pelo processo de alterações químicas na rocha, enfatizando que esta substância exerce influência em quase todas as classes de minerais halogênicos ou mesmo em compostos de sílica.

As substâncias liquênicas, de natureza fenólica (CULBERSON *et al.*, 1977), estão envolvidas nos mecanismos de decomposição de rochas consolidadas através da quelação. Jones (1988) menciona a capacidade quelante das substâncias liquênicas que podem solubilizar cátions de substratos minerais. Pereira (1998) designa quelação como uma reação química onde a substância orgânica capta íons de substâncias provenientes da rocha. Esse processo a partir da ciclagem de nutrientes, que é um processo funcional que possibilita a retomada por meio da troca de elementos entre os componentes bióticos e abióticos, o que suscita uma permuta de compostos a partir de fatores biogeoquímicos (RICKLEFS, 2010). Esta se estabelece por movimentos circulares dos elementos tais como o nitrogênio, fósforo, cálcio, oxigênio, hidrogênio e carbono que circulam dentro da biota terrestre, permitindo a relação dos compostos inorgânicos com os elementos vivos (ODUM, 1988).

Pinto-Coelho (2000) salienta que os nutrientes presentes na rocha matriz são considerados como depósitos abióticos de renovação lenta. Devido ao intemperismo, estes nutrientes podem ser realocados tanto na forma de íons dissolvidos na água, quanto na forma de gases na atmosfera.

Nash III (2003) ressalta que a ciclagem de nutrientes pode ser dividida em intrassistema e intersistema. O ciclo de intrassistema estaria relacionado aos movimentos dos nutrientes dentro do ecossistema e o ciclo intersistema engloba o fluxo de nutrientes entre os ecossistemas e suas conexões com os ciclos globais. Devido a sua capacidade de capturar elementos dispersos no ar atmosférico, se permite aos líquens contribuir para a produtividade de ecossistemas pobres em nutrientes, seja a partir do ciclo intrassistema ou intersistema.

Os líquens possuem grande capacidade de adaptação a ambientes variados devido a sua nutrição higroscópica, sua relação indireta com o substrato, e com os demais fatores do ecossistema. Desta forma, são capazes de capturar nutrientes halogênicos dispersos para serem absorvidos pelo ecossistema (NASH III, 2003). Por isso, sua relação com o substrato pode influir no repasse desses nutrientes ao solo, que atuam de forma direta ou indireta na biossíntese de seus compostos, que são repassados ao substrato promovendo modificações e interferência em sua biota e em sua química.

2.6.1 Ação de Substâncias Líquênicas Sobre a Degradação de Rochas

As substâncias líquênicas se constituem como importantes agentes no processo de intemperismo sobre minerais rochosos. A capacidade das substâncias de ocasionarem modificações na morfologia e composição dos minerais, principalmente pelas alterações nas características da superfície rochosa, fragmentação de grãos, separação de camadas e dissolução de cátions (CHEN *et al.*, 2000).

Galvan *et al.* (1981) observaram a capacidade dos líquens em modificar rochas metamórficas e descobriram que a interação líquen-rocha propiciava a retenção de quartzo; já os minerais de mica foram encontrados retidos sob o talo líquênico, destacando que o teor de retenção está relacionado à compactação da rocha e/ou teor de minerais de mica na rocha matriz.

Silva *et al.* (2001) avaliaram a ação quelante do ácido úsnico sobre amostras de ignimbrito, rocha ígnea, do município de Ipojuca, Pernambuco. Constataram que as amostras de ignimbrito sofreram quelação pelo ácido úsnico, sendo esse processo mais efetivo nas primeiras 72h. Análises cromatográficas da ação quelante do ácido úsnico, 24h após a montagem do experimento, evidenciaram a presença de manchas púrpura, possivelmente devido à quelação do ferro presente na composição mineralógica da rocha.

Costa (2003) avaliou o processo de pedogênese do basalto a partir da ação do ácido úsnico sob condições laboratoriais, diante de três situações. A primeira o basalto submetido ao ácido úsnico durante seis meses, à temperatura ambiente; a segunda utilização do basalto e o ácido úsnico aquecidos a 40°C durante 15 dias; e a terceira fez uso de tufos de *Cladonia substellata* (Vainio) *in natura* e sobrejacente a estas amostras de basalto. Constatou que em todas as ocasiões houve o processo de quelação, sendo esta situação mais visível nos experimentos com ácido úsnico à temperatura ambiente e quando submetido à temperatura mais elevada. Isso corrobora a ação do ácido úsnico no processo de intemperismo e que

fatores físicos ambientais (temperatura, umidade e relevo) aceleram o processo de degradação da rocha.

Moura (2004) analisou a capacidade de intemperização do milonito por *C. substellata* e observou em ensaios realizados por cromatografia com os extratos retirados das alíquotas contendo ácido úsnico e amostras de milonito, que o ácido úsnico reagiu com os íons liberados da rocha, formando quelatos. A quelação ocorreu já nas primeiras 24h, o que confirma a ação quelante do ácido úsnico em amostras de milonito. Ensaios submetidos à temperatura de 40°C demonstraram que a atividade quelante é intensificada com o aumento da temperatura, propiciando decomposição dos minerais da rocha.

Barbosa (2005) observou o comportamento do migmatito sob atuação do líquen *C. substellata* como fator de formação primária do solo a partir de três circunstâncias, amostras de migmatito submetidas à ação do ácido úsnico em solução com água deionizada e à temperatura de 40°C por 12h diárias, durante intervalo de tempo de 15 dias e outro com os mesmos parâmetros por três meses, e por último a observação do comportamento do talo de *C. substellata*, no seu estado natural, sobre amostras da rocha. Verificou que houve a interação do líquen com a rocha nas três situações, já constatada nas primeiras 24h, sendo comprovado que o aumento na temperatura interfere positivamente na velocidade da intemperização da rocha, produzindo, em 15 dias, o mesmo efeito obtido à temperatura ambiente, ao longo de seis meses.

Silva (2005) testou a ação do ácido fumarprotocetrárico sobre amostras de migmatito utilizando amostras de *Cladonia verticillaris* e temperatura como parâmetro de avaliação do aumento da velocidade das reações de quelação em ambientes quentes e úmidos. Concluiu que a substância é eficiente no processo de quelação, mas a temperatura é primordial no processo.

Vasconcelos (2007) examinou o efeito do suprimento exógeno de ureia na produção de substâncias degradadoras do migmatito pelo líquen *C. verticillaris*. Foram analisados experimentos com quartzo e migmatito, e sobre estes depositados talos de *C. verticillaris*, onde se utilizaram soluções de ureia em diferentes concentrações. Constatou que os minerais de migmatito sofreram mais significativamente a degradação química pelas substâncias produzidas por *C. verticillaris*, enfatizada sobretudo pela adição de ureia a 1%. O quartzo (dureza sete), por ser resistente ao intemperismo, não apresentou ação evidente de quelação pelas substâncias percoladas pelo líquen, porém foram registrados altos valores de absorvância, principalmente nos extratos de líquens borrifados com ureia. Possivelmente, a

introdução de uma fonte exógena de ureia induziu maior síntese de metabolitos intermediários acumulados na superfície da rocha.

Barbosa (2009) contribuiu para o estudo da ação das substâncias liquênicas no intemperismo biogeoquímico quando avaliou a influência de fonte exógena de nitrogênio, sob a forma de ureia, na produção de substâncias quelantes de *C. substellata* e sua ação no intemperismo do milonito. Verificou que a ureia quando adicionada sobre o milonito, propiciou maiores teores de ácido úsnico, especialmente a concentração de 0,1%. Contudo, as amostras borrifadas com solução de ureia a 0,01%, demonstraram uma produção crescente durante todo o experimento. Tal fato evidenciou a reação sofrida pelos minerais do milonito em decorrência do ácido úsnico e influenciada pela ureia, comprovando que a ureia ao sofrer volatilização é capturada pelo líquen, alterando seu metabolismo para a produção de metabolitos secundários que foram repassados para o milonito.

Silva (2006) verificou as possíveis mudanças na produção do ácido úsnico pelo líquen *C. substellata*, submetido a diferentes dosagens da radiação gama para a determinação da capacidade quelante desse líquen e o conseqüente efeito sobre rochas calcárias. Constatou que houve um aumento na produção do ácido úsnico, diretamente proporcional às doses mais altas, até a de 10 Gy, doses superiores a este valor tiveram uma tendência à redução da produção. A ação quelante do ácido úsnico sobre rochas calcárias foi intensificada com a utilização de doses de radiação gama, que interferiu na biossíntese do líquen com o aumento nos teores de produção à medida que são elevadas as doses de radiação gama.

2.6.2 Ação de Substâncias Liquênicas na Modificação da Composição Química de Solos

Os solos têm importância singular na constituição do ecossistema por se tratar de um complexo sistema de elementos bióticos e abióticos, constituído de organismos, fragmentos de rocha e minerais (LEPSCH, 2002). Estabelecido pela ação de cinco variáveis independentes que caracterizam os fatores de sua formação como clima, organismos, material originário, relevo e tempo (BUNTING, 1971; PALMIERI & LARACH, 2003), é o resultado de fatores de sua formação e da biosfera sobre a rocha, que a partir do intemperismo físico (desintegração), químico (decomposição) e biológico (recombinação) transforma a rocha matriz em solo (DREW, 2002).

Devido à necessidade de manutenção, conservação e preservação do solo, Silva (2007) avaliou a influência do líquen *C. salzmannii* sobre a atividade microbiana e de fungos micorrízicos arbusculares. Constatou que o líquen libera suas substâncias, e estas atuam na

microbiota do solo, já que os fenóis liquênicos possuem ação antimicrobiana. Tal fato sugere uma relação direta entre o líquen, o solo e as plantas, pois as substâncias liquênicas afetam a composição química e a população microbiana do solo devido à ação de micorrizas, possuindo papel ecológico na distribuição da vegetação.

Neste contexto Silva e Pereira (2008) examinaram a influência de suprimentos exógenos de ureia no metabolismo de *C. verticillaris* e possíveis modificações químicas no solo subjacente a partir da percolação dos fenóis do líquen. Observaram que a ureia influencia na síntese de substâncias de *C. verticillaris*, o que ocasiona maiores teores que são repassados ao solo. Contudo, soluções de ureia em concentrações elevadas poderão bloquear ou interferir no metabolismo deste líquen, ocasionando uma saturação e diminuição da produção. Evidenciou-se que houve a percolação dos fenóis, e estes promoveram modificações na composição química do solo com a diminuição do pH e alterações nos teores de hidrogênio e alumínio.

Silva e Pereira (2009) em estudos aprofundados avaliaram como a utilização de fontes exógenas poderiam ativar a síntese de *C. verticillaris* a partir da incorporação de fonte nitrogenada e cloreto de níquel, como ativador da enzima urease, e hipoclorito de sódio, como fonte de sódio. Constataram que houve um aumento na biossíntese do líquen por meio da alga, influenciada pela ureia em conjunto com o cloreto de níquel e hipoclorito de sódio, o que reporta um incremento na produção de metabólitos intermediários produzidos por *C. verticillaris*, conseqüentemente percolados para o solo, comprovado pela formação de quelatos.

Vasconcelos (2009) buscou avaliar como o incremento de uma fonte exógena de fosfato de potássio, em diferentes concentrações, poderia afetar a biossíntese de *C. verticillaris* e como os ácidos orgânicos produzidos pelo líquen e percolados ao solo subjacente causaria alterações químicas no solo, em condições laboratoriais. Verificou que nutrientes do solo, quando são volatilizados ou dissolvidos em água, promovem modificações na síntese das substâncias do líquen. A absorção de elementos dispersos na forma iônica ocasionou uma hiperprodução dos fenóis que são repassados ao substrato, aumentando a capacidade de troca catiônica, a disponibilidade de hidrogênio e a neutralidade do solo.

Melo (2011) analisou como suprimentos de radiação gama em diferentes dosagens poderiam afetar a produção do ácido barbático pelo líquen *C. salzmannii* e as possíveis alterações no solo subjacente. Evidenciou que existe uma tolerância do líquen às dosagens da radiação, sendo na dose de 5Gy os melhores níveis de produção de ácido barbático, a partir dessa dose se observou uma tendência de redução da produção em doses mais elevadas. A

radiação gama possibilitou uma biossíntese diferenciada do ácido barbático, que foi percolado para o solo proporcionando um aumento nos parâmetros de pH, carbono total e nitrogênio total, demonstrando que a percolação das substâncias produzidas pelo líquen contribuiu para mudanças nas propriedades químicas do solo.

2.6.3 Ação das Substâncias Liquênicas como Biorremediadoras de Solos Salinizados de Núcleos de Desertificação em Pernambuco

A degradação ambiental da região semiárida do Nordeste brasileiro tem se tornado objeto de estudo devido à necessidade de preservação e conservação do bioma Caatinga ali ocorrente. Dentre os processos de degradação dos solos no semiárido nordestino, a utilização de técnicas de irrigação mal supervisionadas é o que mais tem condicionado o processo de salinização, tornando grandes áreas de solo inutilizadas para o cultivo. Assim, revela-se a importância do uso sustentado dos ecossistemas, no qual o conhecimento sobre o solo, suas propriedades e características, bem como de sua biota possibilitam indicar a melhor forma para seu manejo.

A capacidade de interação dos líquens com o seu substrato permite a segregação de substâncias que interagem com os elementos químicos do solo. Desta forma, estudos têm se voltado para utilização de espécies de líquens como biorremediadores de solos salinizados em áreas em processo de desertificação, têm se constituído como uma alternativa por se tratar do uso de um agente biológico. Em adição Pires *et al.* (2003) abordam que essa técnica pode ser utilizada em áreas contaminadas seja por compostos orgânicos ou inorgânicos, por meio do uso de organismos vivos, microrganismos e plantas. O processo se dá a partir da aceleração do processo de biodegradação, por meio de reações bioquímicas através dos microrganismos presentes no ambiente.

Silveira (2010) utilizou o líquen *C. substellata* na recuperação de Luvisolos salinizados e não salinizados, verificou que o ácido úsnico percolado promoveu modificações químicas no solo subjacente e, a adição da ureia incrementou a produção de compostos fenólicos da espécie, que liberava quantidades crescentes de seu principal fenol, favorecendo a quelação. Em uso do líquen *C. verticillaris*, Silva e Pereira (2011) também constataram esse comportamento influenciado pelas dosagens de ureia; atrelado a isso houve a volatilização de sais contidos no solo que podem ter alterado a biossíntese da espécie.

Silva e Pereira (2010) fizeram uso da espécie *C. verticillaris* em Luvisolo salinizado e não salinizado para a observação da interação dos compostos liquênicos com este tipo de solo.

Constataram que o líquen associado ao tratamento com água deionizada teve um incremento na produção dos compostos fenólicos principais, alterando os compostos químicos do solo.

Silva (2011) constatou que o líquen *C. verticillaris* sobreposto ao Luvisolo salinizado e não salinizado promoveu modificações químicas no solo subjacente, influenciado pela adição de ureia, o que possibilitou ao solo melhores condições de fertilidade com a diminuição dos teores de sódio e aumento de cálcio. Em consonância, Silva e Pereira (2012) em estudos continuados sobre a capacidade do líquen *C. verticillaris* recuperar a fertilidade de Luvisolo salinizado, observaram essa interação a partir da adição de fonte exógena de ureia e radiação UVB, como promotores da produção de substâncias pelo líquen. Constataram que a radiação UVB estimula o metabolismo do líquen, juntamente com a ureia, proporcionando modificações em suas características químicas, com diminuição do sódio e da condutividade elétrica, e consequente aumento dos teores de cálcio, magnésio e valores de pH.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 MAPEAMENTO ESPECTRAL

A análise ambiental do município de Cabrobó, por meio do uso de imagens de satélite, levou em consideração a sazonalidade, período seco e úmido, e a escala temporal de 27 anos. A utilização dos atributos biofísicos e da temperatura da superfície tiveram como parâmetro de observação o comportamento da vegetação e suas alterações durante esses dois intervalos para os anos avaliados.

Para a realização do mapeamento espectral foram selecionadas dezoito imagens digitais geradas pelos sensores TM e OLI, abordo dos satélites Landsat 5 e 8, respectivamente. O sensor TM faz o imageamento da superfície terrestre produzindo imagens com 185 km de largura no terreno em 7 bandas espectrais, sendo a três primeiras na faixa do visível, duas no infravermelho próximo, uma no infravermelho médio e uma no infravermelho distante/termal (NOVO, 2008). Já o sensor OLI é composto por 11 bandas espectrais distribuídas, sendo a primeira referente a aerossóis, as três seguintes compõem a faixa do visível, uma infravermelho próximo, duas infravermelho médio, uma faixa pancromática e outra cirrus, e as duas últimas a infravermelho distante/termal (INPE, 2015).

As cenas foram obtidas em dois intervalos anuais período seco (agosto a dezembro) e úmido (janeiro a julho) no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), ponto/órbita 216/66 e 217/66 para satélite Landsat TM 5 e da NASA USGS/Earth Explore

para Landsat OLI 8. As imagens utilizadas no estudo corresponderam ao intervalo de período úmido de 24-05-1990, 19-05-1994, 06-05-2001, 28-01-2006, 13-06-2009, 18-07-2016. Optou-se no intervalo úmido a utilização, apenas, das cenas do ponto/órbita 216/66, pelo fato de apresentarem menor quantitativo de nuvens. Para o período seco se realizou mosaico com as imagens ponto/órbita 216/66 e 217/66 datadas de 26-09-1989/17-09-1989, 02-01-1994/26-10-1994, 24-09-2000/04-12-2000, 22-09-2005/15-10-2005, 20-11-2009/27-11-2009, 02-09-2015/09-09-2015. Paralelamente, foi realizado levantamento de dados médios de pluviometria e temperatura no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP), do Instituto Nacional de Meteorologia, para a construção de climogramas com o intuito de auxiliar a interpretação das imagens.

A seleção das imagens se baseou na disponibilidade de cobertura espacial da área e no menor percentual de nebulosidade. Após seleção e aquisição das imagens, estas foram processadas no software Erdas 9.1. As imagens foram empilhadas banda a banda registradas a partir da imagem Landsat OLI 8, que já possuem registro. Com uso de coordenadas geográficas obtidas em visita a campo ao município de Cabrobó, se fez o espelhamento para georreferenciar as imagens Landsat TM 5. Após o empilhamento, foi realizada a reprojeção para coordenadas geográficas. As imagens foram recortadas e mosaicadas, pois o imageamento do município de Cabrobó é composto por duas cenas. O Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo foi adquirido junto ao site da NASA USGS/Earth explore no produto SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) referente à cena SC-24-V-B.

Utilizou-se o algoritmo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), que é um método que objetiva a estimativa instantânea dos componentes do balanço de energia por sensoriamento remoto. A base física envolvida no algoritmo do modelo SEBAL permite o cálculo dos fluxos em superfície para uma ampla gama de uso do solo e calcula o balanço completo de radiação e de energia para cada pixel da imagem, sem a necessidade de extensivas medidas de campo, ou seja, com um número reduzido de dados meteorológicos (TIMMERMANS *et al.*, 2011; MOHAMED *et al.*, 2004).

3.1.1 Balanço de Radiação

3.1.1.1 Calibração Radiométrica

A primeira variável do SEBAL obtida foi o saldo de radiação à superfície (R_n), através de uma série de etapas efetuadas com o emprego da ferramenta *Model Maker*. A

primeira etapa constitui o cômputo da radiância espectral de cada banda (L_{λ_i}), ou seja, efetivação da calibração radiométrica, em que o número digital (ND) de cada pixel da imagem é convertido em radiância espectral. Essas radiâncias representam a energia solar refletida por cada pixel, por unidade de área, de tempo, de ângulo sólido e de comprimento de onda, medida ao nível do satélite Landsat (705 km), e a calibração é efetivada segundo a equação (MARKHAM e BAKER, 1987):

$$L_{\lambda_i} = a_i + \left(\frac{b_i - a_i}{255} \right) ND \quad (1)$$

Em que: a e b são as radiâncias espectrais mínima e máxima ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$); ND é a intensidade do pixel (número digital – número inteiro de 0 a 255); e i corresponde as bandas do satélite Landsat 5 – TM. Ressalta-se que as imagens Landsat 8 – OLI já possuem calibração radiométrica.

3.1.1.2 Reflectância

Sequencialmente se realizou a reflectância monocromática de cada banda (ρ_{λ_i}), definida como sendo a razão entre o fluxo da radiação solar refletido e o fluxo da radiação solar incidente, que é obtida segundo equação:

$$\rho_{\lambda_i} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda_i}}{k_{\lambda_i} \cdot \cos Z \cdot d_r} \quad (2)$$

onde L_{λ_i} é a radiância espectral de cada banda, k_{λ_i} é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$, Tabela 5), Z é o ângulo zenital solar e d_r é o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol (r_o) e a distância Terra-Sol (r) em dado dia do ano (DSA), que de acordo com Iqbal (1983), é dado por:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos(DSA \cdot 2\pi / 365) \quad (3)$$

em que DSA é o dia sequencial do ano.

O ângulo zenital foi obtido com a seguinte fórmula:

$$\cos z = \cos\left(\frac{\pi}{2} - E\right) = \text{sen}(E) \quad (4)$$

Onde: E é o ângulo de elevação do Sol, obtido no cabeçalho de cada imagem.

Tabela 5 - Descrição das bandas e faixas espectrais correspondentes ao Landsat TM 5, coeficientes de calibração mínimo (a) e máximo (b), irradiância solar espectral (K_{λ}) no topo da atmosfera (TOA).

Bandas	Faixa espectral (μm)	Coeficientes de Calibração ($\text{Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$)						$K_{\lambda}(\lambda_i)$ ($\text{Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$)	
		01/03/1984 até 04/05/2003		05/05/2003 até 01/04/2007		Após 02/04/2007			
		a	b	a	b	a	b		
		1 (azul)	0,45 – 0,52	-1,52	152,10	-1,52	193,00	-1,52	169,00
2 (verde)	0,52 – 0,60	-2,84	296,81	-2,84	365,00	-2,84	333,00	1826	0,274
3 (vermelho)	0,63 – 0,69	-1,17	204,30	-1,17	264,00	-1,17	264,00	1554	0,233
4 (IV-próximo)	0,76 – 0,90	-1,51	206,20	-1,51	221,00	-1,51	221,00	1036	0,155
5 (IV-médio)	1,55 – 1,75	-0,37	27,19	-0,37	30,20	-0,37	30,2	215,0	0,032
6 (IV-termal)	10,4 – 12,5	1,2378	15,303	1,2378	15,303	1,2378	15,03	-	-
7 (IV-médio)	2,10 – 2,35	-0,15	14,38	-0,15	16,50	-0,15	16,50	80,67	0,012

Fonte: Adaptado de Chander *et al.* (2007); Moreira (2014).

3.1.1.3 Índices de Vegetação

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI) é obtido através da razão entre a diferença das refletividades do IV-próximo (ρ_{IV}) e do vermelho (ρ_V), pela soma dos mesmos:

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V} \quad (5)$$

Onde: ρ_{IV} e ρ_V correspondem, respectivamente, as bandas 4 e 3 do Landsat 5 – TM, no caso do Landsat OLI 8 se fez uso das bandas 4 e 5. O NDVI é um indicador sensível da quantidade e da condição da vegetação verde. Seus valores variam de -1 a $+1$ e para superfícies com alguma vegetação o NDVI varia de 0 e 1, já para a água e nuvens o NDVI geralmente é menor que zero.

O Índice de Vegetação Ajustado para os Efeitos do Solo (*Soil Adjusted Vegetation Index* - SAVI) busca amenizar os efeitos do solo, e para seu cálculo tem sido utilizada a expressão (HUETE, 1988):

$$\text{SAVI} = \frac{(1+L)(\rho_{IV} - \rho_V)}{(L + \rho_{IV} + \rho_V)} \quad (6)$$

Onde: o fator L é uma função do tipo de solo. Em estudo recente, utilizamos $L = 0,1$, embora o seu valor mais frequente seja $L = 0,5$ (HUETE e WARRICK, 1990; ACCIOLY *et al.*, 2002; BOEGH *et al.*, 2002).

O SAVI foi desenvolvido devido à.

O Índice de Área Foliar (IAF) é definido pela razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área utilizada por essa vegetação. O IAF é um indicador da biomassa de cada pixel da imagem e este foi computado pela seguinte equação empírica obtida por Allen *et al.* (2002):

$$\text{IAF} = -\frac{\ln\left(\frac{0,69 - \text{SAVI}}{0,59}\right)}{0,91} \quad (7)$$

3.1.1.4 Emissividade da Superfície

Para obtenção da temperatura da superfície foi introduzido à emissividade de cada pixel no domínio espectral da banda termal, de acordo com Allen *et al.* (2002), as emissividades ε_{NB} e ε_0 podem ser obtidas, para $\text{NDVI} > 0$ e $\text{IAF} < 3$, segundo:

$$\varepsilon_{\text{NB}} = 0,97 + 0,0033 \cdot \text{IAF} \quad (8)$$

$$\varepsilon_0 = 0,95 + 0,01 \cdot \text{IAF} \quad (9)$$

Para pixels com $\text{IAF} \geq 3$, $\varepsilon_{\text{NB}} = \varepsilon_0 = 0,98$ e para corpos de água ($\text{NDVI} < 0$) $\varepsilon_{\text{NB}} = 0,99$ e $\varepsilon_0 = 0,985$, conforme postulados de Allen *et al.* (2002).

3.1.1.5 Temperatura da Superfície

Para a obtenção da temperatura da superfície foram utilizadas a radiância espectral da banda termal e a emissividade. Dessa forma, foi obtida a temperatura da superfície (K) a partir da expressão:

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{\text{NB}} K_1}{L_{\lambda,6}} + 1\right)} \quad (10)$$

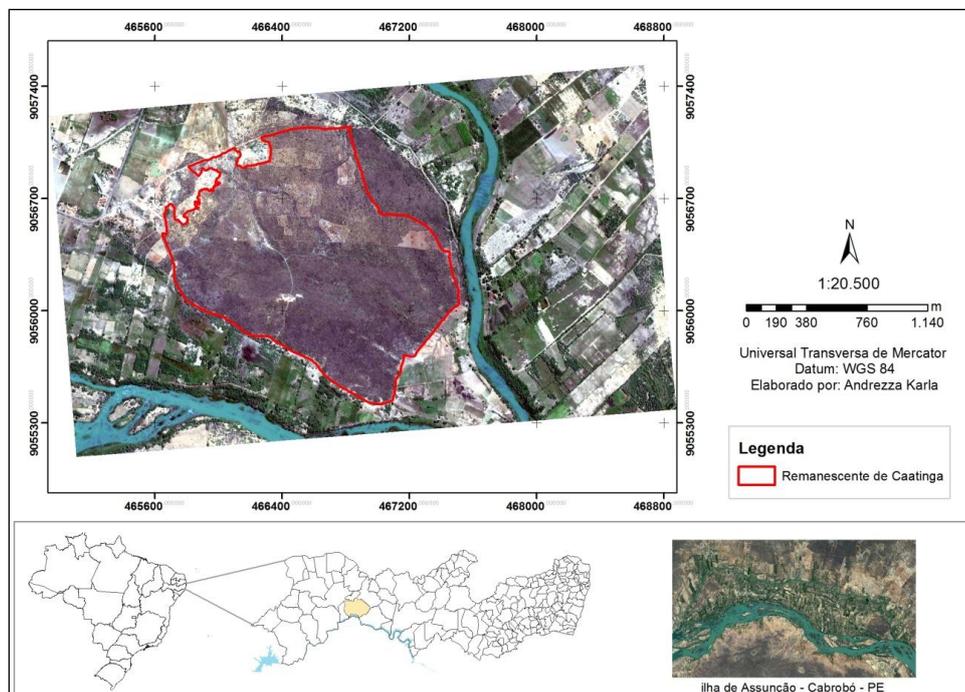
onde $K_1 = 607,76$ e $K_2 = 1260,56$ são constantes de calibração da banda termal do Landsat 5–TM (ALLEN *et al.*, 2002; SILVA *et al.*, 2005). Para Landsat 8 – OLI foram utilizadas as constantes $K_1 = 774,89$ e $K_2 = 1321,08$.

3.2 LEVANTAMENTO E CLASSIFICAÇÃO DA ESTRUTURA DA VEGETAÇÃO EM REMANESCENTE/FRAGMENTO DE CAATINGA NA ILHA DE ASSUNÇÃO, CABROBÓ, PERNAMBUCO

3.2.1 Delimitação dos Pontos

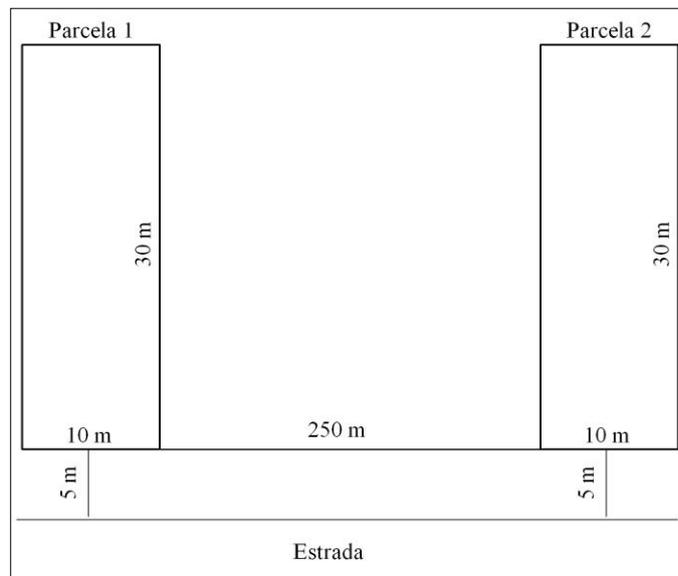
Para classificar as espécies lenhosas vivas, de área de remanescente/fragmento de Caatinga, foi percorrido para georreferenciamento para cálculo da área total 200 hectares (Figura 6). Após delimitação da área foram selecionadas 21 parcelas com distância de 250 m entre cada uma. Em cada parcela foi respeitada distância de 5 m da estrada para fixação de estacas de madeira sustentadas por cordas de náilon para delimitação da parcela, com 10 m x 30 m, totalizando 300 m² (Figura 7).

Figura 6 – Mapa de localização da área de Caatinga selecionado para estudo na ilha de Assunção, município de Cabrobó, Pernambuco.



Fonte: Google Earth Pro (2017); IBGE (2010), adaptado pela autora. Licença ArcGis 9.3 fornecido por DCG/UFPE.

Figura 7 – Esquema da delimitação das parcelas no remanescente/fragmento da ilha de Assunção, município de Cabrobó (PE).



Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.2 Levantamento das Espécies Lenhosas Vivas

Os indivíduos vivos foram avaliados através do Diâmetro à Altura do Peito (DAP) \geq 3cm e altura \geq 1 m do solo (AMORIM *et al.*, 2005; RODAL *et al.*, 2013). A altura foi medida por meio do clinômetro ou por trena métrica, bem como o diâmetro da base rente ao solo e do caule. Para árvores com múltiplas bases e caules foi realizada medição de 50% do número de troncos de base e do caule para contagem e, posteriormente, obtida à média aritmética. Fez-se uso de fita métrica para as medições. A contagem e identificação foram realizadas no local com base nos atributos estabelecidos por Maia (2012) e pelo Manual Sobre Métodos de Estudo Florístico e Fitossociológico da Sociedade Botânica do Brasil – SBB (RODAL *et al.*, 2013), no que se refere ao tipo de caule, formato da folha, característica do fruto e sementes. Amostras do material botânico foram coletadas para confirmação de identificação no Laboratório de Botânica, Herbário Dárdano de Andrade Lima do Instituto Agronômico de Pernambuco – IPA.

3.2.3 Análise dos Indicadores de Biomassa de Vegetação Lenhosa e dos Índices de Porte e Recobrimento

Para obtenção do Índice de Biomassa de Vegetação Lenhosa - IBVL foram avaliados os índices de porte e recobrimento. Foi avaliado quanto ao porte a partir do Índice de Porte (Ip) (Tabela 6) e a relação do grau de recobrimento do solo pela vegetação através do Índice de Recobrimento (Ir) (Tabela 7). Pelo produto dos índices calculou-se o Índice de Biomassa da Vegetação Lenhosa (IBVL) (CHAVES *et al.*, 2008).

Tabela 6 - Índice de porte da biomassa para as diferentes classes.

Classe de Vegetação	Índice de Porte (Ip)
Arbórea > 4,5 m	1,00
Subarbórea 3,0 a 4,5 m	0,75
Arbustiva 1,5 a 3,0 m	0,50
Subarbustiva < 1,5 m	0,25
Sem vegetação	0

Fonte: CHAVES *et al.* (2008).

Tabela 7 - Índices de recobrimento da biomassa para as diferentes subclasses de vegetação.

Subclasse de vegetação	Índice de Recobrimento (Ir)
Muito densa > 80%	1,0
Densa 60 a 80%	0,8
Aberta 40 a 60 %	0,6
Rala 20 a 40 %	0,4
Muito rala < 20%	0,2
Sem vegetação	0

Fonte: CHAVES *et al.* (2008).

3.2.4 Classificação Estrutural da Vegetação

Nas parcelas previamente demarcadas, após identificação das espécies e contagem dos indivíduos, foi procedida a classificação de porte por meio de quatro níveis categóricos: Tipo, Grupo, Classe e Subclasse. O Tipo se relaciona à separação de vegetação nativa e áreas cultivadas. O Grupo é composto pelo levantamento do porte da vegetação separado em grupos: arbóreo (> 4,5 m de altura); subarbóreo (> 3 m e < 4,5 m); arbustivo (> 1,5 m e < 3 m) e subarbustivo (< 1,5 m). A Classe se refere à separação das diferentes feições morfológicas da vegetação, sendo descrita pela ordem decrescente dos portes dominantes. A

Subclasse é representada pela percentagem do grau de recobrimento da superfície do solo: muito densa (> 80% de cobertura); densa (> 60 e < 80%); aberta (> 40 e < 60%); rala (> 20 e < 40%) e muito rala (< 20%) (CHAVES *et al.*, 2008).

3.2.5 Análise da Estrutura Vegetal

Com o auxílio do software Fitopac 2.1 foram obtidos os seguintes parâmetros fitossociológicos de acordo com Mueller-Dombois e Elleberg (1974): Densidade absoluta e relativa, Frequência absoluta e relativa, Dominância absoluta e relativa, Índice de Valor de Importância e Índice de Valor de Cobertura.

3.2.5.1 Densidade Absoluta e Relativa

Os parâmetros densidade absoluta (DA) e relativa (DR) permitem a mensuração da densidade em número de indivíduos por unidade de área em que a espécie ocorre na parcela. Assim, maiores valores de DA_i e DR_i indicam um elevado número de indivíduos por área da parcela.

$$DA_i = \frac{N_i}{A} \quad (11) \quad DR_i = \frac{DA_i}{DT} \times 100 \quad (12) \quad DT = \frac{N}{A} \quad (13)$$

Em que:

DA_i = densidade absoluta da espécie, em número de indivíduos por hectare;

N_i = número de indivíduos da espécie;

N = número total de indivíduos;

A = área total em hectare;

DR_i = densidade relativa (%) da espécie;

DT = densidade total em número de indivíduos por hectare.

3.2.5.2 Frequência Absoluta e Relativa

Os valores de Frequência absoluta (FA) e Frequência relativa (FR) podem informar como uma espécie se distribui na área analisada em termos de presença e ausência, permitindo a observação da distribuição horizontal de uma espécie.

$$FA_i = \frac{u_i}{u_t} \times 100 \quad (14) \quad FR_i = \frac{FA_i}{\sum_{i=1}^p FA_i} \times 100 \quad (15)$$

Em que:

FA_i = frequência absoluta da espécie na comunidade vegetal;

FR_i = frequência relativa da espécie na comunidade vegetal;

u_i = número de unidades amostras em que a espécie ocorre;

u_t = número total de unidades amostrais;

p = número de espécies amostradas.

3.2.5.3 Dominância Absoluta e Relativa

A partir dos dados de Dominância absoluta (DoA) e Dominância relativa (DoR), é possível mensurar a densidade de uma espécie em área basal, enquanto maior o valor, indicará a dominância que a espécie exerce na área analisada em termos de área basal.

$$DoA_i = \frac{AB_i}{A} \quad (16) \quad DoR_i = \frac{DoA_i}{DoT} \times 100 \quad (17) \quad ABT = \sum_{i=1}^s AB_i \quad (18)$$

Em que:

DoA_i = dominância absoluta da espécie em m^2/ha ;

AB_i = área basal da espécie em m^2 de na área;

A = área em hectare;

DoR_i = dominância relativa (%) da espécie;

DoT = dominância total, soma das dominâncias de todos os indivíduos, em m^2/ha ;

ABT = área basal total;

AB_i = área basal da espécie.

3.2.5.4 Índice de Valor de Importância (IVI)

A importância de uma determinada espécie na comunidade vegetal analisada foi obtida a partir dos valores de Densidade relativa, Frequência relativa e Dominância relativa.

$$IVI_i = DR_i + FR_i + DoR_i \quad (19)$$

Em que:

IVI_i = valor de importância de uma espécie, expresso em porcentagem (%);

DR_i = densidade relativa de uma espécie, expresso em porcentagem (%);

FR_i = frequência relativa de uma espécie, expresso em porcentagem (%);

DoR_i = dominância relativa de uma espécie, expresso em porcentagem (%).

3.2.5.5 Índice de Valor de Cobertura (IVC)

É adquirido por meio dos valores de Densidade relativa e Dominância relativa de cada espécie. Esse Índice determina pesos iguais para número de indivíduos e biomassa, diferente do IVI.

$$IVC_i = DR_i + DoR_i \quad (20)$$

Em que:

IVI_i = valor de cobertura de uma espécie, expresso em porcentagem (%);

DR_i = densidade relativa de uma espécie, expresso em porcentagem (%);

DoR_i = dominância relativa de uma espécie, expresso em porcentagem (%).

3.2.6 Diversidade

Para determinar a diversidade florística foram utilizados os índices de diversidade de Shannon (H'), Equabilidade de Pielou (J) e Dominância de Simpson (D), descritos por Pielou (1975), Whittaker (1972), Alves Júnior (2010).

3.2.6.1 Índice de Diversidade de Shannon (H')

O índice de Shannon, também conhecido como índice de Shannon-Weaver ou Shannon-Wiener, é um índice não-paramétrico de medida de diversidade, baseado na abundância proporcional da espécie. Expressa a heterogeneidade florística de uma área, buscando unir a riqueza de espécies e a similaridade em uma única informação. Pressupõe para isso, que os indivíduos foram amostrados de forma aleatória a partir de um conjunto infinitamente grande e que todas as espécies estão representadas na amostra. Faz uma atribuição maior de pesos às espécies consideradas raras. Deste modo, quanto maior o valor de H' , maior será a diversidade florística da população da área em estudo, expressando riqueza e uniformidade.

$$H' = \frac{\left[N \ln(N) - \sum_{i=1}^s n_i \ln(n_i) \right]}{N} \quad (21)$$

Em que:

n_i = número de indivíduos amostrados da espécie;

N = número total de indivíduos amostrados;

S = número de espécies amostradas;

\ln = logaritmo neperiano ($e = 2,71828\dots$).

3.2.6.2 Equabilidade de Pielou (J')

A análise de equabilidade de Pielou é derivada do índice de Shannon e possibilita a representação da uniformidade da distribuição dos indivíduos entre as espécies existentes (PIELOU, 1966). Seu valor apresenta uma amplitude de 0 (uniformidade mínima) a 1 (uniformidade máxima), a expressão que a representa é:

$$J' = \frac{H'}{H_{\max}} \quad (22) \quad \text{sendo} \quad H_{\max} = \ln(S) \quad (23)$$

Em que:

S = número total de espécies amostradas;

H' - índice de diversidade de Shannon.

3.2.6.3 Dominância de Simpson (D)

O índice de dominância de Simpson mede a probabilidade de que dois indivíduos de uma comunidade, selecionados ao acaso na amostra, pertençam à mesma espécie. É uma medida de dominância, atribuindo um peso maior às espécies consideradas comuns, diferentemente do índice de Shannon (FELFILI e RESENDE, 2003; ALVES JUNIOR, 2010). Uma comunidade com maior diversidade terá menor dominância, sendo o valor expresso entre 0 a 1, quanto mais próximo a 1 maior a diversidade. Esse índice é derivado do Índice de concentração de Simpson (SIMPSON, 1949), sua compreensão visa entender como que dois indivíduos são independentemente retirados, ao acaso e sem reposição, de uma comunidade de S espécies contendo N indivíduos, em que N_j represente indivíduos pertencentes a uma determinada espécie. Caso a probabilidade de ambos os indivíduos ser da mesma espécie for alta, permite afirmar que a comunidade apresenta um elevado grau de concentração.

$$C = 1 - \frac{\sum_{i=1}^s n_i(n_i - 1)}{N(N - 1)} \quad (24) \quad \text{Sendo:} \quad D = 1 - C$$

Em que:

C = medida de dominância;

D = índice de dominância de Simpson;

n_i = número de indivíduos amostrados da espécie;

N = número total de indivíduos amostrados.

3.2.7 Medidas de Riqueza de Espécies

3.2.7.1 Estimativas Não Paramétricas de Riqueza de Espécies

As medidas de riqueza de espécies permitem a comparação dos dados obtidos em uma única área amostral submetida a diferentes coletas, possibilitando as estimativas de riqueza. Os estimadores que são baseados na riqueza de espécies raras fazem uso de quatro variáveis: *singletons*, *doubletons*, *uniques* e *duplicates* (COLWELL, 2004; FERRAZ, 2008). Dentre os principais estimadores estão Jackknife (1 e 2), Chao (1 e 2), sendo sua aplicabilidade eficaz devido às equações para cálculo de limites de confiança da estimativa. A projeção de riqueza foi obtida por meio dos estimadores Jackknife 2 e Chao 2, calculados através do programa R, onde os dados foram aleatorizados 999 vezes.

3.2.7.2 Estimador Jackknife

O método de Jackknife 2º ordem estima a riqueza total, baseado na abundância; a partir do número de espécies utiliza os *uniques* e o número de indivíduos que ocorrem em duas amostras (*duplicates*). A estimativa de riqueza é calculada pela equação:

$$S_j = s + \frac{Q_1(2n - 3)}{n} - \frac{Q_2(n - 2)^2}{n(n - 1)} \quad (25)$$

Em que:

S_j = riqueza estimada;

s = riqueza observada;

Q_1 = número de espécies representadas em somente uma amostra;

Q_2 = número de espécies representadas em exatamente duas amostras;

n = número de amostras.

3.2.7.3 Estimador Chao

O método Chao 2º ordem é um estimador de riqueza baseado na incidência de espécies, ou seja, presença/ausência dos dados de raridade ou do número de *uniques/duplicates* para o número de espécies encontradas em somente 1 ou 2 amostras.

$$S_c = s + \frac{Q_1^2}{2Q_2} \quad (26)$$

Em que:

S_c = riqueza estimada;

s = riqueza observada;

Q_1 = número de espécies representadas em somente uma amostra;

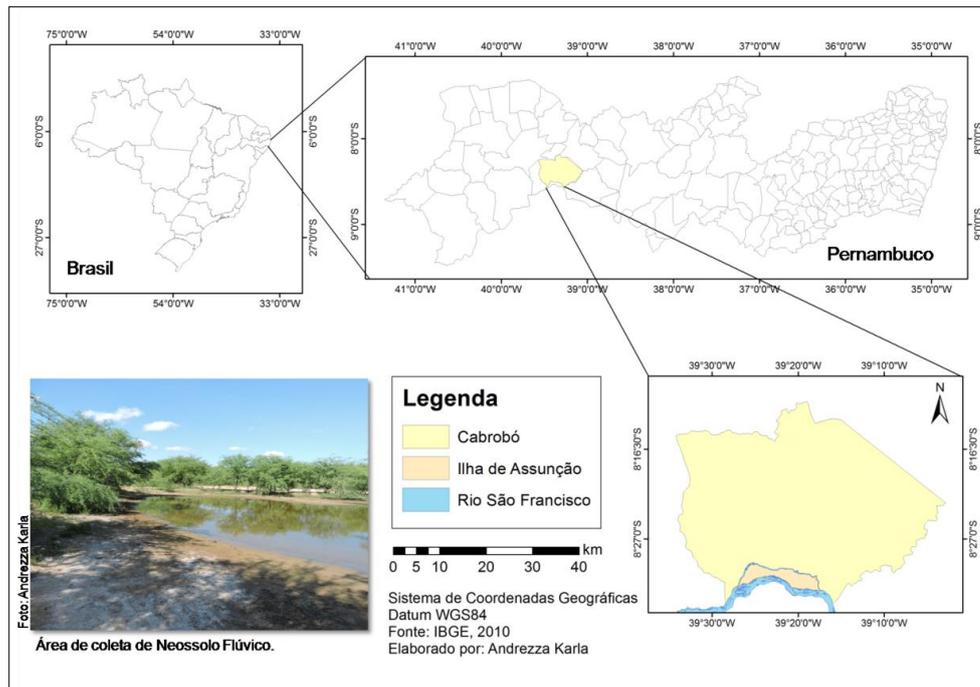
Q_2 = número de espécies representado em somente duas amostras.

3.3 EXPERIMENTOS EM LABORATÓRIO COM NEOSSOLO FLÚVICO SALINIZADO

3.3.1 Coleta e Processamento de Neossolo Flúvico Salinizado

O solo foi coletado na ilha de Assunção, no município de Cabrobó, 500 km do Recife, Pernambuco. As amostras foram coletadas, com auxílio de pá de ferro, em uma área de 1 hectare de forma aleatória (Figura 8), em diferentes pontos, cada amostra com aproximadamente 5 kg e profundidade média de 0 a 20 cm, conforme Manual de Coleta de Solos (EMBRAPA, 2015). As amostras de Neossolo Flúvico salinizado foram conduzidas ao Laboratório de Geografia Ambiental (LAGEAM/DCG/UFPE), para secagem à temperatura ambiente ($28^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$), posteriormente foi composta uma única amostra, destorroada e peneirada por processo granulométrico com peneiras de 6,3, 4,0 e 2,0 mm. Em seguida, a amostra foi fracionada e depositada em sacos plásticos com 1 kg cada. Realizaram-se quatro visitas técnicas à ilha de Assunção durante intervalo da pesquisa para coleta do solo, totalizando 89,5 kg.

Figura 8 – Área de coleta de Neossolo Flúvico salinizado na ilha de Assunção, município de Cabrobó – PE.



Fonte: IBGE (2010), adaptado pela autora. Licença ArcGis 9.3 fornecido por DCG/UFPE.

3.3.2 Coleta e Processamento do Material Liquéenico

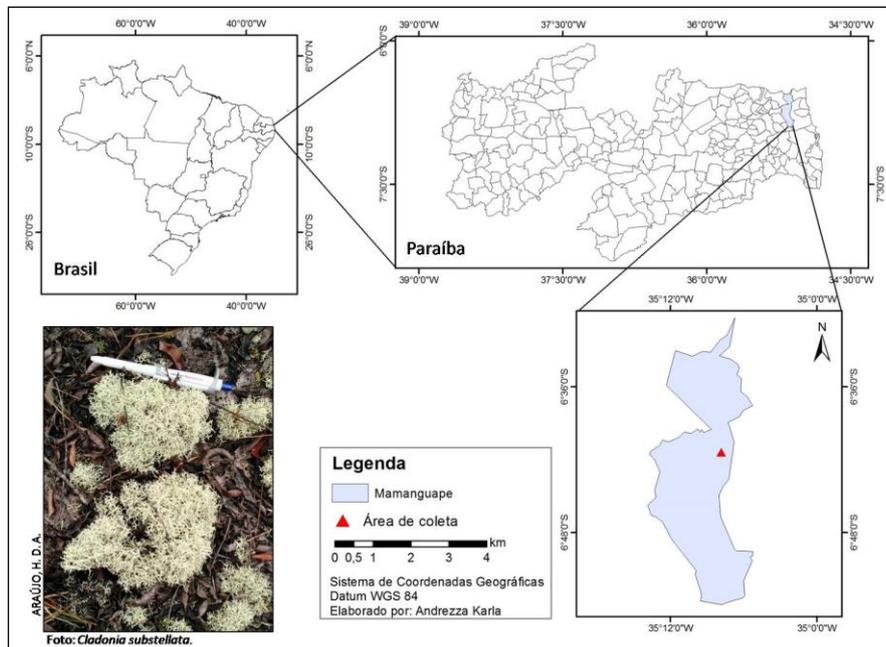
3.3.2.1 Coleta e Caracterização de *Cladonia substellata*

O líquen *C. substellata* foi coletado no município Mamanguape - PB, às margens da BR - 101, nas proximidades da Reserva Biológica Guaribas, nas coordenadas 06° 42' 42,4" S e 35° 07' 07,0" W (Figura 9), em uma altitude de 181m (em relação ao nível médio do mar). O líquen foi encontrado em áreas de tabuleiros costeiros, onde há presença de manchas de cerrado edáfico com solos do tipo Neossolos Quartzarênicos (EMBRAPA, 2006). As características pluviométricas indicam ser um ambiente tropical chuvoso com estação seca no verão e chuvas de outono inverno, As', segundo classificação de Köppen.

A espécie *C. substellata* tem como substância majoritária o ácido úsnico (98,1%) (HOVINEN e AHTI, 1986), sendo uma das substâncias mais estudadas na química de líquens. Este líquen foi descrito pela primeira vez por Vainio em 1887, sua morfologia é destacada por sua coloração verde-amarelada devido ao principal fenol produzido pela espécie. Possui podécios dicotômicos em suas extremidades, sendo encontrado em solos

arenosos, como em áreas de brejo de altitude e manchas de cerrado edáfico existentes no Tabuleiro Costeiro nordestino (PEREIRA, 1998; BARBOSA, 2009; 2014). O material foi identificado através de caracteres morfológicos e químicos do talo. Uma amostra foi depositada no Herbário Geraldo Mariz UFP, sob registro n° 75.451.

Figura 9 – Área de coleta do líquen *Cladonia substellata*.



Fonte: IBGE (2010), adaptado pela autora. Licença ArcGis 9.3 fornecido por DCG/UFPE.

3.3.3 Procedimento de Obtenção do Extrato Etéreo de *Cladonia substellata*

Fez-se uso do extrato etéreo de *C. substellata* como agente biorremediador, obtido a partir de 20 g de talos que foram limpos, secos e macerados em almofariz de porcelana até a formação de um pó fino, depositados em erlenmeyer e acrescido 60 mL de éter etílico. Esse material foi deixado em mesa agitadora para extração em agitação constante durante 1 h a temperatura ambiente ($28 \pm 3^\circ\text{C}$). Após intervalo, o material foi filtrado em papel filtro Whatman (n°1) e adicionado em balão de fundo redondo para extração a quente. O balão foi conectado em aparelho rotaevaporador (Buchi Instruments, NJ. USA) acoplado a banho maria (40°C), de acordo com Martins *et al.* (2010), até retirada total do solvente. Este procedimento foi repetido 5 vezes. Os extratos orgânicos obtidos foram reunidos e depositados em tubos de penicilina. Sequencialmente, houve a renovação do líquen para continuar a obtenção do extrato etéreo. A execução dessas etapas foi realizada durante todo o andamento da pesquisa.

3.3.4 Purificação do Ácido Úsnico de *Cladonia substellata*

Para purificação do ácido úsnico (USN), amostras de 40 g de *C. substellata* foram limpas, maceradas e depositadas em erlenmeyer. Adicionaram-se 80 mL de éter etílico e foi deixado em mesa agitadora por 1 h, posteriormente a solução foi filtrada em balão de fundo redondo acoplado a evaporador rotativo a temperatura de 40°C. Após a segunda extração a substância retida na parede do balão foi raspada e parte do material foi depositado em um becker e lavado com éter etílico, sendo deixado à temperatura ambiente. Antes da completa evaporação do solvente o material foi pipetado e repassado para outro becker, onde os cristais formados no fundo foram raspados e novamente lavados com éter etílico. Esse procedimento de lavagens e cristalizações sucessivas possibilitou a obtenção de cristais mais limpos. Foi feita análise química do USN purificado através de cromatografia em camada delgada (CCD) para comparação com padrão Merck do ácido úsnico. A quantificação dos fenóis foi estimada usando o método UV espectrofotométrico por absorbância medida a 220, 290 e 325 nm em espectrofotômetro Biochrom Libra S22. A curva de calibração foi feita com o USN (Merck) nas concentrações 2-10 mg/mL. Os valores obtidos foram plotados para construção da curva analítica e cálculo da equação da reta de regressão linear, sendo o comprimento de 290 nm que apresentou melhor linearidade.

3.3.5 Irradiação Gama das Amostras de Neossolo Flúvico e Talos de *Cladonia substellata*

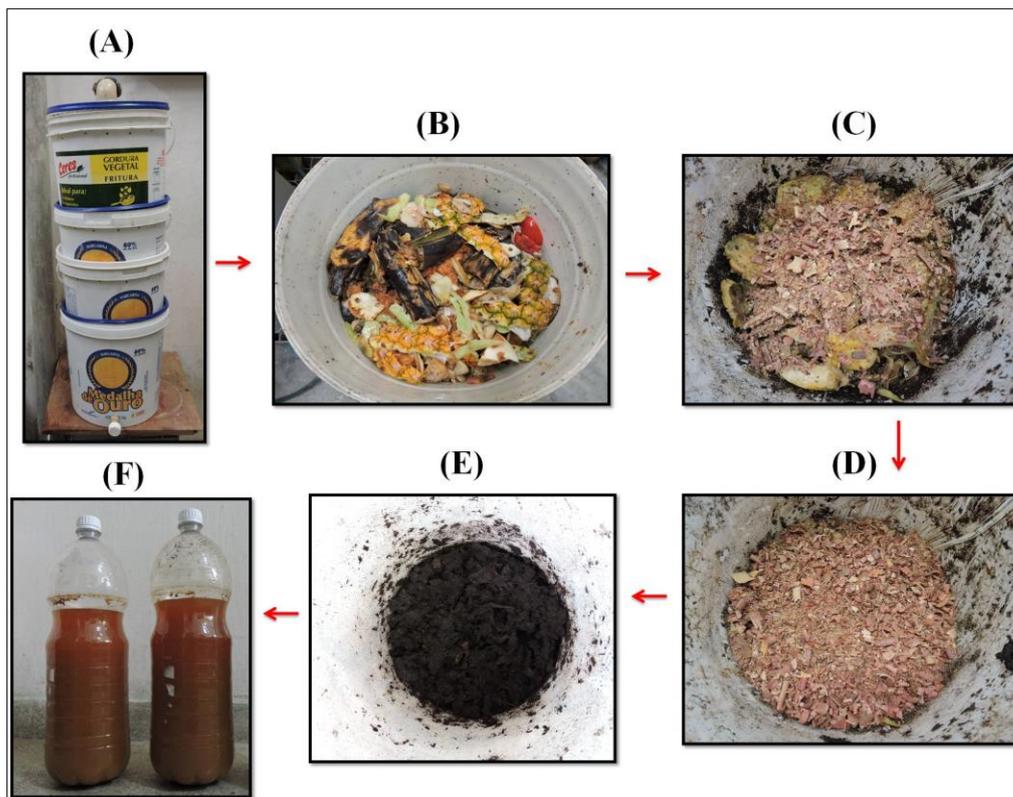
Amostras de *C. substellata* (54 g) e Neossolo Flúvico (9 kg) foram colocadas em envelopes de papel para submissão à irradiação gama, no laboratório GAMALAB/DEN/UFPE, na dose de 5 Gy, em fonte 60 Co, modelo Gammacell 220 Excel MDS Nordion, a uma taxa de dose de 0,5 Gy/s. A dosagem foi obtida a partir de Silva (2011) e Melo (2011).

3.3.6 Procedimento Para Obtenção do Material Orgânico em Biodecompositores

Foram construídos biodecompositores orgânicos (Figura 10) com a utilização de quatro baldes de plástico de 15 kg (A), encaixados um dentro do outro, estando o primeiro com uma abertura de saída para liberação dos gases provenientes do processo de decomposição. Em cada balde foram depositados resíduos orgânicos (cascas de frutas,

legumes, verduras e folhas) (B), intercalados com uma camada de pó de madeira (C). Foram colocadas camadas sobrepostas sempre intercalando os resíduos orgânicos e o pó de madeira até completar o limite do balde (D), após, aproximadamente, quatro meses se obteve um material orgânico escuro (E). Esse material fruto da decomposição foi deixado à temperatura ambiente por intervalo de cinco a dez dias para perda da umidade excessiva. No último balde foi instalada uma válvula para a retirada do resíduo líquido da decomposição (biofertilizante) (F), tendo em vista que os demais baldes existentes na estrutura possuíam pequenos furos no fundo para a percolação do líquido.

Figura 10 - Sistema de construção de biodecompositor orgânico para geração de matéria orgânica.



Legenda: (A) Sistema de biodecompositor; (B) Material orgânico como cascas de fruta, legumes, verduras e folhas; (C) Mistura do material orgânico com pó de madeira; (D) Formação de camadas intercaladas de material orgânico e pó de madeira; (E) Material orgânico formado a partir de modificação química após três meses; (F) Subproduto líquido obtido da decomposição. Foto: Autora (agosto, 2015).

3.3.7 Quantificação do Teor de Carbono Orgânico Total do Solo

Amostras de 0,5 g de solo do solo controle de campo e controle de campo irradiado foram colocadas em tubos digestores e nestes depositados 5 mL de dicromato de potássio

0,167 mol L⁻¹, e, em seguida 7,5 mL de ácido sulfúrico concentrado foi adicionado. Os tubos foram colocados em chapas digestoras pré-aquecidas, após a temperatura chegar a 170 °C os tubos permaneceram nesta temperatura por 30 minutos. A solução foi deixada esfriar e transferida para erlenmeyer e o volume foi completado com água deionizada (67,5 mL). Adicionou-se 0,3 mL de solução indicadora para titulação (ferroína). Para a titulação foi utilizada solução de sulfato ferroso amoniacal 0,20 mol L⁻¹, onde dissolveram-se 156,8 g de Fe(NH₄)₂ (SO₄)₂ 6H₂O (Sal de Mohr) em 100 mL de ácido sulfúrico concentrado para um volume de 2 L de água destilada, de acordo com estabelecido por Mendonça e Matos, 2005.

Fórmulas:

$$A = [(V_{ba} - V_{am}) (V_{bn} - V_{ba}) / V_{bn}] + (V_{ba} - V_{am})$$

V_{ba} = volume gasto na titulação do branco controle com aquecimento

V_{bn} = volume gás na titulação do branco controle sem aquecimento

$$CO \text{ (dag kg}^{-1}\text{)} = (A) \times (\text{molaridade do sulfato ferroso}) \times (3) \times (100) / \text{peso da amostra (mg)}$$

$$\text{Molaridade do sulfato ferroso} = 0,20 \text{ mol L}^{-1}$$

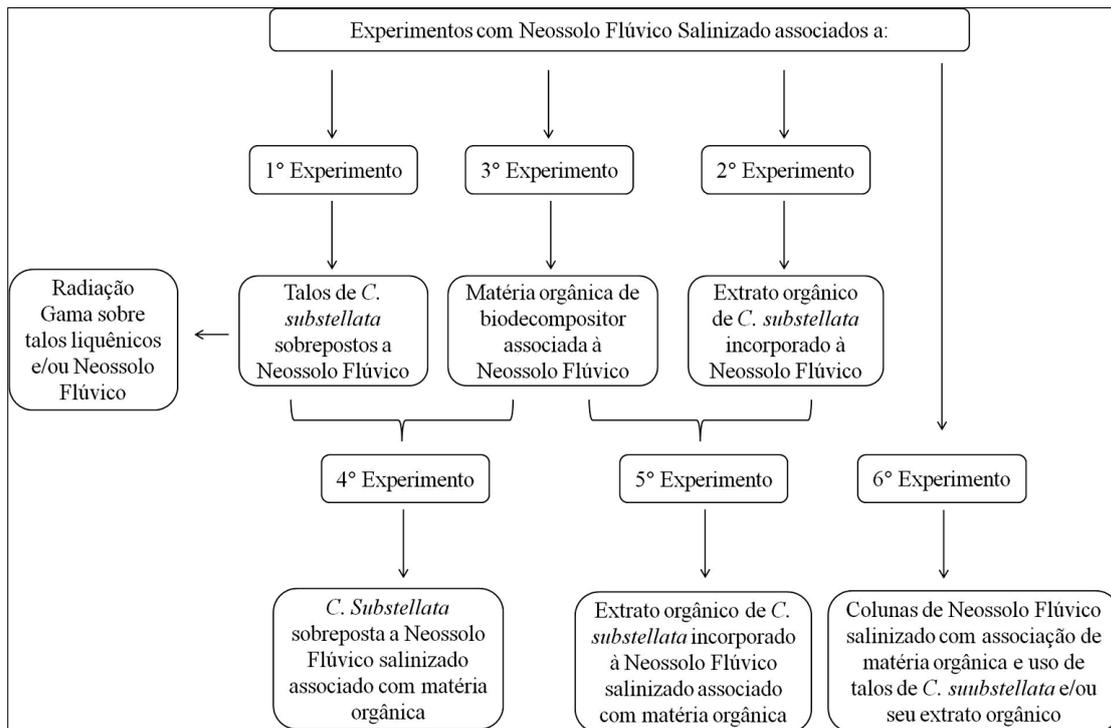
3.3.8 Matéria Orgânica do Solo

Para obtenção do valor da matéria orgânica no solo foi utilizada a fórmula: M.O. g.kg⁻¹ = 1,724 x C, onde C é o valor obtido na análise do Carbono orgânico do solo, conforme Conceição *et al.* (1999).

3.3.9 Montagem dos Experimentos

Foram definidos seis experimentos para estudo de redução de sódio em Neossolos Flúvicos da ilha de Assunção, município de Cabrobó, Pernambuco. Utilizou-se a espécie *C. substellata* como agente biológico para recuperação de solos salinizados. Foram delineados seis experimentos com uso do talo liquênico e/ou seu extrato orgânico em associação ou não com matéria orgânica, e, um experimento com a aplicação, apenas, de matéria orgânica produzida por biodecompositor orgânico e seus subprodutos líquidos (Figura 11).

Figura 11 - Fluxograma dos experimentos de recuperação de Neossolo Flúvico salinizado.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

3.3.9.1 Experimento 1 – Neossolo Flúvico Salinizado Sobreposto a Talos de *Cladonia substellata* Submetida à Radiação Gama

O experimento foi montado com o objetivo de observar a produção e percolação das substâncias de *C. substellata* para Neossolo Flúvico com ou sem a influência da radiação Gama. Fez-se uso de 6 g do líquen sobreposto em 1 kg de Neossolo Flúvico salinizado. Foram utilizadas doze cúpulas de vidro transparente nas dimensões 18 cm x 20 cm x 15 cm com três tratamentos e um controle de laboratório, todos compostos por três réplicas, a saber: a) controle de laboratório (T-1.1) – Neossolo Flúvico salinizado e talos de *C. substellata* ambos não irradiados; b) tratamento (T-1.2) – Neossolo Flúvico salinizado não irradiado e talos de *C. substellata* irradiados; c) tratamento (T-1.3) – Neossolo Flúvico salinizado e talos de *C. substellata* ambos irradiados; d) tratamento (T-1.4) – Neossolo Flúvico salinizado irradiado e talos de *C. substellata* não irradiados. O experimento foi borrifado, semanalmente, com 3 mL de água deionizada durante o intervalo de seis meses de montagem do experimento.

3.3.9.2 Experimento 2 – Extrato Orgânico de *Cladonia substellata* Incorporado ao Solo

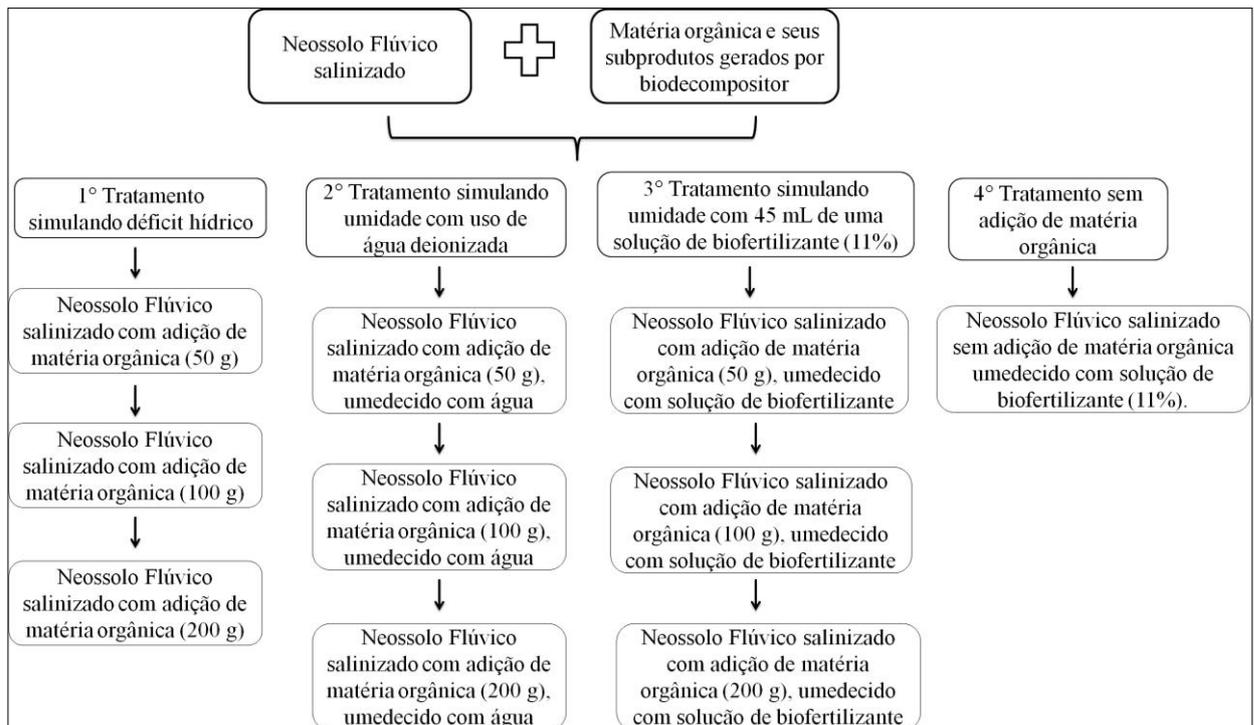
A partir dos dados obtidos com o Experimento 1 se teve por objetivo avaliar como o extrato orgânico de *C. substellata* poderia interferir na salinidade de Neossolo Flúvico salinizado. Para isso foram utilizadas dezoito cúpulas de vidro transparente nas dimensões 18 cm x 20 cm x 15 cm para montagem do experimento com uso de seis tratamentos, todos com três réplicas. Em cada cúpula foram depositados 1 kg de Neossolo Flúvico salinizado, onde se estabeleceram três concentrações de extrato orgânico bruto de *C. substellata*. As concentrações foram determinadas a partir dos resultados obtidos no Experimento 1. Verificou-se a quantidade de fenóis produzidos pela espécie e percolados para o solo ao longo do experimento, tendo-se como base o tratamento considerado controle de laboratório. Obteve-se assim, uma quantidade média mensal de 0,125 g de ácido úsnico. Esse valor foi utilizado como padrão, acrescentando-se outros dois valores de 0,0625 g e 0,1875 g de USN, sendo respectivamente 25% e 75% da média obtida. O extrato etéreo extraído do líquen foi inserido no solo, utilizando-se dois métodos de adição do extrato: em forma de pó e outro grupo o extrato diluído/líquido.

Fez-se uso de seis tratamentos e um controle: a) tratamento (T-2.1) – Extrato etéreo de *C. substellata* (0,1875 g) diluído em 40 mL de solução de DMSO (5%), sendo a concentração final de 4,46 mg/mL, incorporada ao Neossolo Flúvico salinizado; b) tratamento (T-2.2) - Extrato etéreo de *C. substellata* (0,125 g) diluído em 40 mL de solução de DMSO (5%), sendo a concentração final 2,98 mg/mL, incorporada ao Neossolo Flúvico salinizado; c) tratamento (T-2.3) - Extrato etéreo de *C. substellata* (0,0625 g) diluído em 40 mL de solução de DMSO (5%), sendo a concentração final 1,49 mg/mL, incorporada ao Neossolo Flúvico salinizado; d) tratamento (T-2.4) - Extrato etéreo de *C. substellata* (0,1875 g) em forma de pó, sendo a concentração final 0,1875 mg/g, incorporado ao Neossolo Flúvico salinizado; e) tratamento (T-2.5) - Extrato etéreo de *C. substellata* (0,125 g) em forma de pó, sendo a concentração final 0,125 mg/g, incorporado ao Neossolo Flúvico salinizado; f) tratamento (T-2.6) - Extrato etéreo de *C. substellata* (0,0625 g) em forma de pó, sendo a concentração final 0,0625 mg/g, incorporado ao Neossolo Flúvico salinizado. O procedimento de inserção do extrato etéreo de *C. substellata* foi realizado, mensalmente, durante intervalo de seis meses.

3.3.9.3 Experimento 3 – Neossolo Flúvico Salinizado e Matéria Orgânica Produzida por Biodecompositor

O experimento 3 teve como intuito a verificação da influência da matéria orgânica em amostras de Neossolo Flúvico salinizado, associando-se como mais um possível agente na recuperação da fertilidade. Devido à variabilidade climática do semiárido nordestino, optou-se pela utilização de dois grupos que simularam período seco e chuvoso (Figura 12).

Figura 12 – Distribuição dos tratamentos em experimento com Neossolo Flúvico salinizado associado à matéria orgânica e seus subprodutos, provenientes de biodecompositor.



Fonte: Elaborado pela autora.

A montagem do experimento foi realizada após a matéria orgânica ter se tornado uma mistura seca. Vinte e sete cúpulas de vidro transparente nas dimensões de 18 cm x 20 cm x 15 cm foram utilizadas para montagem do experimento, dividido em quatro tratamentos e subdividido em subtratamentos, todos compostos por três réplicas.

Em cada cúpula foi depositado 1 kg de solo e utilizada três quantidades de matéria orgânica, produzida a partir de biodecompositor orgânico 50 g, 100 g e 200 g, equivalente a 5%, 10% e 20% do peso seco do solo obtido em gramas, tendo por base os resultados de teores de matéria orgânica do solo. No tratamento 1 foi simulado período de déficit hídrico, sendo subdividido nos seguintes subtratamentos: a) tratamento (T-3.1) – Neossolo Flúvico salinizado com adição de matéria orgânica (50 g); b) tratamento (T-3.2) - Neossolo Flúvico salinizado com adição de matéria orgânica (100 g); c) tratamento (T-3.3) - Neossolo Flúvico

salinizado com adição de matéria orgânica (200 g). O tratamento 2 foi composto de subtratamentos simulando períodos de umidade com uso de água deionizada: d) tratamento (T-3.4) – Neossolo Flúvico salinizado com adição de matéria orgânica (50 g), sendo umedecido com água deionizada (50 mL); e) tratamento (T-3.5) - Neossolo Flúvico salinizado com adição de matéria orgânica (100 g), sendo umedecido com água deionizada (50 mL); f) tratamento (T-3.6) - Neossolo Flúvico salinizado com adição de matéria orgânica (200 g), sendo umedecido com água deionizada (50 mL). No tratamento 3 foram avaliados os subtratamentos com simulação de períodos de precipitação, onde se fez soluções de água deionizada e biofertilizante, a saber: g) tratamento (T-3.7) – Neossolo Flúvico salinizado com adição de matéria orgânica (50 g), sendo umedecido com 45 mL de uma solução de biofertilizante (11%); h) tratamento (T-3.8) - Neossolo Flúvico salinizado com adição de matéria orgânica (100 g), sendo umedecido com 45 mL de uma solução de biofertilizante (11%); i) tratamento (T-3.9) - Neossolo Flúvico salinizado com adição de matéria orgânica (200 g), sendo umedecido com 45 mL de uma solução de biofertilizante (11%). O tratamento 4 - tratamento (T-3.10) – Neossolo Flúvico salinizado sem adição de matéria orgânica umedecido com 45 mL de uma solução de biofertilizante (11%). A adição de solução de água deionizada contendo biofertilizante foi incorporada ao solo a intervalo de 15 dias durante os seis meses de experimento.

3.3.9.4 Experimento 4 – Neossolo Flúvico salinizado Associado com Matéria Orgânica e seus Subprodutos a Talos de *Cladonia substellata*

Após observação dos resultados da matéria orgânica e seus subprodutos na fertilidade de Neossolo Flúvico salinizado, objetivou-se avaliar as possíveis interações entre esses agentes e talos de *C. substellata*. O experimento foi montado com nove cúpulas de vidro transparente nas dimensões de 18 cm x 20 cm x 15 cm. Nestas se adicionou 1 kg de Neossolo Flúvico salinizado, associado a 200 g de matéria orgânica e 9 g de talos de *C. substellata*, sendo estes sobrepostos à junção Neossolo e matéria orgânica.

O experimento foi dividido em três tratamentos, todos com três repetições, a saber: a) tratamento (T-4.1) - Neossolo Flúvico salinizado associado com matéria orgânica e talos de *C. substellata* umedecida com 3 mL de água deionizada; b) tratamento (T-4.2) - Neossolo Flúvico salinizado associado com matéria orgânica e talos de *C. substellata* umedecida com 3 mL de uma solução de biofertilizante (0,3%); c) tratamento (T-4.3) - Neossolo Flúvico salinizado associado com matéria orgânica e talos de *C. substellata* umedecida com 3 mL de

uma solução de biofertilizante (0,6%). A adição de água deionizada ou de solução contendo biofertilizante foi incorporada ao solo a intervalo de 7 dias durante os seis meses de montagem do experimento.

3.3.9.5 Experimento 5 – Extrato Orgânico das Substâncias Produzidas por *Cladonia substellata* Incorporado a Neossolo Flúvico e Adição de Matéria Orgânica com seus Subprodutos

Em adição aos resultados obtidos com o experimento 3 e 4, constatou-se a necessidade de analisar a interação do extrato etéreo de *C. substellata*, quando incorporado a Neossolo Flúvico salinizado em associação com matéria orgânica.

O experimento foi montado com uso de nove cúpulas de vidro transparente nas dimensões de 18 cm x 20 cm x 15 cm, onde foram depositados 1 kg de Neossolo Flúvico salinizado com a adição de 200 g de matéria orgânica e incorporado extrato etéreo de *C. substellata* na quantidade de 0,1875 g. Foram selecionados três tratamentos com três réplicas. O extrato foi inserido na junção de Neossolo Flúvico e matéria orgânica em duas formas de aplicação em pó e outra diluído/líquido: a) tratamento (T-5.1) - Neossolo Flúvico salinizado associado com matéria orgânica e extrato etéreo de *C. substellata* incorporada na forma de pó com adição de 50 mL de água deionizada; b) tratamento (T-5.2) - Neossolo Flúvico salinizado associado com matéria orgânica e extrato etéreo de *C. substellata* diluído em 48 mL de uma solução de DMSO (dimetilsulfóxido) (4,2 %); c) tratamento (T-5.3) - Neossolo Flúvico salinizado associado com matéria orgânica e extrato etéreo de *C. substellata* diluído em 43 mL de uma solução de DMSO (4,6 %), contendo 5 mL de biofertilizante. A adição de água deionizada e/ou de solução contendo biofertilizante foi incorporada ao solo a intervalo de 15 dias durante os seis meses de experimento.

3.3.9.6 Experimento 6 – Neossolo Flúvico Salinizado Associado à Matéria Orgânica em Experimento de Coluna de Solo com uso de Talos de *Cladonia substellata* e/ou seu Extrato Orgânico Simulando Períodos Secos e Úmidos

Devido à grande quantidade de argila expansiva existente em Neossolo Flúvico, fato que, de acordo com Lima e Pereira (2016), dificulta a percolação da água nas colunas de solo, optou-se pela adição de matéria orgânica produzida por biodecompositor como alternativa para aumentar a porosidade, tendo por base os resultados obtidos nos experimentos 3, 4 e 5. O

experimento foi desenvolvido com dois parâmetros, simulando período de precipitação e intervalo de estiagem, que foram subdivididos em diferentes tratamentos. Eventos de seca: a) (T- 6.1) – Neossolo Flúvico salinizado associado com matéria orgânica e extrato etéreo de *C. substellata* em condições de pó (0,1875 g); b) (T- 6.2) – Neossolo Flúvico salinizado associado com matéria orgânica e talos liquênicos (12 g) umedecido com 3 mL de água deionizada. Os tratamentos simulando intervalo úmido foram delineados da seguinte forma: c) (T- 6.3) – Neossolo Flúvico salinizado associado com matéria orgânica e extrato etéreo de *C. substellata* em condições de pó (0,1875 g), sendo umedecido com 50 mL de água deionizada; d) (T- 6.4) - Neossolo Flúvico salinizado associado com matéria orgânica e extrato etéreo de *C. substellata* (0,1875 g) diluído em uma solução de DMSO (42%) e em 48 mL de água deionizada; e) (T- 6.5) – Neossolo Flúvico salinizado associado com matéria orgânica e talos liquênicos (12 g) hidratado com 6 mL de água deionizada. Os talos de *C. substellata* foram umedecidos semanalmente, já os tratamentos com extrato etéreo o valor incremento ao solo foi equivalente ao intervalo de quatro semanas.

Em cada garrafa foi adicionado 500 g de Neossolo Flúvico salinizado e 200 g de matéria orgânica. Dentre os cinco tratamentos: dois foram simulando solo seco e três com solo hidratado, ambos subdivididos em subtratamentos com uso de talos de *C. substellata* e/ou seu extrato etéreo.

3.3.9.7 Quantificação dos Fenóis Liquênicos do Talo, Percolados ou Incorporados ao Solo

As coletas de solo e líquen foram realizadas a cada 30 dias até o período de 6 meses de montagem dos experimentos. Foram coletadas 1 g de *C. substellata* e 10 g de solo de cada cúpula dos diferentes tratamentos. As amostras liquênicas foram maceradas até a formação de um pó fino submetido a extrações sucessivas por esgotamento a temperatura de $2^{\circ} \pm 3^{\circ}\text{C}$ com éter etílico, clorofórmio e acetona (5 mL) durante 2h para cada reagente. Posteriormente, foram filtrados em papel de filtro Whatman (n°1). Para o solo utilizou-se 10 mL, 5 mL e 5 mL dos respectivos reagentes (SILVA, 2014). Os fenóis liquênicos foram valorados espectrofotometricamente, segundo foi descrito em 3.3.4.

3.3.9.8 Análise Química de Neossolo Flúvico

3.3.9.8.1 pH em água

Para análise de pH em água foram utilizadas 10 g de solo diluído em 10 mL de água deionizada, agitado por 5 minutos e deixado decantar por 30 minutos e posterior leitura em pHmetro como descrito em Manual e Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 1997).

3.3.9.8.2 Determinação de fertilidade química do solo

Amostras de 500 mg do controle de campo, dos experimentos aos três e seis meses foram analisadas no Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA) para determinação dos elementos Ca, Mg, Na, P, K, Al, H, de acordo com o método estabelecido pelo Manual e Método de Análise de Solo (EMBRAPA, 1997).

3.3.9.8.3 Análise de fluorescência de raios-x por dispersão de energia (EDXRF)

Amostras de Neossolo Flúvico dos diferentes experimentos foram separadas e analisadas no Centro Regional de Ciências Nucleares (CRCN). Para adequação granulométrica o solo foi macerado e peneirado em peneira de tecido de "nylon" tipo voal (porosidade de 0,1 mm²). Posteriormente, foram separadas porções analíticas de 1g de solo transferidas para tubos de polietileno vedados com filme de polipropileno específicos para a análise por EDXRF. Utilizou-se o equipamento EDX-720 da Shimadzu consistindo de tubo de raios-X de ródio e detector de Si(Li) para a quantificação dos raios-X característicos. Foram usados materiais de referências 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, analisados juntamente com as amostras. A quantificação dos elementos químicos contidos na amostra foi obtida a partir de curvas analíticas geradas a partir das análises de material de referência (FERNANDES *et al.*, 2017). Foi utilizada voltagem de 15 kV para a determinação dos elementos químicos de número atômico (< 22) e de 50 kV para os demais elementos químicos.

3.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

A análise estatística dos dados fitossociológicos foi realizada por meio do programa Fitopac 2.1, como descrito no item 4.2.5, bem como boxplot das médias de altura e diâmetro dos indivíduos amostrados. Fez-se uso do programa estatístico R através da ferramenta R-studio para construção de correlograma, análise de Cluster (dendrograma) obtida pela

distância Euclidiana, e uso do programa PAST para análise de correspondência (CA). Para as análises dos resultados dos experimentos com uso de Neossolo Flúvico salinizado utilizou-se o Sisvar 5.6 para análise multivariada. As diferenças estatísticas foram estabelecidas através do teste Tukey, em que $p < 0.05$. O cálculo do desvio padrão (DV) foi realizado pelo software GraphPad.Prism 5. Os dendrogramas de correlações entre os tratamentos foram realizados por meio do PAST. Os correlogramas e a análise componentes principais (PCA) dos elementos químicos por meio do R-studio.

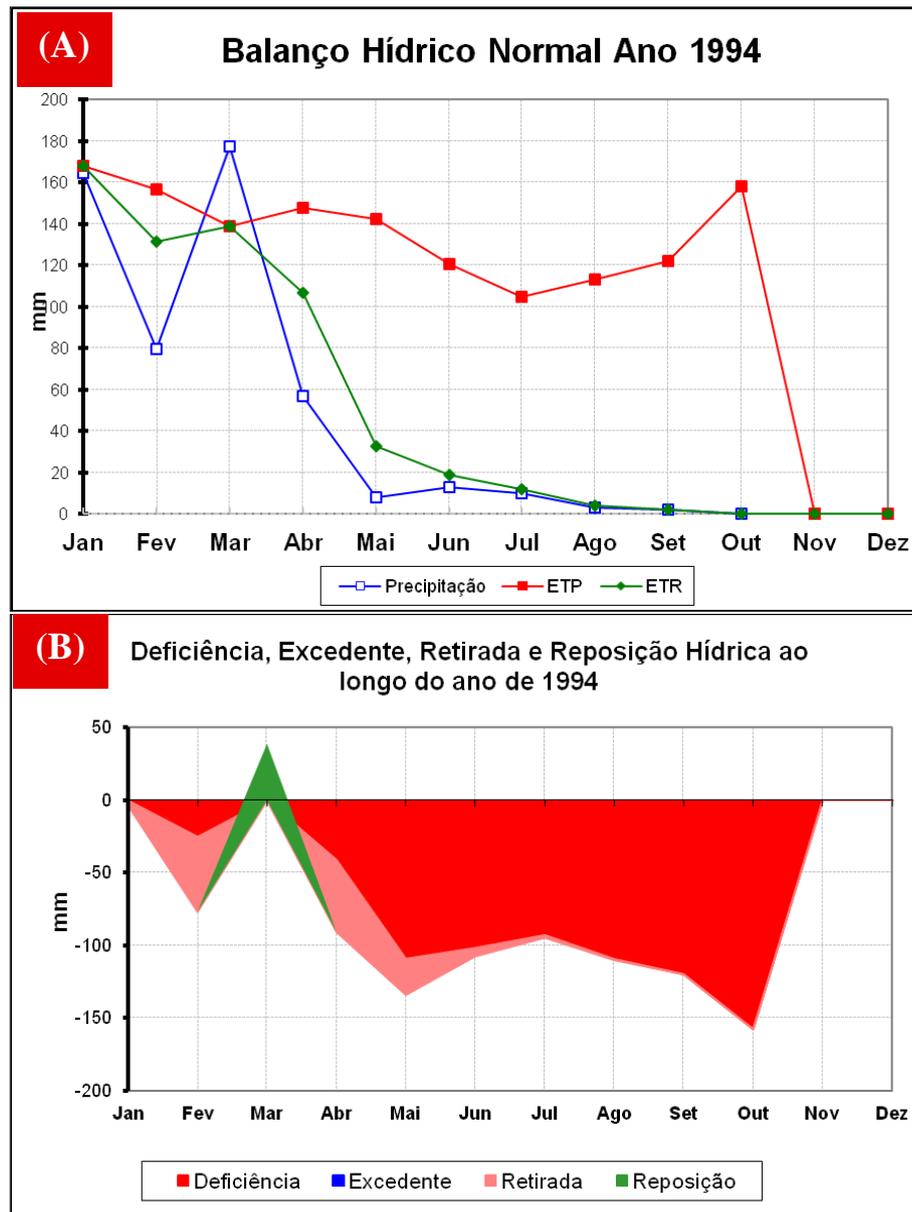
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE AMBIENTAL DO MUNICÍPIO DE CABROBÓ, PERNAMBUCO, A PARTIR DE MAPEAMENTO ESPECTRAL

A região semiárida do Nordeste brasileiro é composta por uma área geográfica com diferentes tipos vegetacionais, submetidos a um clima tropical seco, que formam o bioma Caatinga. Sua ampla variedade anatômica, características morfológicas e ecofisiológicas, permitem garantir eficiência na aquisição de água e crescimento das plantas (MACHADO *et al.* 1997; MANSUR e BARBOSA, 2000; SILVA *et al.*, 2004; GIULLIETI *et al.*, 2006; SOUZA *et al.*, 2009; FIGUEIREDO *et al.*, 2012; LIMA *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2014).

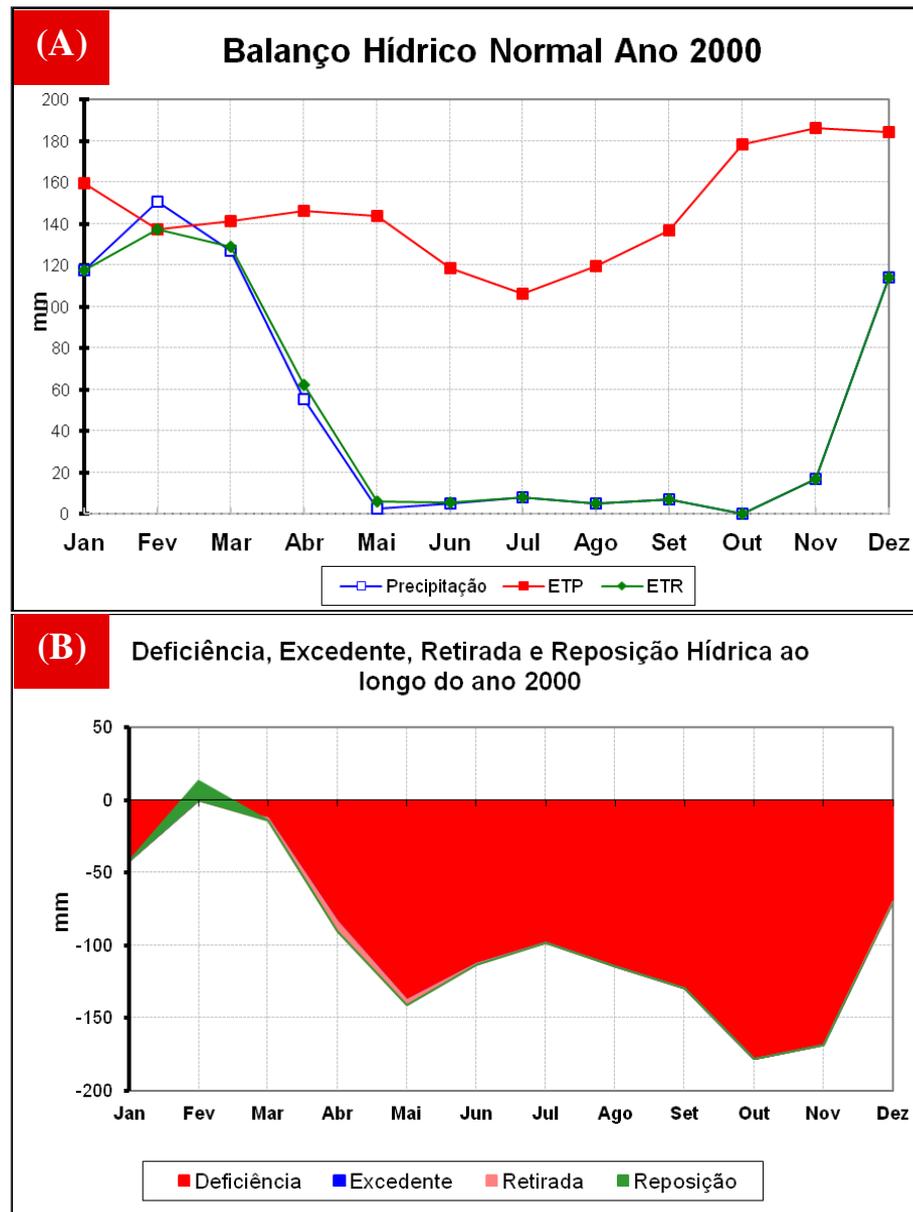
O balanço hídrico realizado ao longo dos anos de 1994, 2000, 2001, 2005, 2006, 2009, 2015 e 2016 (Figuras 13 a 20) tornou-se essencial para interpretação das respostas captadas pelos sensores dos satélites utilizados para o mapeamento. Foi possível verificar que o município apresenta chuvas irregulares e concentradas em determinados meses do ano, especificamente entre janeiro e maio. Evidencia-se um extenso período seco que variou de 10 a 12 meses. Observou-se nos anos de 1994, 2000, 2001, 2006, 2009, e 2016 baixa reposição de água no solo, durante o mês em que a precipitação foi superior a evapotranspiração. Após o período de precipitação, e devido às elevadas temperaturas, existe a tendência de perda de água do solo para a atmosfera; à medida que o solo seca torna-se mais difícil às plantas absorverem água, por causa do aumento da força de retenção (BERGAMASCHI, 1992; SANTOS e CARLESSO, 1998), afetando a distribuição da espécie e o desenvolvimento radicular (LUDLOW e MUCHOW, 1990). Destaca-se que apenas no ano de 2009 houve pequeno excedente, motivado pelo elevado volume de chuvas, superior a 250 mm concentrada no mês de março (Figura 18). Em contrapartida, o ano de 2015 pode ser considerado dentre os analisados o mais seco, onde a deficiência hídrica apresentou valores mais significativos (Figura 19). Ressalta-se que não foram obtidas informações para os anos de 1989 e 1990 nos bancos de dados meteorológicos. Essa irregularidade pluviométrica no tempo e no espaço é destacada por Ab'Saber (2003) e está associada a fatores de escala regional e a fenômenos globais: El Niño, La Niña e alterações na Temperatura da superfície do mar (TSM) no Pacífico equatorial e no Atlântico tropical, que condicionam a formação de eventos extremos (MARENGO *et al.*, 2018).

Figura 13 – Balanço hídrico para o município de Cabrobó, Pernambuco, ao longo do ano de 1994.



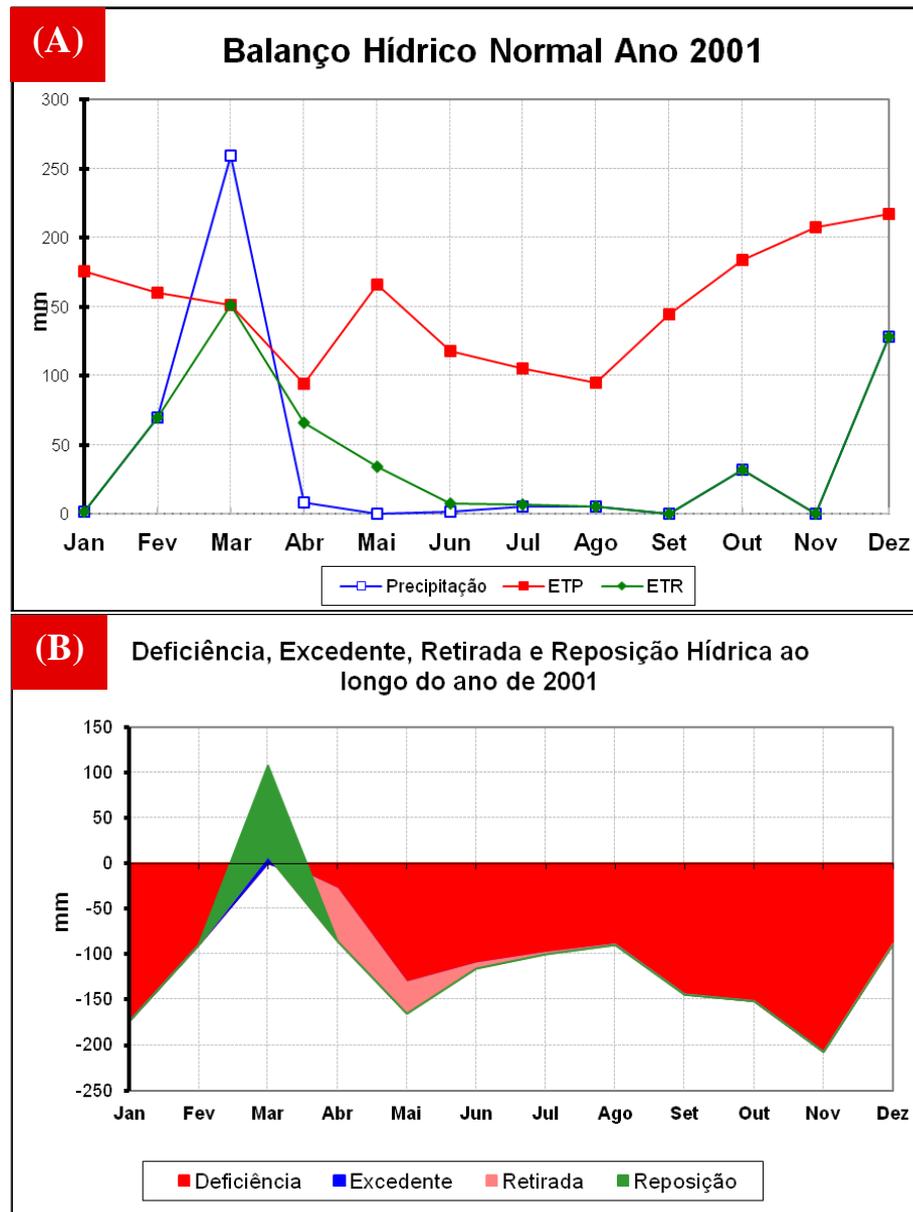
Legenda: ETP (Evapotranspiração potencial); ETR (Evapotranspiração real). (A) balanço hídrico anual; (B) umidade no solo ao longo do ano de 1994. Fonte: INPE.

Figura 14 – Balanço hídrico para o município de Cabrobó, Pernambuco, ao longo do ano 2000.



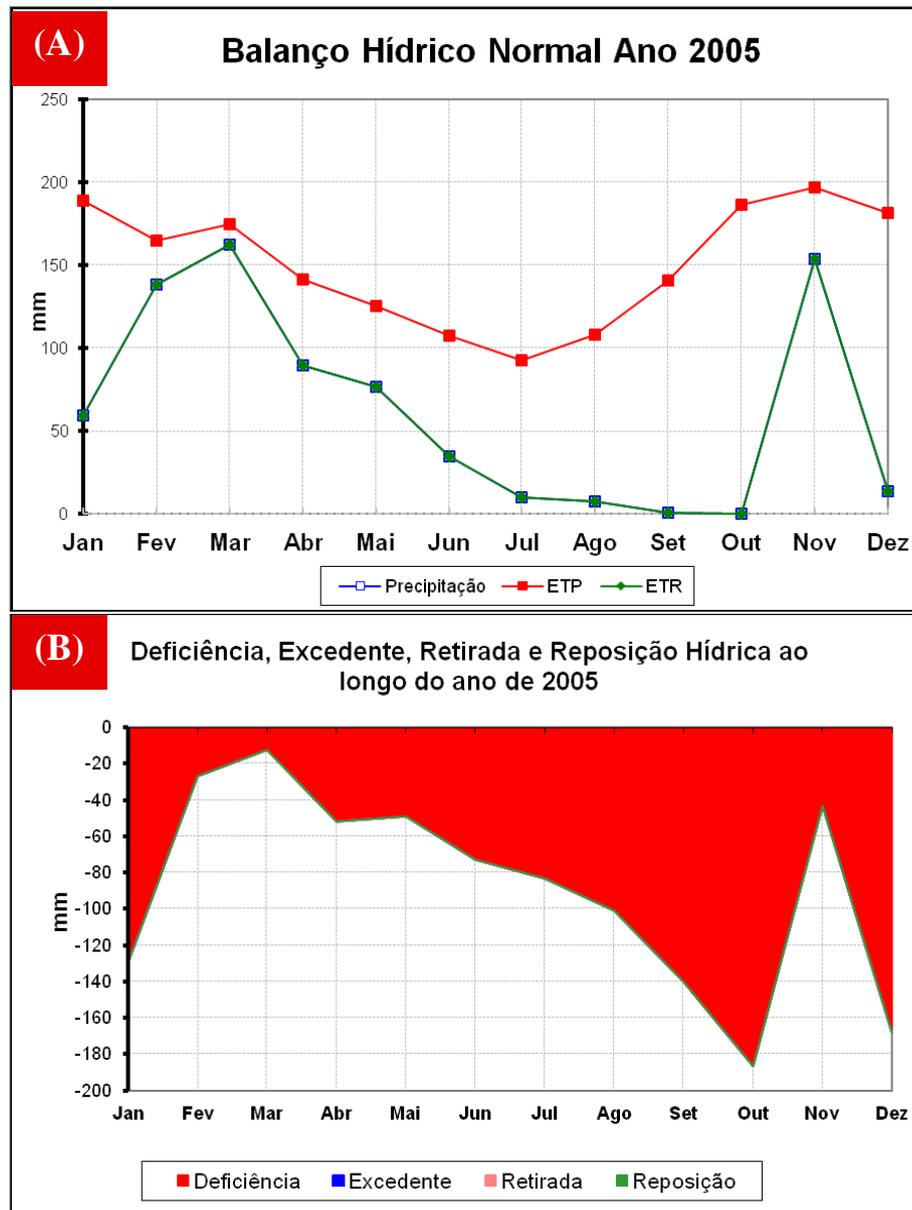
Legenda: ETP (Evapotranspiração potencial); ETR (Evapotranspiração real). (A) balanço hídrico anual; (B) umidade no solo ao longo do ano de 2000. Fonte: INPE.

Figura 15 – Balanço hídrico para o município de Cabrobó, Pernambuco, ao longo do ano de 2001.



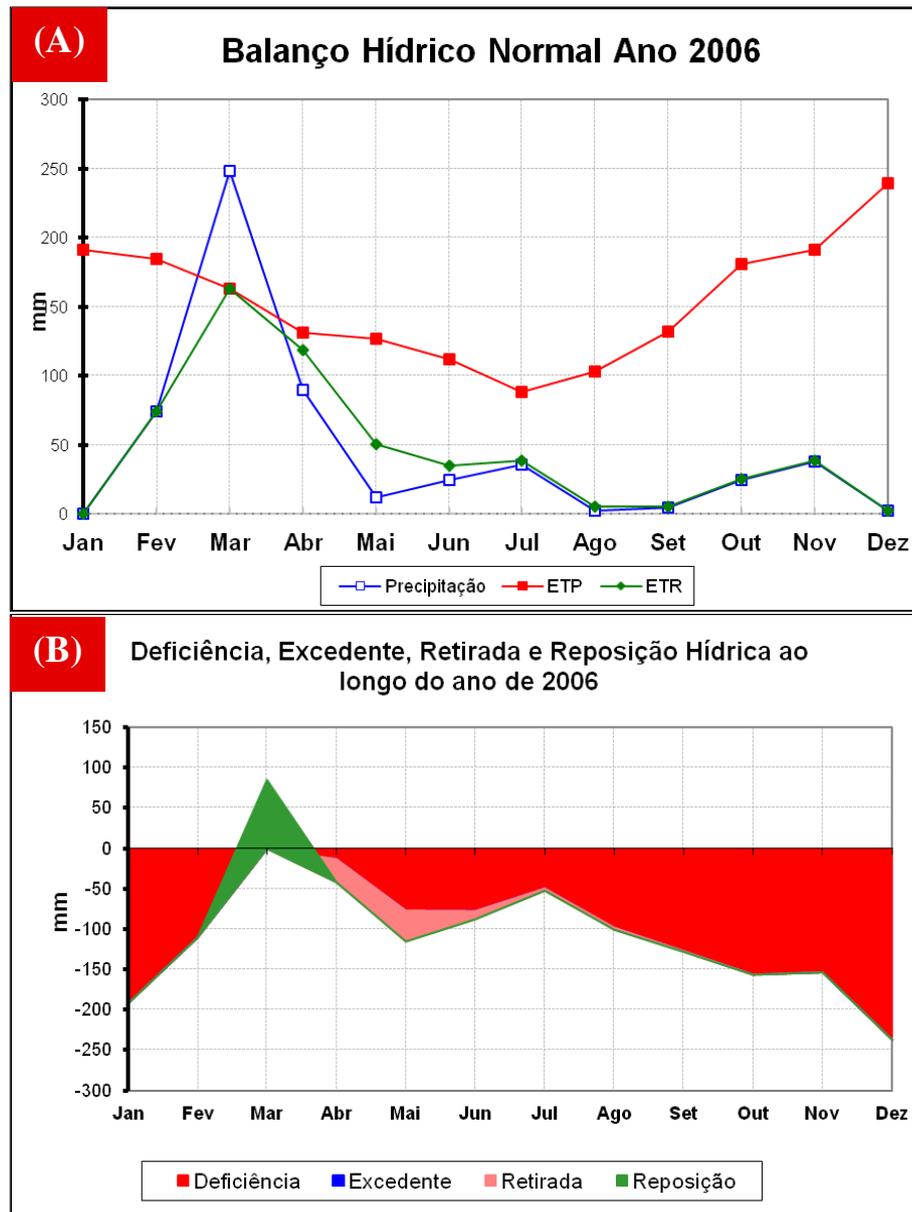
Legenda: ETP (Evapotranspiração potencial); ETR (Evapotranspiração real). (A) balanço hídrico anual; (B) umidade no solo ao longo do ano de 2001. Fonte: INPE.

Figura 16 – Balanço hídrico para o município de Cabrobó, Pernambuco, ao longo do ano 2005.



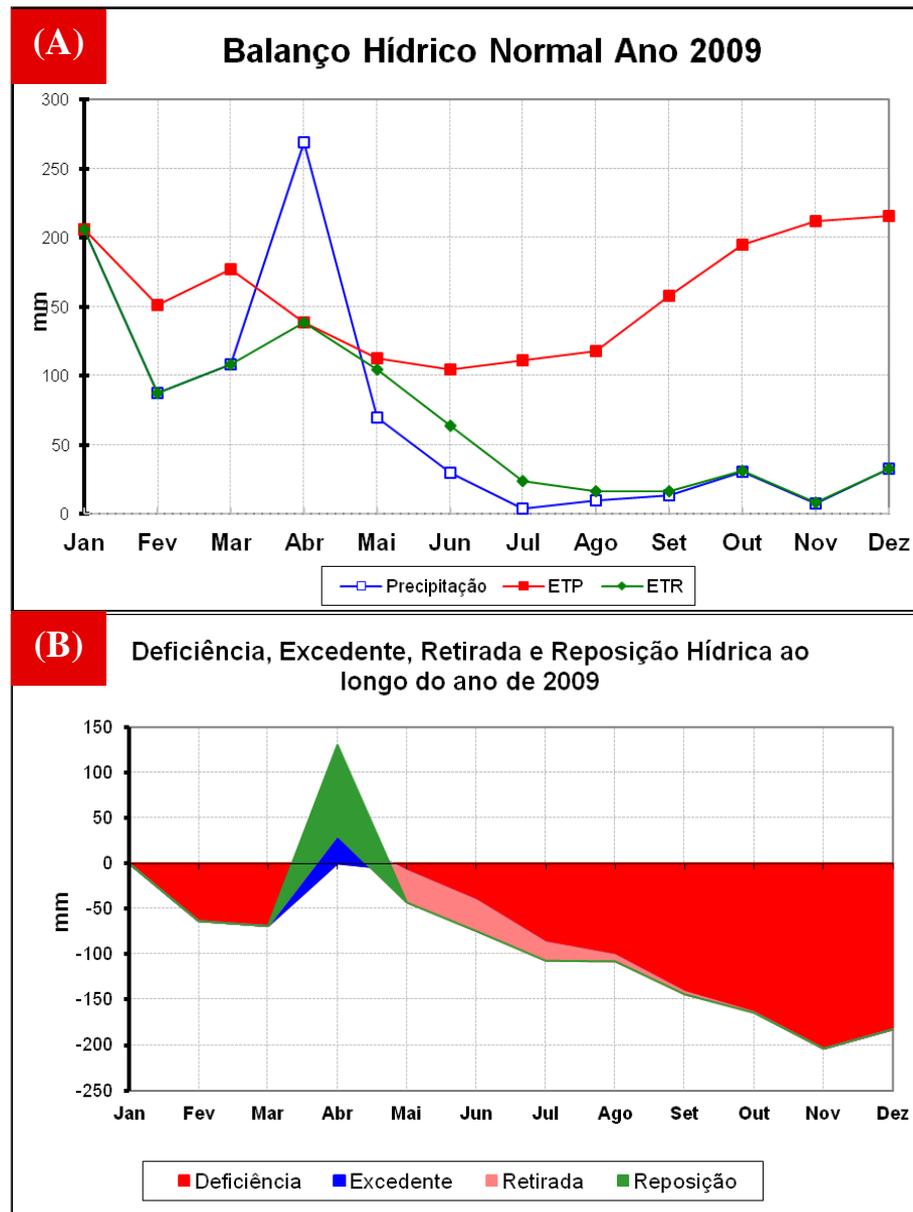
Legenda: ETP (Evapotranspiração potencial); ETR (Evapotranspiração real). (A) balanço hídrico anual; (B) umidade no solo ao longo do ano de 2005. Fonte: INPE.

Figura 17 – Balanço hídrico para o município de Cabrobó, Pernambuco, ao longo do ano de 2006.



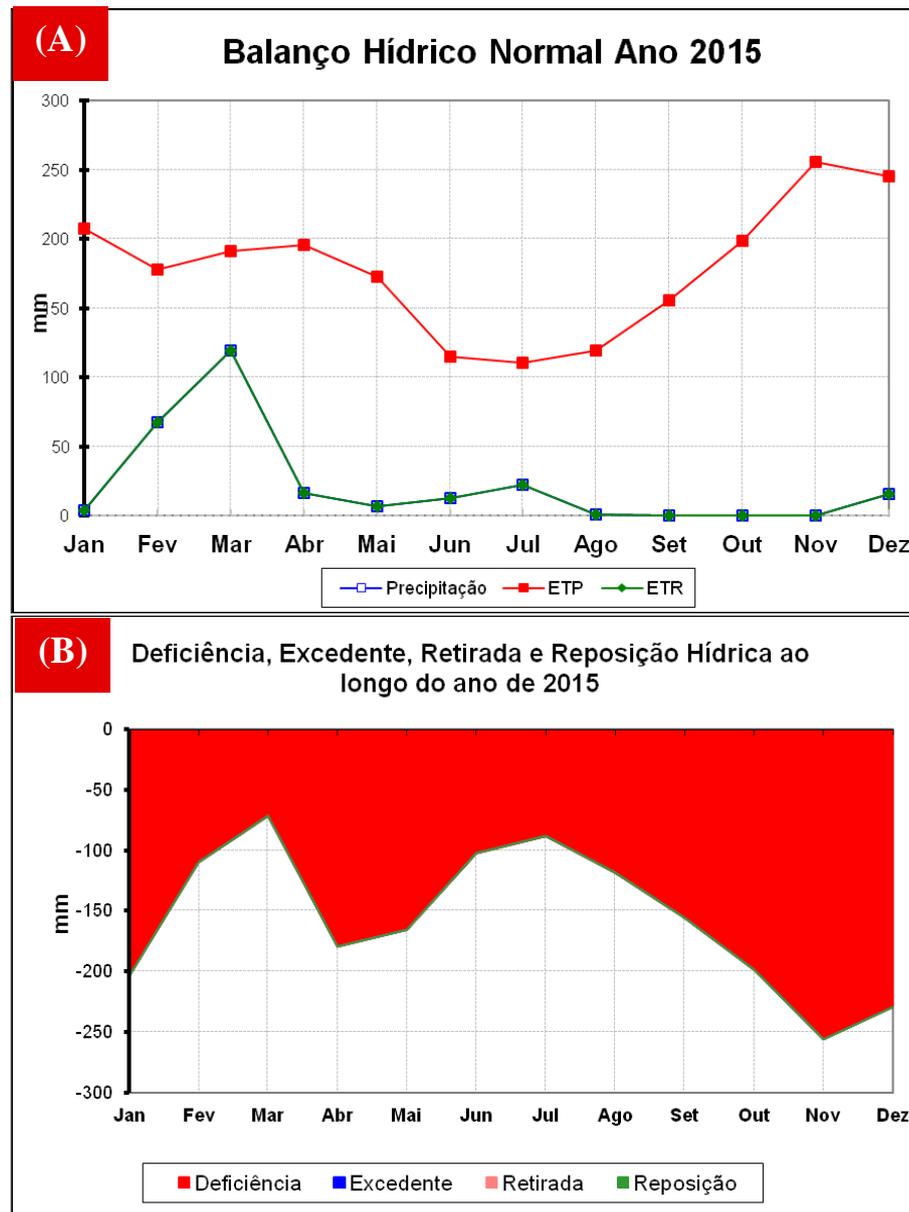
Legenda: ETP (Evapotranspiração potencial); ETR (Evapotranspiração real). (A) balanço hídrico anual; (B) umidade no solo ao longo do ano de 2006. Fonte: INPE.

Figura 18 – Balanço hídrico para o município de Cabrobó, Pernambuco, ao longo do ano de 2009.



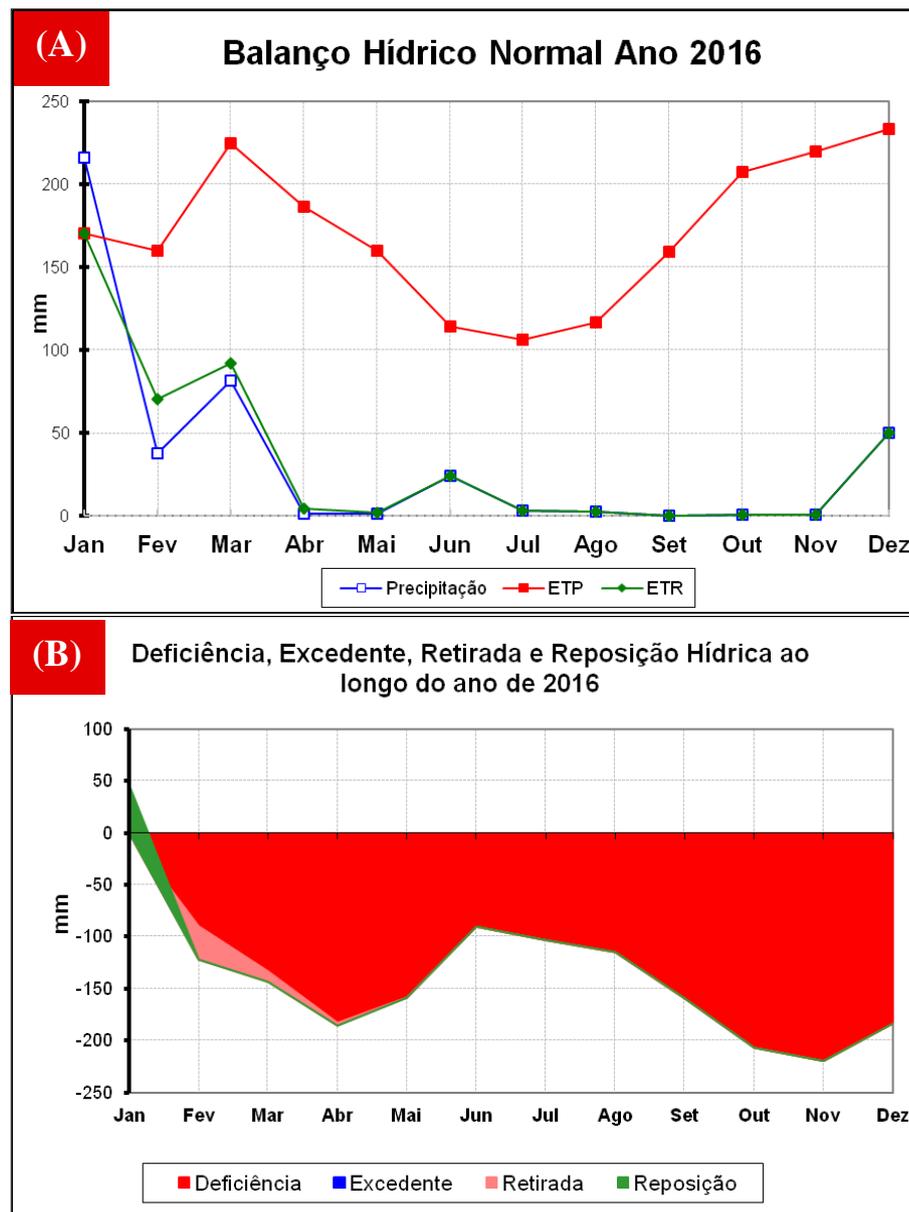
Legenda: ETP (Evapotranspiração potencial); ETR (Evapotranspiração real). (A) balanço hídrico anual; (B) umidade no solo ao longo do ano de 2009. Fonte: INPE.

Figura 19 – Balanço hídrico para o município de Cabrobó, Pernambuco, ao longo do ano de 2015.



Legenda: ETP (Evapotranspiração potencial); ETR (Evapotranspiração real). (A) balanço hídrico anual; (B) umidade no solo ao longo do ano de 2015. Fonte: INPE.

Figura 20 – Balanço hídrico para o município de Cabrobó, Pernambuco, ao longo do ano de 2016.

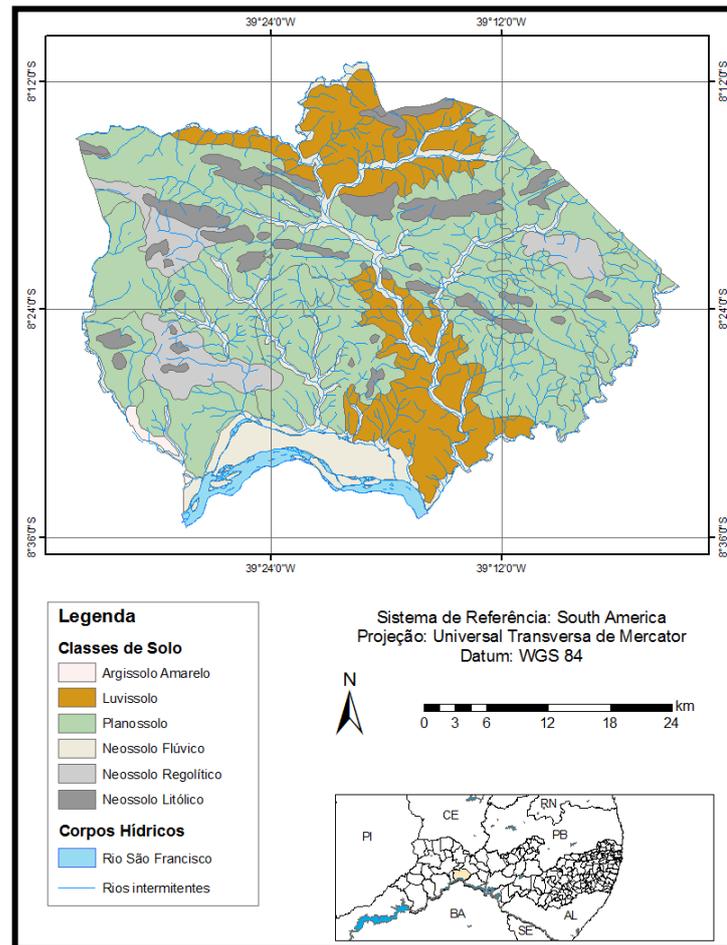


Legenda: ETP (Evapotranspiração potencial); ETR (Evapotranspiração real). (A) balanço hídrico anual; (B) umidade no solo ao longo do ano de 2016. Fonte: INPE.

A partir da observação das séries temporais sobre a influência de El Niño e La Niña, pode-se compreender como fenômenos climáticos incidem na distribuição de chuvas para a região. Constatou-se que para os intervalos anuais de 1990, 1994, 2005, 2006, 2009, 2015 e 2016 houve predominância de eventos de El Niño-Oscilação Sul (ENOS), com episódios finais de La Niña para os anos de 2000 e 2001, que incidiram no NEB. Sabe-se que o ENOS propicia redução das chuvas em ambientes áridos e semiáridos, como o Nordeste brasileiro,

condicionando na Caatinga um grande retardamento da floração da vegetação, aumentando áreas de solo exposto com susceptibilidade à erosão, e temperaturas mais elevadas. Durante os episódios de El Niño/La Niña, há uma tendência para redução/intensificação da atividade convectiva no oceano Atlântico tropical ocidental, que interfere na formação de células e, conseqüentemente nos níveis de precipitação no Nordeste brasileiro (NEB) (MARENGO *et al.* 2016; 2018).

Figura 21 – Mapa de solo do município de Cabrobó e da ilha de Assunção, Pernambuco.



Fonte: IBGE, 2001; EMBRAPA, 2001. Adaptado pela autora. Licença ArcGis 9.3 fornecido por DCG/UFPE.

A compreensão das repostas das plantas ao déficit hídrico possibilita o entendimento dos mecanismos de adaptação utilizados para suportar a redução de disponibilidade de água no solo. As características físicas do solo (porosidade, textura, granulometria) tornam-se fundamentais para a retenção da água, principalmente em ambientes de florestas secas, como a Caatinga (SANTOS e CARLESSO, 1998). Solos com características argilosas tendem a

reter mais água que arenosos, tendo em vista a maior concentração de argila e silte, cujas dimensões das partículas e dos poros são menores (KIEHL, 1979; TAIZ e ZEIGER, 1991). No município de Cabrobó predomina uma paisagem com solos, em sua maioria, do grupo dos Planossolos, Neossolos e Luvisolos (Figura 21).

Os Planossolos são solos de agrupamento de solos minerais que possuem horizonte B plânico, subjacente a qualquer tipo de horizonte A, podendo ou não apresentar horizonte E (háplico ou não). Possui expressão de desargilização intensa constatada pela diferenciação entre o horizonte diagnóstico B plânico e os horizontes A ou E, com mudança de textura abrupta. São solos com restrição de permeabilidade em subsuperfície, que interfere na infiltração e no regime hídrico (EMBRAPA, 2013). Caracterizam-se por apresentarem cores de redução e/ou mosqueamento resultante de drenagem imperfeita ou má e com estrutura em blocos subangulares e/ou angulares médio a grandes ou, ainda, prismática (OLIVEIRA *et al.*, 1992).

Oliveira *et al.* (1992) ressaltam que este tipo de solo, dependendo do local de origem na paisagem, especificamente são encontrados em terrenos baixos, em terraços, ou terço inferior de encostas pouco íngremes, localidades favoráveis ao acúmulo de água durante certos períodos do ano. Atrelado a isso, a baixa permeabilidade faz com que este solo apresente sinais de hidromorfismo.

São solos que possuem atividade de argila tanto alta (Ta) quanto baixa (Tb), com predominância de solos com argila de atividade alta. Encontrados com frequência no semiárido nordestino, especificamente no município de Cabrobó, são responsáveis por mais de 50% da paisagem. Na região semiárida nordestina e no Pantanal matogrossense, estes solos apresentam teores de sódio (Na^+) trocáveis elevados identificados como Planossolos salinos, sálicos e solódicos (OLIVEIRA *et al.*, 1992; EMBRAPA, 2013).

Os solos do tipo Neossolos são caracterizados por apresentarem em sua formação material mineral ou material orgânico pouco espesso, que não apresenta alterações significantes em relação ao material originário devido à reduzida atuação dos processos pedogenéticos. Essa característica se relaciona a sua maior resistência ao intemperismo ou composição químico-mineralógica por meio dos fatores de formação, tais como: clima, relevo ou tempo, que podem exercer influência no processo de evolução dos solos (EMBRAPA, 2013). Podem ser subdivididos em Neossolo Litólico, Neossolo Regolítico, Neossolo Flúvico e Neossolo Quartzarênico. No município de Cabrobó, de acordo com mapeamento da Embrapa (2001), foram encontradas quatro subordens desse Neossolo (Litólico, Regolítico, Flúvico), e algumas manchas de Neossolo Quartzarênico.

Os Neossolos Flúvicos, dentro da subordem dos Neossolos, é um tipo de solo fundamental na paisagem do município de Cabrobó, sendo encontrado próximo às margens do rio São Francisco, limite sul do município. Este tipo de solo caracteriza a paisagem da ilha de Assunção, um dos principais núcleos agrícolas da área.

O caráter flúvico está relacionado aos solos formados por sedimentos de natureza aluvionar ou colúvio-aluvionar. Os Neossolos Flúvicos são derivados de sedimentos aluviais com horizonte A estável sobre camada ou horizonte C e que apresentam caráter flúvico dentro de 150 cm de profundidade, a partir da superfície do solo. Admitem um horizonte Bi inferior a 10 cm de espessura e ausência de gleização expressiva dentro dos 50 cm de superfície do solo (EMBRAPA, 2013).

Os Luvisolos são característicos de terrenos do Pré-Cambriano desenvolvidos a partir de rochas de micaxisto, biotita-xisto, gnaiss, tilito, anfíbolito (SUDENE, 1973). São solos de constituição mineral, não hidromórficos, possuindo um horizonte B textural com argila de atividade alta com capacidade de troca de 2:1 e saturação por bases alta, imediatamente abaixo do horizonte A ou E pouco desenvolvido. Apresentam profundidade média que varia entre 45 e 85 cm, além de variarem entre bem a imperfeitamente drenados (SUDENE, 1973). Possuem coloração avermelhada, laranja, brunada ou acinzentada, com estrutura em blocos, moderada ou fortemente desenvolvida, ou prismática. São solos moderadamente ácidos a ligeiramente alcalinos, com teores de alumínio extraível baixo ou nulo (EMBRAPA, 2013).

Luvisolos possuem uma nítida diferenciação entre os horizontes A e Bt devido ao contraste de textura, cor e/ou estrutura, onde se observa uma transição para o horizonte B textural de forma abrupta. Este tipo de solo pode ou não apresentar pedregosidade na parte superficial e caráter solódico ou sódico na parte subsuperficial (EMBRAPA, 2013). Estes solos apresentam erosão laminar moderada a severa, chegando a formar sulcos, bem como se caracterizam por possuir uma camada de cascalhos e calhaus de quartzo, constituindo um pavimento desértico (SUDENE, 1973). Essa classe de solo possui em sua constituição altas quantidades de nutrientes disponíveis às plantas e de minerais primários passíveis de intemperismo ricos em bases trocáveis (OLIVEIRA *et al.*, 1992), tornando-o muito fértil e apto à agricultura, caso manejado adequadamente.

O solo, além da função de armazenamento e condução de umidade, é um meio quimicamente ativo, que retém e troca elementos minerais (LIRA, 1979). Sua ação, juntamente com o clima, é considerada fator causal para o estabelecimento dos tipos de caatinga (SANTOS *et al.*, 1992). Santos *et al.* (1992) em estudo sobre a semelhança vegetacional em sete solos de Caatinga no município de Parnamirim, Pernambuco,

observaram que Luvissolo, Planossolo e Argissolo Vermelho-Amarelo apresentaram alta semelhança com relação à densidade de espécies lenhosas, apesar de possuírem distinções físicas e químicas. Esse fato demonstra a complexa distribuição dos solos no semiárido nordestino, tendo em vista a formação de um mosaico bastante dividido e com diferentes tipos de classe, variando em profundidade, fertilidade, salinidade, constituição mineralógica (RODAL *et al.*,1992), sendo fatores condicionantes para a capacidade de sustentação de espécies vegetais e retenção de umidade no solo, que nos meses de secas atinge um potencial hídrico negativo para as plantas.

Becerra *et al.* (2015) ao observarem a relação das sazonalidades da precipitação e da vegetação no bioma Caatinga a partir do uso de séries temporais (2001-2008) e dos índices de vegetação NDVI e LSWI (*Land Surface Water Index*) atrelados à precipitação, constataram que as áreas com sazonalidade mais acentuada têm no início da precipitação um rápido incremento da vegetação. Já nas áreas com maior estação chuvosa a vegetação não tende a acompanhar o mesmo padrão de crescimento, sendo mais lento, quando comparada com as mais secas. Esse fato evidencia que existe uma relação direta entre volume de precipitação e volume de fitomassa, propiciando assim um ciclo de crescimento vegetativo.

Os mapas temáticos obtidos a partir de dados de NDVI e SAVI atenderam a uma distribuição de cinco classes de cobertura de solo, a partir dos valores dos pixels obtidos, para os intervalos seco e úmido (Tabela 8). Ressalta-se que, devido ao uso de mapas temáticos sazonais e de diferentes índices, existe uma alteração nos valores dos pixels quantificados nas imagens. Para o IAF se levou em consideração a capacidade fotossintética da vegetação, sendo distinguido por elevada, média e baixa atividade fotossintetizante, intercalada com o porte dos estratos.

Tabela 8 - Identificação das classes de cobertura do solo para os Índices de vegetação NDVI e SAVI para o município de Cabrobó e ilha de Assunção (PE), em escala temporal de 27 anos, durante o período seco e úmido.

Período	Classe de cobertura do solo	Valores de NDVI	Valores de SAVI
Úmido	Corpos d'água	<0,200	<0,184
	Solo exposto/áreas susceptíveis à desertificação	0,200 – 0,331	0,184 – 0,291
	Vegetação não lenhosa	0,331 – 0,439	0,291 – 0,366

Período	Classe de cobertura do solo	Valores de NDVI	Valores de SAVI
Úmido	Vegetação de caatinga aberta	0,439 – 0,535	0,366 – 0,442
	Vegetação de caatinga densa/culturas irrigadas	0,535 – 0,812	0,442 – 0,740
Seco	Corpos d'água	<0,04	<0,058
	Solo exposto/áreas susceptíveis à desertificação	0,04 – 0,198	0,058 – 0,168
	Vegetação não lenhosa	0,198 – 0,265	0,168 – 0,215
	Vegetação de caatinga aberta	0,265 – 0,353	0,215 – 0,295
	Vegetação de caatinga densa/culturas irrigadas	0,353 – 0,741	0,295 – 0,630

Fonte: Dados obtidos a partir do mapeamento espectral das imagens para o município de Cabrobó, Pernambuco.

O NDVI é o índice mais comumente empregado pela comunidade científica em estudos locais, regionais e globais (WARDLOW e EGBERT, 2008). Proposto por Rouse *et al.* (1973), esse índice permite o monitoramento da densidade e do estado de vigor da vegetação verde na superfície. Por sua aplicação é possível monitorar as mudanças e o desenvolvimento da vegetação (JENSEN, 2009), bem como eventuais perturbações em seu ciclo sazonal (NERY *et al.*, 2014). Jensen (2009) expõe que os valores obtidos pelo NDVI podem sofrer alterações devido a sua sensibilidade às mudanças no substrato/solo da vegetação, sendo influenciados pela trajetória da radiação ao atravessar a atmosfera e, pela saturação no processo fotossintético. Elmore *et al.* (2000) ressaltam que o NDVI sofre influência do brilho e do efeito espectral do solo, principalmente em formações vegetacionais esparsas, fato que interfere nas quantificações da estrutura da vegetação. Por isso, Ponzoni *et al.* (2012) enfatizam que o brilho do solo pode superestimar os valores do NDVI. Desta forma, os autores sugerem o uso do SAVI para minimizar tais efeitos.

O mapa temático do NDVI para o período dos meses caracterizados como úmido, evidenciam valores de pixels maiores (Figura 22), quando comparado ao intervalo seco. A análise ambiental para o ano de 1990 demonstra a incidência de uma vegetação aberta, possivelmente, formada por portes subarbustivo e arbustivo. Já em 1994, houve uma maior presença da classe de caatinga densa, provavelmente, motivada pelo intervalo chuvoso dos meses de março-abril. Esse episódio permitiu a reposição de água no solo, o que favoreceu a sustentação de uma vegetação de porte denso e amplo dossel. Em adição, se constata que a

cena para o ano de 2001 teve redução de vegetação densa e ampliação de portes abertos. Esse fato pode estar correlacionado à retirada da madeira para uso e implantação de cultivos agrícolas. Trovão *et al.* (2007) salientam que a maioria das espécies da Caatinga apresenta elevada sensibilidade à variação na quantidade de água no solo, onde o potencial hídrico caulinar, de algumas espécies, diminuiu durante o período de estiagem, motivando condições favoráveis ao estresse hídrico da planta. Em geral, as espécies de plantas em florestas tropicais secas exibem padrões fenológicos diversos, que refletem a heterogeneidade dos fatores ambientais: disponibilidade de recursos, precipitação, temperatura, fotoperíodo e tipos de solo, demonstrando a especificidade dessa formação vegetacional (ALBUQUERQUE *et al.*, 2012).

Evidencia-se que no ano de 2006, houve a predominância da classe de solo exposto/áreas susceptíveis à desertificação, possivelmente, atrelado à data da imagem 28-01-2006 ser o final do período seco e início do chuvoso no município (Figura 22). Outro fator associado é devido aos efeitos do ENOS para esse intervalo de tempo, que ocasionou um retardamento no florescimento dos atributos vegetacionais. Esse fenômeno (ENOS) ocasiona variabilidade na precipitação e na dinâmica da vegetação, que podem ser indicativos de possíveis mudanças climáticas (BARBOSA *et al.*, 2006). Quando o ENOS ocorre durante a curta estação chuvosa (fevereiro a maio) intensifica a vulnerabilidade desse complexo ambiental (BARBOSA; LAKSHMI KUMAR, 2016). Destaca-se que a cena para o ano de 2009 apresentou grande recobrimento de vegetação classificada como densa, sendo um intervalo correspondente do final da La Niña e início do El Niño. É possível que devido à influência do evento climático La Niña, esse tenha sido o ano com maiores índices de precipitação dentre os analisados, onde se constatou a existência de excedente hídrico no solo. Verifica-se que a imagem datada de 18-07-2016 antecedeu um intenso período de ENOS para a região semiárida do NEB, onde a vegetação, para o intervalo seco no ano de 2015, se apresentou com áreas de grande susceptibilidade ambiental. Deste modo, se contrasta em 2016 um aumento da atividade fotossintética com existência de vegetação lenhosa de maior porte, densa e feições de caatinga esparsa, subarbustiva/arbustiva, em detrimento ao solo exposto/áreas susceptíveis à desertificação predominantes no ano de 2015. Silva *et al.* (2016) a partir do uso do NDVI observaram, em escala temporal de 15 anos, que o município de Belém do São Francisco, Pernambuco, teve perda da cobertura vegetal devido ao aumento da fragmentação das áreas de vegetação densa durante o período úmido e, uma redução na época mais seca com incidência de manchas de solo exposto. Marengo *et al.* (2016; 2018) ressaltam que a seca faz parte da variabilidade natural do clima na região. Elas ocorreram no passado,

estão ocorrendo no presente e, de acordo com as projeções de mudanças climáticas, é provável que continuem e se intensifiquem no futuro.

Constatou-se, segundo o mapa de NDVI, que durante o intervalo considerado como seco existiu uma sensível retração da vegetação devido aos baixos índices de precipitação, comuns para a época do ano analisada, quando comparada com o período úmido (Figura 23). Entretanto, os anos de 1994, 2005, 2009 e 2015 tiveram influência do ENOS, fato que foi determinante para a dinâmica da vegetação. Evidenciou-se que no início da década de 90 houve uma sensível incidência de vegetação de menor porte formada por não lenhosas intercaladas entre fitofisionomias abertas de lenhosas. O intervalo da imagem para o ano 2000 demonstrou uma predominância de vegetação de característica subarbustiva/arbustiva aberta, não lenhosa e feições de caatinga densa. É possível que a imagem datada de 04-12-2000, que apresentou uma formação vegetacional densa, tenha sido influenciada pela precipitação próxima a 120 mm/mês em dezembro. Amorim *et al.* (2009) relatam que as espécies da Caatinga possuem respostas diferentes à disponibilidade de água no solo, em que determinados brotos conseguem florescer em resposta a chuvas esporádicas durante a estação seca, enquanto outros permanecem em estado de dormência.

As imagens obtidas para os anos de 2005, 2009 e 2015 apresentaram eventos de ENOS, especificamente para os anos de 2005 e 2015 essa seca se mostrou mais acentuada, havendo uma significativa alteração na dinâmica da vegetação, sendo a classe de cobertura solo exposto/áreas susceptíveis à desertificação feição dominante (Figura 24). Destaca-se que, apesar do ano de 2005 ser considerado como inativo para fenômenos climáticos, houve intervalo antecedente de três anos de ENOS, provavelmente exercendo influência na deficiência hídrica, transformando a paisagem local. Dessay *et al.* (2001) enfatizam que os eventos de El Niño afetam de forma significativa a vegetação de Caatinga, devido a sua forte sazonalidade. A quantidade e intervalo anual de chuvas no NEB são determinantes na dinâmica da vegetação e estrutura do ecossistema, podem ocasionar oscilações na estação de crescimento (fevereiro a maio) (BARBOSA, 1998; BARBOSA *et al.* 2006) com diminuição gradual da umidade e retenção d' água no solo, e da atividade fotossintética (BARBOSA *et al.* 2015), tendo seu efeito mais marcante sobre a vegetação do núcleo central do semiárido nordestino, onde a influência do ENOS é forte, sendo a maioria das secas da região coincidentes com os eventos de El Niño (BARBOSA *et al.*, 2006; ERASMI *et al.*, 2009).

A imagem no ano de 2009, apesar de ter apresentado os maiores índices de precipitação em comparação com os intervalos avaliados, é convergente com eventos de El Niño. Essas particularidades fizeram com que existissem classes de cobertura com padrões de

solo exposto/áreas susceptíveis à desertificação, vegetação não lenhosa, caatinga aberta e densa/culturas irrigadas (Figura 23). Ressalta-se que a mancha de vegetação densa verificada na área central da imagem seja resultante das áreas de culturas irrigadas. Quando se observa a imagem para o ano de 2015, se comprova como períodos de secas intensas interferem efetivamente em ambiente semiárido, intensificando áreas com solo exposto e de susceptibilidade à desertificação, devido à redução das chuvas, sendo este o ano com maior deficiência hídrica dentre os avaliados.

Barbosa *et al.* (2006) em estudo sobre a variabilidade do NDVI na região Nordeste do Brasil em escala temporal de 20 anos (1982-2001), observaram que o Índice sofre oscilações sazonais de períodos de chuva e seca, condicionando fortemente a vegetação. Dessa forma, observaram-se valores máximos do NDVI obtidos nos meses de abril-maio e, conseqüente diminuição durante a primavera austral. Os autores ressaltam que durante o período de 1984-1990 houve uma tendência ascendente dos valores médios de NDVI. Em contrapartida, o intervalo de 1991-1998 representou uma redução desses valores, principalmente quando observado o ápice da estação seca (setembro), apresentando alto grau de variabilidade climática. Esse fato demonstra que os fenômenos climáticos são decisivos para a vegetação, com tendência ao retardamento e dormência para a maioria das espécies, sendo os anos 90 e o intervalo de 2012 a 2015 períodos prolongados de seca sob efeito das perturbações do ENOS. Outro fator atrelado à redução das áreas de vegetação nativa está associado à intensificação das atividades agropecuárias (NASCIMENTO *et al.*, 2014). É possível que essa relação esteja presente na análise ambiental do município de Cabrobó, tendo em vista a exploração da agricultura irrigada e criação de caprinos sobre áreas de Caatinga nativa.

Figura 22 – Mapas NDVI para o município de Cabrobó e ilha de Assunção durante o período úmido.

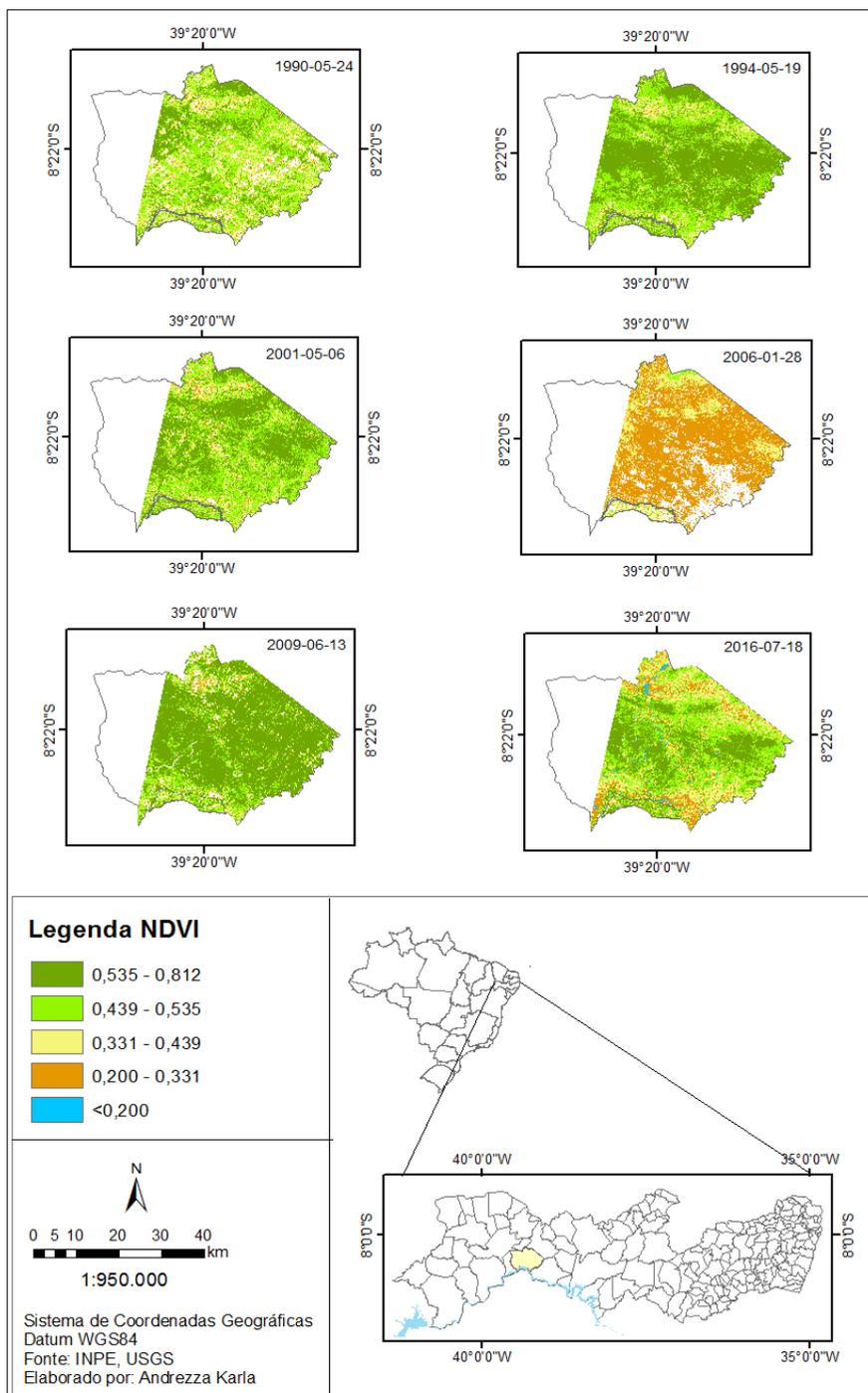
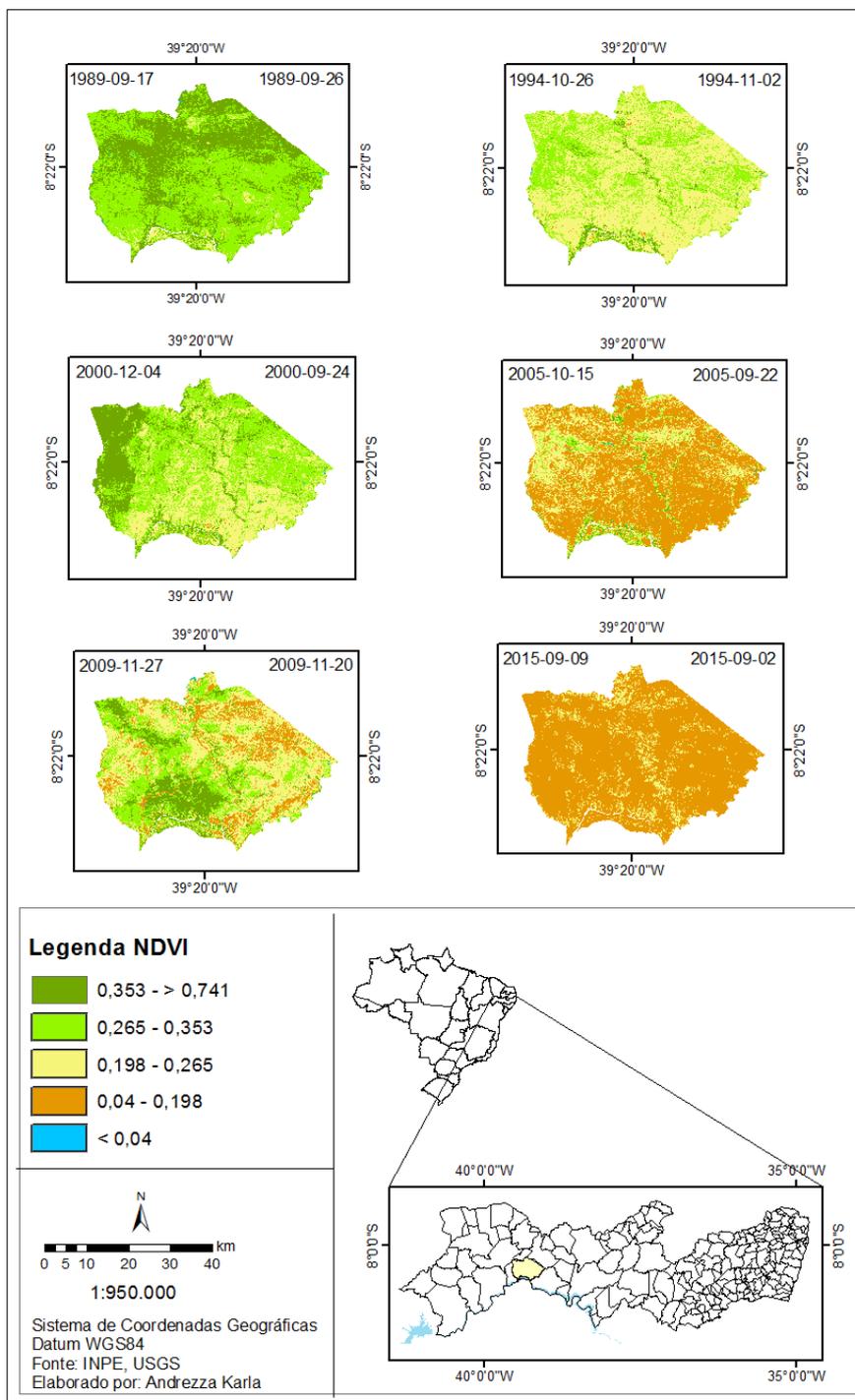


Figura 23 – Mapas NDVI para o município de Cabrobó e ilha de Assunção durante o período seco.



O mapa temático do SAVI indica valores mais baixos que o NDVI, possivelmente, devido à correção do parâmetro solo. Durante o período úmido com o florescimento da vegetação, o SAVI exibiu semelhanças com os resultados do NDVI, porém com valores inferiores (Figura 24). Verificou-se uma grande incidência de pontos com solo exposto/áreas de susceptibilidade à desertificação em ambos os mapas do SAVI durante os anos de 2005,

2006 e 2015 (Figuras 24 e 25). Ratifica-se que, mesmo a imagem do ano de 2006 sendo caracterizada como intervalo úmido, por apresentar-se no final do período seco para o município, condicionou uma fitofisionomia de susceptibilidade ambiental. Tal fato pode ser constatado por meio da análise do balanço hídrico (Figura 17), que confirma a pluviosidade zero para o mês de janeiro e, somente registrado saldo de precipitação em fevereiro. Ressalta-se que a feição vegetacional exibida para as imagens datadas de 24-05-1990 (intervalo úmido) e 17-09-1989/26-09-1989 (intervalo seco) possuem significativo contraste dos atributos da vegetação, onde o período seco visualmente apresentou a predominância da classe de cobertura com vegetação aberta para grande parte do município (Figura 25). Em contraponto, no período úmido, houve um padrão de cobertura com vegetação não lenhosa e lenhosas de padrão subarbustiva/arbustiva (Figura 24). Essa diferenciação é motivada por valores diferentes de pixels para a padronização das classes de cobertura do solo, tendo em vista que as características ambientais de ambos os períodos apresentam particularidades específicas.

Para o intervalo seco o SAVI enfatizou mais a classe de solo exposto/áreas susceptíveis à desertificação, que apresentou ampliação, principalmente para os anos de 2005 e 2015 (Figura 25). Esse índice acentua as peculiaridades do período seco com padrões mais intensos de solos expostos e baixas feições da vegetação, sobretudo em anos com maior deficiência hídrica. Maldonado (2005) alerta que a resposta espectral da vegetação para ambiente semiárido deve ser tratada a partir da complexa relação espectral vegetação/solo/sombra. Esse ambiente quando possui baixa cobertura vegetal $\leq 30\%$, o sensor não consegue captar a resposta da vegetação, devido à caducifolia durante período seco. Arelado a isso, menciona-se a questão do dossel, que apresenta um importante componente de sombreamento através dos troncos e galhos. Asner *et al.* (2000) salientam que a ausência de estrutura foliar verde em grande número de espécies, incide diretamente na resposta espectral. Outro fator associado a isso se refere aos solos do semiárido que possuem baixo teor de matéria orgânica e umidade, sendo tipicamente de coloração clara, aumentando assim a reflectância (HUTCHINSON, 1982; PRINCE, 1987; MILTON *et al.*, 1990; MALDONADO, 2005).

A análise ambiental do município de Cabrobó para o período seco e úmido demonstra a sensibilidade da Caatinga à umidade, onde se verificaram índices de vegetação com valores mais altos. Em compensação durante os intervalos mais secos se exhibe redução da vegetação densa, ficando restrita a áreas mais isoladas ou de agricultura irrigada (Figuras 22 a 25). Choudhury (1992) salienta que as culturas agrícolas implantadas possuem alta atividade fotossintética, por causa da irrigação e a dominância de poucas espécies, apresentando

características mesófilas (MOORE e CHAPMAN, 1990), diferentemente da vegetação nativa do semiárido que é xerófila. Esse fato é típico no município de Cabrobó e na ilha de Assunção, que se tornou uma área de intenso cultivo agrícola. Silva (2014) ressalta que a agricultura é praticada na parte sul do município devido à proximidade com o rio São Francisco e intensamente na ilha de Assunção pelos indígenas, onde as culturas de arroz e cebola amplamente exploradas têm sido substituídas pela fruticultura irrigada.

A comparação do NDVI com o SAVI permite evidenciar que o SAVI consegue distinguir melhor as classes em ambiente semiárido, quando utilizado em períodos secos. Sua eficácia na distinção das feições de vegetação (densa e esparsa), solo exposto e áreas susceptíveis, demonstram maior consonância com a realidade do município. Silva e Galvínio (2012) em desenvolvimento de comparação da variação do NDVI e SAVI em uma área no município de Petrolina, Pernambuco, para o período seco, observaram que o NDVI interfere nas respostas do solo, e isso pode ocasionar respostas diferenciadas na cobertura vegetal devido a uma subestimativa. Os autores salientam, ainda, que a Caatinga sofre bastante influência do solo, pois durante o período seco as áreas de solo exposto e susceptibilidade são as que possuem maior fragilidade ambiental. Em adição, Ilha e Pagotto (2017) avaliaram o NDVI e SAVI, no Monumento Natural Grota do Angico, verificando que o SAVI se sobressaiu na discriminação da cobertura vegetal, sendo o período de estiagem o que apresenta diferenças mais significativas. Esses resultados se mostram em consonância com os dados obtidos, onde a distinção das feições foi mais evidente durante o intervalo seco, principalmente com o uso do SAVI.

Figura 24 – Mapas do SAVI para o município de Cabrobó e ilha de Assunção durante o período úmido.

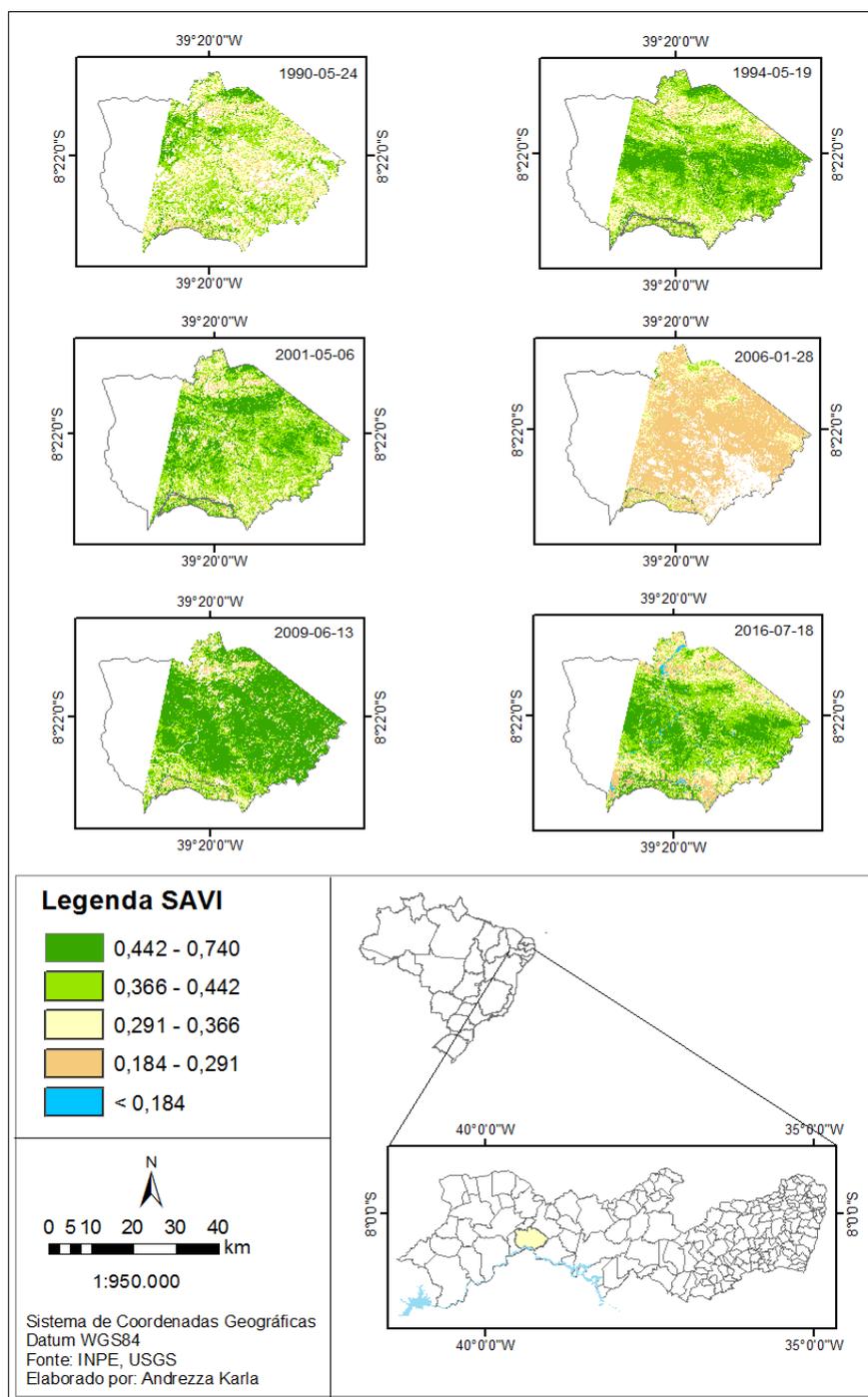
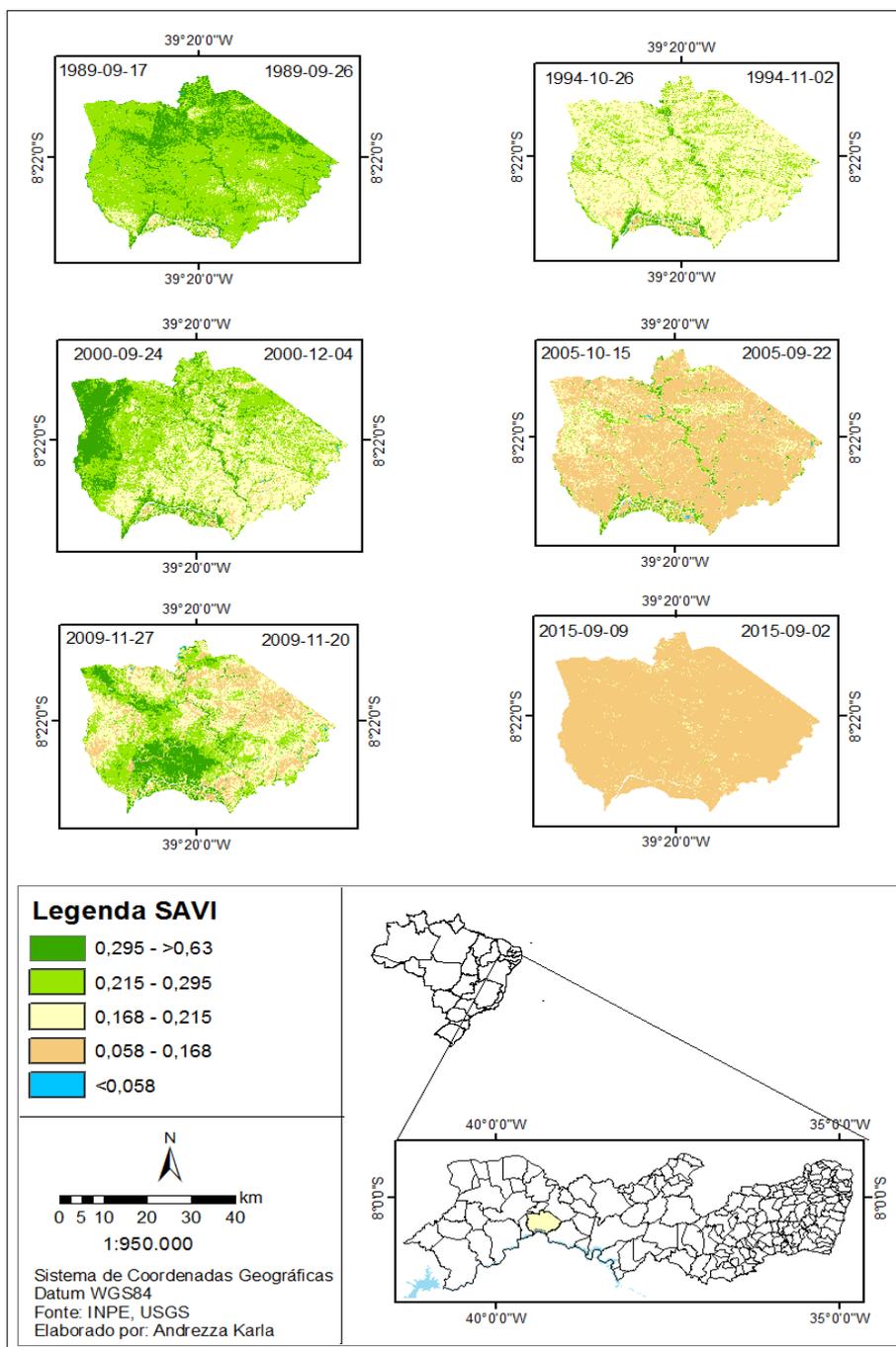


Figura 25 – Mapas do SAVI para o município de Cabrobó e ilha de Assunção durante o período seco.



A análise da resposta espectral obtida a partir do IAF é o produto da razão entre a área foliar de toda a vegetação pela unidade de área utilizada, por isso um indicador de biomassa de cada pixel da imagem (ALLEN *et al.*, 2002). É amplamente empregado para observação do vigor da vegetação, podendo distingui-la por classes (Tabela 9).

Tabela 9 - Identificação das classes de cobertura da vegetação para o Índice de área foliar (IAF) para o município de Cabrobó e ilha de Assunção (PE), em escala temporal de 27 anos, durante o período seco e úmido.

Período	Classe de cobertura do solo	Valores de IAF
Úmido	Vegetação não lenhosa	<0,460
	Vegetação subarbusativa	0,460 – 0,767
	Vegetação arbustiva	0,767 – 1,088
	Vegetação subarbórea	1,088 – 1,650
	Vegetação arbórea/cultivos irrigados	1,650 – 6,630
Seco	Vegetação não lenhosa	<0,148
	Vegetação subarbusativa	0,148 – 0,295
	Vegetação arbustiva	0,295 – 0,533
	Vegetação subarbórea	0,533 – 0,970
	Vegetação arbórea/cultivos irrigados	0,970 – 5,210

Fonte: Dados obtidos a partir do mapeamento espectral das imagens para o município de Cabrobó, Pernambuco.

O mapa temático do IAF para o período úmido demonstrou a predominância de uma vegetação de caráter subarbusativo e arbustivo, intercalada com manchas de caatinga densa de estratos subarbóreo e arbóreo (Figura 26). Observa-se como exceção o ano de 2009, que apresentou uma feição vegetacional de maior porte composta pela classe subarbórea e arbórea. Moreira e Assunção (1984) ressaltam que a vegetação da caatinga responde rapidamente ao início das precipitações, devido ao aumento dos valores espectrais, que durante o período úmido podem estar correlacionados à maior presença de biomassa vegetal, se comparado com o intervalo seco. A redução de parte da folhagem das plantas caducifólias permite diminuir as perdas excessivas de água para a atmosfera pelos estômatos, fato que interfere na arquitetura do dossel da árvore, influenciando a resposta espectral. As folhas são responsáveis pela interação da radiação eletromagnética para a conversão da radiação de ondas curtas (radiação solar) em energia química por meio da fotossíntese. Com as chuvas durante o período úmido ocorre o desenvolvimento do mesófilo com consequente aumento da produção da fotossíntese pelos cloroplastos e do dossel. Constatou-se que durante os meses com maiores índices de precipitação houve um florescimento da vegetação com a formação de folhas, que tende a absorver mais radiação. Atrelado a isso, dentre os anos analisados, 2009 foi o que apresentou pluviosidade superior a 841 mm/ano. Esse fato possibilitou uma feição

atípica dos demais anos analisados, tendo em vista que são distinguidos atributos de vegetação com elevada atividade fotossintetizante. Destaca-se, ainda, que parte pode estar associada a cultivos irrigados, que são crescentes no município.

Ratificou-se, a partir dos atributos da vegetação, que devido aos baixos índices pluviométricos para a imagem de 28-10-2006, houve a dominância do estrato subarbustivo (Figura 26), corroborando com os dados obtidos do NDVI e SAVI, que expressaram a influência da umidade para o florescimento e desenvolvimento da vegetação. Ressalta-se que os fenômenos climáticos interferem diretamente nesse complexo ambiental, principalmente os eventos de seca (ENOS). Os efeitos do ENOS podem ser observados na vegetação, mesmo quando sua força se torna menos intensa como na cena de 18-07-2016, onde é verificada a presença de não lenhosa. A sazonalidade foi fator condicionante para os valores de IAF no município de Cabrobó, estando em conformidade com Braga *et al.* (2009) que verificaram aumento do IAF superiores a 3,6, a partir do início do período chuvoso em área de mata e caatinga no município de Quixeré, Ceará. Em adição, Silva (2014) em estudo na bacia experimental de São João do Cariri, Paraíba, enfatiza que as áreas mais próximas a corpos hídricos tendem a possuir uma vegetação perene, onde suas folhas permanecem mesmo em períodos considerados secos, porém apresentam menor densidade de biomassa à medida que se distanciam das áreas úmidas com valores de IAF entre 2 e 6.

Para o intervalo seco, o IAF dos anos avaliados retratou uma fitofisionomia condicionada pela deficiência hídrica, onde classes compostas por estratos de porte reduzido foram dominantes, principalmente nos anos de 2005 e 2015 (Figura 27). Evidencia-se que as áreas compostas por vegetação não lenhosa tendem a apresentar baixa atividade fotossintetizante, formações características de ambiente semiárido. Essa feição estabelecida na paisagem se torna mais dominante, quando associada a deficiências hídricas, em que plantas lenhosas tendem a perder suas folhas, deixando o solo exposto e, com consequente aumento da reflectância. Santos *et al.* (2014) salientam que, devido às plantas da Caatinga experimentarem de 8 a 10 meses de seca durante o ano, o potencial de água nas folhas é influenciado por dois fatores ambientais: o déficit de pressão de vapor d'água no ar (VPD) e a umidade do solo. Por isso a fisionomia caducifólia predominante na maioria do complexo vegetacional deste bioma. Os pontos com atividade fotossintetizante média podem corresponder a estratos subarbustivos e arbustivos, que se apresentam esparsos e de pequeno porte. As áreas de vegetação com maior capacidade de absorção se associam a portes subarbóreo e arbóreo mais restritos a relevos elevados, em análise das imagens durante o período seco (Figura 27).

Mariano *et al.* (2018) detectaram a tendência de biomassa a partir do IAF como indicador da degradação de terras no Nordeste brasileiro. Observaram a predisposição de perda de vegetação induzidas pelo homem ou pela seca, no intervalo avaliado de 2002 a 2016. Devido ao período ser caracterizado por seca, predominou áreas de susceptibilidade à degradação. Os autores ressaltam, ainda, que o resultado do aumento do rebanho, levando ao sobrepastoreio, foi um fator relacionado à degradação de terras por ação humana. O IAF mostrou-se como um melhor indicador para a avaliação de terras degradadas devido a um maior intervalo de variação, apresentando também correlação com a evapotranspiração total.

Lima e Rodal (2010) evidenciaram uma estreita relação entre fenologia de plantas da Caatinga e densidade da madeira, visto que plantas decíduas com baixa densidade da madeira são capazes de armazenar mais água nos troncos, sendo o brotamento e a reprodução frequentes em espécies com essa característica morfológica. Já as caducifólias com alta densidade da madeira tendem a iniciar seu ciclo fenológico em função do aumento da disponibilidade de água no solo. Em adição, Lima (2010) observou os tipos funcionais fenológicos de 27 espécies lenhosas da Caatinga no município de Serra Talhada, onde avaliou a densidade da madeira, constatando que a baixa densidade condiciona uma maior capacidade de brotar mesmo com índices pluviométricos mais baixos e/ou irregulares. As características fenológicas podem influenciar na observação dos índices de vegetação durante o período seco, principalmente no IAF, já que algumas espécies desse bioma podem brotar com pequenos volumes de chuvas.

Figura 26 – Mapas IAF para o município de Cabrobó e ilha de Assunção durante o período úmido.

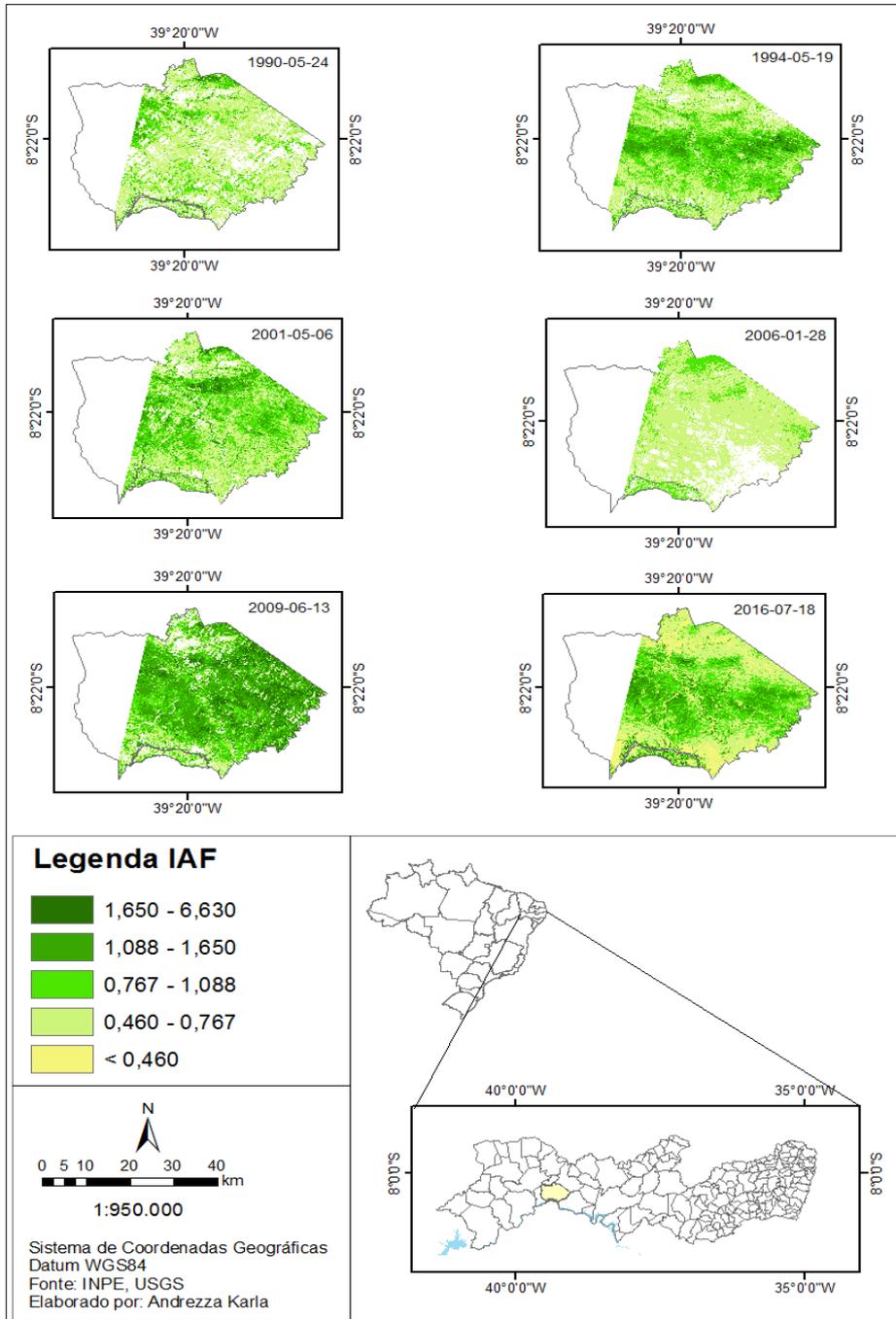
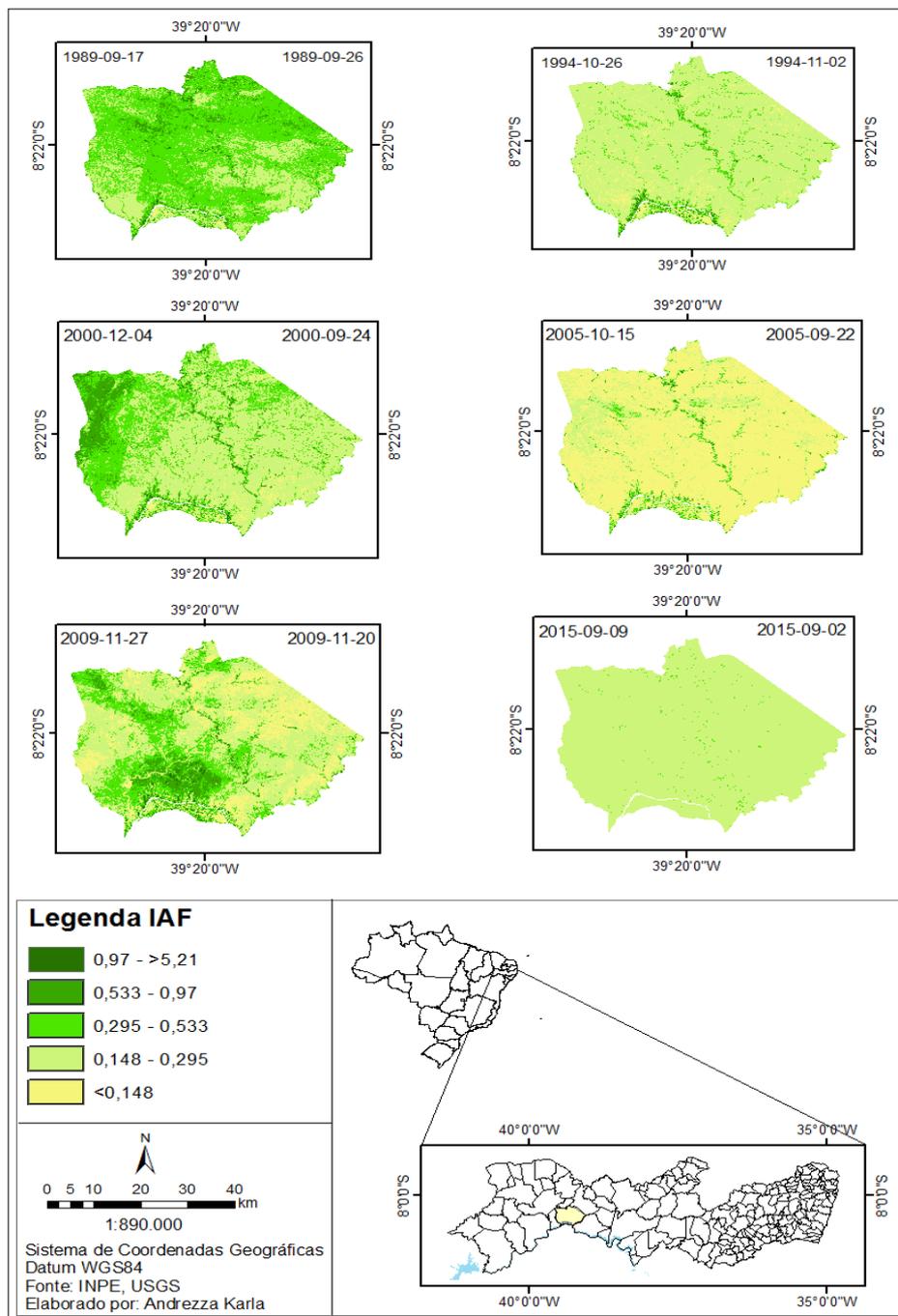


Figura 27 – Mapas IAF para o município de Cabrobó e ilha de Assunção durante o período seco.



A temperatura de superfície (T_s) atua como indicador de áreas propícias à ocorrência de incêndios, cujas condições de estresse hídrico (baixa umidade e elevada insolação) favorecem o agravamento do processo de desertificação, além de dispor de informações ao manejo adequado do solo e planta (BEZERRA *et al.*, 2014).

A análise do mapa temático da Temperatura da superfície para o período úmido evidenciou uma significativa diminuição, quando comparada ao intervalo seco (Figuras 28 e 29). A temperatura máxima atingiu 38,0 °C, sendo os anos de 1990, 1994 e 2016 os que apresentaram valores mais altos. Oliveira e Galvêncio (2009) analisaram a bacia do Moxotó, Pernambuco, em escala temporal para os anos de 1992 e 2003. Durante o período seco demonstraram que as áreas com cobertura vegetal mais densa permanecem com temperatura entre 30 °C e 35 °C, porém os pontos onde houve perda de vegetação apresentaram valores superiores a 38 °C. Esse fato comprova como a fragmentação da cobertura vegetal tende a influenciar nos valores de temperatura, mesmo em intervalos de maior umidade. Destaca-se que para o município de Cabrobó e a ilha de Assunção, durante o período úmido, foram encontradas temperaturas da superfície próximas às obtidas por Oliveira e Galvêncio (2009) para o intervalo seco. Constatou-se que a presença da vegetação influi na temperatura da superfície, fato observado durante o período úmido, em que cenas com elevados valores de IAF correspondem às menores médias de temperatura. Considerou-se como exceção o ano de 2006, no qual a temperatura pode ter sido influenciada pela presença de nuvens, impossibilitando a obtenção clara das informações, afetando os dados da temperatura da superfície (Figura 29).

A cena do ano de 2009 obteve as temperaturas mais amenas, possivelmente devido a um maior recobrimento do solo pela vegetação, como ratificado pelo IAF. Confirmam-se os efeitos tardios do ENOS para o ano de 2016, apresentando as temperaturas mais elevadas para o intervalo úmido avaliado (Figura 28). Ferreira *et al.* (2012) ao verificarem a dinâmica da cobertura vegetal, a partir de escala temporal no município de Petrolina, salientaram que nos períodos chuvosos foram detectados elevados índices de vegetação e temperaturas amenas e, conseqüentemente, nos períodos secos uma retração da cobertura vegetal com aumento de áreas esparsas e altas temperaturas. Essas informações corroboram com os dados obtidos, que demonstram a formação de enclaves vegetacionais durante o período seco com expansão de solo exposto e áreas susceptíveis à desertificação. Em contrapartida, com a incidência das precipitações ocorre a ampliação vegetação densa e, também esparsa, que acaba se desenvolvendo em detrimento ao solo exposto e pontos de susceptibilidade ambiental.

A observação do mapa de Temperatura da superfície para o período seco evidencia que, devido à redução da vegetação e exposição do solo, as temperaturas foram mais elevadas do que no intervalo úmido, obtendo-se pontos com valores de 53,4 °C (Figura 29). Constatou-se que o ano de 2015 foi o mais quente, dentre os observados, fato corroborado pelos mapas temáticos dos Índices de vegetação. A partir dos dados obtidos se verificou que a amplitude térmica para o período seco foi 38,5 °C, em compensação durante o intervalo úmido registrou 20,9 °C. Essa grande variação nos valores de temperatura da superfície durante os intervalos seco e úmido demonstra como a redução da cobertura vegetal, fenômenos climáticos e alterações no uso do solo tornam o ambiente mais susceptível a processos de degradação. Em consonância com os dados obtidos, Ribeiro (2016) também observou elevada amplitude térmica em estudo na bacia hidrográfica do rio Pajeú, para os anos de 2003, 2013 e 2014, devido à baixa quantidade de umidade atmosférica, do sistema de circulação do ar e, principalmente, pelo uso e cobertura do solo. Associado a isso, destaca-se também que o intervalo seco tende a apresentar temperaturas mais elevadas, devido às características fisiológicas e morfológicas da Caatinga, ocasionando assim mais áreas com solo exposto.

Ferreira *et al.* (2011) ressaltam que em áreas de vegetação nativa e/ou verde os valores de temperatura variam entre 22 °C e 32 °C, sendo superiores ao valor máximo observado para áreas de vegetação seca com solo exposto. Em adição, Machado (2014) expõe que a variação espacial dos pixels da temperatura da superfície pode refletir a realidade climática e geomorfológica de um local, no caso do estudo o Parque Nacional do Catimbau, sendo as áreas com maiores valores de IAF, cotas altimétricas e vegetação densa, as que exibem valores de temperatura inferiores a 28 °C. Contrapondo a isso, obtêm-se valores superiores a 33 °C, e na variação entre 38 °C e 40 °C estão as áreas de solo exposto ou de zonas urbanas. Bezerra *et al.* (2014) confirmam essa tendência de correlação entre estruturas do relevo, formações vegetacionais e pluviometria, em análise dos parâmetros biofísicos na região semiárida do estado do Rio Grande do Norte. Fato igualmente observado para o município de Cabrobó e a ilha de Assunção, estando em consonância com estudos desenvolvidos por Lopes *et al.* (2010), na bacia do rio Brígida - PE, bem como os dados obtidos por Cunha *et al.* (2012), na bacia de São João do Rio do Peixe, PB.

Figura 28 – Mapas da temperatura da superfície para o município de Cabrobó (PE) e ilha de Assunção durante o período úmido.

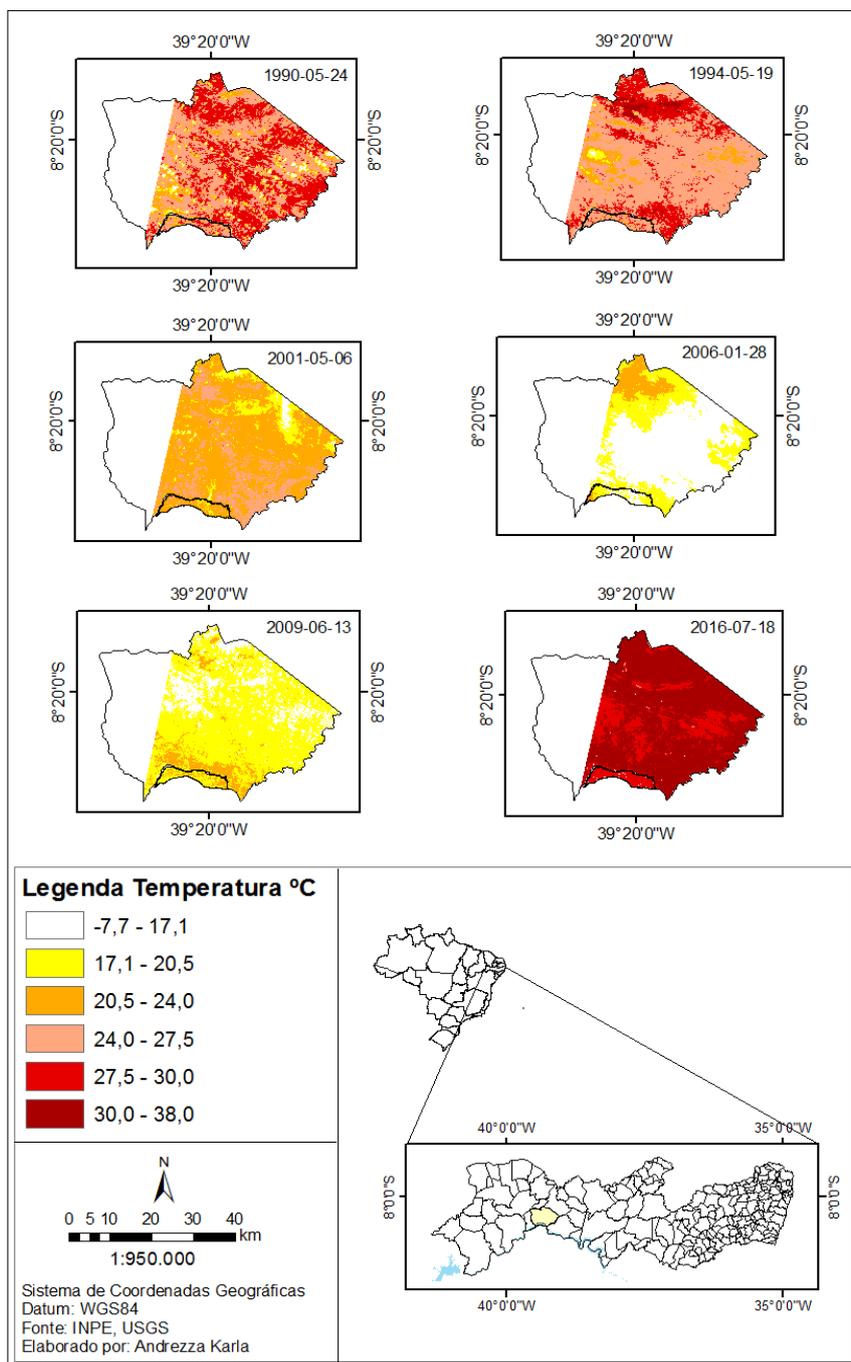
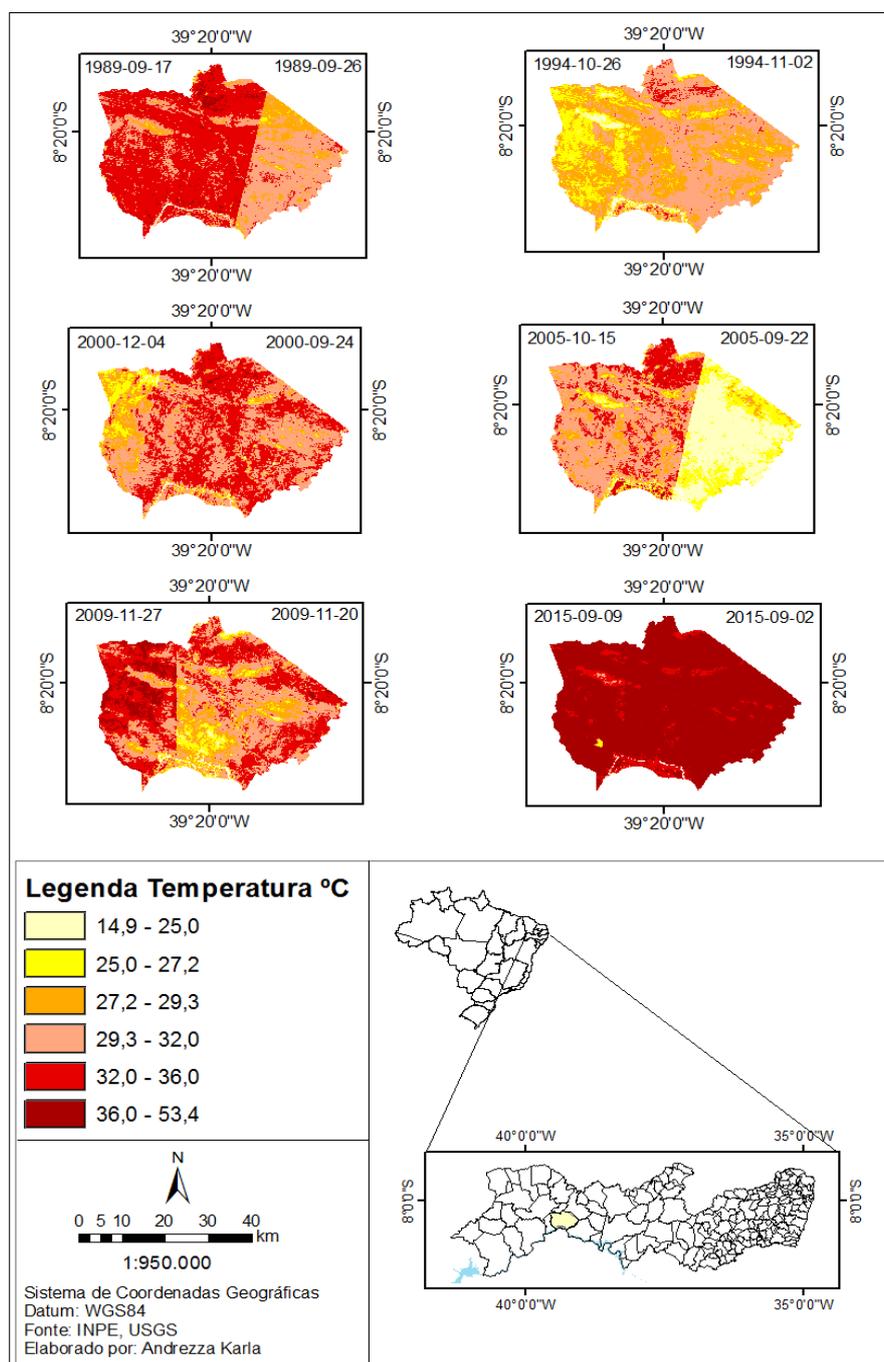


Figura 29 – Mapas da temperatura da superfície para o município de Cabrobó (PE) e ilha de Assunção durante o período seco.



Desta forma, observa-se que a cobertura vegetal com estresse hídrico tende a absorver menos radiação solar, aumentando a reflectância e, conseqüentemente, exibindo menores valores de NDVI, SAVI e IAF e maiores valores de temperatura da superfície. A partir dos dados obtidos se constata que a vegetação apresenta maior densidade nas áreas mais elevadas ou influenciadas pelo aumento da precipitação durante período chuvoso. As condições ambientais são determinantes para o processo reprodutivo, principalmente de espécies vegetais. Carvalho e Nakagawa (2000) salientam que existe uma faixa de temperatura ótima para a germinação, quando ela é ultrapassada as enzimas sofrem desnaturaçã, decrescendo a velocidade e a porcentagem de germinação, chegando até a inibir o processo. Por conta disso, a distribuição geográfica de diversas espécies é determinada pela faixa de condições ambientais toleradas pela germinação de suas sementes (LABOURIAU, 1983). Souza *et al.* (2013) em avaliação da capacidade germinativa de espécies da Caatinga submetidas a diferentes variações de temperatura, observaram que das 19 espécies analisadas típicas da Caatinga, 6 têm seu processo germinativo condicionado a temperaturas $<30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (aroeira, faveleira, feijão-bravo, ipê-roxo, pau-ferro, quixabeira), 7 possuem tolerância a temperaturas até $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ (angico-vermelho, catingueira, imburana, mandacaru, mororó, pau-de-serrote, sabiá), sendo 6 capazes de germinar com temperaturas $>35\text{ }^{\circ}\text{C}$ (baraúna, canela-de-ema, caroá, craibeira, tamboril, tingui). É perceptível a capacidade adaptativa das espécies vegetais existentes no bioma, porém com o crescente aumento da temperatura da superfície que tem ocorrido no município de Cabrobó e na ilha de Assunção, é possível que se condicione uma homogeneização de populações e redução da diversidade de espécies. Neste sentido, análises da vegetação *in loco* possibilitam verificar como a sazonalidade, a temperatura, os tipos de solo, a proximidade com o rio São Francisco e as interferências antrópicas modificam a paisagem e distribuição das espécies do bioma Caatinga, no município de Cabrobó, Pernambuco. Estes parâmetros interferem na radiação e reflectâncias dos alvos, refletindo assim nas respostas espectrais capturadas pelos sensores.

4.2 ANÁLISE E CLASSIFICAÇÃO DA ESTRUTURA DA VEGETAÇÃO EM ÁREA DE REMANESCENTE/FRAGMENTO DE CAATINGA EM REGENERAÇÃO NA ILHA DE ASSUNÇÃO, CABROBÓ – PE

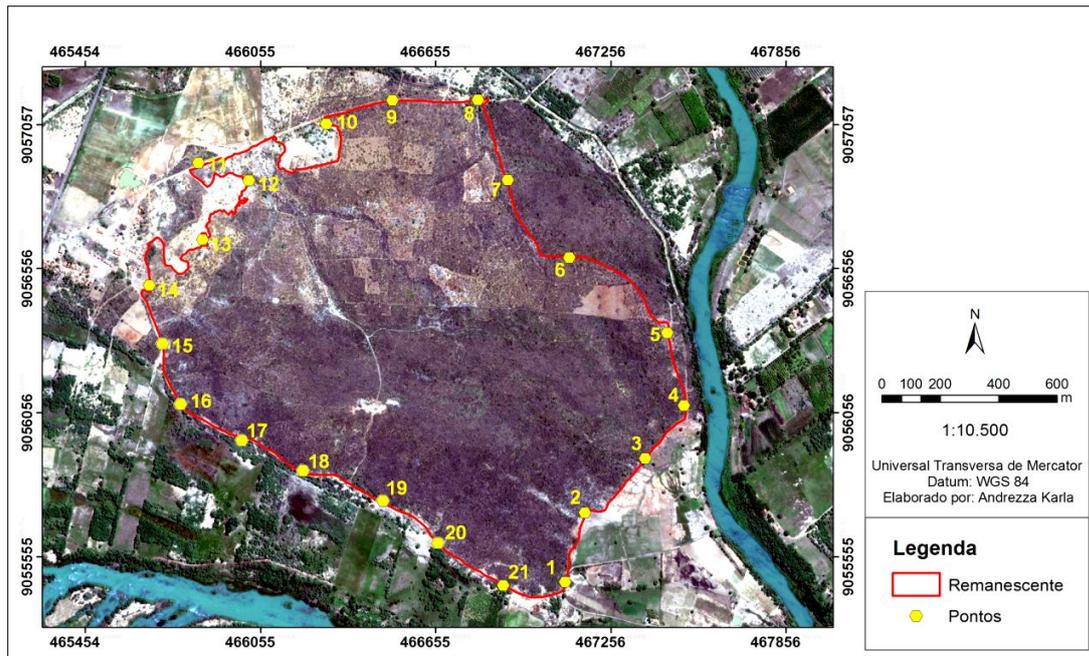
A ilha de Assunção, município de Cabrobó, é destacada pela multiplicidade de usos formando mosaicos paisagísticos, que se intercalam na natureza entre áreas de vegetação nativa, exógena e diferentes formas de apropriação do solo pela agricultura irrigada e piscicultura. Estabelece-se a partir disso uma reconfiguração da paisagem, refletida através da substituição de determinados cultivos agrícolas por novas culturas e novos manejos do solo. Esses diferentes intercâmbios funcionais podem ser entendidos como a capacidade de compreender a concordância estrutural das diversas partes ou dos diferentes mosaicos. Com isso, devido à intensificação das práticas agrícolas, o bioma Caatinga tende a se restringir a pequenos enclaves.

Troll (1997) salienta que a paisagem é dotada de certa fisionomia, onde seus distintos aspectos e elementos, sejam eles visíveis ou não, se encontram em determinada relação funcional. A partir do momento em que houver uma variação em qualquer um dos elementos, terá como consequência modificações em toda a paisagem. A junção de paisagens naturais e culturais, compreendidas através das áreas de vegetação nativa encontradas na ilha de Assunção, e a retirada dessa cobertura vegetal para a implantação de cultivos agrícola, estabelecem uma sobreposição de funcionalidades que repercutem na criação de mosaicos paisagísticos. Dessa forma, é necessário entender a paisagem como uma combinação de elementos físico, biológico e antrópico, ou seja, como uma unidade orgânica, constituída de um caráter temporal e espacial, onde seus numerosos e diversos fatores reagem dialeticamente uns sobre os outros, em constante evolução na busca por equilíbrio (TROLL, 1997; BERTRAND, 2004).

Na área de estudo foram mensuradas 21 parcelas para avaliação dos atributos de vegetação lenhosa em área de Caatinga hiperxerófito em remanescente/fragmento na ilha de Assunção (Figura 30). Aqui compreende-se remanescente/fragmento a partir da discussão de Bresolin *et al.* (2011), remanescente se reporta a uma área de vegetação restante não modificada. Em contraponto, fragmento estaria relacionado a toda área em que a composição florística foi alterada, por meio de corte. Dessa forma, observam-se ao norte da área de estudo sinais de perturbações com provável exploração do solo para agricultura, encontrando-se esta atualmente abandonada e em processo de regeneração (Figura 30). Deste modo, se supõe que as parcelas 6 a 14 estão relacionadas a um processo de recolonização de espécies. Esse fato

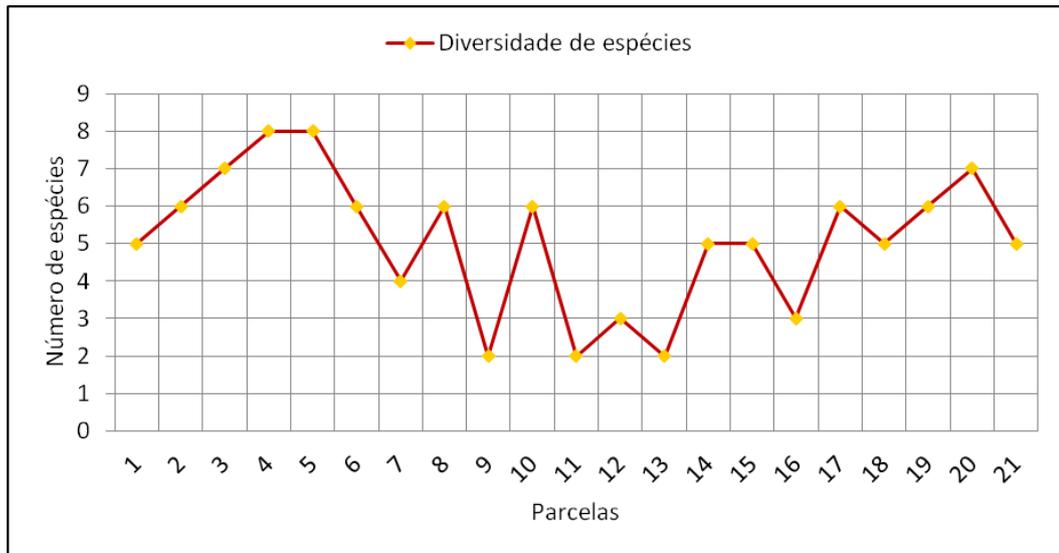
pode ser evidenciado quando se verifica a baixa diversidade de espécies lenhosas nessas parcelas, a exceção dos pontos 6, 8, 10 e 14, quando comparadas as demais parcelas (Figura 31). Arelado a isso, existe a pressão antrópica que tende a adentrar a área de Caatinga para retirada da madeira utilizada na construção de cercas e moradias, bem como se deve levar em consideração a disponibilidade hídrica com o maior distanciamento do rio São Francisco.

Figura 30 – Pontos de mensuração de área de remanescente/fragmento na ilha de Assunção, Cabrobó, Pernambuco.



Fonte: Google Earth Pro (2017); IBGE (2010), adaptado pela autora. Licença ArcGis 9.3 fornecido por DCG/UFPE.

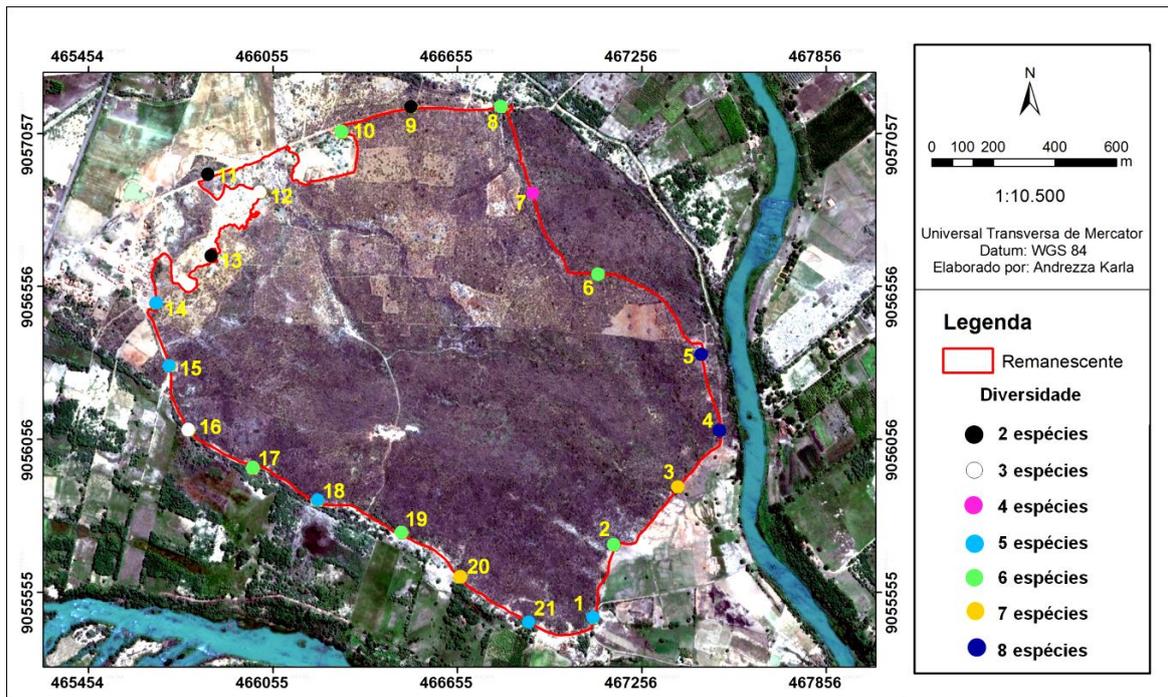
Figura 31 – Diversidade de espécies lenhosas vivas encontradas em áreas de remanescente/fragmento na ilha de Assunção, Cabrobó, Pernambuco.



Fonte: Autora.

Vasconcelos Sobrinho (1978) destaca que a Caatinga é um espelho das condições restritivas e limitantes do ambiente: solo, regime hídrico, temperatura e luminosidade. O zoneamento da diversidade de espécies observadas no remanescente/fragmento na ilha de Assunção demonstra que as parcelas com maior riqueza estão inseridas, em sua maioria, nas áreas com vegetação mais conservada e próxima ao rio São Francisco, a exceção das parcelas 6, 8, 10 e 14 (Figura 32). Já as parcelas que apresentaram menor diversidade estão localizadas nas áreas onde, anteriormente, houve corte raso da vegetação para inserção de cultivo, e atualmente se encontram sob pressão antrópica. Esse fato pode ser observado a partir do contraste das parcelas 1, 2, 5 e 18 dentre as que apresentaram maior diversidade de espécies, exibindo uma vegetação mais densa e com elevado grau de recobrimento do solo. Por conseguinte, verifica-se que as parcelas 9, 11, 14 e 16 são enquadradas por uma vegetação rala, espaçada, de baixa diversidade e com predominância de seixos na camada superficial do solo.

Figura 32 – Zoneamento da diversidade de espécies lenhosas vivas encontradas nas parcelas inventariadas na ilha de Assunção, município de Cabrobó, Pernambuco.



Fonte: Google Earth Pro (2017); IBGE (2010), adaptado pela autora. Licença ArcGis 9.3 fornecido por DCG/UFPE.

No inventário foram contabilizados 964 indivíduos lenhosos vivos para uma área de 200 ha, em 21 unidades amostrais. No levantamento realizado foram identificadas 13 espécies pertencentes a 6 famílias botânicas (Quadro 5). Dentre elas, as que apresentaram maior número de espécies foram: Fabaceae com seis espécies, no entanto com dominância da subfamília Mimosoideae, e Euphorbiaceae com três, enquanto as demais obtiveram apenas um representante. Essas famílias aparecem dentre as mais representativas, sendo encontradas como majoritárias em estudos florísticos em Caatinga e abrangem a maior parte das espécies lenhosas da flora do bioma (ARAÚJO *et al.*, 1995; RODAL *et al.*, 2008; PESSOA *et al.*, 2008; RAMALHO *et al.*, 2009). Suas características morfológicas e fisiológicas possibilitam a essas espécies boa adaptabilidade às condições edafoclimáticas do semiárido nordestino (Quadro 6).

Quadro 5 – Espécies amostradas, por família, no inventário de vegetação lenhosa em uma área de remanescente/fragmento de Caatinga, da ilha de Assunção, Cabrobó – PE.

Família	Espécie	Nome popular
Apocynaceae	<i>Aspidosperma pyrifolium</i> Mart.	Pereiro
Burseraceae	<i>Commiphora leptophloeos</i> (Mart.) J. B. Gillet	Imburana
Capparaceae	<i>Cynophofalla flexuosa</i> (L.) J. Presl	Feijão-bravo
Euphorbiaceae	<i>Jatropha mollissima</i> (Pohl.) Baill.	Pinhão bravo
	<i>Cnidoscolus quercifolius</i> Pohl.	Faveleira
	<i>Croton blanchetianus</i> Baill.	Marmeleiro preto
Fabaceae	<i>Mimosa tenuiflora</i> (Willd.) Poir.	Jurema preta
	<i>Libidibia ferrea</i> (Mart. ex Tul.) L.P. Queiroz var. <i>ferrea</i>	Jucá
	<i>Poincianella pyramidalis</i> Tul. L. P. Queiroz	Catingueira
	<i>Anadenanthera colubrina</i> (Vell.) Brenan var. <i>cebil</i> (Griseb.) Altshul	Angico
	<i>Prosopis juliflora</i> (Sw.) D.C.	Algaroba
	<i>Bauhinia cheilantha</i> (Bong.) Steud.	Mororó
	<i>Ziziphus joazeiro</i> Mart.	Juazeiro

Quadro 6 – Características ecológicas das espécies inventariadas em uma área de remanescente/fragmento de Caatinga, da ilha de Assunção, Cabrobó – PE.

Espécie	Nome popular	Características ecológicas
<i>Aspidosperma pyrifolium</i>	Pereiro	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidade de adaptar-se a todos os tipos de textura e profundidade de solos; • Elevada tolerância a condições encharcadas e a terrenos muito erodidos; • Forma agrupamentos nos terrenos mais degradados; • Alta resistência a longas e severas secas;

Espécie	Nome popular	Características ecológicas
<i>Commiphora leptophloeos</i>	Imburana	<ul style="list-style-type: none"> • Planta pioneira com ampla dispersão, porém descontínua; • Preferência por solos calcários, bem drenados e profundos.
<i>Cynophofalla flexuosa</i>	Feijão-bravo	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada resistência à seca, ao vento e alta tolerância à salinidade; • Cresce ao Sol ou a meia-sombra.
<i>Jatropha mollissima</i>	Pinhão-bravo	<ul style="list-style-type: none"> • Preferência por solos aluviais; • Pode formar populações quase puras; • Encontra-se muitas vezes associada com Faveleira e Pereiro, eventualmente em solos secos e pobres em nutrientes.
<i>Cnidoscolus quercifolius</i>	Faveleira	<ul style="list-style-type: none"> • Planta seletiva higrófita e pioneira; • Frequência elevada, porém, pode apresentar dispersão descontínua e irregular; • Preferência por solos argilosos ou arenosos, pedregosos, com água em profundidade e boa fertilidade;
<i>Cnidoscolus quercifolius</i>		<ul style="list-style-type: none"> • Boa resistência à seca, calor, forte irradiação solar e alagamento; • Ocorre em associação com Pinhão-bravo, Maniçobas, Marmeleiros, Pereiros, Xique-xique e Cansação.
<i>Croton blanchetianus</i>	Marmeleiro-preto	<ul style="list-style-type: none"> • Planta pioneira ocorrente em áreas degradadas; • Preferência por solos de fertilidade natural adequada e boa drenagem; • Pode ser indicadora de perturbação antrópica, ocorrente com frequência em áreas de vegetação devastada;

Espécie	Nome popular	Características ecológicas
<i>Mimosa tenuiflora</i>	Jurema preta	<ul style="list-style-type: none"> • Planta seletiva higrófito, pioneira, com dispersão descontínua e irregular; • Boa adaptabilidade a terrenos diversos, onde a vegetação sofreu corte raso, solos erodidos, pedregosos ou secos; • Raízes capazes de penetrar solos compactados; • Elevado potencial de regeneração de solos erodidos; • Espécie indicadora de sucessão secundária; • Participa da recuperação do teor de nitrogênio no solo; • Capacidade de preparar o solo para plantas mais exigentes.
<i>Libidibia ferrea</i>	Jucá	<ul style="list-style-type: none"> • Preferência por solos argilosos profundos, solos de tabuleiro ou colúvios profundos; • Não forma matas puras, mas se encontra em agrupamentos; • Possui resistência ao fogo, tolerância à sombra, porém não se desenvolve em solos muito úmidos ou alagados; • Ocorre, conjuntamente, com Cumaru, Angico, Pau-d'arco, Mofumbo, Juazeiro e Jurema preta.
<i>Poincianella pyramidalis</i>	Catingueira	<ul style="list-style-type: none"> • Espécie de mais ampla dispersão no semiárido nordestino; • Pode ser encontrada em diversas associações vegetais; • Boa adaptabilidade às características edafoclimáticas do local.

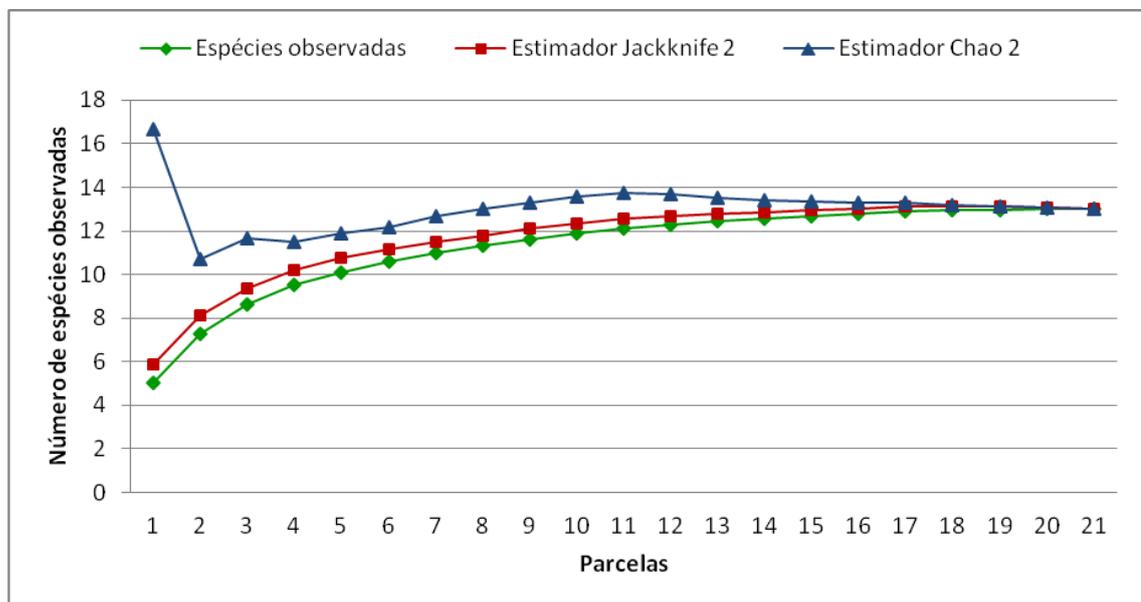
Espécie	Nome popular	Características ecológicas
<i>Anadenanthera colubrina</i>	Angico	<ul style="list-style-type: none"> • Planta pioneira ou secundária inicial com boa dispersão; • Adaptabilidade a diferentes tipos de solos; • Alta tolerância a solos rasos e compactados; • Predomina em solos sedimentares (areníticos, calcários e aluviais); • Regeneração natural através de sementes e rebrotação de tocos.
<i>Prosopis juliflora</i>	Algaroba	<ul style="list-style-type: none"> • Boa adaptabilidade ao ambiente semiárido; • Sistema radicular profundo capaz de captar água subterrânea e um lateral para captação da umidade da superfície; • Possui tronco curto e tortuoso.
<i>Bauhinia cheilantha</i>	Mororó	<ul style="list-style-type: none"> • Preferência por solos férteis e argilosos; • Tolerância à seca em intervalos curtos; • Capacidade de enriquecer o solo com nitrogênio.
<i>Ziziphus joazeiro</i>	Juazeiro	<ul style="list-style-type: none"> • Planta sempre verde, seletiva, higrófito; • Sistema radicular profundo; • Boa adaptabilidade a solos arenosos e pedregosos, preferência por solos argilosos, férteis e ricos em água subterrânea; • Em solos pobres e sem água subterrânea possui baixo porte, podendo perder as folhas; • Não forma matas puras, aparecendo de forma isolada

Fonte: Maia (2012); Gomes *et al.* (2007), adaptado pela autora.

A curva de estimativa de riqueza total gerada pelos estimadores Jackknife 2 e Chao 2, demonstraram que a partir da parcela 19 se inicia um processo de suficiência amostral, onde o número de espécies observadas começa a se igualar com os estimadores. Foi atingida a suficiência nas parcelas 20 e 21, em que a riqueza estimada já é igual aos valores dos

estimadores (Gráfico 1). A estimativa de riqueza total gerada pelos estimadores manteve-se com valores muito próximos, a exceção do Chao 2 que apresentou uma superestimativa de riqueza. Esses estimadores são baseados na abundância, sendo o Chao 2 relacionado à incidência de espécies raras em sua presença/ausência nas unidades amostrais, quantificando os táxons encontrados em apenas 1 ou 2 amostras (DIAS, 2004). É possível que devido à presença de espécies com baixa e pontual incidência nas parcelas inventariadas no remanescente/fragmento, como *B. cheilantha*, *A. colubrina*, *L. ferrea*, *Z. joazeiro* e *C. leptophloeos*, tenha ocasionado uma curva mais ascendente do estimado Chao 2, principalmente nas primeiras cinco parcelas que apresentaram maior abundância de espécies.

Gráfico 1 – Curva de estimativa de riqueza em remanescente/fragmento na ilha de Assunção, município de Cabrobó – PE, a partir dos estimadores Jackknife e Chao de segunda ordem.



O índice de Shannon-Winner foi equivalente a 2,036 nats/ind, estando de acordo com estudos realizados em ambientes de Caatinga, que variam de 1,10 a 3,09 nats/ind (CALIXTO JÚNIOR e DRUMOND, 2011). Sampaio (2010) ressalta que o índice de diversidade para a maior parte desse bioma apresenta valores baixos de H' entre 1,5 a 3 nats/ind. O valor obtido é inferior ao exposto por Rodal *et al.* (1998) para área de Caatinga perenifólia 2,73 nats/ind., as áreas de Carrasco 2,57 nats/ind. (ARAÚJO *et al.*, 1998), de transição Caatinga-carrasco 2,65 nats/ind. (OLIVEIRA *et al.*, 1997), de Caatinga arbórea 3,09 nats/ind. (ALCOFORADO-FILHO, 1993), porém em consonância com Alves Junior *et al.* (2013) para área de Caatinga em regeneração natural 1,91 nats/ind. Evidencia-se que o remanescente/fragmento possui uma

baixa diversidade florística, possivelmente devido ao histórico de intervenções antrópicas com uso da área para cultivo agrícola.

O índice de Equabilidade de Pielou foi 0,791, indicando que houve predomínio de uma ou mais espécies sobre outras. Calixto Junior e Drumond (2011) em estudos fitossociológicos em fragmento de Caatinga em repouso por 30 anos após corte raso, observaram que a equabilidade foi 0,50. Os autores relatam que a baixa equabilidade verificada pode estar relacionada à elevada densidade de *M. tenuiflora* no fragmento. Maia (2004) salienta que *M. tenuiflora* por ser uma espécie pioneira, indicadora de sucessão secundária progressiva ou de recuperação, é capaz de formar, no início da sucessão, matas homogêneas da espécie. Esse fato corrobora os dados obtidos, tendo em vista que a espécie *M. tenuiflora* esteve presente em todas as parcelas analisadas, evidenciando-se, ainda, que nas parcelas 7, 8, 9, 11, 12, 13, 16 e 20 houve uma dominância da espécie superior a 53%, bem como formando matas quase puras de *M. tenuiflora* nas parcelas 11, 12 e 13. Isso ratifica seu papel recolonizador, sendo sua presença reduzida em áreas com menor grau de modificação, permitindo o convívio concomitante com espécies menos tolerantes.

O índice de Simpson foi 0,178, demonstrando uma baixa heterogeneidade. Esse fato ratifica que as espécies *M. tenuiflora* e *J. mollissima* se configuram como dominantes, em que a soma de suas densidades relativas equivale a 50,93% do total (Tabela 9). Esse fato pode ter relação com a maior abundância de indivíduos lenhosos dessas três espécies. Em contrapartida *A. colubrina*, *B. cheilantha*, *C. leptophloes*, *L. ferrea* e *Z. joazeiro* obtiveram as mais baixas densidades relativas influenciadas pelo pequeno quantitativo de espécimes, provavelmente por serem mais suscetíveis a ambientes com maior grau de perturbação. Ressalta-se que, apesar da grande existência no município de Cabrobó e na ilha de Assunção de *P. juliflora*, esta não se dissemina tão intensamente em remanescentes/fragmentos menos impactados e com diversidade de espécies.

Constatou-se que *M. tenuiflora*, *A. pyrifolium* e *J. mollissima* são as espécies de maior valor de importância – IVI, especificamente, *M. tenuiflora*. As espécies de maior importância na área de estudo são típicas de Vegetação Caducifolia Espinhosa (VCE), que também têm sido relacionadas em outros levantamentos florísticos (RODAL *et al.*, 2003). Deste modo, é possível afirmar que *M. tenuiflora* possui elevada densidade relativa, que associada a uma frequência absoluta alta (100%), indica que a espécie não só é abundante, mas com boa distribuição no remanescente/fragmento estudado. O IVC ratifica os valores obtidos, demonstrando que *M. tenuiflora* recobre mais de 67,88% das áreas amostrais analisadas (Tabela 10).

As espécies observadas no inventário apresentam diferentes exigências e estratégias de ocupação, fato que pode ser determinante para a dominância de determinado táxon. Observa-se que, apesar dos baixos valores de dominância e IVC de *J. mollissima* condicionados pela sua característica morfológica, esta representa a segunda maior DA, inferior apenas a *M. tenuiflora*. Lopes *et al.* (2002) ressaltam que valores elevados de densidade indicam que a espécie apresenta boa adaptação as condições edafoclimáticas do local, possibilitando maior resistência à competitividade.

Farias *et al.* (2016) ao analisarem duas áreas de Caatinga diferenciadas devido à proximidade de curso d' água (I) e a 100 m de distância do recurso hídrico (II) no Parque Estadual da Mata da Pimenteira, município de Serra Talhada, constataram que 71% dos total de espécies encontradas são compartilhadas em ambas as áreas. Ressaltaram que as populações mais abundantes foram de *C. blanchetianus*, *C. rhamnifolioides*, *J. mollissima*, *Manihot epruinosa*, *A. colubrina*, *B. cheilantha*, *P. pyramidalis*, *A. pyriformium* e *Rollinia leptopetala*. Estas espécies representaram cerca de 60% e 80% da densidade total dos ambientes I e II, respectivamente. Destaca-se que no levantamento realizado foram identificadas cinco dentre as espécies apontadas pelos autores. Esses dados ratificam a pesquisa, comprovando a representatividade de *C. blanchetianus*, *J. mollissima*, *B. cheilantha*, *P. pyramidalis* e *A. pyriformium* no levantamento realizado onde a soma de suas participações equivale a 45,9% na DA. Essa representatividade é inferior à de *M. tenuiflora*, que sozinha possui 33,9% da densidade absoluta do remanescente/fragmento.

Tabela 10 – Parâmetros fitossociológicos e estruturais das espécies de plantas em remanescente/fragmento na ilha de Assunção, Cabrobó – PE.

Espécies	Número de ind.	Altura média (m)	Diâmetro médio (cm)	DA (n/ha)	DR (%)	DoA (m ² /ha)	DoR (%)	FA (%)	FR (%)	IVI (%)	IVC
<i>Anadenanthera colubrina</i>	7	2,78	31,03	11,1	0,73	0,89	1,26	9,52	1,87	3,86	1,99
<i>Aspidosperma pyriformium</i>	94	3,05	26,46	149,2	9,75	13,33	19	57,14	11,21	39,97	28,75
<i>Bauhinia cheilantha</i>	14	1,94	12,83	22,2	1,45	0,3	0,42	9,52	1,87	3,75	1,88
<i>Cnidocolus quercifolius</i>	56	3,36	22,57	88,9	5,81	4,89	6,97	52,38	10,28	23,06	12,78
<i>Commiphora leptophloeos</i>	3	4,00	31,13	4,8	0,31	0,4	0,57	9,52	1,87	2,75	0,88
<i>Croton blanchetianus</i>	96	2,00	11,16	152,4	9,96	1,76	2,51	33,33	6,54	19,01	12,47
<i>Cynophalla flexuosa</i>	43	2,15	13,29	68,3	4,46	1,12	1,59	47,62	9,35	15,4	6,05
<i>Jatropha mollissima</i>	164	2,19	13,27	260,3	17,01	4,25	6,05	76,19	14,95	38,02	23,07
<i>Libidibia ferrea</i>	12	3,22	28,83	19	1,24	1,88	2,68	9,52	1,87	5,8	3,93
<i>Mimosa tenuiflora</i>	327	2,55	20,50	519	33,92	23,82	33,96	100	19,63	87,51	67,88
<i>Poincianella pyramidalis</i>	75	2,93	20,59	119	7,78	5,02	7,16	47,62	9,35	24,28	14,94
<i>Prosopis juliflora</i>	59	2,97	24,82	93,7	6,12	9,46	13,49	42,86	8,41	28,02	19,61
<i>Ziziphus joazeiro</i>	14	2,83	34,46	22,2	1,45	3,03	4,33	14,29	2,8	8,58	5,78

Legenda: DA (densidade absoluta); DR (densidade relativa); DoA (dominância absoluta); DoR (dominância relativa); FA (frequência absoluta); FR (frequência relativa); IVI (índice de valor de importância); IVC (índice de valor de cobertura).

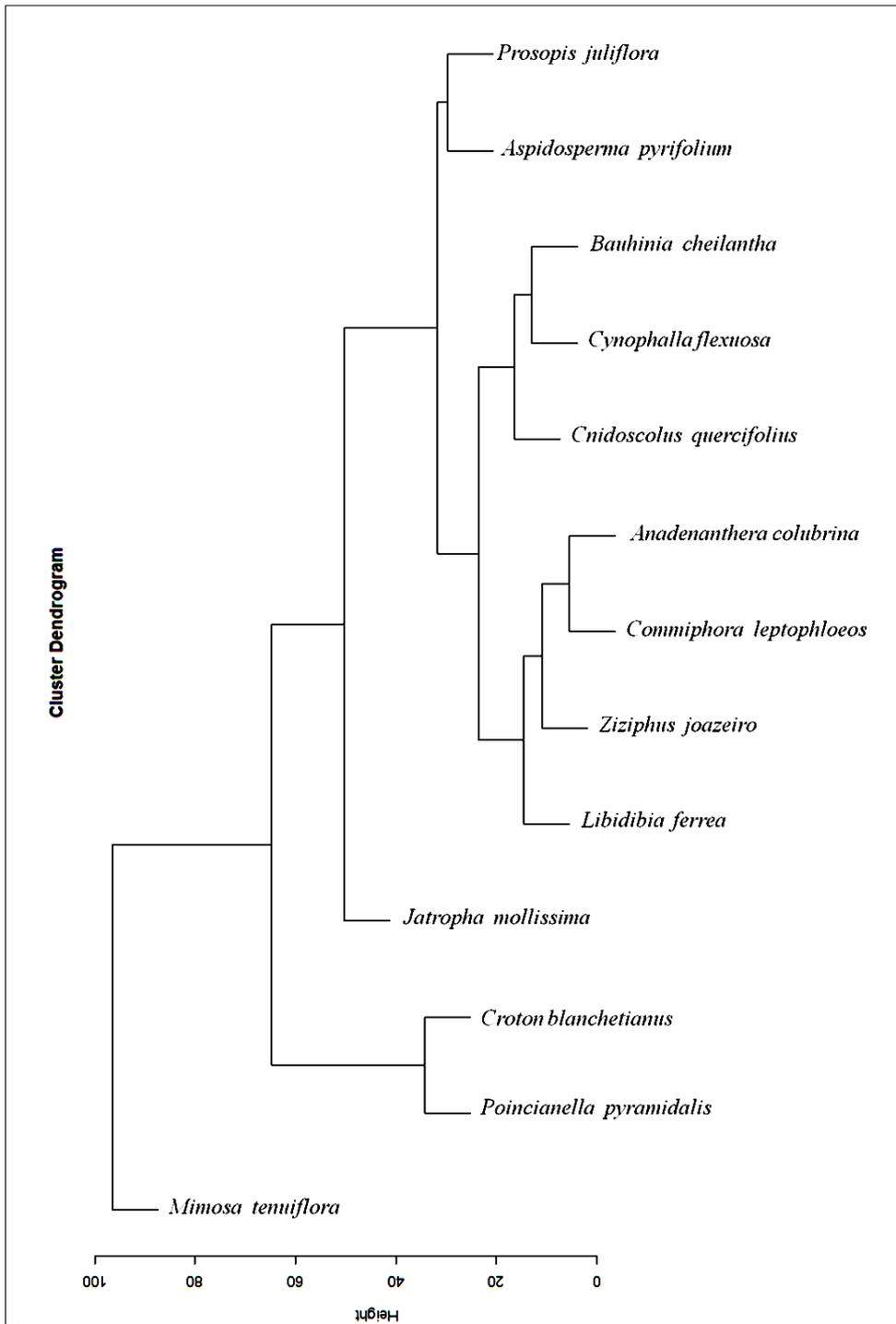
Silva *et al.* (2012) ao verificarem a regeneração natural em remanescente de Caatinga com diferentes históricos de uso no Agreste pernambucano, constataram que as duas áreas estudadas sofreram níveis de perturbações acentuados, fato que refletiu no elevado número de espécies colonizadoras e típicas de ambientes antropizados, como *C. blanchetianus* e *C. argyrophyllus*. Em adição, Cabral *et al.* (2013) avaliaram três diferentes estádios sucessionais de Caatinga, inicial, intermediário e tardio. Os autores observaram que *M. tenuiflora* foi o táxon dominante no estágio de sucessão inicial, e *P. pyramidalis*, *C. blanchetianus* e *M. tenuiflora* no estágio de sucessão intermediário, sendo o estágio tardio composto, principalmente, por *C. leptophloeos*, *C. blanchetianus* e *P. pyramidalis*, consideradas típicas de vegetação conservada. A partir da compreensão estabelecida por Cabral *et al.* (2013) é possível considerar o remanescente/fragmento em estudo como uma área em transição entre os estádios inicial e intermediário. A ampla dominância e abundância de *M. tenuiflora*, principalmente nas parcelas 6 a 14, em estágio de sucessão inicial, estão estabelecidas em área de regeneração após abandono. Em contrapartida, as demais parcelas podem ser vinculadas ao estágio intermediário, a exceção da parcela 20. Deste modo, o nível de degradação ocasiona diferenciações nos estádios entre o considerado remanescente e fragmento, tendo em vista as perturbações que refletem na maior diversidade nas parcelas mais conservadas.

A análise de agrupamento por número de indivíduos inventariados evidencia a construção de quatro clusters, onde a altura corresponde ao nível em que os indivíduos são considerados semelhantes pela quantidade amostrada (Figura 33). A dominância de *M. tenuiflora* condiciona a formação de um grupo separado, devido sua representatividade e abundância equivalente a 33,9% do total quantificado. Essa variável se configura como distinta das demais, pelo fato de ter formado um grupo isolado, sendo heterogênea em relação às outras. Um segundo agrupamento formado por *C. blanchetianus* e *P. pyramidalis* demonstra a correlação entre essas espécies, que equivalem a 17,73% do total amostral. O grupo estabelecido por *J. mollissima* demonstra sua representatividade de 17% da quantidade total de indivíduos identificados, sendo esta a segunda espécie de maior riqueza, configurando como destoante das demais. O quarto agrupamento é formado pelas espécies *L. ferrea*, *Z. joazeiro*, *C. leptophloeos*, *A. colubrina*, *B. cheilantha*, *C. flexuosa*, *C. quercifolius*, *C. flexuosa*, *C. quercifolius*, *A. pyriformis* e *P. juliflora*. Essa associação pode estar relacionada à semelhança no número de indivíduos quantificados nas parcelas em que ambos os táxons estavam presentes. Os clusters formados esclarecem os dados fitossociológicos, evidenciando as similaridades entre as espécies e, principalmente, suas convergências em determinadas parcelas torna-se fator influenciador para o agrupamento.

Os levantamentos florísticos para a Caatinga nordestina têm apresentado diferenciações quanto à quantidade de espécies e o número de indivíduos. Andrade-Lima (1981) ressalta que as Caatingas de áreas mais úmidas tendem a apresentar maior número de espécies. Em contrapartida, Rodal *et al.* (2008) destacam que não apenas o total pluviométrico deve ser determinante para uma maior diversidade, mas também devem-se considerar fatores como topografia, classe, profundidade e permeabilidade do solo. Maia (2012) salienta que as espécies lenhosas da Caatinga possuem necessidades ecológicas distintas, principalmente as consideradas de maior suscetibilidade.

Pereira *et al.* (2003) ressaltam que a riqueza florística é influenciada pelo uso prévio da área, com grande redução da diversidade de espécies quando o grau de antropização for elevado. Em consonância, Cabral *et al.* (2013) enfatizam que áreas de Caatinga em regeneração em estádios inicial e intermediário refletem o grau de perturbação anterior, sendo o processo de sucessão nestas áreas mais lento. O corte raso da vegetação, mesmo em intervalos de 20 a 40 anos, exercem influência na perda inicial da diversidade, com vegetação mais aberta, predominância de espécies pioneiras no processo de sucessão ecológica, parâmetros estruturais menores (PEREIRA *et al.*, 2003; CAVALCANTI *et al.*, 2009; SILVA *et al.*, 2012). Associado a isso, as alterações climáticas, com redução dos índices de precipitação e aumento dos períodos de seca, podem ser determinantes na distribuição populacional (HERWITZ e YOUNG, 1994). Tais fatos podem ser observados no remanescente/fragmento devido às possíveis alterações ocasionadas na área pela introdução da agricultura e criação de caprinos, bem como seu isolamento geográfico, dificultando o fluxo gênico. A ilha, atualmente, se configura como locus de agricultura irrigada, principalmente da fruticultura, com pequenas manchas de vegetação nativa isolada.

Figura 33 – Dendrograma do número de indivíduos identificados em remanescente/fragmento de Caatinga na ilha de Assunção, município de Cabrobó – PE.

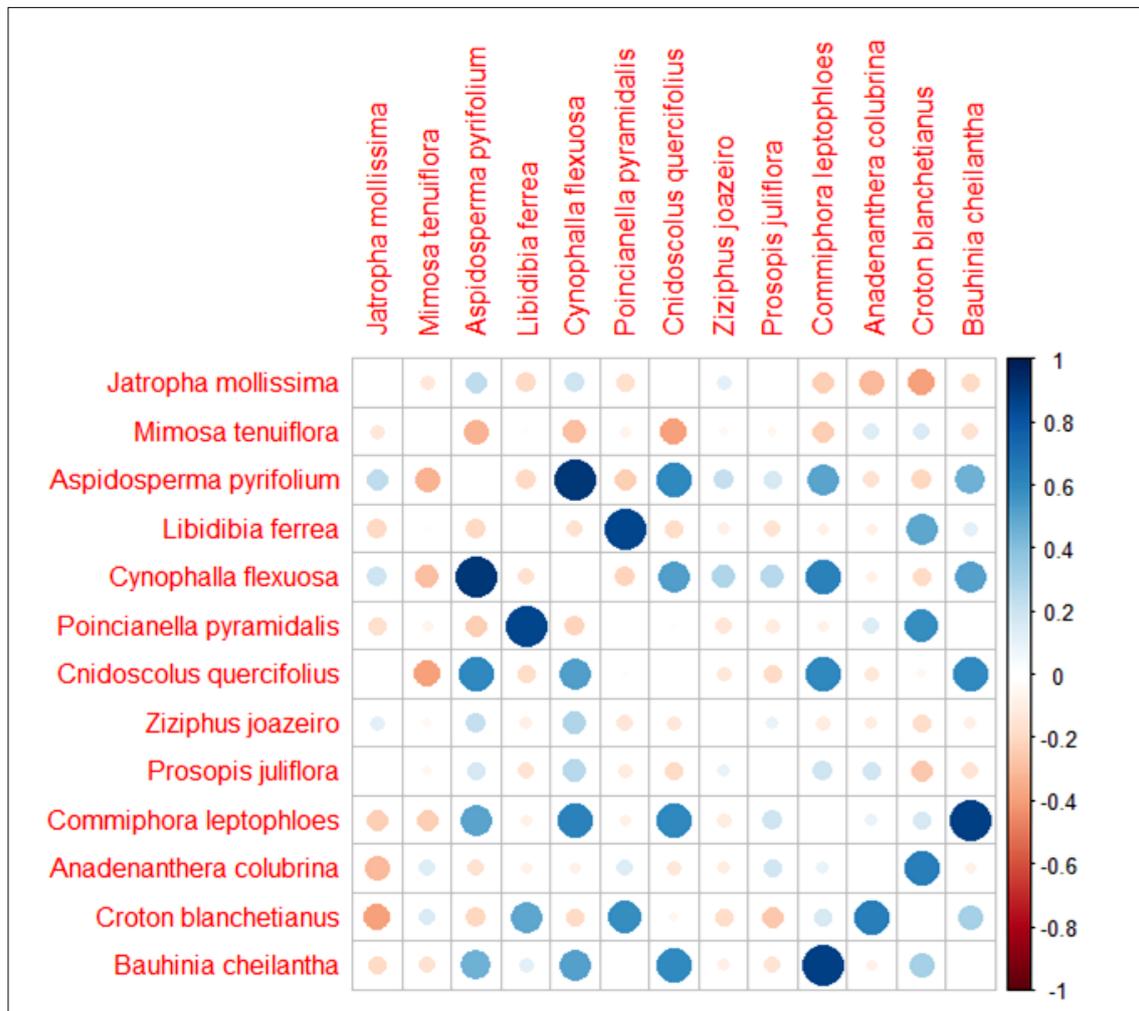


O agrupamento por similaridade entre as espécies identificadas no remanescente/fragmento permitiu observar as correlações positivas e negativas, ou seja, as relações de força existentes (Figura 34). Neste sentido, a partir da análise do correlograma se

verificam as correlações positivas fortes e semifortes entre as seguintes espécies: *A. pyriformis* ↔ *C. leptophloeos*; *A. pyriformis* ↔ *B. cheilantha*; *A. pyriformis* ↔ *C. quercifolius*; *A. pyriformis* ↔ *C. flexuosa*; *L. ferrea* ↔ *P. pyramidalis*; *L. ferrea* ↔ *C. blanchetianus*; *P. pyramidalis* ↔ *C. blanchetianus*; *A. colubrina* ↔ *C. blanchetianus*; *C. flexuosa* ↔ *C. blanchetianus*; *C. flexuosa* ↔ *C. leptophloeos*; *C. flexuosa* ↔ *B. cheilantha*; *C. flexuosa* ↔ *C. quercifolius*; *C. quercifolius* ↔ *C. leptophloeos*; *B. cheilantha* ↔ *C. quercifolius*; *B. cheilantha* ↔ *C. leptophloeos*. Dessa forma, evidencia-se que quando uma espécie tende a aumentar seu número, ou seja, sua diversidade, a outra tenderá a acompanhar esse crescimento. Em contrapartida foram constatadas correlações negativas semifortes entre as espécies: *M. tenuiflora* ↔ *A. pyriformis*; *M. tenuiflora* ↔ *C. quercifolius*; *M. tenuiflora* ↔ *C. flexuosa*; *J. mollissima* ↔ *C. blanchetianus*; *J. mollissima* ↔ *A. colubrina*.

As correlações negativas demonstram que quando uma espécie começa a elevar sua diversidade à outra tende a reduzir seu número. Essa análise ratifica os dados obtidos e o potencial de recolonização de áreas degradadas de *M. tenuiflora*, sendo essa uma das primeiras espécies lenhosas no processo de sucessão ecológica, possibilitando sequencialmente a propagação de outras menos resistentes a ambientes alterados. Sampaio *et al.* (1998) ressaltam que, possivelmente, com o aumento do intervalo de tempo no processo de regeneração a densidade relativa de *M. tenuiflora* tende a reduzir, porque o número de plantas de outras espécies cresce. Esse fato ratifica os dados obtidos, que demonstram um processo inicial de redução de *M. tenuiflora* em parcelas com maior riqueza florística. Destaca-se, ainda, o baixo grau de força das correlações negativas relacionadas, especificamente, as espécies que obtiveram o maior número de indivíduos de *M. tenuiflora* e *J. mollissima*. A presença de *M. tenuiflora*, *J. mollissima*, *C. blanchetianus* e *A. colubrina* como táxons que mantêm correlações seminegativas corrobora serem essas espécies pioneiras no processo de recolonização de áreas de Caatinga impactada, quando se trata de espécies lenhosas pertencentes a esse bioma.

Figura 34 – Correlograma das espécies identificadas em remanescente/fragmento de Caatinga na ilha de Assunção, município de Cabrobó – PE.



A análise do dendrograma (Figura 35) permite observar as correlações estabelecidas entre as espécies identificadas no levantamento de remanescente/fragmento na ilha de Assunção, município de Cabrobó. São formados dois macroclusters, sendo o primeiro formado por *M. tenuiflora*, *C. blanchetianus*, *P. pyramidalis*, *L. ferrea* e *A. colubrina*. Já o segundo macrocluster é composto por dois subcluster para o qual *P. juliflora*, *Z. joazeiro* e *J. mollissima* compõem um subcluster intermediário, e *A. pyrifolium*, *C. quercifolius*, *B. cheilantha*, *C. flexuosa* e *C. leptophloes* estabelecem um segundo subagrupamento.

Evidencia-se que as correlações mais significativas no dendrograma são geradas por *A. pyrifolium* e *C. flexuosa*, *B. cheilantha* e *C. leptophloes*, *P. pyramidalis* e *L. ferrea*, sendo superiores a 85% (Figura 35). Constatou-se a ratificação dos dados expressados pelo correlograma, onde as correlações fortes positivas e semifortes negativas são corroboradas.

A análise de correspondência (CA) representa no plano as distâncias entre as categorias-pontos (CPs) e podem ser interpretadas quanto a sua proximidade, traduzindo a dispersão das CPs sobre a dimensão correspondente, por meio dos quadrantes. Assim, é possível verificar o grau de significância das espécies inventariadas nas parcelas amostradas (Figura 36). Observou-se no plano cartesiano formado pela riqueza florística em cada parcela a distribuição dos agrupamentos. Ratificou-se a dominância e abundância de *M. tenuiflora*, que formou um agrupamento único. Essa espécie foi responsável por agrupar as parcelas 7, 8, 9, 11, 12, 13, 16 e 20, exercendo influência nas unidades amostrais 10 e 14 para as quais teve o maior número de indivíduos contabilizados.

As parcelas 1 e 6 caracterizam-se pela maior predominância de *J. mollissima*, em associação com *M. tenuiflora* e *A. pyrifolium*, esta última, apenas na parcela 1. No que tange a parcela 19, esta se configura com a presença mais equilibrada de *J. mollissima*, *M. tenuiflora*, *A. pyrifolium*, *C. flexuosa*, *P. juliflora* e *Z. joazeiro*. Constatou-se que *A. pyrifolium*, *C. quercifolius*, *C. flexuosa* e *C. leptophloeos* se agruparam em um único quadrante inferior oposto a *M. tenuiflora*, confirmando as correlações seminegativas (Figura 34) que propiciam a formação de um cluster conjunto (Figura 35). Essas espécies possuem convergência nas parcelas 2, 3, 4, 5, 17, 18 e 21, demonstrando a similaridade entre os táxons por suas correlações positivas fortes, configurando-se entres as parcelas com maior diversidade. Ressalta-se que, apesar de *B. cheilantha* na análise de CA ter sido inserida em um quadrante separado de *A. pyrifolium*, *C. quercifolius*, *C. flexuosa* e *C. leptophloeos*, o correlograma e o dendrograma de correlações apontam sua maior afinidade com essas espécies. É possível que essa intercalação tenha sido formada devido à presença de *B. cheilantha* nas parcelas 5 e 15, estando essa espécie mais próxima do eixo vertical de intersecção no plano cartesiano, havendo assim maior similitude com a parcela 5. Quando se observa o agrupamento de *C. blanchetianus*, *P. pyramidalis*, *A. colubrina* e *L. ferrea*, estas são capazes de congregar as parcelas 10 e 15. Esses táxons possuem similaridade, como demonstrado pelo dendrograma de correlações, com *M. tenuiflora*, evidenciado pela intersecção da parcela 10 no eixo horizontal.

Figura 35 – Dendrograma de correlações das espécies identificadas em remanescente/fragmento de Caatinga na ilha de Assunção, município de Cabrobó – PE.

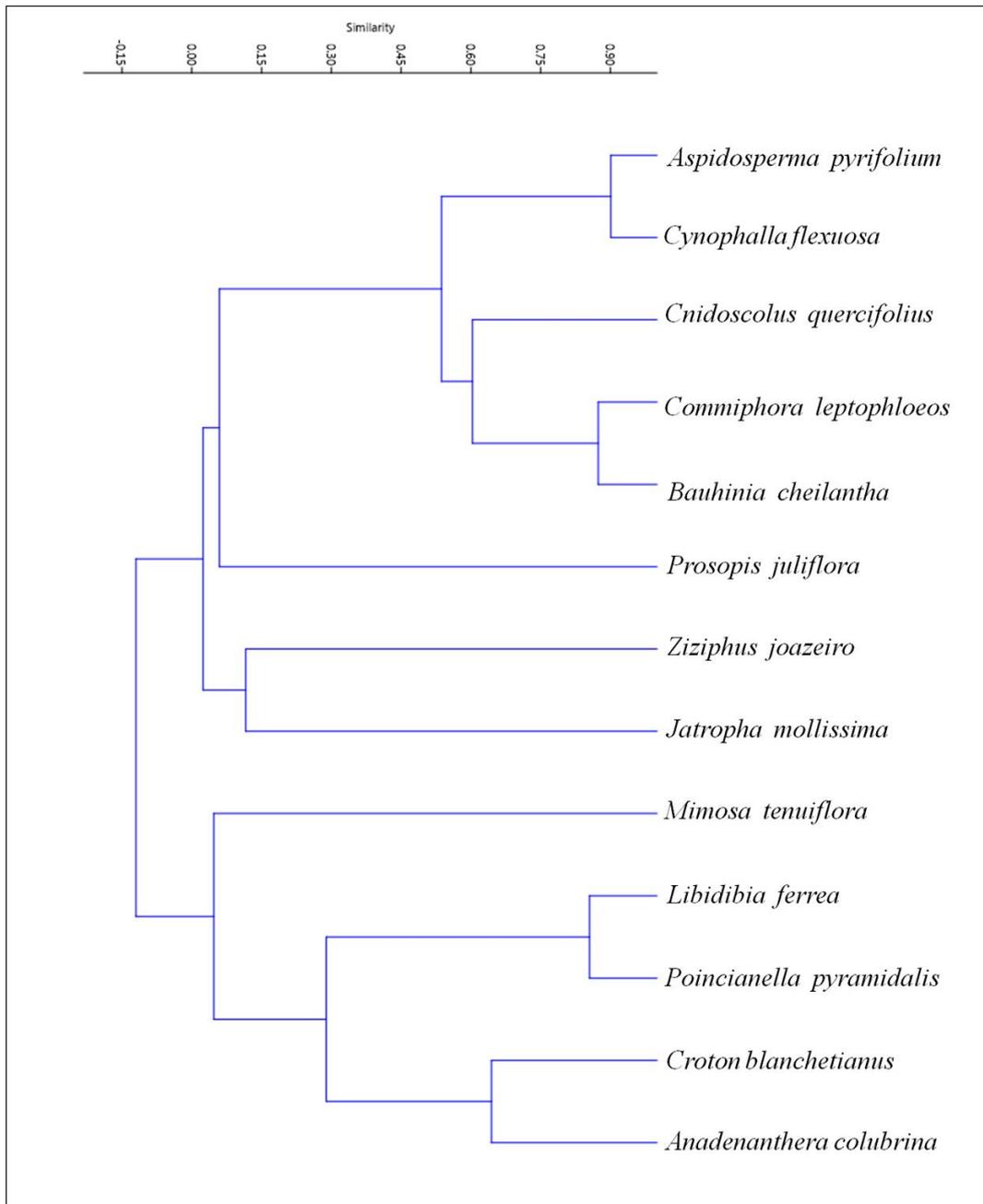
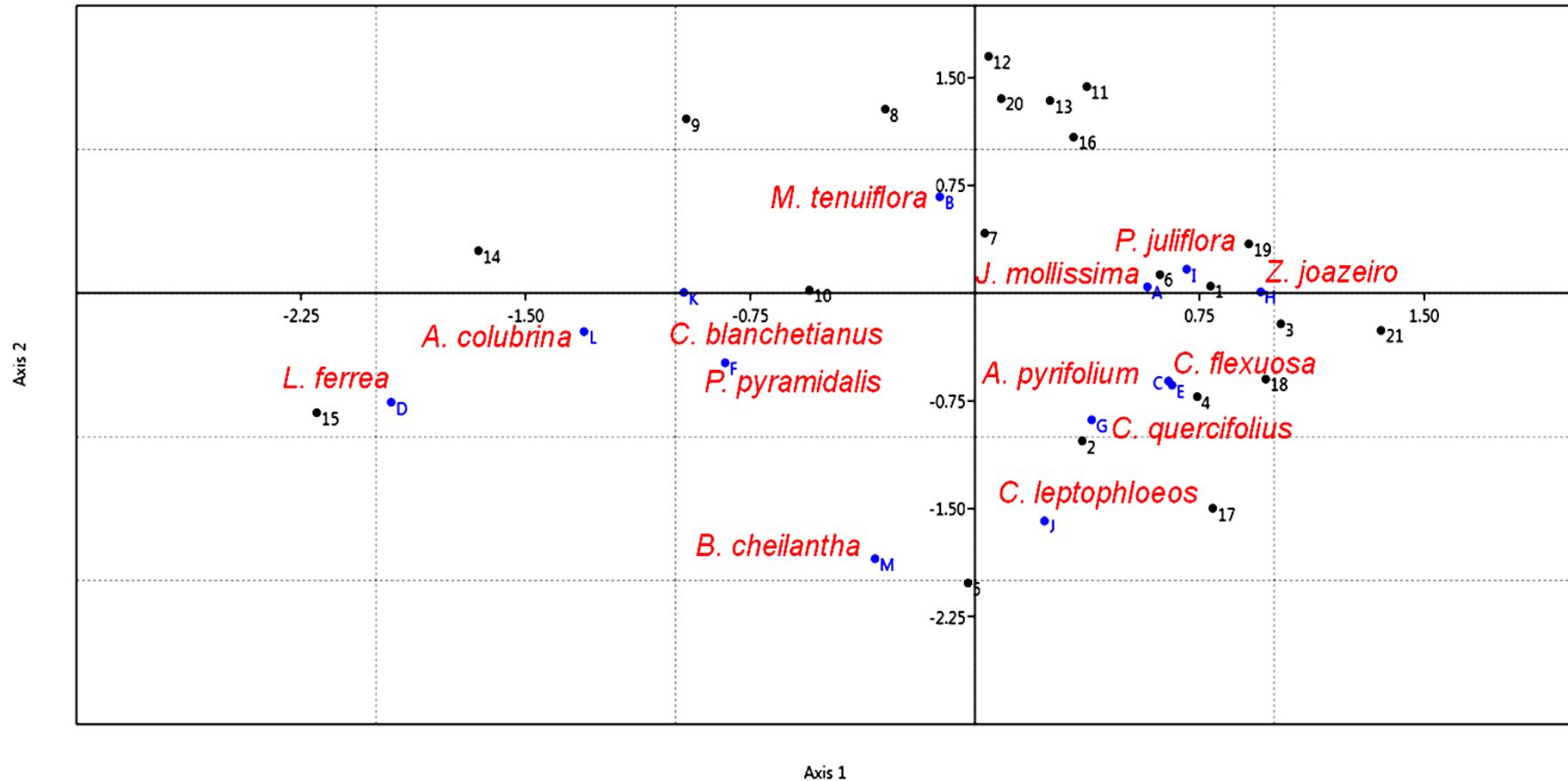


Figura 36 – Eixo de ordenação das espécies e parcelas produzido pela análise de correspondência, baseado na distribuição das espécies identificadas em 21 parcelas em remanescente/fragmento de Caatinga, na ilha de Assunção, município de Cabrobó – PE.



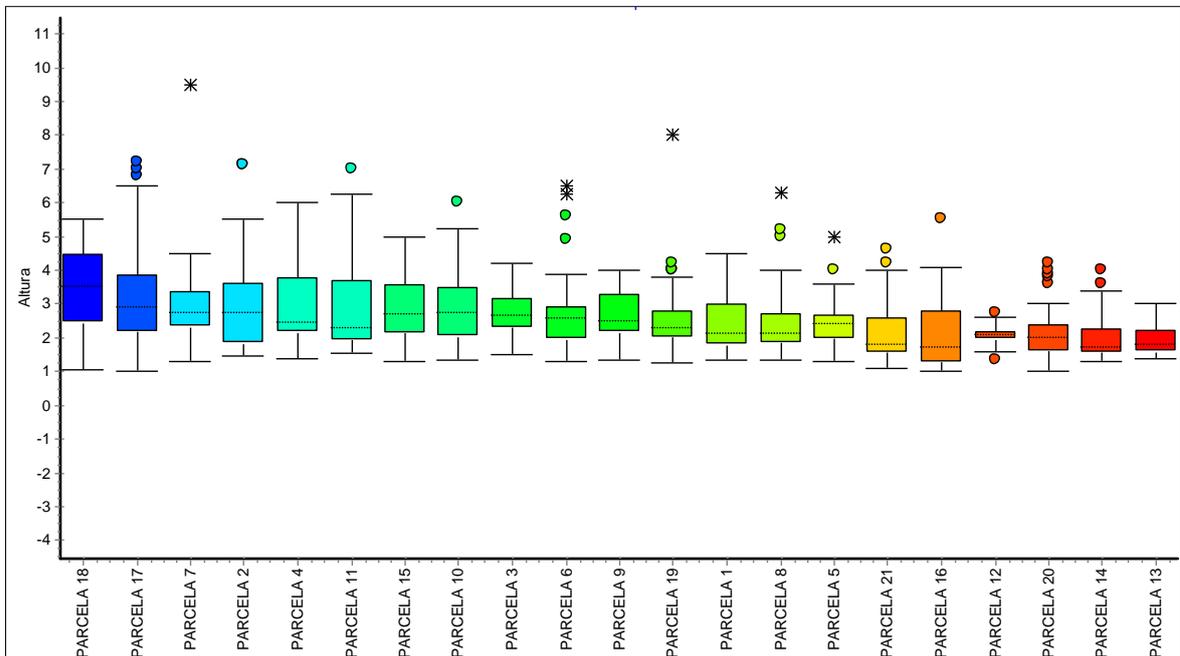
Legenda: Letras alfabéticas (A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M) referentes às 11 espécies identificadas e os numerais de 1 a 21 correspondem às parcelas inventariadas em remanescente/fragmento na ilha de Assunção, município de Cabrobó, Pernambuco.

A classificação estrutural dos indivíduos lenhosos do remanescente/fragmento da ilha de Assunção a partir da homogeneização evidencia que a altura dos indivíduos amostrados variou de 1 a 9,5 m (Figura 37), sendo o representante da maior altura indivíduo da espécie *M. tenuiflora* identificado na parcela 7. Constatou-se uma concentração de mais de 80% dos indivíduos no estrato arbustivo ($> 1,5$ m e < 3 m) (Tabela 10). Pereira *et al.* (2003) em avaliação da estrutura fisionômica de Caatinga no agreste paraibano observaram maior densidade de indivíduos no estrato de 3 a 5 m de altura. Entretanto, Rodal *et al.* (1998) destacam que a estrutura florística da Caatinga possui diversificações, de acordo com fatores edafoclimáticos, sendo admissível encontrar em ambientes de Caatinga mais úmida predomínio de classe de altura entre 1 e 2 m. Sampaio (2010) relatou que o porte vegetacional da Caatinga em habitats em processo de degradação e antropização tende a ser menor não ultrapassando 10 m. Em adição, Calixto Júnior e Drumond (2011) verificaram que a média da altura foi 3,8 m para uma área de Caatinga em regeneração após 30 anos de corte raso. É possível que o curto intervalo de tempo em que o remanescente/fragmento esteja em processo de regeneração seja fator influenciador na determinação de indivíduos de menor porte.

Evidenciou-se que as parcelas com maior altura média, 18 e 17, possuem classe de vegetação subarbórea (3,0 a 4,5 m) com valores superiores a 3,27 m de altura. Em oposição às parcelas 13 e 14, que apresentaram as menores alturas são enquadradas como arbustivas (1,5 a 3,0 m) com média de altura inferiores a 2 m (Tabela 11). Destaca-se que as parcelas 13 e 14 têm elevado número de indivíduos de *M. tenuiflora* de porte subarbustivo e arbustivo, associados em sua maioria com *J. mollissima* e *C. blanchetianus*, que apresentaram nessas parcelas porte subarbustivo. Tal fato pode estar relacionado às características morfológicas das espécies e por apresentarem indivíduos jovens. Em contrapartida, as parcelas 18 e 17 possuem pouca presença de *M. tenuiflora*, quantificadas em 18,6% e 2,7% respectivamente, do número amostral. Salienta-se, que as parcelas com maior altura média tiveram como espécies predominantes *A. pyrifolium* e *C. quercifolius*, possuindo estrato vegetacional superior a 3 m. A altura média verificada das parcelas inventariadas foi 2,68 m, o que configura como um estrato arbustivo, segundo com classificação de Chaves *et al.* (2008). Deste modo, é possível afirmar que o remanescente/fragmento apresenta a maioria dos seus indivíduos de pequeno porte, com altura inferior a cinco metros, principalmente pela existência de indivíduos jovens intercalado com exemplares adultos em estrato subarbóreo e arbóreo. Considera-se que o porte mais reduzido pode estar associado à dominância de *M. tenuiflora* e *J. mollissima* formada por indivíduos jovens, em sua maioria principalmente de *M. tenuiflora*. Maia (2012) ressalta que esses táxons possuem como característica altura

variando de 5 a 7 m e 1 a 3 m, respectivamente. Essa feição ratifica as diferenciações entre as áreas e a transição do estágio inicial para o secundário.

Figura 37 – Ordenamento da altura média por parcela dos indivíduos lenhosos inventariados em remanescente/fragmento na ilha de Assunção, município de Cabrobó – PE.

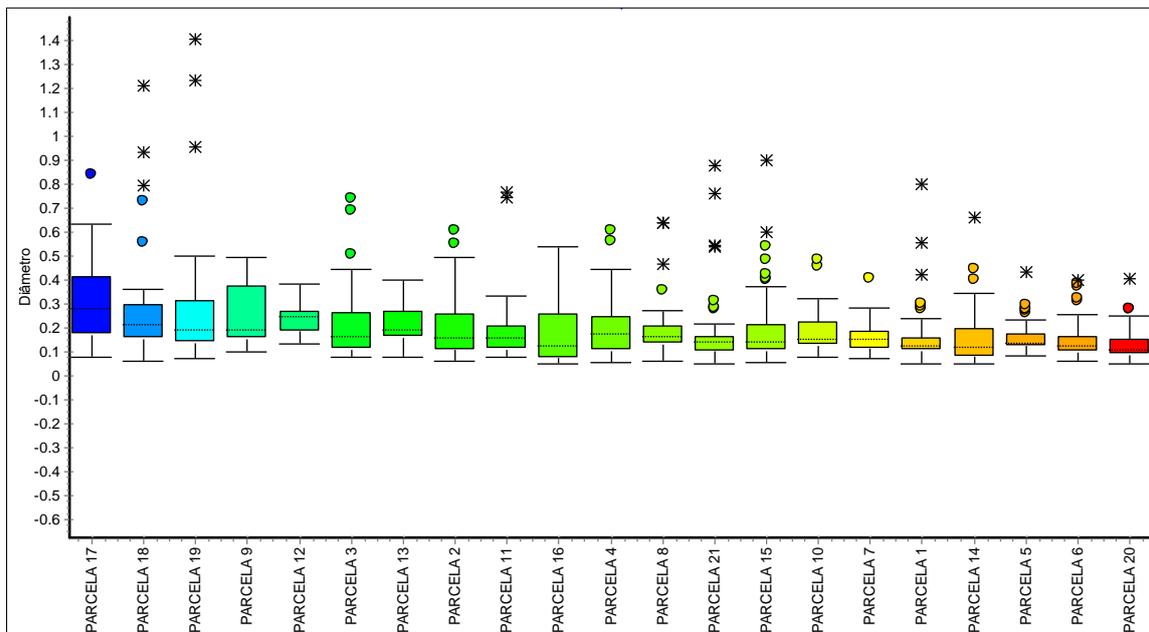


Legenda: Altura medida em metros (m).

A distribuição do diâmetro dos indivíduos demonstrou confluência entre os dados de altura média e classe de vegetação subarbórea, tendo em vista que as parcelas 17 e 18 foram as que obtiveram os maiores diâmetros médios com 26 e 18 cm, respectivamente (Figura 38). A predominância de *A. pyrifolium*, *C. quercifolius* e *P. pyramidalis* nessas parcelas foi fator determinante para a elevada média de diâmetro. Esses valores de diâmetro são evidenciados em áreas de Caatinga mais conservada com indivíduos adultos. Evidenciou-se que as parcelas 20, 6 e 5 apresentaram os menores valores de circunferência do caule ao nível do solo. Esse fato comprova que, mesmo sendo parcelas com elevada diversidade de espécies, essas se configuram com a presença de indivíduos jovens e arbustivos. O diâmetro médio observado no remanescente/fragmento foi 12 cm, confirmado por Alcofrado-Filho *et al.* (2003) ser essa média diamétrica uma das mais representativas de área típica de VCE, sendo superior a média de área de refúgio de Caatinga arbustiva perenifólia 5,1 cm (RODAL, *et al.*, 1998), de regeneração após 30 anos de corte raso 6,7 cm (CALIXTO JÚNIOR e DRUMOND, 2011) e de níveis diferentes de sucessão ecológica (primária e secundária) com maioria dos indivíduos

na classe de 3 a 6 cm (CALIXTO JÚNIOR e DRUMOND, 2014). O remanescente/fragmento pode ser caracterizado por formações arbustivas, aberta e rala, com porte reduzido e caule ao nível do solo bem desenvolvido, sendo típico de vegetação em regeneração, que entremeia indivíduos jovens e antigos.

Figura 38 – Ordenamento do diâmetro médio por parcela dos indivíduos lenhosos inventariados em remanescente/fragmento na ilha de Assunção, município de Cabrobó – PE.



Legenda: Diâmetro medido em centímetros (cm), exposto no gráfico em decímetros (dm).

Constatou-se que a média do IBVL foi 0,3, se caracterizando como uma vegetação rala (>20 e <40%) com reduzido recobrimento do solo (Tabela 11). As áreas com fisionomia mais rala são encontradas nas parcelas próximas às residências dos moradores, mais distantes do rio São Francisco e com solo composto por muitos seixos. Esse fato condiciona a maior susceptibilidade à erosão pela exposição do solo, o que pode levar a perda de sua fertilidade. Ressalta-se que foram constatadas parcelas com elevado índice de recobrimento formando por uma vegetação densa com presença de indivíduos subarbóreos e arbóreos.

A classificação da vegetação quanto ao Grupo foi considerada subarbóreo para as parcelas 2, 7, 17 e 18, e arbustivo nas demais parcelas. Já a classificação ao nível classe condicionou a formação de seis agrupamentos categóricos: a) Vegetação Arbustiva Subarbustiva (parcela 12); b) Vegetação Arbustiva Subarbustiva Subarbórea (parcelas 13, 14, 16 e 20); c) Vegetação Arbustiva Subarbórea Subarbustiva (parcelas 1, 5, 8, 9, 19 e 21); d) Vegetação Arbustiva Subarbórea (parcelas 3 e 15); e) Vegetação Arbustiva Subarbórea

Arbórea (parcelas 2, 4, 6, 7, 10, 11 e 17); f) Vegetação Subarbórea Arbustiva Arbórea (parcela 18) (Tabela 11). A fitofisionomia do remanescente/fragmento se caracteriza, predominantemente, por uma vegetação arbustiva subarbórea com feições subarbustivas e arbóreas como classificação dominante, sendo composta por uma subclasse rala e indivíduos são em sua maioria caducifólios.

Tabela 11 – Classificação estrutural dos indivíduos lenhosos inventariados por parcela em área de remanescente/fragmento de Caatinga na ilha de Assunção, Cabrobó – PE.

Parcelas	Nº de ind.	Altura média (m)	Diâmetro médio (cm)	Classe de vegetação quanto ao Grupo	Classe de vegetação quanto a Classe	Ip	Ir	IBVL
Parcela 1	51	2,47	10	Arbustivo	Arbustiva Subarbórea Subarbustiva	0,5	0,8	0,4
Parcela 2	40	3,06	13	Subarbóreo	Arbustiva Subarbórea Arbórea	0,75	0,8	0,6
Parcela 3	37	2,73	13,5	Arbustivo	Arbustiva Subarbórea	0,5	0,8	0,4
Parcela 4	43	2,93	12,5	Arbustivo	Arbustiva Subarbórea Arbórea	0,5	0,8	0,4
Parcela 5	73	2,38	11	Arbustivo	Arbustiva Subarbórea Subarbustiva	0,5	0,8	0,4
Parcelas	Nº de ind.	Altura média (m)	Diâmetro médio (cm)	Classe de vegetação quanto ao Grupo	Classe de vegetação quanto a Classe	Ip	Ir	IBVL
Parcela 6	49	2,70	10	Arbustivo	Arbustiva Subarbórea Arbórea	0,5	0,6	0,3

Parcela 7	26	3,06	13	Subarbóreo	Arbustiva Subarbórea Arbórea	0,75	0,6	0,45
Parcela 8	50	2,43	13	Arbustivo	Arbustiva Subarbórea Subarbustiva	0,5	0,6	0,3
Parcela 9	26	2,68	14,5	Arbustivo	Arbustiva Subarbórea Subarbustiva	0,5	0,4	0,2
Parcela 10	54	2,82	12	Arbustivo	Arbustiva Subarbórea Arbórea	0,5	0,6	0,3
Parcela 11	23	2,93	12	Arbustivo	Arbustiva Subarbórea Arbórea	0,5	0,4	0,2
Parcela 12	11	2,05	16	Arbustivo	Arbustiva Subarbustiva	0,5	0,4	0,2
Parcela 13	18	1,94	16	Arbustivo	Arbustiva Subarbustiva Subarbórea	0,5	0,4	0,2
Parcela 14	77	1,99	10	Arbustivo	Arbustiva Subarbustiva Subarbórea	0,5	0,6	0,3
Parcela 15	80	2,83	11,83	Arbustivo	Arbustiva Subarbórea	0,5	0,6	0,3
Parcelas	Nº de ind.	Altura média (m)	Diâmetro médio (cm)	Classe de vegetação quanto ao Grupo	Classe de vegetação quanto a Classe	Ip	Ir	IBVL
Parcela 16	32	2,13	10	Arbustivo	Arbustiva Subarbustiva Subarbórea	0,5	0,4	0,2

Parcela 17	37	3,27	26	Subarbóreo	Arbustiva Subarbórea Arbórea	0,75	0,8	0,6
Parcela 18	43	3,37	18	Subarbóreo	Subarbórea Arbustiva Arbórea	0,75	0,8	0,6
Parcela 19	67	2,55	17	Arbustivo	Arbustiva Subarbórea Subarbustiva	0,5	0,6	0,3
Parcela 20	85	2,04	9	Arbustivo	Arbustiva Subarbustiva Subarbórea	0,5	0,6	0,3
Parcela 21	40	2,24	11,5	Arbustivo	Arbustiva Subarbórea Subarbustiva	0,5	0,6	0,3

Legenda: Índice de porte (Ip); Índice de recobrimento (Ir); Índice de biomassa lenhosa (IBVL).

O remanescente/fragmento analisado se configura como locus formado por lenhas nativas e exóticas, em grande parte é composta por espécies pioneiras, em processo de sucessão ecológica primária e secundária cercado por áreas de agricultura. A diminuição do bioma Caatinga acarreta em sérios danos à biodiversidade local com modificações na paisagem e no habitat, gerando desequilíbrios ambientais que alteram as características da biota (CHAPIN *et al.*, 2000). A vegetação institui a existência de um microclima, influencia na erosão por meio da deposição de resíduos orgânicos, da consolidação de partículas do solo, da regulação da estrutura hídrica e implica na qualidade dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo (VASCONCELOS SOBRINHO, 1983). Áreas em que houve o corte raso, queimada e/ou abandonadas após agricultura possuem um processo de regeneração mais lento, principalmente quando condicionada por cultivo agrícola. Esse fato está associado a uma possível redução da fertilidade natural, caso não tenha havido adubação, retirada de nutrientes pelas culturas, diminuição do teor de matéria orgânica e maior susceptibilidade à erosão (SAMPAIO *et al.*, 1998), e salinização, através do uso intensivo e excessivo de água.

A elevação do conteúdo de sais solúveis no solo influencia no comportamento das culturas de diversas maneiras. Algumas espécies são mais tolerantes e se adaptam a ambientes com solos com elevado grau de sais dissolvidos. Áreas afetadas por sais, geralmente

decorrentes de uma irrigação inadequada, têm mudanças nas proporções de sódio trocável, na reação dos solos, nas suas propriedades físicas, no potencial osmótico da sua solução e, efeitos tóxicos de íons específicos. Essas modificações influenciam na atividade das raízes das plantas e nos microrganismos do solo, conseqüentemente na produtividade das culturas (MEDEIROS *et al.*, 2010)

Áreas degradadas, seja por fator natural ou antropogênico, relacionado ao manejo agrícola, como no caso da ilha de Assunção, ocasionam alterações que modificam a estrutura geográfica e as interações dos elementos da paisagem. Neste sentido, a natureza busca, diante certo intervalo de tempo, regular-se a si mesma e tende a recuperar o equilíbrio perturbado mediante a regeneração da vegetação e, como consequência, também dos demais fatores a ela interligados. Por isso, é importante conhecer a capacidade de regeneração da vegetação nativa para o estabelecimento de um manejo sustentável a longo prazo.

4.3 BIORREMEDIAÇÃO DE NEOSSOLO FLÚVICO SALINIZADO PELAS SUBSTÂNCIAS ORGÂNICAS DO LÍQUEN *CLADONIA SUBSTELLATA*

A utilização de técnicas de irrigação inadequadas em solos com tendência a sodicidade e salinidade faz parte de um elenco de fatores que condicionam o processo de salinização. Dependendo da quantidade de água, do método utilizado para a irrigação e da evapotranspiração da região, o solo pode se tornar salinizado (AGUIAR NETTO *et al.*, 2007). Estes fatores, acrescidos das características físico-climáticas do semiárido nordestino, incorrem na susceptibilidade desses solos à salinização e relaciona-se aos sais neles encontrados, que são transportados por capilaridade para sua superfície, e condições imperfeitas de drenagem (BASTOS, 2004). Em adição, a presença de camadas impermeáveis e elevada evapotranspiração contribuem para o aumento da concentração de sais solúveis na solução do solo (salinidade) e/ou o aumento da porcentagem de sódio trocável (sodicidade) (RIBEIRO, 2010b). Reis (1996) ressalta que as atividades antropogênicas exercem influência no processo de erosão do solo do semiárido, devido ao uso agrícola, não considerando sua capacidade de suporte, por meio de métodos de cultivo impróprios.

A salinização é o processo pelo qual a concentração de sais dissolvidos na água e no solo é maior devido a processos naturais ou induzidos pelo homem (SALAMA *et al.*, 1999). O problema da salinização ocorre com mais frequência em regiões áridas e semiáridas, devido às características físico-ambientais da região, baixa drenagem e solos rasos. Santos *et al.* (2010) afirmam que devido aos solos das regiões áridas e semiáridas possuírem baixo conteúdo de água, os minerais primários e secundários sofrem um processo de decomposição química, com reações de hidrólise, hidratação, carbonatação e oxirredução, restringidas a um curto período de tempo, com a liberação de poucos eletrólitos para a solução solo. Em contrapartida, ao longo do tempo, há acumulações periódicas de cátions e ânions, que tendem a precipitar-se devido ao grande índice de evapotranspiração.

Os solos afetados por sais têm sua classificação baseada na concentração de sais solúveis do extrato da solução do solo, na porcentagem de sódio trocável e no valor de pH. Os solos salinos são aqueles em que o crescimento das plantas é limitado pela grande quantidade de sais solúveis. São caracterizados por uma condutividade elétrica superior a 4 dS m^{-1} e o percentual de sódio trocável (PST) menor que 15%, com pH inferior a 8,5. Os solos salino-sódicos apresentam condutividade elétrica (CE) maior que 4 dS m^{-1} e PST superior a 15%, enquanto o pH se situa em torno de 8,5. A limitação deste tipo de solo à produção vegetal está relacionada ao efeito conjunto de concentração excessiva de sais solúveis e de sódio trocável.

Neste tipo de solo, ocorre a lixiviação mais intensa dos sais solúveis que do sódio trocável, transformando-o em solo sódico. Os solos sódicos têm CE inferior a 4 dS m^{-1} , PST maior que 15%, e, geralmente pH superior a 8,5 (EMBRAPA, 2013).

Andrade-Lima (1972) salienta que na constituição dos solos, existe um aspecto que merece ênfase, a presença de elevadas quantidades de sais no solo, especificamente o cloreto de sódio, pois é um sal de difícil metabolização pelos vegetais, como também sulfatos, carbonatos, cloretos e bicarbonatos (SANTOS *et al.*, 2010). O aumento da concentração de sais solúveis no solo prejudica o crescimento das plantas devido ao aumento da tensão osmótica da solução do solo, que reduz a absorção de água pelas plantas, da acumulação de quantidades tóxicas de vários íons e de distúrbios no seu balanço (HENRY e JOHNSON, 1977; CHHABRA, 1996). A saturação do complexo de troca pelo Na^+ implica em condições altamente desfavoráveis ao crescimento vegetal através de distúrbios nutricionais (USSL STAFF, 1954; RIBEIRO, 2010b).

No município de Cabrobó, especificamente na ilha de Assunção, o tipo de irrigação mais frequente é por inundação e sulcos, e ambos formam uma lâmina constante de água que cobre parte do caule da planta cultivada. Este tipo de irrigação pode ser por gravidade ou bombeamento, o excesso de água deixa o solo alagado, dissolvendo os sais existentes. Com a evaporação da água, os sais são elevados para os horizontes mais superficiais (BERNARDO, 1995). Esta técnica é utilizada principalmente nos cultivos de arroz, cebola e em fruticulturas, para as quais tem sido empregada a irrigação por aspersão e microaspersão. Esses tipos de irrigação são fatores condicionantes para a salinização, que tem como consequência a inibição da germinação de sementes e causa prejuízos ao desenvolvimento vegetativo das plantas sensíveis à salinidade, reduzindo sua produtividade e, em casos mais intensos, levam as plantas à morte. Dias e Blanco (2010) expõem que dependendo do grau de salinidade, a planta, em vez de absorver, poderá até perder a água que se encontra no seu interior.

A aplicação de técnicas de recuperação de solos com elevadas concentrações de sais tende a ser um fator essencial em ambiente semiárido, em que o manejo inadequado e a utilização de técnicas de irrigação mal supervisionadas têm tornado extensas áreas inutilizadas para o cultivo. Essas áreas quando utilizadas de forma intensiva durante intervalo de tempo curto a médio, tendem à diminuição da fertilidade e da produção e, conseqüentemente, a um processo de salinização do solo e seu abandono pelos agricultores. Nesse contexto, estudos que vislumbrem formas alternativas e de fácil aplicação pelos agricultores permitem que áreas antes inutilizadas possam, novamente, se tornarem aptas para uso de culturas agrícolas. Dentre as técnicas empregadas está a biorremediação, que permite a biodegradação natural

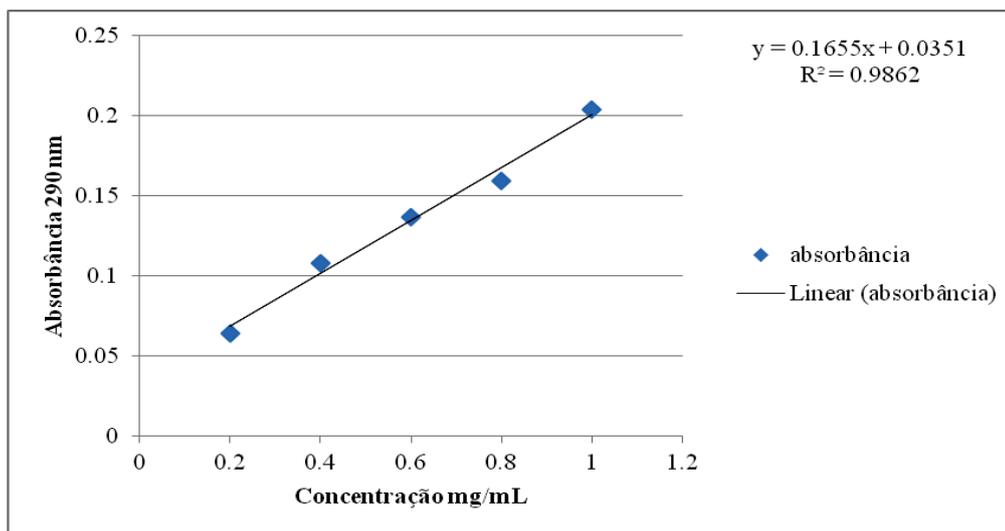
por meio da otimização das condições de aeração, adição de nutrientes, controle de pH e temperatura (MARGESIN *et al.*, 2000; NORRIS, 1994; ATLAS e BARTHA, 1992; MORGAN e WATKINSON, 1989). Silva (2014) fez uso da proposta de biorremediação com a aplicação de talos do líquen *C. verticillaris* como agente no processo de recuperação da fertilidade de Luvisolos degradados pela salinização. Foi constatado que, neste estudo, as substâncias produzidas pela espécie não são capazes de reduzir teores de sódio, porém são eficazes no melhoramento dos níveis de cálcio e magnésio neste tipo de solo. O estudo do uso de líquens e/ou seu extrato orgânico tem permitido entender o comportamento e a capacidade desses organismos em biorremediar solos degradados pela salinização, a partir da quelação. Ascaso e Galvan (1976) já expressavam a importância dos líquens na alteração química de rochas e solo, formando complexos com cátions do solo, sendo capazes de dissolver SiO_2 , como o ácido oxálico. Barbosa (2014) demonstrou que o ácido oxálico comercial e o ácido úsnico exerceram quelação sobre minerais de rochas ígneas, já em intervalo de seis meses em ensaios laboratoriais, destacando os íons de Ca, Fe, K, Mg e Si como os mais susceptíveis ao processo.

Nesse contexto, estudos desenvolvidos com o uso de líquens e suas substâncias orgânicas como agentes de remediação da salinidade de solos do semiárido nordestino têm demonstrado eficiência para melhoramento das propriedades químicas, com redução da sodicidade e aumento de Ca, Mg, K, P (SILVA, 2014; LIMA, 2017; PINA, 2017). Esse fato está relacionado à capacidade de interação dos líquens na formação de solos e sucessão ecológica, com a liberação de substâncias para o substrato, provocando desde a pedogênese (NASH III, 2003), a partir da formação de quelatos, possibilitando uma recombinação química dos íons contidos em rochas ou solos (JONES, 1988), à modificação na composição e fertilidade de solos a eles subjacentes, ou interferindo em sua biota (SILVA, 2014), em que a retenção das substâncias no talo estaria relacionada ao déficit hídrico e sua maior liberação aos períodos de precipitação (VASCONCELOS, 2013). Assim, tendo por base a aplicação de técnicas de redução dos níveis de sódio em solo salinizados pelo manejo agrícola, fez-se uso do líquen *C. substellata* ou seu extrato etéreo em associação ou não com adubo orgânico, além da utilização da radiação gama, na tentativa de biorremediar Neossolo Flúvico degradado pela salinização na ilha de Assunção, município de Cabrobó, Pernambuco. Os resultados obtidos foram separados de acordo com a ordem de execução dos experimentos montados.

Para definirem-se parâmetros para os experimentos em laboratório, com base no USN puro, fez-se uma curva analítica para quantificação do ácido úsnico produzido pela espécie,

bem como este produto percolado para o substrato subjacente, ou este ácido contido no extrato etéreo, quando incorporado ao solo (Gráfico 2). A partir de talos de *C. substellata*, após coleta de campo, quantificou-se o ácido úsnico produzido pela espécie para ser utilizado como controle de campo e padrão de referência comparativa para os experimentos desenvolvidos 1,6 mg/mL.

Gráfico 2 – Curva analítica do ácido úsnico puro de *Cladonia substellata*.



O experimento 1, que correspondeu ao uso da radiação gama no talo liquênico ou no solo ou em ambos, foi dividido em três tratamentos e um controle de laboratório. Foi constatada uma baixa produção fenólica de *C. substellata*, quando comparado ao controle de campo, mesmo talo e/ou solo submetidos à fonte de radiação gama (Gráfico 3). Destaca-se que nos dois primeiros meses foram verificadas as maiores concentrações de USN, quando correlacionado aos demais intervalos de coleta, e sequencial redução. Silva *et al.* (2010) demonstraram, em experimentos com *C. substellata* e diferentes doses de radiação gama, que essa fonte radioativa ocasiona um aumento da principal substância produzida pela espécie até os três primeiros meses, principalmente em dose mais baixas até o limite de 10 Gy. Esse fato pode estar atrelado à morfologia dos líquens, que confere enorme resistência devido à proteção do córtex superior, formada por uma camada de hifas, associada à cristalização de suas substâncias fenólicas que sobre elas se depositam, tanto ao nível cortical quanto medular (HALE, 1983; SEAWARD, 1977). Isso confere aos líquens a capacidade de adaptação às adversidades, visto os cristais funcionarem como fotorreceptores e/ou fotoindutores, de caráter seletivo da radiação que lhe seja conveniente (NASH, 2003; PEREIRA, 1998).

Apesar de ter havido um aumento na concentração de USN aos 30 e 60 dias, em tratamentos em que líquen ou solo foram irradiados separadamente, esse comportamento também foi seguido pelo controle de laboratório, demonstrando que, talvez, a radiação não tenha sido o principal fator da elevação dos teores de ácido úsnico. É possível que a dupla dose de radiação gama, em que solo e talo foram irradiados, tenha ocasionado um bloqueio na síntese do líquen. Silva (2014), ao expor talos de *C. verticillaris* e Luvisolo salinizado a fonte de radiação gama na dose de 5 Gy, verificou que houve interferências na biossíntese do líquen apresentando variações nas concentrações do ácido fumarprotocetrárico, principal fenol da espécie. Erbisch (1974) ratifica a existência de efeitos tardios sobre espécies de líquens submetidos a doses de radiação gama, que podem ser agudos ou crônicos, a depender da dosagem utilizada. Tais efeitos estão relacionados ao acúmulo da radiação no interior do talo do líquen observado sobre *Cladonia sylvatica* e *C. verticillata*.

Os líquens têm a capacidade de assimilação de elementos dispersos tanto na atmosfera quanto volatilizados do substrato. A captação de cátions é um processo rápido, passivo e físico-químico que ocorre por meio da membrana extracelular dos líquens (NIEBOER *et al.*, 1978), ou na parte intracelular (BRONW e BRONW, 1991). Esse processo leva o líquen a uma rápida saturação e a capacidade de retenção dos cátions dentro da parede celular, dependendo da espécie, é estimada entre 6 e 77 $\mu\text{mol.g}^{-1}$ (NASH, 1989). Além de capturar elementos existentes em seu local de origem, sejam eles minerais do solo, poluentes atmosféricos ou rejeitos de fertilizantes, podem ficar retidos no talo liquênico, acarretando danos à fisiologia da espécie (VASCONCELOS, 2013; VASCONCELOS *et al.*, 2013).

Para uma visão em conjunto da atividade do talo e solo com ou sem radiação, construiu-se dendrograma do experimento 1, onde constatou-se, a formação de três clusters, com agrupamento de T-1.1 e T-1.2, e T-1.4 formando um cluster secundário (Figura 39). Evidencia-se que T-1.3, em que dupla dose de radiação foi utilizada, mostrou pouca similaridade com os demais tratamentos, ficando em um cluster isolado. Esses dados confirmam a leitura interpretativa das concentrações de fenóis produzidos por *C. substellata*, em que T-1.1 e T-1.2 possuem significância de correlações, sendo apenas divergentes estatisticamente aos 120 dias de experimento. Verificou-se que T-1.3 foi o tratamento que demonstrou maiores oscilações nas concentrações de USN, com diminuição expressiva aos 90 dias nas quantidades desse fenol.

Gráfico 3 – Concentração de ácido úsnico em talos de *Cladonia substellata* sobreposto a Neossolo Flúvico em diferentes tratamentos submetidos ou não à irradiação gama.

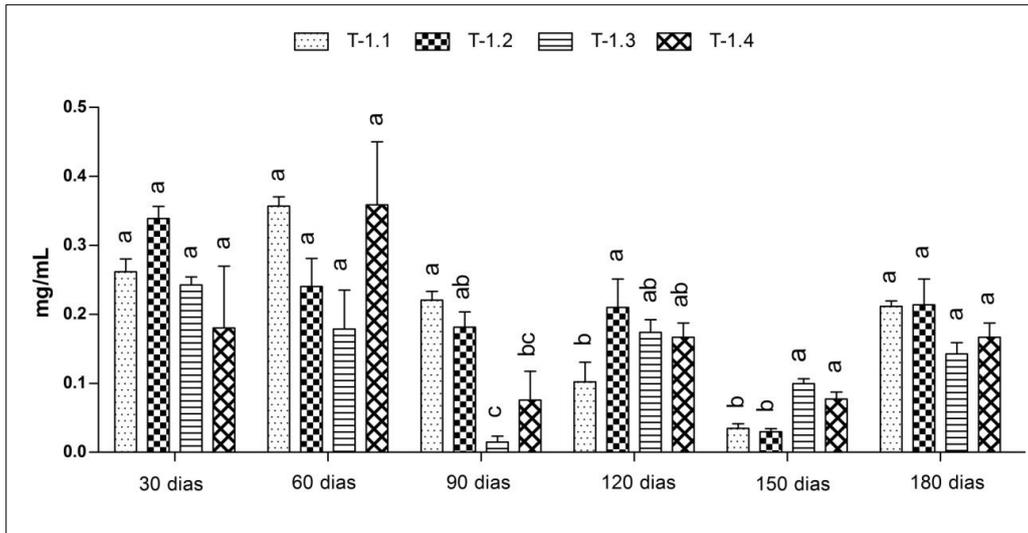
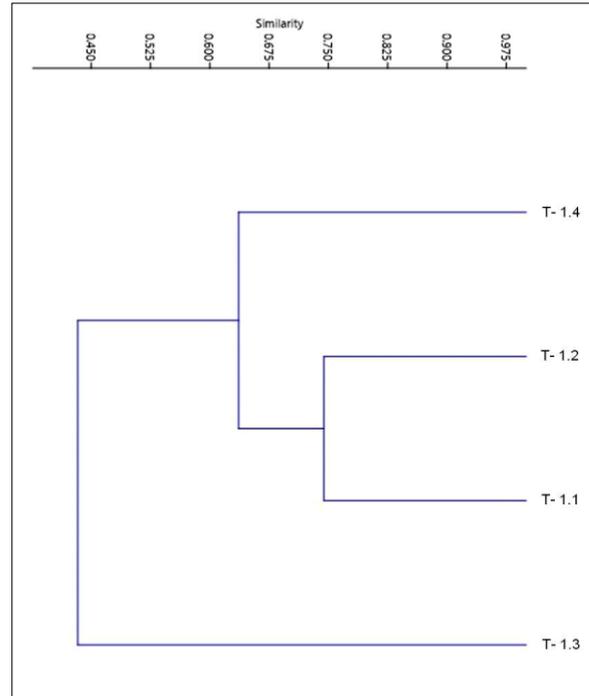


Figura 39 – Dendrograma de correlações da concentração de ácido úsnico de talos de *Cladonia substellata* sobreposta a Neossolo Flúvico em diferentes tratamentos submetidos ou não a irradiação gama.



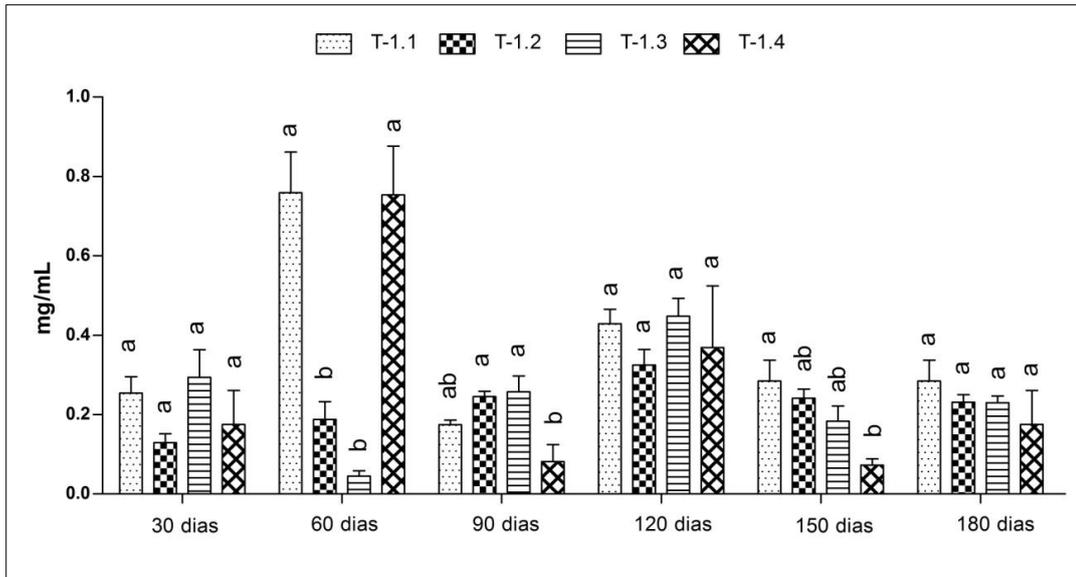
Lara e Benavante (2007) expõem que a radiação causa danos à membrana interna, com consequente alargamento dos poros pela quebra da cadeia, principalmente em doses mais baixas (10 J/kg). Destacam ainda que a radiação altera a permeabilidade da membrana no

sistema NaCl e sua carga elétrica, modificando o transporte de íons. Doses mais elevadas de radiação podem afetar a rugosidade da superfície, devido à dilatação dos poros, alterando a interface de solução da membrana, que induzirá um estresse ao nível de microescala. Essa tensão se dará tanto no sentido intragranular quanto intergranular, que propiciará uma degradação da molécula e sua deformação, com consequente dilatação da membrana (SHIBATA *et al.*, 2003). Em adição, é capaz de elevar o peso molecular do material irradiado e afeta a microestrutura da cadeia (PLIKK *et al.*, 2006).

A radiação gama aplicada no solo promove sua total ou parcial esterilização (POWLSON e JENKINSON, 1975). Com a aplicação da radiação no líquen e no solo pode ter havido uma dilatação da membrana do líquen e um possível mecanismo de bloqueio como forma de proteção exercida por *C. substellata*. Araújo e Melo (2012) salientam que, além da esterilização, a radiação tem o papel de promover a lise celular da microbiota do solo com consequente liberação para o ambiente.

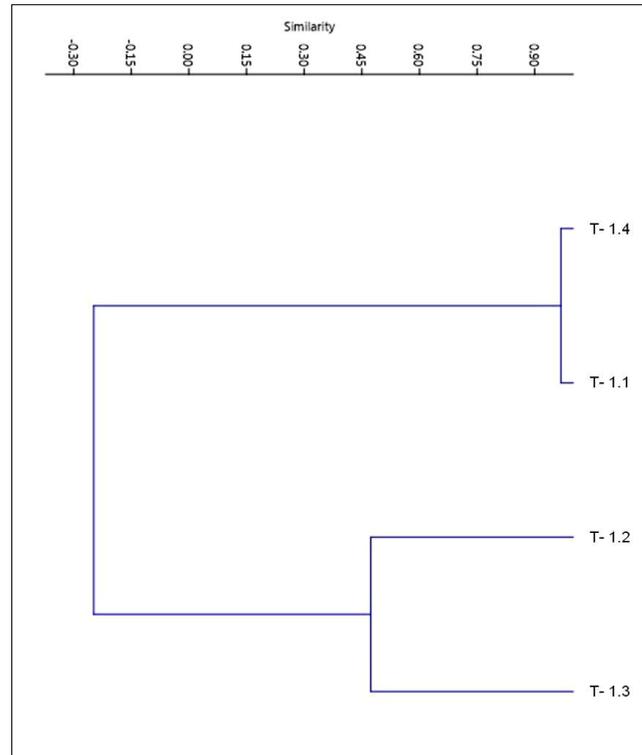
Evidenciou-se que a quantificação dos fenóis de *C. substellata* percolados para Neossolo Flúvico foi superior à produção fenólica do talo (Gráfico 4). Constatou-se que os tratamentos em que o talo não foi irradiado apresentaram maiores concentrações de USN percolado ao solo, principalmente aos 60 dias de experimento. Tal fato é comprovado visto que os talos de *C. substellata* nos tratamentos T-1.1 e T-1.4, aos 60 dias, hiperproduziram com consequente percolação para o solo. Estudos desenvolvidos por Silva (2014) e Santos e Pereira (2015) com uso do líquen *C. verticillaris* e Luvisolo salinizado com uso de radiação gama e UVB, respectivamente, observaram que tratamentos com dose radioativa no talo e no solo, bem como com o uso do solo irradiado, demonstraram intervalos de hiperprodução fenólica repassados ao substrato. Esse fato pode estar atrelado aos efeitos da radiação ionizante, que podem permanecer nas amostras submetidas e ser fator direto na intensificação da produção das substâncias fenólicas do líquen (SILVA, 2014).

Gráfico 4 - Concentrações de ácido úsnico produzido por *Cladonia substellata* e percolado para Neossolo Flúvico em diferentes tratamentos submetidos ou não a irradiação gama.



O dendrograma correspondente às correlações para as concentrações de USN percolados por *C. substellata* para Neossolo Flúvico em diferentes tratamentos demonstrou a formação de dois clusters (Figura 40). Os tratamentos T-1.1 e T-1.4 apresentaram coeficiente de correlação superior a 0,9, evidenciando uma similaridade elevada. Ratificaram-se, assim, os dados de fenóis percolados, que possuem significância estatística durante os seis meses do experimento, à exceção aos 150 dias. O cluster formado por T-1.2 e T-1.3 evidenciam baixa correlação, podendo estar associado ao bloqueio na biossíntese que a radiação gama tenha ocasionado nos talos de *C. substellata*. Desta forma, houve intervalos de hiperprodução de USN no talo, porém não percolados nas mesmas quantidades para o substrato, possivelmente como uma forma de proteção contra o processo de irradiação e seus efeitos. A constatação dos compostos liquênicos no solo está de acordo com os postulados de Shibata *et al.* (2003), Pliikk *et al.* (2006) e Lara e Benavante (2007). Esses autores salientam que a radiação gama causa a dilatação dos materiais e poros de abertura, seja pela expansão do líquen e alargamentos dos espaços intercelulares, ou do solo. Dessa forma, a capacidade de liberar ou absorver fenóis, respectivamente, tende a ser intensificada.

Figura 40 - Dendrograma de correlações da concentração do ácido úsnico produzido por *Cladonia substellata* e percolado para Neossolo Flúvico em diferentes tratamentos submetidos ou não a irradiação gama.



A liberação de substâncias orgânicas, entre elas o ácido úsnico, por *C. substellata* submetida ou não à radiação gama para seu substrato, Neossolo Flúvico salinizado irradiado ou não, promoveu sua interação com os elementos químicos do solo já ocorrentes aos 3 meses, porém aos 6 meses de experimento apresentaram modificações mais significativas (Tabela 12). Observa-se que os tratamentos tiveram comportamento semelhante, não havendo variação entre os tratamentos submetidos ou não à radiação gama. Elementos como cálcio, magnésio e fósforo foram os que evidenciaram maiores alterações nos seus teores. Entretanto, o sódio, principal elemento no fator da salinização, sofreu poucas mudanças em suas concentrações com relativo acréscimo aos 3 meses. Essa permutação de teores nos elementos, atrelada à relativa permanência nos valores de sódio, ocasionou aumento na porcentagem do PST, que no controle de campo foi de 30% e nos tratamentos houve uma elevação, caracterizando um solo fortemente sódico. Esse fato reflete na redução de fertilidade comprovada pela diminuição da soma de bases e da capacidade de troca catiônica.

Tabela 12 - Análise química das amostras de Neossolo Flúvico em experimento com talos de *Cladonia substellata* sobrejacente ao solo em diferentes tratamentos submetidos ou não à radiação gama.

	Trat.*	P	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Al ³⁺	H ⁺	SB	CTC	V	PST
		mg/dm ³	H ₂ O	----- cmol _c /dm ³ -----						---- % ----			
Tempo zero	Contr.	24	6,9	27,7	9,0	16	0,4	0	0,2	53,1	53,3	99,6	30
	Irradiado	22	6,2	25,6	8,7	16	0,4	0	0,2	50,7	50,9	99,6	31
3 meses	T-1.1	13	7,0	14,1	7,4	17	0,2	0	0,2	38,7	38,9	99,0	44
	T-1.2	15	7,0	15,0	6,7	18	0,2	0	0,6	40,0	40,5	99,0	44
	T-1.3	15	6,9	15,5	6,5	17	0,2	0	0,2	39,2	39,5	99,0	43
	T-1.4	14	7,0	15,3	6,6	17	0,2	0	0,1	39,1	39,1	56,5	43
6 meses	T-1.1	14	7,0	12,2	7,6	15	0,2	0	0,1	35,1	35,2	99,7	43
	T-1.2	14	6,9	11,3	7,1	15	0,2	0	0,1	33,6	33,6	55,3	45
	T-1.3	14	6,9	12,4	6,7	15	0,2	0	0,1	34,4	34,5	99,7	44
	T-1.4	13	7,0	11,8	7,9	16	0,2	0	0,2	35,9	36,1	99,4	44
Média	-	14	7,0	14,5	7,2	16,0	0,2	0	0,2	-	-	-	-
DP	-	3,8	0,24	5,78	0,8	1,03	0,08	0	0,17	-	-	-	-
CV (%)	-	27,7	3,5	39,7	12,1	6,45	38,3	0	94,7	-	-	-	-

Fonte: IPA (Instituto Agrônomo de Pernambuco), 2015, adaptado pela autora. DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; PST = Percentagem de sódio trocável.

A capacidade que os líquens têm de segregar suas substâncias para o substrato, rocha ou solo, condiciona processos intempéricos biogeoquímicos e biogeoquímicos, possibilitando alterações dos minerais constituintes das rochas e consequente dissolução e reação a partir da bioformação de novos minerais (ADAMO e VIOLANTE, 2000). Favero-Long *et al.* (2005) avaliaram a ação pedogenética dos líquens *Lecidea atrobrunnea*, *Rhizocarpon geographicum* gr. e *Sporastatia testudinea* em rochas ultramáficas em ambiente alpino. Destacaram que as características mineralógicas e estruturais dos litótipos são fatores decisivos para penetração das hifas dos líquens que invadem até 2 mm de profundidade. Lamas *et al.* (1995) ressaltam que o crescimento e penetração das hifas ocorre tanto verticalmente quanto horizontalmente e pode ser superior a 4 mm, principalmente, pela existência de espaços vazios intergranulares. Esse fato demonstra a capacidade dos líquens no processo de dissolução e quebra do substrato rochoso. No caso do solo, esse mecanismo tem ocorrência direta em suas características

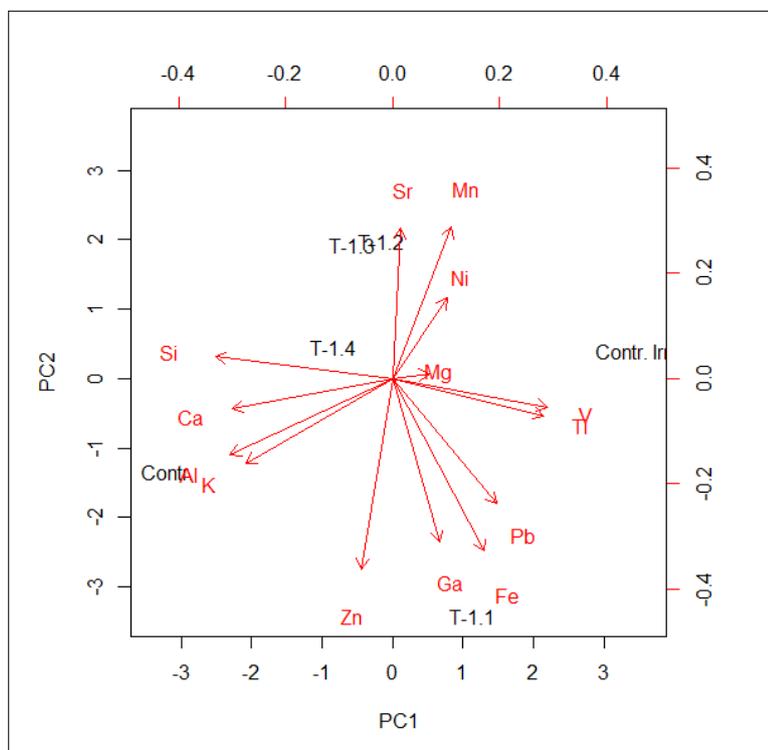
Os resultados da análise de EDXRF permitiram a observação da distribuição dos elementos quantificados em amostras de Neossolo Flúvico em experimento com talos de *C. substellata* sobrejacente ao solo em diferentes tratamentos submetidos ou não a radiação gama, através da análise de componentes principais (Figura 42). Foram contabilizados 14 elementos: silício (Si), alumínio (Al), ferro (Fe), potássio (K), magnésio (Mg), titânio (Ti), cálcio (Ca), manganês (Mn), vanádio (V), zinco (Zn), estrôncio (Sr), níquel (Ni), Pb (chumbo), gálio (Ga), respectivamente, em ordem decrescente de quantidade (g.kg^{-1}) presente no solo. As altas cargas de Si, Al e Fe podem estar associadas ao fato destes elementos serem os principais componentes na formação do solo. Tendo em vista ser um solo de ambiente semiárido, onde o intemperismo químico é mais lento, alguns macro e micro nutrientes se encontram em maiores quantidades, quando comparados a outros solos tropicais. Wastowski *et al.* (2010) em estudo sobre os níveis de elementos químicos em solo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo, utilizando análise quantitativa por EDXRF, observaram que os elementos com maiores concentrações foram Fe, K, Ca, Zn, Mn, Cu em perfil de 0-20 cm.

A PCA demonstra que houve uma separação entre as amostras irradiadas ou não (Figura 42). Evidenciou-se que o solo controle de campo e T-1.1 estão na parte inferior do diagrama da PCA, em contrapartida o controle de campo irradiado e os tratamentos T-1.2, T-1.3 e T-1.4 se encontram no nível superior da PCA. Confirmam-se, assim, as correlações existentes entre as amostras submetidas ou não à radiação. Observando-se os teores dos elementos obtidos no controle de campo, em comparação com o controle de campo irradiado, bem como os tratamentos avaliados, se verifica que não houve diferença nas concentrações médias para a maioria dos elementos químicos analisados, à exceção de K, Ca, Mg e Al. Para os teores de K, Ca e Al, houve redução e aumento de Mg em todos os tratamentos, quando se equipara ao controle de campo. É possível que as substâncias liberadas por talos de *C. substellata* tenham interagido com elementos de Mg, K, Ca e Al, corroborando assim com os dados da análise química do solo, em que elementos como Ca e K sofreram reduções ao longo do experimento. Apesar de ter havido diminuição na concentração de Mg, a partir dos dados de química de solo, a análise de EDXRF evidenciou uma elevação nas concentrações. Dessa forma, é possível que através da quelação tenha ocorrido uma recombinação química com a liberação de magnésio no solo.

Constatou-se que os controles de campo e os tratamentos foram posicionados na PCA próximos aos elementos para os quais possuíam valores mais elevados na quantificação por EDXRF. Esse fato evidencia que o controle de campo é majoritário nos valores de Al e K; já o irradiado possui maior influência sobre Ti e V. No que se refere aos tratamentos se verifica

uma dominância de T-1.1 para Zn, Ga, Fe e Pb, T-1.2 e T-1.3 convergem na posição do diagrama com valores de Sr similares, e T-1.4 para os teores de Si e Ca.

Figura 42 – Análise de componentes principais de amostras de Neossolo Flúvico em experimento com talos de *Cladonia substellata* sobrejacente ao solo em diferentes tratamentos submetidos ou não a radiação gama, a partir de quantificação de EDXRF.

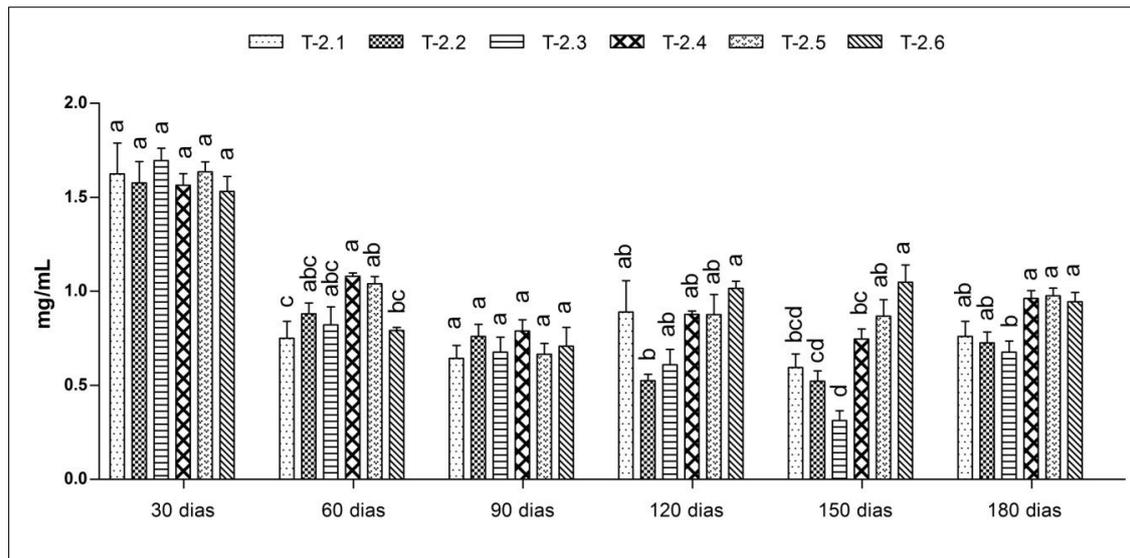


A partir dos resultados obtidos no experimento 1, foi calculada a quantidade média de USN percolado nas cúpulas com amostras de Neossolo Flúvico, sendo proposta a produção do extrato etéreo de *C. substellata* a ser incorporado ao solo na forma de pó (T-2.4; T-2.5; T-2.6), ou diluído em DMSO (T-2.1; T-2.2; T-2.3), em diferentes quantidades. Evidenciaram-se concentrações de USN superiores às obtidas no experimento 1, principalmente aos 30 dias. É possível que o extrato etéreo necessite de um intervalo de tempo maior para interagir com os minerais do solo, quando comparado com a substância liberada pelo talo liquênico. Mesmo nos tratamentos em que o extrato foi diluído em DMSO esse fato foi vigente.

Constatou-se que ao longo do experimento os tratamentos com a incorporação do extrato em forma de pó apresentaram concentrações superiores de USN, quando comparado aos tratamentos com o extrato diluído (Gráfico 5). Esse comportamento pode estar associado ao processo de quelação e a facilidade do substrato (solo) em absorver o extrato etéreo na forma diluída em DMSO. Coloca-se que a presença da água possa ser um facilitador nesse

processo. Adamo *et al.* (1993) sugerem que a capacidade dos líquens de alterarem o substrato não está relacionada à morfologia do talo que se adere com maior ou menor intensidade, mas à fisiologia das diferentes espécies. Ascaso e Galvan (1976) expõem que algumas substâncias líquênicas têm alta solubilidade em água, o suficiente para serem responsáveis pela formação de complexos metálicos, que podem ser detectados por espectrofotometria.

Gráfico 5 – Concentração de ácido úsnico incorporado ao Neossolo Flúvico em tratamentos com extrato etéreo de *Cladonia substellata* em forma de pó e diluído em DMSO.

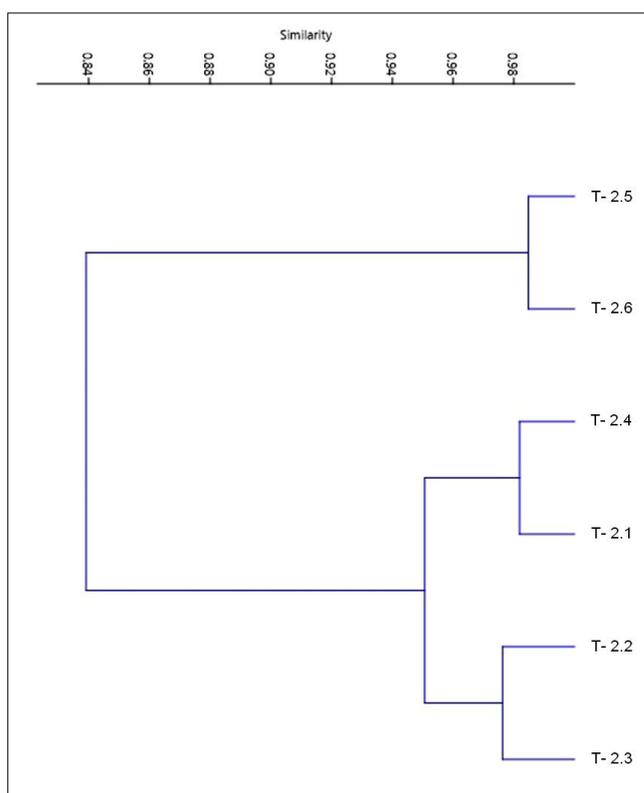


A análise do dendrograma para o agrupamento dos tratamentos com uso do extrato etéreo de *C. substellata*, na forma de pó ou diluída em DMSO, permite observar a formação de três clusters associados entre si (Figura 43). Verifica-se os tratamentos T-2.5 e T-2.6 se estruturam em um cluster separado, sendo a similaridade entre eles ressaltada pela aplicação do extrato na forma de pó e por apresentarem correlações estatisticamente semelhantes para as concentrações ácido úsnico quantificadas durante o experimento. O cluster constituído por T-2.2 e T-2.3, são tratamentos em que o extrato foi incorporado ao solo diluído em DMSO, ratificando a afinidade estatística entre esses tratamentos. O terceiro agrupamento, associado a T-2.2 e T-2.3, é composto por T-2.1 e T-2.4, que apesar de terem formas diferentes de aplicação, são os que possuíram as maiores quantidades do extrato etéreo a ser incorporado ao solo.

Adamo e Violante (1999) ressaltam que além do intemperismo físico realizado através da penetração das hifas do talo, os processos químicos são essenciais devido à liberação de ácidos orgânicos, decompondo minerais pelo processo de biossolubilização. Em adição,

Bjelland e Thorseth (2002) destacam que um dos fatores associados ao intemperismo químico, ocasionado pelos líquens, está nos diferentes compostos liberados, que ligado à capacidade de retenção de água pelo talo, pode aumentar a dissolução química do substrato. Esse fato ratifica que os tratamentos onde o extrato etéreo de *C. substellata* foi adicionado nas amostras de solo na forma diluída, devido à presença da água, podem ter tido sua assimilação facilitada. Chen *et al.* (2000) ressaltam que as substâncias orgânicas e os ácidos inorgânicos excretados pelos líquens podem provocar reações com os minerais do substrato através da desagregação mecânica e cristalização de sais secundários.

Figura 43 - Dendrograma de correlações da concentração de ácido úsnico incorporado ao Neossolo Flúvico em tratamentos com extrato etéreo de *Cladonia substellata* em forma de pó e diluído em DMSO.



A quantificação dos elementos químicos das amostras de Neossolo Flúvico submetido a experimento com a adição de extrato etéreo de *C. substellata* na forma de pó ou diluído em DMSO, em diferentes quantidades demonstrou a capacidade do extrato em modificar as características químicas do solo, assim como o talo da espécie (Tabela 13). Evidenciaram-se alterações nos valores de pH, bem como teores de fósforo, cálcio, magnésio e sódio, quando

correlacionados com o controle de campo. Para o pH houve um aumento em todos os tratamentos, tornando o solo mais alcalino. O extrato mostrou maior interação com os íons de magnésio, principalmente aos 3 meses de experimento, onde houve uma diminuição em T-2.5, superior a 90% do valor encontrado no campo. Destaca-se que aos 3 meses os tratamentos formados pelos grupos com iguais quantidades de extrato orgânico, T-2.1 e T-2.4, seguidos de T-2.2 e T-2.5, e T-2.3 e T-2.6 apresentaram um padrão de redução semelhante. Fato este que pode estar diretamente relacionado à quantidade de extrato inserida nas amostras de Neossolo Flúvico e, não especificamente com sua forma de aplicação. Em adição, aos 6 meses se verifica um acréscimo nos teores desse elemento em T-2.2 e, principalmente, nos tratamentos em que o extrato foi incorporado na forma de pó, retornando a valores superiores ao controle de campo.

Constatou-se que os níveis de cálcio nas amostras sofreram variações ao longo do experimento, sendo mais acentuadas aos 6 meses. Em relação ao cálcio se observa que seu processo de quelação é mais efetivo aos 6 meses de experimento, tanto para os tratamentos com uso do extrato orgânico quanto naqueles com uso do talo, desenvolvidos no experimento 1. Neste sentido, se evidencia que talos de *C. substellata*, em experimentos laboratoriais, possuem maior poder de interação com os elementos existentes nas amostras de solo já nos primeiros meses. Entretanto, o extrato etéreo se mostra mais eficiente quando se observa sua incidência na questão da salinidade do solo. Ressalta-se que em comparação com os resultados de química do solo obtidos para o experimento 1, com uso de talos de *C. substellata*, houve preservação de índices mais elevados de cálcio, magnésio, pH e uma diminuição maior nos níveis de sódio. Apesar desses fatores houve perda de fertilidade devido a SB e a CTC do solo expressar valores mais baixos, em relação ao controle. Atrelado a isso, tem-se como reflexo valores elevados de PST, decorrentes da diminuição de Ca e Mg. Salienta-se que, T-2.1 e T-2.6, aos 3 e 6 meses apenas para este último, apresentaram PST inferior ao controle de campo. Entretanto, ainda com níveis de sódio trocáveis elevados, sendo enquadrado este solo como fortemente sódico, porém apresentando valores inferiores aos obtidos no experimento 1 com uso do talo liquênico.

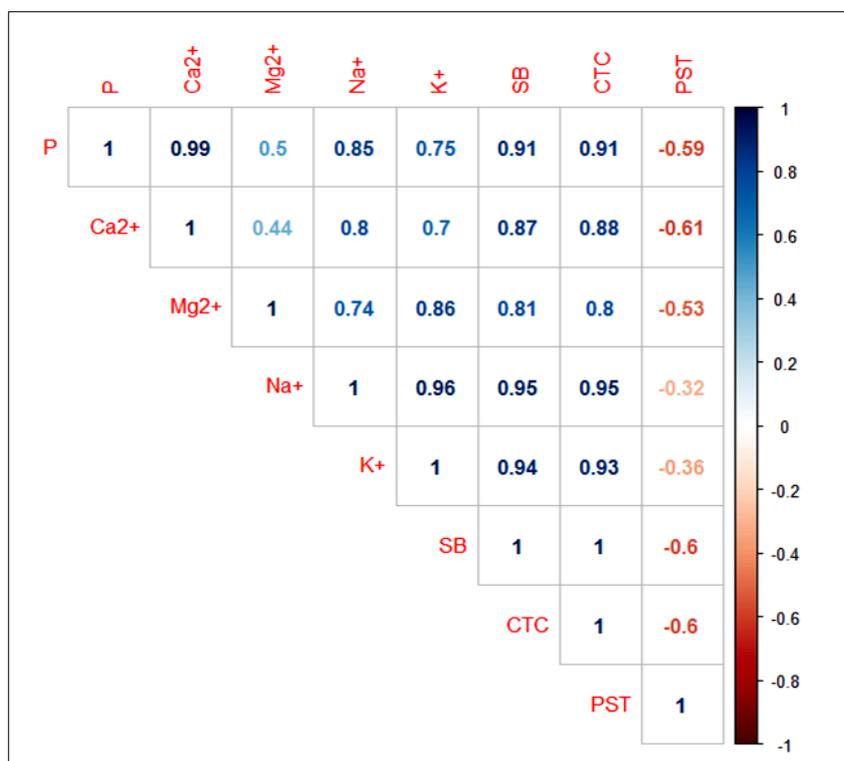
Tabela 13 – Análise química das amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso do extrato etéreo de *Cladonia substellata* diluído ou em pó incorporados ao solo em diferentes tratamentos.

	Trat.*	P	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Al ³⁺	H ⁺	SB	CTC	V	PST
		mg/dm ³	H ₂ O	----- cmol _c /dm ³ -----					-----		----	%	----
Tempo zero	Contr.	24	6,9	27,7	9,0	16	0,4	0	0,2	53,1	53,3	99,6	30
	T-2.1	21	6,9	22,2	3,8	11	0,3	0	0	37,3	37,3	100	29
3 meses	T-2.2	22	6,9	23,9	1,4	12	0,3	0	0	37,6	37,6	100	32
	T-2.3	19	6,8	17,0	4,5	11	0,3	0	0	32,8	32,8	100	34
	T-2.4	21	6,7	21,5	3,2	12	0,3	0	0	37,0	37,0	100	32
	T-2.5	21	6,6	22,0	1,0	12	0,3	0	0,3	35,3	35,6	99	34
	T-2.6	22	6,4	23,9	4,2	12	0,3	0	0,4	40,4	40,8	99	29
	T-2.1	18	7,4	23,2	2,5	14	0,2	0	0	39,9	39,9	100	35
6 meses	T-2.2	21	7,5	15,8	8,4	11	0,2	0	0	35,4	35,4	100	31
	T-2.3	16	7,4	18,2	3,7	12	0,2	0	0,3	34,1	34,4	99	35
	T-2.4	21	7,5	16,3	9,3	14	0,3	0	0	39,9	39,9	100	35
	T-2.5	19	7,5	12,5	9,4	13	0,2	0	0	35,1	35,1	100	37
	T-2.6	21	7,4	15,0	9,9	10	0,3	0	0	35,1	35,1	100	28
Média	-	21	6,9	20,9	3,8	12	0,3	0	0	-	-	-	-
DP	-	1,91	0,38	4,12	3,23	1,5	0,06	0	0,1	-	-	-	-
CV (%)	-	9,14	5,55	19,71	85,21	12,51	19,78	0	0	-	-	-	-

Fonte: IPA (Instituto Agrônomo de Pernambuco), 2015, adaptado pela autora. DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; PST = Percentagem de sódio trocável.

A observação do correlograma dos resultados da análise química das amostras de Neossolo Flúvico para tratamentos com uso do extrato etéreo de *C. substellata* incorporado ao solo na forma de pó ou diluído em DMSO, em diferentes quantidades, demonstra que os elementos avaliados tiveram correlações positivas (Figura 44). Apesar das permutações nos teores dos elementos, houve um padrão de variação semelhante. Destaca-se que as correlações negativas existentes foram registradas, apenas, para a variável PST. Isso evidencia uma relação contrária, principalmente do sódio, tendo em vista que houve uma redução deste elemento, porém um aumento da PST. Esta, motivada por variações nos teores de Ca, Mg, K e H.

Figura 44 – Correlograma dos elementos química das amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso do extrato etéreo de *Cladonia substellata* diluído ou em pó incorporados ao solo em diferentes tratamentos.

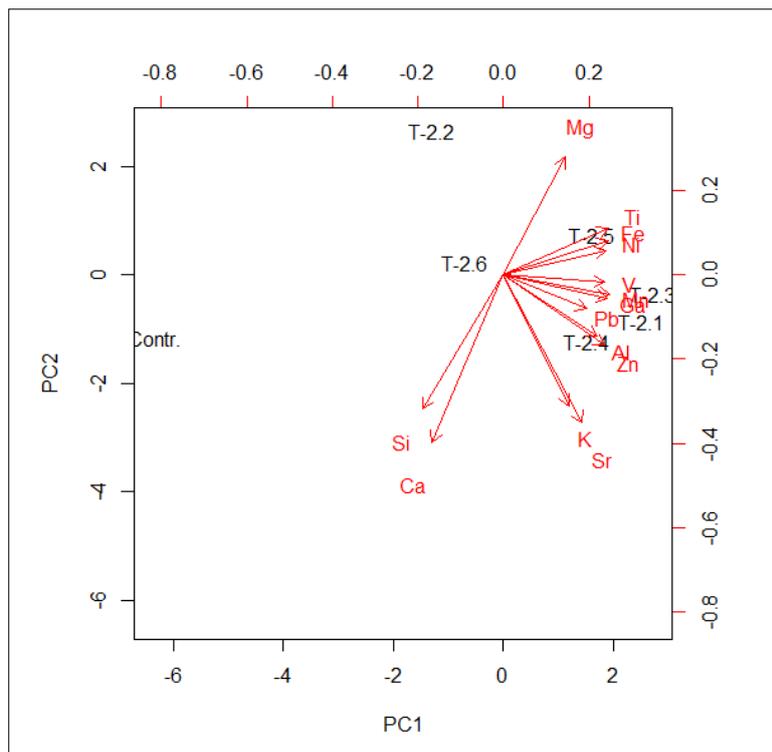


A partir do diagrama da quantificação dos elementos existentes, através da análise de componentes principais, nas amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso do extrato etéreo de *C. substellata* diluído ou em pó incorporados ao solo em diferentes tratamentos e quantidades, se constatou que houve uma polarização de alguns tratamentos específicos (T-2.1, T-2.3, T-2.4, T-2.5), divergindo do controle de campo e de T-2.2 e T-2.6 (Figura 45). Observa-se que esses tratamentos ocasionaram uma concentração na PCA, ficando mais próximos dos elementos para os quais obtiveram-se maiores teores na quantificação por EDXRF. Destaca-se que T-2.6 e T-2.2 se diferenciaram dos demais tratamentos, estando T-2.6 próximo ao eixo central do diagrama, o que pode estar relacionado ao fato deste tratamento possuir valores médios e, T-2.2 os menores valores para os elementos químicos avaliados, à exceção do Mg. Os resultados da PCA evidenciam que os tratamentos com uso do extrato etéreo na forma de pó concentraram os elementos Al e Zn (T-2.4) e Ti, Fe, Ni (T-2.5). Já para o uso do extrato diluído foram constatados Pb (T-2.1) e V, Ga, Mn (T-2.3).

Quando se comparam os valores obtidos no controle de campo com os encontrados nos diferentes tratamentos do experimento 2, se observa que houve um aumento nas

concentrações de Mg, Fe, Mn, Zn, Ni, Pb, Sr, Ti, Al, V. Esse fato é constatado em todos os tratamentos, sendo os teores de magnésio superiores ao controle de campo, bem como aos verificados para os tratamentos do experimento 1. Salienta-se que também foram verificadas reduções de Ca e Si em relação ao controle de campo. Singh *et al.* (2011) destacam que a aplicação de análise multielementar por meio do EDXRF possibilita a compreensão do comportamento e interação entre os elementos químicos no solo, tendo em vista que a entrada de diferentes macro e oligoelementos podem ocasionar um profundo impacto na concentração, acumulação e absorção de muitos dos elementos químicos presentes no solo. É possível inferir que o extrato etéreo, em ambas as formas de aplicação, possibilitou um enriquecimento pelo aumento nas concentrações de determinados elementos químicos. Esse processo pode estar relacionado à interação do extrato com os minerais do solo, sendo mais intensa em T-2.3 para os elementos Fe, Mn, Zn, Ni, Pb, Ti, T-2.1 para Sr e V, T-2.4 para Al e T-2.2 para Mg.

Figura 45 – Análise de componentes principais de amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso do extrato etéreo de *Cladonia substellata* diluído ou em pó incorporados ao solo em diferentes tratamentos, a partir de quantificação por EDXRF.



A partir dos resultados dos tratamentos existentes nos experimentos 1 e 2, constatou-se que tanto o talo de *C. substellata* submetida ou não a radiação gama, bem como o uso do seu extrato etéreo, não apresentaram reduções significativas nos teores de sódio em amostras de Neossolo Flúvico. Diante dessa perspectiva e em observações na área de estudo, ilha de Assunção, se evidenciou que os agricultores descartavam parte da produção agrícola, que não consideravam apropriadas para consumo, em local próximo às culturas. Em virtude dessa realidade, se optou pela ideia de reaproveitamento desses resíduos orgânicos como forma complementar à biorremediação de solo, com ênfase no sódio. Em escala laboratorial, fez-se uso de biodecompositores orgânicos para geração de matéria orgânica e biofertilizante, subproduto líquido da decomposição dos resíduos orgânicos. Os produtos obtidos do biodecompositor foram utilizados para avaliar como essa matéria orgânica poderia auxiliar na diminuição do sódio e, ser uma forma alternativa para auxiliar os pequenos agricultores da ilha de Assunção na melhoria da qualidade do solo.

Feller e Seare (1997) destacam que o processo de degradação dos solos se encontra intimamente relacionados à dinâmica da matéria orgânica. Em ambientes tropicais, essa interação é efetiva devido à conjunção entre fatores como temperatura e umidade. Entretanto, em ambientes semiáridos existentes em regiões tropicais, por causa da baixa umidade atmosférica e elevadas temperaturas, o processo de decomposição é mais lento, ocasionando solos pobres em matéria orgânica. Por isso, realizou-se análise de carbono orgânico total do solo para a amostra controle de campo, que determinou a concentração de 0,496 dag/kg. Esse valor foi usado como base para a quantificação do teor de matéria orgânica do solo, chegando-se ao valor de 8,551 g/kg. Reichardt e Timm (2004) ressaltam que um solo deve possuir pelo menos 4% de matéria orgânica em sua constituição. Deste modo, devido à baixa quantidade de matéria orgânica em amostras de Neossolo Flúvico salinizado, fez-se uso das quantidades 50 g, 100 g e 200 g de matéria orgânica para cada quilograma de peso seco do solo, simulando episódios úmidos e de seca hídrica. Essa proposta se baseia no pressuposto que a conversão da vegetação nativa em área de produção agrícola pode reduzir drasticamente os teores de matéria orgânica do solo, devido ao menor suprimento de resíduos e o aumento das perdas das camadas superficiais do solo por erosão (ANDREUX, 1996; CHRISTENSEN, 2000; CARTER, 2001).

Constatou-se que nos tratamentos em que houve a adição de matéria orgânica em maiores quantidades, detectou-se uma elevação nos teores de fósforo, independente do caráter de simulação de intervalos de umidade ou seca, sendo essa influência mais evidente nos tratamentos com uso de água ou solução com biofertilizante para umedecimento do solo

(Tabela 14). Ressalta-se que apenas T-3.10 apresentou pequena diminuição nas concentrações de fósforo. Guerra *et al.* (2008) salientam que as transformações que ocorrem desde a incorporação da matéria orgânica no solo até a formação das frações humificadas mais estáveis (huminas) compreendem a evolução da matéria orgânica naquele substrato. Evidenciou-se a ação direta da inserção da matéria orgânica em amostras de Neossolo Flúvico com o aumento do pH, tornando-o mais alcalino, e reduções de Ca e Mg. Esse último elemento apresentou aumento aos 3 meses de análise para T-3.2, T-3.4, T-3.6, T-3.7 e T-3.8. No que se refere ao sódio, todos os tratamentos tiveram diminuição, à exceção de T-3.1 que aos 6 meses apresentou valor igual ao controle de campo. Além disso, a matéria orgânica ocasionou o enriquecimento de potássio, principalmente nos tratamentos em que houve a adição de maiores quantidades de matéria orgânica.

As variações nas concentrações de Ca, Mg, Na e K, especificamente com suas reduções, exerceram influência nos valores de SB e CTC. Já a PST, apesar da diminuição do sódio nas amostras avaliadas, se manteve com caráter fortemente sódico e excessivamente sódico para $PST > 30\%$. Cambardella e Elliot (1992) ressaltam que a matéria orgânica pode ser considerada um dos indicadores mais úteis para avaliação da qualidade do solo, pois consegue interagir com seus diferentes componentes, exercendo efeitos sobre a retenção de água, formação de agregados, densidade, pH, capacidade tampão, capacidade de troca catiônica, mineralização, sorção de metais pesados, pesticidas e outros agroquímicos, infiltração, aeração e atividade microbiana. Essa capacidade de interação se deve ao complexo sistema de substâncias, dinâmico, influenciado pela adição de resíduos orgânicos de diversas naturezas e, pelas transformações contínuas sob ação dos fatores biológicos, químicos e físicos. Em adição, Shukla *et al.* (2006) destacam que a matéria orgânica do solo é um indicador sensível das práticas de manejo agrícola, sendo eficiente no monitoramento de mudanças na qualidade e fertilidade do solo.

Tabela 14 – Análise química das amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso de matéria orgânica e seus subprodutos líquidos produzidos a partir de biodecompositor, em diferentes quantidades.

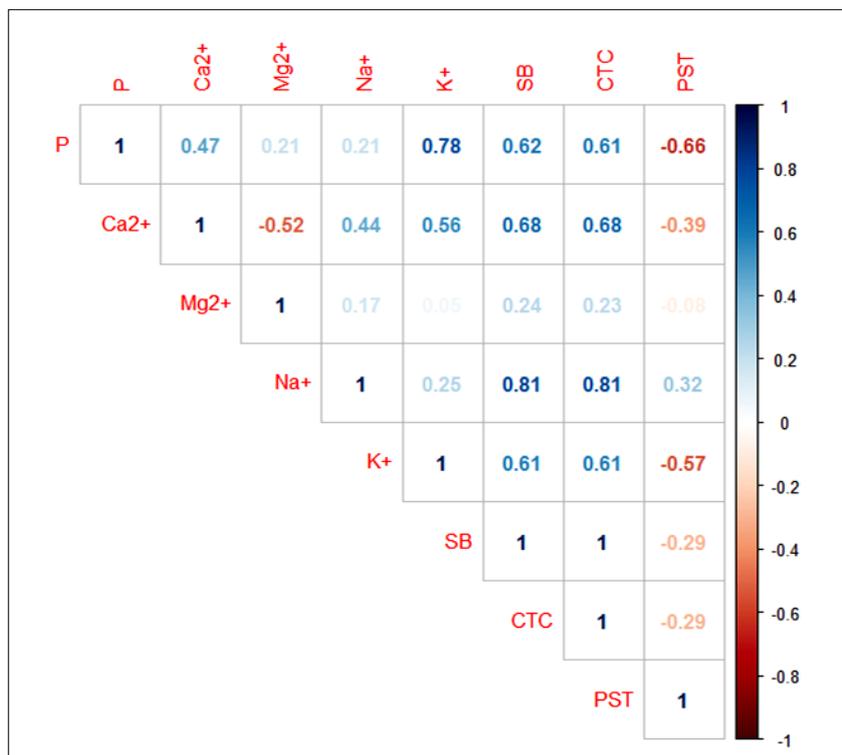
	Trat.*	P	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Al ³⁺	H ⁺	SB	CTC	V	PST
		mg/dm ³	H ₂ O	----- cmol _c /dm ³ -----					-----		---- % ----		
Tempo zero	Contr.	24	6,9	27,7	9,0	16	0,4	0	0,2	53,1	53,3	99,6	30
3 meses	T-3.1	24	7,2	18,0	5,4	13	1,0	0	0	37,4	37,4	100	35
	T-3.2	26	7,6	14,8	11,8	12	1,3	0	0	39,9	39,9	100	30
	T-3.3	35	7,7	16,9	9,4	10	2,2	0	0	38,5	38,5	100	26
	T-3.4	32	7,7	12,7	14,3	12	0,7	0	0	39,7	39,7	100	30
	T-3.5	48	7,8	22,5	5,4	11	1,2	0	0	40,1	40,1	100	27
	T-3.6	80	7,9	16,3	9,3	10	2,1	0	0	37,7	37,7	100	27
	T-3.7	36	8,0	12,6	11,7	11	1,3	0	0	36,6	36,6	100	30
	T-3.8	47	8,1	15,2	9,4	12	1,8	0	0	38,4	38,4	100	31
	T-3.9	80	8,2	14,2	8,4	10	3,0	0	0	35,6	35,6	100	28
	T-3.10	23	7,9	19,2	7,7	13	0,9	0	0	40,8	40,8	100	32
6 meses	T-3.1	26	7,2	18,6	5,8	16	0,8	0	0	41,2	41,2	100	39
	T-3.2	27	7,2	18,7	2,2	10	1,2	0	0	32,1	32,1	100	31
	T-3.3	40	7,0	18,8	3,2	9	1,9	0	0	32,9	32,9	100	27
	T-3.4	32	7,6	19,1	5,4	14	0,6	0	0	39,1	39,1	100	36
	T-3.5	56	7,6	19,7	7,0	12	1,0	0	0	39,7	39,7	100	30
	T-3.6	74	7,8	18,4	4,0	10	1,7	0	0	34,1	34,1	100	29
	T-3.7	37	8,0	18,2	3,0	11	1,4	0	0	33,6	33,6	100	33
	T-3.8	56	8,0	17,3	5,2	11	1,7	0	0	35,2	35,2	100	31
	T-3.9	74	7,9	17,5	4,3	11	2,8	0	0	35,6	35,6	100	31
	T-3.10	22	7,4	18,6	3,9	11	1,0	0	0	34,5	34,5	100	32
Média	-	36	7,7	18,2	5,8	11	1,3	-	-	-	-	-	-
DP	-	19,8	0,4	3,3	3,3	1,9	0,7	-	-	-	-	-	-
CV (%)	-	55,0	4,8	18,1	56,3	17,1	53,1	-	-	-	-	-	-

Fonte: IPA (Instituto Agrônomo de Pernambuco), 2016, adaptado pela autora. DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; PST = Percentagem de sódio trocável.

A análise do correlograma para os elementos químicos das amostras de Neossolo Flúvico, em experimento com uso de matéria orgânica e seus subprodutos líquidos produzidos a partir de biodecompositor, em diferentes quantidades, evidenciou correlações fracas, seguidas de maior neutralidade entre os elementos, com destaque para o magnésio (Figura 46). É possível que as variações na concentração dos íons de Mg ocorridas durante o experimento tenham influenciado em sua relação de similaridade, devido ao aumento apresentado aos 3 meses e perda aos 6 meses, a exceção do T-3.5. Verificou-se que nos experimentos 1 e 2 os elementos químicos que mais sofreram mudanças em suas concentrações foram Ca e Mg, e esse fato se repete no experimento 3 com a adição de matéria orgânica às amostras de Neossolo Flúvico. A correlação negativa existente entre cálcio e magnésio pode ser justificada pela elevação inicial e, posterior significativa redução. Esse comportamento foi mais vigente nos tratamentos T-3.2, T-3.4, T-3.6, T-3.7 e T-3.8. É concebível que esse fato esteja relacionado às quebras existentes para que a matéria orgânica se torne disponível, como salientam Cunha *et al.* (2015) que a assimilação de matéria orgânica pelas plantas depende do processo de mineralização, que constitui a fase de perdas ocorridas durante a decomposição dos compostos orgânicos.

Constatou-se que a adição de matéria orgânica conseguiu reduzir os teores de sódio em todos os tratamentos, a exceção do T-3.1 aos 6 meses, que apresentou valor igual ao controle de campo. Entretanto, apesar da diminuição do Na, as porcentagens de PST se apresentaram elevadas demonstrando um solo excessivamente sódico. A variabilidade observada aos 3 e 6 meses de análise ressaltam a atenuação da SB e CTC das amostras, que estão inferiores aos controles de campo. Todavia, o experimento 3 comprova a ação eficiente da matéria orgânica e seus subprodutos líquidos gerados por biodecompositor, como agentes auxiliares para estudos de biorremediação de solos salinizados em ambiente semiárido. Segundo Sayer e Mielniczuk (1999), as perdas da matéria orgânica do solo são favorecidas, principalmente, pelo revolvimento do solo e conseqüente destruição dos agregados, maior fragmentação diminuição da cobertura do solo, que resultam em alterações na sua temperatura, umidade e aeração. Devido à intensa exploração dessas áreas para agricultura, construção de perímetros irrigados, sem a reposição de nutrientes e correção da acidez do solo, associada à falta de drenagem para solos com baixa capacidade de infiltração, tende a ocasionar redução da produtividade e fertilidade natural, e risco de salinização.

Figura 46 – Correlograma dos elementos químicos das amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso de matéria orgânica e seus subprodutos líquidos produzidos a partir de biodecompositor, em diferentes quantidades.

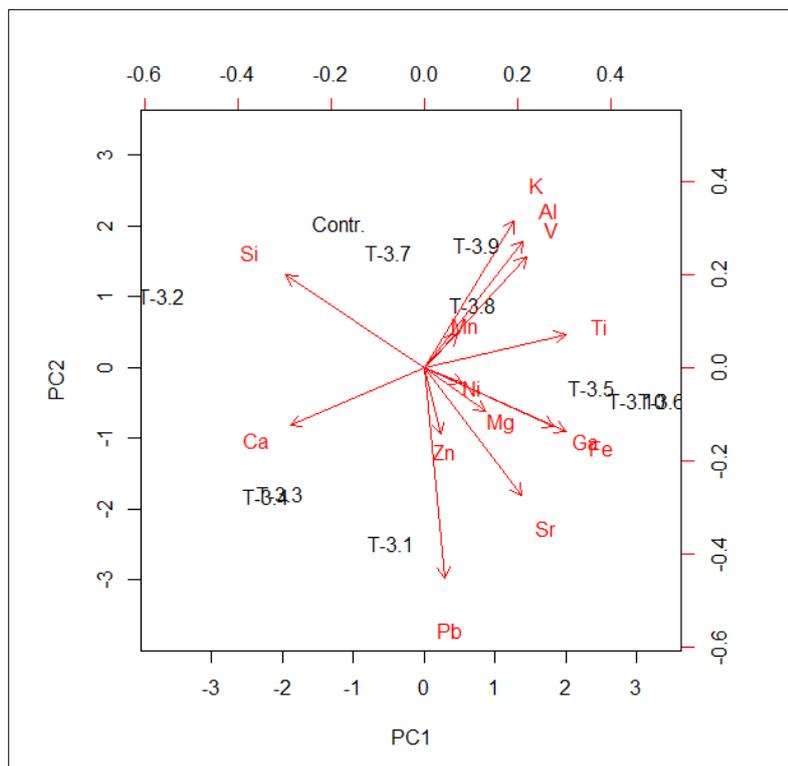


No diagrama da quantificação dos elementos existentes, através da análise de componentes principais, nas amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso de matéria orgânica e seus subprodutos líquidos produzidos a partir de biodecompositor, em diferentes quantidades, se constatou que a PCA foi polarizada pelos tratamentos simulando umidade, seja com água ou solução com biofertilizante (Figura 47). Evidenciou-se que os tratamentos simulando intervalo de seca hídrica apresentaram aumento, especificamente de cálcio, para todos os três grupos formados com quantidades diferentes de matéria orgânica (T-3.1, T-3.2, T-3.3). Já os tratamentos simulando períodos úmidos, com uso de água ou solução com biofertilizante, demonstraram uma maior centralização dos elementos, principalmente para T-3.5, T-3.6, T-3.9 e T-3.10. Destaca-se que, mesmo sem adição de matéria orgânica, T-3.10 foi responsável por direcionar Mg, Fe, Ti, Ni, Ga e Sr, juntamente com T-3.6, apresentando os maiores valores para esses elementos, quando comparado ao controle de campo. Esse fato comprova que o uso de biofertilizantes no solo ocasiona um aumento na concentração dos elementos químicos analisados, bem como tratamentos com uso de maiores quantidades de matéria orgânica umedecidos com água ou solução com biofertilizante. É

possível que esses tratamentos, simulando episódios úmidos, favoreçam o processo de mineralização da matéria orgânica, possibilitando uma interação com os componentes do solo. Em contraponto, Singh *et al.* (2011) ao avaliarem a importância dos fertilizantes aplicados em solos de agricultura no crescimento de plantas, trigo e arroz, através do EDXRF, constataram que as amostras tratadas com fertilizante não alteraram as concentrações de macro e microelementos. É possível que, por ser um estudo experimental em laboratório com uso de NPK industrializado, tenham sido apresentados resultados divergentes dos encontrados com uso de matéria orgânica obtida por meio de biodecompositor.

Constatou-se que os tratamentos tiveram posicionamento na PCA divergente do controle de campo, exceto T-3.7 que apresentou valores próximos. Essa correlação esclarece o fato deste tratamento não agrupar nenhum dos elementos quantificados, tendo em vista que os demais exibiram valores iguais ou superiores ao controle de campo, a exceção do Ca. A partir da análise da PCA é possível evidenciar que houve um aumento na concentração de Pb em T-3.1. De acordo com Alloway (1995), o chumbo se encontra em solos não contaminados em concentrações inferiores a 20 mg/kg, sendo um elemento não essencial com grau de toxicidade em concentrações elevadas. Ressalta-se que no controle de campo foi encontrada a concentração de 18 mg/kg, demonstrando aumento significativo para 27 mg/kg em T-3.1. Essa elevação nos teores de Pb podem estar associadas à adição de matéria orgânica, bem como ser uma característica geoquímica do Neossolo Flúvico da ilha de Assunção, que pode ter em sua formação rochas como argilitos, xistos, granitos ou granodioritos (REIMANN e CARITAT, 1998). Santana (2015) em estudo sobre caracterização e classificação dos solos da ilha de Assunção, município de Cabrobó, constatou em amostras de quatro perfis de solos Gleissolo, Cambissolo Flúvico e Neossolos Flúvicos, em que todos são constituídos por minerais dos grupos da caulinita, mica, esmectita, goethita e quartzo. Tais informações permitem compreender que a estrutura litológica de formação do Neossolo Flúvico existente na ilha de Assunção já condiciona um predomínio de chumbo de origem natural, sendo o Si o elemento de maior abundância. Chaves *et al.* (2004) ao analisarem as propriedades químicas de Neossolo Flúvico daquela localidade, evidenciaram que as cargas elétricas ocorrem, predominantemente, na fração orgânica e argila, sendo o solo da área de estudo constituído por baixos teores de matéria orgânica. Isso faz com que se infira que os valores de CTC devem estar relacionados à fração argila, compreendendo sua extensão com solos classificados como argilo-siltosos.

Figura 47 – Análise de componentes principais de amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso de matéria orgânica e seus subprodutos líquidos produzidos a partir de biodecompositor, em diferentes quantidades.



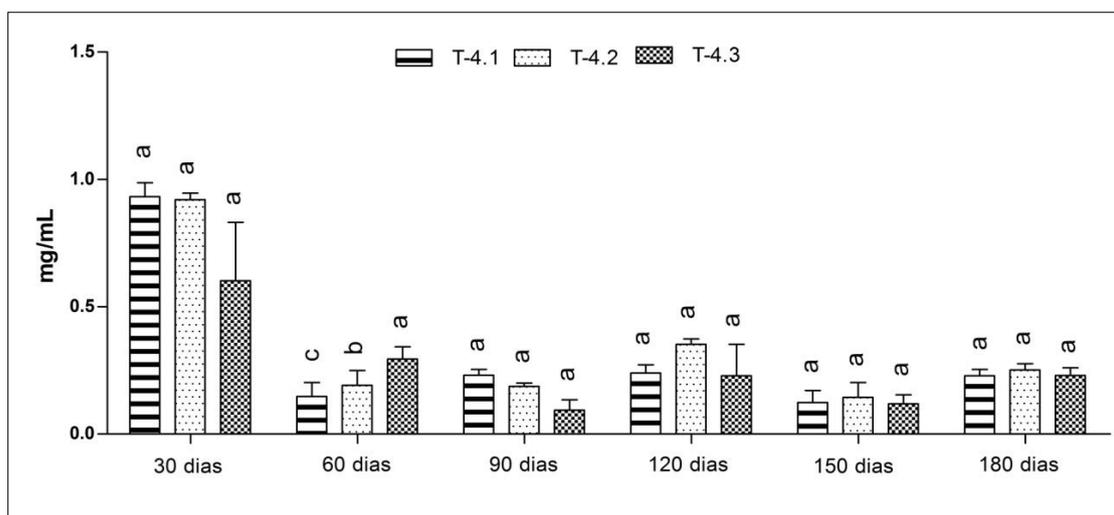
A partir dos resultados obtidos pelos tratamentos desenvolvidos no experimento 3, com adição de matéria orgânica e seus subprodutos em amostras de Neossolo Flúvico salinizado, comprovou-se a ação desses agentes na redução do sódio. Deste modo, optou-se por observar os possíveis efeitos da introdução de talos de *C. substellata*, sobrepostos ao Neossolo Flúvico com incorporação de matéria orgânica, sendo umedecido com água deionizada, ou diferentes soluções de biofertilizante a 0,3 % e 0,6 %. A utilização e aplicação do biofertilizante em Neossolo Flúvico no experimento 3, evidenciou ser benéfico para as questões de salinidade e melhoria da fertilidade, sendo uma forma alternativa e viável, se mostrando de fácil introdução para uso por pequenos agricultores. Miranda *et al.* (2011) destacam que a aplicação de esterco ovino e bovino, em associação com gesso e polímero, conseguiram reduções satisfatórias da CE, PST e Na solúvel, em amostras de Neossolo Flúvico salinizado no Perímetro irrigado de Custódia, Pernambuco. Sá *et al.* (2015) ressaltam que a adição de matéria orgânica e fertilizantes orgânicos solúveis, biofertilizantes, têm efeito condicionador, promovendo uma redistribuição dos poros do solo, bem como melhoria na permeabilidade favorecendo a infiltração da água.

Os biofertilizantes são benéficos para o solo e planta, pois possuem um quantitativo de nutrientes e, diversidade de composição mineral, que podem ocasionar quelação com compostos existentes na solução solo a serem disponibilizados pela atividade biológica, bem como na função de ativador enzimático no metabolismo vegetal (PRATE e MEDEIROS, 2001; SÁ *et al.*, 2015). Desta forma, buscou-se a aplicação do biofertilizante em diferentes soluções como um estimulador do metabolismo de *C. substellata*. Constatou-se que esse efeito foi alcançado, especificamente no tratamento T-4.2, em que aos 30 dias, juntamente com o controle de laboratório, houve uma grande quantidade de USN produzido no talo (Gráfico 6). Entretanto, após esse intervalo de tempo se observou uma tendência de redução da produção desse fenol liquênico, vigente até os 180 dias. Ressalta-se que a concentração de ácido úsnico encontrada no talo na coleta aos 30 dias foi superior ao obtido em todos os tratamentos do experimento 1. É possível que a aplicação constante de soluções de biofertilizante sobre talos de *C. substellata* tenha ocasionado um bloqueio na sua síntese, especificamente, na solução a 0,6%. Salienta-se que o controle de laboratório também acompanhou esse comportamento. Esse fato pode estar associado à volatilização de elementos presentes no biofertilizante, que podem ter sido capturados higroscopicamente pelo talo do tratamento T-4.1. Assis (2016) em estudo sobre a influência de soluções de biofertilizantes no metabolismo de *C. verticillaris* sobreposta a Neossolo Flúvico com inserção de matéria orgânica, confirma a interferência da solução e, possivelmente, da matéria orgânica na biossíntese da espécie. Esse fato ratifica os dados obtidos para o experimento, que evidenciam a sensibilidade dos líquens para alterações do meio.

Nash (1996) ressalta que os líquens dependem dos nutrientes do meio, capturando-os de forma higroscópica, dispersos no ar atmosférico necessário para o seu metabolismo e desenvolvimento. Em adição, a relação desses organismos com o substrato é extremamente importante, pois nutrientes volatilizados ou dissolvidos na água podem entrar na forma iônica em suas células, promovendo modificações na biossíntese de suas substâncias (VASCONCELOS, 2009). Adamo e Violante (1999) destacam que a fragmentação mecânica e a ação química do talo do líquen aumentam a área de superfície do mineral ou da rocha por meio do processo de dissolução, principalmente por ácidos orgânicos, ocorrentes nas microfissuras. Tal fato possibilita a ampliação da superfície do substrato e a incorporação de grãos no talo do líquen das rochas ou do substrato subjacente ao talo. Jones *et al.* (1981) salientam que como consequência da interpenetração das hifas nas partículas do substrato ocorre um inchaço do talo pela absorção de grãos ou micropartículas desagregadas do substrato. Esse processo pode ter sido fator vigente no experimento, para o qual tanto

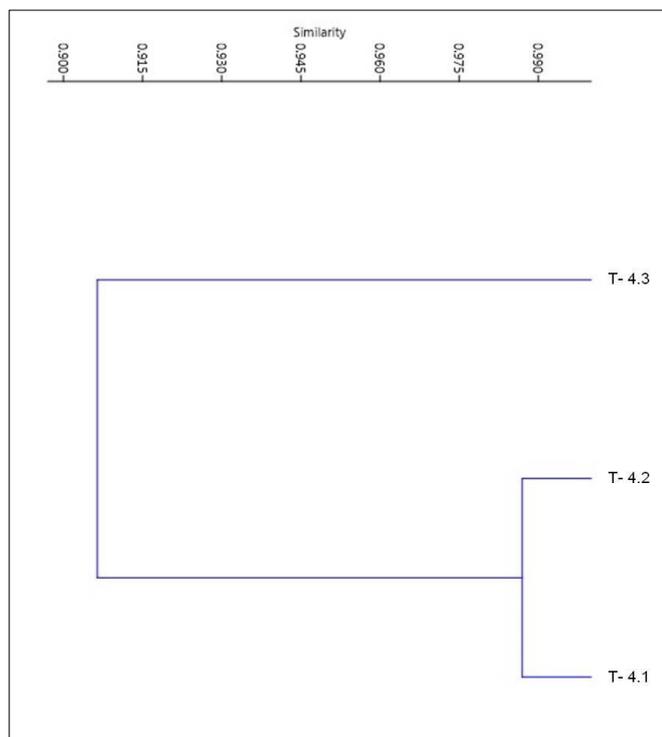
elementos dissolvidos na solução de biofertilizante quanto micropartículas da matéria orgânica e de Neossolo Flúvico podem ter sido capturados por talos de *C. substellata*, ocasionando assim alterações no seu metabolismo.

Gráfico 6 - Concentração de ácido úsnico em talos de *Cladonia substellata* sobrepostos ao Neossolo Flúvico associado com matéria orgânica e seus subprodutos em diferentes tratamentos.



A análise do dendrograma para o agrupamento da produção fenólica de USN em talos de *C. substellata* confirma os dados obtidos, demonstrando a formação de dois clusters (Figura 48). O maior grau de similaridade é verificado entre T-4.1 e T-4.2, que formam um cluster separado de T-4.3. Isso ratifica que existe um limite de tolerância da quantidade de solução de biofertilizante absorvida pelo talo. Outro fato que pode estar atrelado é a presença da matéria orgânica incorporada ao solo, pois elementos contidos podem ter volatilizado e terem sido capturados pela espécie, já que a decomposição da matéria orgânica pode liberar gases nocivos ao líquen. Cavalcante *et al.* (2009) destacam que a aplicação do biofertilizante ao solo pode induzir aumento do ajustamento osmótico das plantas pela acumulação de solutos orgânicos, promovendo a absorção de água e nutrientes em meios adversamente salinos. Além disso, pode contribuir para melhorar a tolerância das plantas aos sais, promovendo melhores condições na emergência das plântulas, crescimento vegetativo e produção de biomassa (LACERDA *et al.*, 2003; SÁ *et al.*, 2015).

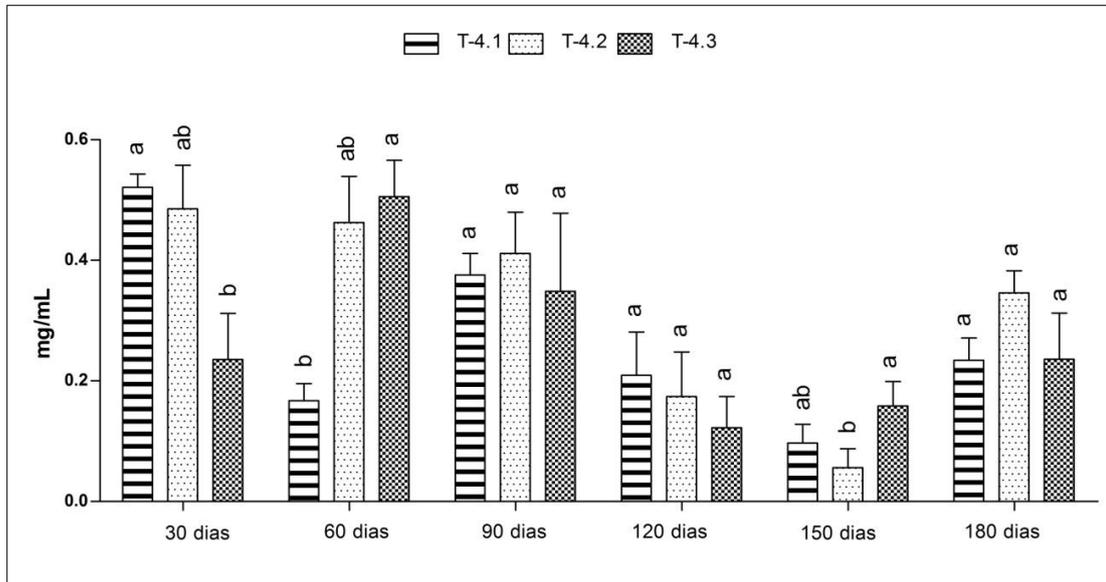
Figura 48 - Dendrograma de correlações da concentração de ácido úsnico em talos de *Cladonia substellata* sobrepostos ao Neossolo Flúvico associado com matéria orgânica e seus subprodutos em diferentes tratamentos.



A análise da concentração de fenóis produzidos por *C. substellata* e, percolados para amostras de Neossolo Flúvico com adição de matéria orgânica, evidenciou que houve maior quantidade de USN no solo do que no talo, principalmente nos três primeiros meses do experimento (Gráfico 7). Observou-se que aos 30 dias tanto a concentração de ácido úsnico no talo quanto no solo foram elevadas nos tratamentos T-4.1 e T-4.2, o que confirma a correlação desses tratamentos. Após os três primeiros meses, houve uma redução da quantidade da substância majoritária produzida pela espécie. Isso demonstra que mesmo o líquen tendo, possivelmente, sua síntese metabólica afetada pela presença da matéria orgânica e do biofertilizante, ocorreu produção suficiente para percolação ao solo subjacente. Nash III (2003) ressalta que os íons são elementos importantes para o metabolismo de líquens, sejam positivamente carregados, cátions, ou negativamente, ânions. Ligações aniônicas, tais como ácidos carboxílicos e hidroxicarboxílicos, que são porções dentro dos polissacarídeos, são responsáveis pela estrutura da parede celular. Ligações catiônicas são consideradas fundamentais na capacidade de troca de íons dispersos no meio através da parede celular do líquen, onde partículas dispersas no ar podem ser facilmente incorporadas em espaços

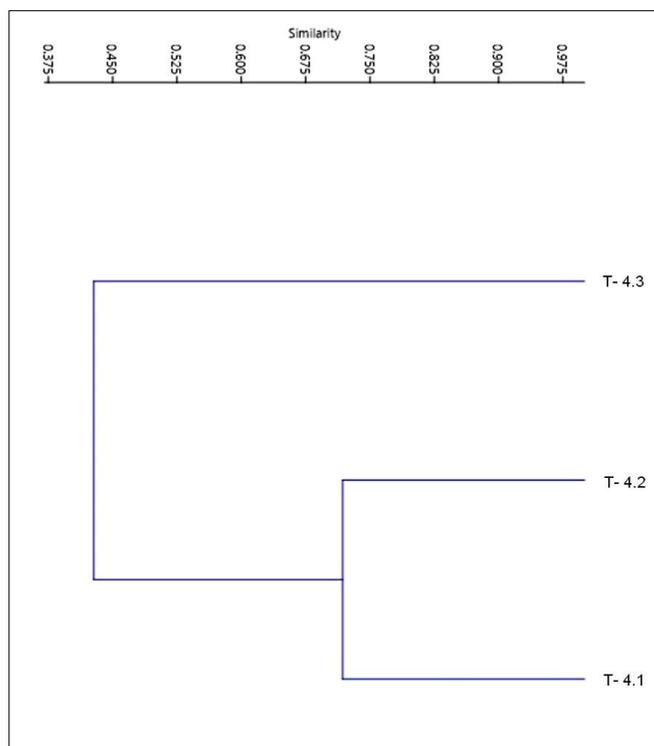
intracelulares e resultar em concentrações relativamente elevadas de elementos químicos tais como Al, Fe, Sc, Ti entre outros dentro do talo.

Gráfico 7 – Concentração de ácido úsnico produzido por *Cladonia substellata* e percolados para Neossolo Flúvico com adição de matéria orgânica e seus subprodutos em diferentes tratamentos.



O dendrograma dos fenóis percolados para amostras de Neossolo Flúvico ratifica o que foi observado na Figura 74, onde se comprova a maior correlação entre T-4.1 e T-4.2 (Figura 49), entretanto o coeficiente de similaridade foi 0,75. Isso indica que esses tratamentos não apresentam alto grau de correlação. Contudo, pelo teste de Tukey se evidencia que T-4.1 e T-4.2 durante todo o experimento tiveram convergência, sendo mais fortes aos 90, 120 e 180 dias. Destaca-se que, assim como no dendrograma da concentração de USN no talo, o tratamento T-4.3 formou um cluster separado confirmando sua baixa relação com os demais, especificamente com T-4.1 (controle de laboratório).

Figura 49 - Dendrograma de correlações da concentração de ácido úsnico produzido por *Cladonia substellata* e percolados para Neossolo Flúvico com adição de matéria orgânica e seus subprodutos em diferentes tratamentos.



A quantificação de elementos por meio de análise química das amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso matéria orgânica e seus subprodutos e, talos de *C. substellata* sobrepostos ao solo em diferentes tratamentos, demonstram um processo de solubilização e quelação dos elementos contidos (Tabela 15). Evidenciou-se uma elevação do teor de P no solo, especificamente dos tratamentos com uso de solução de biofertilizante. Quando se correlacionam os resultados obtidos para fósforo, observa-se que houve um aumento significativo, sendo superior ao verificado nos tratamentos com uso de matéria orgânica e/ou biofertilizante desenvolvidos no experimento 3. Esse fato revela que, provavelmente, a influência das substâncias produzidas por *C. substellata* e percoladas para o substrato intensificam os níveis de fósforo no solo. Raij (1993) salienta que o fósforo é um elemento químico de muito baixa mobilidade no solo, que em fase sólida se encontra combinado em compostos de ferro, alumínio, cálcio e na matéria orgânica. Reimann e Caritat (1998) ressaltam que o fósforo um elemento essencial para todos os organismos, porém em doses elevadas se torna tóxico, podendo em concentrações superiores a 100 mg ser letal para humanos. Deste modo, verifica-se que os tratamentos T-4.2 e T-4.3 tiveram valores de fósforo

aos 6 meses de experimento de 117 e 154 mg/dm³, respectivamente, demonstrando, assim, um grau de toxicidade.

Houve uma expressiva redução na concentração de cálcio em todos os tratamentos, quando comparados ao controle de campo, sendo mais intensa aos 3 meses de experimento. O magnésio foi outro elemento químico que teve uma diminuição no teor de quase 50%, sobretudo em T-4.3 aos 6 meses. Destaca-se que houve efeito nas concentrações de sódio com pequena redução, evidenciada aos 6 meses. Elementos como potássio e hidrogênio apresentaram um considerável aumento, principalmente os teores de K. Silva *et al.* (1999) ao avaliarem o efeito geoquímico dos líquens sobre rochas graníticas ressaltam que os líquens afetam a mobilidade de alguns elementos, sendo essa mobilidade ou acumulação dependente da suscetibilidade do mineral constituinte da rocha. Assim, Na e Ca, em minerais plagioclásios, tendem a ser facilmente mobilizados, diferentemente do K que possui menor grau de mobilidade. Em adição, Raij (1993) expõe que K, Ca e Mg são encontrados no solo na forma iônica, em solução e como cátions trocáveis, onde potássio e magnésio participam da estrutura de mica e minerais de argila do tipo 2:1, que são vigentes em solos menos intemperizados, como típicos solos do semiárido nordestino. Esses elementos químicos possuem influência sobre a disponibilidade do outro. Portanto, em solução o potássio depende dos teores de cálcio e magnésio, sendo assim quanto maior a concentração de K, menores serão os níveis de Ca e Mg.

Observou-se que devido às reduções de Ca, Mg e Na os valores de SB e CTC foram diretamente afetados com significativa diminuição, quando comparados ao controle de campo, mesmo com o aumento de K e H. Estes não conseguiram deixar a SB e a CTC próximos ao padrão do campo. Essas variações dos elementos químicos é fator influenciador na PST, que tende a deixar o solo com maior grau de sodicidade e salinidade. Aguiar Netto *et al.* (2007) ressaltam que as áreas de perímetro irrigado do Nordeste brasileiro apresentam problemas de degradação física e química dos solos. Fatores como questões sociais e econômicas, juntamente com a expansão da agricultura irrigada devem ser levados em consideração para que haja qualidade no manejo da água e do solo. Dantas *et al.* (2012) expõem que a exploração agrícola na área do perímetro irrigado em Jaguaribe/Apodí, no Ceará, afetou a qualidade do solo. Verificaram que houve degradação da qualidade física e química de Cambissolo Háptico devido ao cultivo intenso, resultando na redução da estabilidade estrutural, na percolação da água do solo e, em impacto negativo sobre a matéria orgânica. Afirmam a necessidade da adoção de práticas de manejo que favoreçam a infiltração

da água no solo, conjuntamente ao incremento dos teores de matéria orgânica, para que a sua qualidade seja recuperada.

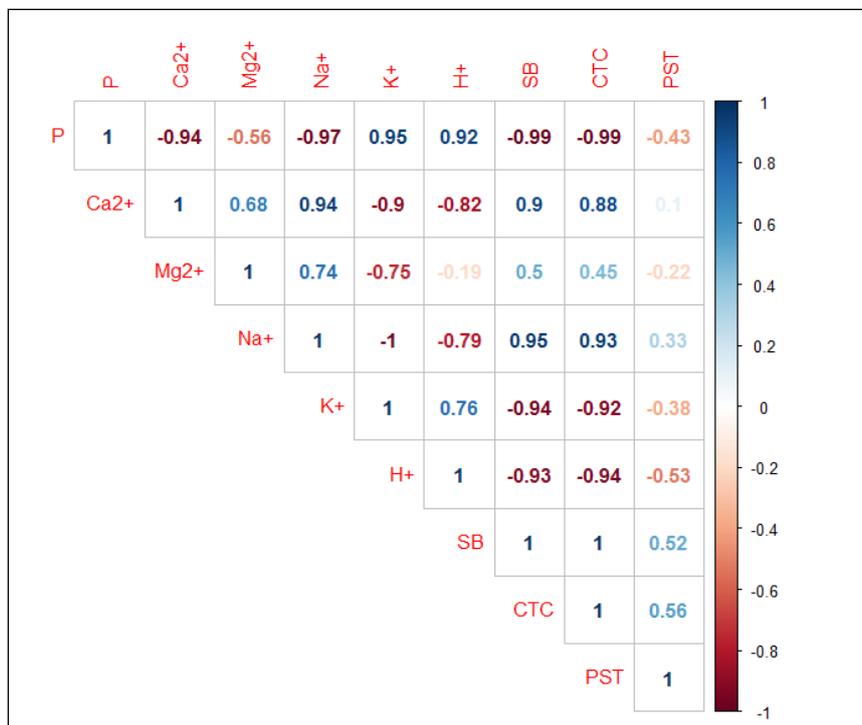
Tabela 15 – Análise química das amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso matéria orgânica e seus subprodutos, e, talos de *Cladonia substellata* sobrepostos ao solo em diferentes tratamentos.

	Trat.*	P	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Al ³⁺	H ⁺	SB	CTC	V	PST
		mg/dm ³	H ₂ O	----- cmol _c /dm ³ -----					-----		----	%	----
Tempo zero	Contr.	24	6,9	27,7	9,0	16	0,4	0	0,2	53,1	53,3	99,6	30
	T-4.1	86	7,0	13	6,6	14	2,4	0	0,6	36,1	36,6	98	38
3 meses	T-4.2	123	6,9	13,9	8,1	14	3,0	0	0,9	39,0	39,9	98	35
	T-4.3	148	6,9	12,2	6,9	14	2,9	0	0,9	36,1	37,0	98	38
6 meses	T-4.1	86	7,0	15,3	7,6	13	2,4	0	0,6	38,3	38,9	99	33
	T-4.2	117	6,9	12,8	8,0	12	2,8	0	0,7	35,7	36,4	98	33
	T-4.3	154	7,0	14,7	4,8	12	3,2	0	0,9	34,8	35,7	97	34
Média	-	117	6,9	13,9	7,6	14	2,8	0	0,7	-	-	-	-
DP	-	44,7	0,1	5,4	1,4	1,4	0,9	0	0,3	-	-	-	-
CV (%)	-	38,2	0,8	39,0	17,8	10	33,9	0	36,4	-	-	-	-

Fonte: IPA (Instituto Agrônomo de Pernambuco), 2016, adaptado pela autora. DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; PST = Percentagem de sódio trocável.

O correlograma do resultado da análise química das amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso matéria orgânica e seus subprodutos e, talos de *C. substellata* sobrepostos ao solo em diferentes tratamentos, confirmou a leitura interpretativa para a química do solo (Figura 50). O crescente aumento do fósforo estabeleceu correlações negativas com Ca, Mg e Na, que apresentaram reduções nas suas concentrações, e positivas com K e H. Os elementos que tiveram uma diminuição nos seus teores se correlacionam entre si positivamente, e negativamente com os elementos com características contrárias. As relações com a SB e CTC evidenciaram-se positivas para Ca, Mg e Na, pois esses elementos tiveram decréscimo nos seus valores e, negativos para K e H. Já a PST demonstrou uma correlação fracamente positiva com o Na, possivelmente pela pequena redução na concentração desse elemento.

Figura 50 – Correlograma dos elementos química das amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso matéria orgânica e seus subprodutos, e, talos de *Cladonia substellata* sobrepostos ao solo em diferentes tratamentos.



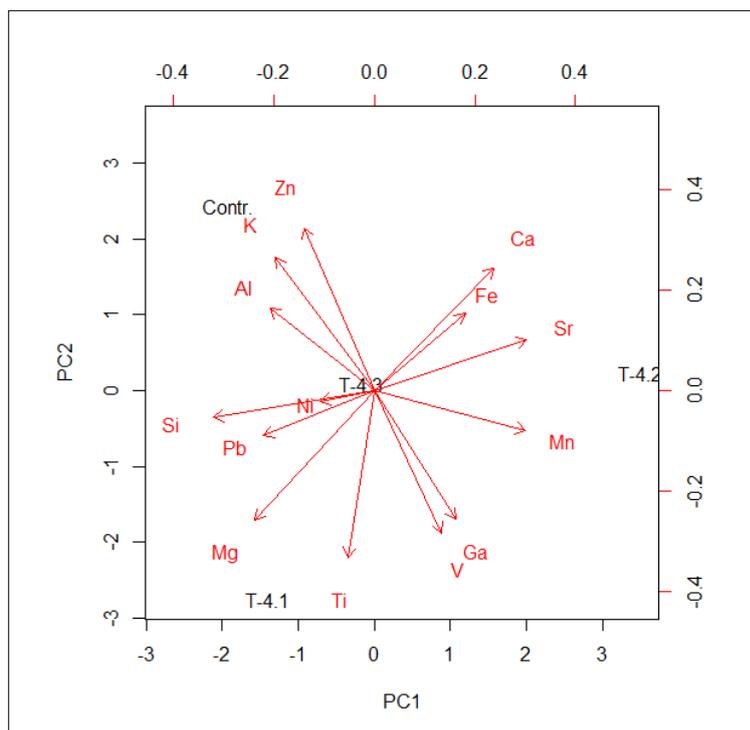
O diagrama da quantificação dos elementos existentes, através da análise de componentes principais, nas amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso de matéria orgânica e seus subprodutos produzidos a partir de biodecompositor e, talos de *C. substellata* sobrepostos ao solo em diferentes tratamentos, se constatou que a PCA formou um fluxo direcional para o controle de campo e os diferentes tratamentos (Figura 51). Observou-se que os tratamentos divergiram do controle de campo, onde este polarizou as concentrações de K, Zn e Al. Em T-4.1 se evidenciou um aumento nos valores de Mg, Si, Ti e V. Já os tratamentos com uso de solução de biofertilizante a 0,3% e 0,6% tiveram comportamentos opostos, tendo em vista que T-4.2 demonstrou intercâmbio com os elementos do solo possuindo os maiores valores de Ca, Fe, Mn, Sr e V. Em contrapartida, T-4.3 ficou posicionado no eixo central da PCA, confirmando valores medianos na análise de EDXRF. Isso ratifica os dados de fenóis percolados para o solo e a análise química de cátions trocáveis, comprovando a baixa relação de T-4.3 motivado, possivelmente, pelo uso da solução de biofertilizante a 0,6%.

Schatz (1963) ressalta que no processo de quelação os minerais são decompostos e eluviados na presença do agente quelante. Neste caso, se pode afirmar que existem vários

agentes quelantes nos tratamentos desenvolvidos no experimento 4, onde a matéria orgânica e a solução de biofertilizante, e os talos de *C. substellata* interagem entre si, possibilitando a solubilização e quelação de íons. Em comparação com o tratamento T-3.9, realizado no experimento 3 com uso de matéria orgânica e solução de biofertilizante, que apresentou a partir da análise de EDXRF maiores quantificações para K, Al e V, se observa que a presença do líquen, nos tratamentos T-4.2 e T-4.3, influenciaram a polarização de Ca, Fe, Mn, Sr, V, Si, Ni e Pb. Esse fato evidencia a interação e a capacidade quelante do *C. substellata*, onde suas substâncias possibilitaram quebra e liberação de elementos antes retidos na solução solo.

Lee e Parsons (1999), ao estudarem a ação biomecânica e bioquímica de *Rhizocarpon geographicum* sobre rochas graníticas formadas no Devoniano inferior, evidenciaram que existe a penetração das hifas nos poros intragranulares ao longo da clivagem e plano de fratura da rocha. Nesta, formada por minerais de biotita, feldspato alcalino e plagioclásio, os autores sugerem que *R. geographicum* ocasiona remoção de K e Fe da biotita, e forma uma camada rica em silício. Schatz (1963) afirma que na quelação elementos como Fe e Al são removidos mais rapidamente do que o silício. Destaca também que na interface rocha-líquén a extração de silicatos, além da quelação, pode ocasionar solubilização de metais alcalinos e alcalinos terrosos. Diante dessas colocações se verifica nos resultados da quantificação por EDXRF para o experimento 4, que o Si é o elemento mais abundante nas amostras de solo e o que menos sofre alterações nas suas concentrações por ser fracamente quelado. Devido às características de formação do Neossolo Flúvico da ilha de Assunção, este possui como principais elementos químicos em ordem decrescente Si, Al e Fe. Especificamente, Al e Fe podem ser considerados os que mais sofreram variações em seus valores, quando comparados com o controle de campo. Isso demonstra que os agentes quelantes, matéria orgânica e biofertilizante, juntamente com *C. substellata*, propiciam um processo de complexação dos elementos envolvidos, confirmando que a presença do líquén favoreceu a interface solo-matéria orgânica.

Figura 51 – Análise de componentes principais das amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso matéria orgânica e seus subprodutos, e, talos de *Cladonia substellata* sobrepostos ao solo em diferentes tratamentos.



Diante dos resultados obtidos no experimento 4, verificou-se a pouca influência dos tratamentos na redução dos teores de sódio em amostras de Neossolo Flúvico. Por isso, formulou-se a proposta de observação da interação do extrato etéreo de *C. substellata* em Neossolo Flúvico com a incorporação de matéria orgânica como uma possível alternativa para diminuição do sódio trocável. Três tratamentos foram elaborados com formas diferentes de inserção do extrato orgânico no solo. Constatou-se que as concentrações de USN quantificadas em amostras de Neossolo Flúvico foram inferiores às observadas no experimento 2, no qual se fez uso do extrato etéreo, porém superiores as encontradas no experimento 4, com a utilização de talos de *C. substellata* e matéria orgânica incorporada ao solo (Gráfico 8). Evidenciou-se que aos 60 dias de experimento houve uma redução de ácido úsnico em todos os tratamentos, confirmando o verificado no experimento 2 para o mesmo intervalo de tempo. Isso comprova que o extrato etéreo, quando incorporado ao solo, necessita de um período superior a 30 dias para iniciar o processo de quelação com os elementos químicos existentes no substrato. Observou-se que após os 60 dias existiu um aumento na concentração de USN em todos os tratamentos, apresentando declínio aos 180 dias. Wilson e Jones (1983) destacam que muitos líquens crostosos produzem ácido oxálico em abundância

atrelado a uma variedade de ácidos fenólicos fracos, que podem reagir com minerais para formar complexos metálicos. Gehrman *et al.* (1988) esclarecem que o processo de biocorrosão e biodeterioração ocasionado pelos líquens vai depender diretamente da natureza da rocha e sua suscetibilidade ao processo. Devido à falta de estudos sobre o efeito do extrato líquênico em solo, compreende-se que o mecanismo de interação do extrato seja diferente ao ocorrido através da liberação da substância pelo talo. É possível que o uso do extrato orgânico necessite de um agente facilitador para o processo de quelação, a água, podendo ser sua incorporação na forma diluída mais eficiente.

A análise do dendrograma evidência que T-5.1 e T-5.2 formaram um cluster com elevado grau de similaridade (Figura 52). Esse fato ratifica o que foi verificado no experimento 2, em que os tratamentos se agruparam em relação à quantidade de extrato etéreo inserido no solo e não, propriamente, a sua forma de incorporação. Em contrapartida, T-5.3 ficou em um agrupamento separado. Isso demonstra a influência que a solução de aplicação do extrato com uso de biofertilizante pode ter ocasionado no processo de interação com a matéria orgânica e os minerais do solo. Essa mesma relação foi observada no experimento 4, onde o uso de solução de biofertilizante motivou um bloqueio na biossíntese de *C. substellata*, principalmente na concentração de 0,6%. Todavia, Collard *et al.* (2001) em estudo sobre o efeito de biofertilizante no desenvolvimento e na produção de maracujazeiro amarelo, destacam que a aplicação do biofertilizante-Agrobio pulverizado na planta favoreceu o crescimento e produção do cultivo, mostra ser um eficiente antifúngico. O uso de biofertilizantes diretamente no solo foi uma alternativa estudada por Araújo *et al.* (2007) para avaliar o rendimento do pimentão adubado com esterco bovino na presença e ausência do biofertilizante. Evidenciaram que o biofertilizante bovino pode ser uma opção para a fertilização não convencional, sendo os melhores resultados obtidos com o uso do biofertilizante aplicado via foliar. Deste modo, é possível que exista um grau de tolerância dos líquens para o uso de biofertilizantes como destacou Assis (2016), sendo mais viável sua aplicabilidade em cultivos agrícolas. Assim, esse procedimento pode favorecer o desenvolvimento da cultura, bem como ser uma possibilidade complementar a adubação orgânica, com boa exequibilidade por pequenos agricultores do semiárido pernambucano.

Gráfico 8 – Concentração de ácido úsnico incorporado ao Neossolo Flúvico associado com matéria orgânica e seus subprodutos em tratamentos com extrato etéreo de *Cladonia substellata* em diferentes formas de aplicação no solo.

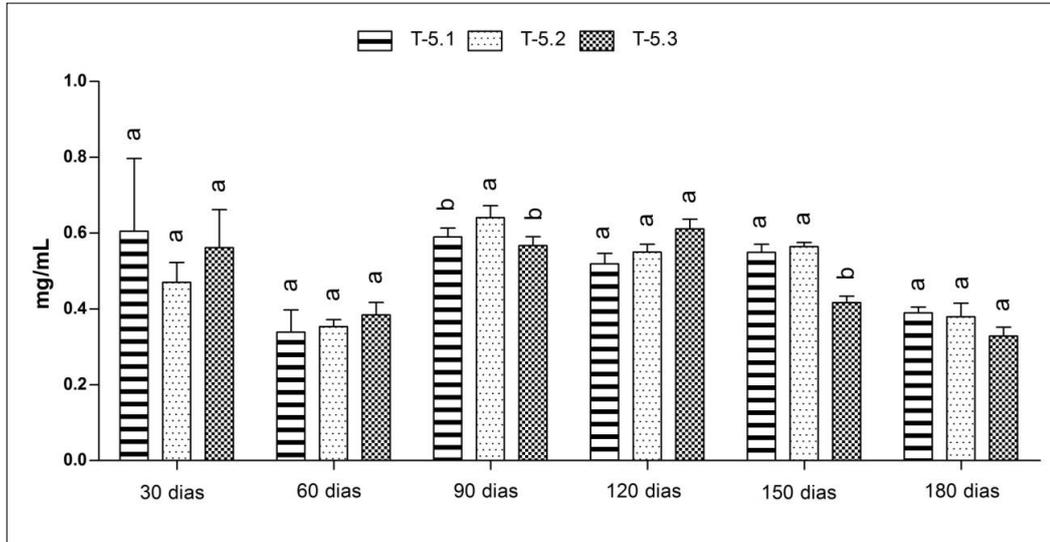
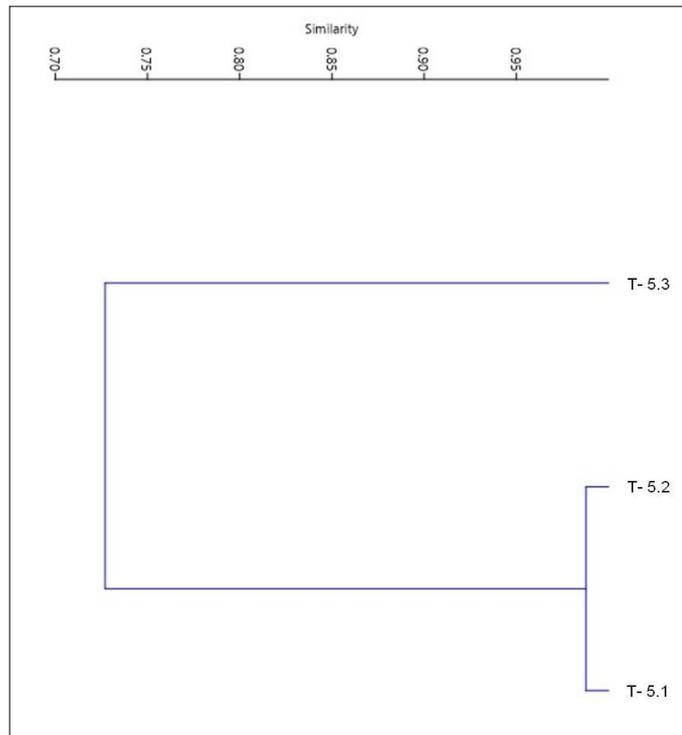


Figura 52 – Dendrograma de correlações da concentração de ácido úsnico incorporado ao Neossolo Flúvico associado com matéria orgânica e seus subprodutos com extrato etéreo de *Cladonia substellata* em diferentes formas de aplicação.



A análise de fertilidade química das amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso matéria orgânica e extrato etéreo de *C. substellata* em pó e/ou diluído incorporado ao solo em diferentes tratamentos, demonstrou que o extrato orgânico interagiu com os elementos existentes, entretanto o sódio não teve alterações significativas (Tabela 16). Evidenciou-se que houve aumento na concentração de fósforo, principalmente nos tratamentos com uso do extrato orgânico diluído em DMSO, ou na solução de biofertilizante. Entretanto, os valores obtidos para o P foram inferiores aos observados no experimento 4, com uso do talo de *C. substellata*. Esse fato sugere ser o extrato orgânico mais adequado por não potencializar os níveis de fósforo a valores de toxicidade, como ocorrente em amostras de Neossolo Flúvico e matéria orgânica com a presença de talos liquênicos. Constatou-se que o solo se tornou alcalino, como destaca Schatz (1963), onde menciona que as substâncias liberadas pelos líquens tendem a aumentar o pH do substrato subjacente. Em contrapartida, a queda no pH resulta da quelação de metais que substituem íons de hidrogênio. Esse fato confirma que o extrato etéreo é capaz de ocasionar alterações no pH, deixando-o alcalino, como demonstrado no experimento 2 e 5. Já os experimentos com presença do talo de *C. substellata* o pH tende a neutralidade. Associado a isso, se verifica que os experimentos com uso de soluções de biofertilizante têm condicionado elevação nos valores de hidrogênio, possivelmente, por efeitos dos subprodutos existentes na solução.

Gehrmann *et al.* (1988) expõem que os líquens são capazes de excretar uma variedade de compostos a partir do metabolismo secundário. Huneck (1999) esclarece que alguns ácidos liquênicos como, por exemplo, norstictico, psorômico, úsnico, e isoúsnico, conseguem formar complexos com metais como K, Cu e Fe, podendo fornecer aos líquens minerais do substrato. Essa capacidade de complexar metais pode estar correlacionada, mais especificamente, com aos grupos polares como -OH e -COOH do que com a solubilidade em água dos compostos. A presença de doadores na posição orto na estrutura aromática favorece a formação de complexos solúveis (GEHRMANN *et al.*, 1988). Observou-se que Ca e Mg apresentaram reduções, principalmente aos 6 meses de experimento, entretanto a diminuição nas concentrações desses elementos não foi tão significativa, quando comparada com os demais experimentos executados e com o controle de campo. Atrélado a esse perfil decrescente, o sódio também teve pequena redução, porém ainda acentuado, o que reflete no PST do solo. Essa variável aos 3 meses foi definida como fortemente sódico para em todos os tratamentos, e excessivamente sódico aos 6 meses. Essa variação pode estar atrelada ao aumento do Na nas amostras aos 6 meses, em associação às reduções de Ca e Mg. Ressalta-se que a adição de matéria orgânica ao solo ocasionou a elevação na concentração de potássio como observado

nos experimentos 3 e 4. Destaca-se que, apesar da perda de fertilidade das amostras do experimento 5, estes tratamentos foram os que apresentaram CTC e SB com valores mais próximos do controle de campo, a exceção de T-5.3.

Cavalcante *et al.* (2016) advertem que a eficiência de toda e qualquer técnica de recuperação visa o controle dos sais solúveis e do sódio trocável, de modo a possibilitar o solo se manter produtivo. A recuperação dos solos afetados por sais, normalmente, necessita da combinação de duas ou mais técnicas, simultaneamente. Dentre as técnicas, o uso de corretivos orgânicos, inclusive a matéria orgânica, independentemente da fonte vegetal ou animal, exerce efeitos positivos na melhoria física, química e biológica dos solos afetados por sais (GHEYI *et al.*, 1995; CAVALCANTE *et al.*, 2002; 2016). Apesar do baixo conteúdo, principalmente em cálcio, qualitativamente é o mais completo dos insumos e promove a liberação de CO₂, produz ácidos orgânicos e estimula a oxidação biológica e a atividade microbiana (GUPTA *et al.*, 1984; LEITE, 1990; SILVA, 1997).

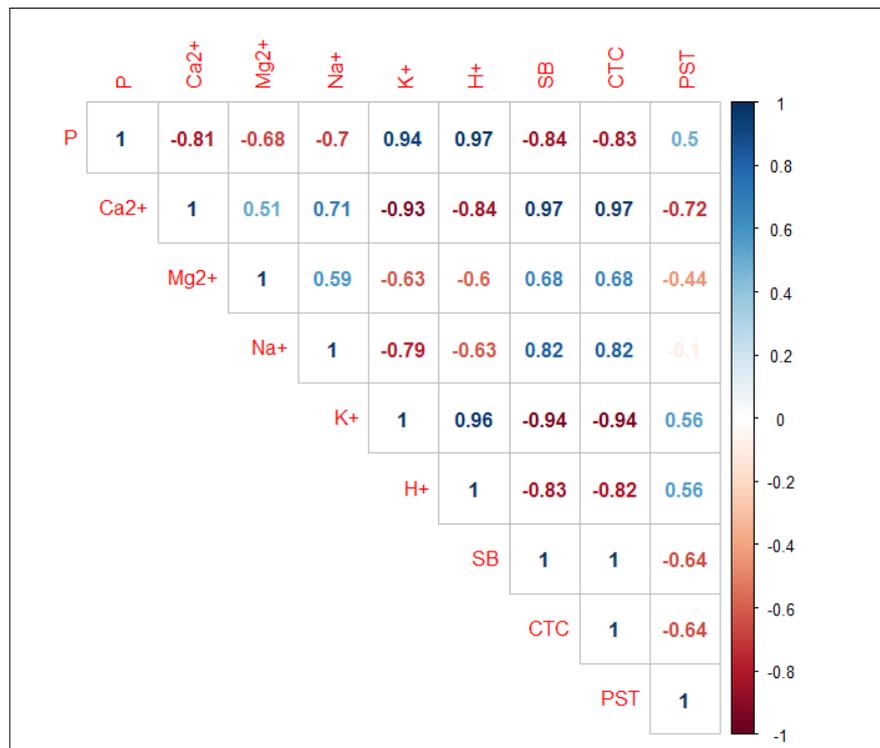
Tabela 16 - Análise química das amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso matéria orgânica e seus subprodutos com extrato etéreo de *Cladonia substellata* em pó e/ou diluído incorporado ao solo em diferentes tratamentos.

	Trat.*	P	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Al ³⁺	H ⁺	SB	CTC	V	PST
		mg/dm ³	H ₂ O	----- cmol/dm ³ -----					-----		---- % ----		
Tempo zero	Contr.	24	6,9	27,7	9,0	16	0,4	0	0,2	53,1	53,3	99,6	30
3 meses	T-5.1	62	7,2	24,1	6,9	13	2,3	0	0,6	46,3	46,9	99	28
	T-5.2	74	7,1	21,5	8,7	13	2,1	0	1,0	44,6	45,1	99	28
	T-5.3	74	7,4	19,7	4,7	12	2,7	0	0,7	45,3	46,3	98	30
6 meses	T-5.1	68	7,0	22,5	5,2	14	2,2	0	0,2	43,2	43,4	99	32
	T-5.2	86	6,8	21,6	5,4	15	2,4	0	0,7	44,4	45,1	99	33
	T-5.3	86	7,2	18,6	6,9	14	3,6	0	0	29,1	29,1	100	32
Média	-	74	7,1	21,6	6,9	14	2,3	0	0,6	-	-	-	-
DP	-	21,2	0,2	3,0	1,7	1,3	1,0	0	0,4	-	-	-	-
CV (%)	-	28,6	2,9	13,9	24,6	9,6	41,6	0	59,7	-	-	-	-

Fonte: IPA (Instituto Agrônomo de Pernambuco), 2017, adaptado pela autora. DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; PST = Percentagem de sódio trocável.

A análise do correlograma dos elementos químicos das amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso de matéria orgânica e seus subprodutos, e extrato etéreo de *C. substellata* incorporado ao solo em diferentes formas, comprovou as feições que os elementos vão se agrupar de acordo com as variações nas concentrações (Figura 53). O aumento do P no solo motivado, sobretudo pela adição da matéria orgânica, estabeleceu correlações positivas com K e H, e negativas com Ca, Mg, Na. Destaca-se que elementos como Ca, Mg e Na apresentaram correlações positivas entre si, juntamente com a SB e a CTC do solo. Isso é atrelado ao fato de ambos terem sofrido reduções ao longo do experimento. Em compensação, exercem efeitos negativos com K, H, P e PST. Especificamente, o sódio teve uma relação de neutralidade com a PST, possivelmente porque os valores se mantiveram próximos ao controle de campo.

Figura 53 – Correlograma dos elementos química das amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso matéria orgânica e seus subprodutos com extrato etéreo de *Cladonia substellata* em pó e/ou diluído incorporado ao solo em diferentes tratamentos.

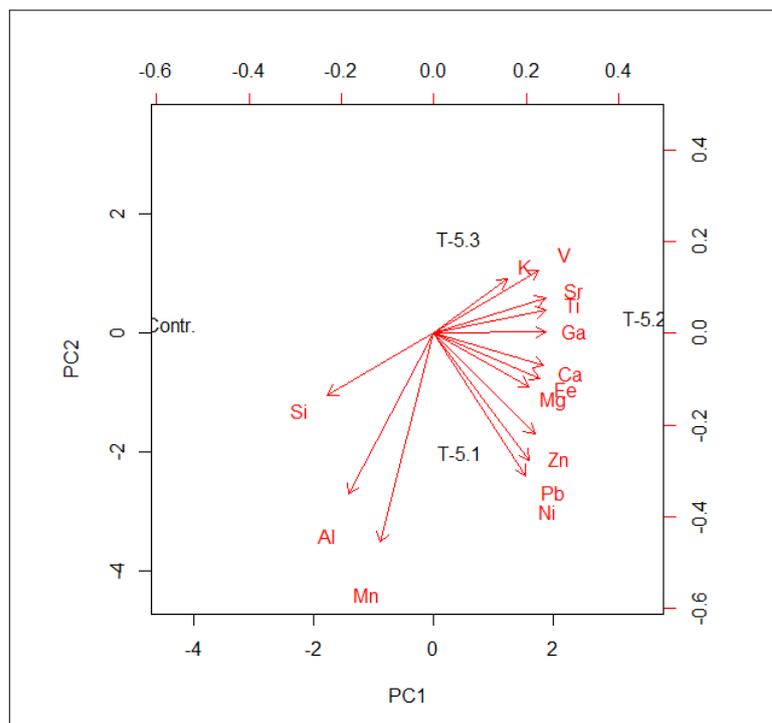


No diagrama da quantificação dos elementos existentes, através da análise de componentes principais, nas amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso matéria orgânica e seus subprodutos com extrato orgânico etéreo de *Cladonia substellata* em pó e/ou diluído incorporado ao solo em diferentes tratamentos, se constatou que a PCA formou um

fluxo polarizado para T-5.2, onde T-5.1 e T-5.3, que apresentaram posição central, evidenciando valores médios para os elementos quantificados (Figura 54). Constatou-se que todos os tratamentos divergiram do controle de campo, bem como este foi responsável por direcionar Mn, Si e Al. As reduções de Si e Al nas amostras submetidas aos tratamentos podem estar atreladas à interação do extrato orgânico etéreo com o solo. Lamas *et al.* (1995) analisaram a colonização de líquens em rochas graníticas em igrejas na Galícia, comprovando que a interação líquen-rocha estimula o intemperismo da biotita, onde seus efeitos mineralógicos mais marcantes são incentivos à conversão da biotita para hidróxido de alumínio e vermiculita, e liberação de oxihidróxido de ferro não cristalino de biotita. Foi evidenciado pelos autores a neoformação de um mineral associado, oxalato de cálcio hidratado, na presença de talos de *Ochrolechia parella*. Destaca-se que T-5.2 foi o tratamento agrupou a maioria dos elementos quantificados na análise de EDXRF (Ca, Mg, Fe, Ni, Pb, Sr, Ti, V), onde os demais tratamentos obtiveram maior quantificação de Zn e K para T-5.1 e T-5.3, respectivamente. É possível que em T-5.2, onde houve a inserção do extrato orgânico etéreo diluído em DMSO e adicionado ao Neossolo Flúvico com matéria orgânica incorporada, tenha permitido maior capacidade de quelação com biodissolução de elementos. Wilson e Jones (1983) afirmam que o estágio inicial do processo de complexação, motivado pelas substâncias líquênicas, é sua ação de intemperismo nos minerais primários, que de acordo com a vulnerabilidade, os elementos constituintes são completamente removidos.

A recuperação de solos afetados pela salinidade e/ou sodicidade requer a adoção de técnicas e práticas de manejo, economicamente possíveis e sustentáveis para que haja eficiência. Cavalcante *et al.* (2016) ressaltam que áreas recentemente recuperadas, quando as práticas de manejo tais como lavagem, aplicação de corretivos químicos minerais e orgânicos, bem como a drenagem são desconsiderados, em reduzido espaço de tempo, voltam aos graus de salinidade e de sodicidade originais, ou até mais elevados. Esse fato acaba intensificando processos de degradação e comprometendo as atividades agrícolas, principalmente dos pequenos agricultores.

Figura 54 – Análise de componentes principais das amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso matéria orgânica e seus subprodutos com extrato etéreo de *Cladonia substellata* em pó e/ou diluído incorporado ao solo em diferentes tratamentos.

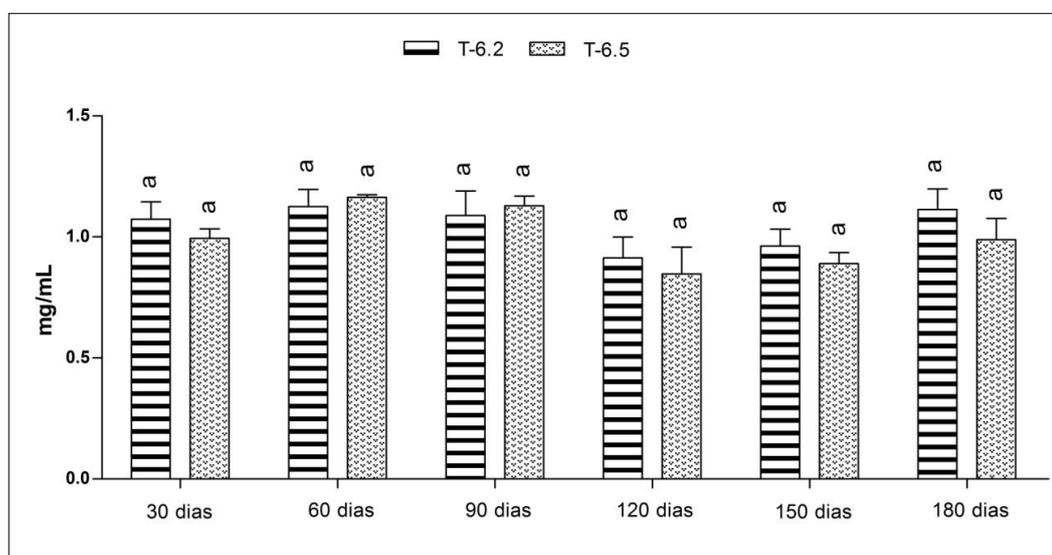


Após observações dos resultados obtidos nos experimentos executados foi constatado que as diferentes combinações realizadas na busca de uma forma alternativa de redução do nível de sódio em amostras de Neossolo Flúvico salinizado, devido ao manejo agrícola, não alcançaram diminuições satisfatórias no teor desse elemento químico. Diante dessa questão se optou por uma mudança do método, que visou à adaptação do método de coluna de solo desenvolvido por Vasconcelos (2013) com Neossolo Quartzarênico (arenoso) para Neossolo Flúvico (argiloso). Esse método está em concordância ao proposto por Cavalcante *et al.* (2016). Em estudos sobre a utilização de técnicas de recuperação de solos afetados por sais, destacam que a lavagem do solo é a técnica mais eficiente de se reduzir os teores de sais solúveis, tendo como objetivo a passagem de determinado volume de água pelo perfil do solo. Assim, os sais são carreados para além da zona radicular. Deste modo, fez-se uso do método de coluna de solo com Neossolo Flúvico em associação com matéria orgânica produzida por biodecompositor, e talos e/ou extrato orgânico etéreo de *C. substellata*, simulando intervalos úmidos ou períodos de estiagem em ambiente natural. Devido à elevada quantidade de argila em amostras de Neossolo Flúvico, utilizou-se a matéria orgânica como agente auxiliar no processo de biorremediação, bem como suas implicações sobre o comportamento físico do

solo, como sugerem Braida *et al.* (2011). Os autores mencionam que a matéria orgânica tem efeitos sobre a agregação e consistência do solo (porosidade, infiltração, retenção de água, resistência à compactação), atuando na formação de agregados e, conseqüentemente, na distribuição do tamanho dos poros do solo e na sua estabilidade.

A partir desse contexto, observou-se que as concentrações de ácido úsnico nos tratamentos com uso do talo liquênico T-6.2 (intervalo seco) e T-6.5 (intervalo úmido) foram semelhantes quantitativamente e estatisticamente (Gráfico 9). Apesar do grau de umedecimento do talo ser diferente para esses tratamentos, eles apresentaram valores próximos de produção fenólica. Esse comportamento também foi observado por Silva (2018) em experimento com uso de colunas de Neossolo Quartzarênico e talos de *C. substellata*, simulando período seco e úmido, em que as concentrações de USN foram similares entre os tratamentos. Destaca-se que aos 30, 120 e 150 dias T-6.2 teve superioridade nos valores de USN, em relação a T-6.5. É possível que o talo, além dos 3 mL de água deionizada borrifados semanalmente, tenha obtido umidade do ambiente ou sofrido elevado nível de estresse, e com isso produzido em maior quantidade seu principal fenol.

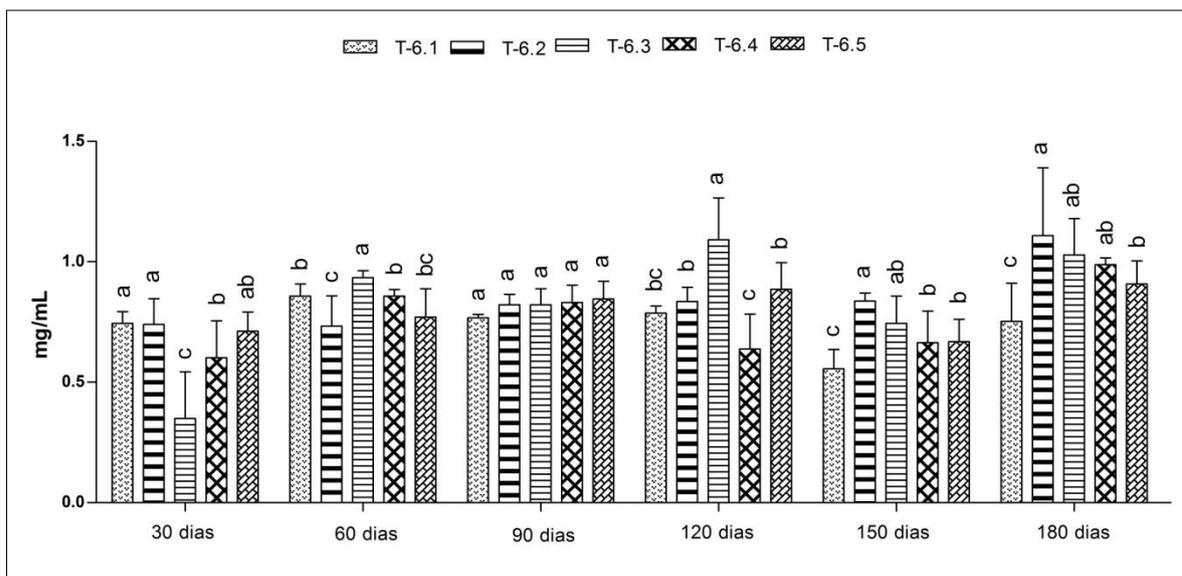
Gráfico 9 – Concentração de ácido úsnico produzido por talos de *Cladonia substellata* sobreposta ao Neossolo Flúvico associado com matéria orgânica, simulando período seco e úmido.



As concentrações de ácido úsnico percoladas pelo talo liquênico e/ou a do extrato orgânico etéreo de *C. substellata* adicionado às amostras de Neossolo Flúvico, evidenciaram quantidades de USN no solo próximas ao produzido no talo (Gráfico 10). Observou-se que aos 30 dias, estatisticamente, os tratamentos foram separados pelo grau de umidade, seco e

hidratado, onde T-6.1 e T-6.2 representam a simulação de déficit hídrico, e T-6.3, T-6.4 e T-6.5 intervalos de chuva. Apenas, T-6.3 foi a exceção a esse padrão de comportamento não apresentando semelhança com os demais do seu grupo. Aos 60 dias se verificaram correlações entre os tratamentos com uso do talo liquênico, T-6.2 e T-6.5, e os com o extrato orgânico etéreo T-6.1 e T-6.4, sendo mais uma vez T-6.3 divergente dos seus pares. Esse mesmo desempenho foi constatado aos 120 dias do experimento. Ressalta-se que, apesar de estarem em grupos de simulação de umidade diferentes houve o agrupamento desses tratamentos. Entretanto, a partir dos 150 dias houve uma mudança no padrão evidenciado, onde o grupo formado pelos tratamentos simulando intervalo úmido exibiu semelhança estatística entre si, em conjunto com T-6.2, que demonstrou relação com T-6.3. Esse fato aponta a discordância de T-6.1 tanto no seu grupo simulando período seco, quanto com T-6.3 e T-6.4 que tiveram o extrato orgânico etéreo adicionado ao solo, porém em caráter úmido. Aos 180 dias esse proceder é seguido por todos os tratamentos, com destaque para o aumento da similaridade entre T-6.2 com T-6.3 e T-6.4.

Gráfico 10 – Concentração de ácido úsnico em experimento com Neossolo Flúvico com uso matéria orgânica e talo e/ou extrato etéreo de *Cladonia substellata* em pó e/ou diluído incorporado a colunas de solo em diferentes tratamentos.



A análise do dendrograma auxilia a compreensão do comportamento dos tratamentos, pois confirma o padrão vigente a partir dos 150 dias de experimento. Constatou-se a formação de três clusters, onde T-6.1 teve baixa similaridade com os demais (Figura 55). O grupo formado pelos tratamentos simulando umidade apresentou coeficiente de correlação de 0,65,

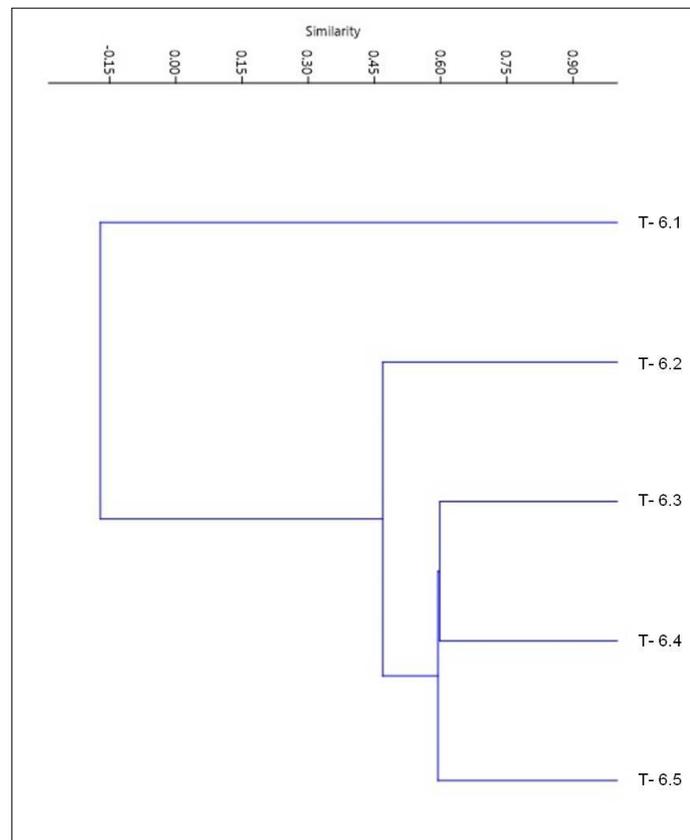
demonstrando que existiram discordâncias entre os tratamentos. Este fato foi evidenciado na análise das concentrações de USN aos 30, 60 e 120 dias, em que T-6.3 não foi, estatisticamente, semelhante a T-6.4 e T-6.5. Possivelmente, isso motivou o baixo valor da similaridade entre seus pares agrupados pela simulação de episódios de chuva. Destaca-se que T-6.2 teve mais afinidade com os tratamentos com uso de maior umidade, especificamente com T-6.5. Essa relação é confirmada pela quantificação de ácido úsnico produzido por talos de *C. substellata*, bem como pela equivalência desse fenol percolado para amostras de Neossolo Flúvico.

Silva (2018) fez uso do método de coluna de solo arenoso, Neossolo Quartzarênico, com talos de *C. substellata* sobrepostos ao solo e/ou seu extrato orgânico etéreo a ele incorporado, ambos talo e extrato simulando eventos de chuva ou seca. O autor observou que a adição direta do extrato, em condição de déficit hídrico, os teores de ácido úsnico foram aproximados aos obtidos para talos de *C. substellata* em episódios de chuva. Esse fato ratifica os dados encontrados no experimento 6, tendo em vista que esse desempenho foi verificado em T-6.1 e T-6.5 até os 120 dias de experimento. Armas *et al.* (2016) ressaltam que em intervalo seco, sob condições naturais, o líquen tende a liberar gradativamente seu fenol para o substrato. Especificamente, a espécie *C. verticillaris* ao produzir o ácido fumarprotocetrárico, este tenderia a ficar retido no solo, sendo lentamente percolado no perfil, o que aumentaria sua capacidade de modificação química. Em adição, Vasconcelos (2013) evidenciou em experimento de coluna de Neossolo a retenção dos ácidos fumarprotocetrárico e protocetrárico simulando ocasião de chuva e período de estiagem, em que houve maior retenção de FUM, sendo esse fenol retido no solo e transformado em PRO, devido ao processo de hidrólise que promoveria a quebra da ligação éster do FUM.

Devido às propriedades químicas e físicas do Neossolo Flúvico se diferenciarem dos estudos com Neossolo Quartzarênico, é possível que as substâncias produzidas por *C. substellata* tanto no intervalo úmido quanto em estiagem fiquem retidos no solo. Isso estaria relacionado ao fato do solo ser muito argiloso, o que dificulta a percolação da água no seu perfil, mesmo com a adição da matéria orgânica. Diante dessa perspectiva, o comportamento do extrato orgânico etéreo incorporado ao solo tenderia a se diferenciar, de acordo com a forma de inserção. Acredita-se que durante episódios de estiagem o extrato orgânico ficaria retido na parte superior da coluna de solo, e seria lentamente absorvido. Por ser insolúvel em água, os cristais do extrato, necessitariam de um agente facilitador do processo de quebra para que haja a interação com os elementos do solo. É possível que no tratamento T-6.1, a matéria orgânica tenha desempenhado esse papel como agente quelante e fornecedora de umidade,

permitindo a efetivação da relação extrato-matéria orgânica-solo. Para o uso do extrato simulando períodos de chuva a ação da água possibilita a percolação do extrato orgânico por todo o perfil da coluna de solo, principalmente em T-6.4, onde há uma diluição prévia do extrato em DMSO. Assim, rapidamente a solução com o extrato orgânico consegue preencher os espaços vazios entre as partículas do solo e interagir com elementos existentes. Apesar do tratamento T-6.3 fazer uso do extrato orgânico na forma de pó, a adição de água para umedecimento do perfil da coluna faz com que o extrato consiga percolar na coluna. Considera-se que a atuação da água, em associação com a matéria orgânica, é fundamental para que se concretize mais rapidamente o processo de quelação.

Figura 55 – Dendrograma de correlações da concentração de ácido úsnico em experimento com Neossolo Flúvico com uso matéria orgânica e talo e/ou extrato etéreo de *Cladonia substellata* em pó e/ou diluído incorporado a colunas de solo em diferentes tratamentos.



Asta *et al.* (2001) ao realizarem investigações micromorfológicas e ultra-estruturais da interface de solo de líquen, evidenciaram que as substâncias produzidas por *Cladonia rangiferina* têm importante papel no desgase químico, humificação e, também na regulação da atividade biológica dentro do húmus. Isso sugere que as substâncias produzidas por *C.*

substellata e seu extrato orgânico etéreo podem estar exercendo essa mesma relação, acelerando a transição da humificação da matéria orgânica em húmus. As substâncias húmicas são capazes de equilibrar o pH, conduzir a mobilidade dos contaminantes através da absorção, agregação e sedimentação, além de controlar a espoliação de metais (MCCARTHY *et al.*, 1998). Devido à sua capacidade de complexação, afeta a biodisponibilidade de metais dissolvidos e importante meio para controle e transporte de poluentes em sistemas naturais (BAALOUSHA *et al.*, 2006). Raij (2011) ressalta que a formação de quelatos a partir da matéria orgânica pode ser compreendida pela reação de equilíbrio entre um íon metálico e um agente complexante, no caso orgânico, caracterizado por mais de uma ligação, que resulta na formação de uma estrutura de anel, estando o metal incorporado à estrutura.

A análise da fertilidade química das amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso matéria orgânica e extrato orgânico etéreo de *C. substellata* em pó e/ou diluído incorporado a colunas de solo em diferentes tratamentos, demonstrou que a utilização do método de coluna de solo adaptada para Neossolo Flúvico foi eficiente, quando em associação com matéria orgânica, permitindo a lavagem do perfil da coluna (Tabela 17). Lima e Pereira (2016) ressaltam que o uso de coluna de solo com Neossolo Flúvico sem adição de matéria orgânica não possibilita a infiltração da água no perfil da coluna, devido a expansão da argila. Isso faz com que haja uma retenção excessiva de água na parte superior da coluna, tornando-se inviável. A adição da matéria orgânica com o extrato e/ou as substâncias produzidas pelo líquen e percolados para o substrato ocasionaram um aumento no teor de fósforo no solo, sobretudo aos 6 meses de experimento nos tratamentos T-6.2 e T-6.5, ao nível de toxicidade.

Constatou-se que nos tratamentos simulando intervalo úmido com a utilização do extrato orgânico etéreo houve a acidificação do solo aos 3 e 6 meses de experimento, em T-6.3 e T-6.4. Em consorciação, esses mesmos tratamentos tiveram aumento na concentração de hidrogênio, como afirma Scharz (1963) que essa redução do pH do substrato, solo, resulta da quelação de metais que substituem íons de hidrogênio. Destaca-se que, mais uma vez, a suscetibilidade de cálcio e magnésio para o processo de quelação, sendo os elementos que mais sofreram variações em suas concentrações, principalmente para o magnésio, a exceção de T-6.1 que demonstrou aumento aos 6 meses. Os níveis de cálcio apresentaram uma diminuição em todos os tratamentos, ocorrendo mais intensamente aos 6 meses. Cavalcante *et al.* (2016) sugerem que dentre as técnicas para recuperação dos solos afetados por sais são os melhoradores ou corretivos químicos, para o qual a adição de substâncias que contenham, preferencialmente, cálcio são recomendadas. Esse fato, de acordo com os autores, estaria atrelado ao fornecimento ou liberação do cálcio presente no solo, possibilitando o

deslocamento do sódio do complexo de troca para a solução, que em seguida pode ser lixiviado mediante lavagem. Devido ao cálcio ter maior seletividade, ou seja, força de atração pelas partículas de argila, consegue substituir o sódio trocável.

Evidenciou-se redução nas concentrações de sódio em todos os tratamentos aos 3 e 6 meses, porém sendo mais significativas aos 6 meses em T-6.3 e T-6.4. Esses tratamentos fizeram uso do extrato orgânico etéreo simulando eventos de precipitação, entretanto com formas de aplicação diferentes. Associada a essa diminuição do sódio houve a mudança do PST de fortemente sódico para ligeiramente sódico em T-6.3 e T-6.4. Verificou-se elevação nos níveis de potássio no solo, possivelmente influenciados pela matéria orgânica e substâncias liquênicas, do talo e/ou extrato orgânico. Raij (2011) esclarece que os sais de potássio apresentam alta solubilidade e, assim, os teores de K na solução do solo podem atingir concentrações bastante elevadas. O grau de umidade no solo e a relação do potássio com os elementos cálcio e magnésio podem afetar sua disponibilidade em solo. O autor destaca que em teores mais elevados de água no solo, ocorre diluição da concentração salina e diminuição dos teores de íons na solução. Para manter a atividade catiônica constante, acontece a adsorção líquida de cátions divalentes e dessorção monovalentes. Em contrapartida, em intervalos secos quando há redução da disponibilidade de umidade no solo, a concentração total de íons em solução aumenta, entretanto os teores de cálcio mais magnésio serão elevados mais rapidamente do que a concentração de potássio. Devido às reduções dos teores de cálcio, magnésio e sódio e, mesmo com o aumento de potássio e hidrogênio, a soma de bases e a capacidade de troca catiônica foram inferiores ao controle de campo. Essa diminuição da fertilidade do solo pode ser compensada com a adição de corretivos químicos ou orgânico.

Tabela 17 – Análise química das amostras de Neossolo Flúvico em experimento de coluna com uso matéria orgânica e talo e/ou extrato etéreo de *Cladonia substellata* em pó e/ou diluído incorporado a colunas de solo, simulando período úmido e seco.

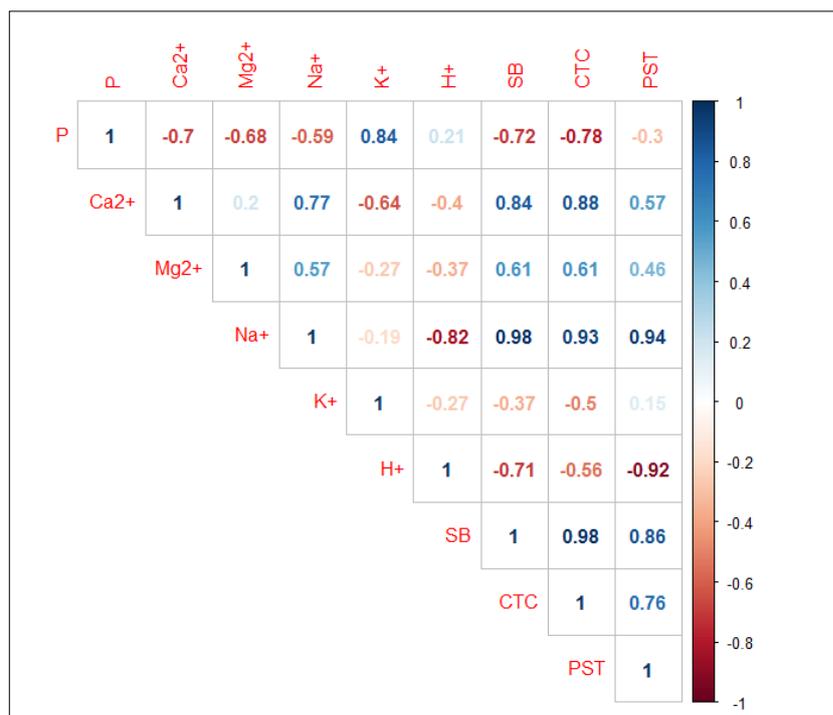
	Trat.*	P mg/dm ³	pH H ₂ O	Ca ²⁺ -----	Mg ²⁺ -----	Na ⁺ -----	K ⁺ -----	Al ³⁺ -----	H ⁺ -----	SB	CTC	V ---- % ----	PST
Tempo zero	Contr.	24	6,9	27,7	9,0	16	0,4	0	0,2	53,1	53,3	99,6	30
3 meses	T-6.1	68	7,3	16,2	7,3	8,6	3,1	0	0,4	35,2	35,6	98,9	24
	T-6.2	80	7,3	17,1	4,6	8,2	3,2	0	0,4	33,1	33,5	98,8	24
	T-6.3	99	5,7	18,2	4,5	5,6	2,9	0,1	3,4	31,3	34,8	89,9	16
	T-6.4	111	5,6	18,3	5,2	5,4	2,7	0,1	3,6	31,7	35,4	89,5	15
	T-6.5	74	7,4	18,5	3,3	9,0	2,9	0	0,3	33,7	34,0	99,1	26
6 meses	T-6.1	80	7,2	12,2	10,2	10	3,6	0	0,1	36,1	36,2	99,7	28
	T-6.2	99	7,3	17,8	4,6	10	3,4	0	0,1	35,8	35,9	99,7	28
	T-6.3	86	6,0	13,1	3,5	1,9	2,3	0	3,1	20,8	23,9	87,0	8
	T-6.4	92	4,5	14,7	4,5	2,2	2,0	0,4	6,2	23,5	30,1	78,1	7
	T-6.5	105	7,3	19,2	2,7	10	3,6	0	0,2	35,5	35,7	99,4	28
Média	-	86	7,2	17,8	4,6	8,6	2,9	0	0,4	-	-	-	-
DP	-	23,8	1,0	4,1	2,4	4,0	0,9	0,1	2,1	-	-	-	-
CV (%)	-	27,7	13,6	22,9	52,3	46,6	31,8	0	522,2	-	-	-	-

Fonte: IPA (Instituto Agrônomo de Pernambuco), 2017, adaptado pela autora. DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; PST = Percentagem de sódio trocável.

O correlograma dos elementos químicos das amostras de Neossolo Flúvico em experimento com uso matéria orgânica e talo e/ou extrato orgânico etéreo de *C. substellata* em pó e/ou diluído incorporado a colunas de solo, simulando período úmido e seco confirmou relações de força entre os elementos, segundo as concentrações expostas pela análise de fertilidade (Figura 56). As correlações positivas exibidas entre fósforo e potássio são estabelecidas pelo aumento observado, sobretudo nos tratamentos com uso do talo líquênico aos 6 meses de experimento. Quando se comparam os valores de fósforo obtidos nos experimentos realizados, se confirma a influência da matéria orgânica em Neossolo Flúvico, porém a interação desta com talos de *C. substellata* potencializaram os níveis de fósforo no solo, chegando a valores acima do tolerado. Possivelmente, isso está relacionando a capacidade das substâncias excretadas pelo líquen de quebrar estruturas, ocasionando a quebração e

liberando cátions. Esse fato também pode ser evidenciado para o potássio, entretanto em menores proporções. Em contraponto, fósforo e potássio exercem correlações negativas com os demais elementos quantificados, devido às reduções apresentadas nas concentrações de Ca, Mg, Na, SB, CTC e PST. Contudo, esses elementos e índices desempenham correlações positivas entre si, pois todos tiveram uma variação decrescente nos teores, quando equiparados ao controle de campo. Constatou-se que a diminuição dos níveis de sódio foi acompanhada pela redução do PST, que apesar dos tratamentos T-6.1, T-6.2 e T-6.5 terem apresentado PST fortemente sódico, T-6.3 e T-6.4 tiveram elevado grau de representatividade forçando o valor do PST para ligeiramente sódico. Cavalcante *et al.* (2016) ressaltam que o excesso de sais no solo afetam, negativamente, as atividades agrícolas, principalmente em áreas salinizadas submetidas a salinidade de natureza secundária ou antrópica, que em regiões áridas e semiáridas podem ocasionar perdas extensas de áreas produtivas.

Figura 56 – Correlograma dos elementos químicos das amostras de Neossolo Flúvico em experimento de coluna com uso matéria orgânica e talo e/ou extrato etéreo de *Cladonia substellata* em pó e/ou diluído incorporado a colunas de solo, simulando período úmido e seco.

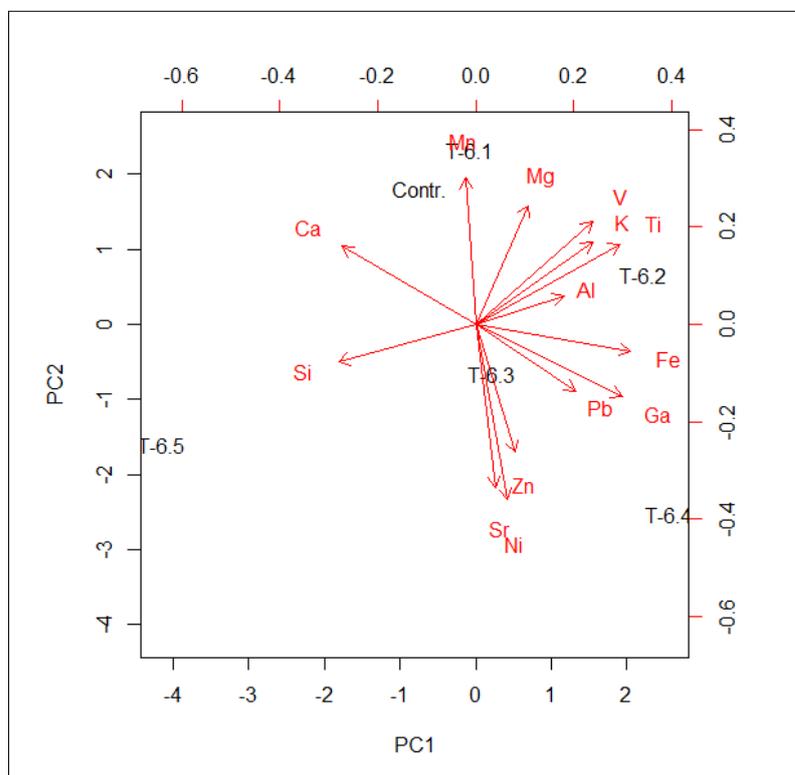


O diagrama da quantificação dos elementos existentes, através da análise de componentes principais, nas amostras de Neossolo Flúvico em experimento de coluna com

uso matéria orgânica e talo e/ou extrato orgânico etéreo de *C. substellata* em pó e/ou diluído incorporado a colunas de solo, simulando período úmido e seco, demonstrou que a PCA formou um fluxo polarizado para T-6.2 e T-6.4. Isso está atrelado ao fato desses tratamentos terem as maiores concentrações dentre os elementos quantificados (Figura 57). A maior incidência de elementos em T-6.2 segue o exposto por Vasconcelos (2013) e Armas *et al.* (2016), quando afirmam que durante intervalo de estiagem hídrica talos liquênicos, especificamente de *C. verticillaris*, liberam seus fenóis e proteínas para o substrato, Neossolo Quartzarênico, onde estes são acumulados na camada superior do solo e interagem lentamente com os íons presentes, condicionando maior capacidade de complexação, do que em intervalo úmido onde rapidamente as substâncias são lixiviadas. Em adição, Vasconcelos *et al.* (2015) ressaltam que talos de *C. verticillaris*, são capazes de capturar pequenas partículas de minerais do solo por ação mecânica e, posteriormente modificá-las no interior do talo por ação de metabólitos através de processos de solubilização parcial e recristalização. Esse fato é ratificado por Asta *et al.* (2001) onde afirmam que talos liquênicos foliosos e crostosos podem deslocar cristais de quartzo ou feldspato da superfície de rochas cristalinas por movimentos de expansão e contração, bem como são capazes de acumular elementos químicos, em que a interação entre substrato e crescimento foi significativa para P, K, Ti, Mn, Fe, Ni e Rb (CLAIR *et al.*, 2002), ficando retidos, principalmente, na parte central do talo (NIMIS *et al.*, 2001).

Evidenciou-se que o controle de campo e T-6.1 tiveram confluência nas concentrações dos elementos quantificados. Devido ao fato da simulação de intervalo seco com uso de extrato orgânico etéreo é possível que a baixa umidade tenha impossibilitado a ação do extrato nos minerais constituintes do solo, apresentando valores próximos ao controle de campo. Observou-se que T-6.3 teve posição central no diagrama, demonstrando valores médios entre os tratamentos avaliados e controle de campo. Em sentido oposto, T-6.5 divergiu dos seus pares, apresentando superioridade de concentrações apenas para Ca e Si. Constatou-se que dentre os elementos quantificados pela análise de EDXRF, apenas o alumínio teve perda, ficando abaixo dos valores do controle de campo. Isso confirma o processo de interação das substâncias liquênicas percoladas por *C. substellata* e/ou seu extrato orgânico etéreo, sobretudo em T-6.2 e T-6.4. Esses tratamentos foram responsáveis pelas maiores concentrações de Mg, V, K, Ti, Al para T-6.2, e Fe, Ga, Pb, Zn, Sr e Ni para T-6.4. A decomposição biogeoquímica de rochas por compostos secundários de líquens, geralmente ácidos orgânicos fracos, através da solubilização de elementos do substrato, comumente cátions (JONES, 1988), movidos por transporte ativo para a membrana celular (NASH, 1996).

Figura 57 – Análise de componentes principais das amostras de Neossolo Flúvico em experimento de coluna com uso matéria orgânica e talo e/ou extrato etéreo de *Cladonia substellata* em pó e/ou diluído incorporado a colunas de solo, simulando período úmido e seco.



A retenção dos cátions trocáveis nos coloides do solo segue uma série liotrópica, $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$, levando em consideração a carga dos cátions e o tamanho do íon hidratado (RAIJ, 2011). Os cátions trocáveis e os ânions se movem livremente, sendo a absorção dos elementos químicos, de diferentes cargas, pelas raízes das plantas a partir da solução do solo. O sódio trocável se configura como um dos fatores associados à salinidade e, dependendo do teor existente no solo pode interferir na disponibilidade de nutrientes e causar queimaduras foliares (DE PASCALE *et al.*, 2013). O excesso de sódio absorvido e acumulado pelas plantas se torna altamente tóxico, causando danos fisiológicos, deficiência de nutrientes como K e Ca, estresse hídrico e indução de danos celulares resultantes da irregularidade do sistema oxirredução (DIAS *et al.*, 2016). A elevada concentração de sódio em solos sódicos e salino-sódicos interfere, também, na dinâmica de movimentação da água no solo, prejudicando o processo de infiltração e evaporação, a aeração e o escoamento superficial, principalmente quando a camada superficial do solo é formada por uma crosta de sais (COELHO, 1983). Solos com grande quantidade de sais tendem a possuir baixas taxas de

infiltração, atrelado a isso a presença de argilas expansivas 2:1, sendo típicos do semiárido pernambucano. A eficiência de algumas técnicas de recuperação da fertilidade depende do movimento da água através dos microporos, promovendo o deslocamento da solução salina pela água na lavagem do perfil, como destacam Cavalcante *et al.* (2016) e Coelho (1983). Assim, a adição de matéria orgânica produzida por biodecompositor se revela como uma alternativa simples, prática e viável a ser empregada por pequenos agricultores do semiárido pernambucano, como uma proposta de uso em solos com altos níveis de sais. A partir dos experimentos realizados se constatou que o líquen *C. substellata* e/ou seu extrato etéreo conseguem interagir com os elementos químicos do Neossolo Flúvico, sendo capazes de solubilizar e quelar íons presentes na solução solo. Comprovou-se que esse processo se torna mais viável, para este tipo específico de solo, com a incorporação de matéria orgânica e utilização da água como agente facilitador, sobretudo em experimento com uso de coluna de solo. Essa técnica propicia a lavagem dos sais, possibilitando a interação das substâncias liquênicas, especificamente o ácido úsnico na forma de extrato etéreo adicionado ao solo na forma diluída.

5 CONCLUSÕES

- Constatou-se, a partir dos Índices de vegetação, que a fitofisionomia do município de Cabrobó é influenciada por eventos climáticos, principalmente pelos longos intervalos de ENOS sobre o Nordeste brasileiro.
- Os mapas temáticos do NDVI, SAVI e IAF para o período seco evidenciam a expansão de áreas com solos expostos/susceptíveis à desertificação, restringindo a vegetação lenhosa a enclaves. Durante o período úmido há disseminação da vegetação aberta e densa/cultura irrigada, demonstrando a elevada sensibilidade da Caatinga à variação na quantidade de água no solo.
- Os intervalos anuais analisados evidenciaram como a sazonalidade interfere nas feições da paisagem. A comparação do NDVI com o SAVI permite evidenciar que o SAVI consegue distinguir melhor as classes em ambiente semiárido, quando utilizado em períodos secos.
- A análise dos mapas temáticos de temperatura da superfície indica que a cobertura vegetal tende a influenciar nos valores de temperatura, onde no intervalo de maior umidade se observam médias mais baixas, em comparação ao período seco. Entretanto, ressalta-se que ambos os intervalos analisados apresentaram elevada amplitude térmica 20,9°C (úmido) e 38,5°C (seco), ratificando a expansão de áreas de solo exposto e vegetação não lenhosa para o município.
- Evidenciou-se que o remanescente/fragmento na ilha de Assunção possui uma baixa diversidade florística, possivelmente devido ao histórico de intervenções antrópicas com uso da área para cultivo agrícola.
- Os parâmetros de diversidade florística indicam ser o remanescente/fragmento uma área de regeneração com predominância de uma ou mais espécies sobre outras, evidenciando baixa heterogeneidade, elevada densidade, frequência e dominância de *M. tenuiflora*, confirmando ser esta uma espécie pioneira, indicadora de sucessão secundária progressiva ou de recuperação.
- Constatou-se que as espécies exercem correlações de força entre si no processo de sucessão ecológica, sendo positiva, quando ambas as espécies tendem a aumentar conjuntamente seu número de indivíduos, e correlação negativa quando uma espécie começa a elevar seu número a outra tende a reduzi-lo.
- Verificou-se que o remanescente/fragmento de vegetação na ilha de Assunção, Cabrobó, apresenta a maioria dos seus indivíduos de pequeno porte, com altura inferior a cinco

metros, principalmente pela existência de indivíduos jovens intercalado com exemplares adultos em estratos subarbóreo e arbóreo.

- A fitofisionomia do remanescente/fragmento se caracteriza, predominantemente, por uma vegetação arbustiva subarbórea com feições subarbusivas e arbóreas como classificação dominante, sendo composta por uma subclasse rala e os indivíduos são, em sua maioria, caducifólios.
- Observou-se nos experimentos de biorremediação de Neossolo Flúvico salinizado, que o líquen *C. substellata* ou seu extrato orgânico etéreo são capazes de interagir com os elementos químicos do solo, principalmente os de maior suscetibilidade como cálcio e magnésio.
- A utilização da radiação gama aplicada no talo liquênico, no solo ou em ambos conjuntamente não se mostra viável para diminuição dos níveis de sódio em Neossolo Flúvico.
- A associação de matéria orgânica produzida por biodecompositor em amostras de Neossolo Flúvico se mostrou eficaz, sendo um agente auxiliar, ocasionando efeitos nas propriedades físicas e químicas do solo, essenciais para solos argilosos.
- O uso de biofertilizante, subproduto líquido do processo de decomposição da matéria orgânica, acarretou bloqueio na biossíntese de fenóis por *C. substellata* e aumento expressivo de fósforo no solo, recomendando-se seu uso para culturas agrícolas.
- Constatou-se que dentre as propostas de biorremediação de Neossolo Flúvico, a aplicação da técnica de coluna de solo com adição de matéria orgânica e extrato orgânico etéreo, simulando intervalo úmido, mostrou-se eficiente na redução da concentração de sódio trocável, tornando-o ligeiramente sódico.
- Comprovou-se a capacidade de solubilização, quelação de elementos e capacidade de biorremediação do extrato orgânico etéreo de *C. substellata*, de Neossolo Flúvico salinizado, em associação com matéria orgânica, em ensaios de laboratório.
- Diante dos resultados obtidos nos experimentos para redução da salinidade de Neossolo Flúvico, recomenda-se a lavagem do perfil solo para diluição dos sais existentes e a aplicação de matéria orgânica como fonte de nutrientes, principalmente quando enriquecida de cálcio. A utilização do extrato etéreo de *C. substellata* se mostrou bastante eficaz, porém são necessários estudos que visem sua viabilidade para em larga escala.

REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. 5. ed. Cotia, São Paulo: Ateliê, 2003. 159 p.
- ADAMO, P.; VIOLANTE, P. Weathering of rocks and neogenesis of minerals associated with lichen activity. *In: Applied Clay Science*. V. 16. 229–256. 2000.
- ADAMO, P.; MARCHETIELLO, A.; VIOLANTE, P. The weathering of mafic rocks by lichens. *Lichenologist* 25, 285– 297. 1993.
- AGUIAR NETTO, A. O.; GOMES, C. C. S.; LINS, C. C. V.; BARROS, A. C.; CAMPECHEN, L. F. S. M.; BLANCO, F. F. Características químicas e salino-sodicidade dos solos do Perímetro Irrigado Califórnia, SE, Brasil. *In: Revista de Ciência Rural*, Santa Maria, v. 37, n.6, p. 1640-1645, nov-dez. 2007.
- ALCOFORADO-FILHO, F. G. **Composição florística e fitossociologia de uma área de caatinga arbórea no município de Caruaru, PE**. Dissertação de Mestrado em Botânica, UFRPE, Recife, 220p. 1993.
- ALCOFORADO-FILHO, F.G.; SAMPAIO, E.V.S.B.; RODAL, M.J.N. Florística e fitossociologia de um remanescente de vegetação caducifólia espinhosa arbórea em Caruaru, Pernambuco-PE. *Acta Botanica Brasilica*, v.17, n.2, p. 287-303. 2003.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land). Advance Training and Users Manual – Idaho Implementation, VERSION 1.0, 97p., 2002.
- ALVES JUNIOR, F. T.; FERREIRA, R. L. C.; FERREIRA, R. L. C.; SILVA, J. A. A.; MARANGON, L. C.; CESPEDES, G. H. G. Regeneração natural de uma área de caatinga no sertão Pernambucano, nordeste do Brasil. *CERNE (UFLA)*, v. 19, p. 229-235, 2013.
- ALVES JÚNIOR, F. T. **Estrutura, biomassa e volumetria de uma área de caatinga, Floresta – PE**. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Ciência Florestal, Recife, 2010.
- AMEZKETA, E. An integrated methodology for assessing soilsalination, a pre-condition for land desertification. *In: Journal of Arid Environments*, v. 67, p. 594–606. 2006.
- AMORIM, I. L.; SAMPAIO, E. V. S. B.; ARAÚJO, E. L. Flora e estrutura da vegetação arbustivo-arbórea de uma área de caatinga do Seridó, RN, Brasil. *In: Acta bot. bras.* 19(3): 615-623. 2005.
- ANDRADE, L. A.; PEREIRA, I. M.; LEITE, U. T.; BARBOSA, R. V. Análise da cobertura de duas fitofisionomias de caatinga, com diferentes históricos de uso, no município de São João do Cariri, Estado da Paraíba. *Revista Cerne*, Viçosa, MG, v. 11, n. 3, p. 253-262, 2005.
- ANDRADE-LIMA, D. **Um pouco de ecologia para o nordeste: parte geral**. Recife: UFPE. Centro de Ensino de Ciências do Nordeste, 1972. 76p.

ANDRADE-LIMA, D. The caatingas dominium. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 4, n. 2, p. 149-153, 1981.

ANDRADE-LIMA, D. Estudos Fitogeográficos de Pernambuco. *In: Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica*. Recife, vol. 4, p.243-274, 2007.

ANDREUX, F. Humus in world soils. In: PICCOLO, A. (Ed.). Humic substances in terrestrial ecosystems. Amsterdam: Elsevier, 1996. p. 45- 100.

ARAÚJO, E. L., SAMPAIO, E. V. S. B.; RODAL, M. J. N. Composição florística e fitossociológica de três áreas de caatinga. **Revista Brasileira de Biologia**, 55(4): 595-607. 1995.

ARAÚJO, F. S., SAMPAIO, E. V. S. B., RODAL, M. J. N.; FIGUEIREDO, M. A. Organização comunitária do componente lenhoso de três áreas de carrasco em Nova Oriente, CE. **Revista Brasileira de Biologia**, 58(1): 85-95. 1998.

ARAUJO, G. H.S.; ALMEIDA, J .R.; GUERRA, A. J. T. **Gestão ambiental de áreas degradadas**. 3º ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2008. 320 p.

ARAÚJO, A. S. F.; MELO, W. J. **Biomassa microbiana do solo**. Teresina: Universidade Federal do Piauí. 2012. 150 p.

ARMAS, R.; Oliveira, A. K. ;VASCONCELOS, T. L. ; VICENTE, C. ; SANTIAGO, R.; PEREIRA, E. C.; LEGAZ, M. E. . Effect of soil moisture on the percolation of lichen substances from *Cladonia verticillaris* (Raddi) Fr. in a quartzarenic neosol from Brazil. **Environmental Science: An Indian Journal**, v. 12, p. 243-251, 2016.

ASCASO, C.; GALVAN, J. Studies on the pedogenetic action of lichen acids. **Pedobiologia**, Bd. 16, S. 321—331., 1976.

ASSIS, J. S. **Uso do líquen *Cladonia verticillaris*, matéria orgânica e seus subprodutos na biorremediação de Neossolos Flúvicos salinizados na ilha de Assunção, Cabrobó – PE**. Monografia de conclusão de Curso em Geografia. Universidade Federal de Pernambuco. 2016.

ATLAS, R. M. Microbial degradation of petroleum hydrocarbons: an environmental perspective. *In: Microbiology*, 45(1):180-209. 1981.

ATLAS, R.M.; BARTHA, R. Hydrocarbon biodegradation and oil spill bioremediation. **Adv. Microbial Ecol.** 12, 287-338. 1992.

AUBREVILLE, A. **Climats, Forêts et Désertification de l'Afrique Tropicale**. Paris, Société d'Éditions Géographiques, Maritimes et Coloniales. 1949.

BAALOUSHA, M.; HEINO, M.M.; LE COUSTOMER, B.K. Conformation and size of humic substances: effects of major cation concentration and type, pH, salinity and residence time. *Colloids and surfaces. Physicochemical and engineering aspects*, v. 222, n.1-2, p.48-55, 2006.

- BJELLAND, T.; THORSETH, I. H. Comparative studies of the lichen–rock interface of four lichens in Vingen, western Norway. **Chemical Geology** 192 (2002) 81– 98.
- BAÑUELOS, G.S. Factors influencing field phytoremediation of selenium-laden soils. *In*: TERRY, N. AND BAÑUELOS, G. (Ed), **Phytoremediation of contaminated soil and water**, Boca Raton: Lewis Publishers, 2000, pp 41-59.
- BASTOS, D. C. O. **Manejo da salinidade em irrigação localizada: análise da alternativa de lixiviação incompleta**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Ciências do Solo, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2004. 92p
- BARBOSA, C.B. **Estabilidade de comunidades ribeirinhas no semi-árido brasileiro**. 1998. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. 1998.
- BARBOSA, J. S. S. **Interação e dinâmica de substâncias produzidas por *Cladonia substellata* (líquen) com Neossolos Quartzarênicos de Tabuleiros costeiros do Nordeste**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Geografia. Universidade Federal de Pernambuco. 2018. 72 p.
- BARBOSA, H. M. S. **Análise do comportamento do migmatito sob atuação de *Cladonia substellata* (líquen) como fator de formação primária dos solos**. Monografia de Bacharelado em Ciências Geográficas. Universidade Federal de Pernambuco, 2005.
- BARBOSA, H. M. S. **Influência do nitrogênio na produção de substâncias degradadoras do milonito por *Cladonia substellata* (líquen)**. Dissertação de Mestrado em Geografia. Universidade Federal de Pernambuco, 2009.
- BARBOSA, H. M. S. **Intemperismo biogeoquímico e ciclagem de nitrogênio pela interação do líquen *Cladonia substellata* Vainio com granito e basalto**. Tese de doutorado em Geografia. Universidade Federal de Pernambuco, 2014.
- BARBOSA, D. C. A. de; BARBOSA, M. C. A.; LIMA, L. C. M. **Fenologia de espécies lenhosas da Caatinga**. *In*: LEAL, I. R.; TABARELLI, M.; SILVA, J. M. C. (Ed.). **Ecologia e conservação da Caatinga**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2003.
- BARROS, M. F. C.; FONTES, M. P. F.; ALVAREZ, V. H.; RUIZ, H. A. Recuperação de solos afetados por sais pela aplicação de gesso de jazida e calcário no Nordeste do Brasil. *In*: **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.8, n.1, p.59-64, 2004.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. *In*: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (Ed.). **Matéria orgânica do solo: fundamentos e caracterização**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p.9-26.
- BECERRA, J. A. B.; CARVALHO, S.; OMETTO, J. P. H. B. **Relação das sazonalidades da precipitação e da vegetação no bioma Caatinga: abordagem multitemporal**. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE.
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 6. ed. Viçosa: UFV, 1995. 657 p.

- BERTILLER, M. B. Grazing Effects on Sustainable Semiarid Rangelands in Patagonia: The State and Dynamics of the Soil Seed Bank. *In: Environmental Management*. Vol. 20, No. 1, 2002. pp. 123-132.
- BERTRAND, G. Paisagem e Geografia física global. Esboço metodológico. *In: R. RAÍE GA*, Curitiba, n. 8, p. 141-152, 2004.
- BEŠKOSKI, V. P.; GOJGIĆ-CVIJOVIĆ, G.; SOLEVIC, T. Ex situ bioremediation of a soil contaminated by mazut (heavy residual fuel oil) – A field experiment. *In: Chemosphere*. Vol. 83. 2011. 34-40.
- BESSE, J. M. **Ver a terra**: seis ensaios sobre a paisagem e a geografia. São Paulo: Perspectiva, 2006.
- BEZERRA, J. M.; MOURA, G. B. A.; SILVA, B. B.; LOPES, P. M. O.; SILVA, E. F. F. Parâmetros biofísicos obtidos por sensoriamento remoto em região semiárida do estado do Rio Grande do Norte, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.18, n.1, p.73-84, 2014.
- BRAGA, C.C.; SOARES, F. R.; DANTAS, F. R. C.; BARBIERI, L. F. P. Determinação do albedo e índice de área foliar usando o sensor TM / LANDSAT 5. *In: Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 935-942.
- BRAIDA, J. A. *et al.* Matéria orgânica e seus efeitos na física do solo. *In: Tópicos de Ciências do Solo*, 7:221-278, 2011.
- BRESOLIN, C. C. *et al.* **Fragmento ou remanescente?** Sociedade de Ecologia do Brasil. X Congresso de Ecologia do Brasil. São Lourenço, MG. 2011.
- BROWN, D. H.; BROWN, R. M. Mineral cycling and lichens: the physiological basis. *In: Lichenologist*. 23:293-307. 1991.
- BUNTING, B. T. **Geografia do solo**. Rio de Janeiro: Zahar, 1971. 259 p.
- CALIXTO JÚNIOR, J. T.; DRUMOND, M. A. Estrutura fitossociológica de um fragmento de Caatinga sensu stricto 30 anos após corte raso, Petrolina-PE, Brasil. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 24, n. 2, p. 67-74, 2011.
- CALIXTO JÚNIOR, J.T.; DRUMOND, M.A. Estudo comparativo da estrutura fitossociológica de dois fragmentos de Caatinga em níveis diferentes de conservação. *Pesquisa Florestal Brasileira*, Colombo, v. 34, n. 80, p.345-355, 2014.
- CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOT, E. T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 56, p. 777-783. 1992.
- CAMPBELL, J. B. **Introduction to Remote Sensing**. 2nd ed., Taylor and Francis, London.1996.

CASTELLETTI, C. H. M.; SANTOS, A. M. M.; TABARELLI, M.; SILVA, J. M. C. Quanto ainda resta da Caatinga? Uma estimativa preliminar. In: Leal I. R.; Tabarelli, M.; Silva J. M. C. (Ed.). **Ecologia e Conservação da Caatinga**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2003.p.719-734.

CASSETTI, V. **Ambiente e apropriação do relevo**. São Paulo: Contexto, 1991.

CAVALCANTE, L. F.; SANTOS, R. V. dos; FERREYRA F. F. H.; GHEYI, H. R.; DIAS, T. J. Recuperação de solos afetados por sais. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. **Manejo da salinidade na agricultura**. Fortaleza, INCT Sal, 2010. p. 472.

CAVALCANTE, L. F.; SILVA, G. F.; GHEYI, H. R.; DIAS, T. J.; ALVES, J. C.; COSTA, A. P. M. Crescimento de mudas de maracujazeiro amarelo em solo salino com esterco bovino líquido fermentado. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, vol. 4, núm. 4, outubro-diciembre, 2009, pp. 414-420

CAVALCANTI, A. D. C.; RODAL, M. J. N.; SAMPAIO, E. V. S. B; COSTA, K. C. C. Mudanças florísticas e estruturais, após cinco anos, em uma comunidade de Caatinga no estado de Pernambuco, Brasil. **Acta bot. bras.** 2009.

CAVALCANTE, L.F.; SANTOS, J.B. ; SANTOS, C.J.O.; FEITOSA FILHO, J.C.; LIMA, E.M.; CAVALCANTE, I.H.L. Germinação de sementes e crescimento inicial de maracujazeiros irrigados com água salina em diferentes volumes de substrato. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.24, n.3, p. 748-751, 2002.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; BARSÍ, J. A. Revised Landsat -5 Thematic Mapper Radiometric Calibration. In: **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 4, n. 3, p. 490-494, 2007.

CHAVES, I. B; LOPES, V. L.; FFOLLIOTT, P.; SILVA-PAES, A. P. Uma classificação morfo-estrutural para descrição e avaliação da biomassa da vegetação da Caatinga. In: **Revista Caatinga**. v.21, n.2, p.204-213, abril/junho de 2008.

CHAVES, L. H. G.; TITO, G. A.; CHAVES, I. B.; LUNA, J. G.; SILVA, P. C. M. PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO ALUVIAL DA ILHA DE ASSUNÇÃO – CABROBÓ (PERNAMBUCO). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 28, núm. 3, mayo-junio, 2004, pp. 431-437.

CHAPIN, F.S., ZAVALETA, E.S., EVINER, V.T., NAYLOR, R.L., VITOUSEK, P.M., REYNOLDS, H.L. **Consequences of changing biodiversity**. Nature, 2000.

CABRAL, G. A. L.; SAMPAIO, E. V. S. B.; CORTEZ-ALMEIDA, J. S. Estrutura Espacial e Biomassa da Parte Aérea em Diferentes Estádios Sucessionais de Caatinga, em Santa Terezinha, Paraíba. **Revista Brasileira de Geografia Física**, vol. 6, n.03, 2013.

CARTER, M. R Organic matter and sustainability. In: REES, R. M., BALL, B. C.; CAMPBELL, C. D.; WATSON, C. A (Ed.). **Sustainable management of soil organic matter**. New York: CABI,2001. p. 9-22.

CHEN, J.; BLUME, H. P.; BEYER, L. Weathering of rocks induced by lichen colonization — a review. *In: Catena*. 39. 121–146. 2000.

CHEN, J.; YANG, Q.; HUANG, T.; ZHANG, Y.; DING, R. Enhanced bioremediation of soil contaminated with viscous oil through microbial consortium construction and ultraviolet mutation. *In: World J Microbiol Biotechnol*. Vol. 27. 2011. 1381–1389.

CHHABRA, R. **Soil salinity and water quality**. Rotterdam: A.A. Balkema Publishers, 1996. 283p.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999. 236p.

CHRISTENSEN, B. T. **Organic matter in soil structure, function and turnover**. Tjele: Research Centre Foulum, 2000. p. 95.

COIMBRA-FILHO, A.F. & I. DE G. CÂMARA. **Os limites originais do bioma Mata Atlântica na região Nordeste do Brasil**. Fundação Brasileira para Conservação da Natureza, Rio de Janeiro. 1996.

COLLA, L. M.; PRIMAZ, A. L.; LIMA, M.; BERTOLIN, T. E.; COSTA, J. A. V. Isolamento e seleção de fungos para biorremediação a partir de solos contaminados com herbicidas triazínicos. *In: Ciênc. agrotec.*, Lavras, v. 32, n. 3, p. 809-813, maio/jun., 2008.

COLLARD, F. H. *et al.* Efeito do uso de biofertilizante agrobio na cultura do maracujazeiro amarelo (*Passiflora edulis f. flavicarpa Deg*). *In: Rev. biociênc.*, Taubaté, v.7, n.1, p.15-21, jan.-jun.2001.

CONCEIÇÃO, M.; MANZATTO, C. V.; ARAÚJO, W. S.; MARTIN NETO, L.; SAAB, S. C.; CUNHA, T. J. F.; FREIXO, A. A. 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*. Nº 3, agosto 1999, p.1-5.

CONDEPE/FIDEM. **As comunidades indígenas de Pernambuco**. Recife: Condepe, 1981. p. 44 a 47.

CONTI, J. B. **O conceito de desertificação**. *In: Climatologia e estudos da paisagem*. Rio Claro, Vol. 03 – n.2, junho/dezembro, 2008. p. 39.

COSTA, D. L. C. R. **Avaliação do processo de pedogênese do basalto a partir da ação do ácido úsnico sob condições ambientais e laboratoriais**. Dissertação de Mestrado em Geografia. Universidade Federal de Pernambuco, 2003.

CULBERSON, W. L.; JOHNSON, A. **Second Supplement to Chemical and Botanical Guide of Lichen Products**. St. Louis, The American Bryological and Lichenological Society, Inc., 1977. 400p.

CUNHA, T. J.; MENDES, A. M. S.; GIONGO, V. **Matéria orgânica do solo**. 2015.

DANTAS, J. A. N. *et al.* Qualidade do solo sob diferentes usos e manejos no Perímetro irrigado Jaguaribe/Apodi – CE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. V. 16, n. 1, p.18-26. 2012.

DERCOVA, K.; SEJÁKOVÁ, Z.; SKOKANOVA, M. Bioremediation of soil contaminated with pentachlorophenol (PCP) using humic acids bound on zeolite. *In: Chemosphere*. Vol. 66. 2007. 783–790.

DIAS, S. C. Planejando estudos de diversidade e riqueza: uma abordagem para estudantes de graduação. *In: Acta Scientiarum. Biological Sciences*. Maringá, v. 26, no. 4, p. 373-379, 2004.

DIAS, N. S.; BLANCO, F. F.. Efeitos dos sais no solo e na planta. *In: Manejo da salinidade na agricultura: Estudo básico e aplicados*. Orgs. GHEYI, H. R., DIAS, N. S., LACERDA, C. F. Fortaleza, INCT Sal, 2010. 472p.

DREW, D. **Processos interativos homem-meio ambiente**. 5. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2002. 206p.

DRUMOND, M.A, *et al.* **Avaliação e identificação de ações prioritárias para a conservação, utilização sustentável e repartição de benefícios da biodiversidade do bioma Caatinga**. Petrolina: Documento para discussão no GT Estratégias para o Uso Sustentável, 2000.

ELMORE, A. J.; MUSTARD, J. F.; MANNING, S. J.; LOBELL, D. B. **Quantifying Vegetation Change in Semiarid Environments: Precision and Accuracy of Spectral Mixture Analysis and the Normalized Difference Vegetation Index**. *Remote Sensing of Environment*, New York, v. 73, n. 1, p.87-102, 21 jan. 2000.

EMBRAPA. **Sistema de classificação brasileiro de solos**. Brasília: SPI, 1999. 412 p.

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

EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solos**. Rio de Janeiro: SPI, 1997. 212 p.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solos**. 2 ed. rev. ampl. Rio de Janeiro: SPI, 2015. 212 p.

ERBISCH, F. H. Effects of acute and chronic gamma radiation on *Cladonia sylvatica* and *Parmelia sulcata*. *In: USAEC REPORT COO-2087-7*, Michigan Technological University, 1974

FARIAS, S. G. G.; RODAL, M. J. N.; MELO, A. L.; SILVA, M. A. M.; LIMA, A. L. A. Fisionomia e estrutura de vegetação de caatinga em diferentes ambientes em Serra Talhada - Pernambuco. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 435-448, abr.-jun., 2016.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 1980.

_____. **Food aid in figures**. Roma. 1984.

_____. **African agriculture: the next 25 years**. Roma, 1986.

_____. **Protect and produce**. Roma, 1992.

FAVERO-LONGO, S. E.; CASTELLI, D.; SALVADORI, O.; BELLUSO, E.; PIERVITTORI, R. Pedogenetic action of the lichens *Lecidea atrobrunnea*, *Rhizocarpon geographicum* gr. and *Sporastatia testudinea* on serpentized ultramafic rocks in an alpine environment. *In: International Biodeterioration & Biodegradation*. 56. 17–27. 2005.

FELFILI, J.M. & REZENDE, R.P. **Conceitos e métodos em fitossociologia**. Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Florestal, Brasília. 2003.

FERNÁNDEZ, Z. H.; SANTOS JÚNIOR, J. A.; AMARAL, R. S.; ALVAREZ, J. R. E.; SILVA, E. B.; FRANÇA, E. J.; MENEZES, R. S. C.; FARIAS, E. E. G.; SANTOS, J. M. N.; EDXRF as an alternative method for multielement analysis of tropical soils and sediments. **Environmental Monitoring and Assessment** (DORDRECHT. ONLINE), v. 189, p. 447, 2017.

FEREIRA, J. M. S.; FERREIRA, H. S.; SILVA, H. A.; SANTOS, A. M.; GALVÍNIO, J. D. Análise Espaço-Temporal da Dinâmica da Vegetação de Caatinga no Município de Petrolina – PE. *In: Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 04 (2012) 904-922 p.

FREIRE, M. B. G.; FREIRE, F. J. Fertilidade do solo e seu manejo em solos afetados por sais. *In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F. Fertilidade do solo*. Viçosa: SBCS, 2007. Cap. 16. 929-954 p.

FREIRE, M. B. G.; SOUZA, E. R.; FREIRE, F. J. Fitorremediação de solos afetados por sais. *In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. Manejo da salinidade na agricultura*. Fortaleza, INCT Sal, 2010.

GALVAN, J.; ASCASO, C.; RODRIGUEZ. The pedogenic action of lichen in metamorphic rocks. *In: Pedobiologia*, 21. 1981. pp.60-73.

GALVÍNIO, J. D. *et al.* **Sensoriamento remoto e análise ambiental**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2012.

GLANZT, M. H.; ORLOVSKY, N. S.; Desertification: A review of the concept. *In: Desertification Control Bulletin*. 9: 15-22. 1983.

GOMES, J. J.; TOLEDO FILHO, R. D.; NASCIMENTO, J. W. B.; SILVA, V. R.; NÓBREGA, M. V. Características tecnológicas da *Prosopis juliflora* (Sw.) DC. e alternativas para o uso racional. *In: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.11, n.5, p.537–542, 2007.

GUERRA, A. J. T.; MARÇAL, M. S. **Geomorfologia ambiental**. 3 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010.

GUERRA, A. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia e Meio Ambiente**. 4º ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003. 372 p.

- HALE, M. E. **The Biology of Lichens**. 3ed. London. Edward Arnold Pub., 1983, 90p.
- GUERRA, J. G. M. *et al.* Macromoléculas e substâncias húmicas. In: Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. 2 ed. Porto Alegre: Metrópoles, 2008. p. 19-26.
- HARTSHORNE, R. **Propósitos e natureza da geografia**. São Paulo: HUCITEC. 1978.
- HENRY, J. L.; JOHNSON, W. E. **The nature and management of salt-affected soils in Saskatchewan**. Saskatoon: University of Saskatchewan, 1977. 26p.
- HUOVINEN, K.; AHTI, T. The composition and contents of aromatic lichen substances in the genus *Cladina*. **Ann. Bot. Fennici**, v. 23, p. 93-106., 1986.
- HUETE, A. R. A soil adjusted vegetation index (SAVI). In: **Remote Sensing of Environment**, v.25, n.3, p.295-309, 1988.
- HUNECK, S.; YOSHIMURA, I. **Identification of lichen substances**. Springer Verlag, Berlin. 1996. 504p.
- HUNECK S. The significance of lichens and their metabolites. *Naturwissenschaften* 86, 559-570. 1999.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário**. 2006.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico**. 2010.
- ILHA, D. B.; PAGOTTO, M. A. Avaliação do desempenho dos índices de vegetação NDVI e SAVI no bioma Caatinga, a partir de imagens do satélite Landsat 8. **Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR**, 2017. 677-684 p.
- ISKANDER, I. K.; SYERS, J. K. Soil. In: **J. Soil, Sci.** v. 23. 255. 1972.
- ISRIC/UNEP. **Status of desertification and implementation of the United Nations Plan of Action to Combat Desertification**. Nairobi, 1991.
- JALFIM, A. **Meio Ambiente Brasil: avanços e obstáculos pós-Rio 92**. CAMARGO, A; CAPOBIANO, J. P. R.; OLIVEIRA, J. A. P. (orgs.). 2 ed. São Paulo: Estação Liberdade: Instituto Socioambiental; Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas. 2004.
- JENSEN, J.R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009.
- JONES, D. Lichens and pedogenesis. In: **Handbook of lichenology**. Vol III, M. Galun ed. CRC Press, Boca Raton, FL. pp. 109-124. 1988.
- KAGEYAMA, P; GANDARA, F.B. Recuperação de áreas ciliares. In: **RODRIGUES, RR; LEITÃO FILHO, HF. (Ed.). Matas ciliares: conservação e recuperação**. 2.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo; FAPESP, 2001.

KASSAS, M. Desertification: a general review. *In: Journal of Arid Environments*. 30:115-128. 1995

LACERDA, C. F. *et al.* Changes in growth and in solute concentrations in sorghum leaves and roots during salt stress recovery. *In: Environmental and Experimental Botany*. 54 (2005) 69–76.

LAL, R. Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality, and sustainability. *In: Soil & Tillage Research*, 27, 1-8. 1993.

LAMAS, P. B.; RIVAS, B. M. T.; SILVA, H. B. M. Colonização Por líquenes de Igrejas de granito na Galiza noroeste da Espanha. *In: Sci.Total Environ*. 167, 343-351. 1995.

LARA, R.; BENAVENTE, J. Electrokinetic and surface chemical characterizations of an irradiated microfiltration polysulfone membrane: Comparison of two irradiation doses. *In: Journal of Colloid and Interface Science*. 310. 519–528. 2007.

LEAL, I. G.; ACCIOLY, A. M. A.; NASCIMENTO, C. W. A.; FREIRE, M. B. G. S.; MOTENEGRO, A. A. A.; FERREIRA, F. L. Fitorremediação de solo salino sódico por *Atriplex nummularia* e gesso de jazida. *In: Revista Brasileira de Ciências do Solo*, Vol. 32, pp. 1065-1072, 2008.

LEAL, I. G. **Utilização de *Atriplex nummularia* e gesso de jazida na fitorremediação de solo salino-sódico**. Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal Rural de Pernambuco. 2005. 61 p.

LEAL, I. R.; TABARELLI, M.; SILVA, J. M. C. **Ecologia e conservação da caatinga**. Recife: Ed. Universitária UFPE, 2003. 400 p.

LEE, M.R.; PARSONS, I. Biomechanical and biochemical weathering of lichen-encrusted granite: textural controls on organic- mineral interactions and deposition of silica-rich layers. *Chem. Geol.* 161, 385– 397. 1999.

LEINZ, V.; AMARAL, S. E. **Geologia geral**. 8 ed. São Paulo: Nacional, 1980. 396 p.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 177 p.

LIANG, S. **Quantitative remote sensing of land surfaces**. Wiley Interscience, New Jersey, USA, 534 p. 2004.

LIMA, D. N. S. **Interação do extrato orgânico e do talo do líquen *Cladonia substellata* (Vainio) e insumos orgânicos para biorremediar solos degradados pela salinização**. Monografia de conclusão de Curso em Geografia. Universidade Federal de Pernambuco. 2017.

LIRA, D. R.; ARAÚJO, M. S B. de, ; SAMPAIO, E. V. S. B. ; SILVA, H. A. . Mapeamento e Quantificação da Cobertura Vegetal do Agreste Central de Pernambuco Utilizando o NDVI. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 3, p. 157-162, 2010.

LOPES, W. P.; SILVA, F. A.; SOUZA, A. L.; MEIRA NETO, J. A. A. Estrutura fitossociológica de um trecho de vegetação arbórea no Parque estadual do Rio Doce - Minas Gerais, Brasil. **Acta bot. bras.** 16(4): 443-456, 2002.

MABBUTT, J. A. Desertification indicators. *In: Climatic Change*. 9. p. 113-122. 1986.

MACLEOD, R. D.; CONGALTON, R. G. A quantitative comparison of change-detection algorithms for monitoring eelgrass from remotely sensed data. *In: Photogrammetric engineering and remote sensing*, v.64, n.3, p.207-216. 1998.

MAIA, G. N. **Caatinga: árvores e arbustos e suas utilidades**. 2 ed. Fortaleza: Printcolor Gráfica e Editora, 2012.

MAIA, G. N. **Caatinga: árvores e arbustos e suas utilidades**. D&Z Computação Gráfica e Editora. São Paulo, 2004.

MALDONADO, F. D. **Análise por componentes principais (ACP) na caracterização da dinâmica do uso da terra em área do semi-árido brasileiro: Quixaba – PE. Brasil**. São José dos Campos, INPE. Dissertação de mestrado em Sensoriamento remoto – INPE. 116 p. 1999.

MATALLO JUNIOR, H. **Indicadores de desertificação: histórico e perspectivas**. Brasília: UNESCO, 2001.

MARGESIN, R.; ZIMMERBAUER, A.; SCHINNER, F. Monitoring of bioremediation by soil biological activities. **Chemosphere**. 40. 339-346. 2000.

MARIANO, A. P. **Avaliação do potencial de biorremediação de solos e de águas subterrâneas contaminados como óleo diesel**. Rio Claro/SP: UEP, 2006.p 06 – 22. Programa de Pós-Graduação em Geociência e Meio Ambiente pela Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2006.

MARKHAM, B. L.; BAKER, J. L. Thematic mapper bandpass solar exoatmospherical irradiances. *In: Journal of Remote Sensing*, v. 8, n. 3, p. 517-523, 1987.

MELO, P. **Radiação gama na funcionalidade e interação de *Cladonia salzmännii* Nyl. (líquen) com o solo**. Dissertação de Mestrado em Tecnologias Energéticas Nucleares. Universidade Federal de Pernambuco, 2011. 49 p.

MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. Viçosa: UFV, 2005. 107 p.

MIRANDA, M. F. A. **Diagnóstico e recuperação de solos afetados por sais em perímetro irrigado do sertão de Pernambuco**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal Rural de Pernambuco. 2013. 102 p.

MIRANDA, M. A. *et al.* Condicionadores químicos e orgânicos na recuperação de solo salino-sódico em casa de vegetação. *In: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. V. 15, n. 5, p. 494-490. 2011.

MOHAMED, Y. A., BASTIAANSSES, W. G. M, SAVENIJE, H. H. G, Spatial variability of evaporation and moisture storage in the swamps of the upper Nile studied by remote sensing techniques. *In: Journal of Hydrology*, v.289, p.145–164, 2004.

MOREIRA, R. **Pensar e ser em Geografia**: ensaios de história, epistemologia e ontologia do espaço geográfico. 2 ed. São Paulo: Contexto, 2011a.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Atlas de áreas susceptíveis a desertificação no Brasil**. Santana, M.O. (Org.). Brasília: MMA, 2007. 134 p.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca PAN-Brasil**. Brasília: MMA, 2005. 242 p.

MMA. **Diagnóstico da vegetação nativa do bioma Caatinga**. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2003.

MOREIRA, R. **O pensamento geográfico brasileiro**: as matrizes clássicas originárias. 2 ed. 1º reimpressão. São Paulo: Contexto, 2011b.

MOREIRA, E. B. M. **Balço de energia e evapotranspiração na cidade do Recife-PE por sensoriamento remoto**. Tese de doutorado. Programa de Pós-graduação em Geografia. Universidade Federal de Pernambuco, 2014. 115 p.

MORGAN, P.; WATKINSON, R.J. Hydrocarbon degradation in soils and methods for soil biotreatment. *CRC Crit. Rev. Biotechnol.* 8, 305-333. 1989.

MOURA, D. Z. O. **Intemperização do milonito de *Cladonia substellata***. Monografia de Bacharelado em Ciências Geográficas. Universidade Federal de Pernambuco, 2004.

MUELLER-DOMBOIS D, ELLENBERG H. **Aims and methods of vegetation ecology**. New York: John Wiley e Sons; 1974

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

NASH III, T. H. **Metal tolerance in lichens. In Heavy Metal Tolerance in Plants: Evolutionary Aspects**, ed. A. J. Shaw, pp. 119–131. Boca Raton: CRC Press. 1989.

NERY, C. V. M.; MOREIRA, A. A.; FERNANDES, F. H. S.; ALMEIDA, L. S.; ALMEIDA, R. P. **Utilização do modelo linear de mistura espectral e NDVI para avaliação do comportamento de área desmatada no município de Rio Pardo do Minas/MG**. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.07, n.01. 2014, 130-145 p.

NIEBOER, E.; RICHARDSON, D. H. S.; TOMASSINI, F. D. Mineral uptake and release by lichens: an overview. *In: Bryologist*, 81, 226–246. 1978.

NIMER, E. Desertificação: realidade ou mito? *In: Revista Brasileira de Geografia/IBGE*. Rio de Janeiro, 50 (1): 7-39, jan./mar. 1988.

NORRIS, R.D. **Handbook of Bioremediation**. CRC Press, Boca Raton, Florida.1994.

NOVO, E. M. L. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. São Paulo, 2008, 363p.

ODUM, E. P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1988. 434 p.

OKIN, G. S.; PARSONS, A. J.; WAINWRIGHT, J.; HERRICK, J. E.; BESTELMEYER, B. T.; PETERS, D. C.; FREDRICKSON, Ed L. Do Changes in Connectivity Explain Desertification? *In: BioScience*. Vol. 59. Nº 3. March 2009.

OLIVEIRA, J. B.; JACOMINE, P. K. T.; CAMARGO, M. N. **Classes gerais de solos do Brasil: guia auxiliar para seu reconhecimento**. Jaboticabal: FUNEP, 1992. 201 p.

OLIVEIRA, M. E. A., SAMPAIO, E. V. S. B., CASTRO, A. A. J. DE F.; RODAL, M. J. N. Flora e fitossociologia de uma área de transição carrasco-caatinga de areia em Padre Marcos, Piauí. **Naturalia**. São Paulo, 22: 131-150. 1997.

PALMIERI, F.; LARACH, J. O. I.; Pedologia e Geomorfologia. *In: Geomorfologia e Meio Ambiente*. GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). 4º ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003. 372 p.

PESSOA, M. F.; GUERRA, A. M. N. M.; MARACAJÁ, P. B.; LIRA, J. F. B.; DINIZ FILHO, E. T. Estudo da cobertura vegetal em ambientes de caatinga com diferentes formas de manejo no assentamento Moacir Lucena, Apodi – RN. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 21, n. 3, p. 40-48, 2008.

PEREIRA, E. C. G. **Produção de metabólitos por espécies de Cladoniaceae (líquen) a partir de imobilização celular**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Botânica. Universidade Federal Rural de Pernambuco, 1998. 240 p.

PEREIRA, E. C.; VICENTE, C.; LEGAZ, M. E.; SILVA, N. H.; SILVA, E. F.; ANDRADE, L. H. C.; Production of lichen metabolites by immobilized cells of *Cladonia clathrata*. *In: Phytion*, v. 39, p. 79–90. 1999.

PEREIRA, I. M.; ANDRADE, L. A.; SAMPAIO, E. V. S. B; BARBOSA, M. R. Use-history effects on structure and flora of caatinga. **Biotropica**, Lawrence, v. 35, n. 2, p. 154-165, 2003.

PINTO-COELHO, R. M. **Fundamentos em ecologia**. Porto Alegre: Artmed Editora, 2000. 252p.

PINA, V. **Biorremediação de Neossolo Flúvico salinizado pelo processo de desertificação a partir do uso de extrato orgânico e talo de *Cladonia verticillaris* (RADDI) FR.** Monografia de conclusão de Curso em Geografia. Universidade Federal de Pernambuco. 2017.

PIRES, F. R.; SOUZA, C.M.; SILVA, A. A.; PROCÓPIO, S. O.; FERREIRA, I. R. Fitorremediação de solos contaminados com herbicidas. *In: Revista Planta Daninha*. Viçosa – MG, v. 21, n.2, p. 335-341, 2003.

PLIKK, P.; ODELIUS, K.; HAKKARAINEN, M.; ALBERTSSON, A.C. Finalizing the properties of porous scaffolds of aliphatic polyesters through radiation sterilization. *In: Biomaterials*. 27. 5335–5347. 2006.

PRINCE, STEPHEN D.; WESSELS, KONRAD J.; TUCKER, COMPTON J.; NICHOLSON, SHARON E. Desertification in the Sahel: a reinterpretation of a reinterpretation. *In: Global Change Biology*. Vol. 13, 2007. 1308–1313.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos, SP: A. Silva Vieira Ed., 2009.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação**. 2ª Edição. Cubatão: Oficina de Textos, 2012. 160 p

POWLSON, D. S.; JENKINSON, D. S. A comparison of the organic matter, biomass, adenosine triphosphate and mineralizable nitrogen contents of ploughed and directdrilled soils. *In: Journal of Agricultural Science*, Cambridge. 97, 713-721. 1981.

QADIR, M.; GHAFOOR, A.; MURTAZA, G. Use of saline-sodic waters through phytoremediation of calcareous saline-sodic soils. **Agricultural Water Management**, v. 50, p.197-210, 2001.

RAIJ, B. V. **Avaliação da fertilidade do solo**. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato. 2 ed. 1993.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Editora: IPNI. 2011.

RAMALHO, C. I.; ANDREADE, A. P.; FÉLIX, L. P.; LACERDA, A. V.; MARACAJÁ, P. B. Flora arbóreo-arbustiva em áreas de caatinga no semi-árido baiano, Brasil. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 22, n. 3, p. 182-190, 2009.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004. 478p.

REIMANN C.; CARITAT, P. Chemical elements in the environment— factsheets for the geochemist and environmental scientist. Berlin, Germany7 **Springer-Verlag**; 1998.

REINING, P. **Handbook on Desertification Indicators**, American Association of Advanced Science, Washington, D.C., 1978. 48 p

REIS, J. G. **Desertificação no Nordeste**. Recife: SUDENE, 1988. 40p.

REIS, J. G. **Conservação do solo no semi-árido Nordeste: Uma análise crítica**. Recife: SUDENE, 1996. 51p.

REYNOLDS, J.; F; STAFFORD SMITH, D. M. Do Humans Cause Deserts? *In: Dahlem University Press*. ISBN 3-934504-10-8. 2002. 25 p.

REYNOLDS, J. F.; STAFFORD SMITH, D. M.; LAMBIN, E. F.; TURNER, B. L.; MORTIMORE, M.; BATTERBURY, S. P. J.; DOWNING, T. E.; DOWLATABADI, H.;

FERNÁNDEZ, R. J.; HERRICK, J. E.; HUBER-SANNWALD, E.; JIANG, H.; LEEMANS, R.; LYNAM, T.; MAESTRE, F. T.; AYARZA, M.; WALKER, B. Global Desertification: Building a Science for Dryland Development. *In: Science*. Vol. 316, 11 may 2007.

RIBEIRO, E. P. **Mudanças ambientais e desertificação na bacia hidrográfica do rio Pajeú**. Tese de doutorado. Programa de Pós-graduação em Geografia. Universidade Federal de Pernambuco. 2016. 180 p.

RIBEIRO, M. R. **Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais**. Orgs. Rachel Bardy Prado, Ana Paula Dias Turetta e Aluísio Granato de Andrade. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2010a. 171-180 pp.

RIBEIRO, M. R. Origem e classificação dos solos afetados por sais. *In: GHEYI, R.H.; DIAS, N.S.; LACERDA, C.F. Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados*. Fortaleza: INCT Sal, 2010b. 472p.

RIBEIRO, M. R. A pedologia e o planejamento da irrigação no Nordeste do Brasil: uma avaliação crítica. *In: Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, n. 3, p.13-15, 2003.

RICKLEFS, R. E. **A economia da natureza**. 6. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2010. 546 p.

RODAL, M. J. N.; ANDRADE, K. V. A.; SALES, M. F.; GOMES, A. P. S. Fitossociologia do componente lenhoso de um refúgio vegetacional no município de Buíque, Pernambuco. **Rev. Brasil. Biol.**, 58(3): 517-526. 1998.

RODAL, M. J. N.; MARTINS, F. R.; SAMPAIO, E. V. S. B. Levantamento quantitativo das plantas lenhosas em trechos de vegetação de caatinga em Pernambuco. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 21, n. 3, p. 192-205, 2008.

RODAL, M. J. N.; SAMPAIO, E. V. S. B.; FIGUEIREDO, M. A. **Manual sobre métodos de estudos florístico e fitossociológico**. Brasília: SB, 2013. Disponível em: <<http://www.acszanzini.net/wpcontent/uploads/material/manuais/MANUAL%20DE%20FITOSSOCIOLOGIA.pdf>>. Acesso em: 15 de ago. 2017.

RODRIGUES, V. (Org). Avaliação do quadro da Desertificação no nordeste do Brasil: Diagnósticos e perspectivas. *In: Conferência Internacional sobre Impacto das Variações Climáticas e Desenvolvimento Sustentável em Regiões Semiáridas*. Fortaleza, 1992. Disponível em: <http://www.icid18.org/arquivos/volume8_pt.pdf>. Acesso em: 24 ago. 2012.

RODRIGUEZ, J. M. M.; SILVA, E. V. A classificação das paisagens a partir de uma visão geossistêmica. *In: Mercator - Revista de Geografia da UFC*. Vol. 1, nº 1, 2002. pp. 1-18.

ROUSE, J.W.; HASS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *In: Earth resources technology satellite symposium*, 1973. p.309-317.

RUNDEL, P. W. The Ecological Role of Secondary Lichen Substanc. *In: Biochemical Systematics and Ecology*, Vol. 6, 1978. pp. 157-170.

SÁ, F. V. S. *et al.* Influência do gesso e biofertilizante nos atributos químicos de um solo salino-sódico e no crescimento inicial do girassol. *In: Irriga, Botucatu*, v. 20, n. 1, p. 46-59, janeiro-março, 2015.

SÁ, I. B.; SÁ, I. I. S. ; SILVA, A. S. Desertificação na região de Cabrobó-PE: a realidade vista do espaço. *In: Anais – III Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto*. 2006.

SAADI, A. Os sertões que viram desertos. *In: Boletim Informativo da Sociedade de Ciência do Solo*, v. 25, n. 1, p. 10-17, jan/mar. 2000.

SALAMA, R. B.; OTTO, C. J.; FITZPATRICK, R. W. Contributions of groundwater conditions to soil and water salinization. *In: Journal Hydrogeology*. Vol. 7, nº 1, p. 46-64. 1999.

SALTER, J.W. On some reactions of oxalic acid. *In: Chem. Gaz.*, XIV: 130-131. 1856.

SAMPAIO, E. V. S. B.; ARAÚJO, E. L.; SALCEDO, I. H.; TIESSEN, H. Regeneração da vegetação de caatinga após corte e queima, em Serra Talhada, PE. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 5, p. 621-632, 1998.

SAMPAIO, E. V. B.; SAMPAIO, Y. S. B. **Desertificação**: conceitos, causas, consequências e mensuração. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2002. 85 p.

SAMPAIO, E. V. B.; ARAÚJO, M. S. B.; SAMPAIO, Y. S. B. Impactos ambientais da agricultura no processo de desertificação no Nordeste do Brasil. *In: Revista de Geografia*. v. 22, n. 1, p. 90-112. 2003.

SANTANA, M. B. **Caracterização e classificação de solos na ilha de Assunção, Cabrobó – Pernambuco**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal Rural de Pernambuco. 2015. 93 p.

SANTOS, R. V.; CAVALCANTE, L. F.; VITAL, A. F. M. Interações salinidade-fertilidade do solo. *In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. Manejo da salinidade na agricultura*. Fortaleza, INCT Sal, 2010. p. 472

SANTOS, M. A. **Recuperação de solo salino-sódico por fitorremediação com *Atriplex nummularia* ou aplicação de gesso**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal Rural de Pernambuco. 2012. 89 p.

SCHATZ, A. The importance of metalbinding phenomena in the chemistry and microbiology of the soil: I. The chelating properties of lichens and lichen acids. *Adv. Front. Plant Sci.* 6, 113– 134. 1963.

SCHENKEL, C. S.; MATALLO JUNIOR, H. **Desertificação**. Brasília: UNESCO, 2003. 80p.

SEAWARD, M. R. D. Lichens in air-polluted environments: multivariate analysis of the factors involved. *In: Proceedings of the Kuopio Meeting on Plant Damages Caused by Air Pollution*. Kuopio, 1977. p. 57-63.

SHIBATA, N.; TOMITA, N.; IKEUCHI, K. Gamma-irradiation aggravates stress concentration along subsurface grain boundary of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) under sliding fatigue environment. *In: Bio-Medical Materials and Engineering*. 13. 35–45. 2003.

SHUKLA, M. K.; EBINGER, M. Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil Tillage Research*, v. 87, p.194-204. 2006.

SILVA, H. A.; GALVÍNCIO, J. D.; PIMENTEL, R. M. M. Índice de vegetação e suas técnicas. *In: Sensoriamento remoto e análise ambiental*. Org. Josiclêda Domiciano Galvêncio. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2012.

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2 ed. Brasília, DF: EMBRAPA Informação tecnológica, 2009. 627p.

SILVA, B. C.G. **Ação do ácido fumarprotocetrárico e talo *in natura* de *Cladonia verticillaris* sobre amostras de migmatito**. Monografia de Bacharelado em Ciências Geográficas. Universidade Federal de Pernambuco, 2005.

SILVA, H. P. B. **Radiossensibilidade gama de *Cladonia substellata* Vainio (líquen) e o consequente efeito sobre rochas calcárias**. Dissertação de Mestrado em Energia Nuclear. Universidade Federal de Pernambuco, 2006.

SILVA, H. P. B. **Efeitos da radiação gama e ultravioleta sobre *Cladonia verticillaris* (Raddi) Fr. (líquen) coletado em diferentes ambientes do Nordeste do Brasil**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco. 2011. 116 p.

SILVA, H. P. B.; COLACO, W.; PEREIRA, E. C.; SILVA, N. H. Sensitivity of *Cladonia substellata* Vainio (lichen) to gamma irradiation and the consequent effect on limestone rocks. **International Journal of Low Radiation**, v. 7, p. 324, 2010

SILVA, E. E.; AZEVEDO, P. H. S.; DE-POLLI, H. **Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO₂)**. Seropédia: Embrapa Agrobiologia, 2007. 4 p. (Embrapa Agrobiologia. Comunicado técnico, 99).

SILVA, E. E.; AZEVEDO, P. H. S.; DE-POLLI, H. **Determinação do carbono da biomassa microbiana do solo (BMS-C)**. Seropédia: Embrapa Agrobiologia, 2007. 6 p. (Embrapa Agrobiologia. Comunicado técnico, 98).

SILVA, F. P. **Influência de *Cladonia salzmannii* na ocorrência de fungos micorrízicos arbusculares em rizosfera e desenvolvimento de plântulas**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Bioquímica, Universidade Federal de Pernambuco, 2007. 90 p.

SILVA, G. J. F. **Estimativa de indicadores biofísicos para avaliação do processo de desertificação no município de São João do Cariri – PB.** Dissertação de mestrado em Geografia. Universidade Federal da Paraíba. 2014.

SILVA; A. K. O. **Biorremediação de solos salinizados procedentes de áreas em processo de desertificação mediante uso do líquen *Cladonia verticillaris* (Raddi) Fr.** Dissertação de mestrado em Geografia. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE 2014. 158 p.

SILVA, A. K. O.; PEREIRA, E. C. G. **Uso da radiação gama no líquen *Cladonia verticillaris* para incremento da produção de substâncias modificadoras de solos salinizados.** In: 16º Jornada de Iniciação Científica PIBI/FACEPE/CNPq. Recife, 2012.

SILVA, A. K. O. **Uso de fonte nitrogenada para incremento da síntese de substâncias modificadoras de Luvisolo salinizado no município de Belém do São Francisco (PE) pelo líquen *Cladonia verticillaris* (Raddi) Fr.** Monografia de graduação em Geografia. Universidade Federal de Pernambuco, 2011. 56 p.

SILVA, A. K. O.; PEREIRA, E. C. G. **Uso de fonte nitrogenada para incremento da síntese de substâncias modificadoras de solos salinizados pelo líquen *Cladonia verticillaris*.** In: 15º Jornada de Iniciação Científica PIBI/FACEPE/CNPq - Centenário do Prêmio Nobel de Química: Marie Curie a mulher na ciência. Recife, 2011.

SILVA, A. K. O.; PEREIRA, E. C. G. **Capacidade de recuperação de solos salinizados por *Cladonia verticillaris* (líquen) - Ciclagem de nutrientes em solos subjacentes a líquens.** In: 14º Jornada de Iniciação Científica PIBI/FACEPE/CNPq - Joaquim Nabuco e a luta pela cidadania, Recife, 2010.

SILVA, R. F.; PEREIRA, E. C. **Influência do nitrogênio no metabolismo de *Cladonia verticillaris* e modificação química do solo subjacente.** In: **XVI Congresso de Iniciação Científica da UFPE.** Recife, 2008.

SILVA, R. F.; PEREIRA, E. C. **Uso do NiCl₂ para ativação do metabolismo de *Cladonia verticillaris* e interação de seus produtos com o solo subjacente.** In: **XVII Congresso de Iniciação Científica – CONIC/UFPE.** Recife, 2009.

SILVA, A. M.; SILVA, N. H. **Ação da atranorina sobre amostras de granito da Região Metropolitana do Recife – PE.** In: **IX Congresso de Iniciação Científica UFPE.** V. 1. 2001. p. 100.

SILVA, H. P. B.; MACIEL, L. N. Q.; SILVA, A. M.; SANTOS, R. A.; MOTA-FILHO, F. O.; PEREIRA, E. C.; SILVA, N. H. **Avaliação da ação quelante do ácido úsnico sobre ignimbrito (dados preliminares).** In: **IX Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada.** Recife – Brasil. p. 296. 2001.

SILVEIRA, A. C. **Uso da uréia e do líquen *Cladonia substellata* como proposta para recuperação de Luvisolo salinizado.** Monografia de Bacharelado em Ciências Geográficas. Universidade Federal de Pernambuco, 2010.

SINGH, A. **Digital change detection techniques using remotely-sensed data.** In: **International Journal of Remote Sensing**, v.10. n. 6, p. 989-1003. 1989.

SINGH, V. *et al.* Elemental profile of agricultural soil by the EDXRF technique and use of the Principal Component Analysis (PCA) method to interpret the complex data. **Applied Radiation and Isotopes**. 69 (2011) 969–974.

SHIBATA, N.; TOMITA, N.; IKEUCHI, K. Gamma-irradiation aggravates stress concentration along subsurface grain boundary of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) under sliding fatigue environment. In: **Bio-Medical Materials and Engineering**. 13. 35–45. 2003.

SOTCHAVA, V. B. Por uma teoria de classificação de geossistemas de vida terrestre. In: **Biogeografia**, n. 14, São Paulo, 1978.

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

SOUZA, E. R. **Fitorremediação de Neossolo Flúvico sódico salino de Pernambuco com *Atriplex nummularia***. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal Rural de Pernambuco. 2010. 75 p.

SUDENE. **Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco**. Vol. 01. Recife: SUDENE, 1973. 358 p.

TABARELLI, M.; SILVA, J. M.C. Áreas e ações prioritárias para a conservação da biodiversidade da Caatinga. In: Leal I. R.; Tabarelli, M.; Silva J. M. C. (EE.). **Ecologia e Conservação da Caatinga**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2003.p.777-796.

TABARELLI, M.; A. VICENTE.. Lacunas de conhecimento sobre as plantas lenhosas da caatinga. In: E.V.S.B. Sampaio, A.M. Giuliatti, J. Virgílio & C. Gamarra-Rojas (eds.) **Vegetação e flora da Caatinga**. Associação de Plantas do Nordeste – APNE, Centro Nordestino de Informações sobre Plantas – CNIP, Recife. 2003

TIMMERMANS, J. W.; JIMÉNEZ-MUNÓZ, J. C.; HIDALGO, V.; RICHTER, K.; SOBRINHO, J. A. Estimation of the spatially distributed surface energy budget for AgriSAR 2006, part I: remote sensing model intercomparison. **Ieee Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v.4, p.465-481, 2011.

TURNER, M. G. **Landscape ecology: What Is the State of the Science?**. In: **Rev. Ecol. Evol. Syst.** 36:319–44. 2005.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE/SUPREN, 1977. 91 p.

TROLL, C. A paisagem geográfica e sua investigação. In: **Espaço e cultura**. nº 4, jun/1997.

UETA, J.; PEREIRA, N. L.; SHUHAMA, I. K.; CERDEIRA, A. L. Biodegradação de herbicidas e biorremediação: microrganismos degradadores do herbicida atrazina. **Biotecnologia**, Brasília, v. 10, p. 10-13, 1999.

UNITED STATES SALINITY LABORATORY – USSL STAFF. **Diagnosis and**

improvement of saline and alkali soils. Washington, U.S. Department of Agriculture, 1954. 160p. (Handbook 60).

UNCCD. Ficha Informativa, 2. 1995. Disponível em: <<http://www.unccd.int/publicinfo/factsheets/spa.php>>. Acesso em: 25 set. 2012.

UNCCD. Ficha Informativa, 14. 1977. Disponível em: <<http://www.unccd.int/publicinfo/factsheets/spa.php>>. Acesso em: 25 jan. 2013.

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, T. L. **Efeito do suprimento exógeno de uréia na produção de substâncias degradadoras do migmatito pelo líquen *Cladonia verticillaris*.** Monografia de Bacharelado em Ciências Geográficas. Universidade Federal de Pernambuco, 2007.

VASCONCELOS, T. L. **Efeitos da Expansão Agrícola sobre Ecossistemas: Ação de Fertilizantes Nitrogenados no comportamento de Líquens da Mata Atlântica.** Tese de doutorado. Programa de Pós-graduação em Geografia. Universidade Federal de Pernambuco, 2013.

VASCONCELOS, T. L.; PEREIRA, E.; SILVA, N. H.; VICENTE, C. ; LEGAZ, M. E. Intracellular urease activity in the lichen *Cladonia verticillaris*, and its implication for toxicity. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 98, p. 310-316, 2013.

VASCONCELOS, T. L. ; Oliveira, A. K. ; PEREIRA, E. C. ; SILVA, N. H. ; VICENTE, C.; LEGAZ, M. E. The lichen *Cladonia verticillaris* retains and modifies mineral soil particles inside the thallus. **Catena** (Cremlingen), v. 135, p. 70-77, 2015.

VASCONCELOS SOBRINHO, J. **Processos de desertificação ocorrentes no Nordeste do Brasil: sua gênese e sua contenção.** Recife, Convênio SEMA/SUDENE. 1978a. 101 p.

VASCONCELOS SOBRINHO, J. **Metodologia para identificação dos processos de desertificação:** manual de indicadores. Recife: SUDENE, 1978b. 18 p.

VASCONCELOS SOBRINHO, J. **Processos de desertificação no Nordeste.** Recife: SUDENE, 1983. 98 p.

VASCONCELOS SOBRINHO, J. **Desertificação no Nordeste brasileiro: sua formação e sua contenção.** Recife: Ministério da Educação e Cultura, 2000. 64 p.

VERÓN, S. R.; PARUELO, J. M.; OESTERHELD, M. Assessing desertification. *In: Journal of Arid Environments*. Vol. 66, 2010. 751–763.

VERSTRAETE, M. M.; PINTY, B. Designing spectral indexes for remote sensing applications. **Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, v. 34, p. 1254-1265. 1996.

VITTE, A. C. O desenvolvimento do conceito de paisagem e a sua inserção na Geografia Física. *In: Mercator - Revista de Geografia da UFC*. vol. 6, nº 11, 2007, pp. 71-78.

WARDLOW, B.D.; EGBERT, S.L. Large-area crop mapping using time-series MODIS 250 m NDVI data: an assessment for the U.S. Central Great Plains. **Remote Sensing of Environment**, v.112, p.1096-1116, 2008.

WASTOWSKI, A. D. *et al.* Caracterização dos níveis de elementos químicos em solo, submetido a diferentes sistemas de uso e manejo, utilizando espectrometria de fluorescência de raios-x por energia dispersiva (EDXRF). **Quim. Nova**, Vol. 33, No. 7, 1449-1452, 2010.

WILSON, M.J.; JONES, D. Lichen weathering of minerals and implications for pedogenesis. In: Wilson, R.C.L. (Ed.), *Residual Deposits: Surface Related Weathering Processes and Materials*. **Special Publications of the Geological Society**. Blackwell, London, pp. 5 – 12. 1983.

WU, J. J. Landscape ecology, cross-disciplinarity, and sustainability science. *In: Landscape Ecology*. 21:1–4. 2006.

WWF. **Sobreiro, uma barreira contra a desertificação**. Relatório de junho de 2008. Disponível em: <assets.panda.org/downloads/relatorio_desertificacao.pdf>. Acesso em: Jul. de 2010.