

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

MARIA CAMILA DE BARROS SILVA LEITE

**ATRIBUTOS DE SOLO SOB REVEGETAÇÃO NO SEMIÁRIDO
BRASILEIRO E EXTRAÇÃO DE ELEMENTOS PELAS PLANTAS**

RECIFE

2018

Maria Camila de Barros Silva Leite
Engenheira Agrônoma

**Atributos de solo sob revegetação no Semiárido brasileiro e extração de
elementos pelas plantas**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Ciência do Solo

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Betânia Galvão dos Santos Freire

Coorientadores: Prof^a. Dr^a. Leonor Costa Maia e Prof. Dr. Luiz Guilherme Medeiros Pessoa

RECIFE

2018

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

L533a Leite, Maria Camila de Barros Silva.
Atributos de solo sob revegetação no Semiárido brasileiro e extração de elementos pelas plantas / Maria Camila de Barros Silva Leite. – 2018.
123 f. : il.

Orientadora: Maria Betânia Galvão dos Santos Freire.

Co-orientador: Leonor Costa Maia, Luiz Guilherme Medeiros Pessoa.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, BR-PE, 2018.

Inclui referências.

1. Solos - Manejo 2. Solos - Conservação 3. Solos - Salinidade 4. Plantas e solo
5. Cultivo consorciado 6. Revegetação I. Freire, Maria Betânia Galvão dos Santos,
orient. II. Maia, Leonor Costa, co-orient. III. Pessoa, Luiz Guilherme Medeiros, co-
orient. IV. Título

CDD 664

MARIA CAMILA DE BARROS SILVA LEITE

Atributos de solo sob revegetação no Semiárido brasileiro e extração de elementos pelas plantas

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

Aprovada em 12 de julho de 2018

Prof^a. Dr^a. Maria Betânia Galvão dos Santos Freire
Orientadora
Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Leonor Costa Maia
Universidade Federal de Pernambuco

Dr^a. Ana Dolores Santiago de Freitas
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Alexandre Tavares da Rocha
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Emídio Cantídio Almeida de Oliveira
Universidade Federal Rural de Pernambuco

“Aos meus pais, Ariston e Quitéria, que me incentivaram e me deram forças, amando-me incondicionalmente; e que nunca mediram esforços para que eu chegasse até aqui”.

DEDICO

“Ao meu amor: Melquisedec. Que é amigo, companheiro, esposo... Pela paciência, por não me deixar desanimar, sempre me dar forças e, principalmente, por me amar”.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me conceder o dom da vida e ser meu guia, sem ele nada disso seria possível;

Aos meus pais, Ariston e Quitéria, que sempre lutaram para me dar o melhor, que não mediram esforços para meu crescimento pessoal e profissional, que são responsáveis pela pessoa que me tornei e que sempre me amaram, mesmo com minhas falhas;

A Melqui, meu esposo, amigo e companheiro, que sempre me incentivou, me ouviu e me alegrou, com sua paciência, dedicação e amor. Por sempre estar presente, por me amar e por me fazer amá-lo mais a cada dia;

A minha orientadora Prof^a. Dr^a. Maria Betânia Galvão dos Santos Freire, pela oportunidade de trabalhar ao seu lado e com sua equipe, pelo apoio, por toda ajuda, paciência e atenção;

A Prof^a. Júlia por ter me incentivado na vida acadêmica, pela amizade, apoio e por todas as conversas e conselhos;

A todos do Laboratório de Genética e Biotecnologia Microbiana (LGBM), grande família;

A minha coorientadora Prof^a. Dr^a. Leonor Costa Maia, por ter aberto as portas do Laboratório de Micorrizas, por sua ajuda, sua acolhida e ensinamentos;

Aos que fazem o Laboratório de Micorrizas, em especial a Dani, Juliana, Ingrid, Larissa, Indra e Cláudia, que tiraram minhas dúvidas e me apoiaram nesta pesquisa;

Ao amigo João Victor Jansen, que me ajudou imensamente na adaptação inicial ao laboratório, no esclarecimento de dúvidas, nas coletas de campo, além de todas as conversas de incentivo e descontração;

Aos amigos que fiz durante as idas à UFPE, em especial a Natache, que me ajudou das mais diversas formas;

Ao meu coorientador Prof. Dr. Luiz Guilherme Medeiros Pessoa que me deu apoio nesta pesquisa e me auxiliou no experimento em Serra Talhada;

A Prof^a. Keila Moreira, que de “chefe” tornou-se amiga, cedeu seu laboratório para minhas análises, foi extremamente compreensiva e me auxiliou inúmeras vezes;

Ao Prof. Romualdo, por ter permitido que diversas análises fossem realizadas no Laboratório de Solos e Geologia/UAG;

A Prof^a. Erika Valente e Prof. Gustavo Duda, pela disponibilidade e apoio no desenvolvimento de análises deste trabalho;

Aos meus irmãos (Edgar e Márcio) e a minhas cunhadas (Tathy e Eva), que sempre me ouviram, me deram forças e me apoiaram;

A Eva Vilma, pelas noites que ouviu meus desabafos, pelos conselhos e por ser mais que uma cunhada, ser uma irmã;

Aos “estagiários” Thaís, Cynthia, Gisele, Igor, Sara, Rômulo, Maria Fernanda, Lucas, Matheus, Fernanda, Rodrigo e Beatriz, que se tornaram amigos e mais do que auxiliares nos experimentos, experiências e conhecimentos trocados e conquistas alcançadas;

Aos bolsistas Clarissa e Patrik que, apesar de terem seus projetos, dedicaram parte de seu tempo a me ajudar nas mais diversas análises;

Ao Técnico em Laboratório e amigo Pedro, que me ajudou imensamente, tanto nas análises, como em dúvidas e resolução de problemas;

Às minhas grandes amigas Danúbia e Patrícia Karla, por toda ajuda, pela disponibilidade nas mais diversas situações, pelos momentos de descontração e por suas eternas amizades;

A D. Auzeni e Sr. Joaquim, sogra e sogro, segunda mãe e segundo pai, que fizeram parte de minha caminhada e me acolheram como filha;

Aos que fazem o Laboratório de Química do Solo e aos amigos da Pós-Graduação em Ciência do Solo, em especial a Aglair, Jéssica, Jane, Mayame, Stephany, Adriana, Raquel, Monaliza, Érica, Juliet, Juscélia, Felipe, Clarissa, Arianne, Jamilly, Vinícius, Manu, Tiago, Gerson, Aleksandro e Vanessa, pelas ajudas, incentivos, conversas e por tantos bons momentos compartilhados;

A todos os amigos que fiz em Recife, em especial a Elaine, e às amigas que fiz no pensionato, Ju, Thaís, Rita, Thamires, Ingrid, Suênia, Ana Paula, Thilia, Kelly, Rosângela, Carol, D. Pedrina e Amanda, por todas as conversas e momentos de descontração;

Aos colegas de trabalho, nas pessoas de Wilk, Martone, Luan e Arnaldo, que sempre me ajudaram e apoiaram;

Aos professores Marcelo Metri e Alexandre Tavares, pelas amizades, conselhos e incentivos;

Aos amigos da UAG, Adriano, Jéssica, Anderson, Gabriel, Analice, Arnaldo, Carol, David, Prof^a. Suzana e Thiago, que sempre estiveram dispostos a me escutar e que compartilharam momentos de trabalho e descontração;

Ao Sr. Cláudio e Sr. Jair, que tornaram os dias de trabalho mais felizes;

A Socorro, “Socorrinho”, mais que secretária da Pós, grande amiga;

Aos amigos e familiares que, mesmo de longe, torceram por mim;

A todos os professores da Pós-Graduação em Ciência do Solo, pelos conhecimentos repassados e por sempre estarem a disposição para ajudar;

À FACEPE pela bolsa fornecida;

À banca avaliadora, pela disponibilidade e contribuições;

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a conclusão desta etapa tão importante da minha vida; peço que me perdoem se não citei todos aqui, mas tenho no meu coração o mais profundo carinho e gratidão.

Atributos de solo sob revegetação no Semiárido brasileiro e extração de elementos pelas plantas

RESUMO

A busca por alternativas para a recuperação de solos degradados é constante. A restauração de seus atributos é essencial para a manutenção dos serviços ecossistêmicos. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da revegetação sobre atributos físicos, químicos e biológicos de um solo degradado no Semiárido do Nordeste brasileiro, nas estações seca e chuvosa; bem como analisar a microbiota a ele associada e a extração de elementos pelas diferentes espécies vegetais. Para tanto, um experimento foi instalado em campo em novembro de 2013. A área experimental foi cercada e dividida em quatro blocos, com oito tratamentos: 1) testemunha (sem cultivo de plantas); 2) plantas de Atriplex; 3) plantas de Sabiá; 4) plantas de Leucena; 5) plantas de Nim; 6) consórcio Atriplex e Sabiá; 7) consórcio Atriplex e Nim; 8) consórcio Atriplex e Leucena. Foram realizadas duas avaliações no experimento, a primeira ao final do período seco (Novembro/2015), 24 meses após o transplante, e a segunda ao final do período chuvoso (Maio/2016), aos 30 meses. As coletas foram realizadas em três camadas, 0-10, 10-30 e 30-60 cm, sendo realizada a caracterização física, por meio da composição granulométrica e densidade de partículas, e analisados atributos físicos (argila dispersa em água – ADA, grau de flocculação, densidade do solo e condutividade hidráulica saturada – Ksat) e atributos químicos (pH em água, cátions trocáveis, capacidade de troca catiônica – CTC, carbono orgânico total – COT, nitrogênio total – N, relação C/N, pH e condutividade elétrica da pasta de saturação, e cátions solúveis). Os atributos biológicos foram avaliados na camada superficial, sendo eles o pH rizosférico, respiração basal do solo – RBS, carbono da biomassa microbiana – CBM, quociente metabólico – qCO_2 e quociente microbiano – $qMIC$. Também foi avaliada a presença de fungos micorrízicos arbusculares (FMA), por meio da densidade de glomerosporos, colonização micorrízica e quantificação da glomalina. A estrutura da comunidade microbiana do solo foi analisada pela técnica *fatty acid methyl ester* (FAMES). Na estação chuvosa, as plantas foram coletadas para a análises de Na, K, Ca, Mg, Cl, P e N no tecido vegetal. Os resultados deste trabalho indicam que as espécies vegetais foram eficientes na melhoria de atributos do solo degradado, devido à redução no teor de ADA e aumento no grau de flocculação, bem como diminuição na densidade do solo e aumento na condutividade hidráulica em meio saturado (Ksat). As espécies vegetais também aumentaram o teor de COT no solo e o CBM. Na estação chuvosa, a RBS e o qCO_2 foram menores na área cultivada, comparada à área testemunha. Em geral, a densidade de esporos de FMA e a colonização micorrízica foram maiores na área cultivada. Confirmou-se a formação de associação micorrízica em *Atriplex nummularia* (Chenopodiaceae), com taxas superiores a 50%. A estação chuvosa e ambos os cultivos, isolado ou consórcio, influenciaram positivamente diversos atributos do solo. Com relação à extração de sódio e cloro, o cultivo isolado ou consorciado não influenciou o potencial fitoextrator da Atriplex. E o consórcio de Atriplex com Nim foi mais eficiente na extração de K, Ca, Mg, P e N.

Palavras-chave: Cultivo consorciado. Cultivo isolado. Qualidade do solo. Microbiota.

Soil attributes under revegetation in the Brazilian semiarid region and extraction of chemical elements by plants

ABSTRACT

The search for alternatives for the recovery of degraded soils is constant. The restoration of its attributes is essential for the maintenance of ecosystem services. The objective of this work was to evaluate the influence of revegetation on physical, chemical and biological attributes of a degraded soil in the Brazilian Northeast semiarid, in the dry and rainy seasons; as well as to analyze the associated microbiota and the extraction of chemical elements by different plant species. For that, an experiment was installed in the field, in November of 2013. The experimental area was fenced and divided into four blocks, with eight treatments: 1) control (without plant cultivation); 2) *Atriplex* plants; 3) *Sabiá* plants; 4) *Leucaena* plants; 5) *Neem* plants; 6) *Atriplex* and *Sabiá* consortium; 7) *Atriplex* and *Neem* consortium; 8) *Atriplex* and *Leucaena* consortium. Two evaluations were performed in the experiment, the first at the end of dry period (November/2015), 24 months after transplanting, and the second at the end of rainy season (May/2016) at 30 months. The samples were collected in three layers, 0-10, 10-30 and 30-60 cm, being carried out the physical characterization, by granulometric composition and particle density, and analyzed physical attributes (water dispersed clay - WDC, flocculation degree, soil density and saturated hydraulic conductivity - K_{sat}) and chemical attributes (pH in water, exchangeable cations, cation exchange capacity - CEC, total organic carbon - TOC, total nitrogen - N, C/N ratio, pH and electrical conductivity of the saturation paste, and soluble cations). The biological attributes were evaluated in the superficial layer, being rhizospheric pH, basal respiration of the soil - BRS, carbon of the microbial biomass - CMB, metabolic quotient - qCO_2 and microbial quotient - $qMIC$. The presence of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) was also evaluated through glomerospores density, mycorrhizal colonization and glomalin quantification. The structure of the soil microbial community was analyzed by the fatty acid methyl ester (FAMES) technique. In the rainy season, the plants were collected for analysis of Na, K, Ca, Mg, Cl, P and N in the plant tissue. The results of this work indicate that the plant species were efficient in improving attributes of degraded soil due to the reduction in WDC content and increase in flocculation degree, as well as decrease in soil density and increase in saturated water hydraulic conductivity (K_{sat}). Plant species also increased soil TOC and CMB. In the rainy season, BRS and qCO_2 were lower in the cultivated area, compared to the control area. In general, the FMA spore density and mycorrhizal colonization were higher in the cultivated area. It confirmed the formation of mycorrhizal association in *Atriplex nummularia* (Chenopodiaceae), with rates higher than 50%. The rainy season and both crops, isolated or consortium, positively influenced diverse attributes of the soil. Regarding the extraction of sodium and chloride, the isolated or intercropping culture did not influence the phytoextractor potential of *Atriplex*. *Atriplex* consortium with *Neem* was more efficient at extracting K, Ca, Mg, P and N.

Keywords: Consortium cultivation. Isolated cultivation. Soil quality. Microbiota.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	17
1.1 Hipóteses	18
1.2 Objetivo geral	18
1.3 Objetivos específicos	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Degradação de solos	20
2.2 Revegetação como técnica de recuperação	21
2.3 Fungos micorrízicos arbusculares (FMA).....	22
2.4 Biomassa vegetal e extração de elementos do solo	23
REFERÊNCIAS	24
3 ATRIBUTOS DE SOLO SOB REVEGETAÇÃO E EXTRAÇÃO DE ELEMENTOS PELAS PLANTAS	31
RESUMO.....	32
ABSTRACT	33
3.1 INTRODUÇÃO	34
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	35
3.2.1 Descrição da área	35
3.2.2 Amostragem do solo e planta.....	38
3.2.3 Atributos físicos e químicos do solo	38
3.2.4 Biomassa e extração de elementos pelas plantas	40
3.2.5 Análises estatísticas	40
3.3 RESULTADOS	41
3.3.1 Atributos físicos e químicos do solo	41
3.3.2 Extração de elementos pelas plantas.....	58
3.4 DISCUSSÃO	69
3.4.1 Atributos físicos e químicos do solo	69
3.4.2 Extração de elementos pelas plantas.....	76
3.5 CONCLUSÃO.....	78
REFERÊNCIAS	79
4 FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES E ATRIBUTOS BIOLÓGICOS DE SOLO DEGRADADO SOB REVEGETAÇÃO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO	87
RESUMO.....	88
ABSTRACT	89

4.1 INTRODUÇÃO	90
4.2 MATERIAL E MÉTODOS	92
4.2.1 Descrição da área	92
4.2.2 Amostragem do solo.....	94
4.2.3 Atributos biológicos do solo.....	95
4.2.4 Análise de presença e atividade de fungos micorrízicos arbusculares (FMA)..	96
4.2.5 Análise da estrutura da comunidade microbiana do solo por perfis de ésteres metílicos de ácidos graxos (<i>fatty acid methyl ester</i> , FAMES)	97
4.2.6 Análises estatísticas	97
4.3 RESULTADOS	98
4.3.1 Atributos biológicos do solo.....	98
4.3.2 Análise de presença e atividade de fungos micorrízicos arbusculares (FMA)	100
4.3.3 Análise da estrutura da comunidade microbiana do solo por perfis de ésteres metílicos de ácidos graxos (<i>fatty acid methyl ester</i> , FAMES)	101
4.3.4 Análise multivariada	103
4.4 DISCUSSÃO	106
4.4.1 Modificações nas propriedades biológicas do solo sob revegetação	106
4.4.2 Análise de presença e atividade de fungos micorrízicos arbusculares (FMA)	108
4.4.3 Análise da estrutura da comunidade microbiana do solo por perfis de ésteres metílicos de ácidos graxos (<i>fatty acid methyl ester</i> , FAMES)	110
4.4.4 Análise multivariada	111
4.5 CONCLUSÃO.....	112
REFERÊNCIAS	113
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	123

1 INTRODUÇÃO GERAL

O homem tem causado diversas alterações no ambiente solo, o que tem levado a sua degradação, ou seja, a perda da sua produtividade biológica ou econômica. Essa degradação é acentuada em áreas onde a vegetação não consegue mais se reestabelecer, devido ao aumento da exposição do solo ao sol e à chuva, ocasionando diversos problemas, entre eles a erosão e a salinização (OLIVEIRA et al., 2015; ALVES et al., 2017).

Na região semiárida do Brasil, em áreas onde a caatinga foi retirada, a degradação tem sido observada com frequência, nestas, o processo é conhecido como desertificação (SANTANA et al., 2007). E a busca por alternativas de recuperação tem sido constante.

A revegetação tem sido uma alternativa, por ser uma técnica simples e de baixo custo. As plantas, entre outras coisas, aumentam o teor de matéria orgânica no solo, o que proporciona melhoria nos atributos físicos, químicos e biológicos (QU et al., 2016; NADAL-ROMERO et al., 2016). Diversas características do solo são avaliadas para confirmar a melhoria em sua qualidade, no entanto, os atributos biológicos/microbiológicos vêm ganhando destaque por apresentarem respostas mais rápidas às mudanças de manejo.

A microbiota é essencial em diversos processos que ocorrem no solo, como na decomposição da matéria orgânica e na mineralização de nutrientes. Desta forma, ela também auxilia na recuperação dessas áreas degradadas. Alguns micro-organismos são capazes de contribuir para o desenvolvimento vegetal, proporcionando uma maior garantia no reestabelecimento da vegetação. Entre eles, estão os fungos micorrízicos arbusculares (FMA), que beneficiam as plantas de diversas maneiras, sendo uma delas a absorção de nutrientes (SMITH; READ, 2008).

Para o sucesso da revegetação, também se faz necessário avaliar algumas características das plantas usadas, como por exemplo, produção de biomassa e a extração de elementos. As plantas retornarão estes elementos ao solo por meio da serrapilheira oriunda da senescência de sua parte aérea e raízes. A manutenção e decomposição da serrapilheira influenciam na melhoria da qualidade do solo (ANDRADE et al., 2003; MALUF et al., 2015).

Desta forma, estudos referentes a revegetação de solos degradados são essenciais para que estas áreas possam vir a ser restauradas e, posteriormente, utilizadas para a produção agrícola ou preservadas para a recuperação ambiental.

1.1 Hipóteses

- A introdução de espécies vegetais promove a recuperação de atributos físicos, químicos e biológicos de solos degradados;
- O tipo de cultivo, isolado ou consorciado, promove alterações diferenciadas nos atributos do solo;
- A espécie vegetal influencia a composição da comunidade microbiana do solo;
- O solo sob cultivo influencia a comunidade de fungos micorrízicos arbusculares (FMA);
- A estação seca ou chuvosa altera as propriedades do solo, bem como a sua microbiota;
- O cultivo isolado ou em consórcio influencia o potencial fitoextrator da *Atriplex nummularia*;
- O cultivo isolado ou em consórcio influencia a extração dos elementos do solo pelas espécies vegetais.

1.2 Objetivo geral

Avaliar alterações nas propriedades físicas, químicas e biológicas de solo degradado no Semiárido, sob revegetação, a partir do segundo ano de cultivo de espécies arbustivas e arbóreas, isoladamente ou em consórcio; bem como analisar a microbiota com ele associada.

1.3 Objetivos específicos

- Avaliar as alterações nas propriedades físicas e químicas de solo degradado, após dois anos de cultivo com espécies arbustivas e arbóreas em campo;
- Avaliar a influência do cultivo isolado ou consorciado nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo;

- Avaliar alterações na respiração basal e na biomassa microbiana do solo degradado em função das espécies utilizadas;
- Determinar a densidade de esporos e a produção de glomalina por fungos micorrízicos arbusculares (FMA) presentes no solo cultivado com as diferentes espécies;
- Determinar a taxa de colonização micorrízica das plantas em campo;
- Verificar modificações na composição da comunidade microbiana do solo, por meio da análise de perfis de ácidos graxos (FAMES);
- Avaliar a influência das estações seca e chuvosa sobre os atributos do solo;
- Determinar o conteúdo de nutrientes e sódio extraídos pela biomassa vegetal.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Degradação de solos

A degradação do solo se tornou uma importante preocupação global devido a suas implicações para a segurança alimentar e o ambiente (TEFERI et al., 2016). A degradação pode ser definida como a perda da função ou produtividade do ecossistema e é causada por perturbações das quais o solo não pode se recuperar sem ajuda (BAI et al., 2008). Os processos de degradação do solo envolvem degradação química (ex. depleção de nutrientes, acidificação, salinização), degradação física (ex. erosão e compactação do solo) e degradação biológica (ex. perda da matéria orgânica e redução da fauna do solo) (LAL et al., 1989; FAO; ITPS, 2015).

Uma das principais causas da degradação do solo é a atividade antrópica, devido, por exemplo, à remoção da vegetação natural, pastoreio excessivo e práticas agrícolas sem medidas de controle da erosão (MIKHA et al., 2014; TEFERI et al., 2016). A degradação pode ser notada quando há pouca cobertura vegetal ou baixa produtividade, depleção na biomassa microbiana, período de disponibilidade de água reduzido, baixa diversidade microbiana, redução da matéria orgânica, entre outros (ARONSON et al., 1993; ASMELASH et al., 2016).

De acordo com a Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação (UNCCD), quando o processo de degradação ocorre em regiões áridas, semiáridas e subúmidas secas, ele é conhecido como desertificação (SANTANA et al., 2007).

O Brasil apresenta uma área superior a 1,3 milhões de km² susceptíveis à desertificação, abrangendo os Estados do Nordeste, Minas Gerais e Espírito Santo, o que equivale a 16% do território nacional (SANTANA et al., 2007; MMA, 2013). A retirada da caatinga, vegetação nativa da região semiárida do Brasil, aliada a longos períodos de estiagem, intensifica a susceptibilidade à desertificação (MARTINS et al., 2010).

No Brasil, já são registrados quatro núcleos de desertificação, em Cabrobó – PE, Irauçuba – CE, Seridó – RN e Gilbués – PI. E diversas áreas já estão classificadas como em situação moderada, grave e muito grave de desertificação (MMA, 2007). Assim, é iminente a necessidade de recuperar essas áreas, a fim de evitar que mais núcleos de desertificação se formem.

2.2 Revegetação como técnica de recuperação

A busca por alternativas para a recuperação de solos degradados é constante. A restauração da qualidade do solo é de grande importância para se manter ou melhorar os serviços ecossistêmicos para as gerações futuras (KEESSTRA et al., 2016; VAN HALL et al., 2017). A qualidade do solo, definida como a capacidade de garantir a sustentabilidade do ambiente do solo e da biosfera, pode ser estimada usando vários indicadores (KARLEN et al., 2003; RAIESI, 2017; GUO et al., 2018a).

Diversas propriedades do solo são usadas como indicadores, como pH (STUMPF et al., 2016; QU et al., 2016; BARUT; CELIK, 2017), carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (N) (MOREIRA; COSTA, 2004; AN et al., 2009; VAN HALL et al., 2017), e relação C/N do solo (MOREIRA; COSTA, 2004; AN et al., 2009; NADAL-ROMERO et al., 2016).

Uma alternativa de recuperação que vem ganhando destaque é a revegetação, por ser uma técnica de baixo custo e possibilitar a melhoria dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Essa técnica consiste no plantio localizado de espécies vegetais que não ocorriam mais ou que nunca ocorreram no local (OLIVEIRA et al., 2015).

Na revegetação, podem-se usar diversas espécies vegetais, incluindo leguminosas arbóreas e herbáceas que atuam em simbiose com fungos micorrízicos e bactérias fixadoras de nitrogênio atmosférico (NOGUEIRA et al., 2012). Em ambientes sob estresse hídrico e salino, a espécie halófito *Atriplex nummularia* Lindl. tem sido amplamente estudada (MONTENEGRO et al., 2003; FREIRE et al., 2004; LEAL et al., 2008; BAZIHIZINA et al., 2009; SOUZA et al., 2011).

Espécies que sejam conhecidas pelos agricultores e que tenham potencial para se desenvolver nesses solos degradados também merecem destaque em processos de revegetação. O Sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia* Benth) por sua baixa exigência em fertilidade e umidade dos solos, desenvolve-se bem em áreas muito degradadas (CARVALHO, 2007).

Outras espécies que podem ser usadas em programas de revegetação são a Leucena (*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit), conhecida por ser tolerante à seca (FREIRE; RODRIGUES, 2009), e o Nim (*Azadirachta indica* A. Juss.), que, devido a sua rusticidade se desenvolve bem em solos fisicamente degradados e suporta longos períodos de estiagem (NEVES et al., 2003; NUNES et al., 2012).

É importante considerar que a perda da vegetação natural leva à redução da biodiversidade e o uso de diferentes espécies pode ser fundamental para a recuperação das áreas degradadas. Assim, na revegetação se estimula o plantio heterogêneo, no qual estão envolvidas espécies nativas e exóticas que sejam potenciais para a recuperação dessas áreas (PEREIRA; RODRIGUES, 2012).

São observados resultados da revegetação na estabilidade de agregados, capacidade de retenção de água, porosidade, aeração, diminuição da densidade do solo e menores perdas de água por evaporação, na maior parte pelo efeito da matéria orgânica (LOURENTE et al., 2011; QU et al., 2016; NADAL-ROMERO et al., 2016). O reestabelecimento da cobertura vegetal também diminui o processo erosivo, além de promover a reorganização do ecossistema (AN et al., 2009; STUMPF et al., 2016; QU et al., 2016). No entanto, essas propriedades geralmente se alteram lentamente e não refletem as mudanças de qualidade do solo durante um curto período de tempo (GUO et al., 2018a).

Já as propriedades biológicas/microbiológicas do solo são mais sensíveis a modificações no manejo do solo, com respostas mais rápidas, quando comparadas àquelas de caráter físico ou químico (PAZ-FERREIRO; FU, 2016; SANTOS et al., 2016; GRAZZIOTTI et al., 2017). Diversos atributos biológicos, como respiração basal do solo (RBS), carbono da biomassa microbiana (CBM), quociente metabólico (qCO_2) e outros, são utilizados para avaliar a recuperação de áreas degradadas (AN et al., 2009; QU et al., 2016; SANTOS et al., 2016; GRAZZIOTTI et al., 2017).

Os micro-organismos desempenham papel fundamental na funcionalidade do solo, como na decomposição de matéria orgânica e ciclagem de nutrientes, essenciais para a manutenção e restauração dos ecossistemas. Assim, os atributos biológicos são bons indicadores da qualidade funcional do solo (ZHANG et al., 2006; AN et al., 2009; SANTOS et al., 2016; MEDEIROS et al., 2017). E a microbiota do solo também pode ser alterada pelo tipo de vegetação, que pode afetar a estrutura e propriedades físico-químicas do solo, microclima, qualidade e quantidade de matéria orgânica e exsudatos radiculares (JANGID et al., 2011; CAO et al., 2017). De acordo com Guo et al. (2018b), a revegetação a longo prazo também melhora a diversidade taxonômica microbiana total e aumenta significativamente a diversidade funcional.

2.3 Fungos micorrízicos arbusculares (FMA)

Alguns micro-organismos auxiliam na promoção de crescimento vegetal, como rizobactérias, fungos micorrízicos e outros (HAMILTON et al., 2016; VIMAL et al., 2017), possibilitando o melhor desenvolvimento das plantas (DUPONNOIS et al., 2013; VIMAL et al., 2017) e o possível sucesso da revegetação (SILVA et al., 2015).

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMA), constituem um dos melhores exemplos de associação simbiótica (PEDONE-BONFIM et al., 2018), na qual as raízes de plantas vasculares são colonizadas por fungos específicos, ocorrendo uma perfeita integração funcional entre os simbiontes (SMITH; READ, 2008). Os FMA desempenham um papel ecológico fundamental no funcionamento dos ecossistemas, por incrementar a absorção e translocação de elementos essenciais às plantas (SMITH; READ, 2008), beneficiando o hospedeiro mesmo em condições de estresse. Assim, a presença desses fungos pode auxiliar na recuperação de solos degradados, devido ao melhor desenvolvimento das plantas por eles colonizadas.

Além disso, os FMA produzem glomalina, uma glicoproteína correlacionada com a estabilidade de agregados e com o carbono e o nitrogênio do solo (NICHOLS; WRIGHT, 2005; SILVA et al., 2012). Sua presença/aumento auxilia na restauração de áreas degradadas (SILVA et al., 2014). A glomalina recentemente produzida é comumente quantificada como proteína do solo relacionada à glomalina facilmente extraível (PSRG-FE), que é considerada de fácil decomposição (ROSIER et al., 2006). Outra fração denominada de PSRG total (PSRG-T) representa a glomalina fortemente adsorvida aos minerais do solo e é considerada a fração relativamente persistente (ROSIER et al., 2006; WU et al., 2012). Estudos demonstram que a resposta dessas duas frações de glomalina às mudanças do ambiente do solo pode ser diferente (WU et al., 2012; KUMAR et al., 2018).

Considerando os benefícios promovidos pelos FMA, entende-se a necessidade de estudos que indiquem como o manejo do solo pode ser conduzido de modo a incrementar as associações micorrízicas em processos de recuperação de solos degradados no Semiárido.

2.4 Biomassa vegetal e extração de elementos do solo

Em pesquisas com revegetação, além de avaliar características do solo, é necessário estudar a extração de elementos pelas espécies vegetais usadas. A manutenção e decomposição da serrapilheira contribuem para que parte dos

nutrientes absorvidos retorne ao solo, influenciando na melhoria de sua qualidade (ANDRADE et al., 2003; MALUF et al., 2015).

A produção de serrapilheira rica em nitrogênio devido à associação de espécies vegetais com bactérias fixadoras de nitrogênio, muitas vezes proporciona uma decomposição rápida, promovendo melhorias mais imediatas ao solo (PARSAPOUR et al., 2018). Além disso, a principal fonte de COT do solo é a decomposição da serrapilheira e restos vegetais (AHIRWAL; MAITI, 2018). Manna et al. (2016) correlacionaram o aumento da matéria orgânica do solo à grande produção de serrapilheira pelo cultivo de *Pinus ponderosa* e atribuíram a melhoria dos atributos físicos do solo (umidade na capacidade de campo, porosidade e estabilidade de agregados) a este acréscimo.

De acordo com Andrade et al. (2003), a camada de serrapilheira sobre solos degradados é essencial para reativação da ciclagem de nutrientes entre as plantas e o solo, fornecendo condições mais adequadas para o restabelecimento da vegetação.

Aliada à extração de nutrientes, algumas plantas têm a capacidade de absorver e acumular na parte aérea elementos que causam toxidez a outras espécies, como é o caso do sódio. Entre elas está a *A. nummularia*, que é uma boa alternativa de uso na fitoextração de sódio e cloro do solo (SANTOS et al., 2013), favorecendo o desenvolvimento de outras plantas, usadas para revegetação, que sejam sensíveis a esses elementos.

Diante do exposto, pesquisas relacionadas a revegetação de áreas degradadas são fundamentais, a fim de identificar plantas tolerantes a esses ambientes. Também é necessário melhor entender a associação dessas plantas com micro-organismos que possam contribuir para o estabelecimento das mesmas e melhorar a qualidade dos solos. Assim, juntos, plantas e micro-organismos podem vir a recuperar essas áreas, de modo que elas possam ser posteriormente utilizadas para a produção agrícola ou preservadas para a recuperação ambiental.

REFERÊNCIAS

AHIRWAL, J.; MAITI, S. K. Development of Technosol properties and recovery of carbon stock after 16 years of revegetation on coal mine degraded lands, India. **Catena**, Amsterdam, v. 166, p. 114–123, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.03.026>>.

ALVES, T. L. B.; AZEVEDO, P. V. de; CÂNDIDO, G. A. Indicadores socioeconômicos e a desertificação no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba. **Ambiente e Sociedade**, São Paulo, v. 2, p. 19-40, 2017.

AN, S.; HUANG, Y.; ZHENG, F. Evaluation of soil microbial indices along a revegetation chronosequence in grassland soils on the Loess Plateau, Northwest China. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 41, p. 286–292, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.12.001>>.

ANDRADE, A. G. de; TAVARES, S. R. de L.; COUTINHO, H. L. da C. Contribuição da serrapilheira para recuperação de áreas degradadas e para manutenção da sustentabilidade de sistemas agroecológicos. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 24, n. 220, p. 55-63, 2003.

ARONSON J.; FLORET C.; FLOCH E.; OVALLE C.; PONTANIER R. Restoration and rehabilitation of degraded ecosystems in arid and semi-arid lands: a view from the south. **Restoration Ecology**, Malden, v. 1, p. 8-17, 1993. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.1993.tb00004.x>>.

ASMELASH, F.; BEKELE, T.; BIRHANE, E. The potential role of arbuscular mycorrhizal fungi in the restoration of degraded lands. **Frontiers in Microbiology**, Lausanne, v. 7, n. 1095, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01095>>.

BAI, Z. G.; DENT, D. L.; OLSSON, L.; SCHAEPMAN, M. E. Proxy global assessment of land degradation. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 24, p. 223–234, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00169.x>>.

BARUT, Z.B.; CELIK, I. Tillage effects on some soil physical properties in a semi-arid Mediterranean Region of Turkey. **Chemical Engineering Transactions**, Budapest, v. 58, p. 217-222, 2017. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.3303/CET1758037>>.

BAZIHIZINA, N.; COLMER, T.D.; BARRETT-LENNARD, E.G. Response to non-uniform salinity in the root zone of the halophyte *Atriplex nummularia*: growth, photosynthesis, water relations and tissue ion concentrations. **Annals of Botany**, London, v. 104, p. 737–745, 2009.

CAO, C.; ZHANG, Y.; CUI, Z.; FENG, S.; WANG, T.; REN, Q. Soil bacterial community responses to revegetation of moving sand dune in semi-arid grassland. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 101, n. 15, p. 6217-6228, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s00253-017-8336-z>>.

CARVALHO, P. E. R. Sabiá: *Mimosa caesalpiniiifolia*. **Embrapa**, Colombo, Circular Técnica 135, p. 1-10, 2007.

DUPONNOIS, R.; RAMANANKIERANA, H.; HAFIDI, M.; BAOHANTA, R.; BAUDOIN, E.; THIOULOUSE, J.; SANGUIN, H.; BÂ, A.; GALIANA, A.; BALLY, R.; LEBRUN, M.; PRIN, Y. Des ressources végétales endémiques pour optimiser durablement les opérations de réhabilitation du couvert forestier en milieu méditerranéen et tropical: exemple des plantes facilitatrices vectrices de propagation des champignons mycorrhiziens. **Comptes Rendus Biologies**, Paris, v. 336, n. 5,6, p. 265-272, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.crv.2013.04.015>>.

FAO; ITPS. **Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report**. Roma, 2015. 608 p.

FREIRE, A. L. de O.; RODRIGUES, T. de J. D. A salinidade do solo e seus reflexos no crescimento, nodulação e teores de N, K e Na em leucena (*Leucaena leucocephala* (Lam.) De Vit.). **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, Espírito Santo do Pinhal, v. 6, n. 2, p. 163-173, 2009.

FREIRE, S. V.; MARTINEZ, C. P.; PORTO, E. R.; OLIVEIRA, B. R. B.; MAIA, L. C. Atividade microbiana em solo do Semi-Árido sob cultivo de *Atriplex nummularia*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 8, p. 757-762, 2004.

GRAZZIOTTI, D.; GRAZZIOTTI, P.; RAGONEZI, C.; SILVA, A.; PEREIRA, I.; SILVA, E. Microbiological attributes of soil under spontaneous restoration. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 24, e20160069, 2017. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.006916>>.

GUO, S.; HAN, X.; LI, H.; WANG, T.; TONG, X.; REN, G.; FENG, Y.; YANG, G. Evaluation of soil quality along two revegetation chronosequences on the Loess Hilly Region of China. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 633, p. 808–815, 2018a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.210>>.

GUO, Y.; CHEN, X.; WU, Y.; ZHANG, L.; CHENG, J.; WEI, G.; LIN, Y. Natural revegetation of a semiarid habitat alters taxonomic and functional diversity of soil microbial communities. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 635, p. 598–606, 2018b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.171>>.

HAMILTON, C. E.; BEVER, J. D.; LABBÉ, J.; YANG, X.; YIN, H. Mitigating climate change through managing constructed-microbial communities in agriculture. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, New York, v. 216, p. 304-308, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.10.006>>.

JANGID, K.; WILLIAMS, M. A.; FRANZLUEBBERS, A. J.; SCHMIDT, T. M.; COLEMAN, D. C.; WHITMAN, W. B. Land-use history has a stronger impact on soil microbial community composition than aboveground vegetation and soil properties. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v. 43, n. 10, p. 2184-2193, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.06.022>>.

KARLEN, D. L.; DITZLER, C. A.; ANDREWS, S.S. Soil quality: why and how? **Geoderma**, Amsterdam, v. 114, p. 145–156, 2003.

KEESSTRA, S. D.; BOUMA, J.; WALLINGA, J.; TITTONELL, P.; SMITH, P.; CERDÀ, A.; MONTANARELLA, L.; QUINTON, J.N.; PACHEPSKY, Y.; VAN DER PUTTEN, W. H.; BARDGETT, R. D.; MOOLENAAR, S.; MOL, G.; JANSEN, B.; FRESCO, L. O. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. **Soil**, Göttingen, v. 2, p. 111-128, 2016.

KUMAR, S.; SINGH, A. K.; GHOSH, P. Distribution of soil organic carbon and glomalin related soil protein in reclaimed coal mine-land chronosequence under tropical condition. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 625, p. 1341–1350, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.061>>.

LAL, R.; HALL, G. F.; MILLER, F. P. Soil degradation: I. Basic processes. **Land Degradation & Rehabilitation**, Chichester, v. 1, 51-69, 1989.

LEAL, I. G.; ACCIOLY, A. M. A.; NASCIMENTO, C. W. A.; FREIRE, M. B. G. dos S.; MONTENEGRO, A. A. A.; FERREIRA, F. L. Fitorremediação de solo salino sódico por *Atriplex nummularia* e gesso de jazida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3 p. 1065-1072, 2008. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000300015>>.

LOURENTE, E. R. P.; MERCANTE, F. M.; ALOVISI, A. M. T.; GOMES, C. F.; GASPARINI, A. S.; NUNES, C. M. Atributos microbiológicos, químicos e físicos de solo sob diferentes sistemas de manejo e condições de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 1, p. 20-28, 2011.

MALUF, H. J. G. M.; SOARES, E. M. B.; SILVA, I. R. da; NEVES, J. C. L.; SILVA, M. F. de O. Disponibilidade e recuperação de nutrientes de resíduos culturais em solo com diferentes texturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 6, p. 1690-1702, 2015. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1590/01000683rbc20140658>>.

MANNA, L. L.; BUDUBA, C. G.; ROSTAGNO, C. M. Soil erodibility and quality of volcanic soils as affected by pine plantations in degraded rangelands of NW Patagonia. **European Journal of Forest Research**, Heidelberg, v. 135, p. 643–655, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10342-016-0961-z>>.

MARTINS, C. M.; GALINDO, I. C. DE L.; SOUZA, E. R. DE; POROCA, H. A. Atributos químicos e microbianos do solo de áreas em processo de desertificação no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 6, p. 1883-1890, 2010. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000600012>>.

MEDEIROS, E. V.; DUDA, G. P.; SANTOS, L. A. R. DOS; LIMA, J. R. DE S.; ALMEIDA-CORTÉZ, J. S. DE; HAMMECKER, C.; LARDY, L.; COURNAC, L. Soil organic carbon, microbial biomass and enzyme activities responses to natural regeneration in a tropical dry region in Northeast Brazil. **Catena**, Amsterdam, v. 151, 137-146, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.12.012>>.

MIKHA, M. M.; BENJAMIN, J. G.; STAHLMAN, P. W.; GEIER, P. W. Remediation/restoration of degraded soil: I. Impact on soil chemical properties. **Agronomy Journal**, Madison, v. 106, n. 1, p. 252-260, 2014.

MMA. **Atlas das áreas susceptíveis à desertificação do Brasil**. Brasília: MMA, 2007. 134 p.

MMA. **Relatório Técnico Nacional de Implementação da UNCCD**. Brasília: IICA, 2013. Disponível em: <<http://www.iicabr.iica.org.br/wp-content/uploads/2014/03/Produto-3-e-Folha-de-Rosto-Vers%C3%A3o-Final-J%C3%Balio-Paupitz.pdf>>.

MONTENEGRO, A. A. de A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MARINHO, I.; SILVA, V. de P.; ANDRADE, A.; SILVA, J.G. da. Uso de água subterrânea salina em halófitas no semiárido nordestino. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 2, p. 75–84, 2003.

MOREIRA, A.; COSTA, D. G. Dinâmica da matéria orgânica na recuperação de clareiras da floresta amazônica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 10, 1013-1019, 2004.

NADAL-ROMERO, E.; CAMMERAAT, E.; PÉREZ-CARDIEL, E.; LASANTA, T. Effects of secondary succession and afforestation practices on soil properties after cropland abandonment in humid Mediterranean mountain areas. **Agricultural and Forest Entomology**, Oxford, v. 228, p. 91-100, 2016.

NEVES, B. P. das; OLIVEIRA, I. P. de; NOGUEIRA, J. C. M. Cultivo e Utilização do Nim Indiano. **Embrapa**, Goiás, Circular técnica 62, p. 1-12, 2003.

NICHOLS, K. A.; WRIGHT, S.F. Comparison of glomalin and humic acid ineight native U.S. soils. **USDA-ARS/UNL Faculty**, Lincoln, v. 170, n. 12, p. 985-997, 2005.

NOGUEIRA, N. O.; OLIVEIRA, O. M.; MARTINS, C. A. da S.; BERNARDES, C. de O. Utilização de leguminosas para recuperação de áreas degradadas. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 8, n. 14, p. 2121–2131, 2012.

NUNES, J. C.; CAVALCANTE, L. F.; LIMA NETO, A. J. de; REBEQUI, A. M.; DINIZ, B. L. M. T.; GHEYI, H. R. Comportamento de mudas de nim à salinidade da água em solo não salino com biofertilizante. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 11, p. 1152–1158, 2012.

OLIVEIRA, A. P. G.; MARCÍLIO, G. S.; MENDES, D. F.; SOUZA, T. da S. de; AMARAL, A. A. do. Revegetação, remediação e uso de geotécnicas para recuperação de ambientes degradados. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 11, n. 22, p. 212-225, 2015.

PARSAPOUR, M. K.; KOOCH, Y.; HOSSEINI, S. M.; ALAVI, S. J. Litter and topsoil in *Alnus subcordata* plantation on former degraded natural forest land: A synthesis of age-sequence. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 179, p. 1–10, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.still.2018.01.008>>.

PAZ-FERREIRO, J.; FU, S. Biological indices for soil quality evaluation: perspective and sand limitations. **Land Degradation & Development**, Chichester, v. 27, p. 14-25, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/ldr.2262>>.

PEDONE-BONFIM, M. V. L.; SILVA, D. K. A.; MAIA, L. C.; YANO-MELO, A. M. Mycorrhizal benefits on native plants of the Caatinga, a Brazilian dry tropical forest. **Symbiosis**, Boston, 74, 79–88. 2018.

PEREIRA, J. S.; RODRIGUES, S. C. Crescimento de espécies arbóreas utilizadas na recuperação de área degradada. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 13, n. 41, p. 102–110, 2012.

QU, L.; HUANG, Y.; MA, K.; ZHANG, Y.; BIERE, A. Effects of plant cover on properties of rhizosphere and inter-plant soil in a semiarid valley, SW China. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v. 94, p. 1-9, 2016.

RAIESI, F. A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions. **Ecological Indicators**, Amsterdam, v. 75, p. 307–320, 2017.

ROSIER, C. L.; HOYE, A. T.; RILLIG, M. C. Glomalin-related soil protein: assessment of current detection and quantification tools. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v. 38, p. 2205–2211, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.01.021>>.

SANTANA, M.O. et al., organizador. **Atlas das áreas susceptíveis à desertificação do Brasil/MMA**. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos, Universidade Federal da Paraíba, 2007. 134 p.

SANTOS, J. V.; VARÓN-LÓPEZ, M.; SOARES, C. R. F. S.; LEAL, P. L.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. Biological attributes of rehabilitated soils contaminated with heavy metals. **Environmental Science and Pollution Research**, Berlin, v. 23, p. 6735-6748, 2016. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1007/s11356-015-5904-6>>.

SANTOS, M. A. dos; FREIRE, M. B. G. dos S.; ALMEIDA, B. G. de; LINS, C. M. T.; SILVA, E. M. da. Dinâmica de íons em solo salino-sódico sob fitorremediação com *Atriplex nummularia* e aplicação de gesso. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 4, p. 397-404, 2013.

SILVA, C. F. da; ARAÚJO, J. L. S. de; SILVA, E. M. R. da; PEREIRA, M. G.; SCHIAVO, J. A.; FREITAS, M. S. M. de; SAGGIN-JUNIOR, O. J.; MARTINS, M. A. Comunidade de fungos micorrízicos arbusculares: diversidade, composição e glomalina em área revegetada com sesbânia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38 n. 2, p. 423-431, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000200007>>.

SILVA, C. F. da; LOSS, A.; CARMO, É. R. do; PEREIRA, M. G.; SILVA, E. M. R. da; MARTINS, M. A. Fertilidade do solo e substâncias húmicas em área de cava de extração de argila revegetada com eucalipto e leguminosas no Norte Fluminense. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 3, p. 547-561, 2015.

SILVA, C. F. da; SIMÕES-ARAÚJO, J. L.; SILVA, E. M. R. da; PEREIRA, M. G.; FREITAS, M. S. M.; SAGGIN JÚNIOR, O. J.; MARTINS, M.A. Fungos micorrízicos arbusculares e proteína do solo relacionada à glomalina em área degradada por extração de argila e revegetada com eucalipto e acácia. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 4, p. 749-761, 2012.

SMITH, S. E.; READ, D. J. **Mycorrhizal symbiosis**. New York: Academic Press, 2008. 815p.

SOUZA, E. R. de; FREIRE, M. B. G. dos S.; NASCIMENTO, C. W. A. do, MONTENEGRO, A. A. de A., FREIRE, F. J.; MELO, H. F. de. Fitoextração de sais pela *Atriplex nummularia* Lindl. sob estresse hídrico em solo salino sódico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 5, p. 477-483, 2011.

STUMPF, L.; PAULETTO, E.A.; SPINELLI PINTO, L.F.; ALVES BRITO PINTO, M.; ALDRIGHI DUTRA JÚNIOR, L.; SCHEUNEMANN, T. Sistema radicular da *Urochloa brizantha*: desenvolvimento e influência nos atributos de um solo degradado. **Interciencia**, Santiago, v. 41, n. 5, p. 334-339, 2016.

TEFERI, E.; BEWKET, W.; SIMANE, B. Effects of land use and land cover on selected soil quality indicators in the headwater area of the Blue Nile basin of Ethiopia. **Environmental Monitoring and Assessment**, Dordrecht, v. 188, n. 83, p. 1-12, 2016. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1007/s10661-015-5086-1>>.

VAN HALL, R. L.; CAMMERAAT, L. H.; KEESSTRA, S. D.; ZORN, M. Impact of secondary vegetation succession on soil quality in a humid Mediterranean landscape. **Catena**, Amsterdam, v. 149, p. 836-843, 2017.

VIMAL, S. R.; SINGH, J. S.; ARORA, N. K.; SINGH, S. Soil-plant-microbe interactions in stressed agriculture management: A review. **Pedosphere**, Beijing, v. 27, n. 2, p. 177-192, 2017. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60309-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60309-6)>.

WU, Q.-S.; HE, X.-H.; ZOU, Y.-N.; HE, K.-P.; SUN, Y.-H.; CAO, M.-Q. Spatial distribution of glomalin-related soil protein and its relationships with root mycorrhization, soil aggregates, carbohydrates, activity of protease and β -glucosidase in the rhizosphere of *Citrus unshiu*. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v. 45, p. 181–183, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.10.002>>.

ZHANG, C.; HUANG, L.; LUAN, T.; JIN, J.; LAN, C. Structure and function of microbial communities during the early stages of revegetation of barren soils in the vicinity of a Pb/Zn Smelter. **Geoderma**, Amsterdam, v. 136, p. 555-565. 2006. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.04.011>>.

3 ATRIBUTOS DE SOLO SOB REVEGETAÇÃO E EXTRAÇÃO DE ELEMENTOS PELAS PLANTAS

Atributos de solo sob revegetação e extração de elementos pelas plantas

RESUMO

A necessidade de restauração da qualidade do solo é de grande importância, por isso a busca por alternativas para a recuperação de solos degradados é constante. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da revegetação, com espécies arbustivas e arbóreas, sobre atributos físicos e químicos de um solo degradado no Semiárido do Nordeste brasileiro, nas estações seca e chuvosa; bem como analisar a extração de elementos pelas diferentes espécies vegetais. Para tanto, foi instalado um experimento em campo, em novembro de 2013. A área experimental foi cercada e dividida em quatro blocos, com oito tratamentos, sendo eles: 1) testemunha (sem cultivo de plantas), 2) cultivo de plantas de Atriplex, 3) plantas de Sabiá, 4) plantas de Leucena, 5) plantas de Nim, 6) consórcio Atriplex e Sabiá, 7) consórcio Atriplex e Nim, e 8) consórcio Atriplex e Leucena. Foram realizadas duas avaliações no experimento, a primeira em final de período seco (Novembro/2015), quando as plantas completaram 24 meses do transplante; e a segunda ao final de período chuvoso (Maio/2016), aos 30 meses. As coletas foram realizadas em três camadas, 0-10, 10-30 e 30-60 cm, sendo realizada a caracterização física, por meio da composição granulométrica e densidade de partículas, e analisados atributos físicos (argila dispersa em água – ADA, grau de floculação, densidade do solo e condutividade hidráulica saturada – Ksat) e atributos químicos (pH em água, cátions trocáveis, capacidade de troca catiônica – CTC, carbono orgânico total – COT, nitrogênio total – N, relação C/N, pH e condutividade elétrica da pasta de saturação, e cátions solúveis). Na estação chuvosa, as plantas foram coletadas para a análises de Na, K, Ca, Mg, Cl, P e N no tecido vegetal. Os resultados deste trabalho indicam que as espécies vegetais foram eficientes na melhoria de atributos do solo degradado, devido à redução no teor de ADA e aumento no grau de floculação, bem como diminuição na densidade do solo e aumento na condutividade hidráulica em meio saturado (Ksat). As espécies vegetais também aumentaram o teor de COT no solo (elevando a $3,25 \text{ g kg}^{-1}$). A época de coleta influenciou nos resultados de diversas propriedades avaliadas. Devido a maior parte de atributos recuperados, o cultivo consorciado torna-se mais apropriado à revegetação de áreas degradadas no Semiárido de Pernambuco. Com relação à extração de sódio e cloro, o cultivo isolado ou consorciado não influenciou o potencial fitoextrator da Atriplex. E o consórcio de Atriplex com Nim foi mais eficiente na extração de K, Ca, Mg, P e N.

Palavras-chave: Cultivo consorciado. Cultivo isolado. Qualidade do solo.

Soil attributes under revegetation and chemical elements extraction by plants

ABSTRACT

The need for restoration of soil quality is of great importance, so the search for alternatives for the recovery of degraded soils is constant. The objective of this work was to evaluate the influence of revegetation, with shrub and tree species, on physical and chemical attributes of a degraded soil in the Brazilian Northeast semiarid, in dry and rainy seasons; as well as to analyze the chemical elements extraction by different plant species. For that, an experiment was installed in the field, in November of 2013. The experimental area was fenced and divided into four blocks, with eight treatments: 1) control (without plant cultivation); 2) Atriplex plants; 3) Sabiá plants; 4) Leucaena plants; 5) Neem plants; 6) Atriplex and Sabiá consortium; 7) Atriplex and Neem consortium; 8) Atriplex and Leucaena consortium. Two evaluations were performed in the experiment, the first at the end of the dry period (November/2015), 24 months after transplanting, and the second at the end of the rainy season (May/2016) at 30 months. The samples were collected in three layers, 0-10, 10-30 and 30-60 cm, being carried out the physical characterization, by granulometric composition and particle density, and analyzed physical attributes (water dispersed clay - WDC, flocculation degree, soil density and saturated hydraulic conductivity - Ksat) and chemical attributes (pH in water, exchangeable cations, cation exchange capacity - CEC, total organic carbon - TOC, total nitrogen - N, C/N ratio, pH and electrical conductivity of the saturation paste, and soluble cations). In the rainy season, the plants were collected for analysis of Na, K, Ca, Mg, Cl, P and N in the plant tissue. The results of this work indicate that the plant species were efficient in improving attributes of degraded soil due to the reduction in WDC content and increase in flocculation degree, as well as decrease in soil density and increase in saturated water hydraulic conductivity (Ksat). Plant species also increased soil TOC content (raising 3.25 g kg^{-1}). The collection period influenced the results of several evaluated properties. Due to the majority of attributes recovered, the intercropping becomes more appropriate to the revegetation of degraded areas in the Pernambuco semiarid region. Regarding the extraction of sodium and chloride, the isolated or intercropping culture did not influence the phytoextractor potential of the Atriplex. Atriplex consortium with Neem was more efficient at extracting K, Ca, Mg, P and N.

Keywords: Consortium cultivation. Isolated cultivation. Soil quality.

3.1 INTRODUÇÃO

A formação e o desenvolvimento do solo e a variação de suas propriedades podem ser dominadas por fatores extrínsecos (alogênicos) (por exemplo, clima, organismos, relevo, material de origem e tempo), e por fatores intrínsecos (autogênicos) envolvendo processos e fenômenos dentro do solo, ou alguma combinação deles (PHILLIPS, 2017). Além disso, em algumas situações, o homem torna-se mais ativo como fator de formação do solo ou agente de modificação das suas propriedades. Przewoźna (2014) demonstrou a influência antropogênica sobre propriedades do solo, como a densidade, em uma toposequência do noroeste da Polônia.

Algumas ações do homem podem causar a degradação do solo (MIKHA et al., 2014), ou seja, a perda ou redução da produtividade biológica ou econômica das terras agrícolas, pastagens e florestas nativas, devido à forma de uso do solo ou a um processo e/ou combinação de processos (MMA, 2004; OLIVEIRA et al., 2015; FAO; ITPS, 2015; ALVES et al., 2017). Um tipo de degradação recorrente em regiões áridas e semiáridas do mundo é a salinização (HORNEY et al., 2005), devido as condições climáticas favorecerem o desenvolvimento deste processo.

A necessidade de restauração da qualidade do solo é de grande importância, por isso a busca por alternativas para a recuperação de solos degradados é constante (KEESSTRA et al., 2016; VAN HALL et al., 2017).

A revegetação tem sido uma alternativa de baixo custo que possibilita melhoria dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, como demonstrado em diversos trabalhos (LOURENTE et al., 2011; QU et al., 2016; NADAL-ROMERO et al., 2016). No entanto, uma das dificuldades para o sucesso da revegetação é o estabelecimento das plantas na área degradada (RAMACHANDRAN; RADHAPRIYA, 2016), por isso diversas espécies vegetais vêm sendo estudadas, um exemplo é a espécie halófito *Atriplex nummularia* Lindl., usada principalmente em ambientes sob estresse hídrico e salino (MONTENEGRO et al., 2003; LEAL et al., 2008; BAZIHIZINA et al., 2009; SOUZA et al., 2011).

Para avaliar os efeitos da revegetação em solos degradados, diversos atributos físicos e químicos são estudados, como densidade do solo (NADAL-ROMERO et al., 2016; STUMPF et al., 2016b; BARUT; CELIK, 2017), condutividade hidráulica em meio saturado (STEFANOSKI et al., 2013), pH (STUMPF et al., 2016a; QU et al., 2016;

BARUT; CELIK, 2017), carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (N) (MOREIRA; COSTA, 2004; AN et al., 2009; VAN HALL et al., 2017), relação C/N do solo (MOREIRA; COSTA, 2004; AN et al., 2009; NADAL-ROMERO et al., 2016), cátions trocáveis (STUMPF et al., 2016a; PAULUCIO et al., 2017), entre outros.

Além de avaliar características do solo, é necessário estudar a capacidade de extração de elementos pelas espécies vegetais usadas na revegetação, a manutenção e decomposição de sua serrapilheira contribuem para que parte dos nutrientes absorvidos retorne ao solo, influenciando na melhoria de sua qualidade (ANDRADE et al., 2003; MALUF et al., 2015). De acordo com Andrade et al. (2003), a camada de serrapilheira sobre solos degradados é essencial para reativação da ciclagem de nutrientes entre a planta e o solo, fornecendo condições mais adequadas para o restabelecimento da vegetação.

Aliada à extração de nutrientes, algumas plantas têm a capacidade de absorver e acumular na parte aérea elementos que causam toxidez a outras espécies, como é o caso do sódio. Entre elas está a *A. nummularia*, que é uma boa alternativa de uso na fitoextração de sódio e cloro de solos afetados por sais (SANTOS et al., 2013), favorecendo o desenvolvimento de outras plantas, usadas para revegetação, que possam ser sensíveis a esses elementos.

Deste modo, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da revegetação sobre atributos físicos e químicos de um solo degradado no Semiárido brasileiro, nas estações seca e chuvosa; bem como, analisar a extração de nutrientes e sódio pelas diferentes espécies vegetais.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Descrição da área

O experimento foi instalado em campo em novembro de 2013, sendo a área localizada no lote 4P do Perímetro Irrigado Cachoeira II (7°59'55.2084" S, 38°18'56.0448" W), em Serra Talhada, Pernambuco (Figura 1). O clima da região segundo classificação de Köppen é do tipo BShw. A temperatura média anual é de 25,9 °C e a precipitação média anual é de 642 mm, concentrada entre os meses de dezembro e maio com 85% da média anual (ALVARES et al., 2013).

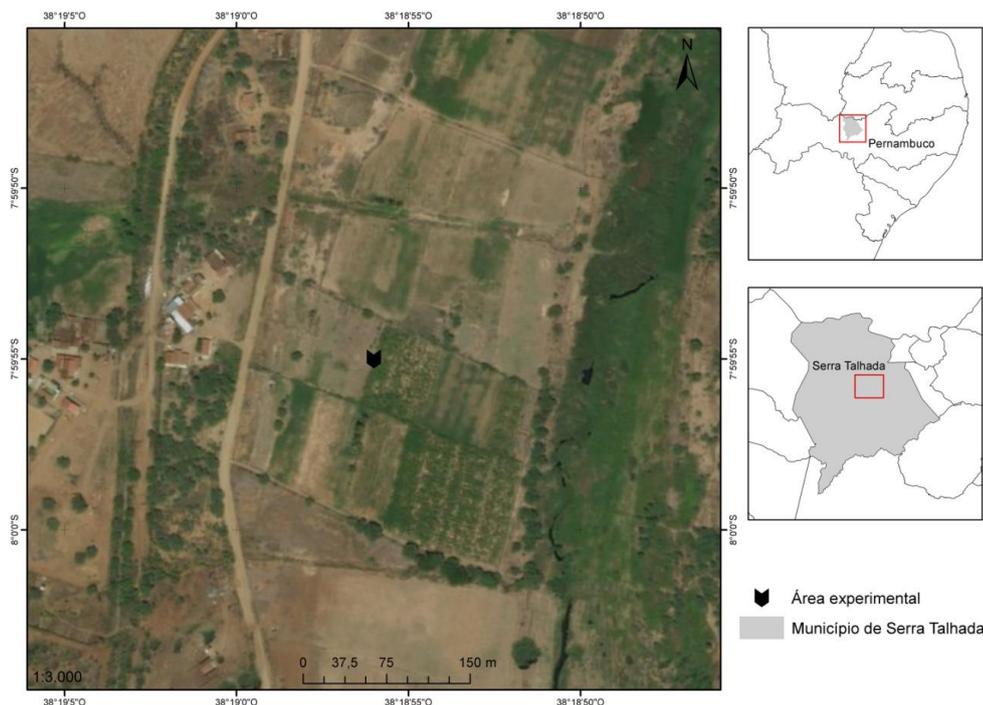


Figura 1. Localização da área experimental. Lote 4P – Perímetro Irrigado Cachoeira II, Serra Talhada, Pernambuco, Brasil

O solo da área na implantação do experimento era degradado quimicamente pela salinidade e sodicidade (Tabela 1), aliada a esta degradação, a pequena e localizada cobertura vegetal deixou o solo exposto ao sol e a chuva. Anteriormente a área era cultivada com bananeiras, mas devido ao avançado processo de degradação, passou cerca de 10 anos sem cultivo, até a implantação do experimento.

O relevo é plano e o solo possui elevada proporção de areia fina e silte, existindo camadas adensadas em subsuperfície, causando a degradação física deste solo. Na área também há o acúmulo de sedimentos fluviais, e de acordo com o Zoneamento Agroecológico de Pernambuco (ZAPE) o solo é um Neossolo Flúvico (SILVA et al., 2001).

Tabela 1. Caracterização física e química do solo da área experimental antes da instalação do experimento (Santos, 2016)

Camada	Areia	Silte	Argila	pH	CEes ¹	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CTC ²	PST ³
cm	g kg ⁻¹			H ₂ O	dS m ⁻¹			cmolc kg ⁻¹			%
0 - 10	827,91	77,63	94,45	7,23	5,48	5,99	1,05	1,59	0,68	9,51	62,98

¹Condutividade elétrica do extrato da pasta saturada; ²Capacidade de troca de cátions;

³Percentagem de sódio trocável

A área foi cercada e dividida em quatro blocos casualizados, com oito tratamentos, contabilizando 32 parcelas experimentais. Cada parcela tinha as dimensões: 8 x 8 m (64 m²) e a área útil 4 x 4 m (16 m²). Os tratamentos foram: 1) testemunha (área sem cultivo de plantas), 2) cultivo de plantas de Atriplex (*Atriplex nummularia* Lind.), 3) plantas de Sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia* Benth), 4) plantas de Leucena (*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit), 5) plantas de Nim (*Azadirachta indica* A. Juss.), 6) consórcio Atriplex e Sabiá, 7) consórcio Atriplex e Nim, e 8) consórcio Atriplex e Leucena.

Esta disposição foi estabelecida devido a salinidade e sodicidade inicial do solo da área, assim as plantas de Atriplex foram utilizadas como principais e as demais espécies como secundárias. O Sabiá foi escolhido por ser uma planta nativa. As outras espécies por serem adaptadas a condições de altas temperaturas e baixa precipitação, bem como terem o crescimento rápido. O espaçamento do plantio foi de 2 x 2 m, tanto para o cultivo isolado como para o consórcio (plantas alternadas), totalizando 16 plantas por parcela e 4 plantas na área útil.

As mudas das espécies estudadas foram transplantadas com cerca de 20 cm de altura, para covas de 15 cm de diâmetro por 20 cm de profundidade. O transplântio foi feito diretamente na cova, com o substrato orgânico das mudas (solo/composto orgânico comercial, 1:1), sem aplicação de qualquer tipo de produto, químico ou orgânico. Assim que foram transplantadas, as mudas foram irrigadas manualmente, mantendo-se a aplicação de água semanalmente nos três primeiros meses para o estabelecimento das mudas. Devido à morte de algumas mudas nos primeiros meses, foi feita a reposição, com mudas nas mesmas condições e seguindo-se os mesmos procedimentos. Nos períodos de chuva na região, realizou-se o coroamento das mudas, que consta da limpeza da vegetação espontânea num raio de 20 cm em volta do caule de cada planta, para evitar competição com as espécies estudadas.

Para as análises físicas e químicas do solo foram realizadas duas avaliações no experimento, a primeira no final do período seco (Novembro/2015), quando as plantas completaram 24 meses do transplântio; e a segunda ao final do período chuvoso (Maio/2016), aos 30 meses (Figura 2). No período seco, a umidade média do solo era de 0,0038 g g⁻¹ de água no solo, no período chuvoso era de 0,0104 g g⁻¹ de água no solo. E para as análises do tecido vegetal, a coleta das plantas foi feita ao final do período chuvoso (Maio/2016), aos 30 meses.

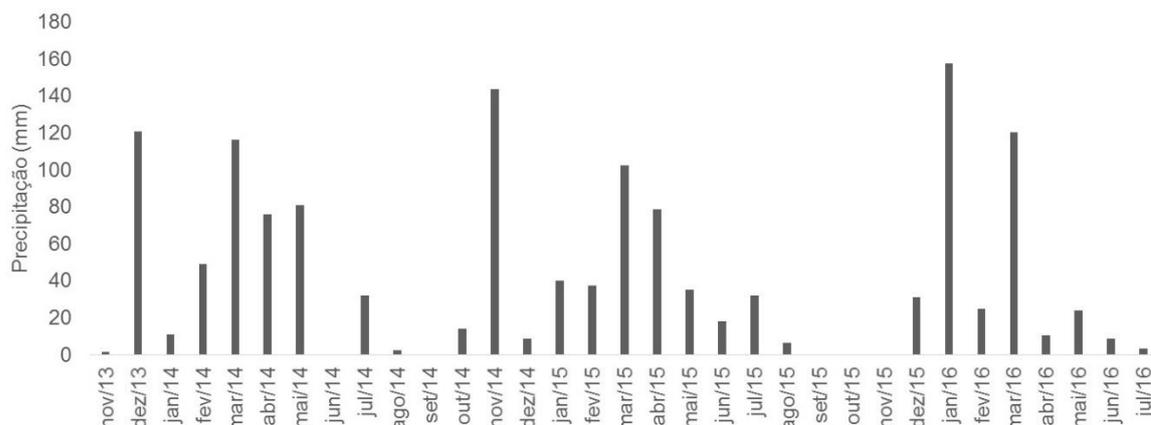


Figura 2. Precipitação mensal acumulada (em milímetros), entre os meses de novembro de 2013 e julho de 2016, no Município de Serra Talhada de acordo com a Estação Meteorológica Serra Talhada/Açude Cachoeira (APAC, 2018)

3.2.2 Amostragem do solo e planta

As amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0-10, 10-30 e 30-60 cm de profundidade, com estrutura deformada, respeitando a projeção da copa das plantas. Em cada parcela foram coletadas quatro amostras simples, para formar uma amostra composta. Estas amostras foram utilizadas para as análises químicas e algumas análises físicas.

Para os atributos físicos que exigem amostras de solo com estrutura preservada, a coleta foi feita com cilindro volumétrico nas camadas de 0-5 e 30-35 cm, no centro da área útil de cada parcela, caracterizando a camada superficial e o centro da camada subsuperficial.

Na área útil de cada parcela foi coletada uma planta inteira; enquanto que nos consórcios, duas plantas foram coletadas, sendo uma de cada espécie vegetal. As plantas foram cortadas na base e colocadas sobre uma lona, para a separação nas partes a serem analisadas. As plantas de *Atriplex* foram fracionadas em caule/galhos e folhas, as de *Sabiá* em caule/galhos, folhas e inflorescências, a *Leucena* e o *Nim* foram fracionados em caule/galhos, folhas, inflorescências e frutos.

Todas as partes foram pesadas separadamente no campo, uma subamostra de cada fração foi retirada e pesada, sendo acondicionada em sacos de papel e transportada ao laboratório para secagem.

3.2.3 Atributos físicos e químicos do solo

Nas amostras deformadas de solo foram determinadas a composição granulométrica (EMBRAPA, 2017) e argila dispersa em água – ADA (ALMEIDA et al., 2012), ambos pelo método da pipeta. Com os dados de argila total e argila dispersa em água foi calculado o grau de floculação. A densidade de partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico (EMBRAPA, 2017).

Os resultados da composição granulométrica do solo e densidade de partículas não são alterados em função da aplicação dos tratamentos, representando a caracterização do solo (Tabela 2).

A densidade do solo foi determinada pelo método do cilindro volumétrico com o uso de amostras de solo não deformadas, conforme método descrito pela EMBRAPA (2017). Nestas, também foi determinada a condutividade hidráulica (K_{sat}) em meio saturado com o permeâmetro de coluna vertical e carga constante (EMBRAPA, 2017).

Tabela 2. Composição granulométrica e densidade de partículas (D_p) do solo da área experimental (média de 32 repetições)

Camada	D_p	Composição granulométrica					Classe textural
		Areia		Silte	Argila		
cm	$g\ cm^{-3}$	Grossa	Fina				Total
0-10	2,65	100,4	777,5	877,9	53,1	69,0	Areia franca
	$\pm 0,06$	$\pm 5,5$	$\pm 42,5$	$\pm 25,8$	$\pm 19,1$	$\pm 17,1$	
10-30	2,67	72,7	788,2	860,9	68,9	70,2	Areia franca
	$\pm 0,06$	$\pm 3,1$	$\pm 33,9$	$\pm 50,8$	$\pm 30,9$	$\pm 26,7$	
30-60	2,65	72,8	701,4	774,2	105,9	119,9	Franco arenosa
	$\pm 0,07$	$\pm 6,5$	$\pm 62,4$	$\pm 141,4$	$\pm 68,2$	$\pm 65,5$	

Como atributos químicos do solo, nas três camadas avaliadas foi realizada a medida do pH em água (1:2,5); a determinação dos cátions trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+), extraídos com acetato de amônio $1\ mol\ L^{-1}$ a pH 7,0 (THOMAS, 1982), sendo Na^+ e K^+ determinados por fotometria de chama e Ca^{2+} e Mg^{2+} por espectrofotometria de absorção atômica (USSL STAFF, 1954). A capacidade de troca de cátions (CTC) foi determinada pelo método do acetato de sódio/acetato de amônio (USSL STAFF, 1954).

Também foi quantificado o carbono orgânico total (COT) por meio da oxidação da matéria orgânica pelo dicromato de potássio, pelo método Walkley-Black, com posterior titulação com sulfato ferroso amoniacal (SILVA et al., 2009) e o nitrogênio

total (N) foi determinado por digestão sulfúrica, destilação a vapor e condensação pelo método Kjeldahl, com posterior titulação com HCl (TEDESCO et al., 1995). Com os resultados de COT e N foi calculada a relação C/N do solo.

Além disso, as amostras de solo foram submetidas às análises dos elementos solúveis, com o preparo da pasta saturada, pelo método descrito por USSL Staff (1954). No extrato da pasta saturada foram medidos a condutividade elétrica (CEes a 25°C) e o pH; determinando-se também os cátions solúveis: Ca^{2+} e Mg^{2+} , por espectrofotometria de absorção atômica, Na^+ e K^+ por fotometria de emissão de chama. Com os resultados foi calculada a relação de adsorção de sódio (RAS) e a percentagem de sódio trocável (PST), conforme USSL Staff (1954).

3.2.4 Biomassa e extração de elementos pelas plantas

As subamostras do material vegetal coletado foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C, até peso constante. Determinou-se a umidade das amostras de frações das plantas com base na massa da subamostra fresca e seca, o que foi utilizado para estimar a biomassa total produzida pelas plantas.

A massa seca das frações da planta foi moída em moinho tipo Willye e submetida à digestão nítrica, com aquecimento por micro-ondas de acordo com Silva et al. (2009) e conforme modificações de Almeida et al. (2008), para posterior determinação dos teores de Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e P. Sendo os cátions Na^+ e K^+ determinados por fotometria de emissão de chama; e Ca^{2+} e Mg^{2+} por espectrofotometria de absorção atômica. O P foi determinado por espectrofotometria de luz visível, com azul-de-molibdênio, em um comprimento de onda de 725 nm.

O N foi determinado por digestão sulfúrica, destilação a vapor e condensação pelo método Kjeldahl (SILVA et al., 2009). O cloreto foi determinado em extrato aquoso por titulação com nitrato de prata, conforme método descrito por Malavolta et al. (1997).

Com os resultados estimados de massa seca total das plantas inteiras e dos teores dos elementos no tecido vegetal, foram calculados os conteúdos extraídos por cada fração da planta e estimada a extração dos mesmos por área.

3.2.5 Análises estatísticas

Os resultados foram submetidos à análise da variância (ANOVA) e foram testados contrastes ortogonais, confrontando o efeito dos tratamentos nas variáveis avaliadas, pelo teste t a 5% de confiança, com o uso do software SISVAR 5.3. O efeito da época de coleta foi avaliado pelo teste de Tukey a 5% de confiança.

Os resultados referentes às análises de elementos nas plantas foram submetidos ao teste de Tukey a 10% de confiança, também com o software SISVAR 5.3.

3.3 RESULTADOS

3.3.1 Atributos físicos e químicos do solo

O cultivo do solo com as espécies testadas promoveu redução nos teores de ADA na camada de 0-10 cm, tanto na estação seca, como na chuvosa (Tabela 3). E as plantas cultivadas isoladamente possibilitaram a manutenção do menor teor de ADA, na estação seca, em comparação com o cultivo consorciado. Quando cultivada isoladamente na estação seca, a Atriplex diminuiu o teor de ADA no solo (51,14 g kg⁻¹ de ADA), comparada aos seus consórcios com Nim, Leucena e Sabiá (65,04 g kg⁻¹ de ADA); enquanto que na estação chuvosa, os consórcios possibilitaram o menor teor de ADA quando comparados à Atriplex cultivada isoladamente (34,02 e 46,79 g kg⁻¹ de ADA, respectivamente). A época de coleta também teve efeito significativo no teor de ADA, sendo o solo coletado na estação seca o que teve o maior valor de ADA (Tabela 3).

Ao observar a camada de 0-10 cm, nota-se que o cultivo com as espécies vegetais possibilitou maior grau de flocculação no solo coletado em ambas as estações (Tabela 3). Na estação seca, o cultivo com Atriplex promoveu aumento no grau de flocculação, quando comparado aos seus consórcios (19,87 e 14,86%, respectivamente). Na estação chuvosa, os consórcios se sobressaíram tanto quando comparados a todos os cultivos isolados, como comparados apenas à Atriplex. Com relação a época de coleta, na estação chuvosa o solo teve o maior grau de flocculação (Tabela 3).

Tabela 3. Contrastes ortogonais do teor médio de argila dispersa em água (ADA) e grau de floculação nas camadas de 0-10, 10-30 e 30-60 cm, em função dos tratamentos e da época de amostragem

Camada cm	Contraste/ Tratamentos	ADA g kg ⁻¹		Grau de floculação %	
		Estação seca	Estação chuvosa	Estação seca	Estação chuvosa
0-10	1º Contraste				
	Testemunha	78,77*	43,90*	6,73*	41,13*
	Cultivos	58,33	35,51	14,48	50,25
	2º Contraste				
	Consórcios	65,04*	34,02*	14,65	53,47*
	Cultivo isolado	53,29	36,64	14,35	47,84
	3º Contraste				
	Consórcios	65,04*	34,02*	14,65*	53,47*
	Atriplex	51,14	46,79	19,87	46,08
	CV ¹ (%)	23,60	23,52	80,21	36,28
Média total	60,88 a	36,56 b	13,51 b	49,11 a	
CV (%)		24,34		45,20	
10-30	1º Contraste				
	Testemunha	48,53	53,79	14,99*	16,89
	Cultivos	48,19	56,59	22,73	20,18
	2º Contraste				
	Consórcios	43,02*	50,37*	25,23	19,97
	Cultivo isolado	52,06	61,26	20,85	20,34
	3º Contraste				
	Consórcios	43,02*	50,37*	25,23*	19,97*
	Atriplex	52,25	97,42	33,63	11,54
	CV (%)	30,24	38,89	84,30	71,38
Média total	48,23 a	56,24 a	21,76 a	19,77 a	
CV (%)		32,14		80,38	
30-60	1º Contraste				
	Testemunha	90,10*	113,84	10,54*	19,06
	Cultivos	74,62	93,12	20,87	21,45
	2º Contraste				
	Consórcios	61,16*	86,03	24,72*	23,39*
	Cultivo isolado	84,72	98,44	17,98	19,99
	3º Contraste				
	Consórcios	61,16*	86,03*	24,72*	23,39*
	Atriplex	113,87	156,36	9,81	15,92
	CV (%)	48,33	60,91	54,13	47,39
Média total	76,55 b	95,71 a	19,58 a	21,15 a	
CV (%)		41,60		50,04	

*Médias dos contrastes seguidas de asterisco diferem estatisticamente entre si, pelo teste t a 5% de probabilidade, e médias das estações seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ¹Coeficiente de variação (CV)

Para a camada de 10-30 cm não houve diferença significativa na ADA entre a área testemunha e o cultivo com as plantas, nas duas estações (Tabela 3). No entanto, os consórcios promoveram diminuição na ADA do solo quando comparados ao cultivo isolado ou à *Atriplex* cultivada isoladamente, em ambas as estações. E a época de coleta não influenciou na ADA. Com relação ao grau de flocculação, ele foi maior para o cultivo com as plantas em comparação à testemunha, apenas na estação seca. Sendo que nesta estação a *Atriplex* promoveu maior grau de flocculação no solo quando comparada aos consórcios desta com as outras plantas; enquanto que na estação chuvosa os consórcios se sobressaíram ao cultivo com *Atriplex* isoladamente em relação ao grau de flocculação. Quanto à época de coleta, não houve influência no grau de flocculação, nesta camada de solo (Tabela 3).

Na camada de 30-60 cm, o cultivo com as espécies vegetais reduziu a ADA no solo na estação seca, com destaque para os tratamentos consorciados (Tabela 3). E o grau de flocculação também foi maior com o cultivo das plantas na estação seca, e da mesma maneira, com destaque para os tratamentos de consórcios. A época de coleta teve efeito significativo na ADA, sendo o solo da estação seca o que teve o menor valor. No entanto, não houve efeito da estação no grau de flocculação do solo.

Na camada de 0-5 cm, o cultivo do solo com as espécies vegetais avaliadas possibilitou redução na densidade do solo em relação à testemunha aos 30 meses do início do experimento (período chuvoso). E a densidade do solo foi menor no período chuvoso em relação ao período seco (Tabela 4). Em ambas as estações, o cultivo das plantas também promoveu aumento nos valores da K_{sat} do solo. No entanto, a *Atriplex* cultivada isoladamente proporcionou menor K_{sat} quando comparada aos seus consórcios, em ambas as estações. E a estação não influenciou a K_{sat} nesta camada (Tabela 4).

Para a camada de 30-35 cm, o cultivo com as plantas também reduziu a densidade do solo aos 30 meses do início do experimento, no período chuvoso (Tabela 4). Havendo destaque nesta redução para os consórcios, quando comparados aos cultivos isolados. Os consórcios também se sobressaíram na estação seca, tanto quando comparados ao cultivo isolado, como com a *Atriplex* cultivada isoladamente.

Na camada de 30-35 cm, a área sob cultivo com as plantas se sobressaiu sobre a área testemunha em relação à K_{sat} (6,69 e 4,65 cm h^{-1} , respectivamente) do solo na estação chuvosa, não havendo diferença entre os consórcios e os demais tratamentos (Tabela 4). Na estação seca, o solo submetido ao cultivo em consórcios

teve maior Ksat, quando comparado ao solo sob cultivo isolado e ou com Atriplex. A época de coleta (estação seca ou chuvosa) não influenciou na densidade do solo e Ksat nesta camada.

Tabela 4. Contrastes ortogonais de valores de densidade do solo e condutividade hidráulica (Ksat) nas camadas de 0-5 e 30-35 cm, em função dos tratamentos e da época de amostragem

Camada cm	Contraste/ Tratamentos	Densidade do solo g cm ⁻³		Ksat cm h ⁻¹	
		Estação seca	Estação chuvosa	Estação seca	Estação chuvosa
0-5	1º Contraste				
	Testemunha	1,41	1,40*	5,94*	5,62*
	Cultivos	1,42	1,37	8,69	9,11
	2º Contraste				
	Consórcios	1,42	1,37	8,72	9,06
	Cultivo isolado	1,42	1,37	8,66	9,16
	3º Contraste				
	Consórcios	1,42	1,37	8,72*	9,06*
	Atriplex	1,42	1,38	7,10	5,99
	CV ¹ (%)	4,19	4,15	46,79	55,05
Média total	1,42 a	1,37 b	8,34 a	8,68 a	
CV (%)	4,31		50,33		
30-35	1º Contraste				
	Testemunha	1,44	1,43*	7,97	4,65*
	Cultivos	1,45	1,37	7,32	6,69
	2º Contraste				
	Consórcios	1,43*	1,39*	9,19*	6,72
	Cultivo isolado	1,47	1,43	6,04	6,66
	3º Contraste				
	Consórcios	1,43*	1,39	9,19*	6,72
	Atriplex	1,48	1,42	4,10	5,59
	CV (%)	4,17	3,68	57,45	62,27
Média total	1,45 a	1,42 a	7,40 a	6,42 a	
CV (%)	4,54		47,85		

*Médias dos contrastes seguidas de asterisco diferem estatisticamente entre si, pelo teste t a 5% de probabilidade, e médias das estações seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ¹Coeficiente de variação (CV)

O pH do solo tem valores médios próximos da neutralidade, característico de solos de semiárido com acúmulo de sais (Tabela 5). Na estação seca, o pH do solo

na camada superficial (0-10 cm) das áreas com o cultivo das plantas foi superior ao da área testemunha. E não houve influência da época de coleta no pH do solo em todas as camadas avaliadas.

Na camada de 10-30 cm, o pH do solo com o cultivo das plantas foi superior ao da área testemunha, em ambas as estações, enquanto que na camada de 30-60 cm, isso ocorreu apenas na estação chuvosa (Tabela 5).

Os valores de Na^+ trocável foram extremamente baixos no solo, especialmente na camada de 0-10 cm onde não houve diferença significativa entre a área testemunha e a área com as plantas, tanto na estação seca, como na chuvosa (Tabela 6). Em ambas as estações, o solo sob cultivo com Atriplex isoladamente teve valores de Na^+ trocável superiores aos do solo sob consórcios. E na estação chuvosa o solo sob cultivo isolado também teve maior teor de Na^+ trocável, comparado aos consórcios. Com relação ao K^+ trocável, o solo da área com o cultivo de plantas apresentou menor teor, quando comparado ao da testemunha (0,63 e 0,92 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, respectivamente). E na comparação do K^+ trocável no solo sob cultivo com Atriplex e cultivo isolado, foi semelhante ao que ocorreu para o Na^+ trocável, em que o tratamento com Atriplex isolada promoveu maiores teores de K^+ trocável no solo. Os teores de K^+ trocável no solo também foram superiores na estação chuvosa, quando comparada à estação seca.

Na camada de 10-30 cm, o cultivo de plantas só promoveu aumento no teor de Na^+ trocável no solo na estação seca, em relação ao solo da área testemunha (Tabela 6). Sendo que o cultivo isolado se sobressaiu sobre os consórcios e a Atriplex cultivada isoladamente também promoveu maior teor de Na^+ trocável no solo quando comparado aos tratamentos de consórcios. Para o K^+ trocável, o comportamento foi similar ao da camada de 0-10 cm. Sendo que, a estação seca foi a que apresentou o maior teor de K^+ trocável no solo.

Na estação seca, a área sem o cultivo das plantas, teve maior teor de Na^+ trocável na camada de 30-60 cm do que a área cultivada. Isso também foi observado para o K^+ trocável na estação chuvosa (Tabela 6). E a época de coleta influenciou o teor de K^+ trocável, sendo os maiores valores observados na estação seca.

O solo em todos os tratamentos e camadas foi classificado como não sódico (Tabela 6).

Tabela 5. Contrastes ortogonais de valores de pH do solo nas camadas de 0-5 e 30-35 cm, em função dos tratamentos e da época de amostragem

Camada cm	Contraste/ Tratamentos	pH	
		Estação seca	Estação chuvosa
0-10	1º Contraste		
	Testemunha	6,80*	7,26
	Cultivos	7,10	7,23
	2º Contraste		
	Consórcios	7,15*	7,17*
	Cultivo isolado	7,05	7,28
	3º Contraste		
	Consórcios	7,15	7,17*
	Atriplex	7,20	7,61
	CV ¹ (%)	2,99	4,67
	Média total	7,06 a	7,24 a
	CV (%)	7,86	
10-30	1º Contraste		
	Testemunha	7,15*	7,40*
	Cultivos	7,54	7,58
	2º Contraste		
	Consórcios	7,47*	7,55
	Cultivo isolado	7,60	7,59
	3º Contraste		
	Consórcios	7,47	7,55*
	Atriplex	7,54	7,86
	CV (%)	2,95	4,00
	Média total	7,49 a	7,55 a
	CV (%)	2,60	
30-60	1º Contraste		
	Testemunha	7,79	7,70*
	Cultivos	7,80	7,90
	2º Contraste		
	Consórcios	7,82	7,95*
	Cultivo isolado	7,79	7,85
	3º Contraste		
	Consórcios	7,82	7,95
	Atriplex	7,81	7,88
	CV (%)	3,00	2,83
	Média total	7,80 a	7,87 a
	CV (%)	2,74	

*Médias dos contrastes seguidas de asterisco diferem estatisticamente entre si, pelo teste t a 5% de probabilidade, e médias das estações seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ¹Coeficiente de variação (CV)

Tabela 6. Contrastes ortogonais do teor de Na⁺ e K⁺ trocáveis e da percentagem de sódio trocável (PST) nas camadas de 0-10, 10-30 e 30-60 cm, em função dos tratamentos e da época de amostragem

Camada cm	Contraste/ Tratamentos	Na ⁺		K ⁺		PST	
		cmol _c kg ⁻¹				%	
		Estação seca	Estação chuvosa	Estação seca	Estação chuvosa	Estação seca	Estação chuvosa
0-10	1 ^o Contraste						
	Testemunha	0,06	0,13	0,51	0,92*	1,08	1,93
	Cultivos	0,06	0,11	0,49	0,63	1,09	2,07
	2 ^o Contraste						
	Consórcios	0,05	0,09*	0,45	0,55*	0,99	1,70*
	Cultivo isolado	0,07	0,13	0,52	0,69	1,17	2,34
	3 ^o Contraste						
	Consórcios	0,05*	0,09*	0,45*	0,55*	0,99*	1,70*
	Atriplex	0,16	0,26	0,65	0,72	2,44	4,28
	CV ¹ (%)	152,46	48,32	46,30	57,51	143,39	42,57
Média total	0,06 b	0,12 a	0,49 b	0,66 a	1,09 b	2,05 a	
CV (%)		83,12		49,25		64,83	
10-30	1 ^o Contraste						
	Testemunha	0,06*	0,09	0,38	0,32*	1,03*	1,50*
	Cultivos	0,11	0,13	0,41	0,28	2,21	2,33
	2 ^o Contraste						
	Consórcios	0,09*	0,11*	0,43	0,26*	1,84*	2,02*
	Cultivo isolado	0,12	0,15	0,40	0,29	2,48	2,56
	3 ^o Contraste						
	Consórcios	0,09*	0,11*	0,43	0,26*	1,84*	2,02*
	Atriplex	0,17	0,31	0,44	0,30	2,61	4,71
	CV (%)	60,81	106,35	56,91	34,92	45,19	93,45
Média total	0,10 a	0,12 a	0,41 a	0,28 b	2,06 a	2,22 a	
CV (%)		84,76		49,96		50,47	
30-60	1 ^o Contraste						
	Testemunha	0,35*	0,26	0,26	0,22*	6,00*	3,11
	Cultivos	0,23	0,24	0,28	0,18	3,50	3,25
	2 ^o Contraste						
	Consórcios	0,15*	0,17*	0,28	0,19	2,85*	2,58*
	Cultivo isolado	0,29	0,29	0,28	0,18	3,99	3,76
	3 ^o Contraste						
	Consórcios	0,15*	0,17*	0,28	0,19*	2,85*	2,58*
	Atriplex	0,46	0,48	0,29	0,23	4,82	3,95
	CV (%)	71,60	96,56	37,20	38,82	60,69	52,02
Média total	0,25 a	0,24 a	0,28 a	0,19 b	3,81 a	3,24 a	
CV (%)		60,15		29,76		56,00	

*Médias dos contrastes seguidas de asterisco diferem estatisticamente entre si, pelo teste t a 5% de probabilidade, e médias das estações seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ¹Coeficiente de variação (CV)

Ao observar os teores de Ca^{2+} trocável, nota-se que apenas na estação chuvosa o solo da área testemunha se sobressaiu ao do cultivo com as plantas na camada de 0-10 cm (Tabela 7). O solo sob os consórcios teve teores de Ca^{2+} trocável inferiores ao solo do tratamento com Atriplex cultivada isoladamente, em ambas as estações. E a época de coleta influenciou o teor de Ca^{2+} trocável, sendo a estação seca a que apresentou o maior valor. Com relação ao Mg^{2+} trocável, em nenhuma das estações houve diferença significativa entre o solo da área testemunha e o da área com plantas. Também houve destaque para o solo da Atriplex cultivada isoladamente na estação chuvosa, e para o dos cultivos isolados comparados aos consórcios, em ambas as estações. A CTC do solo foi superior no tratamento testemunha em relação aos de cultivos, e a média geral da CTC do solo em todos os tratamentos foi de $5,56 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$.

Na camada de 10-30 cm, no solo coletado na estação chuvosa, o maior teor de Mg^{2+} trocável foi observado na área com plantas, quando comparada à testemunha (1,11 e $0,99 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, respectivamente). Sendo que o solo sob cultivo isolado e Atriplex também cultivada isoladamente se sobressaíram quanto ao teor de Mg^{2+} trocável quando comparados aos consórcios. Para os teores de Ca^{2+} trocável e CTC, não houve diferença significativa entre a testemunha e o cultivo com as plantas. O solo da estação seca também teve maior teor de Ca^{2+} trocável como na camada superficial, no entanto, o maior teor de Mg^{2+} trocável foi observado na estação chuvosa (Tabela 7).

Na estação seca, os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis no solo da camada de 30-60 cm foram superiores na área testemunha. E a CTC não diferiu entre o solo da área testemunha e o cultivado pelas plantas. Vale ressaltar que, para Ca^{2+} trocável, Mg^{2+} trocável e CTC, o cultivo com Atriplex promoveu valores mais altos em relação às áreas sob cultivo consorciado. Com relação à época de coleta, o teor de Ca^{2+} trocável também foi superior no solo da estação seca e o teor de Mg^{2+} trocável foi superior na estação chuvosa, como nas outras camadas (Tabela 7).

Tabela 7. Contrastes ortogonais do teor de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis e capacidade de troca de cátions (CTC) nas camadas de 0-10, 10-30 e 30-60 cm, em função dos tratamentos e da época de amostragem

Camada cm	Contraste/ Tratamentos	Ca^{2+}		Mg^{2+}		CTC
		Estação seca	Estação chuvosa	cmol _c kg ⁻¹		Estação chuvosa
0-10	1º Contraste					
	Testemunha	3,72	3,09*	0,77	0,94	5,97*
	Cultivos	3,57	2,70	1,21	0,96	5,51
	2º Contraste					
	Consórcios	3,47	2,66	0,90*	0,90*	5,31*
	Cultivo isolado	3,66	2,74	1,47	1,01	5,65
	3º Contraste					
	Consórcios	3,47*	2,66*	0,90	0,90*	5,31*
	Atriplex	4,10	3,11	1,17	1,25	6,17
	CV ¹ (%)	21,24	24,42	112,38	30,47	17,59
Média total	3,59 a	2,75 b	1,15 a	0,96 a	5,56	
CV (%)		22,34		80,90		
10-30	1º Contraste					
	Testemunha	3,84	3,06	0,80	0,99*	4,78
	Cultivos	4,00	3,18	0,83	1,11	4,75
	2º Contraste					
	Consórcios	3,94	2,96*	0,76*	1,05*	4,83
	Cultivo isolado	4,06	3,34	0,88	1,20	4,69
	3º Contraste					
	Consórcios	3,94*	2,96*	0,76*	1,05*	4,83*
	Atriplex	4,94	5,09	1,19	1,75	6,29
	CV (%)	36,94	30,09	23,50	27,34	24,22
Média total	3,98 a	3,16 b	0,82 b	1,11 a	4,75	
CV (%)		27,62		24,59		
30-60	1º Contraste					
	Testemunha	6,21*	4,57	1,56*	1,81	7,13
	Cultivos	5,57	4,00	1,24	1,57	6,58
	2º Contraste					
	Consórcios	4,95*	3,43*	1,04*	1,51	6,06
	Cultivo isolado	6,04	4,42	1,39	1,62	6,97
	3º Contraste					
	Consórcios	4,95*	3,43*	1,04*	1,51*	6,06*
	Atriplex	7,18	6,69	1,92	2,38	10,81
	CV (%)	27,28	47,35	42,49	49,52	62,03
Média total	5,65 a	4,07 b	1,28 b	1,60 a	6,65	
CV (%)		26,26		40,64		

*Médias dos contrastes seguidas de asterisco diferem estatisticamente entre si, pelo teste t a 5% de probabilidade, e médias das estações seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ¹Coeficiente de variação (CV)

O cultivo do solo com as espécies testadas possibilitou aumento nos teores de COT em relação ao solo sem cultivo (testemunha) aos 30 meses do início do experimento (Novembro/2013), no período chuvoso (Tabela 8). E as plantas cultivadas isoladamente possibilitaram a manutenção de maiores valores de COT no solo na estação seca ou chuvosa, em comparação com o cultivo consorciado. A Atriplex, quando cultivada isoladamente, também se sobressaiu sobre a Atriplex cultivada em consórcio com Nim, Leucena e Sabiá (1,76 e 1,27 g kg⁻¹, respectivamente), na estação seca.

Com relação ao N do solo na camada de 0-10 cm, na estação seca não houve diferença entre a área sem cultivo (testemunha) e com cultivo, sendo que o cultivo isolado das plantas e a Atriplex isolada superaram os consórcios (Tabela 8). Na estação chuvosa, o N do solo foi maior sem o cultivo de plantas (testemunha) quando comparado ao solo com o cultivo das plantas (0,44 e 0,40 g kg⁻¹, respectivamente). Mais uma vez, o cultivo isolado e o tratamento de plantas de Atriplex isoladas propiciaram maior teor de N no solo em relação aos tratamentos consorciados. A época de coleta influenciou nos teores de COT e de N no solo, em que na estação chuvosa foi observado maior teor de COT e na seca, de N (Tabela 8).

Ainda na camada de 0-10 cm, o cultivo com as plantas proporcionou maior valor da relação C/N no solo na estação chuvosa (7,85), assim como o cultivo isolado quando comparado ao consórcio (9,40 e 6,06, respectivamente). No geral, o solo na estação chuvosa teve maior relação C/N do que o solo coletado na estação seca (Tabela 8).

Para a camada de 10-30 cm, não existiu diferença entre os teores de COT na área testemunha e na área com o cultivo das plantas (Tabela 8). Sendo que, em ambas estações, a Atriplex cultivada isoladamente promoveu aumento nos teores de COT do solo em relação aos tratamentos desta planta consorciada. E na estação chuvosa o cultivo isolado se sobressaiu sobre os consórcios. O teor de N no solo em ambas as estações foi maior na área testemunha. No entanto, tanto na estação seca como na chuvosa, o teor de N foi superior no solo do tratamento com Atriplex cultivada isoladamente, quando comparada às áreas sob consórcios. Para a relação C/N, a área com plantas teve maior valor que a área testemunha na estação seca e o solo sob cultivo de Atriplex isoladamente teve o maior valor comparado aos seus consórcios. Na estação chuvosa o cultivo isolado se sobressaiu aos consórcios. A época de coleta não influenciou os resultados de COT, N e relação C/N nesta camada.

Tabela 8. Contrastes ortogonais do teor de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (N) e relação C/N do solo nas camadas de 0-10, 10-30 e 30-60 cm, em função dos tratamentos e da época de amostragem

Camada cm	Contraste/ Tratamentos	COT		N		Relação C/N	
		g kg ⁻¹					
		Estação seca	Estação chuvosa	Estação seca	Estação chuvosa	Estação seca	Estação chuvosa
0-10	1º Contraste						
	Testemunha	1,46	1,87*	0,54	0,44*	2,82	4,51*
	Cultivos	1,37	2,78	0,52	0,40	2,72	7,85
	2º Contraste						
	Consórcios	1,27*	2,16*	0,48*	0,37*	2,59*	6,06*
	Cultivo isolado	1,45	3,25	0,54	0,42	2,79	9,40
	3º Contraste						
	Consórcios	1,27*	2,16	0,48*	0,37*	2,59	6,06
	Atriplex	1,76	2,12	0,65	0,50	2,68	4,30
	CV ¹ (%)	34,43	51,97	28,29	27,54	28,84	78,03
Média total	1,38 b	2,67 a	0,52 a	0,40 b	2,72 b	7,54 a	
CV (%)	56,24		24,29		86,44		
10-30	1º Contraste						
	Testemunha	0,94	1,27	0,35*	0,32*	2,74*	3,58
	Cultivos	0,95	0,97	0,30	0,29	3,13	3,48
	2º Contraste						
	Consórcios	0,92	0,74*	0,30	0,26*	3,05	2,77*
	Cultivo isolado	0,97	1,13	0,30	0,31	3,20	3,98
	3º Contraste						
	Consórcios	0,92*	0,74*	0,30*	0,26*	3,05*	2,77
	Atriplex	1,42	1,21	0,39	0,39	3,72	2,64
	CV (%)	44,42	54,72	24,19	26,00	31,20	76,68
Média total	0,95 a	1,00 a	0,31 a	0,29 a	3,08 a	3,49 a	
CV (%)	35,93		14,53		52,55		
30-60	1º Contraste						
	Testemunha	0,53	0,53	0,29	0,24	1,79*	2,36
	Cultivos	0,54	0,43	0,27	0,23	3,06	2,24
	2º Contraste						
	Consórcios	0,44*	0,35*	0,24*	0,20*	1,90*	2,61*
	Cultivo isolado	0,60	0,52	0,29	0,26	3,92	1,92
	3º Contraste						
	Consórcios	0,44*	0,35*	0,24*	0,20*	1,90	2,61*
	Atriplex	0,61	0,92	0,35	0,42	1,93	2,08
	CV (%)	55,90	59,14	41,01	67,29	53,75	48,67
Média total	0,53 a	0,45 a	0,27 a	0,23 a	2,90 a	2,25 a	
CV (%)	58,66		49,64		59,57		

*Médias dos contrastes seguidas de asterisco diferem estatisticamente entre si, pelo teste t a 5% de probabilidade, e médias das estações seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ¹Coeficiente de variação (CV)

Na camada de 30-60 cm, observa-se que o comportamento para COT e N foi semelhante em ambas as estações, onde não existiu diferença entre os teores na área testemunha e na área com o cultivo das plantas (Tabela 8). Sendo que o cultivo isolado se sobressaiu sobre os consórcios, assim como a Atriplex cultivada isoladamente também apresentou maior teor de C e N em relação aos seus consórcios. Para a relação C/N, a área com plantas teve maior valor que a área testemunha na estação seca (3,06 e 1,79, respectivamente), enquanto que na estação chuvosa não houve diferença significativa. O cultivo isolado se sobressaiu aos consórcios na estação seca, e na chuvosa foi o inverso. Os consórcios também apresentaram maior relação C/N que a Atriplex cultivada isoladamente na estação chuvosa. A época de coleta não influenciou os resultados de C, N e C/N para esta camada (Tabela 8). Vale ressaltar, que todos os valores da relação C/N, em todas as camadas e em ambas as estações, foram considerados baixos, ou seja, maior mineralização de nutrientes.

Na camada de 0-10 cm, não foram observadas diferenças significativas entre o solo do tratamento testemunha e o da área com as plantas em ambas as estações para pH e CE do extrato de saturação (Tabela 9). Na estação seca, o solo sob cultivo isolado e Atriplex tiveram valores de pH inferiores ao solo dos consórcios. Isso se inverteu na estação chuvosa, em que o solo dos consórcios é que apresentaram valores de pH mais baixos. Com relação à CEes, o solo submetido aos consórcios teve valores inferiores tanto na comparação com o cultivo isolado, como com a Atriplex isoladamente, em ambas as estações. A época de coleta influenciou a CEes, sendo o solo coletado na estação chuvosa o que apresentou o menor valor (Tabela 9).

No solo coletado na estação chuvosa na camada de 10-30 cm, o pH da área testemunha foi menor do que da área sob cultivo das plantas (7,72 e 8,02, respectivamente). Nesta mesma estação, o solo sob cultivo isolado teve pH menor que o dos consórcios (Tabela 9). Contrariamente, na estação seca o solo dos consórcios é que tiveram o menor pH.

Quanto à CE, não houve diferença entre o solo da área testemunha e o do cultivo com as plantas em ambas as estações (Tabela 9). Independentemente da época de coleta, os consórcios promoveram diminuição na CEes do solo, quando comparados ao cultivo isolado ou à Atriplex cultivada isoladamente. E, não houve diferença significativa tanto para o pH, como para a CEes entre as épocas de coleta.

Tabela 9. Contrastes ortogonais de valores de pH e condutividade elétrica (CEes) do extrato da pasta saturada nas camadas de 0-10, 10-30 e 30-60 cm, em função dos tratamentos e da época de amostragem

Camada cm	Contraste/ Tratamentos	pH		CEes dS m ⁻¹	
		Estação seca	Estação chuvosa	Estação seca	Estação chuvosa
0-10	1º Contraste				
	Testemunha	8,07	8,08	0,62	0,36
	Cultivos	7,97	8,02	0,58	0,30
	2º Contraste				
	Consórcios	8,04*	7,89*	0,51*	0,26*
	Cultivo isolado	7,91	8,10	0,64	0,32
	3º Contraste				
	Consórcios	8,04*	7,89*	0,51*	0,26*
	Atriplex	7,78	8,31	0,96	0,50
	CV ¹ (%)	3,89	4,85	75,61	65,10
Média total	7,98 a	8,02 a	0,59 a	0,31 b	
CV (%)	4,26		74,62		
10-30	1º Contraste				
	Testemunha	8,00	7,72*	0,62	0,52
	Cultivos	7,93	8,02	0,62	0,47
	2º Contraste				
	Consórcios	7,79*	8,09*	0,56*	0,32*
	Cultivo isolado	8,02	7,96	0,66	0,58
	3º Contraste				
	Consórcios	7,79	8,09	0,56*	0,32*
	Atriplex	7,90	8,19	1,01	1,52
	CV (%)	4,95	5,22	54,40	136,93
Média total	7,94 a	7,94 a	0,62 a	0,48 a	
CV (%)	4,82		94,34		
30-60	1º Contraste				
	Testemunha	7,76	7,29*	1,06	1,18
	Cultivos	7,75	7,73	0,94	0,94
	2º Contraste				
	Consórcios	7,62*	7,73	0,65*	0,53*
	Cultivo isolado	7,83	7,74	1,15	1,26
	3º Contraste				
	Consórcios	7,62*	7,73	0,65*	0,53*
	Atriplex	8,08	7,79	2,11	2,89
	CV (%)	4,08	7,72	79,23	134,57
Média total	7,75 a	7,67 a	0,95 a	0,97 a	
CV (%)	5,66		86,29		

*Médias dos contrastes seguidas de asterisco diferem estatisticamente entre si, pelo teste t a 5% de probabilidade, e médias das estações seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ¹Coeficiente de variação (CV)

Na camada de 30-60 cm foi observado o mesmo da camada anterior para CEes (Tabela 9). Para o pH, houve diferença significativa entre a área testemunha e o cultivo com as plantas apenas na estação chuvosa, sendo o menor pH o da área testemunha. Na estação seca, o solo dos consórcios teve o menor pH tanto na comparação com o cultivo isolado, como com a Atriplex isoladamente. E a época de coleta não influenciou os resultados de pH e CEes (Tabela 9).

Com relação ao teor de Na^+ solúvel, na camada de 0-10 cm não houve diferença entre o solo da área testemunha e o da área com o cultivo das plantas, em ambas as estações (Tabela 10). No entanto, o Na^+ solúvel no solo sob cultivo de Atriplex isoladamente foi superior ao de seus consórcios nas duas estações. Para o K^+ solúvel, na estação seca não houve diferença entre o solo da testemunha e o da área com as espécies vegetais, mas os tratamentos com o cultivo isolado e a Atriplex isoladamente tiveram valores mais elevados de K^+ solúvel no solo, quando comparados ao dos tratamentos de consórcios. Na estação chuvosa, o solo da área testemunha teve maior teor de K^+ solúvel que o do cultivo com as plantas (1,64 e 1,05 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ de K^+ solúvel, respectivamente). E o solo sob cultivo da Atriplex se sobressaiu sobre seus consórcios em relação do teor de K^+ solúvel. Em todas as camadas, para Na^+ e K^+ solúveis não houve influência da época de coleta (Tabela 10).

Na camada de 10-30 cm, na estação seca, o solo do tratamento com o cultivo das plantas teve maior teor de Na^+ solúvel do que o da área testemunha (2,17 e 1,63 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ de Na^+ solúvel, respectivamente). Tanto o solo sob cultivo isolado, como o da Atriplex isoladamente se sobressaíram sobre o dos consórcios, em ambas as estações. No entanto, não houve diferença entre o Na^+ solúvel do solo no cultivo das plantas e o da área testemunha na estação chuvosa. Com relação ao K^+ solúvel, em ambas as estações, o solo da área testemunha e o do cultivo com as plantas não diferiram. No entanto, o cultivo de Atriplex isoladamente promoveu aumento no teor de K^+ solúvel no solo em relação aos seus consórcios nas duas estações.

O comportamento do Na^+ solúvel no solo da camada de 30-60 cm coletado na estação seca foi inverso ao da camada anterior, com o solo da testemunha apresentando o maior teor (Tabela 10). No entanto, os teores no solo sob o cultivo isolado e o cultivo com Atriplex isoladamente também se sobressaíram sobre os dos consórcios, em ambas as estações. Com relação ao K^+ solúvel na camada de 30-60 cm, não houve diferença significativa, em ambas as estações, na comparação entre o solo do tratamento testemunha e o das áreas cultivadas com as plantas.

Tabela 10. Contrastes ortogonais do teor de Na⁺ e K⁺ do extrato da pasta saturada nas camadas de 0-10, 10-30 e 30-60 cm, em função dos tratamentos e da época de amostragem

Camada cm	Contraste/ Tratamentos	Na ⁺ K ⁺ mmol _c L ⁻¹			
		Estação seca	Estação chuvosa	Estação seca	Estação chuvosa
0-10	1 ^o Contraste				
	Testemunha	1,60	0,87	1,57	1,64*
	Cultivos	1,54	1,35	1,35	1,05
	2 ^o Contraste				
	Consórcios	1,31	1,25	1,17*	1,06
	Cultivo isolado	1,72	1,42	1,48	1,04
	3 ^o Contraste				
	Consórcios	1,31*	1,25*	1,17*	1,06*
	Atriplex	3,98	2,19	1,75	1,35
	CV ¹ (%)	142,01	100,82	60,89	50,79
Média total	1,55 a	1,29 a	1,38 a	1,12 a	
CV (%)	123,95		57,17		
10-30	1 ^o Contraste				
	Testemunha	1,63*	2,41	0,82	0,89
	Cultivos	2,17	2,47	0,82	0,93
	2 ^o Contraste				
	Consórcios	1,92*	1,89*	0,78	0,82*
	Cultivo isolado	2,35	2,90	0,84	1,02
	3 ^o Contraste				
	Consórcios	1,92*	1,89*	0,78*	0,82*
	Atriplex	3,70	7,72	1,09	1,09
	CV (%)	59,08	138,25	57,26	43,46
Média total	2,10 a	2,46 a	0,82 a	0,93 a	
CV (%)	107,99		50,75		
30-60	1 ^o Contraste				
	Testemunha	4,73*	5,42	0,43	0,59
	Cultivos	3,62	4,65	0,57	0,62
	2 ^o Contraste				
	Consórcios	2,51*	2,69*	0,64	0,73*
	Cultivo isolado	4,44	6,11	0,52	0,54
	3 ^o Contraste				
	Consórcios	2,51*	2,69*	0,64*	0,73
	Atriplex	6,61	14,80	0,33	0,57
	CV (%)	65,61	139,92	97,40	84,18
Média total	3,75 a	4,74 a	0,55 a	0,62 a	
CV (%)	106,64		94,85		

*Médias dos contrastes seguidas de asterisco diferem estatisticamente entre si, pelo teste t a 5% de probabilidade, e médias das estações seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ¹Coefficiente de variação (CV)

Os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} solúveis no solo da camada de 0-10 cm não diferiram significativamente entre a área com o cultivo das espécies vegetais e o solo sem cultivo (testemunha), em ambas as estações (Tabela 11). Na estação seca, o cultivo isolado e com a Atriplex promoveram aumento nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} solúveis do solo. Na estação chuvosa, o teor de Ca^{2+} solúvel também foi superior no cultivo isolado e no cultivo com Atriplex, no entanto, o teor de Mg^{2+} solúvel foi superior nos consórcios em comparação ao cultivo isolado (0,61 e 0,43 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, respectivamente). A época de coleta influenciou apenas o teor de Ca^{2+} solúvel, sendo a estação seca a que teve a maior média.

A RAS dos tratamentos foi baixa, demonstrando que os solos não são sódicos ($\text{RAS} \leq 13$). No solo da camada de 0-10 cm, na estação chuvosa, a RAS foi superior na área com o cultivo de plantas. E o solo dos consórcios teve menor valor de RAS quando comparado ao da Atriplex cultivada isoladamente, em ambas as estações. Os valores médios da RAS entre as estações não diferiram em nenhuma das camadas estudadas (Tabela 11).

Na camada de 10-30, o comportamento do Ca^{2+} solúvel no solo foi o mesmo da camada superficial. No entanto, a época de coleta não influenciou esta variável. Para o Mg^{2+} solúvel não houve diferença entre o solo da área com o cultivo das plantas e o da testemunha em ambas as estações (Tabela 11). Na estação chuvosa, o teor de Mg^{2+} solúvel no solo sob cultivo isolado se sobressaiu ao dos consórcios. E o solo com Atriplex cultivada isoladamente teve o maior teor de Mg^{2+} solúvel comparado ao de seus consórcios, em ambas as estações. O solo da estação chuvosa teve maior teor de Mg^{2+} solúvel quando comparado ao da estação seca. Com relação à RAS, na estação seca ela foi maior no solo da área com plantas. No entanto, o solo sob cultivos em consórcios teve os menores valores em comparação ao cultivo apenas com Atriplex, em ambas as estações.

O Ca^{2+} solúvel no solo da camada de 30-60 cm, novamente apresentou um comportamento semelhante às demais camadas, com exceção que na estação seca, o solo da área testemunha teve maior teor que o da área com plantas (2,20 e 1,60 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ de Ca^{2+} , respectivamente). E, mais uma vez, a época de coleta não influenciou os dados.

Tabela 11. Contrastes ortogonais do teor de Ca^{2+} e de Mg^{2+} e da relação de adsorção de sódio (RAS) do extrato da pasta saturada nas camadas de 0-10, 10-30 e 30-60 cm, em função dos tratamentos e da época de amostragem

Camada cm	Contraste/ Tratamentos	Ca^{2+}		Mg^{2+}		RAS	
		mmol _c L ⁻¹				(mmol _c L ⁻¹) ^{0,5}	
		Estação seca	Estação chuvosa	Estação seca	Estação chuvosa	Estação seca	Estação chuvosa
0-10	1º Contraste						
	Testemunha	1,73	0,73	0,68	0,46	0,83	0,84*
	Cultivos	2,00	0,63	0,73	0,51	0,86	1,58
	2º Contraste						
	Consórcios	1,81*	0,52*	0,58*	0,61*	0,82	1,55
	Cultivo isolado	2,15	0,71	0,84	0,43	0,90	1,61
	3º Contraste						
	Consórcios	1,81*	0,52*	0,58*	0,61	0,82*	1,55*
	Atriplex	2,41	0,81	0,97	0,52	1,91	2,96
	CV ¹ (%)	61,42	71,01	59,44	97,30	106,47	115,01
Média total	1,97 a	0,64 b	0,72 a	0,50 a	0,86 a	1,49 a	
CV (%)	63,03		70,22		116,94		
10-30	1º Contraste						
	Testemunha	1,06	0,98	0,57	0,92	1,29*	1,44
	Cultivos	1,01	1,19	0,66	1,09	1,72	1,84
	2º Contraste						
	Consórcios	0,85*	0,64*	0,72	0,79*	1,64	1,95
	Cultivo isolado	1,14	1,61	0,61	1,32	1,79	1,75
	3º Contraste						
	Consórcios	0,85*	0,64*	0,72*	0,79*	1,64*	1,95*
	Atriplex	1,88	3,95	1,04	2,04	2,13	3,04
	CV (%)	70,66	162,23	79,98	95,54	54,80	96,13
Média total	1,02 a	1,17 a	0,65 b	1,07 a	1,67 a	1,79 a	
CV (%)	125,86		93,56		78,35		
30-60	1º Contraste						
	Testemunha	2,20*	2,84	0,98	1,49	2,69	2,36
	Cultivos	1,60	3,41	0,92	2,11	2,38	2,22
	2º Contraste						
	Consórcios	1,20*	1,50*	0,89	1,97	1,91*	1,90*
	Cultivo isolado	1,90	4,83	0,94	2,21	2,74	2,46
	3º Contraste						
	Consórcios	1,20*	1,50*	0,89*	1,97*	1,91*	1,90*
	Atriplex	3,60	10,33	1,31	3,56	3,10	3,70
	CV (%)	75,45	163,87	85,85	126,51	43,57	77,32
Média total	1,68 a	3,34 a	0,92 b	2,03 a	2,42 a	2,24 a	
CV (%)	154,01		120,76		56,02		

*Médias dos contrastes seguidas de asterisco diferem estatisticamente entre si, pelo teste t a 5% de probabilidade, e médias das estações seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ¹Coeficiente de variação (CV)

Ainda na camada de 30-60, em ambas as estações, o Mg^{2+} solúvel não diferiu entre o solo da área testemunha e o do cultivo com as plantas, o solo da Atriplex cultivada isoladamente teve o maior teor de Mg^{2+} solúvel comparada aos seus consórcios, e a estação chuvosa se sobressaiu sobre a estação seca. Com relação à RAS, também não houve diferença entre a área testemunha e o cultivo com as plantas. No entanto, o solo sob os consórcios teve os menores valores, em relação ao cultivo isolado e a Atriplex cultivada isoladamente, tanto na estação seca, como na chuvosa (Tabela 11).

3.3.2 Extração de elementos pelas plantas

A biomassa de cada fração das plantas (caule, folha, flor e fruto) e a biomassa total por planta variaram de acordo com o tratamento (Tabela 12). A maior biomassa de caule foi observada nas plantas de Nim em consórcio com Atriplex, diferindo das plantas de Sabiá em consórcio com Atriplex. Este mesmo comportamento se refletiu na biomassa total das plantas. Não houve diferença entre a fração folha dos tratamentos. Para as flores a maior biomassa foi obtida nas plantas de Nim em cultivo isolado ou consorciado e nas plantas de Sabiá. Já para os frutos a maior biomassa foi observada nas plantas de Leucena tanto em cultivo isolado como no consorciado (Tabela 12).

Tabela 12. Biomassa seca por fração e biomassa total das plantas cultivadas nos diferentes tratamentos aos 30 meses

Tratamento	Frações da planta				Biomassa total kg planta ⁻¹
	Caule	Folha	Flor	Fruto	
	Biomassa kg planta ⁻¹		Biomassa g planta ⁻¹		
Atriplex	4,15 ab	0,95 a	-	-	5,10 ab
Atriplex (A x L)	4,28 ab	1,27 a	-	-	5,55 ab
Atriplex (A x N)	6,67 ab	1,43 a	-	-	8,10 ab
Atriplex (A x S)	5,88 ab	1,58 a	-	-	7,46 ab
Leucena (A x L)	1,64 ab	0,52 a	5,93 b	736,95 a	2,90 ab
Nim (A x N)	7,39 a	3,22 a	32,74 a	135,41 b	10,75 a
Sabiá (A x S)	0,52 b	0,18 a	-	-	0,73 b
Leucena	1,94 ab	0,29 a	6,45 b	501,29 a	2,73 ab
Nim	3,57 ab	1,52 a	34,55 a	124,65 b	5,22 ab
Sabiá	1,58 ab	0,88 a	33,20 a	-	2,46 ab

*Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 10% de probabilidade

Ao avaliar a biomassa por fração da planta acumulada por hectare (Tabela 13), nota-se que a maior biomassa de caule foi obtida no tratamento de plantas de Atriplex consorciada com Nim e de plantas de Atriplex em cultivo isolado. Não houve diferença para a biomassa de folhas. Para as flores a maior biomassa acumulada foi nos tratamentos com Nim, Sabiá e consórcio de Atriplex e Nim. Já para os frutos o maior acúmulo foi nos tratamentos com plantas de Leucena tanto em cultivo isolado como no consorciado com Atriplex. A biomassa acumulada total foi maior no tratamento de Atriplex consorciada com o Nim, diferindo apenas do tratamento com Leucena e com Sabiá em cultivo isolado (Tabela 13).

Tabela 13. Biomassa acumulada por fração e biomassa acumulada total das plantas cultivadas nos diferentes tratamentos aos 30 meses

Tratamento	Frações da planta				Acumulado total t ha ⁻¹
	Caule	Folha	Flor	Fruto	
	Acumulado				
	t ha ⁻¹	kg ha ⁻¹			
Atriplex	10,38 ab	2,37 a	-	-	12,75 ab
A x L	7,40 b	2,24 a	7,41 b	1253,23 a	10,90 ab
A x N	17,57 a	5,81 a	40,93 a	169,26 b	23,55 a
A x S	8,00 b	2,20 a	-	-	10,24 ab
Leucena	4,86 b	0,72 a	16,13 b	921,19 a	6,54 b
Nim	8,92 b	3,80 a	86,39 a	311,19 b	13,11 ab
Sabiá	3,94 b	2,20 a	83,00 a	-	6,16 b

*Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 10% de probabilidade

Ao avaliar os teores dos elementos por frações da planta, observa-se que os teores de Na, tanto no caule como na folha, foram maiores nas plantas de Atriplex (Tabela 14). Houve grande variação no teor de K nas folhas das plantas, sendo os maiores valores observados nas plantas de Atriplex em cultivo isolado, de Atriplex em consórcio com Nim, Leucena e Sabiá, nas plantas de Sabiá consorciada com Atriplex e nas de Nim. Nas flores o maior teor de potássio foi observado nas plantas de Nim em cultivo isolado e consorciado (Tabela 14).

O maior teor de Ca no caule das plantas foi observado no Sabiá consorciado, na Atriplex cultivada isoladamente, no Nim consorciado e no Nim e Sabiá cultivados isoladamente. As folhas de Nim tiveram o maior teor de Ca. Já nas flores, as plantas de Sabiá tiveram o maior teor deste elemento (Tabela 14). Com relação ao Mg, houve diferença apenas na fração das folhas das plantas, na qual o maior teor foi das plantas de atriplex cultivadas em consórcio com Leucena, Sabiá e Nim (Tabela 14).

Tabela 14. Teor (g kg^{-1}) de Na, K, Ca e Mg nas frações das plantas cultivadas nos diferentes tratamentos aos 30 meses

Tratamento	Frações da planta			
	Caule	Folha	Flor	Fruto
Na (g kg^{-1})				
Atriplex	6,47 a	43,43 ab	-	-
Atriplex (A x L)	7,02 a	48,07 ab	-	-
Atriplex (A x N)	5,03 a	42,00 b	-	-
Atriplex (A x S)	6,69 a	49,28 ab	-	-
Leucena (A x L)	0,21 b	0,45 c	0,46 a	0,32 a
Nim (A x N)	0,26 b	0,19 c	0,42 a	0,13 a
Sabiá (A x S)	0,44 b	0,19 c	-	-
Leucena	0,22 b	0,34 c	0,06 a	0,20 a
Nim	0,42 b	0,11 c	0,25 a	0,45 a
Sabiá	0,19 b	0,09 c	0,03 a	-
K (g kg^{-1})				
Atriplex	14,51 a	24,23 a	-	-
Atriplex (A x L)	15,87 a	18,80 ab	-	-
Atriplex (A x N)	14,95 a	24,67 a	-	-
Atriplex (A x S)	11,61 a	17,85 ab	-	-
Leucena (A x L)	11,94 a	8,62 b	16,99 b	22,00 a
Nim (A x N)	17,49 a	13,17 b	26,58 ab	26,51 a
Sabiá (A x S)	13,75 a	18,64 ab	-	-
Leucena	17,15 a	11,9 b	17,74 b	19,41 a
Nim	20,53 a	15,00 ab	31,88 a	17,71 a
Sabiá	11,48 a	12,02 b	15,66 b	-
Ca (g kg^{-1})				
Atriplex	8,75 ab	16,09 d	-	-
Atriplex (A x L)	6,33 b	17,16 d	-	-
Atriplex (A x N)	6,33 b	15,74 d	-	-
Atriplex (A x S)	7,08 b	17,56 d	-	-
Leucena (A x L)	6,92 b	33,11 bc	4,20 b	5,32 a
Nim (A x N)	7,66 ab	35,98 b	5,07 b	4,49 a
Sabiá (A x S)	11,19 a	16,81 d	-	-
Leucena	6,43 b	32,13 c	3,79 b	6,36 a
Nim	7,91 ab	41,57 a	5,32 b	4,14 a
Sabiá	7,82 ab	15,04 d	9,93 a	-
Mg (g kg^{-1})				
Atriplex	1,35 a	9,61 bc	-	-
Atriplex (A x L)	1,49 a	11,37 a	-	-
Atriplex (A x N)	1,27 a	10,01 abc	-	-
Atriplex (A x S)	1,23 a	10,64 ab	-	-
Leucena (A x L)	1,34 a	3,24 d	1,32 a	1,62 a
Nim (A x N)	2,19 a	8,77 c	1,47 a	1,07 a
Sabiá (A x S)	0,85 a	1,78 d	-	-
Leucena	1,16 a	3,18 d	1,14 a	1,37 a
Nim	1,72 a	8,65 c	1,07 a	0,68 a
Sabiá	1,13 a	2,43 d	1,46 a	-

*Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 10% de probabilidade

As folhas das plantas de Leucena em cultivo solteiro e consorciado e das plantas de Nim tiveram os maiores teores de N. Nas flores e frutos os maiores teores deste elemento foram observados nas plantas de Leucena tanto em cultivo solteiro como consorciado (Tabela 15). Houve grande variação nos teores de P no caule das plantas, o maior teor foi observado nas plantas de Nim em cultivo solteiro e consorciado e nas plantas de Sabiá. Com relação ao CI, os maiores teores no caule e nas folhas foram das plantas de Atriplex tanto cultivadas isoladamente como em consórcio. Para os frutos o maior teor foi das plantas de Leucena em cultivo solteiro e consorciado.

Tabela 15. Teor (g kg^{-1}) de N, P e CI nas frações das plantas cultivadas nos diferentes tratamentos aos 30 meses

Tratamento	Frações da planta			
	Caule	Folha	Flor	Fruto
N (g kg^{-1})				
Atriplex	7,33 a	18,55 c	-	-
Atriplex (A x L)	9,04 a	16,34 c	-	-
Atriplex (A x N)	9,40 a	14,77 c	-	-
Atriplex (A x S)	9,06 a	17,38 c	-	-
Leucena (A x L)	11,52 a	27,34 ab	42,30 a	27,78 a
Nim (A x N)	10,92 a	21,58 bc	20,70 b	18,95 bc
Sabiá (A x S)	10,72 a	22,42 bc	-	-
Leucena	11,09 a	31,29 a	39,90 a	26,90 ab
Nim	12,98 a	28,50 ab	22,54 b	18,47 c
Sabiá	10,79 a	22,38 bc	25,81 b	-
P (g kg^{-1})				
Atriplex	1,69 de	1,93 a	-	-
Atriplex (A x L)	1,94 cde	2,20 a	-	-
Atriplex (A x N)	1,77 de	1,31 a	-	-
Atriplex (A x S)	2,13 cde	2,20 a	-	-
Leucena (A x L)	1,29 e	1,59 a	2,96 a	2,05 a
Nim (A x N)	4,20 a	1,43 a	2,57 a	2,68 a
Sabiá (A x S)	2,53 bcd	2,03 a	-	-
Leucena	1,39 de	1,57 a	3,23 a	2,24 a
Nim	3,43 ab	1,91 a	2,48 a	3,01 a
Sabiá	3,10 abc	2,47 a	3,74 a	-
CI (g kg^{-1})				
Atriplex	10,32 ab	64,00 a	-	-
Atriplex (A x L)	13,28 a	69,41 a	-	-
Atriplex (A x N)	9,35 ab	65,12 a	-	-
Atriplex (A x S)	10,15 ab	67,54 a	-	-
Leucena (A x L)	3,67 b	5,83 b	4,46 a	7,64 a
Nim (A x N)	3,00 b	2,41 b	1,41 a	0,49 b
Sabiá (A x S)	4,29 b	2,84 b	-	-
Leucena	5,03 b	5,58 b	3,87 a	7,86 a
Nim	2,45 b	1,39 b	0,68 a	-
Sabiá	4,74 b	4,77 b	6,29 a	-

*Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 10% de probabilidade

A extração de Na (conteúdo) no caule e folhas foi maior nas plantas de Atriplex. As plantas de Leucena, Nim e Sabiá, tanto em consórcios como em cultivo isolado, tiveram um conteúdo de Na inferior. Assim como para o teor, o conteúdo de K nas frações caule e folha das plantas apresentou grande variação, sendo o maior valor para o caule observado nas plantas de Nim em consórcio com Atriplex ($126,00 \text{ g planta}^{-1}$) e para as folhas nas plantas de Nim em consórcio com Atriplex, bem como nas folhas da Atriplex em consórcio com o Nim (Tabela 16).

O maior conteúdo de Ca nas folhas foi observado nas plantas de Nim em cultivo consorciado. Com relação ao conteúdo de Mg, na fração caule as plantas de Nim tanto em consórcio como em cultivo isolado se sobressaíram. Na fração folha essas mesmas plantas tiveram destaque, junto com as plantas de Atriplex tanto em consórcio como em cultivo isolado (Tabela 16).

As folhas de Nim e os frutos de Leucena se sobressaíram no conteúdo de N, tanto no cultivo isolado como em consórcio. Para a extração de P, a fração caule das plantas de Nim em consórcio com Atriplex teve o maior valor ($32,76 \text{ g planta}^{-1}$). E o conteúdo de Cl na fração folha foi superior nas plantas de Atriplex tanto em cultivo solteiro, como no consórcio (Tabela 17).

A extração total de Na no caule e na folha foi superior nas plantas de Atriplex tanto em consórcio como no cultivo isolado (Tabela 18). Para o K as extrações dos caules e folhas dos tratamentos tiveram grande variação. A maior extração de Ca nas folhas das plantas foi observada no Nim isolado ou em consórcio, e nos frutos a maior extração foi obtida pelas plantas de Leucena, tanto consorciada como cultivada isoladamente. As plantas que tiveram os maiores conteúdos totais de Mg nas folhas foram as Nim (em consórcio e isoladas) e as de Atriplex (em consórcio e isoladas) (Tabela 18).

Tabela 16. Conteúdo (g planta⁻¹) de Na, K, Ca e Mg nas frações das plantas cultivadas nos diferentes tratamentos aos 30 meses

Tratamento	Frações da planta			
	Caule	Folha	Flor	Fruto
Na (g planta⁻¹)				
Atriplex	26,35 a	42,27 a	-	-
Atriplex (A x L)	30,21 a	61,48 a	-	-
Atriplex (A x N)	28,88 a	58,45 a	-	-
Atriplex (A x S)	44,95 a	81,26 a	-	-
Leucena (A x L)	0,54 b	0,23 b	-	0,40 a
Nim (A x N)	2,68 b	0,88 b	0,01 a	0,03 a
Sabiá (A x S)	0,24 b	0,03 b	-	-
Leucena	0,38 b	0,10 b	-	0,10 a
Nim	1,23 b	0,27 b	0,02 a	0,06 a
Sabiá	0,28 b	0,11 b	-	-
K (g planta⁻¹)				
Atriplex	60,68 ab	23,78 ab	-	-
Atriplex (A x L)	69,57 ab	25,62 ab	-	-
Atriplex (A x N)	81,19 ab	39,41 a	-	-
Atriplex (A x S)	70,94 ab	26,96 ab	-	-
Leucena (A x L)	19,07 b	4,34 b	0,10 a	16,16 a
Nim (A x N)	126,00 a	41,70 a	0,79 a	3,51 b
Sabiá (A x S)	7,06 b	3,44 b	-	-
Leucena	34,20 b	3,55 b	0,11 a	9,78 ab
Nim	53,62 ab	17,28 ab	2,17 a	2,21 b
Sabiá	15,67 b	9,80 b	0,52 a	-
Ca (g planta⁻¹)				
Atriplex	34,74 a	15,59 b	-	-
Atriplex (A x L)	27,85 a	21,28 b	-	-
Atriplex (A x N)	43,09 a	20,76 b	-	-
Atriplex (A x S)	46,52 a	27,46 b	-	-
Leucena (A x L)	11,60 a	18,03 b	0,02 a	3,65 a
Nim (A x N)	57,15 a	107,17 a	0,19 a	0,45 a
Sabiá (A x S)	5,91 a	3,03 b	-	-
Leucena	13,19 a	9,19 b	0,02 a	3,24 a
Nim	29,68 a	65,44 ab	0,36 a	0,52 a
Sabiá	15,48 a	18,33 b	0,33 a	-
Mg (g planta⁻¹)				
Atriplex	4,54 b	9,52 ab	-	-
Atriplex (A x L)	6,39 b	14,19 ab	-	-
Atriplex (A x N)	6,92 b	15,15 ab	-	-
Atriplex (A x S)	6,34 b	16,54 ab	-	-
Leucena (A x L)	2,07 b	1,66 b	0,01 a	1,01 a
Nim (A x N)	16,22 a	26,50 a	0,05 a	0,09 a
Sabiá (A x S)	0,42 b	0,32 b	-	-
Leucena	2,35 b	0,91 b	0,01 a	0,69 a
Nim	7,29 ab	13,11 ab	0,07 a	0,08 a
Sabiá	1,67 b	2,47 b	0,05 a	-

*Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 10% de probabilidade

Tabela 17. Conteúdo (g planta⁻¹) de N, P e Cl nas frações das plantas cultivadas nos diferentes tratamentos aos 30 meses

Tratamento	Frações da planta			
	Caule	Folha	Flor	Fruto
	N (g planta ⁻¹)			
Atriplex	32,32 ab	18,27 b	-	-
Atriplex (A x L)	40,03 ab	21,96 b	-	-
Atriplex (A x N)	60,18 ab	23,10 b	-	-
Atriplex (A x S)	55,99 ab	28,48 b	-	-
Leucena (A x L)	18,22 b	13,66 b	0,26 a	22,09 a
Nim (A x N)	96,88 a	69,39 a	0,57 a	2,44 b
Sabiá (A x S)	5,46 b	4,04 b	-	-
Leucena	19,89 ab	9,19 b	0,26 a	13,31 a
Nim	31,12 ab	37,18 ab	1,54 a	2,30 b
Sabiá	15,03 b	19,58 b	0,86 a	-
	P (g planta ⁻¹)			
Atriplex	7,22 b	1,92 a	-	-
Atriplex (A x L)	8,01 b	2,93 a	-	-
Atriplex (A x N)	10,57 b	1,66 a	-	-
Atriplex (A x S)	12,01 b	3,58 a	-	-
Leucena (A x L)	1,57 b	0,74 a	0,02 a	1,54 a
Nim (A x N)	32,76 a	4,34 a	0,09 a	0,40 a
Sabiá (A x S)	1,32 b	0,37 a	-	-
Leucena	2,86 b	0,48 a	0,02 a	1,11 a
Nim	12,16 b	2,10 a	0,17 a	0,38 a
Sabiá	4,84 b	2,29 a	0,12 a	-
	Cl (g planta ⁻¹)			
Atriplex	43,16 a	61,43 a	-	-
Atriplex (A x L)	58,99 a	89,13 a	-	-
Atriplex (A x N)	50,26 a	91,90 a	-	-
Atriplex (A x S)	64,28 a	104,87 a	-	-
Leucena (A x L)	6,86 b	3,95 b	0,05 a	5,22 a
Nim (A x N)	24,19 ab	8,62 b	0,02 a	0,13 a
Sabiá (A x S)	2,31 b	0,54 b	-	-
Leucena	9,37 b	1,54 b	0,02 a	3,92 a
Nim	6,44 b	2,37 b	0,05 a	-
Sabiá	8,79 b	4,24 b	0,21 a	-

*Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 10% de probabilidade

Tabela 18. Conteúdo total de Na, K, Ca e Mg acumulados na biomassa das frações vegetais nas plantas dos diferentes tratamentos aos 30 meses de cultivo

Tratamento	Frações da planta			
	Caule	Folha	Flor	Fruto
Na (kg ha⁻¹)				
Atriplex	65,88 a	105,67 a	-	-
Atriplex (A x L)	37,77 a	76,86 a	-	-
Atriplex (A x N)	36,10 a	73,06 a	-	-
Atriplex (A x S)	56,18 a	101,57 a	-	-
Leucena (A x L)	0,68 b	0,29 b	-	0,49 a
Nim (A x N)	3,35 b	1,10 b	0,01 a	0,03 a
Sabiá (A x S)	0,31 b	0,04 b	-	-
Leucena	0,94 b	0,25 b	-	0,26 a
Nim	3,07 b	0,66 b	0,04 a	0,14 a
Sabiá	0,71 b	0,28 b	-	-
K (kg ha⁻¹)				
Atriplex	151,71 a	59,44 a	-	-
Atriplex (A x L)	86,96 ab	32,02 ab	-	-
Atriplex (A x N)	101,49 ab	49,26 a	-	-
Atriplex (A x S)	88,68 ab	33,70 ab	-	-
Leucena (A x L)	23,83 b	5,43 b	0,13 a	20,20 a
Nim (A x N)	157,50 a	52,12 a	0,98 a	4,39 b
Sabiá (A x S)	8,82 b	4,30 b	-	-
Leucena	85,48 ab	8,87 b	0,29 a	24,45 a
Nim	134,06 ab	43,21 ab	5,44 a	5,52 b
Sabiá	39,16 ab	24,51 ab	1,30 a	-
Ca (kg ha⁻¹)				
Atriplex	86,86 a	38,98 c	-	-
Atriplex (A x L)	34,81 a	26,60 c	-	-
Atriplex (A x N)	53,87 a	25,95 c	-	-
Atriplex (A x S)	58,15 a	34,32 c	-	-
Leucena (A x L)	14,50 a	22,54 c	0,03 a	4,56 a
Nim (A x N)	71,43 a	133,96 ab	0,23 a	0,56 b
Sabiá (A x S)	7,40 a	3,78 c	-	-
Leucena	32,97 a	22,99 c	0,06 a	8,10 a
Nim	74,19 a	163,61 a	0,91 a	1,29 b
Sabiá	38,71 a	45,84 bc	0,82 a	-
Mg (kg ha⁻¹)				
Atriplex	11,36 a	23,79 ab	-	-
Atriplex (A x L)	7,99 a	17,73 ab	-	-
Atriplex (A x N)	8,64 a	18,94 ab	-	-
Atriplex (A x S)	7,93 a	20,67 ab	-	-
Leucena (A x L)	2,59 a	2,07 b	0,01 a	1,27 a
Nim (A x N)	20,28 a	33,12 a	0,06 a	0,12 a
Sabiá (A x S)	0,53 a	0,40 b	-	-
Leucena	5,88 a	2,28 b	0,02 a	1,72 a
Nim	18,23 a	32,77 a	0,18 a	0,21 a
Sabiá	4,19 a	6,17 b	0,12 a	-

*Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 10% de probabilidade

A extração total de N pelas plantas com acúmulo nas folhas foi maior no Nim (em consórcio e isolado), Sabiá e Atriplex (isolados). Os frutos de Leucena tanto em consórcio como em cultivo isolado se sobressaíram no conteúdo total de N. Para a extração total do P houve diferenças entre as plantas apenas na fração caule. E a extração total de Cl na fração folha foi maior nas plantas de Atriplex cultivadas isoladamente ou em consórcio (Tabela 19).

Tabela 19. Conteúdo total de N, P e Cl acumulados na biomassa das frações vegetais nas plantas dos diferentes tratamentos aos 30 meses de cultivo

Tratamento	Frações da planta			
	Caule	Folha	Flor	Fruto
N (kg ha ⁻¹)				
Atriplex	80,81 a	45,68 ab	-	
Atriplex (A x L)	50,04 ab	27,44 b	-	
Atriplex (A x N)	75,23 a	28,87 b	-	
Atriplex (A x S)	70,00 a	35,60 b	-	
Leucena (A x L)	22,77 b	17,07 b	0,33 a	27,62 a
Nim (A x N)	121,09 a	86,74 a	0,71 a	3,05 b
Sabiá (A x S)	6,82 b	5,06 b	-	
Leucena	49,74 ab	22,96 b	0,64 a	33,27 a
Nim	77,80 a	92,94 a	3,84 a	5,76 b
Sabiá	37,59 b	48,94 ab	2,14 a	
P (kg ha ⁻¹)				
Atriplex	18,06 ab	4,80 a	-	
Atriplex (A x L)	10,02 b	3,66 a	-	
Atriplex (A x N)	13,21 ab	2,08 a	-	
Atriplex (A x S)	15,01 ab	4,47 a	-	
Leucena (A x L)	1,96 b	0,92 a	0,02 a	1,93 a
Nim (A x N)	40,95 a	5,43 a	0,11 a	0,50 a
Sabiá (A x S)	1,66 b	0,46 a	-	
Leucena	7,15 b	1,21 a	0,05 a	2,78 a
Nim	30,40 ab	5,25 a	0,42 a	0,94 a
Sabiá	12,10 ab	5,73 a	0,31 a	
Cl (kg ha ⁻¹)				
Atriplex	107,92 a	153,58 a	-	-
Atriplex (A x L)	73,74 ab	111,41 a	-	-
Atriplex (A x N)	62,83 ab	114,87 a	-	-
Atriplex (A x S)	80,36 ab	131,08 a	-	-
Leucena (A x L)	8,58 b	4,94 b	0,06 a	6,53 a
Nim (A x N)	30,23 ab	10,78 b	0,04 a	0,16 a
Sabiá (A x S)	2,88 b	0,67 b	-	-
Leucena	23,42 ab	3,85 b	0,06 a	9,79 a
Nim	16,10 b	5,92 b	0,12 a	-
Sabiá	21,99 ab	10,61 b	0,52 a	-

*Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 10% de probabilidade

Devido aos teores dos elementos serem diferentes entre as partes das plantas estudadas, estes valores foram submetidos a uma média ponderada, a fim de se obter o teor médio, também foi calculado o conteúdo total de cada elemento nas diferentes espécies vegetais (Tabela 20).

O maior teor médio de Na no tecido vegetal foi observado nas plantas de Atriplex, tanto cultivadas isoladamente, como em consórcio com Leucena, Nim e Sabiá (Tabela 20). A extração deste elemento por planta (conteúdo) também foi maior nas plantas de Atriplex, com uma extração máxima de 124,70 g planta⁻¹ no tratamento consorciado com Leucena. As plantas de Leucena, Nim e Sabiá, tanto em consórcios como em cultivo isolado, tiveram um teor e um conteúdo de Na inferior.

Quanto ao K, as plantas que tiveram o maior teor foram as de Leucena, cultivadas isoladamente, diferindo apenas do tratamento com Sabiá, também em cultivo isolado. Com relação ao conteúdo total, a maior extração foi observada nas plantas de Nim em consórcio (170,09 g planta⁻¹), e as menores extrações nas plantas de Sabiá, tanto em cultivo isolado como no consórcio com Atriplex (Tabela 20).

O maior conteúdo de Ca (Tabela 20) foi obtido pelas plantas de Nim em consórcio com Atriplex (164,62 g planta⁻¹). E o menor conteúdo foi das plantas de Sabiá em consórcio com Atriplex (8,94 g planta⁻¹).

As plantas com os maiores conteúdos de Mg foram as de Nim em consórcio com Atriplex (A x N), diferindo apenas dos tratamentos com plantas de Sabiá e Leucena, tanto cultivadas isoladamente, como em seus consórcios com Atriplex (Tabela 20).

Tabela 20. Teor (g kg⁻¹) e conteúdo (g planta⁻¹) de Na, K, Ca e Mg nas plantas cultivadas nos diferentes tratamentos aos 30 meses

Tratamento	Na		K		Ca		Mg	
	g kg ⁻¹	g planta ⁻¹						
Atriplex	13,57 a	68,62 ab	16,32 ab	84,46 c	10,15 a	50,34 c	2,92 abcd	14,06 ab
Atriplex (A x L)	16,44 a	124,70 a	16,58 ab	111,38 b	8,83 a	61,97 bc	3,74 abc	20,96 ab
Atriplex (A x N)	12,95 a	87,33 ab	16,78 ab	120,60 b	8,46 a	63,85 bc	3,08 abcd	22,07 ab
Atriplex (A x S)	16,27 a	93,20 ab	13,09 ab	81,71 c	9,51 a	61,13 bc	3,38 abc	22,49 ab
Leucena (A x L)	0,56 b	1,17 b	19,39 ab	39,63 d	16,62 a	33,30 cd	2,27 bcd	4,75 b
Nim (A x N)	0,25 b	3,58 b	15,93 ab	170,09 a	15,67 a	164,62 a	3,99 ab	42,78 a
Sabiá (A x S)	0,39 b	0,28 b	14,86 ab	10,50 e	12,72 a	8,94 d	1,09 d	0,74 b
Leucena	0,43 b	0,58 b	33,25 a	47,56 d	17,87 a	25,64 cd	2,86 abcd	3,95 b
Nim	0,40 b	1,52 b	28,46 ab	72,37 c	22,15 a	95,41 b	4,62 a	20,45 ab
Sabiá	0,16 b	0,39 b	11,51 b	25,64 de	10,37 a	33,92 cd	1,62 cd	4,16 b

*Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 10% de probabilidade

O maior teor de Cl foi observado no tecido vegetal das plantas de Atriplex, tanto em cultivo isolado, como em consórcio (Tabela 21). Com relação à extração deste elemento, mais uma vez, as plantas de Atriplex em todos os tratamentos se sobressaíram, apesar de não diferirem do Nim em consórcio com Atriplex.

Para o teor de P, as plantas com os maiores valores observados foram as de Nim em cultivo isolado e para o conteúdo, as plantas com os maiores valores observados foram as de Nim em consórcio com Atriplex (Tabela 21).

O conteúdo de N (Tabela 21) foi maior nas plantas de Nim em consórcio com Atriplex ($167,94 \text{ g planta}^{-1}$), diferindo das plantas de Leucena, Nim e Sabiá em cultivo isolado, bem como do Sabiá em cultivo consorciado (A x S).

Tabela 21. Teor (g kg^{-1}) e conteúdo (g planta^{-1}) de Cl, P e N nas plantas cultivadas nos diferentes tratamentos aos 30 meses

Tratamento	Cl		P		N	
	g kg^{-1}	g planta^{-1}	g kg^{-1}	g planta^{-1}	g kg^{-1}	g planta^{-1}
Atriplex	20,40 a	104,60 ab	1,77 b	9,15 ab	9,52 a	50,60 ab
Atriplex (A x L)	26,18 a	166,79 a	2,00 ab	12,77 ab	10,71 a	76,50 ab
Atriplex (A x N)	21,25 a	142,17 ab	1,67 b	12,23 ab	10,45 a	83,28 ab
Atriplex (A x S)	23,30 a	150,48 ab	2,14 ab	13,75 ab	10,94 a	69,96 ab
Leucena (A x L)	6,89 b	16,08 b	2,30 ab	3,86 ab	27,95 a	54,14 ab
Nim (A x N)	2,75 b	32,90 ab	3,38 ab	37,37 a	13,91 a	167,94 a
Sabiá (A x S)	3,96 b	2,84 b	2,37 ab	1,69 b	13,72 a	9,50 b
Leucena	10,71 b	14,83 b	2,75 ab	4,46 ab	26,93 a	42,47 b
Nim	2,84 b	8,59 b	4,64 a	14,44 ab	23,77 a	36,17 b
Sabiá	4,74 b	13,11 b	2,86 ab	7,17 ab	14,97 a	34,90 b

*Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 10% de probabilidade

A extração total dos elementos estudados por hectare é apresentada na Tabela 22. Com relação ao Na, observa-se que os tratamentos com plantas de Atriplex foram superiores na extração total deste elemento. Sendo a extração dos tratamentos com Leucena, Nim e Sabiá extremamente baixas.

Para o K, a maior extração foi observada no tratamento consorciado de Atriplex e Nim (A x N), com uma extração de $363,37 \text{ kg ha}^{-1}$ de K. Este tratamento diferiu do consórcio entre Atriplex e Sabiá (A x S), do cultivo com Leucena e com Sabiá isoladamente (Tabela 22). Com relação ao Ca, não houve diferença da extração entre os tratamentos, no entanto, o consórcio de Atriplex e Nim se destacou (Tabela 22).

A maior extração de Mg por hectare foi a do tratamento consorciado de Atriplex e Nim (81,06 kg ha⁻¹ de Mg), diferindo dos tratamentos com Leucena e Sabiá cultivadas isoladamente. Para o Cl, os tratamentos com plantas de Atriplex foram os que promoveram as maiores extrações deste elemento. O tratamento com plantas de Nim isoladamente foi o que apresentou a menor extração de Cl (21,48 kg ha⁻¹ de Cl).

Com relação ao P e N, a maior extração foi observada novamente no tratamento consorciado de Atriplex e Nim (62,00 kg ha⁻¹ de P e 314,03 kg ha⁻¹ de N). O tratamento com plantas de Leucena teve a menor extração de P e o tratamento com plantas de Sabiá a menor extração de N (Tabela 22). Vale ressaltar que, para quase todos os elementos avaliados, o consórcio de Atriplex e Nim foi mais eficiente nas extrações, tanto quando comparado aos seus cultivos isolados, como aos demais tratamentos.

Tabela 22. Conteúdo total de Na, K, Ca, Mg, Cl, P e N acumulados na biomassa vegetal dos diferentes tratamentos aos 30 meses de cultivo

Tratamento	Na	K	Ca	Mg	Cl	P	N
	kg ha ⁻¹						
Atriplex	171,54 a	211,15 ab	125,84 ab	35,15 ab	261,49 a	22,86 ab	126,49 ab
A x L	157,33 a	188,76 ab	119,08 ab	32,14 ab	228,58 a	20,79 ab	163,30 ab
A x N	113,64 a	363,37 a	285,60 a	81,06 a	218,83 ab	62,00 a	314,03 a
A x S	116,84 a	115,26 b	87,60 ab	29,05 ab	191,65 abc	19,31 ab	99,32 ab
Leucena	1,45 b	118,90 b	64,09 ab	9,88 b	37,09 bcd	11,16 b	106,19 ab
Nim	3,80 b	180,92 ab	238,53 ab	51,13 ab	21,48 d	36,10 ab	173,94 ab
Sabiá	0,99 b	64,10 b	84,82 ab	10,40 b	32,77 cd	17,93 ab	87,24 b

*Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 10% de probabilidade.

3.4 DISCUSSÃO

3.4.1 Atributos físicos e químicos do solo

No solo estudado foi possível observar uma elevada proporção de areia fina e silte, de acordo com Galindo et al. (2008), isto pode estar associado à maior disposição ao desenvolvimento de crostas superficiais, o que contribui para o processo de degradação do solo. O silte também apresenta grande potencialidade para a obstrução de poros (SILVA; LIMA, 2013) e, junto com a areia fina, dificulta a emergência de plântulas, infiltração e o movimento de água dentro do perfil do solo (GALINDO et al., 2008). Por isso, nessas áreas se faz necessário a presença de matéria orgânica, já que ela favorece a estruturação do solo (LUCIANO et al., 2012).

Essa matéria orgânica pode ser fornecida pela vegetação e, como resultado desta, se observa maior estabilidade de agregados, capacidade de retenção de água, porosidade, aeração, diminuição da densidade do solo e menores perdas de água por evaporação (LOURENTE et al., 2011; QU et al., 2016; NADAL-ROMERO et al., 2016).

Outra característica que aumenta a degradação do solo é a presença de elevados teores de ADA (GASPARETTO et al., 2009). Os tratamentos com as espécies vegetais estudadas foram eficientes na redução dos teores de ADA na camada de 0-10 cm (em ambas as estações) e 30-60 cm (estação seca), possibilitando assim maior grau de floculação, que é o processo inicial de agregação, contribuindo para a melhoria da qualidade física do solo (MELO et al., 2016). Essa redução do teor de ADA, na camada de 0-10 cm (estação chuvosa), provavelmente ocorreu pelo aumento no teor de carbono (Tabela 8). A matéria orgânica é um agente ligante, principalmente em solos que contém baixos teores de argila (OLIVEIRA et al., 2016). As outras reduções podem ter sido ocasionadas pela qualidade da matéria orgânica fornecida pelas espécies vegetais estudadas (GASPARETTO et al., 2009).

Na camada de 0-10 cm, o solo sob cultivo isolado teve menor teor de ADA quando comparado ao dos consórcios, isto pode estar relacionado aos maiores teores de Na^+ e K^+ trocáveis (Tabela 6) e Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis (Tabela 7) neste tipo de tratamento. Já na camada de 10-30 e 30-60 cm o solo sob consórcios, na maioria das comparações, teve menor ADA, demonstrando a variação que os tratamentos proporcionaram nas camadas.

De modo geral, o solo do tratamento com Atriplex cultivada isoladamente, apesar de apresentar altos teores de cátions trocáveis, teve teor de ADA alto e grau de floculação baixo, quando comparados aos seus consórcios. Isto pode ter ocorrido pela alta absorção de Cl^- pelas plantas de Atriplex (Tabela 21), ou seja, para compensar os desbalanços da absorção iônica, as raízes realizaram a extrusão de OH^- (TAIZ; ZEIGER, 2013), com isso houve o aumento da dispersão.

O solo coletado na estação seca comparado ao da estação chuvosa, na camada de 0-10 cm, apresentou a média mais elevada de ADA ($60,88 \text{ g kg}^{-1}$), bem como o menor grau de floculação (13,51%), o que pode ter sido influenciado pelos menores teores de Na^+ e K^+ trocáveis (Tabela 6) e carbono orgânico (Tabela 8), nesta camada, enquanto que o solo da camada de 30-60 cm teve menor teor de ADA, também na estação seca comparada a chuvosa, devido à maior presença de K^+

trocável (Tabela 6) e Ca^{2+} trocável (Tabela 7), no entanto, não houve influência no grau de floculação entre as estações, para esta camada.

O cultivo das plantas reduziu a densidade do solo, tanto na camada superficial, como na subsuperficial, na segunda coleta (estação chuvosa). Esta redução deve-se, entre outros fatores, à presença do sistema radicular das plantas, que confere maior porosidade, e ao aumento do teor de matéria orgânica, que proporciona maior agregação ao solo (NADAL-ROMERO et al., 2016). A K_{sat} aumentou no cultivo com as espécies vegetais estudadas, provavelmente devido ao aumento da porosidade, pela presença das raízes das plantas e da matéria orgânica, e este resultado é semelhante a outros trabalhos com revegetação (ZHANG et al., 2013; ZHANG et al., 2018).

Os tratamentos consorciados tiveram destaque tanto na redução da densidade do solo, como no aumento da K_{sat} . Os benefícios da revegetação com consórcios de plantas vêm sendo demonstrados por outros trabalhos, como o de Silva et al. (2015), que avaliaram a influência de plantios puros e consorciados de leguminosas e eucalipto em uma cava de extração de argila no Norte Fluminense.

A época de coleta influenciou a densidade do solo, na camada de 0-5 cm, sendo o período chuvoso o que apresentou a menor densidade do solo. Na época das chuvas o desenvolvimento das plantas da Caatinga é mais acentuado (TURÍBIO e SILVA et al., 2017) e a decomposição da serrapilheira e adição de matéria orgânica ao solo é maior (COSTA et al., 2005), estes fatores podem aumentar a formação de agregados e a porosidade do solo, diminuindo assim sua densidade.

De modo geral, o pH do solo com o cultivo das plantas foi superior ao da área testemunha (sem cultivo), este resultado difere de outros trabalhos (SILVA et al., 2015; NADAL-ROMERO et al., 2016). No entanto, alguns autores atribuem a elevação do pH como momentânea, devido à liberação na superfície do solo de compostos orgânicos hidrossolúveis que promovem a complexação de H^+ antes da humificação (SILVEIRA et al., 2010; VERONESE et al., 2012). Aliado a isso, a absorção de ânions pelas espécies vegetais pode ter favorecido a extrusão de OH^- , contribuindo para a elevação do pH do solo.

Os valores de Na^+ trocável, principalmente da camada de 0-10 cm foram baixos. Santos et al. (2015), trabalhando com cultivo de mamoneira em solo degradado coletado da Caatinga, também encontraram valores baixos para este cátion.

Apesar da área ser sódica no início do experimento (Tabela 6), não constatou-se essa característica em nenhuma das coletas realizadas nesta pesquisa. O desenvolvimento das plantas era superior a 24 meses e os ciclos de umedecimento e secagem do solo (Figura 2) podem ter contribuído para a redução dos elevados teores de Na^+ trocável no solo estudado.

O solo com o cultivo de *Atriplex* apresentou os maiores teores de Na^+ trocável, em todas as camadas e ambas as estações. Esta espécie vegetal é uma halófito, alguns trabalhos demonstraram seu potencial como fitorremediadora (MONTENEGRO et al., 2003; LEAL et al., 2008; BAZIHIZINA et al., 2009; SOUZA et al., 2011). As raízes desta planta absorvem o Na em grandes proporções, necessitando de meios para a sua disponibilidade quando o solo não o tem prontamente disponível, desta forma, esta planta pode possuir mecanismos de solubilização do Na presente nos minerais do solo. O que pode se tornar um problema em solos que não são sódicos, já que essa planta poderá translocar o Na das camadas mais profundas para a superfície originando posteriormente problemas relacionadas a salinidade/sodicidade. O manejo adequado se daria pela retirada das plantas de *atriplex*, assim que notada a correção da salinidade/sodicidade do solo.

Com relação ao K^+ trocável, a área com o cultivo de plantas apresentou menor teor em todas as camadas na estação chuvosa, quando comparada à área testemunha. Isto pode ter ocorrido pela absorção deste elemento pelas plantas estudadas (Tabela 20), o que diminuiu momentaneamente o seu teor no solo. Com o tempo, o elemento deve ser solubilizado dos minerais de argila (ARCOBELI COLA; SIMÃO, 2012; SINGH et al., 2018), além de retornar ao solo pelo processo de decomposição da serrapilheira (MALUF et al., 2015).

O teor de Na^+ e K^+ trocáveis, na camada de 0-10 cm, foi maior na estação chuvosa, provavelmente pela maior decomposição da serrapilheira nesta estação e maior liberação destes elementos para o solo ou pela solubilização de sais solúveis de Na e de K com a incidência de chuvas na área.

De modo geral, os valores de CTC foram baixos, compatíveis com a CTC de outros solos da região semiárida, arenosos e com baixo teor de matéria orgânica (CORRÊA et al., 2009), com exceção da área cultivada com *Atriplex* isoladamente, que na camada de 30-60 cm apresentou CTC de 10,81 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$.

Na camada de 0-10 cm, a área com cultivo das plantas apresentou menor CTC que a área testemunha (5,51 e 5,97 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, respectivamente), isto pode ter

influenciado diretamente o menor teor de Ca^{2+} trocável na estação chuvosa para a área com plantas, em comparação à da testemunha. Nesta camada, os tratamentos com cultivo isolado tiveram destaque quanto aos teores de Mg^{2+} trocável, assim como o cultivo com Atriplex isoladamente apresentou maior teor de Ca^{2+} trocável quando comparado aos seus consórcios. Estes resultados são semelhantes aos de Wang et al. (2015) que, avaliando o rendimento de grãos, absorção de nutrientes, mudanças nas propriedades químicas do solo e atividade enzimática após 9 e 10 anos de consórcio, rotação e monocultura com plantas de feijão (fava), milho e trigo, observaram que o consórcio diminuiu significativamente a CTC e contribuiu para a remoção de mais cátions do solo. Essa redução nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis nos tratamentos consorciados, também foi observada nas demais camadas estudadas.

A época de coleta teve influência nos teores de Ca^{2+} trocável, sendo a estação seca a que apresentou os valores mais elevados, em todas as camadas. Enquanto que, para o Mg^{2+} trocável, nas camadas de 10-30 e 30-60 cm, os teores mais baixos ocorreram na estação seca. Existe uma competição entre o Ca^{2+} e Mg^{2+} pelos sítios de adsorção no solo (MOREIRA et al., 1999), desta forma, o aumento do teor de um, ocasionou a redução do outro.

A cobertura vegetal proporcionada pelos plantios, na camada de 0-10 cm, possibilitou ao final do experimento (30 meses, estação chuvosa), o aumento do teor de COT (média geral de $2,78 \text{ g kg}^{-1}$, com o cultivo isolado chegando a $3,25 \text{ g kg}^{-1}$ de COT no solo). Efeito similar foi demonstrado por Qu et al. (2016), que avaliaram a revegetação com *Artemisia gmelinii* em área no semiárido da China, observando maiores teores de COT à medida em que havia maior percentual de cobertura vegetal. Silva et al. (2015) também verificaram aumentos nos teores de COT em uma cava de extração de argila em área de Mata Atlântica revegetada com eucalipto e leguminosas. Do mesmo modo, Nadal-Romero et al. (2016), verificaram aumentos no COT do solo pelo efeito de sucessão secundária e práticas de florestamento em terras agrícolas abandonadas, em áreas montanhosas do Mediterrâneo.

O cultivo isolado das plantas, em todas as camadas, foi mais eficiente no aumento do COT do solo. Isso pode ter sido devido à qualidade do material vegetal (maior relação C/N), associado a uma atividade microbiana lenta, favorecendo o acúmulo do C no solo (SILVA et al. 2015; ZIECH et al., 2015; AGETHEN; KNORR, 2018).

A estação chuvosa propiciou os maiores valores de COT no solo na camada de 0-10 cm, provavelmente, porque a relação C/N do solo foi mais alta do que na estação seca. Além disso, a precipitação pode ter proporcionado maior decomposição da serrapilheira e incorporação de matéria orgânica ao solo. Isso se justifica porque em área de Caatinga a decomposição do material vegetal aéreo é relativamente lenta quando comparada à de outros ecossistemas, principalmente devido à falta de água; deste modo, com o aumento da umidade o processo de decomposição é incrementado (HOLANDA et al., 2015).

O aumento do COT é essencial para a recuperação de solos degradados, está diretamente relacionado com: aumento da aeração, melhoria da estrutura, disponibilização de nutrientes, substrato para atividade microbiana, conservação do ambiente, além de ser determinante para sustentar ou aumentar a produtividade agrícola, entre outros (SCHNITZER, 1991; PAL et al., 2015).

Com relação aos teores de N no solo, na camada de 0-10 cm, estes foram maiores na estação seca ($0,52 \text{ g kg}^{-1}$) em relação à estação chuvosa ($0,40 \text{ g kg}^{-1}$). Isto pode ser explicado pelo aumento da umidade, que proporcionou maior atividade microbiana, consumindo, desta forma, mais N do solo para o processo de decomposição da matéria orgânica, devido ao baixo teor de N na serrapilheira (CHEN et al., 2014). Adicionalmente, o maior desenvolvimento vegetal no período chuvoso ocorre paralelamente ao maior consumo do N do solo para a composição da biomassa vegetal.

Para todas as camadas, na maior parte das comparações, os teores de N no solo no sistema de cultivo isolado foram mais elevados. Silva et al. (2015), trabalhando com revegetação, observaram o maior teor de N no tratamento isolado de *Acacia mangium*, no entanto, este tratamento não diferiu de alguns consórcios estudados. Ainda segundo os mesmos autores, o teor de N pode ter sido maior, pelo fato de que em solos de baixa fertilidade, mas com cobertura vegetal rica em N, espera-se uma menor quantidade de N imobilizado pela biomassa microbiana, e desta forma uma maior parte fica disponível no solo.

De forma geral, a relação C/N foi maior na área com plantas, quando comparada à testemunha, isto se deu, na camada de 0-10 e 10-30 cm, pelos menores valores de N, provavelmente, como já descrito, devido ao seu uso pelos micro-organismos para a decomposição do material vegetal e pela absorção deste elemento

pelas plantas. A baixa relação C/N observada neste trabalho é similar ao estudo de Galindo et al. (2008) em área degradada, também no semiárido de Pernambuco.

A área de estudo está localizada na região semiárida e, como a salinidade é uma condição do solo que ocorre principalmente nas regiões áridas e semiáridas do mundo (PEDROTTI et al., 2015), as amostras de solo foram submetidas às análises dos elementos solúveis, com o preparo da pasta saturada, e nela além dos elementos solúveis, foram medidos a CEes e o pH.

O pH do extrato da pasta saturada foi alcalino ($> 7,0$), em todas as camadas e em ambas as estações, no entanto, a CEes foi baixa ($CEes < 4 \text{ dS m}^{-1}$), demonstrando que a salinidade é baixa nesta área. Na implantação do experimento, o solo era salino, no entanto o desenvolvimento das plantas e os ciclos de umedecimento e secagem do solo (Figura 2) podem ter contribuído para a redução desta salinidade.

De modo geral, a área cultivada com *Atriplex* apresentou CEes maior que as demais áreas, o que pode ter ocorrido porque esta espécie absorve o Na em grandes quantidades e tem um sistema radicular amplo, atingindo profundidades maiores. Assim, este elemento é captado e conduzido para as proximidades das plantas, por isso, apresenta-se em alto teor no extrato da pasta saturada do tratamento com *Atriplex* (Tabela 10), elevando a CEes da mesma (chegando a $2,89 \text{ dS m}^{-1}$ na camada de 30-60 cm). Comprovando que plantas desta espécie em ambientes que não são salinos ou que já tiveram a salinidade corrigida devem ser retiradas, a fim de que o problema não venha a retornar na área.

Com relação ao K^+ solúvel, na camada de 0-10 cm, estação chuvosa, o teor foi menor no solo da área com cultivo das plantas comparado ao da testemunha, provavelmente, devido à absorção deste elemento pelas plantas. O cultivo de *Atriplex* isoladamente, comparado aos seus consórcios, também apresentou os maiores teores de K^+ solúvel nas camadas de 0-10 e 10-30 cm, o que também contribuiu para elevar a CEes nestas camadas.

Houve pouca influência dos tratamentos de cultivo das plantas nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} solúveis no solo, quando comparados ao da área testemunha. No entanto, nota-se que os teores destes elementos no solo do cultivo isolado de *Atriplex* ou das demais plantas, se sobressaíram aos solos dos consórcios em quase todas as camadas e estações. Isto pode ter ocorrido pela elevada extração destes elementos pelas plantas nos tratamentos consorciados (Tabela 22), principalmente no consórcio de *Atriplex* e Nim, o que reduziu seus teores na solução do solo.

3.4.2 Extração de elementos pelas plantas

A fração da planta responsável pela maior parte da transferência anual de nutrientes ao solo é a folha (SELLE, 2007), devido ao seu processo de renovação e queda e no caso de plantas caducifólias devido a perda de suas folhas em uma dada estação do ano. Com relação a biomassa desta fração, não se observou diferença entre os tratamentos na produção por planta ou por área. Deste modo, apesar da biomassa foliar ser a mesma entre as plantas, o sabiá poderá retornar elementos mais rapidamente ao solo por ser uma planta caducifólia.

As menores biomassas foram observadas no tratamento com *Leucena* e com *Sabiá* em cultivo isolado e a maior foi no tratamento consorciado de *Atriplex* com *Nim*. Avila et al. (2012) relatam que em sistemas com maior produção de biomassa vegetal existe maior possibilidade de uma manutenção sustentável, isto devido a maior incorporação de matéria orgânica ao solo, no entanto pequenas frações do caule são incorporadas (grande produção desta fração em alguns tratamentos), assim a menor produção de biomassa de alguns tratamentos não caracteriza insucesso no processo de recuperação do solo, já que a produção de folhas foi similar.

As plantas de *Sabiá* tanto no cultivo isolado, como no consórcio com *Atriplex*, tiveram baixos teores e conteúdos nas folhas da maior parte dos elementos avaliados, no entanto devido a perda de folhas ser total em uma determinada época do ano, essas plantas também contribuem significativamente para a entrada de matéria orgânica no solo e ciclagem dos nutrientes (FERNANDES et al., 2006). Em contrapartida, as plantas de *Nim* tanto no cultivo isolado, como no consórcio com *Atriplex*, tiveram altos valores de conteúdos totais nas folhas para a maior parte dos elementos avaliados, isto devido a sua grande produção de biomassa, assim, mesmo com pequena queda foliar, a contribuição para a matéria orgânica e retorno dos elementos ao solo pode ser significativa (LEÓN; OSORIO, 2014).

O teor do elemento no tecido vegetal é diferente do real conteúdo acumulado pela planta, este depende diretamente da matéria seca total da planta. Como pode ser observado nas Tabelas 20 e 21, algumas plantas tiveram teores mais elevados de elementos, que não coincidiram com altos conteúdos, devido ao maior ou menor desenvolvimento da espécie avaliada.

O maior teor e conteúdo de Na no tecido vegetal foram observados nas plantas de *Atriplex*, tanto cultivadas isoladamente como consorciadas com as plantas de

Leucena, Nim e Sabiá. Isto comprova o seu potencial fitoextrator (MONTENEGRO et al., 2003; LEAL et al., 2008; BAZIHIZINA et al., 2009; SOUZA et al., 2011). As demais espécies estudadas apresentaram valores extremamente inferiores de Na no tecido vegetal, demonstrando a sensibilidade a este íon (PANDOLFI et al., 2012). Por isso, o cultivo consorciado de plantas torna-se uma alternativa para pesquisas em áreas onde íons tóxicos estejam presentes, a fim de que a espécie tolerante (fitoextratora) absorva o íon em grandes proporções, permitindo assim, o desenvolvimento da outra espécie menos tolerante. Essa grande extração de Na pelas plantas de Atriplex também contribuiu para a diminuição da salinidade e sodicidade da área, quando comparada ao início do experimento.

As plantas de Nim cultivadas isoladamente se destacaram nos teores de Mg e P, e no consórcio com Atriplex se destacaram com valores elevados de conteúdos de K, Ca, Mg, P e N. Isto pode ter ocorrido pela adaptação desta espécie à região, sendo tolerante a longos períodos secos e temperaturas elevadas (ARAÚJO et al., 2000). Seu rápido desenvolvimento, com produção de matéria seca total elevada, pode ser atribuído a possíveis benefícios oriundos do consórcio com a Atriplex, como a absorção de Na⁺ por esta. Essa maior extração de elementos irá originar uma serrapilheira mais rica em nutrientes, e de acordo com Andrade et al. (2003) e Maluf et al. (2015), a decomposição da serrapilheira contribui para que parte dos nutrientes absorvidos retorne ao solo, influenciando na melhoria de sua qualidade.

A maior absorção de Cl (teor e conteúdo) também foi observada nas plantas de Atriplex, tanto isoladamente como em consórcio. Comprovando seu potencial fitoextrator, também para este íon (SANTOS et al., 2013; SILVA et al., 2016).

Com relação ao total extraído por hectare, o consórcio de Atriplex e Nim promoveu a maior extração de K, Ca, Mg, P e N, além de estar entre os maiores valores de Na e Cl. Isso demonstra o potencial deste consórcio do ponto de vista fitoextrator de elementos tóxicos, pela poda e retirada da parte aérea da Atriplex. Por outro lado, pode ser caracterizado como fonte de nutrientes, pela serrapilheira rica nos mesmos (principalmente devido a biomassa foliar do Nim). Isto é essencialmente importante para o retorno dos elementos ao solo, constituindo uma via importante do ciclo biogeoquímico dos elementos (VILLA et al., 2016; SEGURA et al., 2017).

Apesar do curto tempo de observação das plantas em campo para experimentos de revegetação com espécies de grande porte, os resultados observados no período chuvoso permitem afirmar que a regeneração da área foi

iniciada. Melhoria em alguns atributos físicos como: diminuição da argila dispersa em água, aumento no grau de floculação, diminuição da densidade do solo, aumento da condutividade hidráulica, foram verificados. Alterações no carbono orgânico total, cátions trocáveis e solúveis, CE e pH, também podem ser atribuídos aos tratamentos aplicados.

O aprofundamento do sistema radicular das plantas deve ter sido responsável por grande parte dessas melhorias, facilitando a infiltração da água no perfil do solo, fator fundamental para a recuperação de solos degradados como este em estudo. Especialmente os tratamentos com o cultivo de plantas consorciadas possibilitaram efeitos mais visíveis nas diversas propriedades avaliadas, possivelmente pela melhor distribuição da malha de raízes no perfil do solo. É possível que o cultivo conjunto de várias espécies seja capaz de promover resultados mais consistentes em estudos futuros.

Por outro lado, estudos dessa natureza devem ser mantidos em campo por períodos mais longos de tempo para que os efeitos sejam mais significativos e tenham sua efetividade comprovada.

3.5 CONCLUSÃO

As espécies vegetais são eficientes na melhoria de atributos do solo degradado. Com redução no teor de ADA e aumento do grau de floculação.

As plantas proporcionam redução na densidade do solo e aumento da Ksat.

A revegetação possibilita acréscimos no teor de COT do solo.

A época de coleta, estação seca ou chuvosa, influencia diversos atributos do solo.

O cultivo consorciado é mais efetivo na melhoria dos atributos físicos do solo. Enquanto que, o cultivo isolado é mais eficiente na melhoria dos atributos químicos.

Devido a maior parte de atributos recuperados, o cultivo consorciado torna-se mais apropriado a revegetação de áreas degradadas no semiárido Pernambucano.

As plantas de Atriplex devem ser apenas utilizadas em ambiente salinos e/ou sódicos e retiradas assim que a correção do solo for comprovada.

O cultivo isolado ou consorciado não influencia o potencial fitoextrator da Atriplex.

O consórcio de Atriplex com Nim é mais eficiente na extração de K, Ca, Mg, P e N.

REFERÊNCIAS

AGETHEN, S.; KNORR, K-H. *Juncus effuses* mono-stands in restored cutover peat bogs—Analysis of litter quality, controls of anaerobic decomposition, and the risk of secondary carbon loss. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v. 117, p. 139–152, 2018.

ALMEIDA, B. G. de; DONAGEMMA, G. K.; RUIZ, H. A.; BRAIDA, J. A.; VIANA, J. H. M.; REICHERT, J. M. M.; OLIVEIRA, L. B.; CEDDIA, M. B.; WADT, P. S.; FERNANDES, R. B. A.; PASSOS, R. R.; FALCI DECHEN, S. C.; KLEIN, V. A.; TEIXEIRA, W. G. **Padronização de métodos para análise granulométrica no Brasil**. Rio de Janeiro: Embrapa, Comunicado Técnico 66, 2012. 11 p.

ALMEIDA, E. L. de; MARCOS, F. C. C.; SCHIAVINATO, M. A.; LAGÔA, A. M. M. A.; ABREU, M. F. de. Crescimento de feijão-de-porco na presença de chumbo. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 3, p. 569-576, 2008.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. DE M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 22, n. 6, 711–728, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>>.

ALVES, T. L. B.; AZEVEDO, P. V. de; CÂNDIDO, G. A. Indicadores socioeconômicos e a desertificação no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba. **Ambiente e Sociedade**, São Paulo, v. 2, p. 19-40, 2017.

AN, S.; HUANG, Y.; ZHENG, F. Evaluation of soil microbial indices along a revegetation chronosequence in grassland soils on the Loess Plateau, Northwest China. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 41, p. 286–292, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.12.001>>.

ANDRADE, A. G. de; TAVARES, S. R. de L.; COUTINHO, H. L. da C. Contribuição da serrapilheira para recuperação de áreas degradadas e para manutenção da sustentabilidade de sistemas agroecológicos. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 24, n. 220, p. 55-63, 2003.

APAC. **Monitoramento pluviométrico em Pernambuco**. Agência Pernambucana de Águas e Clima, Recife. Disponível em: <<http://www.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php#>>. Acesso em 25 de janeiro de 2018.

ARAÚJO, L. V. C. de; RODRIGUEZ, L. C. E.; PAES, J. B. Características físico-químicas e energéticas da madeira de nim indiano. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 57, p. 153-159, 2000.

ARCOBELI COLA, G. P.; SIMÃO, J. B. P. Rochagem como forma alternativa de suplementação de potássio na agricultura agroecológica. **Revista Verde**, Mossoró, v. 7, n. 1, p. 01 – 08, 2012.

AVILA, J. E. T. de; ASSAD, M. L. L.; LIMA, A. S. Avaliação de biomassa vegetal em sistema de produção em transição agroecológica. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Capão do Leão, v. 7, n. 3, p. 72-84, 2012.

BARUT, Z.B.; CELIK, I. Tillage effects on some soil physical properties in a semi-arid Mediterranean Region of Turkey. **Chemical Engineering Transactions**, Budapest, v. 58, p. 217-222, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3303/CET1758037>>.

BAZIHIZINA, N.; COLMER, T.D.; BARRETT-LENNARD, E.G. Response to non-uniform salinity in the root zone of the halophyte *Atriplex nummularia*: growth, photosynthesis, water relations and tissue ion concentrations. **Annals of Botany**, London, v. 104, p. 737–745, 2009.

CHEN, B.; LIU, E.; TIAN, Q.; YAN, C.; ZHANG, Y. Soil nitrogen dynamics and crop residues. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, Berlin, v. 34, n. 2, p. 429-442, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s13593-014-0207-8>>.

CORRÊA, R. M.; FREIRE, M. B. G. dos S.; FERREIRA, R. L. C.; FREIRE, F. J.; PESSOA, L. G. M.; MIRANDA, M. A.; MELO, D. V. M. de. Atributos químicos de solos sob diferentes usos em perímetro irrigado no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 305-314, 2009.

COSTA, G. S.; GAMA-RODRIGUES, A. C. da; CUNHA, G. de M. Decomposição e liberação de nutrientes da serapilheira foliar em povoamentos de *Eucalyptus grandis* no norte Fluminense. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 563-570, 2005.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. Brasília: EMBRAPA, 2017. 573 p.

FAO; ITPS. **Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report**. Roma, 2015. 608 p.

FERNANDES, M. M.; PEREIRA, M. G.; MAGALHÃES, L. M. S.; CRUZ, A. R.; GIÁCOMO, R. G. Aporte e decomposição de serapilheira em áreas de floresta secundária, plantio de sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia* Benth.) e andiroba (*Carapa guianensis* Aubl.) na Flona Mário Xavier, RJ. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 2, p. 163-175, 2006.

GALINDO, I. C. de L.; RIBEIRO, M. R.; SANTOS, M. de F. de A. V.; LIMA, J. F. W. F.; FERREIRA, R. F. de A. e L. Relações solo-vegetação em áreas sob processo de desertificação no município de Jataúba, PE. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1283-1296, 2008.

GASPARETTO, E. C.; BRAIDA, J. A.; CARNEIRO, M.; SCARIOT, J. J.; TABOLKA, C. L. Grau de floculação da argila de um Latossolo Vermelho utilizado com lavoura e mata nativa. **Synergismus scyentifica UTFPR**, Pato Branco, v. 04, n. 1, 2009.

HOLANDA, A. C.; FELICIANO, A. L. P.; MARANGON, L. C.; FREIRE, F. J.; HOLANDA, E. M. Decomposição da serapilheira foliar e respiração edáfica em um remanescente de caatinga na Paraíba. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 39, n. 2, p. 245-254, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/0100-67622015000200004>>.

HORNEY, R. D.; TAYLOR, B.; MUNK, D. S.; ROBERTS, B. A.; LESCH, S. M.; PLANT, R. E. Development of practical site-specific management methods for reclaiming salt-affected soil. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 46, p. 379-397, 2005.

KESSTRA, S. D.; BOUMA, J.; WALLINGA, J.; TITTONELL, P.; SMITH, P.; CERDÀ, A.; MONTANARELLA, L.; QUINTON, J.N.; PACHEPSKY, Y.; VAN DER PUTTEN, W. H.; BARDGETT, R. D.; MOOLENAAR, S.; MOL, G.; JANSEN, B.; FRESCO, L. O. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. **Soil**, Göttingen, v. 2, p. 111-128, 2016.

LEAL, I. G.; ACCIOLY, A. M. A.; NASCIMENTO, C. W. A.; FREIRE, M. B. G. dos S.; MONTENEGRO, A. A. A.; FERREIRA, F. L. Fitorremediação de solo salino sódico por *Atriplex nummularia* e gesso de jazida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3 p. 1065-1072, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000300015>>.

LEÓN J. D.; OSORIO, N. W. Role of litter turnover in soil quality in tropical degraded lands of Colombia. **The Scientific World Journal**, Boynton Beach, ID 693981, 11 pages, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1155/2014/693981>>.

LOURENTE, E. R. P.; MERCANTE, F. M.; ALOVISI, A. M. T.; GOMES, C. F.; GASPARINI, A. S.; NUNES, C. M. Atributos microbiológicos, químicos e físicos de solo sob diferentes sistemas de manejo e condições de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 1, p. 20-28, 2011.

LUCIANO, R. V.; ALBUQUERQUE, J. A.; COSTA, A. da; BATISTELLA, B.; WARMLING, M. T. Atributos físicos relacionados à compactação de solos sob vegetação nativa em região de altitude no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 1733-1744, 2012.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 219 p.

MALUF, H. J. G. M.; SOARES, E. M. B.; SILVA, I. R. da; NEVES, J. C. L.; SILVA, M. F. de O. Disponibilidade e recuperação de nutrientes de resíduos culturais em solo com diferentes texturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 6, p. 1690-1702, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/01000683rbcS20140658>>.

MELO, T. R. de; TELLES, T. S.; MACHADO, W. S.; TAVARES FILHO, J. Factors affecting clay dispersion in Oxisols treated with vinasse. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 37, n. 6, p. 3997-4004, 2016.

MIKHA, M. M.; BENJAMIN, J. G.; STAHLMAN, P. W.; GEIER, P. W. Remediation/restoration of degraded soil: I. Impact on soil chemical properties. **Agronomy Journal**, Madison, v. 106, n. 1, p. 252-260, 2014.

MMA. **Convenção das Nações Unidas de combate à desertificação**. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos, 2004. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/sedr_desertif/_arquivos/unccd_portugues.pdf>. Acesso em 15 de março de 2018.

MONTENEGRO, A. A. de A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MARINHO, I.; SILVA, V. de P.; ANDRADE, A.; SILVA, J.G. da. Uso de água subterrânea salina em halófitas no semiárido nordestino. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 2, p. 75–84, 2003.

MOREIRA, A.; CARVALHO, J. G. de; EVANGELISTA, A. R. Influência da relação cálcio:magnésio do corretivo na nodulação, produção e composição mineral da alfafa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 2, p. 249-255, 1999.

MOREIRA, A.; COSTA, D. G. Dinâmica da matéria orgânica na recuperação de clareiras da floresta amazônica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 10, 1013-1019, 2004.

NADAL-ROMERO, E.; CAMMERAAT, E.; PÉREZ-CARDIEL, E.; LASANTA, T. Effects of secondary succession and afforestation practices on soil properties after cropland abandonment in humid Mediterranean mountain areas. **Agricultural and Forest Entomology**, Oxford, v. 228, p. 91-100, 2016.

OLIVEIRA, A. P. G.; MARCÍLIO, G. S.; MENDES, D. F.; SOUZA, T. da S. de; AMARAL, A. A. do. Revegetação, remediação e uso de geotécnicas para recuperação de ambientes degradados. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 11, n. 22, p. 212-225, 2015.

OLIVEIRA, J. G. R. de; TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M. de C. Alterações na física do solo com a aplicação de dejetos animais. **Geographia Opportuno Tempore**, Londrina, v. 2, n. 2, Edição Especial, p. 66-80, 2016.

PAL, D. K.; WANI, S. P.; SAHRAWAT, K. L. Carbon sequestration in Indian soils: present status and the potential. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Allahabad, v. 85, n. 2, p. 337–358, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s40011-014-0351-6>>.

PANDOLFI, C.; MANCUSO, S.; SHABALA, S. Physiology of acclimation to salinity stress in pea (*Pisum sativum*). **Environmental and Experimental Botany**, New York, v. 84, p. 44–51, 2012.

PAULUCIO, V. de O.; SILVA, C. F. da; MARTINS, M. A.; PEREIRA, M. G.; SCHIAVO, J. A.; RODRIGUES, L. A. Reforestation of a degraded area with *Eucalyptus* and *Sesbania*: Microbial activity and chemical soil properties. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 41, e0160239, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20160239>>.

PEDROTTI, A.; CHAGAS, R. M.; RAMOS, V. C.; PRATA, A. P. do N.; LUCAS, A. A. T.; SANTOS, P. B. dos. Causas e consequências do processo de salinização dos solos. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 19, n. 2, p. 1308-1324, 2015.

PHILLIPS, J. D. Soil complexity and pedogenesis. **Soil Science**, Philadelphia, v. 182, n. 4, p. 117-127, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1097/SS.000000000000204>>.

PRZEWOŻNA, B. Changes of bulk density, air-water properties and morphology of soils in basins without outlets as an effect of erosion and anthropogenic denudation (a study from northwestern Poland). **Soil Science and Plant Nutrition**, London, v. 60, n. 1, p. 30-37, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/00380768.2013.842456>>.

QU, L.; HUANG, Y.; MA, K.; ZHANG, Y.; BIERE, A. Effects of plant cover on properties of rhizosphere and inter-plant soil in a semiarid valley, SW China. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v. 94, p. 1-9, 2016.

RAMACHANDRAN, A.; RADHAPRIYA, P. Restoration of degraded soil in the Nanmangalam Reserve Forest with native tree species: Effect of indigenous plant growth-promoting bacteria. **The Scientific World Journal**, Boynton Beach, ID 5465841, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1155/2016/5465841>>.

SANTOS, M. A. dos. **Adaptabilidade e potencial fitorremediador de espécies vegetais em solo salino**. 2016. 128 f. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2016.

SANTOS, M. A. dos; FREIRE, M. B. G. dos S.; ALMEIDA, B. G. de; LINS, C. M. T.; SILVA, E. M. da. Dinâmica de íons em solo salino-sódico sob fitorremediação com *Atriplex nummularia* e aplicação de gesso. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 4, p. 397-404, 2013.

SANTOS, R. V. dos; SILVA, G. H. da; SILVA do Ó, K. D.; VITAL, A. de F. M. Diagnóstico e desenvolvimento inicial de mamoneira em solos de áreas degradadas. **Revista Verde**, Pombal, v. 10, n. 1, p. 208 - 212, 2015.

SCHNITZER, M. Soil organic matter-the next 75 years. **Soil Science**, Philadelphia, v. 151, n. 1, p. 41-58, 1991.

SEGURA, C.; FERNÁNDEZ-ONDOÑO, E.; JIMÉNEZ, M. N.; NAVARRO, F. B. Thinning affects the needlefall nutrient return to soil in a semiarid *Aleppo pine* afforestation while the nutrient dynamics remain unchanged. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 405, p. 257–270, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.049>>.

SELLE, G. L. Ciclagem de nutrientes em ecossistemas florestais. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 23, n. 4, p. 29-39, 2007.

SILVA, C. F. da; LOSS, A.; CARMO, É. R. do; PEREIRA, M. G.; SILVA, E. M. R. da; MARTINS, M. A. Fertilidade do solo e substâncias húmicas em área de cava de extração de argila revegetada com eucalipto e leguminosas no Norte Fluminense. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 3, p. 547-561, 2015.

SILVA, F. C. editor. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627 p.

SILVA, F. B. R. e; SANTOS, J. C. P. dos; SILVA, A. B. da; CAVALCANTI, A. C.; SILVA, F. H. B. da; BURGOS, N.; PARAHYBA, R. da B. V.; OLIVEIRA NETO, M. B. de; SOUSA NETO, N. C. de; ARAÚJO FILHO, J. C. de; LOPES, O. F.; LUZ, L. R. Q. P. da; LEITE, A. P.; SOUSA, L. de G. M. C.; SILVA, C. P. da; VAREJÃO-SILVA, M. A.; BARROS, A. H. C. **Zoneamento agroecológico do Estado de Pernambuco**. Governo do Estado de Pernambuco, Recife: Secretaria de Produção Rural e Reforma Agrária, Recife/Embrapa Solos – UEP Recife, 2001. (Embrapa Solos. Documentos, 35). 1 CD-ROM.

SILVA, S. de A.; LIMA, J. S. de S. Atributos físicos do solo e sua relação espacial com a produtividade do café arábica. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, n. 4, p. 395-403, 2013.

SILVA, Y. J. A. B.; SILVA, Y. J. A. B.; FREIRE, M. B. G. S.; LOPES, E. A. P. L.; SANTOS, M. A. *Atriplex nummularia* Lindl. as alternative for improving salt-affected soils conditions in semiarid environments: a field experiment. **Chilean Journal of Agricultural Research**, Chillán, v. 76, n. 3, p. 343-348, 2016.

SILVEIRA, P. M. da; CUNHA, P. C. R. da; STONE, L. F.; SANTOS, G. G. dos. Atributos químicos de solo cultivado com diferentes culturas de cobertura. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 40, n. 3, p. 283-290, 2010.

SINGH, S.; MAURYA, B. R.; BAHADUR, I. Solubilization of potassium containing various k-mineral sources by k-solubilizing bacterial isolates on Aleksandrov medium. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, Tamilnadu, v. 7, n. 3, p. 1142-1151, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.703.136>>.

SOUZA, E. R. de; FREIRE, M. B. G. dos S.; NASCIMENTO, C. W. A. do, MONTENEGRO, A. A. de A., FREIRE, F. J.; MELO, H. F. de. Fitoextração de sais pela *Atriplex nummularia* Lindl. sob estresse hídrico em solo salino sódico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 5, p. 477-483, 2011.

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 12, p. 1301-1309, 2013.

STUMPF, L.; PAULETTO, E. A.; SPINELLI PINTO, L. F.; ALVES BRITO PINTO, M.; ALDRIGHI DUTRA JUNIOR, L.; SCHEUNEMANN, T. Sistema radicular da *Urochloa brizantha*: desenvolvimento e influências nos atributos de um solo degradado. **Interciencia**, Caracas, v. 41, n. 5, 334-339, 2016a.

STUMPF, L.; PAULETTO, E. A.; SPINELLI PINTO, L. F.; GARCIA, G. F.; AMBUS, J. V.; SILVA, T. S. da; BRITO PINTO, M. A.; TUCHTENHAGEN, I. K. Condição física e desenvolvimento radicular de gramíneas em solo construído após mineração de carvão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1078-1087, 2016b.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**, 5rd edition. São Paulo: Artmed, 2013. 918 p.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Boletim Técnico de Solos/ UFRGS, Departamento de Solos, 1995. 174 p.

THOMAS, G. W. **Exchangeable cations**. In: PAGE, A.L. (ed.) Methods of soil analysis, chemical and microbiological properties. Soil Science Society of America, Madison, p. 159-165, 1982.

TURÍBIO e SILVA, K. S.; ALMEIDA, A. M.; SILVA, T. S. F. Influência de determinantes ambientais na vegetação da Caatinga. **Sociedade e Território**, Natal, v. 29, n. 1, p. 183-198, 2017.

UNITED STATES SALINITY LABORATORY – USSS STAFF. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington: U.S. Department of Agriculture, 1954. 160 p. (Handbook 60).

VAN HALL, R. L.; CAMMERAAT, L. H.; KEESSTRA, S. D.; ZORN, M. Impact of secondary vegetation succession on soil quality in a humid Mediterranean landscape. **Catena**, Amsterdam, v. 149, p. 836-843, 2017.

VERONESE, M.; FRANCISCO, E. A. B.; ZANCANARO, L.; ROSOLEM, C. A. Plantas de cobertura e calagem na implantação do sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 8, p. 1158-1165, 2012.

VILLA, E. B.; PEREIRA, M. G.; ALONSO, J. M.; BEUTLER, S. J.; LELES, P. S. dos S. Aporte de serapilheira e nutrientes em área de restauração florestal com diferentes espaçamentos de plantio. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 23, n. 1, p. 90-99, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.067513>>.

WANG, Z-G.; BAO, X-G.; LI, X-F.; JIN, X.; ZHAO, J-H.; SUN, J-H.; CHRISTIE, P.; LI, L. Intercropping maintains soil fertility in terms of chemical properties and enzyme activities on a timescale of one decade. **Plant and Soil**, Berlin, v. 391, p. 265–282, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11104-015-2428-2>>.

ZHANG, Q.; JIA, X.; ZHAO, C.; SHAO, M. Revegetation with artificial plants improves topsoil hydrological properties but intensifies deep-soil drying in northern Loess Plateau, China. **Journal of Arid Land**, Berlin, v. 10, n. 3, p. 335-346, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s40333-018-0007-0>>.

ZHANG, Z-H.; LI, X-Y.; JIANG, Z-Y.; PENG, H-Y.; LI, L.; ZHAO, G-Q. Changes in some soil properties induced by re-conversion of cropland into grassland in the semiarid steppe zone of Inner Mongolia, China. **Plant and Soil**, Berlin, v. 373, p. 89–106, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11104-013-1772-3>>.

ZIECH, A. R. D.; CONCEIÇÃO, P. C.; LUCHESE, A. V.; BALIN, N. M.; CANDIOTTO, G.; GARMUS, T. G. Proteção do solo por plantas de cobertura de ciclo hibernar na região Sul do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 5, p. 374-382, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2015000500004>>.

**4 FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES E ATRIBUTOS BIOLÓGICOS DE
SOLO DEGRADADO SOB REVEGETAÇÃO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

Fungos micorrízicos arbusculares e atributos biológicos de solo degradado sob revegetação no Semiárido brasileiro

RESUMO

As propriedades biológicas/microbiológicas do solo são mais sensíveis a modificações no manejo do solo. A revegetação de áreas degradadas pode alterar essas propriedades. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da revegetação, com espécies arbustivas e arbóreas, sobre atributos de um solo degradado no Semiárido do Nordeste brasileiro, analisando a presença de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) e alterações na estrutura da comunidade microbiana do solo. Para tanto, um experimento foi instalado em campo em novembro de 2013. A área experimental foi cercada e dividida em quatro blocos, com oito tratamentos: 1) testemunha (sem cultivo de plantas); 2) plantas de *Atriplex*; 3) plantas de Sabiá; 4) plantas de *Leucena*; 5) plantas de Nim; 6) consórcio *Atriplex* e Sabiá; 7) consórcio *Atriplex* e Nim; 8) consórcio *Atriplex* e *Leucena*. Foram realizadas duas avaliações no experimento, a primeira no final do período seco (Novembro/2015), 24 meses após o transplante, e a segunda ao final do período chuvoso (Maio/2016), aos 30 meses. Em ambas as coletas, foram avaliados o pH rizosférico, respiração basal do solo – RBS, carbono da biomassa microbiana – CBM, quociente metabólico – qCO_2 e quociente microbiano – $qMIC$. Também foi avaliada a presença de FMA, por meio da densidade de glomerosporos, colonização micorrízica e quantificação da glomalina. A estrutura da comunidade microbiana do solo foi analisada pela técnica *fatty acid methyl ester* (FAMES). Os dados foram submetidos à análise de variância, a um contraste ortogonal, e à análise (multivariada) dos componentes principais (PCA). O cultivo do solo degradado com as espécies mencionadas possibilitou o aumento do CBM, em ambas as estações. Na estação chuvosa, a RBS e o qCO_2 foram menores na área cultivada, comparada à área sem cultivo (testemunha). A densidade de esporos de FMA e a colonização micorrízica foram maiores na área cultivada. Confirmou-se a formação de associação micorrízica em *Atriplex nummularia* (Chenopodiaceae), com taxas superiores a 50%. A estação chuvosa, influenciou positivamente diversos atributos do solo, indicando que modificações na umidade do ambiente proporcionam alterações na comunidade microbiana e em suas características. A estrutura da comunidade microbiana da área testemunha é adaptada às condições de degradação. A revegetação promove modificações benéficas no solo e na microbiota associada.

Palavras-chave: *Atriplex nummularia*. Qualidade do solo. Microbiota.

Arbuscular mycorrhizal fungi and biological attributes of degraded soil under revegetation in the Brazilian semiarid region

ABSTRACT

The biological/microbiological properties of the soil are more sensitive to changes in soil management. Revegetation of degraded areas may alter these properties. The objective of this work was to evaluate the influence of revegetation, with shrub and tree species, on the attributes of a degraded soil in the Brazilian Northeast semiarid region, analyzing the presence of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and changes in soil microbial community. For that, an experiment was installed in the field, in November of 2013. The experimental area was fenced and divided into four blocks, with eight treatments: 1) control (without plant cultivation); 2) *Atriplex* plants; 3) *Sabiá* plants; 4) *Leucaena* plants; 5) *Neem* plants; 6) *Atriplex* and *Sabiá* consortium; 7) *Atriplex* and *Neem* consortium; 8) *Atriplex* and *Leucaena* consortium. Two evaluations were performed in the experiment, the first at the end of the dry period (November/2015), 24 months after transplanting, and the second at the end of the rainy season (May/2016) at 30 months. In both collections, the rhizospheric pH, basal respiration of the soil - BRS, carbon of the microbial biomass - CMB, metabolic quotient - qCO_2 and microbial quotient - $qMIC$ were evaluated. It was also evaluated the presence of AMF, through glomerospores density, mycorrhizal colonization and glomalin quantification. The structure of the soil microbial community was analyzed by the *fatty acid methyl ester* (FAMES) technique. Data were submitted to analysis of variance, orthogonal contrast, and analysis (multivariate) of the main components (PCA). The cultivation of degraded soil with the mentioned species allowed the increase of CMB in both seasons. In the rainy season, BRS and qCO_2 were lower in the cultivated area, compared to the non-cultivated area (control). The AMF spore density and mycorrhizal colonization were higher in the cultivated area. It confirmed the formation of mycorrhizal association in *Atriplex nummularia* (Chenopodiaceae), with rates higher than 50%. The rainy season positively influenced several soil attributes, indicating that changes in the humidity of the environment provide changes in the microbial community and its characteristics. The structure of the microbial community of the control area is adapted to the degradation conditions. Revegetation promotes beneficial changes in soil and associated microbiota.

Keywords: *Atriplex nummularia*. Microbiota. Soil quality.

4.1 INTRODUÇÃO

A degradação do solo reduz ou elimina a produtividade biológica e/ou econômica, e a capacidade de suporte aos serviços ecossistêmicos essenciais para o bem-estar humano. Isto ocorre devido a um processo (ex. erosão hídrica) e/ou combinação de processos, abrangendo os que resultam da atividade antrópica (MMA, 2004; OLIVEIRA et al., 2015; FAO; ITPS, 2015; ALVES et al., 2017).

O Brasil apresenta uma área superior a 1,3 milhões de km² susceptíveis à desertificação, abrangendo os Estados do Nordeste, Minas Gerais e Espírito Santo o que equivale a 16% do território nacional (SANTANA et al., 2007; MMA, 2013). A retirada da caatinga, vegetação nativa da região semiárida do Brasil, aliada a longos períodos de estiagem, intensifica a susceptibilidade à desertificação (MARTINS et al., 2010).

Com a ausência de vegetação, aumenta a exposição do solo à chuva e ao sol, acarretando problemas físicos como desagregação e encrostamento da camada superficial, além de compactação das camadas mais profundas. Na ocorrência de chuvas, as perdas de nutrientes e matéria orgânica são consideráveis, principalmente nas camadas superficiais do solo (HERNANI, 1999; TEFERI et al., 2016).

A busca por alternativas para a recuperação de solos degradados é constante, a restauração da qualidade do solo é de grande importância para se manter ou melhorar os serviços ecossistêmicos para as gerações futuras (KEESSTRA et al., 2016; VAN HALL et al., 2017). A revegetação vem ganhando destaque, por ser uma alternativa de baixo custo e possibilitar a melhoria dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo.

Na revegetação, podem-se usar diversas espécies vegetais, incluindo leguminosas arbóreas e herbáceas que atuam em simbiose com fungos micorrízicos e bactérias fixadoras de nitrogênio atmosférico (NOGUEIRA et al., 2012). Em ambientes sob estresse hídrico e salino, a espécie halófito *Atriplex nummularia* Lindl. tem sido amplamente estudada (MONTENEGRO et al., 2003; FREIRE et al., 2004; LEAL et al., 2008; BAZIHIZINA et al., 2009; SOUZA et al., 2011).

Espécies que sejam conhecidas pelos agricultores e que tenham potencial para se desenvolver nesses solos degradados também merecem destaque em processos de revegetação. O Sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia* Benth) por sua baixa exigência em

fertilidade e umidade dos solos, desenvolve-se bem em áreas muito degradadas (CARVALHO, 2007).

Outras espécies que podem ser usadas em programas de revegetação são a Leucena (*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit), conhecida por ser tolerante à seca (FREIRE; RODRIGUES, 2009), e o Nim (*Azadirachta indica* A. Juss.), que, devido a sua rusticidade se desenvolve bem em solos fisicamente degradados e suporta longos períodos de estiagem (NEVES et al., 2003; NUNES et al., 2012).

É importante considerar que a perda da vegetação natural leva à redução da biodiversidade e o uso de diferentes espécies pode ser fundamental para a recuperação das áreas degradadas. Assim, na revegetação se estimula o plantio heterogêneo, no qual estão envolvidas espécies nativas e exóticas que sejam potenciais para a recuperação dessas áreas (PEREIRA; RODRIGUES, 2012).

Para avaliar solos degradados em recuperação, os atributos biológicos/microbiológicos são importantes, por serem mais sensíveis a modificações no manejo do solo, com respostas mais rápidas, quando comparados àqueles de caráter físico ou químico (LINO et al., 2016; PAZ-FERREIRO; FU, 2016; SANTOS et al., 2016; GRAZZIOTTI et al., 2017). Assim, os atributos biológicos são indicadores da qualidade funcional do solo (ZHANG et al., 2006; AN et al., 2009; SANTOS et al., 2016; MEDEIROS et al., 2017). Diversos atributos biológicos, como respiração basal do solo (RBS), carbono da biomassa microbiana (CBM), quociente metabólico (qCO_2) e outros, são utilizados para avaliar a recuperação de áreas degradadas (AN et al., 2009; QU et al., 2016; SANTOS et al., 2016; GRAZZIOTTI et al., 2017).

Os micro-organismos desempenham papel fundamental na funcionalidade do solo, como na decomposição de matéria orgânica e ciclagem de nutrientes, essenciais para a manutenção e restauração dos ecossistemas. A microbiota do solo é influenciada por diversos fatores, incluindo o tipo de vegetação, que pode afetar a estrutura e propriedades físico-químicas do solo, microclima, qualidade e quantidade de matéria orgânica e exsudatos radiculares (JANGID et al., 2011; CAO et al., 2017). Alguns micro-organismos também auxiliam na promoção de crescimento vegetal, como rizobactérias, fungos micorrízicos e outros (HAMILTON et al., 2016; VIMAL et al., 2017), possibilitando melhor desenvolvimento das plantas (DUPONNOIS et al., 2013; VIMAL et al., 2017) e o possível sucesso da revegetação (SILVA et al., 2015).

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) constituem um dos melhores exemplos de associação simbiótica (PEDONE-BONFIM et al., 2018), na qual as raízes

de plantas vasculares são colonizadas por fungos específicos, ocorrendo uma perfeita integração funcional entre os simbioses (SMITH; READ, 2008). Os FMAs desempenham um papel ecológico fundamental no funcionamento dos ecossistemas, por incrementar a absorção e translocação de elementos essenciais às plantas (SMITH; READ, 2008), beneficiando o hospedeiro mesmo em condições de estresse. Assim, a presença desses fungos pode auxiliar na recuperação de solos degradados, devido ao melhor desenvolvimento das plantas por eles colonizadas. Além disso, os FMA produzem uma glicoproteína (glomalina) que é correlacionada com a estabilidade de agregados e com o carbono e o nitrogênio do solo (NICHOLS; WRIGHT, 2005; SILVA et al., 2012).

Considerando os benefícios promovidos pelos FMA, entende-se a necessidade de estudos que indiquem como o manejo do solo pode ser conduzido de modo a incrementar as associações micorrízicas em processos de recuperação de solos degradados no Semiárido. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da revegetação, com espécies arbustivas e arbóreas, sobre atributos biológicos de um solo degradado no Semiárido do Nordeste brasileiro, analisando a presença e atividade de FMA e alterações na estrutura da comunidade microbiana do solo.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Descrição da área

O experimento foi instalado em campo em novembro de 2013, sendo a área localizada no lote 4P do Perímetro Irrigado Cachoeira II (S 7°59'55.2084", W 38°18'56.0448"), em Serra Talhada, Pernambuco (Figura 1). O clima da região segundo classificação de Köppen é do tipo BShw. A temperatura média anual é de 25,9 °C e a precipitação média anual é de 642 mm, concentrada entre os meses de dezembro e maio, com 85% da média anual (ALVARES et al., 2013).

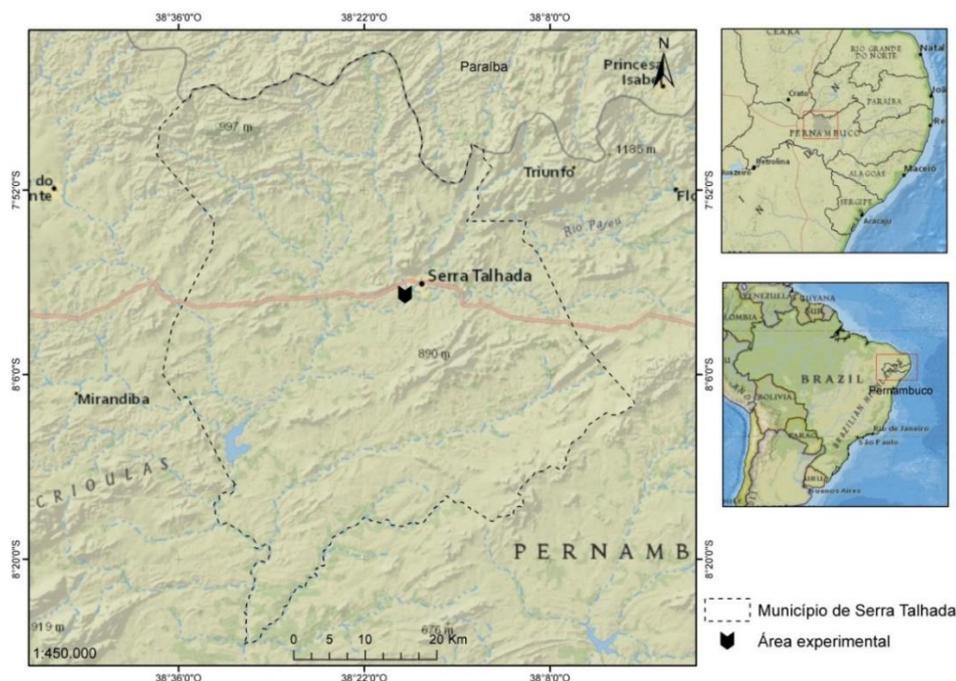


Figura 1. Localização da área experimental. Lote 4P – Perímetro Irrigado Cachoeira II, Serra Talhada, Pernambuco, Brasil

O solo da área na implantação do experimento era degradado quimicamente pela salinidade e sodicidade (Tabela 1), aliada a esta degradação, a pequena e localizada cobertura vegetal deixou o solo exposto ao sol e a chuva. Anteriormente a área era cultivada com bananeiras, mas devido ao avançado processo de degradação, passou cerca de 10 anos sem cultivo, até a implantação do experimento.

O relevo é plano e o solo é pertencente à classe textural areia franca, com elevada proporção de areia fina, existindo camadas adensadas em subsuperfície, causando a degradação física deste solo. Na área também há o acúmulo de sedimentos fluviais e o solo da área é classificado como um Neossolo Flúvico (SILVA et al., 2001).

Tabela 1. Caracterização física e química do solo da área experimental antes da instalação do experimento (Santos, 2016)

Camada	Areia	Silte	Argila	pH	CEes ¹	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CTC ²	PST ³
cm	g kg ⁻¹			H ₂ O	dS m ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹				%	
0 - 10	827,91	77,63	94,45	7,23	5,48	5,99	1,05	1,59	0,68	9,51	62,98

¹Condutividade elétrica do extrato da pasta saturada; ²Capacidade de troca de cátions;

³Percentagem de sódio trocável

A área foi cercada e dividida em quatro blocos casualizados, com oito tratamentos, contabilizando 32 parcelas experimentais. Cada parcela tem as

dimensões: 8 x 8 m (64 m²) e área útil de 16 m² (4 x 4 m). Foram aplicados os tratamentos: 1) testemunha (área sem cultivo de plantas); 2) plantas de Atriplex (*Atriplex nummularia*); 3) plantas de Sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia* Benth); 4) plantas de Leucena (*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit); 5) plantas de Nim (*Azadirachta indica* A. Juss.); 6) consórcio Atriplex e Sabiá; 7) consórcio Atriplex e Nim; 8) consórcio Atriplex e Leucena.

Esta disposição foi estabelecida devido a salinidade e sodicidade inicial do solo da área, assim as plantas de Atriplex foram utilizadas como principais e as demais espécies como secundárias. O Sabiá foi escolhido por ser uma planta nativa e as outras espécies por serem adaptadas a condições de altas temperaturas e baixa precipitação, bem como terem o crescimento rápido. O espaçamento do plantio foi de 2 x 2 m, tanto para o cultivo isolado como para o consórcio (plantas alternadas), totalizando 16 plantas por parcela e 4 plantas na área útil.

Ao atingirem cerca de 20 cm de altura as mudas das espécies estudadas foram transplantadas para covas com 15 cm de diâmetro e 20 cm de profundidade. O transplântio foi feito diretamente na cova, com o substrato orgânico das mudas (solo/composto orgânico comercial, 1:1), sem aplicação de qualquer tipo de produto, químico ou orgânico. Assim que foram transplantadas, as mudas foram irrigadas manualmente, mantendo-se a aplicação de água semanalmente nos três primeiros meses para garantir o pegamento. Devido à morte de algumas mudas nos primeiros meses, foi feita a reposição, com mudas nas mesmas condições e seguindo-se os mesmos procedimentos. Nos períodos de chuva na região (entre dezembro e maio), realizou-se o coroamento das mudas, que consta da limpeza da vegetação espontânea num raio de 20 cm em volta do caule de cada planta, para evitar competição com as plantas estudadas.

Foram realizadas duas avaliações no experimento: a primeira no final do período seco (Novembro/2015), quando as plantas completaram 24 meses do transplântio, e a segunda ao final do período chuvoso (Maio/2016), aos 30 meses (Figura 2). No período seco, a umidade média do solo era de 0,0038 g g⁻¹ de água no solo, no período chuvoso era de 0,0104 g g⁻¹ de água no solo.

4.2.2 Amostragem do solo

As amostras de solo foram coletadas na camada de 0-10 cm de profundidade, respeitando a projeção da copa das plantas. Em cada parcela foram coletadas quatro amostras simples, para composição de uma amostra composta. Também foram coletadas amostras de solo rizosférico (solo sob influência das raízes), obedecendo ao mesmo número de amostras simples para a formação da composta.

Na coleta do solo rizosférico foi necessário encontrar a raiz “principal” das plantas, a fim de coletar o solo aderido as raízes “secundárias” e retirar estas para análises posteriores.

Na área testemunha, para a coleta de solo rizosférico, identificou-se as plantas que se desenvolviam no local, mesmo que pontualmente, e destas foram coletados o solo e as raízes.

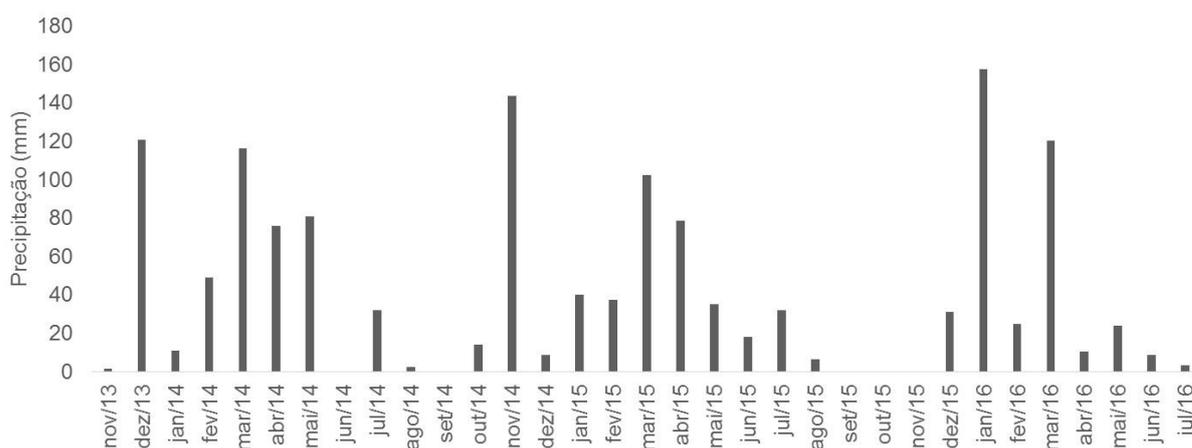


Figura 2. Precipitação mensal acumulada (em milímetros), entre os meses de novembro de 2013 e julho de 2016, no Município de Serra Talhada de acordo com a Estação Meteorológica Serra Talhada/Açude Cachoeira (APAC, 2018).

As amostras de solo foram acondicionadas sob refrigeração em campo e transportadas ao laboratório, onde foram conservadas a 5°C até serem processadas. Para as parcelas sem planta, a amostragem para a formação da amostra de solo composta foi a mesma, no centro da área útil e mantendo-se a mesma distância entre os pontos das parcelas onde havia plantas.

4.2.3 Atributos biológicos do solo

Nas amostras de solo rizosférico foi determinado o pH em água (1:2,5), de acordo com EMBRAPA (2017). O solo da camada de 0-10 cm foi avaliado quanto à

respiração basal (RBS), determinada pelo método de Isermeyer, descrito por Mendonça e Matos (2005), que quantifica o dióxido de carbono (CO_2) liberado no processo de respiração microbiana; o carbono da biomassa microbiana do solo (CBM) foi determinado por fumigação/extração segundo Vance et al. (1987) e Oliveira et al. (2001).

A partir desses dados, foram calculados: o quociente metabólico ($q\text{CO}_2$), representado pela razão entre a respiração basal e a biomassa microbiana e o quociente microbiano, pela relação entre o carbono da biomassa microbiana e o carbono orgânico total (COT) do solo, segundo a expressão: $q\text{MIC} = \text{CBM}/\text{COT}$.

4.2.4 Análise de presença e atividade de fungos micorrízicos arbusculares (FMA)

Glomerosporos, foram extraídos a partir de alíquotas de 50 g de solo (0-10 cm), seguindo-se a técnica de peneiramento úmido (GERDEMANN; NICOLSON, 1963) e centrifugação em água e sacarose 50% (JENKINS, 1964), recolhidos em placa canaletada e quantificados em estereomicroscópio (40X). Os resultados da densidade foram expressos em quantidade de esporos por grama de solo.

Na avaliação da colonização micorrízica, as raízes foram separadas das amostras de solo rizosférico, lavadas e conservadas em álcool a 50%, depois foram diafanizadas com KOH (10%) e coradas com azul de tripano (0,05%), de acordo com o método de Phillips e Hayman (1970). Quando as raízes se apresentaram muito pigmentadas, foi adicionado H_2O_2 (30%) para despigmentação, antes da coloração. As raízes coradas foram conservadas em glicerol a 50% até serem analisadas. Para o cálculo da percentagem de colonização micorrízica, 100 fragmentos de raízes foram montados entre lâmina e lamínula e observados ao microscópio, sendo registrada a presença ou ausência de estruturas típicas de FMA (arbúsculos, vesículas e/ou esporos e hifas) nas raízes das plantas (GIOVANNETTI; MOSSE, 1980).

Duas frações de proteínas do solo relacionadas à glomalina (PSRG) foram avaliadas: facilmente extraível (GFE) e total (GT). Foram usadas alíquotas de 0,25 g de solo (0-10 cm), sendo que para a obtenção da GFE foi realizada uma primeira autoclavagem do solo acrescido de 2 mL de citrato de sódio (20mM; pH 7,0) por 30 minutos. Para a extração da GT foram necessários múltiplos ciclos de autoclavagem por 60 minutos com reposição da solução extratora (2 mL) de citrato de sódio (50mM; pH 8,0) até que o sobrenadante não apresentasse coloração típica de glomalina, ou

seja, vermelho-amarronzado (WRIGHT; UPADHYAYA, 1998). Depois disso, ambas foram quantificadas pelo método de Bradford (1976), em espectrofotômetro (595 nm) e os dados apresentados em miligrama de PSRG por grama de solo.

4.2.5 Análise da estrutura da comunidade microbiana do solo por perfis de ésteres metílicos de ácidos graxos (*fatty acid methyl ester*, FAMES)

A estrutura da comunidade microbiana do solo foi determinada nas amostras de solo rizosférico usando o método de quantificação e identificação de perfis de ésteres metílicos de ácidos graxos (*fatty acid methyl ester*, FAMES), descrito por Schutter e Dick (2000).

A nomenclatura de ácidos graxos usada foi descrita por Frostegård et al. (2011). O número de FAMES utilizados para detecção no extrato do solo foram: i-C15:0, a-C15:0, i-C16:0, i-C17:0 para bactérias gram-positivas (BRADLEY et al., 2006; BLAUD et al., 2012). C12:0 2 OH, C12:0 3 OH, C14:0 2OH, C14:0 3OH, C16:1(9)cis, C17:0(9,10)cis, C16:0 2OH, cisC19:0 para bactérias gram-negativas (MERILES et al., 2009; BLAUD et al., 2012). C18:2(9,12)cis, C18:1(9)cis para fungos sapróbios (BRADLEY et al., 2006). C14:0, C15:0, C16:0, C17:0, C18:0 para não específicos (BRADLEY et al., 2006; BLAUD et al., 2012).

A partir dos dados FAMES foram calculadas as relações entre fungos e bactérias (F/B) e a relação entre bactérias gram-positivas e gram-negativas (Gram+/Gram-).

4.2.6 Análises estatísticas

Os resultados foram submetidos à análise da variância (ANOVA) e foram testados alguns contrastes ortogonais, confrontando o efeito dos tratamentos nas variáveis avaliadas, pelo teste t a 5% de confiança, com o uso do software SISVAR 5.3. Os dados de colonização, de número de esporos e de glomalina foram transformados em arco seno, $(\log x+1)$ e raiz $(x+1)$, respectivamente. Quando não houve diferença significativa entre os contrastes, os dados foram submetidos ao teste de Tukey a 5% de confiança com o uso do software SISVAR 5.3.

Posteriormente, dados de COT, pH, CBM, RBS, colonização micorrízica, densidade de esporos de FMA, glomalina facilmente extraível, bactérias gram-

negativas, bactérias gram-positivas, grupos não específicos, fungos sapróbios, total de bactérias e total FAMES foram usados para uma estatística multivariada, pela análise dos componentes principais (PCA), a fim de verificar os atributos que determinam a variação entre a área testemunha (sem cultivo de plantas) e as áreas cultivadas, utilizando o software STATISTICA 8.0.

4.3 RESULTADOS

4.3.1 Atributos biológicos do solo

O pH rizosférico tem valores médios próximos da neutralidade (Tabela 2). Tanto na estação seca como na chuvosa não houve diferença entre o solo da área cultivada e da testemunha. No entanto, em ambas as estações, os consórcios apresentaram média inferior ao dos cultivos isolados e da Atriplex. A época de coleta não influenciou os valores de pH rizosférico (Tabela 2).

Tabela 2. Contrastes ortogonais de valores de pH rizosférico em função da época de amostragem.

Contrastes/Tratamentos	pH (Rizosférico)	
	Estação seca	Estação chuvosa
1º Contraste		
Testemunha	7,02	7,00
Cultivos	7,09	7,01
2º Contraste		
Consórcios	7,01*	6,91*
Cultivo isolado	7,16	7,09
3º Contraste		
Consórcios	7,01*	6,91*
Atriplex	7,25	7,52
CV ¹ (%)	4,51	5,98
Média total	7,08 a	7,01 a
CV (%)	3,73	

*Médias dos contrastes seguidas de asterisco diferem estatisticamente entre si, pelo teste t a 5% de probabilidade, e médias das estações seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ¹Coeficiente de variação (CV)

O CBM foi maior no solo cultivado do que no solo sem cultivo, em ambas as estações (Tabela 3). O solo sob cultivo isolado também teve os maiores valores de CBM em relação ao solo sob consórcios, tanto na estação seca ($17,18 \mu\text{g g}^{-1}$), como na chuvosa ($20,41 \mu\text{g g}^{-1}$). O CBM do plantio com Atriplex quando comparado ao do cultivo consorciado se sobressaiu apenas na estação seca. Na estação chuvosa o CBM foi superior ao registrado na estação seca: $18,9$ e $14,5 \mu\text{g g}^{-1}$, respectivamente.

Tabela 3. Contrastes ortogonais dos valores de carbono da biomassa microbiana (CBM), respiração basal do solo (RBS), quociente metabólico ($q\text{CO}_2$) e quociente microbiano ($q\text{MIC}$), em função da época de amostragem do solo

Contrastes/ Tratamentos	CBM ($\mu\text{g g}^{-1}$)		RBS ($\text{mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ solo dia^{-1})		$q\text{CO}_2$ ($\text{mg C-CO}_2 \text{ mg}^{-1}$ C-CBM dia^{-1})		$q\text{MIC}$ (%)	
	Estação seca	Estação chuvosa	Estação seca	Estação chuvosa	Estação seca	Estação chuvosa	Estação seca	Estação chuvosa
1º Contraste								
Testemunha	10,34*	15,36*	43,29	48,12*	4,97	3,06*	0,71*	0,87
Cultivos	15,10	19,41	49,47	34,84	4,65	1,79	1,22	0,93
2º Contraste								
Consórcios	12,32*	18,07*	55,19*	32,71	7,85*	1,80	1,18	0,98*
Cultivo isolado	17,18	20,41	45,19	36,44	4,64	1,79	1,25	0,89
3º Contraste								
Consórcios	12,32*	18,07	55,19	32,71*	7,85*	1,80	1,18*	0,98
Atriplex	15,89	19,48	47,09	43,09	3,26	2,00	0,88	0,98
CV ¹ (%)	53,66	24,33	41,75	55,59	88,26	43,14	60,77	46,50
Média total	14,50 b	18,90 a	48,70 a	36,50 b	4,69 a	1,95 b	1,16 a	0,92 a
CV (%)	23,74		45,71		83,53		52,99	

*Médias dos contrastes seguidas de asterisco diferem estatisticamente entre si, pelo teste t a 5% de probabilidade, e médias das estações seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ¹Coeficiente de variação (CV)

Com relação à RBS, o solo cultivado teve o menor valor na estação chuvosa ($34,84 \text{ mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ solo dia}^{-1}$), comparado a área testemunha. Mas na estação seca a RBS do solo não diferiu entre o tratamento testemunha e os de cultivo. Na estação chuvosa, o solo sob cultivo consorciado teve o menor valor de RBS quando comparado ao solo cultivado apenas com Atriplex ($32,71$ e $43,09 \text{ mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ solo dia}^{-1}$, respectivamente). Houve menor RBS na estação chuvosa (Tabela 3).

A média geral do $q\text{CO}_2$ (Tabela 3) foi maior na estação seca ($4,69 \text{ mg C-CO}_2 \text{ mg}^{-1} \text{ C-CBM dia}^{-1}$) do que na chuvosa ($1,95 \text{ mg C-CO}_2 \text{ mg}^{-1} \text{ C-CBM dia}^{-1}$). Nesta estação, não houve diferença entre o solo do tratamento testemunha e o solo sob cultivo de plantas.

Ao avaliar o $qMIC$ o comportamento foi inverso (Tabela 3); não houve diferença na estação chuvosa, entre o solo cultivado e o sem cultivo de plantas (testemunha), enquanto que na estação seca o $qMIC$ foi maior nos cultivos. Nesta estação, o solo sob consórcios teve maior valor quando comparado ao cultivado apenas com Atriplex.

4.3.2 Análise de presença e atividade de fungos micorrízicos arbusculares (FMA)

Tanto na estação seca, como na chuvosa, a densidade de esporos de FMA foi superior nos solos cultivados, quando comparada ao registrado no solo do tratamento testemunha (Tabela 4), enquanto na estação chuvosa, a densidade de esporos foi maior nos consórcios, em comparação ao cultivo isolado com Atriplex. A média geral da densidade de glomerosporos na estação seca foi superior ao encontrado na estação chuvosa (3,52 e 1,51 esporos g^{-1} de solo, respectivamente).

Tabela 4. Contrastes ortogonais entre densidade de esporos de FMA, colonização micorrízica e produção de glomalina facilmente extraível (GFE), em função da época de amostragem do solo

Contrastes/ Tratamentos	Densidade de esporos (esporos g^{-1} solo)		Colonização micorrízica (%)		GFE ($mg\ g^{-1}$ solo)	
	Estação seca	Estação chuvosa	Estação seca	Estação chuvosa	Estação seca	Estação chuvosa
1º Contraste						
Testemunha	2,52*	1,34*	43,90*	41,43*	0,016*	0,016*
Cultivos	3,66	1,54	52,77	78,79	0,020	0,020
2º Contraste						
Consórcios	3,79	1,50	48,44*	80,73*	0,022*	0,019
Cultivo isolado	3,57	1,57	56,03	77,33	0,020	0,020
3º Contraste						
Consórcios	3,79	1,50*	48,44*	80,73*	0,022	0,019*
Atriplex	3,52	1,04	53,14	72,70	0,021	0,022
CV ¹ (%)	20,34	12,37	17,67	12,49	13,78	13,75
Média total	3,52 a	1,51 b	51,66 b	74,12 a	0,020 a	0,019 a
CV (%)	18,01		12,55		15,15	

*Médias dos contrastes seguidas de asterisco diferem estatisticamente entre si, pelo teste t a 5% de probabilidade, e médias das estações seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. ¹Coeficiente de variação (CV)

Em ambas as estações a colonização micorrízica foi superior nas áreas com cultivo das espécies vegetais do que sob o tratamento testemunha (Tabela 4). Na estação seca, a colonização micorrízica no cultivo isolado e no cultivo apenas com

Atriplex se sobressaiu sobre os consórcios. Situação inversa ocorreu na estação chuvosa, na qual as raízes dos cultivos em consórcio apresentaram maior colonização micorrízica do que a registrada nos cultivos isolados. A média geral de colonização na estação chuvosa foi superior ao observado na estação seca (74,12 e 51,66%, respectivamente).

Foi confirmada a associação micorrízica em *A. nummularia* (Figura 3), planta da família Chenopodiaceae, conhecida por apresentar a maioria das espécies tipicamente não-micorrízicas.

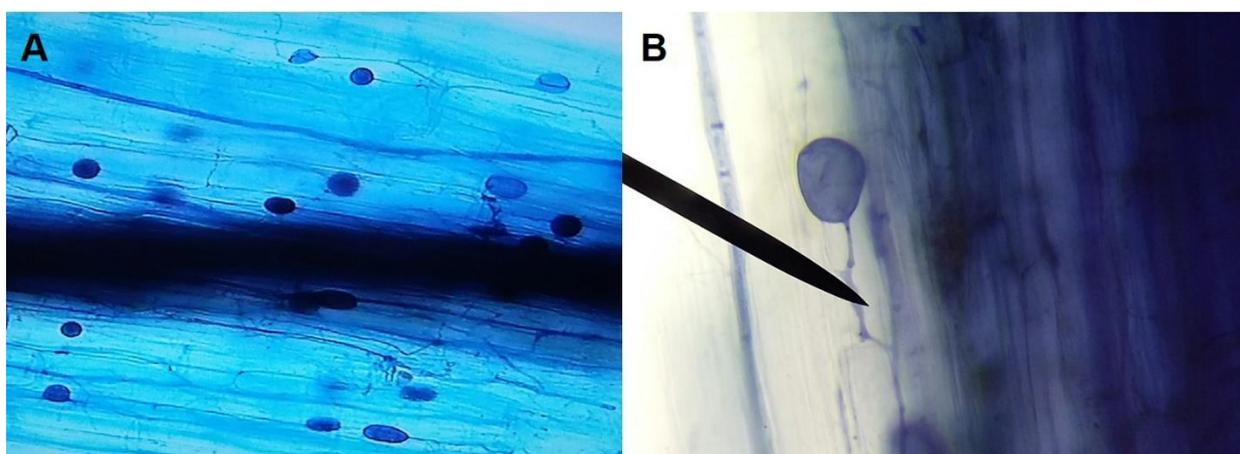


Figura 3. Hifas e vesículas de FMA observadas em raízes de *Atriplex nummularia*: A- vista geral (aumento de 10 X); B- detalhe de uma vesícula (aumento de 40 X)

Em todos os tratamentos foi possível extrair GFE do solo, mesmo em baixas concentrações. Por outro lado, só de alguns tratamentos foi obtida GT: cultivos com Atriplex, Nim, Atriplex x Nim e Atriplex x Leucena, nas seguintes concentrações: 0,005; 0,006; 0,002; e, 0,003 mg g⁻¹ de glomalina total no solo, respectivamente. Em ambas as estações, seca e chuvosa, os FMA nos cultivos proporcionaram ao solo maiores concentrações de GFE (Tabela 4). Na estação seca os tratamentos em consórcios se sobressaíram sobre o cultivo isolado em relação à produção de GFE, enquanto que na estação chuvosa o solo cultivado com Atriplex apresentou valor maior de GFE que os solos dos consórcios.

4.3.3 Análise da estrutura da comunidade microbiana do solo por perfis de ésteres metílicos de ácidos graxos (*fatty acid methyl ester*, FAMES)

O FAMES dos solos na estação seca (Figura 4A) demonstrou que a biomassa do grupo de micro-organismos não específicos ($126,30 \text{ mg kg}^{-1}$ de biomassa no solo) e dos fungos sapróbios ($39,68 \text{ mg kg}^{-1}$ de biomassa no solo) foi superior no solo da área testemunha, quando comparada às áreas cultivadas ($105,44$ e $31,96 \text{ mg kg}^{-1}$ de biomassa no solo, respectivamente). O valor total do FAMES também foi superior no solo da área testemunha em comparação ao da área cultivada.

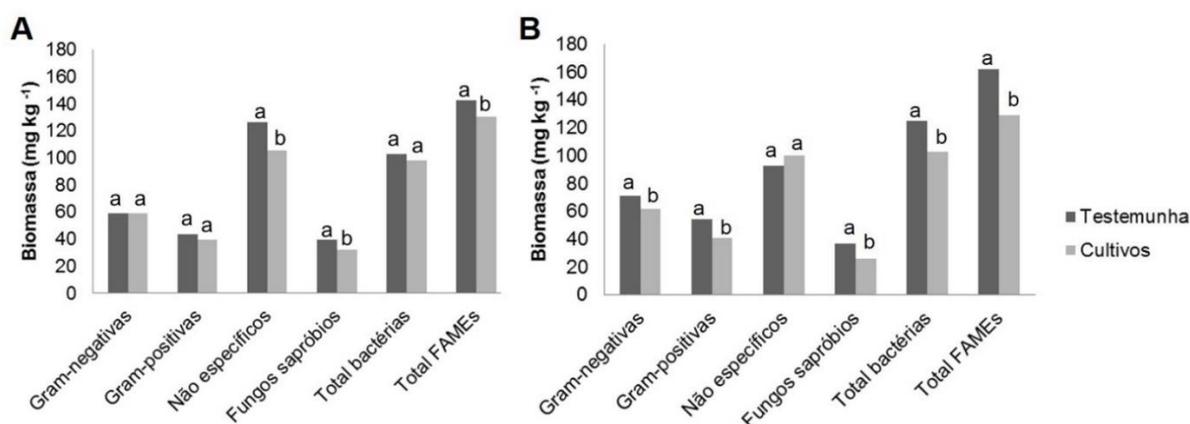


Figura 4. A- FAMES registrados na estação seca. B- FAMES registrados na estação chuvosa. Comparação da biomassa de bactérias gram-negativas, gram-positivas, grupos não específicos, fungos sapróbios, total de bactérias e soma de todos os grupos (Total FAMES), no solo sem cultivo (testemunha) e nos solos cultivados. Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre o tratamento testemunha e o do cultivo de plantas, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade

Na estação chuvosa (Figura 4B), os valores de FAMES em todos os grupos avaliados foram superiores na área testemunha, com exceção dos micro-organismos não específicos, que não apresentaram diferença em relação às áreas cultivadas. Como a área testemunha apresentou a maior biomassa microbiana, em ambas as estações, a comparação dos outros contrastes não foi realizada.

Ao comparar a época de amostragem, a biomassa média de fungos sapróbios foi superior na estação seca, em comparação a chuvosa. As demais biomassas não apresentaram diferenças entre as estações.

Ao realizar uma comparação entre os tratamentos, sem a formação de grupos (ex. consórcios), foi possível observar que na estação seca o tratamento com plantas de Sabiá isoladas e com plantas de Atriplex também isoladas apresentaram os maiores valores de biomassa microbiana (Total FAMES), $163,87$ e $151,70 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente; enquanto a testemunha teve uma biomassa microbiana de $142,20 \text{ mg kg}^{-1}$ (Tabela 5).

Tabela 5. Comparação do Total FAMES nos diferentes tratamentos estudados, na estação seca

Tratamento	Total FAMES mg kg ⁻¹
Sabiá	163,87 a
Atriplex	151,70 a
Controle	142,20 abc
Atriplex x Nim	136,51 abc
Atriplex x Sabiá	134,65 abc
Leucena	121,34 bcd
Atriplex x Leucena	110,70 cd
Nim	93,23 d
CV ¹ (%)	9,87

*Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

¹Coeficiente de variação.

Ao avaliar a relação entre fungos e bactérias (F/B), na estação seca foi observado maior valor médio na área testemunha (0,39) do que nas áreas cultivadas (0,32). O mesmo ocorreu na estação chuvosa, com uma relação F/B de 0,29 no solo da área testemunha e de 0,26 nos solos cultivados. Quando comparadas as médias gerais das estações, a relação F/B na estação seca foi superior ao registrado na estação chuvosa (0,33 e 0,26, respectivamente).

Para a relação entre Gram+/Gram- na estação chuvosa, a média foi maior no solo da área testemunha, quando comparada às cultivadas (0,79 e 0,66, respectivamente), enquanto que na estação seca e entre as duas estações não houve diferença significativa entre os valores.

4.3.4 Análise multivariada

Com a análise multivariada de PCA foi possível identificar diferenças entre os tratamentos de cultivo das espécies vegetais estudadas e a testemunha (sem cultivo), tanto na estação seca (Figura 5) quanto na chuvosa (Figura 6). Na estação seca, os tratamentos com Sabiá, Atriplex x Nim, Leucena, Atriplex x Leucena, e Nim ficaram em grupos opostos ao da testemunha, enquanto na estação chuvosa, todos os

tratamentos ficaram em grupos separados da testemunha, demonstrando a influência das plantas nos atributos dos solos avaliados.

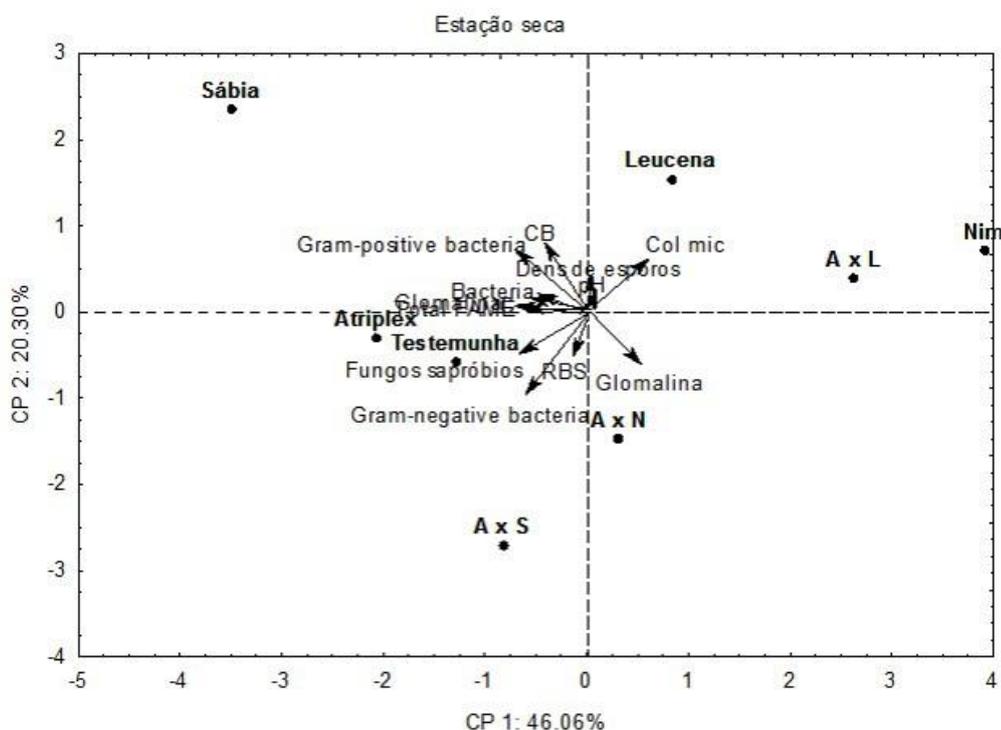


Figura 5. Plotagem da análise dos componentes principais (PCA) para a estação seca, mostrando o carbono orgânico total (COT), pH, carbono da biomassa microbiana (CBM), respiração basal do solo (RBS), colonização micorrízica (Col mic), densidade de esporos de FMA (Dens. de esporos), glomalina facilmente extraível (Glomalina), bactérias gram-negativas (Gram-negative bacteria), bactérias gram-positivas (Gram-positive bacteria), grupos não específicos (Non-specific), fungos sapróbios, total de bactérias (Bacteria) e total *fatty acid methyl ester* (FAMEs), dos tratamentos: testemunha, Atriplex, Sábia, Leucena, Nim, Atriplex x Leucena (A x L), Atriplex x Sábia (A x S) e Atriplex x Nim (A x N)

Os componentes principais CP1, CP2 e CP3 explicaram 46,06, 20,30 e 16,74% da variabilidade dos dados na estação seca, respectivamente (Tabela 6). Para o CP1, que explicou praticamente 50% dos dados, o COT, bactérias gram-negativas, bactérias gram-positivas, grupos não específicos, fungos sapróbios, total de bactérias e total FAMEs tiveram peso negativo e a GFE teve peso positivo.

Na estação chuvosa (Tabela 6), os CP1, CP2 e CP3 explicaram 39,85, 21,21 e 13,44% da variabilidade dos dados, respectivamente. A CP1 apresentou outros atributos com pesos, com o COT e a colonização micorrízica com peso positivo e RBS, bactérias gram-negativas, bactérias gram-positivas, fungos sapróbios, total de bactérias e total FAMEs com peso negativo.

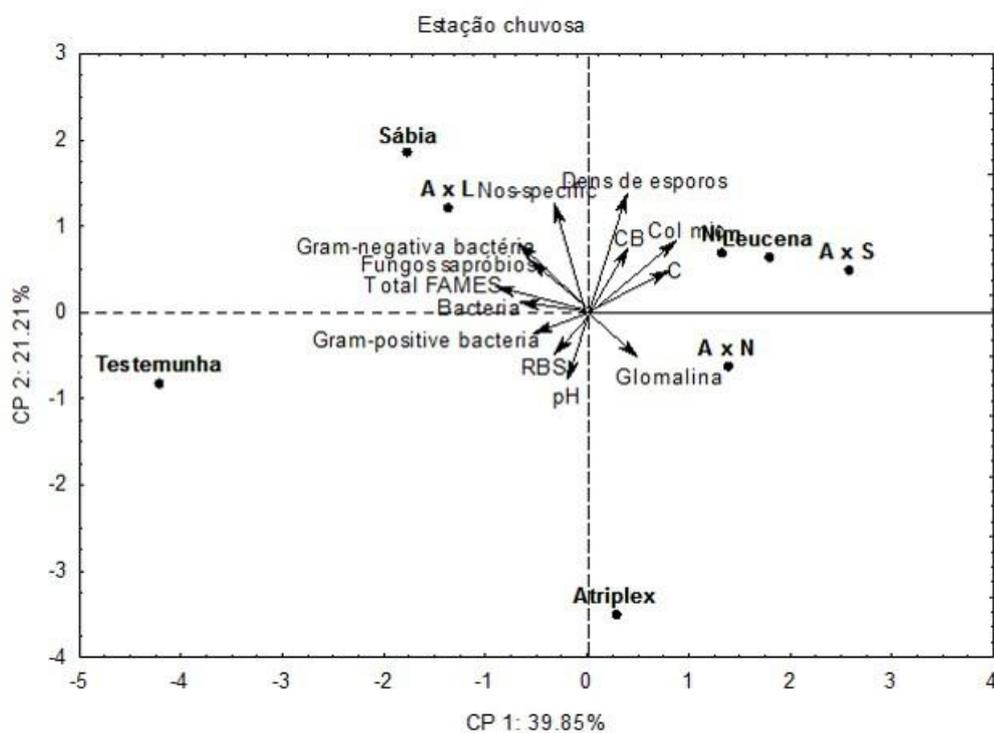


Figura 6. Plotagem da análise dos componentes principais (PCA) para a estação chuvosa, mostrando o carbono orgânico total (COT), pH, carbono da biomassa microbiana (CBM), respiração basal do solo (RBS), colonização micorrízica (Col mic), densidade de esporos de FMA (Dens. de esporos), glomalina facilmente extraível (Glomalina), bactérias gram-negativas (Gram-negative bacteria), bactérias gram-positivas (Gram-positive bacteria), grupos não específicos (Non-specific), fungos sapróbios, total de bactérias (Bacteria) e total *fatty acid methyl ester* (FAMES), dos tratamentos: testemunha, Atriplex, Sábia, Leucena, Nim, Atriplex x Leucena (A x L), Atriplex x Sábia (A x S) e Atriplex x Nim (A x N)

Tabela 6. Correlação entre as variáveis e os componentes principais, autovalores e taxas percentuais da variabilidade explicada por cada componente

	Estação seca			Estação chuvosa		
	CP1 ¹⁴	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
COT ¹	-0.81*	0.03	-0.12	0.43*	0.17	0.01
pH	0.02	-0.05	-0.99*	-0.10	-0.89*	0.23
CBM ²	-0.27	0.83*	-0.36	0.32	0.36	0.67*
RBS ³	-0.19	-0.76*	-0.25	-0.65*	-0.36	0.06
Col mic ⁴	0.37	0.67*	-0.03	0.65*	0.33	0.57
Dens. de esporos ⁵	0.02	0.31	-0.82*	0.35	0.76*	-0.14
Glomalina ⁶	0.55*	-0.30	-0.52	0.36	-0.24	0.79*
Gram-negative bacteria ⁷	-0.80*	-0.50	-0.13	-0.82*	0.40	0.22
Gram-positive bacteria ⁸	-0.77*	0.58	0.11	-0.83*	-0.16	0.30
Non-specific ⁹	-0.99*	0.03	0.04	-0.26	0.78*	0.04
Fungos sapróbios ¹⁰	-0.83*	-0.33	-0.12	-0.77*	0.34	-0.12
Bacteria ¹¹	-0.96*	0.20	0.02	-0.91*	0.08	0.29
Total FAMES ¹²	-0.99*	-0.01	-0.04	-0.96*	0.19	0.17
Eigenvalue ¹³	5.99	2.64	2.18	5.18	2.76	1.75
% Total	46.06	20.30	16.74	39.85	21.21	13.44
Cumulative	5.99	8.63	10.80	5.18	7.94	9.69
Cumulative	46.06	66.36	83.10	39.85	61.06	74.50

¹Carbono orgânico total; ²Carbono da biomassa microbiana; ³Respiração basal do solo; ⁴Colonização micorrízica; ⁵Densidade de esporos; ⁶Glomalina facilmente extraível; ⁷Bactérias gram-negativas; ⁸Bactérias gram-positivas; ⁹Grupos não específicos; ¹⁰Fungos sapróbios; ¹¹Total de bactérias; ¹²Total fatty acid methyl ester; ¹³Autovalores e variância total; ¹⁴Componete principal

4.4 DISCUSSÃO

4.4.1 Modificações nas propriedades biológicas do solo sob revegetação

O pH rizosférico não teve influência dos tratamentos com o cultivo das espécies vegetais comparados a área sem cultivo. Efeito similar foi demonstrado por Qu et al. (2016), que não observaram alterações no pH rizosférico de um solo sob revegetação com *Artemisia gmelinii* no semiárido da China. No entanto, os consórcios proporcionaram uma redução deste pH comparada as áreas com cultivo isolado, possivelmente devido à maior absorção de nutrientes pelas plantas dos consórcios, as raízes devem manter equilíbrio eletroquímico com o solo, e manter o pH intracelular, sendo os desbalanços na absorção iônica compensados pela extrusão de H⁺, quando há predomínio da absorção de cátions (SOUZA et al., 2010; TAIZ; ZEIGER, 2013).

A adoção de práticas para promover o fornecimento de carbono ao solo, afeta positivamente a sua microbiota (STEFANOWICZ et al., 2012; SANTOS et al., 2016), o que se confirmou neste trabalho pelo aumento do CBM nas áreas revegetadas, tanto na estação seca (cerca de 46%), como na chuvosa com cerca de 26%, quando comparadas com a área testemunha.

O cultivo isolado apresentou maiores valores de CBM em ambas as estações, provavelmente por ter fornecido maiores teores de C ao solo comparado aos demais tratamentos. Os maiores valores de CBM observados na estação chuvosa comparada a estação seca, provavelmente estão relacionados com o aumento da umidade do solo, que propiciou um ambiente favorável ao desenvolvimento da microbiota (ALVES et al., 2011).

Avaliando um solo sob revegetação na Província de Hunan na China, Yang et al. (2016) observaram que o CBM aumentou com a progressão da restauração da vegetação. Xiao et al. (2013) também obtiveram resultados semelhantes em áreas abandonadas (solos degradados pelo cultivo agrícola) sob restabelecimento natural da vegetação em Loess Plateau, China, com aumentos no CBM. Estes resultados são indicativos de que a revegetação está contribuindo para a recuperação do solo.

O cultivo com plantas apresentou o menor valor de RBS na estação chuvosa, quando comparado a área testemunha e a média geral de RBS também foi menor na estação chuvosa do que na estação seca. Confirmando o fato da umidade propiciar um ambiente favorável ao desenvolvimento da microbiota (ALVES et al., 2011; FERREIRA et al., 2017). Isto também ocorre quando uma determinada população microbiana se torna mais eficiente, mesmo com mais biomassa, menos carbono é liberado na forma de CO₂ pela respiração, e uma fração mais significativa de carbono é incorporada à biomassa microbiana do solo (INSAM; DOMSCH, 1988; ALVES et al., 2011).

Os valores do qCO_2 confirmam a eficiência da microbiota da área cultivada sobre a da área testemunha, na estação chuvosa, e a média do qCO_2 também confirma menor liberação de CO₂ pela respiração microbiana na estação chuvosa, em comparação com a seca. Maiores valores de qCO_2 em ecossistemas perturbados são indicativos de maior estresse e da resposta da microbiota às condições adversas, com maior perda de CO₂ por unidade de biomassa microbiana no ambiente (FREIRE et al., 2004; NOTARO et al., 2014), o que é observado na estação seca, devido a menor umidade no solo.

As alterações observadas nos valores de RBS (menor valor no cultivo isolado em relação aos consórcios, na estação seca, e menor valor nos consórcios comparando com o cultivo com Atriplex, na estação chuvosa) podem estar relacionadas à taxa de crescimento microbiano, composição química dos resíduos vegetais, disponibilidade de nutrientes no solo e umidade (STOTZKY; NORMAN, 1961; MERCANTE et al., 2008; STILES et al., 2018).

Apesar dos valores de $qMIC$ encontrados neste trabalho serem inferiores a 2%, o que é considerado crítico, significando pequena quantidade de matéria orgânica disponível para a microbiota do solo (ANDERSON, 2003. PAZ-FERREIRO; FU, 2016), na estação seca, os tratamentos cultivados promoveram aumento dos valores de $qMIC$ (1,22%), em comparação com o tratamento testemunha (0,71%). Graziotti et al. (2017) também encontraram valores de $qMIC$ inferiores a 2%, em solos sob restauração espontânea localizados no Estado de Minas Gerais, Brasil, em área de Cerrado; no entanto, os maiores valores de CBM e de $qMIC$, e menores valores de RBS das áreas com restauração avançada e inicial, indicaram maior sustentabilidade do ambiente do solo. Apesar deste trabalho ter sido desenvolvido em área mais úmida do que o presente estudo, os resultados assemelham-se, os maiores valores de CBM e $qMIC$ foram registrados na maior parte dos tratamentos com cultivo, assim como os menores valores de RBS.

A revegetação promove maior infiltração de água no solo nos eventos de chuva, bem como a proteção do solo nos períodos secos, minimizando a evaporação. Desta forma, o aporte de água no solo é maior e suas perdas menores, possibilitando a manutenção da umidade necessária ao desenvolvimento microbiano no solo.

4.4.2 Análise de presença e atividade de fungos micorrízicos arbusculares (FMA)

A densidade de glomerosporos foi superior nos solos cultivados, nas duas estações, quando comparada aos registros da área testemunha, diferindo do mencionado por Teixeira et al. (2017), que não observaram diferenças nos valores de densidade de esporos entre áreas de reabilitação após mineração de Fe e áreas do entorno, com tipos diversos de vegetação, em Sabará, Minas Gerais, Brasil. No presente estudo, é possível que a introdução das plantas tenha estimulado a esporulação dos FMA, considerando que estes micro-organismos são biotróficos

obrigatórios, necessitando dos hospedeiros vegetais para completarem o ciclo de vida (CARNEIRO et al., 2012; BORGES et al., 2014).

Em geral, registrou-se mais glomerosporos na estação seca do que na chuvosa. De acordo com Melloni et al. (2016), alta densidade de esporos pode estar relacionada às condições de estresse de áreas degradadas, que favorecem o aumento da propagação dos FMA, para a perpetuação da espécie. Assim, a condição de estresse hídrico na estação seca pode ter sido determinante para o aumento da densidade de glomerosporos nesta estação.

Em ambas as estações, a colonização micorrízica foi superior nas áreas cultivadas, o que era esperado considerando a necessidade da associação para os fungos e maior presença de hospedeiros nessas áreas. A maior parte dos percentuais de colonização foi superior a 50 %, demonstrando a presença de plantas com alto grau de colonização e, possivelmente, dependentes da associação micorrízica (MELLONI et al., 2016).

Trabalhando com revegetação de fazendas fotovoltaicas na Espanha, Ormeño et al. (2016) introduziram plantas previamente inoculadas com *Rhizophagus irregularis* (antes *Glomus intraradices*) e verificaram valores de colonização variando entre 30 e 90%. No presente estudo, não houve prévia inoculação e os FMA, naturalmente presentes no solo, também promoveram percentuais elevados de colonização, alguns próximos a 90%, como no consórcio de Atriplex com Leucena (85,08%), demonstrando o potencial dos FMA da área experimental, contribuindo no estabelecimento das plantas em planos de revegetação.

A colonização radicular por FMA foi superior na estação chuvosa. Resultado semelhante foi encontrado por Urcoviche et al. (2014), em trabalho comparando a micorrização de plantas medicinais e condimentares em diferentes estações climáticas. Alguns fatores podem afetar a colonização radicular pelos FMA, a exemplo da temperatura e da umidade, assim como o próprio estado nutricional das plantas (SMITH; READ, 2008), o que também pode explicar maior percentual de colonização nos cultivos isolados, na estação seca, e nos consórcios, na estação chuvosa. Radhika e Rodrigues (2010) sugerem que por estar presente em todas as estações, a colonização radicular remete a uma dependência da planta aos FMA ao longo do ano.

A presença de associação micorrízica em *A. nummularia* foi confirmada, embora plantas da família Chenopodiaceae tenham sido consideradas tipicamente

não-micorrízicas (SMITH; READ, 2008). Este é o primeiro relato da micorrização de *A. nummularia* no Brasil; referências iniciais a esta associação foram feitas por Asghari et al. (2005), em um experimento na Austrália, e por Plenchette e Duponnois (2005), em um experimento em casa de vegetação, na França. Becerra et al. (2014) mencionaram a presença de FMA em quatro espécies de Chenopodiaceae, entre as quais *Atriplex argentina*, com valores de colonização inferiores a 50%.

Tal como registrado na esporulação, o cultivo do solo também favoreceu a produção de GFE. Esta glicoproteína é relacionada à estabilidade de agregados e ao C e N do solo (WRIGHT et al., 2007); desta forma, a sua presença/aumento auxilia na restauração de áreas degradadas (SILVA et al., 2014). Os valores de GFE foram baixos quando comparados ao registrado em outros trabalhos (SILVA et al., 2012, 2014); no entanto, foi constatado o aumento no solo, mesmo no início (dois anos) do processo de revegetação. Evidencia-se a importância do estabelecimento das plantas e dos FMA para a recuperação das áreas, considerando que a glomalina pode contribuir de maneira significativa para a restauração de solos degradados, por meio do armazenamento, em longo prazo, de carbono e nitrogênio, além de atuar como ligante orgânico, ajudando na formação de agregados (YANG et al., 2017).

4.4.3 Análise da estrutura da comunidade microbiana do solo por perfis de ésteres metílicos de ácidos graxos (*fatty acid methyl ester*, FAMES)

Os biomarcadores de ácidos graxos podem revelar mudanças na estrutura da microbiota do solo, como observado neste trabalho. Na estação seca, a concentração de FAMES total seguiu uma sequência, sendo os grupos não específicos > total de bactérias > fungos. Na estação chuvosa, a sequência foi o total de bactérias > não específicos > fungos. Os lipídeos que se encontram no solo são diversificados e oriundos de plantas, animais e micro-organismos (JEANNOTTE et al., 2008). Assim, as concentrações de biomarcadores relacionados a grupos não específicos podem estar relacionadas a ácidos graxos ainda não identificados pela técnica de FAMES, alterando as sequências observadas.

A presença de fungos e bactérias na microbiota do solo está intimamente relacionada ao processo de decomposição e à ciclagem de carbono e nutrientes, e esses organismos são sensíveis a condições microclimáticas e modificações ambientais (RODRIGUES et al. 2011; FRAGA et al., 2012). A população de fungos foi

a menor entre as demais, tanto no cultivo das plantas, como na área testemunha, em ambas as estações, o que pode ter sido ocasionado pela influência negativa da degradação do solo, enquanto as bactérias apresentaram maior biomassa. De acordo com Xun et al. (2015), as bactérias são mais resistentes por possuírem diversas estratégias para se adaptar a um novo ambiente.

A maior biomassa microbiana encontrada na área testemunha pode estar relacionada a adaptação da microbiota as plantas espontâneas que crescem pontualmente na área, assim, com a introdução de espécies que não ocorriam no local houve uma perturbação, diminuindo a população microbiana nas áreas cultivadas (COATS; RUMPHO, 2014). O tipo de espécie vegetal influencia a estrutura microbiana do solo, por promover modificações em características como temperatura, umidade, aeração, pH e nutrientes do solo (RECH et al., 2013; CAO et al., 2017). Assim, a redução em alguns componentes da microbiota na área cultivada, pode ter ocorrido em razão da presença de substâncias inibidoras do crescimento microbiano presentes na serrapilheira (ALVES et al., 2011) e/ou à sua composição (ZENG et al., 2017). No entanto, na estação seca, os tratamentos com os cultivos isolados de Sabiá e de *Atriplex* tiveram maiores valores de biomassa microbiana que os demais tratamentos, possivelmente devido ao incremento de nutrientes pelo tipo de matéria orgânica (ZENG et al., 2017).

Outro fator que pode explicar a redução da microbiota é a maior relação F/B na área testemunha, em ambas as estações. De acordo com de Vries e Shade (2013), maior relação F/B indica a prevalência de estrategistas K na comunidade, que aumentam a resistência da estrutura da comunidade microbiana mas, em contrapartida, podem diminuir a resiliência do ambiente. Na área testemunha a relação Gram+/Gram- também foi maior, segundo os mesmos autores isso também pode indicar a prevalência de estrategistas K nessa comunidade. Desta forma, a recuperação da microbiota de áreas degradadas pode se tornar mais difícil e lenta.

4.4.4 Análise multivariada

A PCA foi eficiente em separar os tratamentos, demonstrado que as espécies vegetais promoveram alterações nos atributos do solo, como verificado em diversos trabalhos (NADAL-ROMERO et al., 2016; QU et al., 2016; GRAZZIOTTI et al., 2017). A análise multivariada também foi usada para selecionar e classificar os atributos do

solo mais importantes na detecção das diferenças entre os tratamentos, e em geral, a variável mais importante é identificada pelo valor modular do coeficiente de correlação com o CP (NOTARO et al., 2014). Assim, foi observada variação entre os atributos mais importantes de acordo com a estação, demonstrando que as propriedades biológicas/microbiológicas são mais sensíveis na detecção de alterações no solo sob revegetação, como observado por Graziotti et al. (2017). Os atributos relacionados aos FMA também foram eficientes em demonstrar que as áreas cultivadas diferem da área sem cultivo, como igualmente mencionado por Carneiro et al. (2012), e mostram a importância da vegetação para garantir as associações benéficas planta/fungo.

Na estação chuvosa, a área testemunha ficou separada das demais, mostrando a contribuição do tempo de revegetação, promovida pela introdução dos cultivos. De acordo com Stefanoski et al. (2013), alguns dos componentes do solo requerem períodos de tempo prolongados para serem restaurados; desta forma, as interações plantas/solo estavam mais pronunciadas na segunda coleta (estação chuvosa), realizada 30 meses após o transplante.

Os resultados deste trabalho indicam que a introdução das plantas foi eficiente para promover melhoria em diversos atributos biológicos do solo degradado. Mas, para que a revegetação de fato restaure a qualidade do solo são necessários estudos a longo prazo, com acompanhamento constante das modificações nas propriedades do solo, bem como na sua microbiota.

4.5 CONCLUSÃO

A revegetação possibilita aumentos no teor do CBM e redução na RBS e o qCO_2 .

A maior eficiência metabólica e maior sustentabilidade dos micro-organismos no ambiente do solo é representada pelo maior $qMIC$ das áreas cultivadas.

A estação do ano, seca ou chuvosa, influencia diversos atributos do solo.

Ambos os cultivos, isolado ou consórcio, trazem benefícios aos atributos biológicos do solo.

Os atributos relacionados aos FMA são eficientes para identificar alterações promovidas pelas plantas no solo.

Atriplex nummularia, espécie típica de ambientes salinos, é colonizada por FMA.

A técnica de FAMES é eficiente em determinar alterações na estrutura da comunidade microbiana do solo.

A análise de PCA validou a influência das plantas sobre os atributos biológicos/microbiológicos do solo.

A revegetação promove modificações benéficas no solo e na microbiota associada e é indispensável para garantir a recuperação de ambientes degradados.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. DE M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 22, n. 6, 711–728, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>>.

ALVES, T. L. B.; AZEVEDO, P. V. de; CÂNDIDO, G. A. Indicadores socioeconômicos e a desertificação no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba. **Ambiente e Sociedade**, São Paulo, v. 2, p. 19-40, 2017.

ALVES, T. S.; CAMPOS, L. L.; NETO, N. E.; MATSUOKA, M.; LOUREIRO, M. F. Biomassa e atividade microbiana de solo sob vegetação nativa e diferentes sistemas de manejos. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 2, p. 341-347, 2011.

AN, S.; HUANG, Y.; ZHENG, F. Evaluation of soil microbial indices along a revegetation chronosequence in grassland soils on the Loess Plateau, Northwest China. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 41, p. 286–292, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.12.001>>.

ANDERSON, T. H. Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 98, p. 285–293, 2003.

APAC. **Monitoramento pluviométrico em Pernambuco**. Agência Pernambucana de Águas e Clima, Recife. Disponível em: <<http://www.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php#>>. Acesso em 25 de janeiro de 2018.

ASGHARI, H. R.; MARSCHNER, P.; SMITH, S. E.; SMITH, F. A. Growth response of *Atriplex nummularia* to inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi at different salinity levels. **Plant and Soil**, Berlin, v. 273, p. 245–256, 2005.

BAZIHIZINA, N.; COLMER, T.D.; BARRETT-LENNARD, E.G. Response to non-uniform salinity in the root zone of the halophyte *Atriplex nummularia*: growth, photosynthesis, water relations and tissue ion concentrations. **Annals of Botany**, London, v. 104, p. 737–745, 2009.

- BECERRA, A.; BARTOLONI, N.; COFRÉ, N.; SOTERAS, F.; CABELLO, M. Arbuscular mycorrhizal fungi in saline soils: vertical distribution at different soil depth. **Brazilian Journal of Microbiology**, São Paulo, v. 45, n. 2, p. 585-594, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1517-83822014000200029>>.
- BLAUD, A.; LERCH, T.Z.; CHEVALLIER, T.; NUNAN, N.; CHENU, C.; BRAUMAN, A. Dynamics of bacterial communities in relation to soil aggregate formation during the decomposition of ¹³C-labelled rice straw. **Applied Soil Ecology**, Netherlands, v. 53, n. 1, p. 1-9, 2012.
- BORGES, W. L.; NOVAIS, C. B. de; SAGGIN JÚNIOR, O. J.; PRIN, Y.; LE ROUX, C.; DUCOUSSO, M.; FARIA, S. M. de; Arbuscular mycorrhizal fungi diversity in revegetated areas after bauxite mining. **African Journal of Microbiology Research**, v. 8, n. 28, 2733-2738, 2014.
- BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantification of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, Amsterdam, The Netherlands, v. 72, p. 248-254, 1976.
- BRADLEY, K.; DRIJBER, R. A.; KNOPS, J. Increased N availability in grassland soils modifies their microbial communities and decreases the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v. 38, n. 7, p. 1583-1595, 2006.
- CAO, C.; ZHANG, Y.; CUI, Z.; FENG, S.; WANG, T.; REN, Q. Soil bacterial community responses to revegetation of moving sand dune in semi-arid grassland. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 101, n. 15, p. 6217-6228, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s00253-017-8336-z>>.
- CARNEIRO, R. F. V.; CARDOZO JÚNIOR, F. M.; PEREIRA, L. F.; ARAÚJO, A. S. F.; SILVA, G. A. Fungos micorrízicos arbusculares como indicadores da recuperação de áreas degradadas no Nordeste do Brasil. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, n. 4, 648-657, 2012.
- CARVALHO, P. E. R. Sabiá: *Mimosa caesalpiniiifolia*. **Embrapa**, Colombo, Circular Técnica 135, p. 1-10, 2007.
- COATS, V. C.; RUMPHO, M. E. The rhizosphere microbiota of plant invaders: an overview of recent advances in the microbiomics of invasive plants. **Frontiers in Microbiology**, Lausanne, 5, 368, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00368>>.
- DE VRIES, F. T.; SHADE, A. Controls on soil microbial community stability under climate change. **Frontiers in Microbiology**, Lausanne, 4, 265, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fmicb.2013.00265>>.

DUPONNOIS, R.; RAMANANKIERANA, H.; HAFIDI, M.; BAOHANTA, R.; BAUDOIN, E.; THIOULOUSE, J.; SANGUIN, H.; BÂ, A.; GALIANA, A.; BALLY, R.; LEBRUN, M.; PRIN, Y. Des ressources végétales endémiques pour optimiser durablement les opérations de réhabilitation du couvert forestier en milieu méditerranéen et tropical: exemple des plantes facilitatrices vectrices de propagation des champignons mycorrhiziens. **Comptes Rendus Biologies**, Paris, v. 336, n. 5,6, p. 265-272, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.crv.2013.04.015>>.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. Brasília: EMBRAPA, 2017. 573 p.

FAO; ITPS. **Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report**. Roma, 2015. 608 p.

FERREIRA, E. P. B.; STONE, L. F.; MARTIN-DIDONET, C. C. G. População e atividade microbiana do solo em sistema agroecológico de produção. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 48, n. 1, p. 22-31, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5935/1806-6690.20170003>>.

FRAGA, M. E.; BRAZ, D. M.; ROCHA, J. F.; PEREIRA, M. G.; FIGUEIREDO, D. V. Interação microrganismo, solo e flora como condutores da diversidade na Mata Atlântica. **Acta Botanica Brasilica**, Belo Horizonte, v. 26, n. 4, p. 857-865, 2012.

FREIRE, A. L. de O.; RODRIGUES, T. de J. D. A salinidade do solo e seus reflexos no crescimento, nodulação e teores de N, K e Na em leucena (*Leucaena leucocephala* (Lam.) De Vit.). **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, Espírito Santo do Pinhal, v. 6, n. 2, p. 163-173, 2009.

FREIRE, S. V.; MARTINEZ, C. P.; PORTO, E. R.; OLIVEIRA, B. R. B.; MAIA, L. C. Atividade microbiana em solo do Semi-Árido sob cultivo de *Atriplex nummularia*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 8, p. 757-762, 2004.

FROSTEGÅRD, A.; TUNLID, A.; BAATH, E. Use and misuse of PLFA measurements in soils. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v. 43, n. 8, p. 1621-1625, 2011.

GERDEMANN, J. W.; NICOLSON, T. H. Spores of mycorrhizal endogon e species extracted from soil by wet sieving and decanting. **Transactions of the British Mycological Society**, London, v. 46, p. 235-244, 1963.

GIOVANNETTI, M.; MOSSE, B. An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. **New Phytologist**, London, v. 84, p. 489-500, 1980.

GRAZZIOTTI, D.; GRAZZIOTTI, P.; RAGONEZI, C.; SILVA, A.; PEREIRA, I.; SILVA, E. Microbiological attributes of soil under spontaneous restoration. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 24, e20160069, 2017. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.006916>>.

HAMILTON, C. E.; BEVER, J. D.; LABBÉ, J.; YANG, X.; YIN, H. Mitigating climate change through managing constructed-microbial communities in agriculture. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, New York, v. 216, p. 304-308, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.10.006>>.

HERNANI, L. C. **Perdas de nutrientes e matéria orgânica por erosão: dez anos de pesquisa**. Embrapa Agropecuária Oeste. 1999. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/COL+2+19992_000g8ug3dz402wx5ok0u5nfpmqgu29dn.pdf>. Acesso em 03 de março de 2018.

INSAM, H.; DOMSCH, K. H. Relationship between soil organic carbon and microbial biomass on chronosequences of reclamation sites. **Microbial Ecology**, New York, v. 15, p. 177-188, 1988.

JANGID, K.; WILLIAMS, M. A.; FRANZLUEBBERS, A. J.; SCHMIDT, T. M.; COLEMAN, D. C.; WHITMAN, W. B. Land-use history has a stronger impact on soil microbial community composition than aboveground vegetation and soil properties. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v. 43, n. 10, p. 2184-2193, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.06.022>>.

JEANNOTTE, R.; HAMEL, C.; JABAJI, S.; WHALEN, J.K. Comparison of solvent mixtures for pressurized solvent extraction of soil fatty acid biomarkers. **Talanta**, Amsterdam, v. 77, p. 195-199, 2008.

JENKINS, W. R. A rapid centrifugal-flotation technique for separating nematodes from soil. **Plant Disease Reporter**, Beltsville, v. 48, n. 9, p. 692, 1964.

KEESSTRA, S. D.; BOUMA, J.; WALLINGA, J.; TITTONELL, P.; SMITH, P.; CERDÀ, A.; MONTANARELLA, L.; QUINTON, J.N.; PACHEPSKY, Y.; VAN DER PUTTEN, W. H.; BARDGETT, R. D.; MOOLENAAR, S.; MOL, G.; JANSEN, B.; FRESCO, L. O. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. **Soil**, Göttingen, v. 2, p. 111-128, 2016.

LEAL, I. G.; ACCIOLY, A. M. A.; NASCIMENTO, C. W. A.; FREIRE, M. B. G. dos S.; MONTENEGRO, A. A. A.; FERREIRA, F. L. Fitorremediação de solo salino sódico por *Atriplex nummularia* e gesso de jazida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3 p. 1065-1072, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000300015>>.

LINO, I. A. N.; DOS SANTOS, V. M.; ESCOBAR, I. E. C.; DA SILVA, D. K. A.; DE ARAÚJO, A. S. F.; MAIA, L. C. Soil enzymatic activity in *Eucalyptus grandis* plantations of different ages. **Land Degradation & Development**, Chichester, v. 27, p. 77-82, 2016.

MARTINS, C. M.; GALINDO, I. C. DE L.; SOUZA, E. R. DE; POROCA, H. A. Atributos químicos e microbianos do solo de áreas em processo de desertificação no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 6, p. 1883-1890, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000600012>>.

MEDEIROS, E. V.; DUDA, G. P.; SANTOS, L. A. R. DOS; LIMA, J. R. DE S.; ALMEIDA-CORTÊZ, J. S. DE; HAMMECKER, C.; LARDY, L.; COURNAC, L. Soil organic carbon, microbial biomass and enzyme activities responses to natural regeneration in a tropical dry region in Northeast Brazil. **Catena**, Amsterdam, v. 151, 137-146, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.12.012>>.

MELLONI, R.; FARIA, M. T.; CARNEIRO, L. de O.; FERREIRA, G. M. dos R.; MELLONI, E. G. P.; ALVARENGA, M. I. N. Propágulos e formação de micorriza em taludes de rodovia, no sul de Minas Gerais, Brasil. **Agrária**, São Paulo, v. 11, n. 1, p. 26-32, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v11i1a5356>>.

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

MERCANTE, F. M.; SILVA, R. F.; FRANCELINO, C. S. F.; CAVALHEIRO, J. C. T.; OTSUBO, A. A. Biomassa microbiana, em um Argissolo Vermelho, em diferentes coberturas vegetais, em área cultivada com mandioca. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 34, n. 4, p. 479-485, 2008.

MERILES, J. M.; VARGAS GIL, S.; CONFORTO, C.; FIGONI, G.; LOVERA, E.; MARCH, G. J.; GUZMÁN, C. A. Soil microbial communities under different soybean cropping systems: Characterization of microbial population dynamics, soil microbial activity, microbial biomass, and fatty acid profiles. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, n. 2, p. 271-281, 2009.

MMA. **Convenção das Nações Unidas de combate à desertificação**. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos, 2004. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/sedr_desertif/_arquivos/unccd_portugues.pdf>. Acesso em 15 de março de 2018.

MMA. **Relatório Técnico Nacional de Implementação da UNCCD**. Brasília: IICA, 2013. Disponível em: <<http://www.iicabr.iica.org.br/wp-content/uploads/2014/03/Produto-3-e-Folha-de-Rosto-Vers%C3%A3o-Final-J%C3%Balio-Paupitz.pdf>>. Acesso em 08 de março de 2018.

MONTENEGRO, A. A. de A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MARINHO, I.; SILVA, V. de P.; ANDRADE, A.; SILVA, J.G. da. Uso de água subterrânea salina em halófitas no semiárido nordestino. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 2, p. 75–84, 2003.

NADAL-ROMERO, E.; CAMMERAAT, E.; PÉREZ-CARDIEL, E.; LASANTA, T. Effects of secondary succession and afforestation practices on soil properties after cropland abandonment in humid Mediterranean mountain areas. **Agricultural and Forest Entomology**, Oxford, v. 228, p. 91-100, 2016.

NEVES, B. P. das; OLIVEIRA, I. P. de; NOGUEIRA, J. C. M. Cultivo e Utilização do Nim Indiano. **Embrapa**, Goiás, Circular técnica 62, p. 1-12, 2003.

NICHOLS, K. A.; WRIGHT, S.F. Comparison of glomalin and humic acid ineight native U.S. soils. **USDA-ARS/UNL Faculty**, Lincoln, v. 170, n. 12, p. 985-997, 2005.

NOGUEIRA, N. O.; OLIVEIRA, O. M.; MARTINS, C. A. da S.; BERNARDES, C. de O. Utilização de leguminosas para recuperação de áreas degradadas. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 8, n. 14, p. 2121–2131, 2012.

NOTARO, K. A.; MEDEIROS, E. V.; DUDA, G. P.; SILVA, A. O.; MOURA, P. M. Agroforestry systems, nutrients in litter and microbial activity in soils cultivated with coffee at high altitude. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 71, p. 87–95, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162014000200001>>.

NUNES, J. C.; CAVALCANTE, L. F.; LIMA NETO, A. J. de; REBEQUI, A. M.; DINIZ, B. L. M. T.; GHEYI, H. R. Comportamento de mudas de nim à salinidade da água em solo não salino com biofertilizante. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 11, p. 1152–1158, 2012.

OLIVEIRA, A. P. G.; MARCÍLIO, G. S.; MENDES, D. F.; SOUZA, T. da S. de; AMARAL, A. A. do. Revegetação, remediação e uso de geotécnicas para recuperação de ambientes degradados. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 11, n. 22, p. 212–225, 2015.

OLIVEIRA, J. R. A.; MENDES, I. C.; VIVALDI, L. Microbial biomass carbon in native and cultivated Cerrado soils: a comparison of the fumigation incubation and fumigation extraction methods. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 863–871, 2001.

ORMEÑO, M. S.; HERVÁS, S.; AMORÓS, J. Á.; NAVARRO, F. J. G.; GALLEGU, J. C.; PÉREZ-DE-LOS-REYES, C. Soil protection in solar photovoltaic farms by revegetation with mycorrhizal native species. **Soil Research**, Collingwood, v. 54, n. 2, p. 237–241, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1071/SR15026>>.

PAZ-FERREIRO, J.; FU, S. Biological indices for soil quality evaluation: perspective and limitations. **Land Degradation & Development**, Chichester, v. 27, p. 14–25, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/ldr.2262>>.

PEDONE-BONFIM, M. V. L.; SILVA, D. K. A.; MAIA, L. C.; YANO-MELO, A. M. Mycorrhizal benefits on native plants of the Caatinga, a Brazilian dry tropical forest. **Symbiosis**, Boston, 74, 79–88. 2018.

PEREIRA, J. S.; RODRIGUES, S. C. Crescimento de espécies arbóreas utilizadas na recuperação de área degradada. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 13, n. 41, p. 102–110, 2012.

PHILLIPS, J. M.; HAYMAN, D. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular arbuscular fungi for rapid assessment of infection. **Transactions of the British Mycological Society**, London, v. 55, p. 158–161, 1970.

PLENCHETTE, C.; DUPONNOIS, R. Growth response of the saltbush *Atriplex nummularia* L. to inoculation with the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices*. **Journal of Arid Environments**, London, v. 61, p. 535–540, 2005.

QU, L.; HUANG, Y.; MA, K.; ZHANG, Y.; BIERE, A. Effects of plant cover on properties of rhizosphere and inter-plant soil in a semiarid valley, SW China. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v. 94, p. 1-9, 2016.

RADHIKA, K. P.; RODRIGUES, B. F. Arbuscular mycorrhizal fungal diversity in some commonly occurring medicinal plants of Western Ghats, Goa region. **Journal of Forestry Research**, Berlin, v. 21, p. 45–52, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11676-010-0007-1>>.

RECH, M.; PANSERA, M. R.; SARTORI, V. C.; RIBEIRO, R. T. da S. Microbiota do solo em vinhedos agroecológico e convencional e sob vegetação nativa em Caxias do Sul, RS. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Capão do Leão, v. 8, n. 3, p. 141-151, 2013.

RODRIGUES, H. J. B.; SÁ, L. D. A.; MARIA DE LOURDES PINHEIRO RUIVO, M. L. P.; COSTA, A. C. L.; SILVA, R. B.; MOURA, Q. L.; MELLO, I. F. Variabilidade quantitativa de população microbiana associada às condições microclimáticas observadas em solo de floresta tropical. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 26, n. 4, p. 629-638, 2011.

SANTANA, M.O. et al., organizador. **Atlas das áreas susceptíveis à desertificação do Brasil/MMA**. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos, Universidade Federal da Paraíba, 2007. 134 p.

SANTOS, J. V.; VARÓN-LÓPEZ, M.; SOARES, C. R. F. S.; LEAL, P. L.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. Biological attributes of rehabilitated soils contaminated with heavy metals. **Environmental Science and Pollution Research**, Berlin, v. 23, p. 6735-6748, 2016. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1007/s11356-015-5904-6>>.

SANTOS, M. A. dos. **Adaptabilidade e potencial fitorremediador de espécies vegetais em solo salino**. 2016. 128 f. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2016.

SCHUTTER, M. E.; DICK, R. P. Comparison of fatty acid methyl ester (FAME) methods for characterizing microbial communities. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, n. 5, p. 1659-1668, 2000.

SILVA, C. F. da; ARAÚJO, J. L. S. de; SILVA, E. M. R. da; PEREIRA, M. G.; SCHIAVO, J. A.; FREITAS, M. S. M. de; SAGGIN-JUNIOR, O. J.; MARTINS, M. A. Comunidade de fungos micorrízicos arbusculares: diversidade, composição e glomalina em área revegetada com sesbânia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38 n. 2, p. 423-431, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000200007>>.

SILVA, C. F. da; LOSS, A.; CARMO, É. R. do; PEREIRA, M. G.; SILVA, E. M. R. da; MARTINS, M. A. Fertilidade do solo e substâncias húmicas em área de cava de extração de argila revegetada com eucalipto e leguminosas no Norte Fluminense. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 3, p. 547-561, 2015.

SILVA, C. F. da; SIMÕES-ARAÚJO, J. L.; SILVA, E. M. R. da; PEREIRA, M. G.; FREITAS, M. S. M.; SAGGIN JÚNIOR, O. J.; MARTINS, M.A. Fungos micorrízicos arbusculares e proteína do solo relacionada à glomalina em área degradada por extração de argila e revegetada com eucalipto e acácia. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 4, p. 749-761, 2012.

SILVA, F. B. R. e; SANTOS, J. C. P. dos; SILVA, A. B. da; CAVALCANTI, A. C.; SILVA, F. H. B. da; BURGOS, N.; PARAHYBA, R. da B. V.; OLIVEIRA NETO, M. B. de; SOUSA NETO, N. C. de; ARAÚJO FILHO, J. C. de; LOPES, O. F.; LUZ, L. R. Q. P. da; LEITE, A. P.; SOUSA, L. de G. M. C.; SILVA, C. P. da; VAREJÃO-SILVA, M. A.; BARROS, A. H. C. **Zoneamento agroecológico do Estado de Pernambuco**. Governo do Estado de Pernambuco, Recife: Secretaria de Produção Rural e Reforma Agrária, Recife/Embrapa Solos – UEP Recife, 2001. (Embrapa Solos. Documentos, 35). 1 CD-ROM.

SMITH, S. E.; READ, D. J. **Mycorrhizal symbiosis**. New York: Academic Press, 2008. 815p.

SOUZA, E. R. de; FREIRE, M. B. G. dos S.; NASCIMENTO, C. W. A. do, MONTENEGRO, A. A. de A., FREIRE, F. J.; MELO, H. F. de. Fitoextração de sais pela *Atriplex nummularia* Lindl. sob estresse hídrico em solo salino sódico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 5, p. 477-483, 2011.

SOUZA, L. H.; NOVAIS, R. F.; VENEGAS, V. H. A.; VILLANI, E. M. de A. Efeito do pH do solo rizosférico e não rizosférico de plantas de soja inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* na absorção de boro, cobre, ferro, manganês e zinco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1641-1652, 2010.

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 12, p. 1301-1309, 2013.

STEFANOWICZ, A. M.; KAPUSTA, P.; SZAREK-ŁUKASZEWSKA, G.; GRODZIŃSKA, K.; NIKLIŃSKA, M.; VOGT, R. V. Soil fertility and plant diversity enhance microbial performance in metal-polluted soils. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, 439, 211–219, 2012.

STILES, W. A. V.; ROWE, E. C.; DENNIS, P. Nitrogen and phosphorus enrichment effects on CO₂ and methane fluxes from an upland ecosystem. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 618, p. 1199-1209, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.202>>.

STOTZKY, G.; NORMAN, A. G. Factors limiting microbial activities in soil. **Archives of Microbiology**, Berlin, v. 40, p. 341-369, 1961.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**, 5rd edition. São Paulo: Artmed, 2013. 918 p.

- TEFERI, E.; BEWKET, W.; SIMANE, B. Effects of land use and land cover on selected soil quality indicators in the headwater area of the Blue Nile basin of Ethiopia. **Environmental Monitoring and Assessment**, Dordrecht, v. 188, n. 83, p. 1-12, 2016. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1007/s10661-015-5086-1>>.
- TEIXEIRA, A. F. dos S.; KEMMELMEIER, K.; MARASCALCHI, M. N.; STÜRMER, S. L.; CARNEIRO, M. A. C.; MOREIRA, F. M. de S. Arbuscular mycorrhizal fungal communities in an iron mining area and its surroundings: Inoculum potential, density, and diversity of spores related to soil properties. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 41, n. 5, p. 511-525, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/1413-70542017415014617>>.
- URCOVICHE, R. C.; CASTELLI, M.; GIMENES, R. M. T.; ALBERTON, O. Spore density and diversity of Arbuscular mycorrhizal fungi in medicinal and seasoning plants. **African Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 16, 1244-1251, 2014.
- VAN HALL, R. L.; CAMMERAAT, L. H.; KEESSTRA, S. D.; ZORN, M. Impact of secondary vegetation succession on soil quality in a humid Mediterranean landscape. **Catena**, Amsterdam, v. 149, p. 836-843, 2017.
- VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v. 19, p. 703-707, 1987.
- VIMAL, S. R.; SINGH, J. S.; ARORA, N. K.; SINGH, S. Soil-plant-microbe interactions in stressed agriculture management: A review. **Pedosphere**, Beijing, v. 27, n. 2, p. 177-192, 2017. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60309-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60309-6)>.
- WRIGHT, S. F.; GREEN, V. S.; CAVIGELLI, M. A. Glomalinin aggregate size classes from three different farming systems. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 94, p. 546-549. 2007.
- WRIGHT, S. F.; UPADHYAYA, A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. **Plant and Soil**, Berlin, v. 198, p. 97-107, 1998.
- XIAO, L.; LIU, G.; XUE, S.; ZHANG, C. Soil microbial community composition during natural recovery in the Loess Plateau, China. **Journal of Integrative Agriculture**, Beijing, v. 12, n. 10, p. 1872-1883, 2013. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60399-8](http://dx.doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60399-8)>.
- XUN, W.; HUANG, T.; ZHAO, J.; RAN, W.; WANG, B.; ZHANG, R. Environmental conditions rather than microbial inoculum composition determine the bacterial composition, microbial biomass and enzymatic activity of reconstructed soil microbial communities. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v. 90, p. 10-18, 2015.
- YANG, N.; ZOU, D.; YANG, M.; LIN, Z. Variations in soil microbial biomass carbon and soil dissolved organic carbon in the revegetation of hilly slopes with purple soil. **PLoS ONE**, San Francisco, v. 11, n. 12, e0166536, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0166536>>.

YANG, Y.; HE, C.; HUANG, L.; BAN, Y.; TANG, M. The effects of arbuscular mycorrhizal fungi on glomalin-related soil protein distribution, aggregate stability and their relationships with soil properties at different soil depths in lead-zinc contaminated area. **PLoS ONE**, San Francisco, v. 12, n. 8, e0182264, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182264>>.

ZENG, Q.; LIU, Y.; AN, S. Impact of litter quantity on the soil bacteria community during the decomposition of *Quercus wutaishanica* litter. **PeerJ**, Corte Madera, v. 5, e3777, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.7717/peerj.3777>>.

ZHANG, C.; HUANG, L.; LUAN, T.; JIN, J.; LAN, C. Structure and function of microbial communities during the early stages of revegetation of barren soils in the vicinity of a Pb/Zn Smelter. **Geoderma**, Amsterdam, v. 136, p. 555-565. 2006. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.04.011>>.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho comprovou que, apesar do curto tempo de observação das plantas em campo para experimentos de revegetação com espécies de grande porte, os resultados observados no período chuvoso permitem afirmar que a regeneração da área foi iniciada. Melhorias em atributos físicos, químicos e biológicos podem ser atribuídas aos tratamentos aplicados.

O cultivo de plantas consorciadas possibilitou efeitos mais visíveis nas diversas propriedades avaliadas, possivelmente pela melhor distribuição da malha de raízes no perfil do solo. É possível que o cultivo conjunto de várias espécies seja capaz de promover resultados mais consistentes em estudos futuros.

Fica evidente que os micro-organismos, como os FMA, desempenham papel fundamental em processos de recuperação de áreas degradadas e que as espécies vegetais modificam a microbiota do solo e suas características.

Estudos dessa natureza devem ser mantidos em campo por períodos mais longos de tempo para que os efeitos sejam mais significativos e tenham sua efetividade comprovada em vários ciclos de estresse hídrico nos períodos de seca prolongada.

Também propomos um manejo de revegetação com plantas de Atriplex, onde estas devem ser usadas em solos salinos e/ou sódicos. Assim que estas características forem recuperadas, as plantas devem ser retiradas do sistema a fim de que outras espécies sejam introduzidas.