



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE DO PARANÁ

CAMPUS LUIZ MENEGHEL - BANDEIRANTES

CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

RAQUEL ZANHOLO DA SILVA

FITORREMEDIAÇÃO DE SOLOS SALINIZADOS

BANDEIRANTES, PR, BRASIL

2016

RAQUEL ZANHOLO DA SILVA

FITORREMEDIAÇÃO DE SOLOS SALINIZADOS

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Agronomia, da Universidade Estadual do Norte do Paraná, *Campus* Luiz Meneghel - Bandeirantes.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Ana Maria Conte

BANDEIRANTES, PR, BRASIL

2016

Catálogo na publicação elaborada pela Biblioteca Central do Campus
Luiz Meneghel da Universidade Estadual do Norte do Paraná.

Silva, Raquel Zanholo da

S586f

Fitorremediação de solos salinizados / Raquel Zanholo
da Silva. Bandeirantes, 2016.
46f. ilust.

Orientadora: Ana Maria Conte

Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade
Estadual do Norte do Paraná, *Campus* Luiz Meneghel, 2016.

Banca: Dra. Ana Maria Conte, Dr. Fabio Augusto Manetti, Dr.
Claudinei Paulo de Lima (suplente), Dr. Francisco Carlos Mainardes
da Silva (suplente).

1. Estufa agrícola. 2. Fertirrigação. 3. Poluição do solo. 4. Remediação
de solos. 5. Salinidade. 6. Vinhoto. I. Universidade Estadual do
Norte do Paraná. III. Título.

RAQUEL ZANHOLO DA SILVA

FITORREMEDIAÇÃO DE SOLOS SALINIZADOS

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Agronomia, da Universidade Estadual do Norte do Paraná, *Campus* Luiz Meneghel - Bandeirantes.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Ana Maria Conte

Aprovada em: 30/11/2016

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof ^a . Dr ^a . Ana Maria Conte	UENP
Prof. Dr. Fabio Augusto Manetti	FIO
Prof. Dr. Luis Guilherme Sachs	UENP
Prof. Dr. Claudinei Paulo de Lima	FIO
Prof. Dr. Francisco Carlos Mainardes da Silva	UENP

Prof^a. Dr^a. Ana Maria Conte
Orientadora
Universidade Estadual do Norte do Paraná,
Campus Luiz Meneghel - Bandeirantes

DEDICATÓRIA

A Deus,

Aos meus familiares,

Minha mãe Ana (in memoriam)

Aos meus filhos Marlon, Érico e Angelo

Que tiveram paciência comigo nas horas difíceis,

Que me aconselharam,

Deram força,

Amor,

E me apoiaram incondicionalmente...

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela vida e pelo amor. À minha família, por todo amor, e compreensão.

À minha orientadora Prof^a. Dr^a. Ana Maria Conte, pela constante orientação neste trabalho, pelo apoio, paciência, compreensão e valiosos conselhos. Hoje posso dizer que tenho mais uma grande amiga na minha vida.

Aos professores da UENP - *campus* Luiz Meneghel - Bandeirantes, responsáveis por minha formação profissional e ética, tanto na graduação como na pós-graduação. Seus ensinamentos valeram muito para que eu pudesse chegar a esse momento.

Aos membros componentes da banca examinadora, pela avaliação do trabalho, sugestões e contribuições.

Aos técnicos do laboratório de solos Gilberto Bueno Demétrio e Esmeralda Soares Garcia. À secretária da pós-graduação Sônia Regina Torres Fronteli e sua estagiária Mariany Gonçalves.

À CAPES-Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela cessão de bolsa.

A todos os funcionários amigos da UENP-CLM.

Aos colegas da Pós-graduação.

Aos amigos do laboratório de solos e aos demais não mencionados. Obrigado pela ajuda e amizade.

Ao Sr. João Henrique Castellar, do sítio São José/Bandeirantes por ceder solo para realizar o experimento de cultivo protegido, e também à USIBAN – Usina Bandeirantes de Açúcar e Álcool por ceder solo de área de cultivo de cana-de-açúcar.

À Prefeitura Municipal de Bandeirantes e à Sanepar-Cornélio Procópio que auxiliaram respectivamente com máquinas e material para os vasos.

Enfim a todos que de alguma forma contribuíram para a realização do meu trabalho.

MUITO OBRIGADA!!

Silva, Raquel Zanholo da. **FITORREMEDIAÇÃO DE SOLOS SALINIZADOS**. 2016. 46p. Dissertação de Mestrado em Agronomia - Universidade Estadual do Norte do Paraná, *Campus* Luiz Meneghel, Bandeirantes, 2016.

RESUMO:

O processo de remediação de solos contaminados se refere à redução dos teores de contaminantes a níveis seguros e compatíveis com a proteção à saúde humana e ambiental, podendo ser de forma física, química ou biológica, onde a fitorremediação trata da utilização de plantas para tal finalidade. Com o objetivo de avaliar a qualidade química do solo após utilização da técnica de fitorremediação, foram realizados dois experimentos em cultivo protegido na área da Fazenda Escola Professor Eduardo Meneghel Rando, do *Campus* Luiz Meneghel, da Universidade Estadual do Norte do Paraná, no município de Bandeirantes/PR e avaliados pelo delineamento estatístico em blocos casualizados em esquema fatorial de parcelas subdivididas, onde a parcela principal foi a época 0, 30, 45 e 60 dias após emergência da cultura e a parcela secundária os tratamentos realizados. O primeiro experimento foi instalado em vasos com capacidade de 12,6 L, preenchidos com solo coletado em duas profundidades 0-20 e 20-40 cm, na USIBAN-Usina de Açúcar e Álcool Bandeirantes S/A, do município de Bandeirantes/PR, e avaliado inicialmente para as características químicas de rotina. O delineamento estatístico foi em blocos casualizados com 6 tratamentos e 3 repetições: T1- crotalaria, T2- mucuna anã, T3-milheto, T4-milho, T5-feijão de porco e T6-feijão comum. Através de análise destrutiva o solo foi avaliado de 0-20 cm e 20-40 cm, para análise de rotina dos parâmetros químicos do solo, inicialmente e aos 30, 45 e 60 dias após a emergência (DAE) das culturas. O segundo experimento foi instalado em vasos com capacidade de 5 L, preenchidos com solo proveniente de uma estufa de cultivo de pimentão, no município de Bandeirantes/PR, coletados na profundidade de 0-20 cm, avaliados inicialmente para a condutividade elétrica e para as características químicas de rotina. O delineamento estatístico foi em blocos casualizados com 5 tratamentos e 4 repetições: T1- nabo forrageiro, T2-ervilha forrageira, T3-tremoço, T4-aveia branca e T5- sem cultivo (só irrigação). Através de análise destrutiva o solo foi avaliado de 0-20 cm, para condutividade elétrica e análise de rotina dos parâmetros químicos do solo, inicialmente e aos 30, 45 e 60 dias após a emergência (DAE) das culturas. Os resultados foram avaliados pelos softwares SASM-Agri,e ESTAT, no esquema de parcelas subdivididas e as médias significativas comparadas pelo teste de Tukey. Os resultados permitiram concluir que o cultivo de milho foi o tratamento que melhor remediou potássio até os 45 DAE em solos salinizados pela aplicação de vinhaça em ambas as profundidades estudadas. Quanto ao experimento conduzido em solo proveniente de ambiente protegido, a ervilha forrageira foi a espécie vegetal que proporcionou maior diminuição de fósforo, e o tempo de permanência de 30 dias DAE das culturas, foi suficiente, para diminuição desse elemento. O cultivo do nabo forrageiro foi o responsável pela menor condutividade elétrica e esta diminuiu ao longo do ciclo experimental.

Palavras-chave: Estufa agrícola, fertirrigação, poluição do solo, remediação de solos, salinidade, vinhoto.

Silva, Raquel Zanholo. PHYTOREMEDIATION OF SALINIZED SOILS. 2016. 46p. Dissertação de Mestrado em Agronomia - Universidade Estadual do Norte do Paraná, *Campus Luiz Meneghel*, Bandeirantes, 2016.

ABSTRACT

The remediation process of contaminated soils refers to the reduction of the levels of contaminants to levels that are safe and compatible with a protection for human and environmental health and can be of physical, chemical or biological form, where the fission of the use of plants for this purpose . In order to evaluate the chemical quality of the soil after the use of the phytoremediation technique, two experiments were carried out in protected cultivation in the area of Experimental Farm Teacher Eduardo Meneghel Rando, of *Campus Luiz Meneghel* of the State University of Northern Paraná, in the city of Bandeirantes / PR and evaluated by Randomized complete block design in a split - plot factorial scheme, where the main plot was 0, 30, 45 and 60 days after emergence of the crop and the secondary portion of the treatments. The first experiment was installed in pots with a capacity of 12.6 liters filled with soil collected at two depths 0-20 and 20-40 cm, at the USIBAN-Usina de Açúcar e Álcool Bandeirantes S / A, in the city of Bandeirantes / PR, and initially evaluated for routine chemical characteristics. The statistical design was randomized blocks with 6 treatments and 3 replicates: T1- *Crotalaria spectabilis*, T2-*Mucuna deeringiana*, T3-*Pennisetum americanum* (L.) Leeke, T4- *Zea mays* L., T5-*Canavalia ensiformis* and T6-*Phaseolus vulgaris* L. Through destructive analysis the soil was evaluated from 0-20 cm and 20-40 cm, for routine analysis of soil chemical parameters, initially and at 30, 45 and 60 days after emergence (DAE) of the crops. The second experiment was carried out in pots with a capacity of 5 L, filled with soil from a greenhouse in the municipality of Bandeirantes / PR, collected at 0-20 cm depth, initially evaluated for electrical conductivity and Routine chemical characteristics. The statistical design was randomized blocks with 5 treatments and 4 replicates: T1- *Raphanus sativus*, T2- *Pisum sativum* L. ssp. *Arvense*, T3-*Lupinus albus*, T4-*Avena sativa* and T5-uncultivated (only irrigated). Through destructive analysis the soil was evaluated from 0-20 cm, for electrical conductivity and routine analysis of soil chemical parameters, initially and at 30, 45 and 60 days after emergence (DAE) of the crops. The results were evaluated by the software SASM-Agri, and ESTAT, in the scheme of subdivided plots and the means compared by the Tukey test. The results allowed to conclude that the cultivation of *Pennisetum americanum* (L.) Leeke was the treatment that best remedied potassium up to 45 DAE in soils salinized by the application of vinasse and *Pisum sativum* L. ssp. *Arvense* was the vegetal species that provided greater decrease of phosphorus in soil of protected culture and at 30 DAE was the time that showed lower levels in the soil with all the treatments, that can be used to minimize the negative impacts of salinization of agricultural soils.

Key words: Fertigation, greenhouse, salinity, soil pollution, soil remediation, vinhoto.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 Conceitos gerais sobre fitorremediação de solos agrícolas.....	4
2.2 Fitorremediação de solos salinizados por vinhaça.....	7
2.3 Fitorremediação de solos em ambientes protegidos.....	9
3. ARTIGO A: FITORREMEDIAÇÃO DE SOLOS SALINIZADOS PELA APLICAÇÃO DE VINHACA.....	13
3.1 Resumo e Abstract.....	13
3.2 Introdução.....	14
3.3 Objetivos.....	15
3.4 Material e Métodos.....	15
3.5 Resultados e Discussão.....	19
3.6 Conclusões.....	27
4. ARTIGO B: FITORREMEDIACAO DE SOLOS SOB CULTIVO PROTEGIDO.....	28
4.1 Resumo e Abstract.....	28 - 29
4.2 Introdução.....	30
4.3 Objetivos	31
4.4 Material e Métodos.....	31
4.5 Resultados e Discussão.....	35
4.6 Conclusões.....	38
5. CONCLUSÕES GERAIS.....	39
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40

1.INTRODUÇÃO

A fitorremediação é o uso de plantas e comunidades microbianas associadas à rizosfera para degradar, isolar ou imobilizar contaminantes do solo e água. É uma técnica de custo relativamente baixo, vantagens estéticas e que não gera impactos adicionais (MARQUES et al., 2011).

A maioria dos estudos com plantas na recuperação de áreas contaminadas tem sido desenvolvida em países de clima temperado, onde o potencial da fitorremediação é limitado por fatores climáticos. No Brasil, o conhecimento acerca do potencial fitorremediador das várias espécies de plantas e comunidades microbianas em solos tropicais é ainda muito escasso segundo Marques et al. (2011), o que associado à falta de instrumentos de aferição e de apoio à decisão, dificulta a recomendação por parte das agências ambientais e o setor privado.

Coutinho (2007) citou que a fitorremediação de áreas poluídas é bastante útil para o meio ambiente devido à utilização de plantas específicas que amenizam ou até mesmo despoluem totalmente áreas contaminadas e afirma que é necessário a utilização de plantas que possuam determinadas características como: boa capacidade de absorção, sistema radicular profundo, acelerada taxa de crescimento, fácil colheita e resistência ao poluente. Afirma ainda que solos contaminados apresentam limitações por serem muitas vezes tóxicos às plantas, o que dificulta a seleção de plantas tolerantes e fitorremediadoras.

As técnicas de remediação podem ser classificadas como físicas, químicas e biológicas e sua escolha final depende da relação custo-benefício e dos aspectos ambientais, além do uso previsto da área após a remediação, do tipo de contaminante e de características relacionadas aos seus riscos (MARQUES et al., 2011).

No Brasil as pesquisas sobre fitorremediação têm focado principalmente solos contaminados por metais pesados (MELO et al., 2006; ROMEIRO et al., 2007) e por herbicidas .

Segundo Marques et al. (2011), faz-se necessário investigar e identificar quais espécies vegetais apresentam tolerância às substâncias contaminantes em estudo e, dentre essas espécies, as que poderão ser utilizadas como fitorremediadoras em áreas prejudicadas por aplicação excessiva de vinhaça, posteriormente avaliando sua capacidade em promover o reequilíbrio do solo, atuando direta ou indiretamente na remediação por diferentes mecanismos.

Apesar de todos os benefícios que a aplicação da vinhaça pode trazer aos solos, sua utilização de forma inadequada pode acarretar sérios problemas ambientais. Assim, aplicações em doses acima da capacidade de retenção de água do solo podem resultar em lixiviação de elementos, principalmente o potássio, e outros presentes na sua composição, podendo alcançar os lençóis freáticos e águas subsuperficiais (NICOCELLI et al., 2012).

O efeito estruturante da matéria orgânica presente na composição da vinhaça pode levar a compactação e o selamento superficial do solo, facilitando o escoamento superficial do resíduo, podendo ocorrer o derrame em áreas indesejadas e em áreas de mananciais. Outro agravante é o efeito da vinhaça sobre outras culturas que poderiam ser utilizadas em áreas de reforma de canaviais. Ungaro et al. (2008), em seus estudos sobre o efeito da vinhaça sobre o desenvolvimento de plantas oleaginosas, constataram que a vinhaça influenciou negativamente o desenvolvimento de girassol e amendoim, indicando a ação inibitória sobre o desenvolvimento inicial da cultura.

O desenvolvimento de uma agricultura intensiva e sustentável em seus diferentes aspectos na qual os produtos químicos e fertilizantes minerais sejam usados com o objetivo de aumentar a produção de alimentos com o mínimo de impactos no ambiente, se fez necessário visto o aumento da população mundial e a perspectiva de escassez dos recursos naturais. Portanto, um sistema de produção agrícola que tem sido amplamente utilizado em cultivo de olerícolas em pequenas áreas, principalmente nas regiões Sul e Sudeste do Brasil é em ambientes protegidos (estufas agrícolas) com uso da fertirrigação (SILVA et al., 2015).

Estudos de Eloi et al. (2007), mostraram que a produção de hortaliças em ambiente protegido vem se tornando opção de garantia para o aumento da produtividade. Porém, o manejo inadequado da irrigação, a adição de fertilizantes em altas dosagens e a inexistência de chuvas promotoras de lixiviação para o excesso de sais aplicados via água de irrigação, podem trazer como consequência, a salinização dos solos nesse ambiente, prejudicando o rendimento das culturas mais sensíveis.

As principais causas de acúmulo de sais em solo sob cultivo protegido, são: a utilização de águas de má qualidade provenientes de poços com altos teores de cloretos, sulfatos, carbonatos e bicarbonatos de sódio, cálcio e magnésio e a adição de fertilizantes com alto índice salino, ou adubação superior à necessidade nutricional das plantas (SILVA, 2002).

Vários são os artigos que relatam problemas de salinidade atribuídos a fertirrigação em ambientes protegidos. Entre eles, Dias et al. (2006) e também Eloi et al. (2007), atribuíram os efeitos negativos do manejo inadequado da fertirrigação ao rendimento do meloeiro, e no rendimento comercial dos frutos da cultura do tomate, respectivamente,

devido aos elevados níveis de sais acumulados no solo proporcionado pelas altas doses de adubos solúveis aplicadas. Sendo assim práticas que utilizam culturas toleráveis à salinidade até que se tenha um nível reduzido de sais no solo são viáveis sob o ponto de vista de Silva (2002).

Purquerio et al. (2011), relataram que devido ao uso de insumos sem conhecimento técnico, os agricultores preocupados em garantir elevada produtividade em ambientes controlados, fazem uso de elevadas quantidades de fertilizantes (química e ou orgânica), promovendo, em vários casos após três anos de exploração, a salinização dessas áreas inviabilizando seu uso, com reflexos negativos ao meio ambiente.

Além do uso da irrigação para minimizar os efeitos da salinidade em ambientes protegidos, são estudadas técnicas de fitorremediação dos solos e em trabalho realizado por Purquerio et al. (2011), foi constatado após três ciclos de cultivo, que as plantas de alface produzidas em estufa com solo salinizado remediado com crotalária e milho apresentaram melhor produtividade em relação ao solo em pousio.

Outro aspecto na melhoria do ambiente salinizado em sistemas de cultivo protegido seria o da troca de local da estrutura, bem como a substituição do solo no seu interior, mas são opções onerosas e inviáveis para o produtor brasileiro. Uma alternativa para a melhoria das condições químicas e físicas do solo dentro das estruturas de ambiente protegido e com custo mais acessível pode ser a realização de pelo menos um cultivo com plantas reconhecidas como extratoras de nutrientes, sendo que essas devem apresentar rápido crescimento (60 a 90 dias), grande produção de fitomassa e capacidade de absorção de nutrientes. Posteriormente essas plantas deverão ser retiradas da área de cultivo após o término do seu desenvolvimento. Trabalhos desenvolvidos por Wutke et al. (2008) utilizando a crotalária juncea (*Crotalaria juncea* L.) e o milho (*Pennisetum glaucum* L.) concluíram que essas espécies que podem ser utilizadas para tal finalidade.

Os objetivos gerais deste projeto foram:

Remediar solos salinizados por vinhaça e de ambientes protegidos com manejo incorreto da fertirrigação, utilizando plantas fitorremediadoras;

Verificar quanto tempo seria necessário para que essa fitorremediação tivesse eficiência, considerando o período de renovação do canavial e a não utilização da irrigação como técnica para minimizar a salinização no sistema de cultivo protegido.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. CONCEITOS GERAIS SOBRE FITORREMEDIAÇÃO DE SOLOS AGRÍCOLAS

A fitorremediação pode ser definida como o processo natural em que as plantas e os microrganismos da rizosfera sequestram, degradam ou imobilizam poluentes do solo (PILON-SMITS, 2005).

Sob o termo fitorremediação estão incluídas diferentes técnicas com objetivos específicos e dentre essas, é interesse deste estudo a fitoextração, que se baseia no uso de plantas para remoção de metais dos solos mediante a absorção pelas raízes, transporte e concentração na parte aérea. Para o sucesso desta técnica é essencial que o solo não apresente altos níveis de contaminação e que a planta seja tolerante ao metal, apresente um sistema radicular abundante, possua uma taxa de crescimento rápido, tenha o potencial de produzir alta quantidade de biomassa no campo e acumule na parte aérea elevadas quantidades do metal (MARQUES et al., 2009).

Outras duas abordagens práticas podem ser utilizadas na fitoextração: a utilização de plantas com capacidade natural de acumulação de altas quantidades de metais, mas normalmente com baixa produção de biomassa (plantas hiperacumuladoras); ou a utilização de plantas com alta produção de biomassa, mas com menor capacidade de acumulação de metais, normalmente associada a aplicação de agentes quelantes (NASCIMENTO et al., 2009).

Após o crescimento no campo as plantas podem ter seu volume reduzido por compostagem ou incineração e posteriormente, serem recicladas (biomineração) ou distribuídas em solos com baixos teores de metais pesados ou depositadas em aterro sanitário (MARQUES et al., 2011).

Existe também a possibilidade dos níveis de contaminação do solo estarem tão altos que a fitoextração não seria uma abordagem adequada e o tempo necessário para remediação seria muito longo. Dessa forma uma alternativa de reduzir o risco de contaminação ambiental pode ser a fitoestabilização, que plantas são utilizadas para estabilizar o metal no solo, reduzindo sua movimentação pela erosão e percolação, a exposição aos animais e a probabilidade de serem inseridos na cadeia alimentar (WONG, 2003).

As raízes das plantas também podem oferecer superfícies de precipitação ou adsorção de metais (LAPERCHE et al., 1997; PEREIRA et al., 2012). As plantas adequadas

para fitoestabilização devem ser tolerantes às condições de solo, desenvolver-se vegetativamente com agressividade, possuir sistema radicular com grande expansão, absorver grandes quantidades do metal imobilizando-o nas raízes (baixa translocação raiz-parte aérea), serem fáceis de estabelecer e manter em condições de campo, e ter ciclos de vida longos ou serem capazes de se auto propagar (BERTI; CUNNINGHAM, 2000, SANTIBÁÑEZ et al., 2008).

A existência de poucos estudos de seleção de plantas para fitoestabilização e fitoextração de solos do Brasil, aliado ao baixo número de espécies, que reconhecidamente, sejam tolerantes às altas concentrações de alguns contaminantes, dificultam a implantação de programas de fitorremediação. A interação entre plantas, poluente e solo é o primeiro passo para a realização eficaz da técnica de fitorremediação, porém vários estudos ainda terão que ser realizados para que esta técnica seja totalmente eficaz (CABRAL, 2016).

No Brasil, as pesquisas sobre fitorremediação têm focado principalmente solos contaminados por metais pesados (DO CARMO ALVES et al., 2008; MELO et al., 2006; ROMEIRO et al., 2007) e por herbicidas (PIRES et al, 2006; PROCÓPIO et al., 2008).

Segundo Knuteson et al. (2002), foi observada fitotoxicidade em culturas sensíveis implantadas após a utilização de herbicidas, cujo efeito residual variava de alguns meses até três anos ou mais. Esse fenômeno tem sido observado com diversos herbicidas e, nessa situação, é possível e recomendável o emprego de espécies vegetais na descontaminação do solo. A utilização de adubos verdes como fitorremediadores de herbicidas foi estudado por Pires et al, (2006) e os autores observaram que a mucuna preta, tremoço branco e feijão de porco se mostram promissores.

Estudos com a utilização de adubos verdes na fitorremediação do herbicida tebuthiuron foram realizados por Pires et al. (2006), utilizado para a cultura da cana-de-açúcar, podendo ser encontrado no solo até dois ou mais anos após sua aplicação. Sendo assim, os autores observaram que as plantas *Canavalia ensiformis*, seguido de *Lupinus albus* e *Estizolobium aterrimum*, foram os tratamentos que melhor fitorremediaram o tebuthiuron quando o solo foi tratado com 1,0 kg ha⁻¹ do herbicida.

Solos com níveis elevados de compostos orgânicos, inclusive herbicidas, vêm sendo pesquisado nos últimos anos por Liste e Alexander (1999), Rogers et al. (1996), Vose et al. (2000), entre outros, sendo que os autores corroboram com a ideia de que a fitorremediação apresenta-se como técnica promissora pois, além de menor custo, possibilita a metabolização dos compostos orgânicos, não havendo, nessa situação, necessidade de retirada das plantas remediadoras da área contaminada (CUNNINGHAM et al., 1996).

Espécies selecionadas para fitorremediação de herbicidas devem apresentar sistema radicular vigoroso, agressivo e profundo (NEWMAN et al., 1998), e, além disso, elevada taxa transpiratória, responsável pelo fluxo de substâncias das raízes para a parte aérea (DEE; SCHNOOR, 1997). Aumentos da densidade populacional de plantas remediadoras em determinada área, até certo limite, também pode proporcionar maior volume de raízes e de solo explorado, podendo resultar em incremento da absorção/ degradação do contaminante e/ou degradação rizosférica. Apesar disso, poucos trabalhos de pesquisa com fitorremediação avaliam a densidade mínima de plantas em que se obtenha o máximo de remediação do solo.

Chantachon et al. (2004), citaram a utilização de estratégias como a fitoextração por plantas para reabilitação de solos contaminados por metais pesados.

Melo et al. (2009), em suas pesquisas com Latossolo Vermelho-Amarelo incubado com arsênio, relataram o potencial fitorremediador de plantas forrageiras como azevém, amendoim e estilosante para áreas contaminadas por esse elemento.

Em plantas de tabaco (VÖGELI-LANGE; WAGNER, 1990), e de nabo forrageiro (CARRIER et al., 2003), expostas ao cádmio (Cd), observaram que houve acúmulo do elemento no vacúolo das folhas da primeira espécie, e no vacúolo e parede celular da segunda espécie. Accioly et al. (2004), observaram maiores teores de Cd e Zn (zinco) na raiz em relação à parte aérea, sendo um indicativo da limitação da translocação desses metais para a parte aérea em mudas de *Eucalyptus camaldulensis*.

Ratheesh et al. (2010), constataram, maiores acúmulos de Cd e Cr (cromo) nas raízes de plantas de *Vigna radiata* e *Vigna unguiculata*, o que pode estar relacionado à presença de ácidos orgânicos nos exsudatos das raízes, sendo que possivelmente os referidos metais se ligam a estes ácidos limitando sua translocação para a parte aérea.

Dentre os elementos responsáveis pelo estresse em plantas estão o zinco (Zn), cromo (Cr), cádmio (Cd), níquel (Ni), chumbo (Pb), manganês (Mn) e alumínio (Al), sendo a compartimentalização, controle de pH na rizosfera, exsudação de ácidos orgânicos e quelação intracelular. Alguns dos mecanismos utilizados pelas espécies vegetais em condições de estresse por metais pesados já foram identificados, de acordo com estudos realizados por Tsukamoto et al. (2006), com plantas de cevada sob condições de estresse por manganês.

Souza et al. (2011), observaram que existem várias respostas das plantas ao estresse por metais pesados e que depende e está diretamente relacionado à resposta intrínseca, fisiológica e bioquímica da espécie vegetal, assim como do elemento químico,

capacidade de translocação do elemento pela planta e tempo de exposição ao estresse nutricional.

2.2. FITORREMEDIAÇÃO DE SOLOS SALINIZADOS POR VINHAÇA

Algumas particularidades da produção agrícola, como o uso de vinhaça aplicada continuamente em solos nas áreas de produção de cana-de-açúcar, podem comprometer a qualidade do solo, podendo ser um entrave à produção agrícola, por salinizar o solo e lixiviar para o lençol freático principalmente o potássio.

O uso de vinhaça em áreas agrícolas, especialmente em lavouras de cana, traz benefícios indiscutíveis tanto do ponto de vista agrônômico quanto do econômico e social (FERRAZ; GIACHINI, 2009), porém quando aplicada em altas doses, pode acarretar efeitos indesejáveis como o comprometimento da qualidade da cana para produção de açúcar, salinização do solo e poluição do lençol freático (DA SILVA et al., 2007).

Assim, aplicação de vinhaça ao solo como fertilizante e repositor da umidade passou a ser uma prática difundida na maioria das usinas que beneficiam a cana-de-açúcar, se transformando em fonte de nutrientes e matéria orgânica para a cultura. O aproveitamento da vinhaça é necessário não só pela sua constituição orgânica e mineral, como também pelo seu volume produzido, justificando as preocupações dos pesquisadores com as doses aplicadas e com seus reflexos nas culturas, nos solos e nos corpos d' água. Entretanto, as quantidades a serem depositadas não devem ultrapassar as recomendações de aplicação, baseadas na capacidade de retenção de íons sendo que a mensuração deve ser em função de cada tipo de solo (DA SILVA et al., 2007).

Apesar de todos os benefícios que a aplicação da vinhaça pode trazer aos solos, sua utilização de forma inadequada pode acarretar sérios problemas ambientais. Assim, aplicações em doses acima da capacidade de retenção de água do solo podem resultar em lixiviação de elementos, principalmente o potássio, e outros presentes na sua composição, podendo alcançar os lençóis freáticos e águas subsuperficiais (NICOCELLI et al., 2012).

Paulino et al. (2011), verificaram que áreas com aplicação de vinhaça, via fertirrigação, por períodos de 12 e 20 anos, apresentaram condições mais restritivas para o crescimento de raízes nas profundidades de 0,20 m a 0,36 m e ainda observaram que em áreas sem aplicação de vinhaça, a resistência à penetração foi menor que em áreas onde ocorreram as aplicações.

O efeito estruturante da matéria orgânica presente na composição da vinhaça pode levar a compactação e o selamento superficial do solo, facilitando o escoamento superficial do resíduo, podendo ocorrer o derrame em áreas indesejadas e em áreas de mananciais. Outro agravante é o efeito da vinhaça sobre outras culturas que poderiam ser utilizadas em áreas de reforma de canaviais. Ungaro et al. (2008), em seus estudos sobre o efeito da vinhaça sobre o desenvolvimento de plantas oleaginosas, constataram que a vinhaça influenciou negativamente o desenvolvimento de girassol e amendoim, indicando a ação inibitória sobre o desenvolvimento inicial da cultura.

Diante disso a utilização de técnicas de remediação do solo pode promover a descontaminação (parcial ou total) de áreas ou ainda pode-se isolar o material como alternativa à dispersão da vinhaça. As técnicas de remediação podem ser classificadas como físicas, químicas e biológicas e sua escolha final depende da relação custo-benefício e dos aspectos ambientais, além do uso previsto da área após a remediação, do tipo de contaminante e de características relacionadas aos seus riscos (MARQUES et al., 2011).

A remediação química pode ser através do uso de gesso/e ou calagem. A remediação biológica através da fitorremediação é a técnica que utiliza plantas e comunidades de microrganismos associados à rizosfera para degradar, isolar ou imobilizar poluentes do solo promovendo sua reabilitação estrutural e ecológica, tendo como base a fisiologia vegetal, a bioquímica do solo e a química dos contaminantes. Além de ser atraente pelo seu baixo custo, possui natureza não destrutiva e estética agradável (MARQUES et al., 2011).

A fitorremediação é uma técnica emergente e de baixo custo para o reequilíbrio de áreas contaminadas (MELO et al., 2009). Esses mesmos autores em suas pesquisas relataram o potencial fitorremediador de plantas forrageiras como azevém, amendoim e estilosante para áreas contaminadas por arsênio. Apesar do Brasil ter um grande potencial para a utilização da fitorremediação, devido a sua imensa biodiversidade, a maioria das experiências e conhecimentos acumulados é originária de países de clima temperado (MARQUES et al., 2011). Especificamente para áreas contaminadas pela adição excessiva de vinhaça ao solo, a utilização da fitorremediação é dificultada pela falta de informações no sentido da utilização de espécies tolerantes ou fitorremediadoras.

Faz-se necessário investigar e identificar quais espécies vegetais apresenta tolerância às substâncias contaminantes em estudo e, dentre essas espécies, as que poderão ser utilizadas como fitorremediadoras em áreas prejudicadas por aplicação excessiva de vinhaça, posteriormente avaliando sua capacidade em promover o reequilíbrio do solo, atuando direta ou indiretamente na remediação por diferentes mecanismos básicos (MARQUES et al., 2011).

Esses processos podem ser definidos como: o ‘sequestro’ de contaminantes, a absorção, a redução da biodisponibilidade (fitoestabilização), a degradação de contaminantes orgânicos (fitodegradação), a volatilização e a biodegradação microbiana (MARQUES et al., 2011).

Silva et al.(2013) estudando plantas remediadoras de potássio, veiculado através da aplicação contínua de vinhaça na cultura de cana de açúcar, constataram aos 50 dias após a emergência das culturas, que o milheto foi a planta que mais potássio extraiu do solo seguido do feijão de porco, sendo semelhantes às culturas do milho, feijão e nabo forrageiro.

2.3. FITORREMEDIAÇÃO DE SOLOS EM AMBIENTES PROTEGIDOS

O desenvolvimento de uma agricultura intensiva e sustentável em seus diferentes aspectos, na qual os produtos químicos e fertilizantes minerais sejam usados com o objetivo de aumentar a produção de alimentos com o mínimo de impactos no ambiente, se fez necessário visto o aumento da população mundial e a perspectiva de escassez dos recursos naturais. Assim começou a produção de vegetais em ambientes protegidos, com a particularidade do uso fertirrigação sendo amplamente utilizada em cultivo de olerícolas, principalmente nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, segundo (SILVA et al.,2015)

Estudos de Eloi et al. (2007), mostraram que a produção de hortaliças em ambiente protegido vem-se tornando opção de garantia para o aumento da produtividade, porém o manejo inadequado da irrigação, a adição de fertilizantes em altas dosagens e a inexistência de chuvas promotoras de lixiviação, para o excesso de sais aplicados via água de irrigação podem trazer, como consequência, a salinização dos solos nesse ambiente, prejudicando o rendimento das culturas mais sensíveis.

As principais causas de acúmulo de sais em solo sob cultivo protegido, segundo Silva (2002), são águas de má qualidade e adição de fertilizantes com alto índice salino, sendo que a primeira, por ser proveniente de poços com altos teores de cloretos, sulfatos, carbonatos e bicarbonatos de sódio, cálcio e magnésio, e quando a fertilização é superior à necessidade nutricional das plantas.

O manejo inadequado de locais onde os lençóis freáticos são elevados, como é o caso da Bacia do Mar de Aral (Uzbequistão), associados à má gestão da irrigação e inadequada infraestrutura de drenagem, os solos foram salinizados promovendo declínio da produção agrícola e abandono das terras. Para retomar a produção de trigo e algodão nessas

áreas, estudos utilizando por quatro anos o cultivo de alcaçuz (*Glycyrrhiza glabra*), foram satisfatórios e que também concluirão que a alcaçuz pode fornecer forragem de parte aérea e suas raízes servem como matéria-prima para a indústria (KUSHIEV et al., 2005).

Entre os processos de salinização dos solos, a falta de adequada drenagem superficial e a presença de lençol freático pouco profundo, agravam os problemas de salinidade e complicam seu controle, frequentemente, a presença de nível de lençol freático pouco profundo está associada à presença de solo de baixa permeabilidade, como camada de argila pesada ou a presença da rocha matriz, é comum também o excesso de água ser derivado, de irrigações excessivas, de filtrações provenientes de terras mais elevadas e/ou de vazamento de águas dos canais, sendo assim um solo com pouca ou nenhuma drenagem pode se tornar salino em um curto período de tempo ao ser irrigado, pois as plantas ali cultivadas absorvem basicamente a água enquanto que a maior parte dos sais acaba sendo retida, segundo relatos de De Lima Júnior e Silva (2010), além do que, a tecnologia da fertirrigação conduzida irracionalmente, é a principal via antrópica relacionada com as altas concentrações de sais em áreas irrigadas.

Lopes et al. (2006), destacaram outros fatores contribuinte para salinização em ambiente protegido, sendo que a ausência de práticas agrícolas como a rotação de culturas e emprego de compostos orgânicos, amenizariam os problemas de salinização, além de prejuízos financeiros, pelo mau gerenciamento da utilização de adubos, implicações no desenvolvimento das culturas, no aparecimento de pragas e doenças e notoriamente na qualidade do solo e da água e com reflexos ambientais.

Vários são os artigos que relatam problemas de salinidade atribuídos a fertirrigação em ambientes protegidos entre eles Dias et al. (2006), que atribuíram os efeitos negativos do manejo inadequado da fertirrigação no rendimento do meloeiro, também Eloi et al. (2007), em estudos com a cultura do tomate atribuíram os problemas no rendimento comercial dos frutos da cultura, aos elevados níveis de sais acumulados no solo proporcionado pelas altas doses de fertirrigação aplicadas. Sendo assim, práticas que utilizam culturas toleráveis à salinidade até que se tenha um nível reduzido de sais no solo são viáveis sob o ponto de vista de Silva (2002).

Dias (2001), estudando a evolução da salinidade de um Luvissole cultivado com melão fertirrigado, observou no período de maior exigência nutricional da cultura, incrementos de até $1,60 \text{ dS m}^{-1}$ na salinidade da água de irrigação proveniente da adição de adubos via fertirrigação. Tal fato foi responsável, em parte, pelos níveis altos de salinidade do solo quantificados aos 45 dias após a semeadura.

Comumente em estufas agrícolas é verificada aplicação excessiva de fertilizantes, pois quantidades de nutrientes superiores a $6,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de potássio; a 120 mg dm^{-3} de fósforo e a 7 e 8 $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente, de cálcio e magnésio, são considerados muito elevados para os solos agrícolas em ambientes fechados (RAIJ et al., 1997).

Purquerio et al. (2011), relataram que devido ao uso de insumos sem conhecimento técnico, os agricultores fazem uso de elevadas quantidades de fertilizantes para garantir alta produtividade, promovendo em vários casos, após três anos de exploração a salinização dessas áreas, inviabilizando seu uso, com reflexos negativos ao ambiente.

Tradicionalmente o manejo da fertirrigação que é uma das alternativas para o parcelamento da adubação em cultivos de olerícolas, evitando perdas por lixiviação ou volatilização dos adubos é realizado ministrando-se quantidades pré-estabelecidas de fertilizantes, parceladas de acordo com a marcha de absorção, não existindo normalmente nem monitoramento da concentração de íons na solução do solo, nem do estado nutricional da planta isso agravado pelo manejo inadequado e excessivas aplicações podem levar a ocorrência de salinização dos solos, afetando assim o desenvolvimento e produção das culturas devido aos desequilíbrios nutricionais e antagonismos iônicos segundo (PAPADOPOULOS, 1999).

Medeiros (1998) enfatizou a importância do manejo correto do solo e adubação em ambientes protegidos pois, ao contrário do cultivo em campo, em que ações climáticas como eventos de chuvas elevadas em áreas afetadas por sais, podem promover a lixiviação dos mesmos, quando associados à permeabilidade e drenagem do solo, mas em condições de cultivo em ambiente protegido esse tipo de processo não é possível, pois os solos dentro de tais ambientes se comportam de maneira semelhante às regiões semiáridas, devido a proteção contra às chuvas e uma evaporação frequente, havendo salinização do solo devido a excessivas adubações durante vários ciclos de cultivo.

Importante salientar que a fertirrigação em ambientes protegidos, apesar de ser uma forma viável de parcelamento da adubação, quando aplicada excessivamente pode causar aumento da salinidade do solo como afirmaram Dias (2004) e Silva (2002), e relatos de Villas Bôas et al. (2004), mostraram que o cultivo fertirrigado pode acelerar o processo de salinização quando se utilizam fertilizantes com maior poder de salinização, medidos pelo seu índice salino global ou parcial

Além do uso da irrigação para minimizar os efeitos da salinidade em ambientes protegidos, estudam-se técnicas de fitorremediação dos solos e, em trabalho

realizado por Purquerio et al. (2011), foi constatado após três ciclos de cultivo, que as plantas de alface produzidas em estufa com solo salinizado, após remediação com crotalária e milheto, apresentaram melhor produtividade em relação ao solo em pousio.

Outro aspecto na melhoria do ambiente salinizado em sistemas de cultivo protegido seria o da troca de local da estrutura, bem como a substituição do solo no seu interior, mas são opções onerosas e inviáveis para o produtor brasileiro. Uma alternativa para a melhoria das condições químicas e físicas do solo dentro das estruturas de ambiente protegido e com custo mais acessível pode ser a realização de pelo menos um cultivo com plantas reconhecidas como extratoras de nutrientes. Essas devem apresentar rápido crescimento (60 a 90 dias), grande produção de fitomassa e capacidade de absorção de nutrientes, sendo retiradas da área de cultivo após o termino do mesmo. Trabalhos desenvolvidos por Wutke et al. (2008), utilizando a crotalária juncea (*Crotalaria juncea* L.) e o milheto (*Pennisetum glaucum* L.) concluíram que essas espécies podem ser utilizadas para tal finalidade.

Ainda Wutke et al. (2008), enfatizaram que além do sistema de adubação utilizado (convencional ou fertirrigação) e da fonte do nutriente (química e ou orgânica), o processo de salinização no cultivo protegido é agravado quando se cultiva plantas de ciclo rápido (50 dias aproximadamente), como a alface, adubadas a cada novo cultivo, sem utilização de análise química de solo como referência.

Chang et al. (2013), citaram a importância do sistema de cultivo em estufas visto que pode-se dobrar os rendimentos vegetais e fornece outros serviços ecossistêmicos em relação às abordagens convencionais, incluindo maior sequestro de carbono do solo, menor consumo de água, indicados para pequenos agricultores, porque é fácil de gerir e fornece rápidos retornos econômicos, porém estudos abrangentes sobre os impactos desta abordagem ainda são necessários, futuras prioridades de investigação deve incluir efeitos de estufa quanto a emissões de gases (efeito estufa) e a salinização do solo.

Diante do cenário de contaminação por uso indiscriminado de vinhaça e manejos incorretos em ambientes protegidos é necessário que haja estudos para a seleção de plantas de cobertura de solo, que tolerem altos índices salinos, que o manejo das mesmas seja economicamente viável e que possam ser disponibilizadas aos produtores como alternativas para o manejo desses solos.

3.ARTIGO A: FITORREMEDIAÇÃO DE SOLOS SALINIZADOS PELA APLICAÇÃO DE VINHAÇA

3.1 RESUMO E ABSTRACT

RESUMO: Áreas cultivadas com cana de açúcar onde se utiliza aplicação contínua de vinhaça, tendem a ter sérios problemas de ordem física, biológica e principalmente química pelo excesso de carga nutricional que é veiculada por esse subproduto. Com o objetivo de avaliar a qualidade química do solo após utilização da técnica de fitorremediação foi realizado um experimento em cultivo protegido na área da Fazenda Escola Professor Eduardo Meneghel Rando, do *Campus* Luiz Meneghel da Universidade Estadual do Norte do Paraná, no município de Bandeirantes/PR e avaliado pelo delineamento estatístico em blocos casualizados, em esquema fatorial de parcelas subdivididas, onde as parcelas principais foram as épocas (0, 30, 45 e 60) dias após emergência das culturas e as parcelas secundárias os 6 tratamentos com 3 repetições: T1-crotalária, T2-mucuna anã, T3-milheto, T4-milho, T5-feijão de porco e T6-feijão comum. O experimento foi instalado em vasos com capacidade de 12,6 L, preenchidos com solo coletado em duas profundidades 0-20 e 20-40 cm, na USIBAN-Usina de Açúcar e Álcool Bandeirantes S/A, do município de Bandeirantes/PR, e avaliado inicialmente quanto as suas características químicas de rotina. Através de análise destrutiva o solo foi avaliado de 0-20 cm e 20-40 cm, para análise de rotina dos parâmetros químicos do solo aos 30, 45 e 60 dias após a emergência (DAE) das culturas. Os resultados permitiram concluir que o cultivo de milheto foi o tratamento que melhor remediou potássio até os 45 DAE em solos salinizados pela aplicação de vinhaça.

Palavras -chave: Remediação de solos, vinhoto, salinidade, poluição do solo.

ABSTRACT:

Areas cultivated with sugarcane where continuous vinasse application is used tend to have serious physical, biological and mainly chemical problems due to the excess nutritional load that is transmitted by this byproduct. In order to evaluate the chemical quality of the soil after phytoremediation, an experiment was carried out in protected cultivation in the area of School Farm Teacher Eduardo Meneghel Rando, of *Campus* Luiz Meneghel of the State University of Northern Paraná, in the city of Bandeirantes / PR and evaluated by randomized complete block design, in a split - plot factorial scheme, where the main plots were the times (0, 30, 45 and 60) days after emergence of the crops and the secondary plots the 6 treatments with 3 replicates: T1- *Crotalaria spectabilis*, T2-*Mucuna deeringiana*, T3- *Pennisetum americanum* (L.) Leeke, T4- *Zea mays* L., T5-*Canavalia ensiformis* and T6-*Phaseolus vulgaris* L.. The experiment was carried out in pots with a capacity of 12.6 L, filled with soil collected at two depths 0-20 and 20-40 cm, at the USIBAN-Açúcar and Álcool Bandeirantes S / A plant, in the city of Bandeirantes / PR, and initially evaluated for their routine chemical characteristics. Through destructive analysis the soil was evaluated from 0-20 cm and 20-40 cm, for routine analysis of soil chemical parameters at 30, 45 and 60 days after emergence (DAE) of the crops. The results allowed to conclude that the cultivation of millet was the treatment that best remedied potassium up to 45 DAE in soils salinized by the application of vinasse

Key-words: Remediation of soils, vinhoto, salinity, soil pollution.

3.2. INTRODUÇÃO

Algumas particularidades da produção agrícola, como o uso de vinhaça aplicada continuamente em solos nas áreas de produção de cana-de-açúcar, são passíveis de comprometer a qualidade do solo, podendo ser um entrave à produção agrícola por salinizar o solo e lixiviar sais solúveis para o lençol freático, principalmente o potássio.

O uso de vinhaça em áreas agrícolas, especialmente em lavouras de cana, traz benefícios indiscutíveis tanto do ponto de vista agrônômico quanto do econômico e social (FERRAZ; GIACHINI, 2009), porém quando aplicada em altas doses, pode acarretar efeitos indesejáveis como o comprometimento da qualidade da cana para produção de açúcar, salinização do solo e poluição do lençol freático (DA SILVA et al., 2007).

Apesar de todos os benefícios que a aplicação da vinhaça pode trazer aos solos sua utilização de forma inadequada pode acarretar sérios problemas ambientais. Assim aplicações em doses acima da capacidade de retenção de água do solo podem resultar em lixiviação de elementos, principalmente o potássio, e outros presentes na sua composição, podendo alcançar os lençóis freáticos e águas subsuperficiais (NICOCELLI et al., 2012).

A utilização de técnicas de remediação do solo pode promover a descontaminação (parcial ou total) de áreas ou ainda pode isolar o material como alternativa à dispersão da vinhaça. As técnicas de remediação podem ser classificadas como físicas, químicas e biológicas e sua escolha final depende da relação custo-benefício e dos aspectos ambientais, além do uso previsto da área após a remediação, do tipo de contaminante e de características relacionadas aos seus riscos (MARQUES et al., 2011).

No Brasil as pesquisas sobre fitorremediação têm focado principalmente solos contaminados por metais pesados (MELO et al., 2006; ROMEIRO et al., 2007) e por herbicidas.

Melo et al. (2009) em suas pesquisas com Latossolo Vermelho-Amarelo incubados por 15 dias com arsênio, relataram o potencial fitorremediador de plantas forrageiras como azevém, amendoim e estilosante para áreas contaminadas por esse elemento. Com a utilização de adubos verdes na fitorremediação do herbicida tebuthiuron foram realizados estudos por Pires et al. (2006), visto que ele é utilizado na cultura da cana-de-açúcar, podendo ser encontrado no solo até dois ou mais anos após sua aplicação. Esses autores observaram que as plantas *Canavalia ensiformis*, seguido de *Lupinus albus* e

Estizolobium aterrimum foram os tratamentos que melhor fitorremediaram o tebuthiuron quando o solo foi tratado com 1,0 kg ha⁻¹ do herbicida.

Faz-se necessário investigar e identificar quais espécies vegetais apresentam tolerância às substâncias contaminantes em estudo e, dentre essas espécies, as que poderão ser utilizadas como fitorremediadoras em áreas prejudicadas por aplicação excessiva de vinhaça, posteriormente avaliando sua capacidade em promover o reequilíbrio do solo, atuando direta ou indiretamente, na remediação por diferentes mecanismos básicos (MARQUES et al., 2011).

Silva et al. (2013), estudando plantas remediadoras de potássio, veiculado através da aplicação sucessiva de vinhaça na cultura de cana de açúcar, constataram aos 50 dias após a emergência das culturas, o milho foi a planta que mais potássio extraiu do solo, seguido do feijão de porco, sendo semelhantes as culturas do milho, feijão e nabo forrageiro.

3.3 OBJETIVOS

Remediar o solo onde foi aplicada a vinhaça por longo período, utilizando a técnica da fitorremediação.

Verificar quanto tempo seria necessário para que essa remediação pudesse ter eficiência, considerando o período de renovação do canavial.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado de dezembro a fevereiro de 2014, em cultivo protegido na área experimental da Fazenda Escola da Universidade Estadual do Norte do Paraná, no Campus Luiz Meneghel, localizado em Bandeirantes, Paraná cujas coordenadas geográficas são 23°06' Latitude Sul e 50°21' Longitude Oeste, com 440 m de altitude. O clima predominante na região é do tipo subtropical úmido, baseado na classificação climática de Köppen.

O solo classificado como Latossolo Vermelho eutroférico (LVef) (EMBRAPA, 2013), de classe textural muito argilosa (760 g kg⁻¹ de argila) e teor de ferro superior a 18% Fe₂O₃ foi amostrado inicialmente para fins de análise química, nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm (Figura 3.1), cujo resultado dessa análise está apresentado na Tabela 3.1, essa área cultivada com cana-de-açúcar, pertencente à USIBAN-Usina de

Açúcar e Álcool - Bandeirantes S/A, localizada no município de Bandeirantes, Paraná, fertirrigada periodicamente com vinhaça, cuja composição química está apresentada na Tabela 3.2, aplicada na dose média de $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.



Figura 3.1-Local da coleta do solo para o experimento e amostragem do solo nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm- Bandeirantes/PR, 2014. Fonte: CONTE, A. M. (2014).

Tabela 3.1 - Resultado da análise química inicial do solo nas profundidades de 0 - 20 cm e 20 - 40 cm - Bandeirantes/PR, 2014

Prof.	pH CaCl ₂	M.O.	P Melich	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CTC	V%
cm		g dm ⁻³	mg dm ⁻³	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
0-20	6,1	44,3	29,7	3,3	7	2,6	3,7	12,9	16,6	77,7
20-40	6,1	36,2	26,5	3,5	7,2	2,7	3,65	13,4	17	78,6

Tabela 3.2 - Resultados da análise química da vinhaça

pH	C/N	C	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Na
					g L ⁻¹.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....mg L ⁻¹.....	.....	.....	.....
4,1	19,1	5,02	0,262	0,011	3,14	0,421	0,274	0,493	ND	0,555	62,2	14,5	0,15	200

Foram transcorridos 7 dias entre a amostragem inicial do solo e a coleta do mesmo para a instalação experimental, nesse período não ocorreu chuva e a área permaneceu com a cultura da cana-de-açúcar.

Por ocasião da implantação do experimento o solo foi coletado nas duas profundidades (Figuras 3.2 e 3.3), inicialmente amostrados e transportados até o local experimental (Figura 3.4), onde foi preparado através peneiramento em malha de 2 mm, para

compor os vasos com capacidade para 12,6 L, montados com anéis de tubos de PVC (Figura 3.5).



Figura 3.2- Coleta de solo de 0-20 cm. Fonte: SILVA, R. Z. (2014)



Figura 3.3- Coleta de solo de 20-40 cm. Fonte: SILVA, R. Z. (2014)



Figura 3.4- Solo depositado no local experimental. Fonte: SILVA, R. Z. (2014)



Figura 3.5- Vasos já preenchidos com o solo. Fonte: SILVA, R. Z. (2014)

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, em parcelas subdivididas, onde a parcela principal foi constituída pelas épocas de avaliação (0, 30, 45 e 60 dias após implantação dos tratamentos) e as subparcelas pelos tratamentos, que foram: T1- crotalária (*Crotalaria spectabilis*), T2 - mucuna anã (*Mucuna deeringiana*), T3 - milheto (*Pennisetum americanum* (L.) Leeke), T4 - milho (*Zea mays* L.), T5 - feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) e T6 - feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) (Figura 3.6) e 3

repetições. O experimento recebeu irrigação conforme necessidade das culturas e as plantas invasoras foram controladas manualmente.



Figura 3.6 - Aspecto geral da distribuição do experimento 30 dias após emergência

Inicialmente (época 0) o solo foi avaliado nas duas profundidades amostradas e após 30, 45 e 60 dias da emergência (DAE) das plantas foi realizada a coleta do solo nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm, através de coleta destrutiva e procedeu-se à análise química de rotina no Laboratório de Solos e Plantas da UENP Campus Luiz Meneghel. Os dados foram processados pelo programa estatístico SASM-Agri (CANTERI, 2001), em parcelas subdivididas e as médias comparadas pelo teste de Tukey à 5%. Quando a interação foi significativa o teste de médias foi avaliado pelo programa ESTAT (KRONKA; BANZATO, 1995).

3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1. PROFUNDIDADE 0-20 CM

Os resultados experimentais para fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e acidez potencial (H+Al) na camada de 0-20 cm ao longo do ciclo experimental no solo submetido à aplicação contínua de vinhaça, antes e após o uso de plantas fitorremediadoras estão apresentados na Tabela 3.3.

Observa-se que não houve diferenças estatísticas significativas quando se utilizou diferentes espécies vegetais, porém ao longo do ciclo de avaliação as diferenças estatísticas foram notadas, pois decorridos 30 DAE houve uma redução dos teores de fósforo no solo, diminuindo ainda mais nos transcorrer do experimento.

Para o cálcio há de se salientar que o resultado inicial deverá ser atribuído a erros amostrais não inerentes à veracidade da análise, mas sim relativo ao que realmente a amostra indicou, já que nenhuma prática de calagem ou adubação foi realizada durante a fase experimental, sendo portanto, incoerentes os teores de cálcio obtidos no início, já que são inferiores aos obtidos após cultivo das espécies, e isso é demonstrado quando se observa que houve uma redução dos teores de cálcio, pois até 30 DAE o solo apresentou teores de $9,73 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e ao final do experimento valores de $8,06 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ com redução superior a 17%.

Tabela 3.3 - Teores de fósforo ($\text{P}_{\text{mg dm}^{-3}}$), cálcio ($\text{Ca}_{\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}}$), magnésio ($\text{Mg}_{\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}}$), e acidez potencial ($\text{H}^+\text{Al}_{\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}}$), na profundidade de 0-20 cm, após fitorremediação ao longo do tempo.

Trat	P	Ca	Mg	H+Al
DIAS	mg dm^{-3}		$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$	
0	29,70 A	7,00 C	2,60 A	3,70 C
30	20,35 B	9,73 A	2,11 B	4,74 A
45	16,41 C	8,55 B	2,02 B	4,92 A
60	17,15 C	8,06 B	1,94 B	4,36 B
F	300,80**	43,94**	13,46**	94,36**
CV (%)	7,15	8,71	15,87	5,32
PLANTAS				
Crotalária	20,51 A ⁽⁴⁾	8,32 A	2,18 A	4,29 A
Mucuna ⁽¹⁾	21,08 A	8,22 A	2,08 A	4,53 A
Milheto	20,78 A	8,35 A	2,24 A	4,49 A
Milho	21,18 A	8,41 A	2,22 A	4,47 A
F. porco ⁽²⁾	20,93 A	8,55 A	2,08 A	4,50 A
F. comum ⁽³⁾	20,94 A	8,17 A	2,20 A	4,32 A
F	0,29 ^{ns}	0,57 ^{ns}	0,80 ^{ns}	1,09 ^{ns}
CV (%)	7,3	7,59	12,21	7,48

⁽¹⁾ Mucuna: (mucuna-anã); ⁽²⁾ F.porco: (feijão de porco); ⁽³⁾ F. comum: (feijão comum); ⁽⁴⁾ letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; * = significativo a 5% pelo teste de Tukey; ** = significativo a 1% pelo teste de Tukey; ns= não significativo

A maior redução de magnésio do solo foi observada aos 60 DAE, embora estatisticamente não tenha diferido dos resultados obtido a partir dos 30 DAE. A acidez potencial teve uma elevação a partir da implantação do experimento, manteve-se até a coleta aos 45 DAE e voltou a cair ao final do experimento. Essas variações podem ser atribuídas ao

conceito de que as plantas absorvem quantidades diferentes de cátions e ânions e, para manter equilibrado o pH intracelular pode ocorrer a extrusão de H^+ , HCO_3^- ou exsudados radiculares (ácidos orgânicos, açúcares, fenóis), interferindo no pH (HINSINGER et al., 2003; TAIZ; ZEIGER, 2004) e consequentemente na acidez potencial, já que não houve aplicação de calcário nos tratamentos.

Houve interação significativa para os valores de pH na profundidade de 0-20 cm, como mostra a Tabela 3.4. Observou-se que até ao 30 DAE, não houve diferenças significativas quando o solo foi cultivado com as plantas utilizadas experimentalmente, já aos 45 DAE o solo cultivado com feijão comum apresentou valores maiores e diferentes significativamente em relação as demais culturas, porém no final do ciclo amostrado, menores valores de pH foram observados quando utilizou-se crotalária, mucuna-anã e feijão de porco, ou seja, nas duas amostragens que houve influência dos cultivos sobre o pH, as gramíneas tiveram o mesmo comportamento.

A interação significativa ao longo do ciclo experimental mostrou que as culturas da mucuna-anã, milheto, milho e feijão de porco, tiveram o mesmo comportamento estatístico: inicialmente valores maiores de pH, reduzindo na coleta de 30 e 45 DAE e tendo valores intermediários no final do ciclo (60 DAE). A diferença desse cenário em relação a cultura da crotalária é observada quando ao 45 DAE os valores de pH se assemelham ao encontrados no final do ciclo experimental. Para o feijoeiro comum após uma diminuição dos valores de pH ao 30 DAE, manteve-se constante até os 60 DAE.

Tabela 3.4 - Valores de pH_{CaCl_2} na profundidade de 0-20 cm, após fitorremediação ao longo do tempo.

pH _{CaCl2} 0- 20 cm								
	0		30		45		60	
Plantas	DIAS							
Crotalária	6,10	Aa ⁽⁴⁾	5,37	Ac	5,43	Bbc	5,53	Cb
Mucuna ⁽¹⁾	6,10	Aa	5,33	Ac	5,47	Bc	5,63	BCb
Milheto	6,10	Aa	5,30	Ac	5,43	Bc	5,80	ABb
Milho	6,10	Aa	5,40	Ac	5,50	Bc	5,83	Ab
F. porco ⁽²⁾	6,10	Aa	5,27	Ac	5,40	Bc	5,63	BCb
F. comum ⁽³⁾	6,10	Aa	5,37	Ac	5,80	Ab	5,80	ABb
F (épocas) 273,27 *			F (plantas) 0,26*		F (ép X pls) 4,70*			
C.V. (épocas) 1,49			C.V. (plantas) 1,23					

⁽¹⁾ Mucuna: mucuna-anã; ⁽²⁾ F.porco: feijão de porco; ⁽³⁾ F. comum: feijão comum; ⁽⁴⁾ Letras iguais, maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; * = significativo a 5% pelo teste de Tukey;

O desdobramento da interação significativa para os teores de matéria orgânica na profundidade de 0-20 cm, após uso de plantas fitoextratoras ao longo do ciclo de amostragem, estão apresentadas na Tabela 3.5, onde se observa que apenas na amostragem do solo aos 30 DAE houve diferenças estatísticas significativas entre as espécies vegetais cultivadas, sendo que, excetuando a crotalária as demais culturas tiveram teores de matéria orgânica inferior e semelhantes entre si. E também se observa que no decorrer do ciclo experimental a crotalária diferiu estatisticamente das demais plantas, onde se observa que a matéria orgânica do solo foi diminuindo ao longo do ciclo enquanto que nas demais culturas, a partir dos 30 DAE teve um comportamento estatístico semelhante.

Tabela 3.5 - Teores de matéria orgânica (MO), na profundidade de 0-20 cm, após fitorremediação ao longo do tempo.

MO (mg.dm ⁻³) 0-20 cm								
	0		30		45		60	
Crotalária	43,00	Aa ⁽⁴⁾	24,00	Ab	18,33	Ac	17,86	Ac
Mucuna ⁽¹⁾	43,00	Aa	17,43	Bb	19,23	Ab	17,43	Ab
Milheto	43,00	Aa	18,76	Bb	19,23	Ab	16,53	Ab
Milho	43,00	Aa	20,13	Bb	19,66	Ab	18,80	Ab
F. porco ⁽²⁾	43,00	Aa	17,43	Bb	20,10	Ab	19,23	Ab
F. comum ⁽³⁾	43,00	Aa	18,76	Bb	20,60	Ab	17,43	Ab
F (épocas) 1129 ^{**}			F (plantas) 1,58		F (ép X pls) 2,42*			
C.V. (épocas) 6,34					C.V. (plantas) 6,49			

⁽¹⁾ Mucuna: mucuna-anã; ⁽²⁾ F.porco: feijão de porco; ⁽³⁾ F. comum: feijão comum; ⁽⁴⁾ letras iguais, maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, não diferem estaticamente pelo teste de Tukey a 5%; * = significativo a 5% pelo teste de Tukey; * = significativo a 1% pelo teste de Tukey.

Os resultados experimentais da análise química de potássio (K), apresentado na Tabela 6 mostram uma interação significativa entre as culturas utilizadas na remediação de solo salinizado pela aplicação de vinhaça ao longo do período experimental, onde se pode observar que entre as espécies utilizadas houve uma semelhança estatística na amostragem inicial aos 30 e 60 DAE, sendo que aos 45 DAE as gramíneas foram mais eficientes em extrair o K do solo e também se observa que os feijoeiros, tanto o de porco como o comum foram menos eficientes. A absorção preferencial iônica das poáceas (gramíneas) pelos cátions monovalentes pode ser uma explicação para o comportamento do milheto e do milho com relação à absorção de potássio do solo, pois houve uma redução de 80% e 72% nos teores de potássio no solo quando se cultivou milheto e milho, respectivamente. Isso pode ser explicado pela alta extração de K do solo, que pode ser atribuída a grande acúmulo de massa verde, segundo Teixeira et al. (2010), sendo que essa cultura já aos 45 dias de cultivo foi a que mais extraiu K do solo. A CTC das raízes é um dos fatores que determina a diferença entre as

espécies vegetais quanto à absorção de nutrientes catiônicos e, conforme observações de Da Silva et al. (2009), é característica de algumas espécies de poáceas a CTC radicular significativamente menor que em algumas fabáceas (leguminosas), o que seria coerente com a maior afinidade do sistema radicular das poáceas por cátions monovalentes como o potássio (K^+) e das fabáceas por cátions divalentes como cálcio (Ca^{+2}) e magnésio (Mg^{+2}).

Outro aspecto a ser observado na Tabela 3.6, diz respeito ao desdobramento da interação ao longo do período de amostragem, onde se verifica que para as culturas da crotalária, mucuna-anã, milheto e milho, o comportamento estatístico foi semelhante e que aos 45 DAE foram obtidos/encontrados os menores valores de potássio no solo. Para o feijão de porco e o comum aos 45 e 60 DAE não houve diferenças estatísticas significativas.

Tabela 3.6 - Teores de potássio ($K_{cmolc\ dm^{-3}}$), na profundidade de 0-20 cm, após fitorremediação ao longo do tempo.

	$K_{(cmolc\ dm^{-3})}$ 0-20 cm			
	0	30	45	60
Crotalária	3,30 Aa	2,33 Ab	1,13 ABd	1,63 Ac
Mucuna⁽¹⁾	3,30 Aa	2,17 Ab	1,17 ABd	1,67 Ac
Milheto	3,30 Aa	2,23 Ab	0,63 Cd	1,40 Ac
Milho	3,30 Aa	2,20 Ab	0,93 BCd	1,53 Ac
F. porco⁽²⁾	3,30 Aa	2,10 Ab	1,40 Ac	1,57 Ac
F. comum⁽³⁾	3,30 Aa	2,10 Ab	1,53 Ac	1,57 Ac
F (épocas): 593,5 *	F (plantas): 3,11**		F (ép X pls): 2,99*	
C.V. (épocas): 8,02			C.V. (plantas): 8,47	

⁽¹⁾ Mucuna: mucuna-anã; ⁽²⁾ F.porco: feijão de porco; ⁽³⁾ F. comum: feijão comum; ⁽⁴⁾ Letras iguais maiúsculas na coluna e minúsculas na linha não diferem estaticamente pelo teste de Tukey a 5%; * = significativo a 5% pelo teste de Tukey; ** = significativo a 1% pelo teste de Tukey.

3.5.2.Profundidade 20-40 cm

Os resultados de pH, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e acidez potencial para a profundidade de 20-40 cm estão apresentados na Tabela 3.7, onde se pode observar que houve diferença significativa para todas as épocas amostradas e também houve variação estatística para os teores de potássio e da acidez potencial quando se utilizou plantas para a remediação de solos salinizados por vinhaça.

Assim, houve uma diminuição dos valores de pH quando solo foi amostrado aos 30 e 45 DAE, porém no final do ciclo experimental os valores de pH foram semelhantes ao encontrado no início do experimento, isso pode ser atribuído a exudação ácidos orgânicos, açúcares, fenóis, interferindo no pH (HINSINGER et al., 2003; TAIZ;

ZEIGER, 2004). Para os demais resultados, todos os valores foram decrescentes ao longo do ciclo de amostragem, excetuando o K que aos 60 DAE foi estatisticamente superior aos resultados observados aos 45 DAE. Os teores de fósforo a partir de primeira avaliação depois da introdução das culturas teve uma diminuição em média de 77%, em relação a amostragem inicial. Para o K a diminuição aos 45 DAE, chegou a 60%. Para Ca, Mg e H+Al os percentuais de redução dos teores dos elementos no solo foram respectivamente de 30, 40 e 22%.

Tabela 3.7 - Teores de pH_{CaCl2}, P (fósforo), K (potássio), Mg (magnésio) e H+Al (acidez potencial) para a profundidade de 20-40 cm, após fitorremediação ao longo do tempo.

Tratamentos	pH_{CaCl2}	P_{Melich}	K	Ca	Mg	H+Al
DAE		mg dm ⁻³	cmolc dm ⁻³			
0	6,10 A	26,50 A	3,50 A	7,20 A	2,70 A	3,65 A
30	5,77 B	5,95 B	2,35 B	5,62 B	1,89 B	3,07 BC
45	5,70 B	5,82 B	1,35 D	5,04 B	1,63 BC	3,25 B
60	6,09 A	5,73 B	2,02 C	5,59 B	1,62 C	2,84 C
F	38,46**	440,65**	427,42**	34,35**	94,02**	22,00**
CV (%)	2,43	18,98	8	11,48	11,36	9,62
Plantas						
Crotalária	5,89 A ⁽⁴⁾	11,02 A	2,36 AB	5,82 A	1,96 A	3,04 B
Mucuna⁽¹⁾	5,88 A	11,61 A	2,37 AB	5,88 A	1,96 A	3,43 A
Milheto	5,98 A	10,69 A	2,13 B	5,63 A	1,85 A	3,20 AB
Milho	5,89 A	11,13 A	2,18 AB	6,07 A	1,98 A	3,25 AB
F. porco⁽²⁾	5,91 A	10,93 A	2,43 A	5,85 A	1,97 A	3,18 AB
F. comum⁽³⁾	5,94 A	10,63 A	2,38 AB	5,94 A	2,04 A	3,12 AB
Crotalária	0,85 ^{ns}	0,39 ^{ns}	3,51*	0,71 ^{ns}	0,66 ^{ns}	2,61*
CV (%)	2,39	17,84	9,7	10,23	13,50	8,83

⁽¹⁾ Mucuna: mucuna-anã; ⁽²⁾ F.porco: feijão de porco; ⁽³⁾ F. comum: feijão comum; ⁽⁴⁾ Letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; * = significativo a 5% pelo teste de Tukey; ** = significativo a 1% pelo teste de Tukey; ns= não significativo.

Na profundidade de 20-40 cm observa-se também (Tabela 3.7) que as culturas utilizadas nesse experimento alteraram significativamente os teores de potássio e da acidez potencial. Entre as culturas utilizadas verifica-se que houve diferença estatística significativa para a cultura do milheto e do feijão de porco, sendo que para as demais culturas o comportamento estatístico foi semelhante. O solo onde se cultivou o milheto foi o que apresentou o menor valor de potássio e esses resultados corroboram com os obtidos por Silva et al, 2013, onde a cultura do milheto foi a que demonstrou os menores teores de K no solo, na mesma época amostrada. Alvarenga et al. (2001), afirmaram que o milheto fornece palhada mais duradoura na superfície do solo e, com seu sistema radicular mais desenvolvido,

podendo alcançar mais de 2,0 m, absorve nutrientes em maiores profundidades, extraindo e reciclando nutrientes.

A matéria orgânica em subsuperfície (Tabela 3.8) mostrou uma interação estatística significativa entre as diferentes culturas utilizadas ao longo do ciclo experimental, com uma diminuição dos valores. Quanto à época amostrada houve diferenças estatísticas significativas aos 30 DAE, que excetuando o cultivo da crotalária, as demais plantas utilizadas como fitoextratoras tiveram um comportamento estatístico semelhante e nesses solos foram obtidos os menores valores de matéria orgânica.

Tabela 3.8 - Teores de matéria orgânica ($MO_{mg\ dm^{-3}}$) na profundidade de 20-40 cm, após fitorremediação ao longo do tempo.

Plantas	$MO_{mg\ dm^{-3}}$ (20 – 40 cm)			
	0	30	45	60
Crotalária	36,20 ⁽¹⁾ Aa	14,30 Ab	7,63 Ac	8,53 Ac
Mucuna⁽¹⁾	36,20 Aa	9,83 Bb	8,93 Ab	9,40 Ab
Milheto	36,20 Aa	8,50 Bb	10,30 Ab	8,97 Ab
Milho	36,20 Aa	8,53 Bb	7,60 Ab	11,20 Ab
F. porco⁽²⁾	36,20 Aa	8,97 Bb	9,40 Ab	10,30 Ab
F. comum⁽³⁾	36,20 Aa	8,53 Bb	7,60 Ab	8,53 Ab
F (épocas): 539,26**		F (plantas): 0,89	F (ép X pls): 2,21*	
C.V.(épocas): 15,37			C.V.(plantas): 10,89	

⁽¹⁾ Mucuna: mucuna-anã; ⁽²⁾ F.porco: feijão de porco; ⁽³⁾ F. comum: feijão comum; ⁽⁴⁾ Letras iguais, maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; * = significativo a 5% pelo teste de Tukey; ** = significativo a 1% pelo teste de Tukey.

As avaliações das culturas no decorrer do ciclo experimental mostraram tendência estatística similar nas diferentes épocas, ou seja, o solo cultivado com a mucuna-anã, milheto, milho, o feijão de porco e o comum apresentou o menor teor de matéria orgânica e isso foi constante estatisticamente até o final das amostragens. O teor de matéria orgânica no solo cuja utilização da crotalária como planta fitoextratora, foi decrescente até o 30 DAE e decresceu ainda mais após os 45 DAE, em seguida mantendo-se constante. A diminuição da matéria orgânica do solo é resultante além dos processos que envolvem a sua mineralização, que é acentuado principalmente devido a época do ano em que foi realizado o experimento (verão), acrescido pelo manejo das culturas, já que não tiveram nenhum problemas de déficit hídrico, também pelos diferentes metabolismos das culturas em se utilizar da matéria orgânica para o seu desenvolvimento.

Para enfatizar os diferentes manejos de remediação de solo que recebe continuamente vinhaça, elevando assim seus teores de potássio, que pode gerar consequências negativas para o meio ambiente e também interferir na qualidade dos subprodutos oriundos do

beneficiamento da cana-de-açúcar, estão apresentados na Tabela 3.9, os percentuais de redução dos teores de potássio nas duas profundidades com uso da técnica da fitorremediação em função do tempo ao longo do perfil do solo, considerando os valores iniciais.

Tabela 3.9 - Percentuais de redução dos teores de potássio em função das espécies vegetais na remediação do solo e do tempo de sua aplicação em duas profundidades.

Tratamentos	0-20 cm			20-40 cm		
	30 DAE	45 DAE	60 DAE	30 DAE	45 DAE	60 DAE
	(%)					
Crotalária	29,4	65,8	50,6	33,4	56,3	40,8
Mucuna⁽¹⁾	34,5	66	49,4	28,6	58	42,8
Milheto	29,4	80,9	57,6	42,8	71,4	42,8
Milho	33,3	71,8	53,6	36,3	66,6	46,6
F. porco⁽²⁾	36,4	57,6	52,4	28,6	53,4	40,8
F. comum⁽³⁾	36,4	44,6	52,4	27,7	62,8	38

⁽¹⁾ Mucuna: mucuna-anã; ⁽²⁾ F.porco: feijão de porco; ⁽³⁾ F. comum: feijão comum.

Observando os dados da Tabela 3.9 é possível verificar que, para a maior parte dos manejos ao longo do tempo e nas duas profundidades amostradas, houve redução superior a 30% nos teores de potássio do solo e que essa redução já ocorreu aos 30 DAE e também que o cultivo de milheto foi o mais eficiente em reduzir o K na camada superior do solo, com valor superior a 80%; também na profundidade de 20-40 cm com valor superior a 70%.

Apesar de não apresentar diferenças estatísticas significativas para os teores de K no solo, semelhantemente aos resultados obtidos por Silva et. al (2013), a cultura do milheto foi a que demonstrou os menores teores de K no solo, na mesma época amostrada. Alvarenga et al. (2001), afirmaram que o milheto fornece palhada mais duradoura na superfície do solo e, com seu sistema radicular mais desenvolvido, podendo alcançar mais de 2,0 metros, absorve nutrientes em maiores profundidades, extraindo e reciclando nutrientes.

Mais estudos são necessários em solos com características físico-químicas diferentes, diversas substâncias contaminantes e também a identificação de outras espécies vegetais com potencial para que a técnica da recuperação do solo através da fitorremediação seja consolidada e recomendada.

3.6 CONCLUSÕES

Considerando o tempo de remediação, em que essa prática deverá ser aplicada, principalmente quando se usa plantas, as mesmas deverão além da diminuição do agente contaminante, trazer benefícios como: fixação e ciclagem de nutrientes, proteção do solo, produção de grãos e/ou de massa verde para alimentação animal e fácil erradicação, entre outros. Para tal, as conclusões deste trabalho fundamentam-se em:

- O manejo de remediação do solo em que foi obtido o menor teor de potássio foi encontrado quando o solo foi cultivado com milheto.

- As práticas de remediação do solo utilizadas no experimento que proporcionaram os menores teores de K no solo na camada superficial e em profundidade, respectivamente, em ordem decrescente foram:

0-20 cm: milheto>milho>mucuna anã>crotalária>feijão de porco> feijão comum.

20-40 cm: milheto> milho> feijão comum> mucuna anã> crotalária> feijão de porco

- Os diferentes manejos de remediação do solo quanto ao decréscimo dos teores de K, foram obtidos quando realizados pelo período de 45 dias.

4. ARTIGO B: FITORREMEDIAÇÃO DE SOLOS SALINOS SOB CULTIVO PROTEGIDO

4.1 RESUMO E ABSTRACT

RESUMO: O manejo inadequado de irrigação, fertirrigação, adubação, bem como o ambiente fechado (cultivo protegido) onde se desenvolvem as plantas, culminam muitas vezes em problemas de salinização de solo, com reflexo no desenvolvimento das culturas e na qualidade do solo e água com reflexos negativos de ordem ambiental. Sendo assim, com objetivo de avaliar a qualidade do solo em ambientes protegidos através do uso da técnica de fitorremediação, foi realizado um experimento em cultivo protegido na área da Fazenda Escola Professor Eduardo Meneghel Rando, *Campus* Luiz Meneghel, da Universidade Estadual do Norte do Paraná, no município de Bandeirantes/PR. O solo foi coletado de uma área de cultivo de pimentão em sistema protegido (estufa agrícola), em uma propriedade rural do município de Bandeirantes/PR, numa profundidade de 0-20cm. Os vasos com capacidade de 5 L foram preenchidos com o solo, disposto em delineamento experimental de blocos casualizados, em parcelas subdivididas, onde a parcela principal abrigava as épocas, sendo 30, 45 e 60 dias após a emergência das plantas (DAE), com 5 tratamentos e 4 repetições: T1-nabo forrageiro, T2- ervilha forrageira, T3- tremoço, T4- aveia branca e T5 sem cultivo (só irrigado). Através de análise destrutiva o solo foi avaliado de 0-20 cm para condutividade elétrica e para análise de rotina dos parâmetros químicos do solo, inicialmente e aos 30, 45 e 60 DAE. Os resultados foram avaliados pelo software ESTAT, no esquema de parcelas subdivididas e as médias comparadas pelo teste de Tukey. A ervilha forrageira foi a espécie vegetal que proporcionou maior diminuição de fósforo, e o tempo de permanência de 30 dias DAE das culturas, foi suficiente para diminuição desse elemento; o cultivo do nabo forrageiro foi o responsável pela menor condutividade elétrica e esta diminuiu ao longo do ciclo experimental.

Palavras-chave: Estufa agrícola, fertirrigação, remediação de solos, salinidade.

ABSTRACT: The inadequate management of irrigation, fertigation, fertilization, and the closed environment (greenhouse) where the plants grow up, culminating often in problems of soil salinization, reflecting the development of crop and soil quality and water with reflections negative environmental reasons. Thus, to evaluate soil quality in protected environments through the use of phytoremediation technique, an experiment was conducted in greenhouse in the area of Farm School Teacher Eduardo Meneghel Rando, *Campus* Luiz Meneghel the State University of Northern Paraná, in the city of Bandeirantes / PR. The soil was collected from a chili cultivation in protected area system (greenhouse) on a farm in the municipality of Bandeirantes / PR at a depth of 0-20cm. Vessels with 5 L capacity were filled with soil, arranged in a randomized complete block in a split plot where the main portion housed ages, 30, 45 and 60 days after plant emergence (DAE), with 5 treatments and 4 repetitions: T1-*Raphanus sativus*, T2- *Pisum sativum* L. ssp. *Arvense*, T3-*Lupinus albus*, T4- *Avena sativa* and T5 uncultivated (only irrigated). The results were evaluated by ESTAT software, the scheme split plot and the means were compared by Tukey test. The *Pisum sativum* L. ssp. *Arvense* was the plant species that provided the greatest reduction of phosphorus, and the residence time of 30 days DAE of the cultures, was enough to decrease this element; The

cultivation of *Raphanus sativus* was responsible for the lower electrical conductivity and this decreased during the experimental cycle.

Key-words: Fertigation, greenhouse, salinity, soil remediation.

4.2 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos no Brasil tem-se observado aumento no cultivo de hortaliças em ambiente protegido, cujas principais vantagens em relação aos demais sistemas de produção a céu aberto são: maior proteção contra a adversidade climática, possibilidade de produção na entressafra, aumento da produtividade e melhor qualidade dos produtos, além de maior eficiência no uso da água e dos fertilizantes (STANGHELLINI, 1993).

Apesar das vantagens da utilização do cultivo em ambiente protegido, coexiste o efeito negativo da salinização com maior intensidade de dano, principalmente nas regiões áridas e semi-áridas, onde os baixos índices de pluviosidade e a ocorrência de altas temperaturas provocam intensa evaporação da água e, com efeito, deposição de sais na superfície do solo ao longo do ano (DIAS et al., 2007). Também Nunes Filho et al. (1991) e Queiroz et al. (1997), destacaram que a tecnologia da fertirrigação, conduzida irracionalmente, é a principal via antrópica relacionada com as altas concentrações de sais em áreas irrigadas.

De Lima Junior e Silva (2010) citaram que a salinização é um dos fenômenos crescentes em todo o mundo, decorrente de condições climáticas e da agricultura fertirrigada (adição de fertilizantes via água de irrigação). Citam ainda, que quando esta tecnologia é utilizada sob manejo inadequado, torna-se incremento para o aumento de áreas com altas concentrações salinas.

De acordo com Dias (2004), um processo semelhante pode ocorrer nos cultivos protegidos se medidas preventivas não forem tomadas. Pois a intensiva adubação proporcionando excesso de fertilizantes ao solo, atrelada à falta de chuva ou irrigação para a lixívia e a contínua evaporação da água do solo, pode concentrar sais na solução do solo e prejudicar o rendimento das culturas. O manejo incorreto da irrigação e da adubação, causas diretas da salinização, tornam-se mais graves sob ambiente protegido, uma vez que, as chuvas que poderiam corrigi-las, não adentram este ambiente. Ainda o mesmo autor, afirma que a maioria dos casos do aumento da salinidade em ambiente protegido na região Sudeste do Brasil dá-se em função do excesso de fertilizantes aplicados via água de irrigação.

Uma medida para a melhoria das condições químicas e físicas do solo dentro das estruturas de ambiente protegido seria a troca de local da estrutura, bem como a substituição do solo em seu interior, porém são opções onerosas e inviáveis para o produtor brasileiro. Sendo assim, a opção viável pode ser a realização de pelo menos um cultivo com

plantas reconhecidas como extratoras de nutrientes e que possam ser retiradas da área após o término do mesmo. Dessa forma, a crotalária juncea (*Crotalaria juncea* L.) e o milheto (*Pennisetum glaucum* L.) são espécies que podem ser utilizadas para essa finalidade segundo Wutke et al. (2008).

4.3 OBJETIVOS

- Avaliar o uso de plantas na remediação de solos salinizados sob cultivo protegido.
- Verificar qual o tempo mínimo necessário para que a fitorremediação tenha eficiência.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado sob cultivo protegido, de julho a setembro de 2015, na área experimental da Fazenda Escola Professor Eduardo Meneghel Rando, da Universidade Estadual do Norte do Paraná, no *Campus* Luiz Meneghel, localizado em Bandeirantes, Paraná, cujas coordenadas geográficas são 23°06' Latitude Sul e 50°21' Longitude Oeste, com 440 m de altitude. O clima predominante na região é do tipo subtropical úmido (Cfa), baseado na classificação climática de Köppen.

O solo classificado segundo Embrapa (2013), como Latossolo Vermelho eutroférico (LVef) de classe textural muito argilosa (850 g kg⁻¹ de argila) e teor de ferro superior a 18% Fe₂O₃, foi coletado na área de produção de pimentão (*Capsicum annuum*), em sistema de cultivo protegido (estufa agrícola), no Sítio São José, do proprietário João Henrique Castelar, localizado no município de Bandeirantes/PR (Figura 4.1).



Figura 4.1- Aspecto geral do local de coleta de solo. Fonte: SILVA, R. Z. (2015)



Figura 4.2- Coleta de solo de 0-20 cm em vários pontos da estufa. Fonte: SILVA, R. Z. (2015)

O solo inicialmente foi amostrado para caracterização química e condutividade elétrica e os dados apresentados na Tabela 4.1. As análises foram realizadas no Laboratório de Análise de Solo e Planta da UENP, segundo metodologia descrita em Raij et al., (1987) .

Tabela 4.9 - Análise química e da condutividade elétrica inicial do solo de estufa, na profundidade de 0-20 cm. Bandeirantes/PR

M.O.	CE	pH	P	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CTC	Bases
g kg ⁻¹	dS m ⁻¹	CaCl ₂	mg dm ⁻³	.....	.....	cmolc dm ⁻³.....	.....	.....	.....	(V %)
24,20	3,19	6,40	149,00	1,00	23,50	1,80	2,28	26,30	28,58	92,00

Para compor os tratamentos, foram utilizados vasos com capacidade para 5 L, preenchidos com solo coletado em vários pontos da estufa na profundidade de 0-20 cm (Figuras 4.2 e 4.3) e peneirado em malha de 4 mm, para uniformização do mesmo.

O delineamento experimental foi em parcelas subdivididas com 5 tratamentos e 4 repetições, onde as parcelas principais foram às épocas de coleta (30, 45 e 60 dias após emergência das culturas) e as parcelas secundárias os tratamentos. Os tratamentos foram compostos pelas espécies: nabo forrageiro (*Raphanus sativus*), ervilha forrageira (*Pisum sativum* L. ssp. *Arvense*), tremoço (*Lupinus albus*), aveia branca (*Avena sativa*) e um tratamento sem cultivo (Figura 4.3).



Figura 4.3- Montagem do experimento e semeadura. Fonte: SILVA, R. Z. (2015)

Foram semeadas à profundidade de 0,5 cm, seis sementes de cada espécie. O solo foi irrigado até 70% da capacidade de campo. A capacidade de campo foi obtida de modo indireto, ou seja, a amostra de solo foi saturada e após drenagem natural (água gravitacional), calculada a sua capacidade de campo, através da metodologia preconizada por EMBRAPA (1997). Após a emergência das plantas foi realizado o desbaste, deixando-se 2 plantas por vaso.

Transcorridos 15 dias após a emergência das plantas o tremoço apresentou sintomas de toxidez (Figuras 4.4 e 4.5), o que impossibilitou a condução deste tratamento no experimento.



Figura 4.4-Tremoço 15 DAE. Fonte: SILVA, R. Z. (2015)



Figura 4.5- Tremoço 15 DAE. Fonte: SILVA, R. Z. (2015)

O controle das plantas daninhas foi realizado manualmente e diariamente, assim que foram emergindo, sendo que os vasos permaneceram sempre no limpo, fator considerado importante para que não houvesse a interferência das plantas daninhas na concorrência com as culturas implantadas e também no tratamento onde só a irrigação seria avaliada no processo de absorção iônica.

Por amostragem destrutiva o solo foi avaliado quanto a condutividade elétrica e aos parâmetros químicos da análise de rotina aos 30, 45 e 60 DAE.

Os dados foram submetidos à análise de variância, pelo programa estatístico Estat no delineamento de parcelas subdivididas e as médias significativas comparadas pelo teste de Tukey à 5% (KRONKA; BANZATO, 1995).

4.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises químicas do solo apresentados na Tabela 4.2 mostram diferenças significativas entre as épocas 0 DAE (no dia da semeadura) e aos 30, 45 e 60 DAE (30, 45 e 60 dias após emergência dos vegetais) e para os valores de MO, pH, P, Ca, Mg, e CE entre as plantas utilizadas para fitorremediação. Não houve interação

significativa entre os tratamentos utilizados e as épocas do experimento para os valores desses elementos. Para matéria orgânica pode-se observar que houve decréscimo ao longo do tempo em relação à época inicial (0 DAE) resultante dos processos de mineralização da mesma.

Assemelhando-se com as observações de Nunes Filho et al. (2015), que relataram aumento do pH inicial do solo em trabalho de fitoextração de sais por capim-angola, independente do manejo, observou-se elevação nos valores de pH em relação ao valor inicial. Isso pode estar associado à solubilização de elementos advindos de práticas de adubação e calagem anteriormente realizadas no local, ou seja, há efeito residual de tais práticas, já que se trata de um solo de alto poder tampão. Assim, observa-se entre os tratamentos nabo forrageiro e aveia branca, que houve diferença significativa, respectivamente maior e menor valores de pH encontrados, sugerindo que as gramíneas (aveia branca) podem possuir menor poder de solubilização desses elementos, embora esses tratamentos não tenham diferido estatisticamente dos demais.

Tabela 4.2 - Valores de $\text{MO}_{\text{mg dm}^{-3}}$ (matéria orgânica), $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$, $\text{P}_{\text{mg dm}^{-3}}$ (fósforo), $\text{Ca}_{\text{cmolc dm}^{-3}}$ (cálcio), $\text{Mg}_{\text{cmolc dm}^{-3}}$ (magnésio) e CE_{ds} (condutividade elétrica), obtidos através da análise química do solo de 0-20 cm de profundidade antes (0 DAE) e após os tratamentos

	M.O.	pH_{CaCl2}	P_{Mehlich}	Ca	Mg	CE
DAE	mg dm^{-3}		mg dm^{-3}	cmolc dm^{-3}	cmolc dm^{-3}	dS m^{-1}
0	24,2 A	6,4 C	149 A	23,5 A	1,8 B	3,19 A
30	18,11 B	6,95 A	17,01 C	19,33 B	2,71 AB	2,12 B
45	16,23 C	6,85 B	18,57 C	17,68 C	3,86 A	1,76 C
60	14,17 D	6,94 A	21,01 B	17,55 C	2,64 AB	1,18 D
F	111,71**	329,13**	13943**	88,16**	7,47**	135,97**
CV (%)	8,88	0,85	4,29	6,06	45,09	14,39
DMS	1,78	0,06	2,43	1,31	1,38	3,31
Nabo	17,64 A	6,82 A	51,25 AB	18,7 A	1,92 B	1,16 B
Ervilha	17,81 A	6,81 AB	50,16 B	19,33 A	3,11 A	2,14 A
Aveia	18,64 A	6,74 B	52,56 A	20,03 A	2,95 A	2,32 A
Água	18,6 A	6,78 AB	51,62 AB	20 A	3,02 A	2,26 A
F	1,64 ^{ns}	3,91*	3,62*	1,33 ^{ns}	4,43**	6,44**
CV (%)	8,92	0,99	4,06	9,34	38,29	24,98
DMS	1,54	0,06	1,98	1,74	1,00	4,95

Letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; * = significativo a 5% pelo teste de Tukey; ** = significativo a 1% pelo teste de Tukey; ns= não significativo.

Observou-se redução nos teores de fósforo ao longo do ciclo até os 45 DAE, havendo um incremento aos 60 DAE, devido provavelmente ao aumento do pH que resultou na sua solubilização. Entre os tratamentos, o que mostrou maior diminuição desse elemento no solo foi a ervilha forrageira, apesar de estatisticamente se assemelhar com nabo forrageiro

e água, que não diferiram do tratamento com aveia branca. O fósforo, elemento pouco móvel no solo e muito propício aos processos de fixação, pode ter sua notoriedade associada a processo fisiológicos das plantas, já que entre elas, tem-se espécies como gramíneas (poáceas) leguminosas (fabaceas) e também as brássicas, com metabolismos próprios de absorção e poder de dissociação associado a exsudação radicular inerente a cada espécie.

Quanto à condutividade elétrica, pode-se inferir que diminuiu ao longo do ciclo experimental mostrando que o período de 60 DAE ($1,18 \text{ dS m}^{-1}$) foi o mais adequado (TAVEIRA, 2000) para a média de todos os tratamentos. Observou-se também que se comparada a amostra inicial $3,19 \text{ dS m}^{-1}$, houve redução de mais de 50 % quando no solo foi cultivado o nabo forrageiro sendo que o valor de CE está dentro dos padrões aceitáveis para a maioria das culturas, pois segundo Taveira (2000), faixas superiores a $1,75 \text{ dS m}^{-1}$, podem reduzir o crescimento de espécies e variedades mais sensíveis. Entretanto, deve-se conhecer a fisiologia da cultura antes de sua implantação, pois em trabalho realizado com feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), Santana et al. (2003) já observaram queda na produção de 22,7 % em solo com $1,0 \text{ dS m}^{-1}$ de condutividade elétrica, chegando a 47,2 % em $3,6 \text{ dS m}^{-1}$. Sendo assim, mais estudos são necessários, pois há de se considerar que existe relação entre textura do solo, salinidade e umidade disponível, pois em pesquisa realizada por De Queiroz et al. (2005), em solos com elevado teor de argila a adsorção foi cada vez mais representativa com a redução no teor de umidade do solo, levando a uma subestimativa dos valores de condutividade elétrica. Ao contrário do que ocorre em solos arenosos, que apresentam baixa capacidade de retenção de água e íons. Assim, maiores quantidades dos sais aplicados aos solos arenosos permanecem em solução, elevando a salinidade do solo. Já em condições laboratoriais, pode-se observar valores de condutividade elétrica maiores que os reais em campo, pois no extrato de saturação, ocorre a neutralização do efeito de adsorção das partículas do solo, resultando em valores superestimados em solos argilosos.

Na Tabela 4.3 é apresentada a interação significativa entre as épocas amostradas e os agentes remediadores (espécies vegetais e água) para os teores de potássio (K). Aos 30, 45 e 60 DAE houve diferenças estatísticas significativas, sendo que nas três épocas os menores teores obtidos foram com as culturas de nabo forrageiro e ervilha forrageira, ou seja, essas duas culturas fitoextraíram mais potássio do solo que a aveia branca, discordando de Marschner (1995) que afirma que por absorção preferencial iônica as poáceas (gramíneas) absorvem preferencialmente cátions monovalentes como o potássio (K), por possuírem baixa CTC de raiz. A CTC determina a distribuição relativa dos íons mono e divalentes na composição mineral das plantas. Isto significa que, para uma determinada

concentração de cátions, raízes com alta CTC adsorvem relativamente mais Ca^{2+} e Mg^{2+} e menos cátions monovalentes como K^+ , e o inverso ocorrem com raízes de baixa CTC (GRAY et al., 1953), devido a maior energia de ligação das raízes de alta CTC com cátions divalentes. E isso é reforçado pela grande absorção de K pelas brássicas já que Conte e Castro e Boaretto (2004), estudando a marcha de absorção de canola, verificaram que o K foi o elemento mais absorvido. O menor teor do elemento no solo foi obtido com cultivo do nabo forrageiro aos 45 DAE.

Tabela 4.3 - Teores de K (potássio) após remediação, ao longo do tempo

K _{cmolc dm⁻³} (0-20 cm)								
	0		30		45		60	
Nabo	1,00	Aa ⁽¹⁾	0,82	Bc	0,52	Cc	0,62	Bc
Ervilha	1,00	Aa	0,92	Bab	0,85	Bb	0,68	Bc
Aveia	1,00	Ab	1,08	Aab	1,12	Aa	1,12	Aa
Água	1,00	Ab	1,08	Aab	1,12	Aa	1,15	Aa
F (épocas): 8,35 **			F (plantas):113,13**		F (ép X pls): 20,10			
C.V. (épocas): 7,60			C.V. (plantas): 6,75					

⁽¹⁾ Letras iguais, maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ** = significativo a 1% pelo teste de Tukey.

Houve interação significativa para acidez potencial (H^+Al) entre as épocas das amostragens e os agentes remediadores testados (Tabela 4.4). Pode-se observar que os menores valores para acidez potencial foram aos 30 DAE, com o uso de água, 45 DAE com o cultivo do nabo forrageiro e 60 DAE para a ervilha forrageira, embora estatisticamente não tenha diferido do cultivo do nabo forrageiro e isso corrobora com os resultados da Tabela 4.2 onde os valores de pH aumentaram em detrimento a redução da acidez potencial, justificando os processos de reação do solo.

Tabela 4.4 - Teores de H^+Al (acidez potencial) ao longo do tempo, após remediação.

H+Al ⁻³ _{cmolc dm} (0-20 cm)								
	0		30		45		60	
Nabo	2,28	Aa ⁽¹⁾	1,14	Ab	1,04	Bc	1,12	ABb
Ervilha	2,28	Aa	1,14	Ab	1,10	ABb	1,07	Bb
Aveia	2,28	Aa	1,07	ABc	1,15	Ab	1,15	Ab
Água	2,28	Aa	1,04	Bc	1,16	Ab	1,16	Ab
F (épocas): 5065,16**			F (plantas): 0,77 ^{ns}		F (ép X pls): 5,79**			
C.V. (épocas): 2,34					C.V. (plantas): 2,91			

⁽¹⁾ Letras iguais, maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ** = significativo a 1% pelo teste de Tukey; ns= não significativo.

4.6 CONCLUSÕES

Considerando o tempo de remediação em que essa prática deverá ser aplicada, principalmente quando se usa plantas, as mesmas deverão além da retirada do agente contaminante, trazer benefícios como: fixação e ciclagem de nutrientes, proteção do solo, produção de grãos e/ou de massa verde para alimentação animal, fácil erradicação, entre outros. Para tal, as conclusões deste trabalho fundamentam-se em:

- A ervilha forrageira foi a espécie vegetal que proporcionou maior diminuição de fósforo, e o tempo de permanência de 30 dias DAE das culturas, foi suficiente, para diminuição desse elemento.
- O cultivo do nabo forrageiro foi o responsável pela menor condutividade elétrica e esta diminuiu ao longo do ciclo experimental.

5. CONCLUSÕES GERAIS

Para a fitorremediação de solos que receberam doses sucessivas de vinhaça, o cultivo de milho foi o tratamento que melhor remediou potássio até os 45 DAE em ambas as profundidades estudadas. Quanto ao experimento conduzido em solo proveniente de ambiente protegido, a ervilha forrageira foi a espécie vegetal que proporcionou maior diminuição de fósforo, e o tempo de permanência de 30 dias DAE das culturas, foi suficiente, para diminuição desse elemento. O cultivo do nabo forrageiro proporcionou a menor condutividade elétrica no extrato de saturação do solo e esta diminuiu ao longo do ciclo experimental.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACCIOLY, A. M. A.; SIQUEIRA, J. O.; CURI, N. Amenização do calcário na toxidez de zinco e cádmio para mudas de *Eucalyptus camaldulensis* cultivadas em solo contaminado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.28, n.4, p.775-783, 2004.
- ALVARENGA, R. C.; CABEZAS, W. A. L.; CRUZ, J. C.; SANTANA, D. P. Plantas de cobertura de solo para sistema plantio direto. **Informe Agropecuário**, Epamig: Belo Horizonte, 2001, v. 22, n. 208, p. 25-36.
- BERTI, W.R.; CUNNIGHAM, S.D. Phytostabilization of metals. In: RASKIN, I. & ENSLEY, B. D. (eds.). **Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment**. John Wiley & Sons, Inc., New York, 2000, p.71-88, 2000, 304 p.
- CABRAL, C. M.; SANTOS, J. B. Grupo INOVAHERB: excelência em pesquisas sobre fitorremediação de ambientes com resíduos de herbicidas no Brasil. **Revista Científica Vozes dos Vales**, MG, n. 9, p. 1-11, 2016.
- CANTERI, M. G.; ALTHAUS, R. A.; VIRGENS FILHO, J. S.; GIGLIOTI, E. A.; GODOY, C. V. SASM - Agri : Sistema para análise e separação de médias em experimentos agrícolas pelos métodos Scoft - Knott, Tukey e Duncan. **Revista Brasileira de Agrocomputação**, v.1, n.2, p.18-24, 2001.
- CARRIER, P.; BARYLA, A.; HAVAUX, M. Cadmium distribution and microlocalization in oil seed rape (*Brassica napus*) after long-term growth on cadmium contaminated. **Soil Plant**, Berlin, v.216, n.6, p.939– 950, 2003.
- CHANTACHON, S.; KRUATRACHUE, M.; POKETHITIYOOK, P. Phytoextraction and accumulation of lead from contaminated soil by vetiver grass: Laboratory and simulated field study. **Water, Air & Soil Pollution**, Netherlands, v.154, n.1-4, p.37-55, 2004.
- CONTE E CASTRO, A. M. C.; BOARETTO, A. E. Teores e acúmulo de nutrientes em função da população de plantas de canola. **Revista Scientia Agraria** v.5, n.1 p.95-101, 2004
- COUTINHO, H. D.; BARBOSA, A. R. Fitorremediação: Considerações gerais e características de utilização. **Silva Lusitana**, Oeiras, v. 15, n. 1, p. 103-117, 2007.
- CUNNINGHAM, S. D.; ANDERSON, T. A.; SCHWAB, A. P.; HSU, F. C. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. **Advances in agronomy**, v. 56, n. 1, p. 55-114, 1996.
- DA SILVA, J. O.; CANTARUTTI, R. B.; DE BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L.; ROCHA, F. A. Capacidade de troca catiônica radicular de gramíneas e leguminosas forrageiras na absorção de cátions. **Ministério da Educação Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia**, p. 60, 2009.
- DA SILVA, M.A.; GRIEBELER, N.P.; BORGES, L.C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 108-114, 2007.

DE LIMA JUNIOR, J. A. ; SILVA, A. L. P. Estudo do processo de salinização para indicar medidas de prevenção de solos salinos. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.6, n.11, p. 1-21, 2010.

DE LUCENA TAVARES, S. R.; DE OLIVEIRA, S. A.; SALGADO, C. M.. Avaliação de espécies vegetais na fitorremediação de solos contaminados por metais pesados. **Holos**, Natal, RN, v. 5, p. 80-97, 2013.

DE QUEIROZ, S. O. P.; TESTEZLAF, R.; MATSURA, E. E. Avaliação de equipamentos para determinação da condutividade elétrica do solo. **Irriga**, Botucatu, v. 10, n. 3, p. 279-287, agosto-outubro, 2005.

DE SOUZA, E. P.; DA SILVA, I. F.; FERREIRA, L. E **Current Agricultural Science and Technology**, Pelotas, v. 17, n. 2, 2011.

DIAS, N. D. S.; DUARTE, S. N.; MEDEIROS, J. D.; TELES FILHO, J. F. Salinidade e manejo da fertirrigação em ambiente protegido. II: Efeitos sobre o rendimento do meloeiro. **Irriga**, Botucatu, v. 11, n. 3, p. 376-383, 2006.

DIAS, N. S. **Evolução da salinidade de um solo Luvisolo cultivado com melão irrigado por gotejamento**. 2001.72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2001.

DIAS, N. S. **Manejo da fertirrigação e controle da salinidade em solo cultivado com melão rendilhado sob ambiente protegido**. 2004. 55 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

DIAS, N. S.; DUARTE, S.N.; TELES FILHO, J.F.; YOSHINAGA, R. T. Salinização do solo por aplicação de fertilizantes em ambiente protegido. **Irriga**, Botucatu, v.12, n.1, p.135-143, 2007.

DO CARMO ALVES, J.; DE SOUZA, A.P.; PÔRTO, M.L.; DE ARRUDA, J.A.; ARAÚJO, U.T.J.; DA SILVA, G.B.; ARAÚJO, R.D.C.; SANTOS, D. Absorção e distribuição de chumbo em plantas de vetiver, jureminha e algaroba. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 3, p. 1329-1336, 2008.

DO CARMO ALVES, J.D.C.; DE SOUZA, A.P.; PÔRTO, M.L.; DE ARRUDA, J.A.; ARAÚJO, U.T.J.; DA SILVA, G.B.; ARAÚJO, R.D.C.; SANTOS, D. Absorção e distribuição de chumbo em plantas de vetiver, jureminha e algaroba. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1329-1336, 2008.

ELOI, W. M.; DUARTE, S. N.; SOARES, T. M. Níveis de salinidade e manejo da fertirrigação sobre características do tomateiro cultivado em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 2, n. 01, p. 83-89, 2007.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: 1997. 212p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília/DF: Embrapa Produção de Informação, 2013. 353p.

GIACHINI, C. F.; FERRAZ, M. V.. Benefícios da utilização de vinhaça em terras de plantio de cana-de-açúcar-revisão de literatura. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, v. 3, p. 1-15, 2009.

GRAY, B.; DRAKE, M.; COLBY, W. G. Potassium competition in grass-legume associations as a function of root cation exchange capacity. **Soil Science Society of America Journal**. Proc., v. 17, p. 235 - 239, 1953.

HINSINGER, P.; PLASSARD, C.; TANG, C.; JAILLARD, B. Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: a review. **Plant and soil**, v. 248, n. 1-2, p. 43-59, 2003.

KNUTESON, S. L.; WHITWELL, T.; KLAINE, S. J. Influence of plant age and size on simazine toxicity and uptake. **Journal of environmental quality**, v. 31, n. 6, p. 2096-2103, 2002.

KRONKA, S. N.; BANZATO, D. A. ESTAT: sistema para análise estatística versão 2. **Jaboticabal**: Funep, 1995.

KUSHIEV, H.; NOBLE, A. D.; ABDULLAEV, I.; TOSHBKOV, U. Remediation of abandoned saline soils using *Glycyrrhiza glabra*: A study from the Hungry Steppes of Central Asia. **International Journal of Agricultural Sustainability**, v. 3, n. 2, p. 102-113, 2005.

LAPERCHE, V.; LOGAN, T. J.; GADDAM, P.; TRAINA, S. J. Effect of appatite amendments on plant uptake of lead from contaminated soil. **Environmental Science and Technology**, Ohio, v. 31, n. 10, p. 2745-2753, 1997.

LOPES, C. A.; ZAMBOLIM, L.; REIS, A. Principais doenças de hortaliças cultivadas em ambiente protegido. In: BARBOSA, T. C. et al. **Ambiente protegido: olericultura, citricultura e floricultura**. Viçosa, MG: Empresa Júnior de Agronomia, p. 11-38, 2006.

MARQUES, A. P.; RANGEL, A. O.; CASTRO, P. M. Remediation of heavy metal contaminated soils: phytoremediation as a potentially promising clean-up technology. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 39, n. 8, p. 622-654, 2009.

MARQUES, M.; AGUIAR, C.R.C.; SILVA, J.J.L.S. Desafios técnicos e barreiras sociais, econômicas e regulatórias na fitorremediação de solos contaminados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.35, n. 1, p.1-11, 2011.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. New York: Academic, 1995. 874 p.

MEDEIROS, J. F. **Manejo da água de irrigação salina em estufa cultivada com pimentão**. Piracicaba, 1998. 152 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem)-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

MELO, É.E.C.D.; NASCIMENTO, C.W.A.D.; SANTOS, A.C.Q Solubility, phytoextraction and fractionation of heavy metals as a function of chelating agents applied to soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 30, n. 6, p. 1051-1060, 2006.

MELO, R.F.D.; DIAS, L.E.; MELLO, J.W.V.D.; OLIVEIRA, J.A.D. Potencial de quatro espécies herbáceas forrageiras para fitorremediação de solo contaminado por arsênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 2, p. 455-465, 2009.

NASCIMENTO, C. D.; ACCIOLY, A.; BIONDI, C. M. Fitoextração de metais pesados em solos contaminados: avanços e perspectivas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 6, p. 461-495, 2009.

NEWMAN, L. A.; DOTY, S. L.; GERY, K. L.; HEILMAN, P. E.; MUIZNIEKS, I.; SHANG, T. Q.; GORDON, M. P. Phytoremediation of organic contaminants: a review of phytoremediation research at the University of Washington. **Journal of Soil Contamination**, v. 7, n. 4, p. 531-542, 1998.

NICOCELLI, L. M.; NASCENTES, R.; LIMA, E. B. N. R.; SOARES, F. S. Sorção de potássio em amostras de solo submetidas à aplicação de vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 7, p. 754-760, 2012.

NUNES FILHO, J.; GUERRA, C.A.M.; SOUZA, A.R.; SÁ, V.A. L.; SOARES, M.J.C.C. **Qualidade da água de açudes, para fins de irrigação no sertão de Pernambuco**. ITEM - Irrigação e Tecnologia Moderna, Brasília, n.44, p.35-39, 1991.

PAPADOPOULOS, I.; FOLEGATTI, M. V. Fertirrigação: situação atual e perspectivas para o futuro. **Fertirrigação: citrus, flores, hortaliças**. Guaíba: Agropecuária, p. 11-154, 1999.

PAULINO, J.; ZOLIN, C.A.; BERTONHA, A.; S.L.FREITAS, P.; FOLEGATTI, M.V. Estudo exploratório do uso da vinhaça ao longo do tempo: I. Características do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 3, p. 244-249, 2011.

PEREIRA, A. C. C.; RODRIGUES, A. C. D.; SANTOS, F. S. D.; GUEDES, J. D. N.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B. D. Heavy metals concentration in tree species used for revegetation of contaminated area. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 43, n. 4, p. 641-647, 2012.

PILON-SMITS, E. Phytoremediation. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 56, n. 1, p. 15-39, 2005.

PIRES, F. R.; DE OLIVEIRA PROCÓPIO, S.; DE SOUZA, C. M.; DOS SANTOS, J. B.; SILVA, G. P. Adubos verdes na fitorremediação de solos contaminados com o herbicida tebuthiuron. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 19, n. 1, p. 92-97, 2006.

PROCÓPIO, S.D.O.; DO CARMO, M.L.; PIRES, F.R.; CARGNELUTTI FILHO, A.; BRAGA, G.; BARROSO, L.; SILVA, G.P.; DO CARMO, E.L.; BRAZ, A.J.B.P. Fitorremediação de solo contaminado com picloram por capim-pé-de-galinha-gigante

(*Eleusine coracana*). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.32, n. 6, p.2517-2524, 2008.

PURQUERIO, L. F.V.; TIVELLI, S. W.; DE MARIA, I.C.; ANDRADE, C. A.; WUTKE, E. B.; ROSSE, C. E.; OLIVEIRA, A. H. V. Produção de alface em estufa agrícola com solo salinizado após o cultivo de plantas extratoras de nutrientes. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 29, n. 2, S172-S180, 2011, CD-ROM.

QUEIROZ, J.E.; GONÇALVES, A.C.; SOUTO, J.S.; FOLEGATTI, M.V. Avaliação e monitoramento da salinidade do solo. In.: GHEYI, H.R.; QUEIROZ, J.E.; MEDEIROS, J.F. (Eds). **Manejo e controle da salinidade na agricultura irrigada**. Campina Grande: UFPB/SBEA, 1997. Cap. 3. p. 69-111,1997.

RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Boletim Técnico 100**. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2. ed. Campinas, Instituto Agrônomo, 285p. 1996.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S.; BATAGLIA, O.C. **Análise química de solos para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987, 170p.

RATHEESH, C. P.; ABDUSSALAM, A. K.; SALIM, N.;; PUTHUR, J. T. Distribution of Bio-accumulated Cd and Cr in two Vigna species and the Associated Histological Variations. **Journal of Stress Physiology & Biochemistry**, v. 6, n. 1, 2010.

ROGERS, H. B.; BEYROUTY, C. A.; NICHOLS, T. D.; WOLF, D. C.; REYNOLDS, C. M. Selection of cold-tolerant plants for growth in soils contaminated with organics. **Soil and Sediment Contamination**, v. 5, n. 2, p. 171-186, 1996.

ROMEIRO, S.; LAGÔA, A.M.M.A.; FURLANI, P.R.; ABREU, C.A.D.;PEREIRA, B.F.F. Absorção de Chumbo e potencial de fitorremediação de Canavalia ensiformes L. Bragantia, Campinas, v. 66, n. 2, p. 327-334, 2007.

SANTANA, M. J. D.; CARVALHO, J. D. A.; SILVA, É. L. D.; MIGUEL, D. D. S. Efeito da irrigação com água salina em um solo cultivado com o feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 27, n. 2, p. 443-450, 2003 .

SANTIBÁÑEZ, C.; VERDUGO, C.; GINOCCHIO, R. Phytostabilization of copper mine tailings with biosolids: implications for metal uptake and productivity of *Lolium perenne*. **Science of the Total Environment**, v. 395, n. 1, p. 1-10, 2008.

SCHNOOR, J. L.; DEE, P. E. Technology evaluation report: phytoremediation. **Technology evaluation report: phytoremediation**, Pittsburgh, Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, 37 p, 1997.

SILVA, A. O.; SILVA, Ê. F. F. E.; KLAR, A. E. Management of fertigation and soil salinity on beet crop growth. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, n. 2, p. 230-241, 2015.

SILVA, E.F.F. **Manejo da fertirrigação e controle da salinidade na cultura do pimentão utilizando extratores de solução do solo**. 2002. 136p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2002.

SILVA, L.F.; CANÔ, C.R.; SILVA, D. C.; BERMEJO, G. R.; MOREIRA, G. M. B.; GOMES, C. J. A.; GRACIANO, I.; CASTRO, A. M. C. Fitorremediação de solos com alta saturação por potássio, In: **IV Simpósio de Engenharia Rural**, 2013.

SOUZA, E.P.; SILVA, I.F.; FERREIRA, L.E. Mecanismos de tolerância a estresses por metais pesados em plantas **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v.17, n.2-4, p.167-173, 2011.

STANGHELLINI, C. Evapotranspiration in greenhouse with special reference mediterranean conditions. **Acta Horticulture**. Wageningen, n. 335, p. 296-304, 1993.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. São Paulo, Artmed, 2004.

TAVEIRA, J.A.M. O manejo de substratos na produção de hortaliças e flores. In: **Seminário internacional de cultivo protegido em hortaliças e flores**, 2000, Holambra. Resumos. Holambra (SP): Flortec Consultoria e Treinamento, p.1-10, 2000.

TEIXEIRA, C. M.; CARVALHO, G. J.; SILVA, C. A.; ANDRADE, M. J.B.; PAES, J. M. V. Nutrição mineral do feijoeiro sob influência de nitrogênio e palhadas de milho solteiro e consorciado com crotalária. **Fazu em Revista**. Uberaba, n. 7, p. 73-79, 2010.

TSUKAMOTO, T.; NAKANISHI, H.; KIYOMIYA, S. Mn translocation in barley monitored using a positron-emitting tracer imaging system. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v.52, n.6, p.717-725, 2006.

UNGARO, M. R. G.; DO LAGO, A. A.; MARIN, G. C. Efeito da vinhaça no desenvolvimento inicial de girassol, mamona e amendoim em casa de vegetação. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 3, p. 685-692, 2008.

VÖGELLI-LANGE, R.; WAGNER, G. J. Subcellular localization of cadmium and cadmium-binding peptides in tobacco leaves. **Plant Physiology**, Bethesda, v.92, n.4, p.1086-1093, 1990.

VOSE, J. M.; SWANK, W. T.; HARVEY, G. J.; CLINTON, B. D.; SOBEK, C. Leaf water relations and sapflow in eastern cottonwood (*Populus deltoides* Bartr.) trees planted for phytoremediation of a groundwater pollutant. **International journal of phytoremediation**, v. 2, n. 1, p. 53-73, 2000.

WONG, M. H. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. **Chemosphere**, v. 50, n. 6, p. 775-780, 2003.

WUTKE, E.B.; CALEGARI, A.; WILDNER, L.P.; AMABILE, R.F. Leguminosas alimentícias e adubos verdes. In: ALBUQUERQUE, A.C.S.; SILVA, A.G. (Ed.). **Agricultura tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas**. EMBRAPA Informação Tecnológica, Brasília, DF, v.1, p. 251-271, 2008.