

CAPÍTULO 6

Microrganismos simbiotes: fixação biológica de nitrogênio e recuperação de pastagens degradadas

Francielle Santana de Oliveira, Jéssica Delesposte Destefani, Letícia Rigo Tavares, José Carlos Venâncio da Páschoa, Aline Marchiori Crespo, Otávio Pereira Araujo, Priscilla Moreira Curtis Peixoto, Camila Barbiero Siqueira, Lucas Henrique Cortat, Maurício Novaes Souza

<https://doi.org/10.4322/mp.978-65-994457-2-9.c6>

Resumo

O nitrogênio (N_2) apresenta-se na atmosfera na forma gasosa, em concentração de 78%; contudo, é um dos nutrientes mais limitantes para as variadas formas de vida do planeta. No solo, o nitrogênio (N) encontra-se na forma orgânica, com apenas 2% disponível em forma de amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-), sendo que sua entrada no sistema solo-planta se dá principalmente pelo processo de fixação biológica de nitrogênio (FBN) e pela adubação nitrogenada, as quais facilitam a utilização deste elemento pelas plantas. As bactérias fixadoras, rizóbios ou diazotróficas, em associação com as plantas leguminosas, favorecem a conversão do N atmosférico em amônia (NH_3), permitindo, assim, a assimilação do N pelas plantas. As plantas leguminosas também agem como fitorremediadoras, absorvendo, imobilizando ou removendo metais pesados, a fim de que atuem de forma menos agressiva ao meio ambiente. Visando mitigar a degradação do solo e dos recursos naturais na atividade agropecuária, técnicas vêm sendo empregadas objetivando a recuperação de áreas degradadas, dentre as quais se podem citar o uso das bactérias fixadoras de nitrogênio. Essas bactérias são promotoras do crescimento vegetal, pois estimulam o crescimento da planta por meio de efeitos biofertilizantes e bioestimulantes, que aumentam a resistência às doenças e ao estresse, sendo uma alternativa para o manejo sustentável dos solos. Nesse sentido, esse capítulo aborda técnicas de utilização de bactérias diazotróficas simbióticas e como estas podem ser consideradas componentes fundamentais à disponibilização de nutrientes e à recuperação de pastagens degradadas ao proporcionar um maior acúmulo de nitrogênio na biomassa do solo e auxiliar na mitigação de elementos tóxicos ao solo.

Palavras-chave: Bactérias diazotróficas. Fitorremediação. Biofertilizantes. Bioestimulantes.

1. Introdução

O nitrogênio (N) é um nutriente que possui importante função como integrante da molécula de clorofila, sendo essencial para o crescimento das plantas: é parte de cada célula viva, constituindo moléculas de proteína, enzimas, ácidos nucleicos e citocromos (BÜLL, 1993). Na atmosfera se apresenta em sua forma gasosa (N_2), em concentrações de 78%; entretanto, é um dos nutrientes mais limitantes às diversas formas de vida do planeta (COSTA NETO, 2016). Contudo, no solo, encontra-se em sua forma orgânica, com apenas 2% disponível em forma de amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-), sendo que sua entrada no sistema solo-planta ocorre principalmente pelo processo de fixação biológica de nitrogênio (FBN) e pela adubação nitrogenada, as quais facilitam a utilização deste elemento pelas plantas (MENEZES, 2019).

Atualmente, os adubos químicos representam uma das principais fontes de nitrogênio utilizada nos sistemas de produção agrícolas, sendo a ureia e o sulfato de amônio os fertilizantes nitrogenados mais usados pelos agricultores. Todavia, uma vez que estes fertilizantes estão sujeitos às perdas por lixiviação, escoamento superficial, volatilização da amônia (ureia) ou imobilização na biomassa microbiana (ALVA *et al.*, 2005), o uso das bactérias diazotróficas se apresenta como uma alternativa à diminuição ou até à substituição destes fertilizantes nas culturas agrícolas (LIMA *et al.*, 2017).

As bactérias diazotróficas fixadoras de N ou rizóbios pertencem ao gênero *Rhizobium* e habitam os solos, atuando como fixadoras de N, através da conversão do N_2 em amônia (NH_3), o que permite a assimilação do N pelas plantas (SILVA, 2010). Este processo somente é possível com a simbiose ou relação de mutualismo destas bactérias com plantas leguminosas, em que são formados nódulos nas raízes (MOREIRA *et al.*, 2010), os quais abrigam os rizóbios - que por sua vez, além de executarem a fixação do nitrogênio atmosférico (SPRENT; ARDLEY; JAMES, 2017), favorecendo o crescimento vegetal (APONTE *et al.*, 2017); atuam também como agentes de controle biológico (CIPRIANO; PATRÍCIO; FREITAS, 2013; SANTOS, 2016).

A família das fabáceas constitui um grupo com elevada capacidade de adubação verde ao solo, pois absorve grandes quantidades de nitrogênio em seus tecidos vegetais, disponibilizando-o às plantas (ESPINDOLA *et al.*, 2005).

Apresenta resultados satisfatórios na recuperação de solos degradados (NOGUEIRA *et al.*, 2012) e melhora a qualidade dos solos pobres (FÁVERO; LOVO; MENDONÇA, 2008), atuando na proteção física, conseqüentemente favorecendo a infiltração da água e mantendo a umidade, além de controlar as amplitudes térmicas nos solos (DANTAS *et al.*, 2019).

Outro benefício importante dessa simbiose a ser citado, é a sua capacidade de fitorremediação, imobilizando, removendo ou absorvendo os compostos tóxicos dos metais pesados na estrutura vegetal, de modo que estes ajam de forma menos agressiva ao meio ambiente (ELIAS; BALDANI; BERBARA, 2018; RODRIGUES; ORLANDELLIB, 2018).

Neste sentido, esse capítulo aborda a aplicação de técnicas utilizando bactérias diazotróficas simbióticas e como estas podem ser consideradas componentes fundamentais à disponibilização de nutrientes, bem como à recuperação de pastagens degradadas ao proporcionar um maior acúmulo de nitrogênio na biomassa do solo e auxiliar na mitigação de elementos tóxicos ao solo.

2. Bactérias diazotróficas e a contribuição em pastagens degradadas

No Brasil, estima-se que 50% das áreas de pastagens estejam degradadas (MACEDO *et al.*, 2014). Dada essa condição, tendo em vista a forte demanda do setor agropecuário em relação a tecnologias sustentáveis, a Embrapa Agrobiologia vem atuando nesse assunto a partir de duas linhas de pesquisa: uso de microrganismos para promoção de crescimento de diferentes forrageiras e utilização de práticas que estimulem o aumento dos níveis de matéria orgânica do solo, a partir da introdução de leguminosas. Apesar de serem importantes para os sistemas agropecuários no país, dos 200 milhões de hectares existentes, considera-se que cerca de 130 milhões estejam degradadas, necessitando de alguma intervenção para reverter o estado em que se encontram (EMBRAPA, 2020).

Os principais fatores de degradação dos solos das pastagens estão ligados à ação antrópica, à degradação da cobertura vegetal e ao manejo incorreto, os quais contribuem com as mudanças dos fatores físicos, químicos e biológicos do solo, tal como a diminuição da disponibilidade dos nutrientes

devido à mineralização da matéria orgânica do solo (COSTA *et al.*, 2015) (Figura 1).



Figura 1. Áreas degradadas por pastagens. Fonte: Arquivo pessoal (2019).

Todavia, para alcançar resultados positivos na recuperação de pastagens degradadas é fundamental saber escolher as espécies de plantas forrageiras que serão utilizadas. Na Figura 2 observa-se uma área de pastagem degradada no IF Sudeste de Minas - Campus Rio Pomba sendo preparada para testar diferentes gramíneas e adubações.



Figura 2. Pastagem degradada no IF Sudeste de Minas campus Rio Pomba. Fonte: Arquivo pessoal (2013).

As gramíneas se adaptam às diferentes condições edafoclimáticas (Figura 3), sendo importantes na nutrição do solo, proteção e recuperação de áreas degradadas (FABRICE *et al.*, 2015). Já as leguminosas, por sua vez, apresentam um desempenho favorável associadas com as bactérias fixadoras de N, se comparadas com outras famílias de vegetais (FREITAS *et al.*, 2010). De acordo com Longo *et al.* (2011) e Jack; Braz; Martuscello (2013), as leguminosas se destacam como espécies de grande potencial para inserção em áreas com pouca ou nenhuma resiliência, por apresentarem fácil adaptabilidade aos solos, fixação biológica de nitrogênio atmosférico no solo, tolerância às variações edafoclimáticas, maior produção de biomassa seca e rápido crescimento vegetativo.



Figura 3. Área de pastagem recuperada no IF Sudeste de Minas campus Rio Pomba. Fonte: Arquivo pessoal (2011).

O nitrogênio é indispensável ao desenvolvimento vegetal, sendo constituinte de uma variedade de biomoléculas atuando nos compostos orgânicos que constituem a estrutura da planta (TAIZ; ZEIGER, 2013). Um dos principais fatores que afeta o crescimento e a persistência de gramíneas nos trópicos, aumentando assim a degradação das pastagens, é a deficiência de nitrogênio no solo. Há de se considerar, entretanto, que os fertilizantes nitrogenados oneram muito os custos de produção: com a demanda por

alimentos crescente, tem-se enfatizado a necessidade de alternativas sustentáveis, tal como a fixação biológica de nitrogênio.

Assim, fazem-se necessárias pesquisas com Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) em gramíneas forrageiras, principalmente sobre diversidade de bactérias diazotróficas associadas a essas plantas, para que novas bactérias possam ser descobertas, assim como seu potencial de FBN. As bactérias fixadoras de nitrogênio são promotoras do crescimento vegetal, estimulando o crescimento da planta por meio de efeitos biofertilizantes e bioestimulantes, os quais aumentam a resistência a doenças e ao estresse (STURZ; NOWAK, 2000), apresentando-se, assim, como uma alternativa para o manejo sustentável dos solos (GLIESSMAN, 2001).

A utilização de efluentes da suinocultura tem apresentado bons resultados na recuperação de pastagens. A Figura 4 apresenta uma pastagem que recebeu doses diferenciadas de efluentes da Suinocultura em Ponte Nova, MG. Observa-se a tonalidade verde-escuro dos locais que receberam maior volume do efluente. A tonalidade mais escura das gramíneas evidencia o efeito do N para o desenvolvimento das gramíneas.



Figura 4. Diferentes tonalidades de gramínea em função do volume de efluente aplicado. Fonte: Arquivo pessoal (2013).

Nesse contexto, visando mitigar a degradação do solo e dos recursos naturais na atividade agropecuária, diversas técnicas vêm sendo empregadas objetivando a recuperação de áreas degradadas, com a utilização de bactérias fixadoras de nitrogênio. A fixação de N é de grande importância para os tecidos vegetais, pois na falta desse nutriente ocorre à redução da produção, efeitos na síntese de proteínas e fotossíntese, acarretando prejuízos agrícolas (LOPES *et al.*, 2013; SKONIESKI *et al.*, 2017). Além disso, a fixação biológica do nitrogênio por bactérias diazotróficas (Figura 5) é uma estratégia de manejo que vem ganhando destaque: apresenta-se como uma alternativa viável para reduzir o uso de adubação com fertilizantes nitrogenados, além de apresentar baixo custo econômico (SANDINI *et al.* 2011).

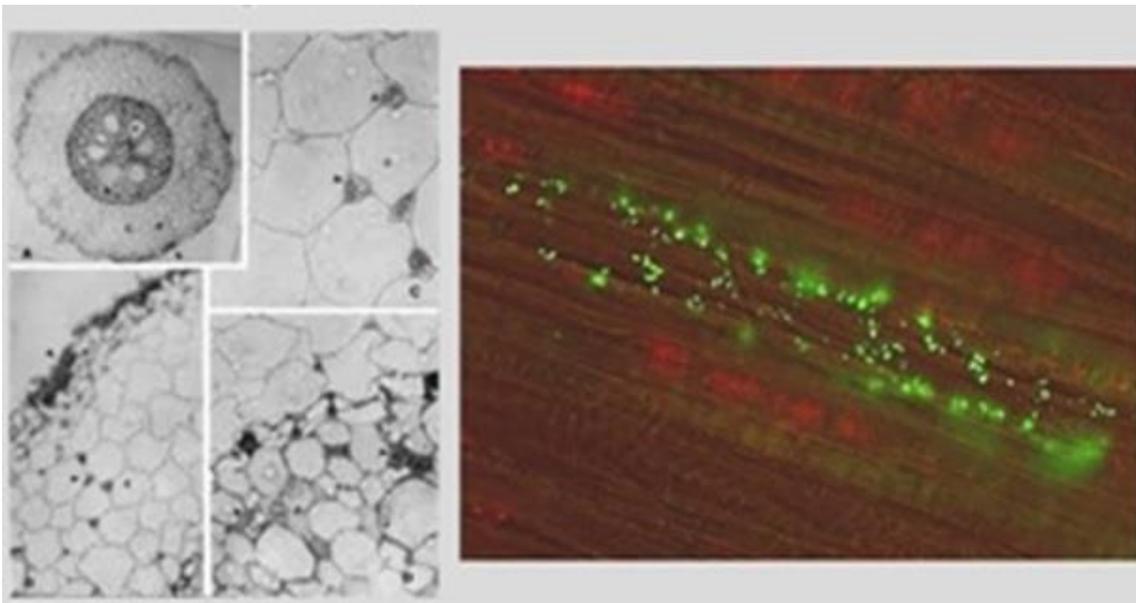


Figura 5. Bactérias diazotróficas. Fonte: EMBRAPA (2020).

Existem diversas culturas que são beneficiadas com a inoculação das bactérias. Sampaio (2013) analisando a inoculação de estirpes na cultura do milho observou melhor desenvolvimento e altos índices de produção em comparação com as plantas não inoculadas. Outros autores acharam resultados semelhantes ao uso da inoculação dos esporos das bactérias em culturas da região do semiárido, obtendo resultados significativos em até 40% nas culturas de maracujá e sorgo (SILVA *et al.*, 2015).

Hungria *et al.* (2010) e Vogel *et al.* (2013) estudando a eficiência da inoculação da bactéria *Azospirillum brasilense*, em milho, trigo e arroz, destacaram o aumento significativo no acúmulo de matéria seca, altura, taxa de germinação e nas raízes, beneficiando maior acúmulo de biomassa e, conseqüentemente, a produtividade final nos plantios.

Entretanto, são diversos os fatores que interferem na colonização das bactérias, os quais podem interferir no insucesso da sua utilização. A escolha da estirpe bacteriana é importante para o desenvolvimento da inoculação (HUNGRIA *et al.*, 2010), uma vez que algumas estirpes possuem especificidade para leguminosas, sendo comum encontrar bactérias fixadoras bem desenvolvidas em uma determinada leguminosa e em outra observar menor nodulação e fixação de N₂ (FRANCO; FARIA, 1997).

Outros fatores que podem interferir negativamente no desenvolvimento bacteriano são baixas concentrações de potássio (K) e altas temperaturas no solo (HUNGRIA; VARGAS, 2000), provocando a redução da população de bactérias fixadoras, o tamanho dos nódulos e a capacidade de fixação de N (ARAUJO; GUALTER, 2017). A textura do solo, a espécie vegetal, assim como o ciclo da cultura implantada, também pode influenciar no uso do inoculante (FREITAS *et al.*, 2019).

Norris (1969) observou que algumas espécies florestais coletadas em solos argilosos não apresentavam nódulos, diferentemente de espécies cultivadas em solos arenosos; Schultz *et al.* (2016) avaliando uma plantação de cana-de-açúcar com duas variedades distintas, em dois diferentes tipos de solo, em um período de três anos consecutivos sob três tratamentos (sem adubação, sem adubação com inoculação e apenas com adubação de 120kg de nitrogênio ha⁻¹), averiguaram que a inoculação beneficiou a produção apenas em uma das cultivares e em solo menos argiloso.

Quanto a espécie vegetal, plantas do gênero *Stylosanthes* associadas às bactérias do gênero *Rhizobium* são muito difundidas nas pastagens brasileiras devido as suas vantagens, tais como o crescimento rápido, a elevada produção de biomassa, a boa resistência às condições adversas, a abundância de sementes e o fácil cultivo, tornando-a uma ótima escolha em programas de recuperação de áreas degradadas (XINGFENG *et al.*, 2010). Em sistemas silvipastoris as leguminosas são comumente empregadas por

apresentarem maior produção de serapilheira, e se adaptarem facilmente às condições ambientais e físicoquímicas do solo (ACENÓLAZA *et al.*, 2010).

Desta forma, justifica-se a utilização das bactérias fixadoras de N com objetivo de auxiliar no restabelecimento de pastagens degradadas, fornecendo condições de equilíbrio e sustentabilidade ao ecossistema. A adoção desta prática por produtores rurais visa recuperar a fertilidade do solo e a qualidade das pastagens, com a crescente diminuição da dependência por adubações nitrogenadas.

3. Bactérias diazotróficas fitorremediadoras

As atividades agrícolas constituem uma das principais fontes não pontuais de poluição por metais. Neste ramo, o uso de agroquímicos sintéticos se destaca muitas das vezes, por possuírem resíduos de metais pesados em sua composição (Pb, Al, Cd, Cu, Fe, Zn, Ni, Mn, Cr). Quando usados em cultivos, esses produtos podem afetar os solos e também alcançar os corpos hídricos via água de chuva ou mesmo de irrigação, ou indiretamente através da percolação no solo, alcançando aos lençóis freáticos (ARIAS *et al.*, 2007).

Por meio de outras atividades antrópicas, tais como práticas de mineração e deposição de resíduos urbanos e, ou, industriais, os metais pesados também são incorporados ao solo. A extração mineral, por exemplo, produz grandes quantidades de rejeitos, podendo-se destacar o manganês (Mn), que em grandes concentrações no solo pode causar toxidez e alterações nos vegetais (YANG *et al.*, 2015). Neste sentido, a busca por alternativas que minimizem este tipo de impacto tem se tornado uma preocupação ambiental constante.

Como estratégia favorável para lidar com os efeitos dos metais pesados no sistema solo-planta, o uso de algumas espécies vegetais limita a absorção desses elementos do solo, impedindo a sua entrada através do sistema radicular (VIEHWEGGER, 2014). De acordo com Ojuederie; Babalola (2017), as plantas possuem mecanismos que lhes conferem adaptabilidade ao estresse aos metais pesados, absorvendo e transportando pelas suas raízes e retendo nas fibras do caule, raiz e folhas a fração disponível do elemento no solo. Cabe ressaltar que as formas de fitorremediação dos metais tóxicos são: fitoestimulação, fitoextração, fitovolatilização, fitoestabilização (RAHMAN *et al.*,

2016). Contudo, neste trabalho dar-se-á ênfase ao uso exclusivo da fitorremediação.

A fitorremediação se caracteriza pela utilização de plantas que possuem capacidade de absorção de contaminantes do substrato, promovendo a descontaminação de solos e águas contaminadas por metais pesados (AMADO; CHAVES FILHO, 2015), principalmente por Pb, Ni, Zn, Cu, Se e Cs (BRAUN *et al.*, 2020). Alguns desses metais se apresentam como fundamentais ao desenvolvimento das plantas; entretanto, outros elementos não possuem função específica, sendo tóxicos em qualquer concentração no solo (TAVARES, 2013).

A vantagem do uso dessa técnica está atrelada ao seu baixo custo e a facilidade no monitoramento das plantas, podendo ser implementada em áreas de grande extensão, estimulando a diversidade dos organismos de solo (VASCONCELLOS; PAGLIUSO; SOTOMAIOR, 2012). Na recuperação de áreas degradadas por mineração, as plantas leguminosas demonstram potencial fitorremediador quando inoculadas com microrganismos fixadores: essa associação promove fixação de nitrogênio atmosférico (N₂), e uma grande incorporação de N ao solo (MENDES FILHO *et al.*, 2010; GARCIA *et al.*, 2016). De acordo com Souza (2018), o processo de revegetação ficará facilitado e a recuperação autossustentada.

A associação de plantas com bactérias diazotróficas fixadoras de nitrogênio tem promovido estudos sobre seu uso da fitorremediação de metais pesados no solo (CAMARGO; BISPO; SENE, 2015). Elias, Baldani e Berbara (2018), em experimento com *poáceas* (ou plantas da família Poaceae), afirmaram que a *Brachiaria decumbens* pode ser utilizada na recuperação de áreas contaminadas, devido à compatibilidade que apresenta quando em associação a essas bactérias. Já em estudo com leguminosas inoculadas com rizóbios no estado de Minas Gerais em áreas degradadas, Chaer *et al.* (2011) relataram sucesso na revegetação em áreas contaminadas por hematita.

Conforme exposto, a fitorremediação pode ser favorecida tanto por espécies de interesse agrônômico, quanto silvicultural, facilitando a implantação das culturas em áreas extensivas de produção (Tabela 1).

Tabela 1. Plantas que apresentam potencial fitorremediador de metais pesados.

| Plantas | Autores | Poluentes | Resultado |
|---|---|-------------------------------|---|
| Feijão de corda (<i>Vigna unguiculata</i> L.) | CHANDRA <i>et al.</i> , 2010; GONÇALVES <i>et al.</i> , 2014 | Cr, Cd, Ni, Pb | Potencial fitorremediador |
| Mamona (<i>Ricinus communis</i> L.) | ANDREAZZA e CAMARGO, 2011 | Cu | Potencial de fitoacumulação |
| Capim-mombaça (<i>Panicum maximum</i>) | SILVA, 2012; OLATUNJI <i>et al.</i> , 2014 | Cd, Co, Cu, Fe, Ni e Pb | Potencial para bioacumulação para todos os metais |
| Camará (<i>Lantana câmara</i>) | SILVA, 2012; ALARIBE e AGAMUTHU, 2015 | Pb | Potencial para fitorremediação |
| Crotalaria (<i>Crotalaria spectabilis</i>) | LINDINO; TOMCZAK; GONÇALVES JUNIOR, 2012 | Pb e Cd | Fitorremediação de Pb na parte aérea |
| Vetiver (<i>Vetiveria zizanioides</i> L.), Feijão-de-porco (<i>Canavalia ensiformis</i> L.); Singônio (<i>Syngonium angustatum</i>); Embaúba (<i>Cecropia</i> sp.); Orelha de elefante (<i>Alocasia macrorrhiza</i>) e Girassol (<i>Helianthus annuus</i>) | BATISTA, 2013 | Pb | Potencial fitorremediador |
| Amendoim (<i>Arachis hypogaea</i> L.) | LIMA <i>et al.</i> , 2013 | Cd e Pb | Potencial fitorremediador |
| <i>Brachiaria decumbens</i> , <i>Brassica juncea</i> | MARTINEZ; CRUVINEL; BARATTO, 2013 | Cr, Ni, Pb e Zn | Potencial fitorremediador |
| Angico-vermelho (<i>Anadenanthera macrocarpa</i>) Bracatinga (<i>Mimosa</i> | SILVA <i>et al.</i> , 2015 | Cu | Elevada tolerância e potencial fitorremediador |

| | | | |
|---|-------------------------------|----|--|
| <i>scabrella</i>) | | | |
| Crisântemo (<i>Dendranthema grandiflora</i> Tzevelev) | MENEGAES, 2017 | Cu | Potencial fitorremediador |
| Paricá (<i>Schizolobium amazonicum</i> Huber ex. Ducke) | NOGUEIRA <i>et al.</i> , 2019 | Cd | Potencial fitorremediador do sistema radicular |

Fonte: elaborada pelos autores.

O *Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke, o Paricá, é uma espécie nativa da Amazônia, bem difundida em projetos de reflorestamento, representando área de cultivo de 90 mil hectares no Brasil (GOMES *et al.*, 2019). Nogueira *et al.* (2019) estudando esta espécie, averiguaram que ela pode ser benéfica à fitorremediação, pois foi capaz de acumular cádmio em suas raízes, de forma que age imobilizando os contaminantes no solo por meio de atividades enzimáticas antioxidantes e compartimentalização do elemento com íons dos tecidos vegetais (LIANG *et al.*, 2015; GARG; SINGH, 2018).

Conforme exposto, a fitorremediação pode ser favorecida tanto por espécies de interesse agrônomo, quanto silvicultural, facilitando a implantação das culturas em áreas extensivas de produção. Pode se tornar ainda mais interessante e vantajosa quando utilizada em associação com plantas que reúnem capacidade remediadora às características desejáveis do ponto de vista agrônomo e agrossilviculturais, como rápido crescimento, fácil controle, propagação ou erradicação. Além disso, é importante citar que essa prática também é benéfica ao ecossistema, apresentando baixa interferência no mesmo e prevenindo erosão do solo e perdas por lixiviação via escoamento das águas superficiais.

4. Adubação verde e fixação de nitrogênio

As atividades agrícolas ao longo do tempo vêm colaborando com a intensificação da degradação dos solos e a perda da fertilidade, principalmente pela implantação de monocultivos, que adotam manejos incorretos, como a substituição da cobertura do solo e outras práticas que podem levar a exaustão

da fertilidade, porosidade e capacidade de armazenamento de água (MOURA; LACERDA; RAMOS, 2013). Diante deste contexto, a recuperação desses sistemas se torna de grande importância para produção e manutenção do agroecossistema (SOUZA, 2018; BENEDETTI, 2019).

Para isso, considera-se fundamental a prática de atividades que proporcionem a nutrição ao solo, como a fixação biológica de nitrogênio, bem como o uso de fertilizantes de fácil disponibilidade ao produtor rural (CAMARGO *et al.*, 2012). O uso de leguminosas tem sido visto como opção promissora para a recuperação de áreas degradadas, sendo importante para atividades agrônomicas e silviculturais, por auxiliar na incorporação do nitrogênio no solo, proporcionar cobertura ao solo e apresentar pouca dependência de insumos externos (MOURÃO; KARAM; SILVA, 2011).

De acordo com Calegari (2008), o solo com cobertura vegetal possui maior proteção física. Proporciona, dentre outros benefícios, a diminuição da sua temperatura, causando menor estresse às plantas, visto que em solos com temperaturas acima de 33°C, elas possuem menor capacidade de absorção de água e nutrientes devido às maiores perdas por evapotranspiração.

O consórcio na implantação de cobertura do solo (Figura 6) é uma técnica promissora na melhoria da produtividade das culturas de interesse (XAVIER *et al.*, 2013). Além de melhorar a capacidade produtiva, a presença de leguminosas permite a fixação simbiótica de nitrogênio (DUCHENE; VIAN; CELETTE, 2017), sendo a capacidade de simbiose com bactérias fixadoras de N o principal benefício decorrente dessas espécies como cobertura verde do solo (SAGRILO *et al.*, 2009). As diversificações das espécies implantadas aumentam a produção de biomassa, possibilitando a menor perda de solo por lixiviação e processos erosivos, sendo significativa na manutenção dos nutrientes (KAHMEN *et al.*, 2006).

Sousa *et al.* (2016), em estudos utilizando feijão-de-porco como adubo verde, no município de Viçosa-MG, averiguaram que o uso dessa planta no pré-plantio aporta consideráveis quantidades de N por meio da sua fixação ao agroecossistema, aumentando a produtividade do próximo cultivo. Gallo *et al.* (2015), na região do Mato Grosso do Sul, observaram índices consideráveis de aporte de N no solo devido o cultivo de feijão comum em consórcio com feijão-de-porco e a crotalária, resultando em maior produção de grãos. Xavier *et al.*

(2013) ressaltaram que o feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* L) e a crotalária (*Crotalaria juncea* L.), são as leguminosas que mais se destacam no consórcio, apresentando alto volume de produção de biomassa e, conseqüentemente, cobertura do solo e a fixação de N via simbiose.



Figura 6. Uso de milho + crotalária como planta de cobertura de solo: INCAPER - Domingos Martins, ES Fonte: Crespo (2021).

Sabe-se que a agricultura familiar tem papel fundamental na produção agrícola, sendo a principal responsável pelo abastecimento de alimentos ao mercado interno. Entretanto, nem todos os produtores utilizam as práticas conservacionistas voltada aos princípios agroecológicos (BARBOSA; MATTOS; FERREIRA, 2015; ARAÚJO *et al.*, 2018). Sendo assim, as práticas agroecológicas por intermédio dos adubos verdes, atuam como opções para maior produção aliada à qualidade do solo e da planta, além do aumento da produtividade e maior diversificação, causando impacto positivo na renda do produtor (BARBOSA JÚNIOR *et al.*, 2017).

Na Tabela 2 são apresentadas as principais espécies para utilização como adubo verde. Dentre as espécies relacionadas estão a *Crotalaria juncea*, o guandu, o feijão-de-porco e a mucuna preta e cinza. O trigo, sorgo e milho são favoráveis ao complemento e diversidade da renda do produtor, além de

beneficiar o solo com a produção de biomassa e de haver a possibilidade de incorporar nitrogênio.

Tabela 2. Principais espécies para utilização na adubação verde

| Nome Comum | Nome Científico | Família Botânica | Massa verde (t ha ⁻¹) | Massa seca (t ha ⁻¹) | Relação C/N | N fixado (kg ha ⁻¹ ano ⁻¹) |
|------------------------|-------------------------------|------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------------|---|
| Crotalária júncea | <i>Crotalaria Juncea</i> | Leguminos a | 21 a 60 | 10 a 15 | 17 a 19 | 150 a 450 |
| Crotalária spectabilis | <i>Crotalaria spectabilis</i> | Leguminos a | 20 a 30 | 04 a 06 | -- | 60 a 120 |
| Feijão-de-porco | <i>Canavalia ensiformis</i> | Leguminos a | 22 a 40 | 05 a 08 | 10 a 16 | 49 a 190 |
| Guandu | <i>Cajanus cajan</i> | Leguminos a | 22 a 90 | 02 a 12 | 15 a 22 | 37 a 280 |
| Milheto | <i>Pennisetum glaucum</i> | Gramínea | 20 a 40 | 08 a 12 | 30 a 43 | -- |
| Milho | <i>Zea mays</i> | Gramínea | 20 a 30 | 06 | 50 a 54 | -- |
| Mucuna-anã | <i>Mucuna deeringiana</i> | Leguminos a | 10 a 20 | 02 a 04 | 12 a 20 | 50 a 100 |
| Mucuna-preta | <i>Mucuna atemima</i> | Leguminos a | 29 a 50 | 06 a 09 | 12 a 21 | 120 a 210 |
| Mucuna-cinza | <i>Mucuna cinérea</i> | Leguminos a | 25 a 50 | 05 a 08 | 10 a 22 | 120 a 210 |
| Sorgo | <i>Sorghum spp</i> | Gramínea | 28 a 56 | 01 a 10 | -- | -- |
| Trigo | <i>Triticum aestivum</i> | Leguminos a | 10 a 14 | 1,5 a 04 | -- | -- |
| Ervilhaca | <i>Vicia sativa</i> | Leguminos a | 05 a 10 | 02 a 03 | 22 | -- |

Fonte: Adaptado de Wutke; Ambrosano (2007).

Souza *et al.* (2018) avaliaram algumas espécies viáveis para fins de adubação verde na região Serrana do Espírito Santo, tais como: milheto, *Crotalaria juncea* e *Crotalaria ochroleuca*. Constataram o maior incremento de biomassa, beneficiando a formação e manutenção de camada protetora no sistema plantio direto, além de teores de N maiores. Contudo, ressaltaram a necessidade de adequar a escolha das espécies aos diagnósticos das áreas e às peculiaridades de cada espécie.

Crespo (2021), na avaliação de produtividade de matéria verde e seca das plantas de cobertura (SC – Sistema convencional sem palha; SO – Sistema orgânico sem palha; G – SPD orgânico com palha de gramínea; L – SPD orgânico com palha de leguminosa; G + L – SPD orgânico com palha de gramínea + leguminosa), observou-se que para o peso verde houve diferença estatística entre as médias dos tratamentos, sendo que o tratamento G+L (SPD orgânico com palha de gramínea + leguminosa) foi superior ao tratamento L (SPD orgânico com palha de leguminosa), mas não diferenciou de G (SPD orgânico com palha de gramínea). Para peso seco, no entanto, não foram observadas diferenças entre os tratamentos estudados (Tabela 3).

Tabela 3. Médias das características peso verde e peso seco das plantas de cobertura

| Tratamento | Peso Verde (kg/ha) | | Peso Seco (kg/ha) | |
|---------------|--------------------|-------|-------------------|-------|
| | Média | Letra | Média | Letra |
| L | 31.566,7 | b | 9.417,3 | a |
| G + L | 50.466,7 | a | 12.372,6 | a |
| G | 42.666,7 | ab | 11.282,7 | a |
| Média | 41.566,7 | | 11.024,2 | |
| CV (%) | 28,47 | | 24,44 | |

* Médias seguidas de uma mesma letra na vertical não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. G – SPD orgânico com palha de gramínea; L – SPD orgânico com palha de leguminosa; G + L – SPD orgânico com palha de gramínea + leguminosa.

Fonte: Crespo (2021).

Nesse sentido, considerando os desafios apresentados, o uso de plantas de cobertura passa por geração de conhecimentos e adaptação local. Têm potencial de utilização em rotação de culturas para a produção de biomassa e cobertura de solo, beneficiando o produtor rural e diversificando o sistema de produção. Também apresenta como benefícios a produção de matéria orgânica, aumento do número de microrganismos simbiotes e das taxas de nutrientes nas camadas do solo.

4.1. Adubação verde na agroecologia

Dentre os recursos naturais, o solo é uma das estruturas mais atingidas pela ação antrópica devido ao manejo inadequado, práticas agrícolas irregulares, pastejo intensivo e desmatamento, que provocam alterações nos ecossistemas e modificam os fluxos naturais (SPAROVEK *et al.*, 2010), tornando necessário a adesão às práticas agrícolas que visem à sustentabilidade e à diminuição da degradação das áreas (CAVALCANTE *et al.*, 2012).

A adubação verde é uma técnica que consiste na utilização da biomassa vegetal das plantas cultivadas no local, ou provenientes de outra localidade, com a finalidade de proteger e auxiliar na fertilidade do solo (CALEGARI *et al.*, 1993; BATISTA *et al.*, 2013), além de contribuir com a melhoria das qualidades físicas, químicas e biológicas do solo (NASCIMENTO *et al.*, 2005).

Ademais, o uso dessa técnica permite melhor proteção da superfície, protegendo contra lixiviação e processos erosivos (MACHADO; NASS; MACHADO, 2011), proporcionando por meio do incremento da biomassa radicular e foliar, a introdução de microrganismos (SILVA *et al.*, 2014; WUTKE *et al.*, 2014). Incorporar o nitrogênio atmosférico ao solo induz o menor aparecimento de plantas espontâneas e insetos considerados pragas, bem como fitonematoides (CARVALHO *et al.*, 2014), e conseqüentemente favorece melhorias na produção e qualidade dos alimentos (MONTEIRO *et al.*, 2018).

O uso dos princípios agroecológicos no desenvolvimento agrícola é uma alternativa sustentável para a conservação dos solos, adotando práticas que auxiliam na fertilidade e proteção dos mesmos, como a compostagem e a adubação verde. Essas técnicas são mais naturais e menos agressivas se

comparadas ao modelo de produção convencional (SOUZA, 2018; FORMENTINI, 2019).

Entretanto, para a implantação dessa técnica a escolha da espécie é de fundamental importância, visto que cada espécie possui características particulares, como fixação de nitrogênio, maior produção de biomassa e maior cobertura do solo - fatores estes que resultam na melhoria do sistema (BARRADAS, 2010).

O Sistema Plantio Direto (SPD) se apresenta como uma ferramenta eficiente na conservação do solo e da água. Entretanto, a impossibilidade de utilização de herbicidas na sua implantação em agricultura orgânica é um dos grandes desafios da atualidade para a pesquisa. Diante deste contexto, apresenta-se como opção para sanar este problema a implantação de rotação de culturas com plantas que apresentem alta produção de matéria vegetal para cobrir o solo, na forma de adubação verde com gramíneas e leguminosas (CRESPO, 2021).

As espécies mais utilizadas para essa destinação são as leguminosas (*Fabaceae*) e gramíneas (*Poaceae*), visto que estas apresentam relações simbióticas com bactérias fixadoras de nitrogênio, sendo favorável para culturas subsequentes. Além do mais, tais espécies possuem rápida decomposição e extração de nutrientes nas camadas profundas, devido seu sistema radicular extenso (SILVA *et al.*, 2014).

De acordo com esses mesmos autores, em trabalho com o objetivo de avaliar cinco sistemas de produção de milho verde em espigas, constituídos por três coberturas de solo no SPD orgânico com palha de crotalária; palha de milho; palha do consórcio crotalária/milho e dois sistemas sem palhada e com revolvimento do solo, sendo um orgânico e outro convencional, constataram: tanto o sistema orgânico sem palhada e com revolvimento do solo, quanto os sistemas orgânicos com palhada e sem revolvimento do solo utilizando crotalária solteira, milho solteiro e consórcio crotalária/milho são possíveis de serem utilizados nas condições testadas neste trabalho, mantendo uma boa produtividade do milho em espiga. A utilização da palhada de milho solteiro ou em consórcio com crotalária, no sistema orgânico sem revolvimento do solo, ocasionou redução do percentual de infestação e da densidade absoluta de plantas espontâneas.

Dentre as diversas espécies, as que possuem maior destaque na prática de adubação verde estão as gliricídias (*Gliricidia sepium* (Jacq.) Steud.), a crotalária (*Crotalaria juncea* L.) e o feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* DC.), por serem plantas resistentes, com desenvolvimento rápido e maior resistência a condições edafoclimáticas (AGUIAR JÚNIOR *et al.*, 2011). Espécies como a mucuna-preta (*Mucuna aterrima*) e guandu (*Cajanus cajan*) correspondem bem quando utilizadas como adubo verde, podendo ser implementadas nas rotações de culturas ou consórcio (CARVALHO *et al.*, 2014).

Em um estudo realizado em Goiás, Menezes; Leandro (2004) observaram que o feijão-de-porco e a crotalária, aos 90 dias após sua emergência, apresentaram produções de fitomassa superiores a 9,0 t ha⁻¹. Segundo Freitas (2020), a espécie gliricídia e feijão-de-porco possuem melhores padrões dendrométricos e maior produção de biomassa acima do solo, sendo indicados como adubo verde para plantações de ciclo curto.

Por outro lado, as gramíneas, apesar de fixarem menos nitrogênio, são excelentes para plantios em longo prazo: possuem decomposição lenta, sendo ideais para a proteção do solo, bem como aos eventos de sol e chuva, além de reduzirem as perdas de nitrogênio imobilizando-o em sua biomassa (BORTOLINI; SILVA; ARGENTA, 2000). Destacam-se os Milhetos (*Pennisetum glaucum*), Aveia preta (*Avena stringosa*) (SARTORI *et al.*, 2011), o azevém (*Lolium multiflorum*), a braquiária (*Brachiaria spp*) (CARVALHO *et al.*, 2014).

Em estudos com combinação de milheto e mucuna-preta, Gut *et al.* (2018) verificaram aumentos na produção de biomassa. Bettiol *et al.* (2015), avaliando consórcio entre braquiária e crotalária, observaram incrementos de massa fresca em cerca de 89.900 kg ha⁻¹. A utilização do consórcio entre leguminosas e gramíneas é uma estratégia para diminuir a taxa de decomposição das leguminosas, além de fixar nitrogênio e favorecer a cobertura do solo eficiente e duradoura (DONEDA *et al.*, 2012).

5. Considerações Finais

Associar práticas de cultivo tradicionais com plantas de cobertura que possuem sistema radicular extenso, com capacidade de chegar às camadas profundas, é uma alternativa sustentável e agroecológica para proteger o solo contra eventos edafoclimáticos, bem como melhorar a qualidade do solo,

mantendo o desenvolvimento das culturas e resultando em aumento de qualidade e produtividade.

Áreas sob manejo orgânico durante períodos prolongados mostram que há alterações positivas em diversas propriedades do solo ao longo do tempo, refletindo em alta produção de palhada e boa produtividade das culturas cultivadas.

Além disso, as técnicas sustentáveis apresentadas nesse capítulo, quando sistematizadas, por intermédio de cartilhas, comunicados técnicos ou *folders*, podem facilitar a compreensão dos agricultores vindo a contribuir na melhoria dos seus processos produtivos.

6. Referências Bibliográficas

ACEÑOLAZA, P. G. *et al.* Litter fall production in forests located at the pre-delta area of the Paraná river (Argentina). **Annals of Forest Science**, Nancy, v. 67, n. 3, p. 311-324, 2010.

AGUIAR JÚNIOR, R. A. *et al.* Relação entre produção de biomassa e biometria de *Gliricídia* (*Gliricidia sepium* (Jacq.)). **Cadernos de Agroecologia**, v. 6, n. 2, p. 1-5, 2011.

ALARIBE, F. O.; AGAMUTHU, P. Assessment of phytoremediation potential of *Lantana camara* in Pb impacted soil with organic waste additives. **Ecological Engineering**, v. 83, p. 513-520, 2015.

ALVA, A. K. *et al.* Nitrogen and irrigation management practices to improve nitrogen uptake efficiency and minimize leaching losses. **Journal of Crop Improvement**, Binghamton, v. 15, n. 2, p. 369-420, 2005.

AMADO, S.; CHAVES FILHO, J. T. Fitorremediação: uma alternativa sustentável para remediação de solos contaminados por metais pesados. **Natureza on-line**, v. 13, n. 4, p. 158-164, 2015.

ANDREAZZA, R.; CAMARGO, F. A. de O. **Fitorremediação de áreas contaminadas com cobre utilizando plantas de mamona**. *In*: IV Salão de Ensino, UFRGS, 2011, Porto Alegre.

APONTE, A. *et al.* Rhizobacteria *Pseudomonas fluorescens* and *Azospirillum* sp. association enhances growth of *Lactuca sativa* L. under tropical conditions. **Journal of Central European Agriculture**, Zagreb, v. 18, n. 2, p. 424-440. Apr./June 2017.

ARAÚJO, C. L. de; GUALTER, R. M. R. Caracterização morfofisiológica de bactérias nativas de solos do Cerrado isoladas de nódulos de feijão-caupi. **Biotemas**, v. 30, n. 1, p. 25-35, 2017.

ARAÚJO, J. C. R. *et al.* Resposta da mandioca a diferentes tipos de preparo do solo. **PUBVET**, Londrina. v. 12, n. 7, p. 1-4, jul., 2018.

ARIAS, A. R. L. *et al.* Utilização de bioindicadores na avaliação de impacto e no monitoramento da contaminação de rios e córregos por agrotóxicos. **Ciência & Saúde Coletiva**, p. 61-72, 2007.

BARBOSA JÚNIOR, L. B. *et al.* Contribuição da atividade de extensão rural no desenvolvimento sustentável do Projeto de Assentamento Indiana município de Araguatins-TO. **Revista Craibeiras de Agroecologia**, v. 1, n. 1, 2017.

BARBOSA, M. G.; DE MATTOS, M. M.; FERREIRA, M. do S. Manejo de vegetação secundária na agricultura familiar no Nordeste paraense. *In*: Embrapa Amazônia Oriental. **Cadernos de Agroecologia**, v. 10, n. 3, p. 26-39, 2015.

BARRADAS, C. A. A. **Uso da adubação verde**. Manual técnico 25, Programa Rio Rural, Niterói, p. 10, 2010.

BATISTA, A. A. **Seleção de espécies com potencial fitorremediador de chumbo**. 2013. 57 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Qualidade de Ecossistemas) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas. 2013.

BATISTA, M. A. V. *et al.* Atributos microbiológicos do solo e produtividade de rabanete influenciados pelo uso de espécies espontâneas. **Horticultura Brasileira**, v. 31, n. 4, p. 587-594, 2013.

BENEDETTI, E. L. Produtividade e colonização natural de bactérias fixadoras de nitrogênio de feijão-guandu cultivado com diferentes adubos orgânicos e preparo do solo em área degradada. **Revista Técnico Científica do IFSC**, v. 1, n. 8, p. 23-29, 2019.

BETTIOL, J. V. T. *et al.* Plantas de cobertura, utilizando *Urochloa ruziziensis* solteira e em consórcio com leguminosas e seus efeitos sobre a produtividade de sementes do feijoeiro. **Uniciências**, v. 19, n. 1, 2015.

BRAUN, A. *et al.* Relevance of sustainable remediation to contaminated sites manage in developed and developing countries: Case of Brazil. **Land Use Policy**, v. 94, p. 104-133, 2020.

BORTOLINI, C. G.; SILVA, P. R.; ARGENTA, G. Sistemas consorciados de Aveia preta e ervilhaca comum como cobertura de solo e seus efeitos na cultura do Milho em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 897-903. 2000.

BÜLL, L.T. Nutrição mineral do milho. *In*: BÜLL, L.T. **A cultura do milho: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: POTAFOS, 1993. p. 63-145.

CALEGARI, A. *et al.* 1993. **Aspectos gerais da adubação verde**. *In*: Adubação verde no Sul do Brasil. Rio de Janeiro: AS-PTA, 346 p.

CALEGARI, A. Plantas de cobertura e rotação de culturas no sistema plantio direto. **Informações Agronômicas**, v. 122, p. 18-21, 2008.

CAMARGO, D.; BISPO, K. L.; SENE, L. Associação de *Rhizobium* sp. a duas leguminosas na tolerância à atrazina. **Ceres**, v. 58, n. 4, 2015.

CAMARGO, C. K. *et al.* Produtividade do morangueiro em função da adubação orgânica e com pó de basalto no plantio. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 1, p. 2985-2994, 2012.

CARVALHO, A. M. de. *et al.* Adubação verde no Cerrado. *In*: LIMA FILHO, O. F. de; AMBROSANO, E. J.; ROSSI, F.; CARLOS, J. A. D. (Eds.) **Adubação verde e plantas de cobertura do Brasil**. Brasília: Embrapa, 2014. p. 345-372.

CAVALCANTE, S. V. *et al.* Biomassa e extração de nutrientes por plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 5, p. 521-528, Campina Grande-PB, 2012.

CHAER, G. M. *et al.* Nitrogen-fixing legume tree species for the reclamation of severely degraded lands in Brazil. **Tree Physiology**, v. 31, n. 2, p. 139-149, 2011.

CHANDRA, R. P. *et al.* Distribution of bio-accumulated Cd and Cr in two Vigna species and the associated histological variations. **Journal of Stress Physiology & Biochemistry**, India, v. 6, n. 1, p. 4-12, 2010.

CIPRIANO, M. A. P.; PATRÍCIO, F. R. A.; FREITAS, S. dos S. Potencial de rizobactérias na promoção de crescimento e controle da podridão radicular em alface hidropônica. **Summa Phytopathol**, Botucatu, v. 39, n. 1, p. 51-57, 2013.

COSTA NETO, V. P. da. **Nodulação e fixação biológica de nitrogênio em feijão-fava inoculado com rizóbios isolados de solos da microrregião do Médio Parnaíba Piauiense**. 2016. 59 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Piauí, Teresina. 2016.

COSTA, C. D. O. *et al.* Propriedades químicas dos solos de uma sub-bacia hidrográfica sob processo de degradação ambiental. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 9, n. 2, p. 37-50, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.18316/1981-8858.15.10>. Acesso em: 22 mar. 2021.

CRESPO, A. M. **Plantio direto de milho-verde orgânico sobre diferentes plantas de cobertura de verão**. 2021. 65 f. Dissertação (Mestrado em Agroecologia e Sustentabilidade). Ifes campus de Alegre: Alegre, ES, 2021.

DANTAS, E. F. *et al.* Biological fixation, transfer and balance of nitrogen in passion fruit (*Passiflora edulis Sims*) orchard intercropped with different green manure crops, **Australian Journal of Crop Science (AJCS)**, v. 13, n. 3, p. 465-471, 2019.

DONEDA, A. *et al.* Fitomassa e decomposição de resíduos de plantas de cobertura puras e consorciadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1714-1723, 2012.

DRUMOND, M. A. *et al.* Documentação Fotográfica do Desempenho Silvicultural de Espécies Arbóreas na Recuperação de Áreas Degradadas pela Deposição de Rejeitos Finos da Mineração de Cobre. Embrapa Semiárido-Artigo em anais de congresso (ALICE). *In*: Simpósio De Mudanças Climáticas e Desertificação No Semiárido Brasileiro, 3., 2011, Juazeiro. **Anais... Experiências para mitigação e adaptação**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2011.

DUCHENE, O.; VIAN, J. F.; CELETTE, F. Intercropping with legume for agroecological cropping systems: Complementarity and facilitation processes and the importance of soil microorganisms. A review. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 240, p. 148-161, 2017.

ELIAS, S.; BALDANI, V.; BERBARA, R. Características morfológicas e resistência à metais pesados de bactérias diazotróficas isoladas de plantas de *Brachiaria decumbens* crescidas em solo contaminado. **Embrapa Agrobiologia-Capítulo em livro técnico (INFOTECA-E)**, 2018.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Pesquisa e desenvolvimento**. 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br> > pesquisa-e-desenvolvimento. Acesso em: 30 mar. 2021.

ESPINDOLA, J. A. A. *et al.* Evaluation of perennial herbaceous legumes with different phosphorus sources and levels in a Brazilian Ultisol. **Renewable Agriculture and Food Systems**, Cambridge, v. 20, p. 56-62, 2005.

FABRICE, C. E. S. *et al.* Recuperação de pastagens de *Brachiaria decumbens* degradada com introdução de *Stylosanthes* e adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 16, n. 4, p. 758-771, 2015.

FÁVERO, C.; LOVO, I. C.; MENDONÇA, E. S. Recuperação de áreas degradadas com sistema agroflorestal no Vale do Rio Doce, Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 861-868, 2008.

FERREIRA, P. A. A. *et al.* Eficiência simbiótica de estirpes de *Cupriavidus necator* tolerantes a zinco, cádmio, cobre e chumbo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 1, p. 85-95, 2012.

FRANCO, A. A; FARIA, S. M. de. The contribution of N₂-fixing tree legumes to land reclamation and sustainability in the tropics. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 29, n. 5-6, p. 897-903, 1997.

FORMENTINI, E. A. **Cartilha sobre adubação verde e compostagem**. 2019. 17 p.

FREITAS, A. D. S.; SAMPAIO, E. V. S. B; SANTOS, C. E. R. S.; FERNANDES, A. R. Biological nitrogen fixation in tree legumes of the Brazilian semi-arid Caatinga. **Journal of Arid Environments**, v. 74, p.344-349, 2010.

FREITAS, B. B. de; PAULETTO, D.; SOUSA, I. R. L. de. Crescimento inicial e biomassa de espécies utilizadas como adubação verde em sistema de aleias. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 15, n. 1, p. 20-27, 2020.

FREITAS, P. V. D. X. de. *et al.* Produção de gramíneas forrageiras inoculadas com *Azospirillum brasilense* associada à adubação nitrogenada. **Revista Científica Rural**, v. 21, n. 2, p. 31-46, 2019.

GALLO, A. S. *et al.* Produtividade da cultura do feijoeiro em sucessão a adubos verdes, com adição de dejetos líquidos de suínos. **Revista de la Facultad de Agronomía**, La Plata, v. 114, n. 1, p. 45-51, 2015.

GARCIA, K. G. V. *et al.* Micorrizas arbusculares no crescimento de mudas de sabiá em um substrato proveniente da mineração de manganês. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 11, n. 2, p. 15-20, 2016.

GARG, N.; SINGH, S. Arbuscular Mycorrhiza *Rhizophagus irregularis* and Silicon Modulate Growth, Proline Biosynthesis and Yield in *Cajanus cajan* L. Millsp. (pigeonpea) Genotypes Under Cadmium and Zinc Stress. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 37, n. 1, p. 46–63, 2018.

GLIESSMAN, S. R. **Agroecologia**: processos ecológicos em agricultura sustentável. Porto Alegre: Ed. UFRGS, 2001, 653p.

GOMES, J. M. *et al.* *Schizolobium parahyba* var. amazonicum (Huber ex Ducke) Barneby pode ser utilizada em enriquecimento de clareiras de exploração florestal na Amazônia. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 1, p. 417-424, 2019.

GONÇALVES, I. C. R. *et al.* Heavy metals and yield of cowpea cultivated under composted tannery sludge amendment. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 36, n. 4, p. 443-448, 2014.

GUT, G. A. P. *et al.* Produção de biomassa de leguminosas em cultivo consorciado com milho no Vale do São Francisco. *In*: Embrapa Semiárido-Artigo. *In*: Jornada De Integração Da Pós-Graduação Da Embrapa Semiárido, 3., 2018, Petrolina. **Anais...** Petrolina: Embrapa Semiárido, 2018.

HUNGRIA, M.; VARGAS, M. Environmental factors impacting N₂ fixation in legumes grown in the tropics, with an emphasis on Brazil. **Field crops research**, v. 65, n. 2-3, p. 151-164, 2000.

HUNGRIA, M. *et al.* Inoculation with selected strains of *Azospirillum brasilense* and *A. lipoferum* improves yields of maize and wheat in Brazil. **Plant and Soil**. v. 331, n. 1, p.413-425, 2010.

JACK, L.; BRAZ, T. G. S.; MARTUSCELLO, J. A. **Gramíneas de clima tropical**. *In*: REIS, R. A.; BERNARDES, T. F.; SIQUEIRA, G. R. Forragicultura: ciência, tecnologia e gestão dos recursos forrageiros. 1ª edição. São Paulo, Jaboticabal: UNESP, 2013. p. 109-119.

KAHMEN, A. *et al.* Niche complementarity for nitrogen: an explanation for the biodiversity and ecosystem functioning relationship? **Ecology**. v. 87, n. 5, p. 1244-1255, 2006.

LIANG, Y. *et al.* **Silicon-Mediated Tolerance to Metal Toxicity**. *In*: Silicon in Agriculture. Dordrecht: Springer Netherlands, 2015, p. 83-122.

LIMA, A. A. de. *et al.* Eficiência da inoculação de *Azospirillum brasilense* associado com enraizador no crescimento e na produção de alface. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 12, n. 2, p. 233-240, 2017.

LIMA, G. M. *et al.* Estudo de fitorremediação de solos contaminados com cádmio e chumbo empregando plantas de amendoim (*Arachis hypogaea* L.). **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, n. 16, 2013.

LINDINO, C. A.; TOMCZAK, A. P.; GONÇALVES JUNIOR, A. C. Fitorremediação de solos utilizando *Crotalaria spectabilis* para remoção de Cd e Pb. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 11, n. 4, p. 25-32, 2012.

LONGO, R. M.; RIBEIRO, A. I.; MELO, W. J. Recuperação de solos degradados na exploração mineral de cassiterita: biomassa microbiana e atividade da desidrogenase. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 1, p. 132-138, 2011.

LOPES, M. N. *et al.* Fluxo de biomassa em capim-massai durante o estabelecimento e rebrotação com e sem adubação nitrogenada. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 60, n. 3, p. 363-371, 2013.

MACEDO, M. C. M. *et al.* Degradação de pastagens, alternativas de recuperação e renovação, e formas de mitigação. *In*: Embrapa Gado de Corte- Artigo em anais de congresso (ALICE). *In*: ENCONTRO DE ADUBAÇÃO DE PASTAGENS DA SCOT CONSULTORIA-TEC-FÉRTIL, 1., 2013, Ribeirão Preto, SP. **Anais...** Bebedouro: Scot Consultoria, 2013. p. 158-181., 2013.

MACHADO, A. T.; NASS, L. L.; MACHADO, C. T. T. **Manejo sustentável da agrobiodiversidade nos biomas cerrado e caatinga com ênfase em comunidades rurais**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2011. p. 316-351.

MARTINEZ, M. S.; CRUVINEL, D. F. C.; BARATTO, D. M. Avaliação da fitorremediação de solos contaminados com metais pelo capim braquiária e mostarda da Índia. **Revista DAE-Sabesp**, São Paulo, v. 191, n. 1, p. 30-37, 2013.

MENDES FILHO, P. F. *et al.* Evaluating the Potential of Forest Species Under “Microbial Management” for the Restoration of Degraded Mining Areas. **Water Air Soil Pollution**. v. 208, p. 79-89, 2010.

MENEGAES, J. F. *et al.* Avaliação do potencial fitorremediador de crisântemo em solo com excesso de cobre. **Ornamental Horticulture**, v. 23, n. 1, p. 63-71, 2017.

MENEZES, L. A. S.; LEANDRO, W. M. Avaliação de espécies de coberturas do solo com potencial de uso em sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 34, n. 3, p.173-180, 2004.

MENEZES, A. P. M. **Crescimento e produção de alface em resposta a rizobactérias e nitrogênio**. 2019. 69 f. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Acre, Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal, Rio Branco, AC, 2019.

MOREIRA, F. M. S. *et al.* Bactérias diazotróficas associativas: diversidade, ecologia e potencial de aplicações. **Comunicata Scientiae**, v. 1, n. 2, p. 74-74, 2010.

MOURA, L. N. A.; LACERDA, M. P. C.; RAMOS, M. L. G. Qualidade de Organossolo sob diferentes usos antrópicos em áreas de preservação permanente no Distrito Federal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 1, p. 33-39, 2013.

MOURÃO, S. A.; KARAM, D.; SILVA, J. A. A. **Uso de leguminosas no Semiárido mineiro**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, Documento 135, 2011.

MONTEIRO, C. B. *et al.* Adubação verde como estratégia de aumento da matéria orgânica e recuperação de área degradada. **Cadernos de Agroecologia**, v. 13, n. 1, 2018.

NASCIMENTO, J. T. *et al.* Efeito de leguminosas nos atributos físicos e carbono orgânico de um Luvissole. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 5, p. 825-831, 2005.

NASCIMENTO, M. V. *et al.* Manejo da adubação nitrogenada nas culturas de alface, repolho e salsa. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia, v. 4, n. 1, p. 65-71, 2017.

NOGUEIRA, N. O. *et al.* Utilização de leguminosas para recuperação de áreas degradadas. **Enciclopédia Biosfera**, v.8, n. 14, p. 2012-2031, 2012.

NOGUEIRA, G. A. S. *et al.* Physiological and Growth Responses in the (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) Seedlings Subjected to Cadmium Doses. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 8, p. 217-227, 2019.

NORRIS, D. O. Observations on the nodulation status of rainforest leguminous species in Amazonia and Guyana. **Tropical Agriculture**, 1969.

OJUEDERIE, O. B.; BABALOLA, O. O. Microbial and Plant-Assisted Bioremediation of Heavy Metal Polluted Environments: A Review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 14, n. 12, p. 1504, 2017.

OLATUNJI, O. S. *et al.* Assessment of the phytoremediation potential of *Panicum maximum* (guinea grass) for selected heavy metal removal from contaminated soils. **African Journal of Biotechnology**, v. 13, n. 19, p. 1979-1984, 2014.

RAHMAN, M. A. *et al.* **Phytoremediation of Toxic Metals in Soils and Wetlands: Concepts and Applications**. In: RAHMAN, M. A. *et al.* Environmental Remediation Technologies for Metal Contaminated Soil. Springer Japan, 2016. p. 161-95.

RODRIGUES, P.T. A.; ORLANDELLI, R. C. Plantas como Ferramentas para a Remediação Ambiental: uma Revisão da Literatura. **Uniciências**, v. 22, n. 1, p. 38-44, 2018.

SAGRILO, E. *et al.* **Manejo agroecológico do solo: os benefícios da adubação verde**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2009.

SAMPAIO, A. A. **Contribuição de bactérias diazotróficas para o desenvolvimento vegetativo e produção de milho na região do submédio São Francisco**. 2013. 85 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado da Bahia, Juazeiro, 2013.

SANDINI, I. E. *et al.* Efeito residual do nitrogênio na cultura do milho no sistema de produção integração lavoura-pecuária. **Ciência Rural**, v. 41, n. 8, p. 1315-1322, 2011.

SARTORI, V. C. *et al.* **Adubação verde e compostagem: estratégias de manejo do solo para conservação das águas**. Cartilha para agricultores [recurso eletrônico]: adubação verde e compostagem: estratégias de manejo do solo para conservação das águas. Caxias do Sul, Rs: Educus, 2011. Disponível em: https://www.ucs.br/site/midia/arquivos/Aduba%C3%A7%C3%A3o_e_Compostagem_2.pdf. Acesso em: 22 ago. 2020.

SANTOS, R. C. dos. **Interação entre rúcula (*Eruca sativa* Miller) e rizobactéria (*Bacillus subtilis* GB03): efeitos na ovoposição e desenvolvimento larval da traçadas-crucíferas, *Plutella xylostella* (L.) (*Lepidoptera: Plutellidae*)**. 2016. 55 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

SCHULTZ, N. *et al.* Produtividade e diluição isotópica de ¹⁵N em cana-de-açúcar inoculada com bactérias diazotróficas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1594-1601, 2016.

SILVA, E. C. *et al.* **Adubação verde como fonte de nutrientes às culturas**. LIMA FILHO, OF *et al.* Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil. Brasília: Embrapa, p. 265-305, 2014.

SILVA, J. F. da. **Prospecção de plantas fitorremediadoras em solos contaminados por metais pesados**. 2012. 91 f. Tese (Doutorado em Biotecnologia) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2012.

SILVA, R. F. *et al.* Growth of tropical tree species and absorption of C in soil artificially contaminated. **Brazilian Journal Biol.**, v. 75, n. 4, p. 119-125, 2015.

SILVA, M. C. P. da. **Seleção de estirpes eficientes para fixação biológica de nitrogênio e promoção de crescimento em plantas da espécie *Brachiaria brizantha***. 2010. 79 f. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. ESALQ. Piracicaba, 2010.

SKONIESKI, F. R. *et al.* Effect of seed inoculation with *Azospirillum brasilense* and nitrogen fertilization rates on maize plant yield and silage quality. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 46, n. 9, p. 722-730, 2017.

SOUSA, F. F. *et al.* Legumes as green manure for common bean cultivated in two growing seasons at southeast Brazil. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 49, p. 4953-4958, 2016.

SOUZA, J. L. de. *et al.* **Utilização de espécies vegetais como cobertura de solo no sistema plantio direto e como adubação verde na Região Serrana do ES**. 2018.

SOUZA, M. N. **Degradação Antrópica e Procedimentos de Recuperação Ambiental**. Balti, Moldova, Europe: Novas Edições Acadêmicas, 2018, v.1000. 376 p.

SPAROVEK, G. *et al.* **Brazilian agriculture and environmental legislation: status and future challenges**. 2010.

SPRENT J. I.; ARDLEY J. A.; JAMES E. K. Biogeography of nodulated legumes and their nitrogen fixing symbionts. **New Phytol**, v. 215, p. 40–56, 2017.

STURZ, A. V.; NOWAK, J. **Endophytic communities of rhizobacteria and the strategies required to create yield enhancing associations with crops***Applied Soil Ecology*, 2000.

TAVARES, S. R. de L. Remediação de solos e águas contaminadas por metais pesados: conceitos básicos e fundamentos. **Rio de Janeiro**, v. 1, ed. 1, 147 p., 2013.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5.ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 1876 p.

VASCONCELLOS, M. C.; PAGLIUSO, D.; SOTOMAIOR, V. S. Fitorremediação: Uma proposta de descontaminação do solo. **Estudos de Biologia: Ambiente e Diversidade**. v. 34, n. 83, 2012.

VIEHWEGER, K. How plants cope with heavy metals. **Botanical Studies**, v. 55, n. 1, p. 1-12, 2014.

VOGEL; G. F. *et al.* Desempenho agronômico de azospirillum brasilense na cultura do arroz: uma revisão. **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, v. 6, n. 3, p. 567-578, 2013.

WUTKE, E. B.; AMBROSANO, E. J. **Bancos comunitários de sementes de adubos verdes**: informações técnicas. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2007.

WUTKE, E. B.; CALEGARI; A.; WILDNER, L. **Espécies de adubos verdes e plantas de cobertura e recomendações para seu uso**. *In*: LIMA FILHO, O. F.; AMBROSANO, E. J.; ROSSI, F. CARLOS, J. A. D. (Org.). Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil. Fundamento e Práticas – Volume I, Brasília: EMBRAPA, 2014. Cap.3, p. 59-168.

XAVIER, F. A. da. S. *et al.* Effect of cover plants on soil C and N dynamics in different soil management systems in dwarf cashew culture. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 165, p. 173-183, 2013.

XINGFENG, Z. *et al.* Potential of four forage grasses in remediation of Cd and Zn contaminated soils. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 2063-2066, 2010.

YANG, W. *et al.* Comparison of manganese tolerance and accumulation among 24 Salix clones in a hydroponic experiment: Application for phytoremediation. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 149, p. 1-7, 2015.

Autores

Francielle Santana de Oliveira, Jéssica Delesposte Destefani, Letícia Rigo Tavares, José Carlos Venâncio da Páschoa, Aline Marchiori Crespo, Otávio Pereira Araujo, Priscilla Moreira Curtis Peixoto, Camila Barbiero Siqueira, Lucas Henrique Cortat, Maurício Novaes Souza

Pós-Graduação em Agroecologia do Instituto Federal do Espírito Santo - Campus de Alegre. Caixa Postal 47, CEP: 29500- 000, Alegre-ES, Brasil.

* Autor para correspondência: mauricios.novaes@ifes.edu.br