



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA E CONSERVAÇÃO



RAPHAELA AGUIAR DE CASTRO

**Viabilização de técnicas alternativas para a restauração de áreas  
degradadas na Caatinga**

São Cristóvão – SE

2022

RAPHAELA AGUIAR DE CASTRO

**Viabilização de técnicas alternativas para a restauração de áreas degradadas na Caatinga**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação da Universidade Federal de Sergipe como requisito para obtenção do título de Doutora em Ecologia e Conservação.

**Orientador:** Prof. Dr. Marcos Vinicius Meiado.

**Co-orientador:** Prof. Dr. Renato Garcia Rodrigues.

São Cristóvão – SE

2022

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

C355v Castro, Raphaela Aguiar de.  
Viabilização de técnicas alternativas para a restauração de áreas degradadas na Caatinga / Raphaela Aguiar de Castro; orientador Marcos Vinicius Meiado. – São Cristóvão, SE, 2022.  
171 f.; il.

Tese (doutorado em Ecologia e Conservação) – Universidade Federal de Sergipe, 2022.

1. Solos - Degradação. 2. Plantas e solo. 3. Regeneração (Biologia). 4. Árvores - Mudas. I. Meiado, Marcos Vinicius, orient. II.Título.

CDU 632.125

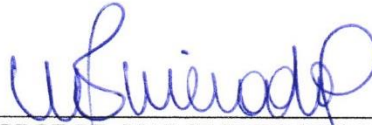
# TERMO DE APROVAÇÃO

## VIABILIZAÇÃO DE TÉCNICAS ALTERNATIVAS PARA A RESTAURAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS NA CAATINGA por

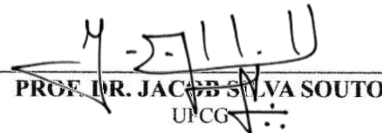
**RAPHAELA AGUIAR DE CASTRO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação da Universidade Federal de Sergipe como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor(a) em Ecologia e Conservação.

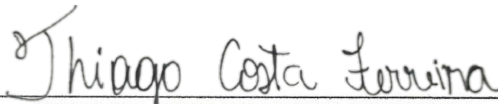
**APROVADA** pela banca examinadora composta por



**PROF. DR. MARCOS VINICIUS MELADO**  
Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação da  
Universidade Federal de Sergipe



**PROF. DR. JACOB SILVA SOUTO**  
UECG



**PROF. DR. THIAGO COSTA FERREIRA**  
UEPB



**PROF. DR. BÁRBARA FRANÇA DANTAS**  
EMBRAPA



**PROF. DR. DANIELA CRISTINE MASCIA VIEIRA**  
UNIVASF

São Cristóvão/SE, 25 de novembro de 2022

## Agradecimentos

À minha família, mãe, irmã, sobrinha e pai, os maiores amores da minha vida. Muito obrigada por todo suporte em todos os sentidos possíveis que vocês sempre me deram. Amo vocês mais que tudo e tudo que faço é pensando em orgulhar e dar o melhor para vocês.

Aos demais integrantes da minha grande família, que incluo a família Tenreiro. Vocês são os maiores alicerces que eu tenho e o melhor lugar do mundo é ao lado de vocês. Cada encontro é especial e renovador. É sempre reconfortando saber que eu não estou sozinha e que eu sempre tenho para onde correr. Amo vocês. Em especial a Iza, minha prima-irmã e companheira atual de jornada. Você foi especialmente imprescindível nesse momento, obrigada por tudo.

Ao meu marido, Igor, o cara mais incrível e admirável que eu conheço, que me inspira todos os dias. Obrigada pelo cuidado diário e por ser tão compreensível. Com certeza, sem você eu não estaria concluindo essa etapa. Espero retribuir todo o amor. Te amo.

Aos meus grandes amigos, em especial a Rubens (*in memoriam*) que a pouco deixou um vazio muito grande aqui, que eu ainda estou tentando entender. Você sabe da importância que tinha na minha vida e eu sei da que tinha na sua, nossa amizade será eterna, ‘vozinho’. A minha melhor amiga de infância e da vida, Camila, nossos laços só aumentam a cada dia. Obrigada por todas as conversas e abraços, te amo. Aos amigos que fiz na faculdade, em especial aquela que se faz sempre presente, Sheila, e são para a vida, obrigada pela troca de sempre.

À Marcos Meiado, já falei nos agradecimentos do mestrado e repito, você acredita mais em mim do que eu! E isso faz com que eu me torne uma profissional e pessoa melhor a cada dia. Muito, muito obrigada pela confiança, obrigada por permitir que eu vivesse essa fase da forma mais leve possível. Eu jamais terei do que reclamar desses quase 7 anos sendo sua orientanda, você é um excelente profissional, respeitoso, cuidadoso e extremamente inteligente. Fico feliz que você possa passar isso para cada vez mais alunos, que sorte a deles. Sei que nosso vínculo continuará independente do meu término aqui, até porque você se tornou um grande amigo.

À Renato Garcia, que não hesitou na primeira ligação em me receber no NEMA. E se não fosse isso, eu nem sei. Muito obrigada pela confiança e autonomia. Muito

obrigada por todo conhecimento transmitido. Não me arrependo de nenhuma das vezes que fiquei esperando você liberar das suas ‘trocentas’ obrigações para podermos conversar, porque cada conversa é um aprendizado e saio com a cabeça a mil. Como é bom trabalhar com alguém que te faz pensar, crescer. Espero retribuir por tudo.

Aos alunos que eu pude contribuir na formação e que me ajudaram demais em todas as etapas, Joanielson, Mari, Kedma, Nizaldo e Luany, muito obrigada. Agradeço muito especialmente as duas meninas/mulheres incríveis que eu confio de olhos fechados, Leticia e Patrícia. Elas sabem da minha admiração, carinho, respeito e o quanto eu tenho certeza de que serão profissionais excelentes. Muito, muito obrigada por desenvolverem esse trabalho comigo, ainda colheremos muitos frutos, juntas!

Ao NEMA, por completo, cada pessoa que faz parte desse projeto incrível. Cada profissional que tirou um tempo para me ajudar a pensar, a agir. À Fábio, Daniela e Cris que literalmente sentaram comigo e me ajudarem a definir cada passo. Muito obrigada pela paciência e ensino. À Vinícius, que sempre esteve disposto em cada dúvida. E a tantos outros que eu “perturbei”, e como eu fiz isso. Muito obrigada à todos e desculpas reais por qualquer incômodo.

Aos trabalhadores do NEMA, em nome de Ramon, eu devo esse trabalho a vocês. Eu não faria um décimo do que foi feito se não fosse a ajuda de vocês. O trabalho em campo foi árduo, mas foi gratificando e leve por conta de vocês, citando Wedson como representante do trabalho pesado e Ari como representante das partes mais extrovertidas. Muito, muito obrigada.

Ao PPEC e aos professores, que pena que não pude aproveitar ao máximo de tantos profissionais maravilhosos. Em especial à Ana Paula Albano que me fez aprender e amar mais ainda a Ecologia, o tipo de matéria que jamais será esquecida.

À Daniela Vieira, Bárbara Dantas, Jacob Souto e Thiago Ferreira, por aceitarem contribuir com o trabalho, sei da dimensão e desprendimento de fazê-lo, com certeza as colocações serão valiosas.

À quem ler e saber que contribuiu nessa fase da minha vida, mas que eu não citei. Me desculpem e estendo a vocês meu **MUITO OBRIGADA**.

## Sumário

Agradecimentos .....	5
Sumário.....	7
Lista de tabelas .....	8
Lista de figuras .....	10
Apresentação .....	14
Resumo .....	16
Referencial Teórico .....	18
Degradação de áreas .....	18
Sucessão ecológica .....	24
Restauração de áreas degradadas (RAD).....	26
Capítulo 1 .....	37
Como a retirada do solo para transposição em áreas degradadas da Caatinga afeta o ecossistema de referência doador?.....	37
Capítulo 2 .....	55
Regeneração natural, transposição de solo e semeadura direta de herbáceas na restauração de áreas degradadas na Caatinga .....	55
Capítulo 3 .....	94
Plantio de mudas e semeadura direta: implantação de arbóreas para restauração de áreas degradadas na Caatinga pós condicionamento do solo com transposição.....	94
Capítulo 4 .....	118
Avaliação de técnicas de restauração em área que serviu de empréstimo de solo na Caatinga .....	118
Considerações gerais da tese .....	149
Referências bibliográficas .....	150

## Lista de tabelas

### Capítulo 1

**Tabela 1.1** Resultados da ANOVA (GLM) para os parâmetros de riqueza, densidade, diversidade e cobertura vegetal entre os tratamentos de retirada de solo para transposição em área de referência positiva na Caatinga, no município de Petrolina, PE..... 45

**Tabela 1.2** Análise de similaridade (ANOSIM) entre os tratamentos de retirada de solo para transposição em área de referência positiva na Caatinga, no município de Petrolina, PE..... 49

### Capítulo 2

**Tabela 2.1** Resultados da ANOVA (GLM) para os parâmetros de riqueza, densidade, diversidade e cobertura vegetal entre os tratamentos com transposição de solo e semeadura de herbáceas para condicionamento do solo de área degradada na Caatinga, no município de Petrolina, PE..... 72

**Tabela 2.2** Análise de solo dos tratamentos de transposição de solo e semeadura de herbáceas para condicionamento do solo de área degradada na Caatinga, no município de Petrolina, PE..... 79

**Tabela 2.3** Análise de similaridade (ANOSIM) entre os tratamentos com transposição de solo com 15% e 30% de cobertura em área de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE..... 80

**Tabela 2.4.** Lista florística do banco de sementes em tratamentos de transposição de solo em área de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE.....82

**Tabela 2.5** Resultados da ANOVA (GLM) para os parâmetros de riqueza, densidade e diversidade do banco de sementes em tratamentos de transposição de solo em área de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE..... 85



### Capítulo 3

**Tabela 3.1** Análise de variância da sobrevivência de mudas de *C. quercifolius*, *M. tenuiflora* e *C. pyramidale*, sob tratamentos de transposição de solo em restauração de área degradada da Caatinga, Petrolina, PE..... 105

**Tabela 3.2** Análise de variância do crescimento em DNS (diâmetro no nível do solo) de *C. quercifolius*, *M. tenuiflora* e *C. pyramidale*, sob tratamentos de transposição de solo em restauração de área degradada da Caatinga, Petrolina, PE..... 107

**Tabela 3.3** Análise de variância da emergência de *C. quercifolius*, *M. tenuiflora* e *C. pyramidale*, semeadas sob tratamentos de transposição de solo em restauração de área degradada da Caatinga, Petrolina, PE..... 110

**Tabela 3.4** Análise de variância da sobrevivência *C. quercifolius*, *M. tenuiflora* e *C. pyramidale*, em relação a forma de introdução (Mudas ou Semeadura) e aos tratamentos de transposição de solo em restauração de área degradada da Caatinga, no município de Petrolina, PE..... 113

### Capítulo 4

**Tabela 4.1** Resultados da ANOVA (GLM) para os parâmetros de riqueza, densidade, diversidade e cobertura do solo em tratamentos de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE..... 127

**Tabela 4.2** Lista florística dos tratamentos de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE..... 132

**Tabela 4.3** Análise de similaridade (ANOSIM) entre os tratamentos de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE..... 139

**Tabela 4.4** Parâmetros fitossociológicos das espécies emergidas nos tratamentos de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE..... 140

## Lista de figuras

### Capítulo 1

- Figura 1.1** Riqueza de espécies entre os tratamentos de retirada de solo para transposição em área de referência positiva na Caatinga, no município de Petrolina, PE..... 44
- Figura 1.2** Densidade de espécies (indivíduos/m<sup>2</sup>) entre os tratamentos de retirada de solo para transposição em área de referência positiva na Caatinga, no município de Petrolina, PE..... 46
- Figura 1.3** Diversidade (Simpson) entre os tratamentos de retirada de solo para transposição em área de referência positiva na Caatinga, no município de Petrolina, PE..... 47
- Figura 1.4** Cobertura de solo (%) entre os tratamentos de retirada de solo para transposição em área de referência positiva na Caatinga, no município de Petrolina, PE..... 48
- Figura 1.5** Escalonamento multidimensional não paramétrico (NMDS) entre os tratamentos de retirada de solo para transposição em área de referência positiva na Caatinga, no município de Petrolina, PE..... 50

### Capítulo 2

- Figura 2.1** Demarcação das áreas de referência positiva e da área em restauração na Caatinga, no Campus de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Petrolina, PE..... 64
- Figura 2.2** Foto aérea da área experimental após o revolvimento do solo, onde foram implantadas técnicas de restauração de áreas degradadas na Caatinga, no Campus de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Petrolina, PE..... 65
- Figura 2.3** Organograma do delineamento experimental dos tratamentos de restauração de área degradada da Caatinga no município de Petrolina, PE..... 66

<b>Figura 2.4</b> Delineamento experimental dos tratamentos com transposição de solo e semeadura de herbáceas para condicionamento do solo em restauração de área degradada na Caatinga, no município de Petrolina, PE.....	67
<b>Figura 2.5</b> Modelo esquemático do GRID utilizado para o sorteio (A) das oito subparcelas (B) que foram utilizadas nas avaliações das técnicas de restauração de áreas degradadas na Caatinga, no município de Petrolina, PE.....	69
<b>Figura 2.6</b> Avaliação de riqueza entre os tratamentos de transposição de solo e semeadura de herbáceas para condicionamento do solo de área degradada na Caatinga, no município de Petrolina, PE.....	73
<b>Figura 2.7</b> Avaliação de densidade (indivíduos/m <sup>2</sup> ) entre os tratamentos de transposição de solo e semeadura de herbáceas para condicionamento do solo de área degradada na Caatinga, no município de Petrolina, PE.....	75
<b>Figura 2.8</b> Avaliação de diversidade (Simpson) entre os tratamentos de transposição de solo e semeadura de herbáceas para condicionamento do solo de área degradada na Caatinga, no município de Petrolina, PE.....	76
<b>Figura 2.9</b> Avaliação da cobertura vegetal (%) entre os tratamentos de transposição de solo e semeadura de herbáceas para condicionamento do solo de área degradada na Caatinga, no município de Petrolina, PE.....	77
<b>Figura 2.10</b> Escalonamento multidimensional não paramétrico (NMDS) entre os tratamentos de transposição de solo com 15% e 30% de cobertura em área de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE.....	81
<b>Figura 2.11</b> Avaliação de riqueza do banco de sementes dos tratamentos de transposição de solo em área de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE.....	85
<b>Figura 2.12</b> Avaliação da densidade (indivíduos/m <sup>2</sup> ) do banco de sementes dos tratamentos de transposição de solo em área de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE.....	86

<b>Figura 2.13</b> Avaliação da diversidade (Simpson) do banco de sementes dos tratamentos de transposição de solo em área de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE. ....	87
--	----

### Capítulo 3

<b>Figura 3.1</b> Organograma do delineamento experimental dos tratamentos de implantação de espécies arbóreas sob tratamentos de transposição de solo em restauração de área degradada da Caatinga, no município de Petrolina, PE.....	101
---	-----

<b>Figura 3.2</b> Delineamento experimental da parcela onde foi implantado o plantio de mudas e a semeadura direta de espécies arbóreas como técnica de restauração de áreas degradadas na Caatinga, no município de Petrolina, PE.....	102
---	-----

<b>Figura 3.3</b> Sobrevivência de mudas de <i>C. quercifolius</i> , <i>M. tenuiflora</i> e <i>C. pyramidale</i> , sob tratamentos de transposição de solo em restauração de área degradada da Caatinga, Petrolina, PE.....	104
---	-----

<b>Figura 3.4</b> Sobrevivência de mudas de <i>C. quercifolius</i> , <i>M. tenuiflora</i> e <i>C. pyramidale</i> , sob tratamentos de transposição de solo em restauração de área degradada da Caatinga, Petrolina, PE.....	106
---	-----

<b>Figura 3.5</b> Crescimento em DNS (diâmetro no nível do solo) de <i>C. quercifolius</i> , <i>M. tenuiflora</i> e <i>C. pyramidale</i> , sob tratamentos de transposição de solo em restauração de área degradada da Caatinga, Petrolina, PE.....	107
---	-----

<b>Figura 3.6</b> Emergência de <i>C. quercifolius</i> , <i>M. tenuiflora</i> e <i>C. pyramidale</i> , semeadas sob tratamentos de transposição de solo em restauração de área degradada da Caatinga, Petrolina, PE.....	109
--	-----

<b>Figura 3.7</b> Sobrevivência de <i>C. quercifolius</i> , <i>M. tenuiflora</i> e <i>C. pyramidale</i> , semeadas sob tratamentos de transposição de solo em restauração de área degradada da Caatinga, Petrolina, PE.....	110
---	-----

<b>Figura 3.8</b> Plantio de mudas e semeadura direta de <i>C. quercifolius</i> , sob tratamentos de transposição de solo em restauração de área degradada da Caatinga, Petrolina, PE....	111
---	-----

**Figura 3.9** Plantio de mudas e semeadura direta de *C. quercifolius*, *M. tenuiflora* e *C. pyramidale*, sob tratamentos de transposição de solo em restauração de área degradada da Caatinga, Petrolina, PE..... 112

**Figura 3.10** Plantio de mudas e semeadura direta de *C. quercifolius*, *M. tenuiflora* e *C. pyramidale*, sob tratamentos de transposição de solo em restauração de área degradada da Caatinga, Petrolina, PE..... 112

#### **Capítulo 4**

**Figura 4.1** Avaliação de riqueza dos tratamentos de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE..... 127

**Figura 4.2** Avaliação da densidade (indivíduos/m<sup>2</sup>) dos tratamentos de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE..... 128

**Figura 4.3** Avaliação da diversidade (Simpson) dos tratamentos de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE..... 129

**Figura 4.4** Avaliação de cobertura do solo (%) dos tratamentos de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE..... 129

**Figura 4.5** Prancha de fotos referente aos tratamentos de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE. A e B: Parcelas em restauração com transposição de solo e plantio de mudas. C e D: Parcelas em restauração com condução da regeneração natural..... 131

**Figura 4.6** Escalonamento multidimensional não paramétrico (NMDS) entre os tratamentos de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE..... 139

## **Apresentação**

A degradação de áreas na Caatinga é crescente e traz como consequência a necessidade de estabelecer técnicas de restauração de áreas degradadas (RAD) viáveis em relação ao custo-benefício e com resultados satisfatórios de retorno da composição e funcionalidade do ecossistema. Os métodos utilizados em ambientes úmidos não devem ser replicados nas condições de Caatinga por conta de diversas fitofisionomias, alta variação de precipitação, temperatura e índices de aridez. Por isso, entende-se a necessidade de testar em campo metodologias que englobem e atuem sobre diferentes situações. Nesse sentido, o objetivo dessa tese foi avaliar técnicas, bem como a união dessas técnicas e suas consequências, em uma área degradada há 18 anos, com retirada das camadas iniciais de solo. Os experimentos foram conduzidos com a finalidade de recuperar as propriedades perdidas do solo para posterior incremento de espécies arbóreas, para favorecer e agilizar os processos de sucessão ecológica.

Em decorrência da experiência no assunto, acreditava-se que a combinação de técnicas aplicadas em épocas distintas possibilitaria obter maior sucesso em relação às premissas ecológicas esperadas. Por conta disso, a parte experimental da tese foi iniciada em março de 2019, período das chuvas da região. Nesse primeiro ano, foram implantadas as técnicas relacionadas ao condicionamento do solo, a partir de transposição de solo de uma área de referência positiva e pela semeadura de espécies herbáceas nativas. Simultaneamente, as consequências na área que serviu para o empréstimo do solo, considerada área de referência positiva, também foi avaliada. No ano seguinte, em janeiro de 2020, período de início das chuvas deste ano, houve a implantação da segunda parte do experimento, com a adição de espécies arbóreas nativas na forma de semeadura direta e de transplante de mudas.

Para entender todos os experimentos realizados e respostas esperadas, a tese foi dividida em quatro capítulos, iniciando com o referencial teórico, que analisam: i) As consequências da retirada do solo para transposição no ecossistema doador; ii) A utilização de condicionadores do solo através da transposição de solo e semeadura de herbáceas para RAD e iii) A influência da transposição de solo como condicionador para introdução de espécies arbóreas por meio de mudas e sementes. Além de avaliar iv) Se a união de técnicas é eficaz para restauração em solos degradados na Caatinga. Para

avaliação dos tratamentos foram verificados parâmetros de riqueza, densidade, diversidade, cobertura do solo, composição florística e fitossociologia.

Para isso, a tese foi associada às atividades realizadas pelo Núcleo de Ecologia e Monitoramento Ambiental (NEMA), localizado em Petrolina, Pernambuco, Campus Ciências Agrárias, Universidade Federal do Vale do São Francisco. O NEMA estuda e aplica diferentes Programas de Recuperação de Áreas Degradadas (PRADs) nas obras do Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional (PISF). A co-orientação do professor Renato Garcia Rodrigues, coordenador do projeto, permitiu o desenvolvimento de metodologias que almejavam ser analisadas para futuro emprego dos melhores resultados nos PRADs. A ideia é indicar metodologias de sucesso desses casos, que possam ser replicadas nos programas de RAD, em termos de funcionamento dos processos ecológicos e da forma de implantação.

Para padronização, a formatação dos capítulos foi realizada de acordo com as normas da revista *Restoracion Ecology*, aos quais devem ser submetidos. Em virtude da similaridade de citações entre os capítulos e para fluidez do texto, todas as referências foram reunidas no final da tese.

Outros resultados do experimento geral permitiram o desenvolvimento adicional de três trabalhos de conclusão de curso: “Besouros (Coleoptera: Insecta) como indicadores de desempenho da transposição de solo na recuperação de área degradada na Caatinga”; “Avaliação do banco de sementes de uma área em processo de recuperação na Caatinga” e “Avaliação de exótica invasora *Aristida adscensionis* (Poaceae) na riqueza e abundância de uma área de recuperação ecológica na Caatinga”.

## Resumo

A degradação de áreas na Caatinga é crescente e traz como consequência a necessidade de estabelecer técnicas de restauração de áreas degradadas (RAD) viáveis em relação ao custo-benefício e com resultados satisfatórios de retorno da composição e funcionalidade do ecossistema. Os métodos utilizados em ambientes úmidos não devem ser replicados nas condições de Caatinga por conta de diversas fitofisionomias, alta variação de precipitação, temperatura e índices de aridez. Por isso, entende-se a necessidade de testar em campo metodologias que englobem e atuem sobre diferentes situações. Nesse sentido, o objetivo dessa tese foi avaliar técnicas, bem como a união dessas técnicas e suas consequências, em uma área degradada há 18 anos, com retirada das camadas iniciais de solo. Visando indicar metodologias de sucesso desses casos, que possam ser replicadas nos programas de RAD. Para isso, a tese apresentada foi dividida em quatro capítulos que analisam: i) As consequências da retirada do solo para transposição no ecossistema doador; ii) A utilização de condicionadores do solo através da transposição de solo e semeadura de herbáceas e iii) Sua influência na introdução de espécies arbóreas por meio de mudas e sementes. Além de avaliar iv) Se a união de técnicas é eficaz para restauração em solos degradados na Caatinga. Os resultados indicam que: i) Áreas conservadas podem ser doadoras de solo para transposição em programas de RAD; ii) Transposição de solo traz benefícios para RAD e a Semeadura de herbáceas é inviável; iii) A introdução de arbóreas independe de condicionadores de solo em curto prazo e deve ser realizada na forma de mudas e não sementes, e iv) A utilização da união de técnicas de RAD não se diferenciam de técnicas realizadas individualmente em curto prazo, mas trazem benefícios gerais para a área degradada.

**Palavras-chave:** Restauração, Plantio de mudas, Semeadura direta, Transposição de solo, Semiárido.



## **Abstract**

The degradation of Caatinga areas is increasing and brings, therefore, the need to set up techniques of restoring degraded areas (RAD) that are viable in terms of cost-effectiveness and with forest results in the return of the ecosystem composition and functionality. The methods used in humid environments should not be replicated for conditions of the Caatinga due to different phytophysionomies, high variation in precipitation, temperature, and aridity indexes. Thus, it is understood the need to test methodologies in the field that encompass and act on different situations. This thesis aimed to evaluate the techniques, as well as the combination of these techniques and their consequences, in an 18 years degraded area, with the removal of the initial soil layers. Also, aiming to indicate successful methodologies of these cases, which can be replicated in RAD programs. For this, the presented thesis was divided into four chapters that analyze: i) The consequences of soil removal for transposition in the donor ecosystem; ii) The use of soil conditioners through soil transposition and herbaceous sowing and iii) Their influence on the introduction of tree species through seedlings and seeds. In addition to assessing iv) If the combination of techniques is effective for restoring degraded soils in the Caatinga. The results indicated that: i) Conserved areas can be soil donors for transposition in RAD programs; ii) Soil transposition benefits to RAD and herbaceous sowing is unfeasible; iii) The introduction of trees, independent of soil conditioners, in the short term must be carried out in the form of seedlings and not seeds, and iv) The use of the union of RAD techniques does not differ from techniques carried out individually in the short term, but brought general benefits for the degraded area.

**Key-words:** Restoration, Planting of seedlings, Direct seeding, Topsoil transposition, Semiarid

## Referencial Teórico

### Degradação de áreas

#### *Conceitos e fatores de degradação*

Segundo a FAO (2000), a degradação de áreas se refere à redução temporária ou permanente da capacidade produtiva de um sítio como resultado de ação antrópica. Para o MMA (2004), área degradada é aquela que passou por um processo de redução ou perda da produtividade biológica ou econômica. Ainda, conforme a Instrução Normativa nº 04/2011 do IBAMA, é uma área impossibilitada de retornar, naturalmente, às condições originais, ou semelhantes.

De acordo com o MapBiomass (2021), a partir de imagens de satélite, a cobertura e uso do solo no Brasil até 2021 estabelece que 59,8% são formados por florestas, 31,1% pela agropecuária, 6,3% com formação florestal não natural, 2% com corpos d'água e 0,7% de área são não vegetadas, que inclui zonas urbanizadas. As pastagens predominam as áreas agropecuárias, com 59% de cobertura e aumento crescente, chegando a ser 39% maior entre 1985 e 2020 (MapBiomass 2021). Avaliações em menor escala e com verificações *in loco* podem determinar alterações mais precisas desses dados.

Diversos motivos podem ser atrelados à degradação de um ambiente, que se inicia na remoção da vegetação original, com o desmatamento, e se agrava com os tipos de uso daquela terra, podendo ter como consequência final um solo improdutivo e estéril (MMA 2004). Um dos fins do desmatamento em grande extensão é a abertura de áreas para produção animal e vegetal. A abertura das áreas para produção já causa a alteração inicial da paisagem, que ainda podem ser transformadas em áreas degradadas quando não há utilização de práticas adequadas.

Na bovinocultura, é comum a limpeza dos pastos através do fogo, que pode impactar os nutrientes do solo, sua ciclagem e a biota local (Leal et al. 2005). Adicionalmente, a produção de monocultura de plantas forrageiras sem manejo apropriado, como a falta de sistemas de rotação e pousio da área causam alterações na composição química, física e biológica do solo (Embrapa 1999). Ainda, pastagens são normalmente formadas por espécies exóticas e podem se tornar sítios de dispersão de espécies exóticas invasoras, como o capim buffel na região semiárida (Alves et al. 2018), ou braquiárias, na Mata Atlântica. O caso é agravado quando as pastagens mal

manejadas se tornam inviáveis e são abandonadas. Na Mata Atlântica, as pastagens abandonadas de gramíneas exóticas são um impasse à restauração e sua necessidade de manejo é abordada desde o planejamento ao monitoramento do programa de RAD (Mesquita et al. 2013). O superpastejo também causa alteração na porosidade do solo, levando à compactação (Lanzanova et al. 2007).

Para o cultivo agrícola, as práticas inadequadas realizadas durante a produção são os grandes fatores de degradação dos solos. O uso errôneo de produtos químicos, sem cumprir as premissas necessárias para cada produto, como forma e concentração para aplicação e período de carência, pode causar danos não controláveis. No caso de fertilizantes, a aplicação de doses a mais pode levar a alta concentração de sais no solo que, aliado a uma irrigação irregular, pode promover a salinização (Pedrotti et al. 2015). Solos salinizados perdem a capacidade de ciclagem correta dos nutrientes, restringe a disponibilização desses nutrientes às plantas e, ainda, pode causar toxidez e elevação da pressão osmótica (Gkiougkis et al. 2015; Pedrotti et al. 2015). Esses fatores podem levar a depleção de nutrientes orgânicos, como C e N e P (Lobe et al. 2001; Zhao et al. 2005). Além disso, também podem ocasionar outra perda importante, do material orgânico e serrapilheira, essenciais para a reestruturação dos solos em casos de restauração (Reis et al. 2010).

A irrigação acima do necessário também pode causar perda de nutrientes por lixiviação, levando a uma nova aplicação que causa desbalanceamento dos nutrientes no solo e que pode ocasionar contaminação das águas subterrâneas (Steffen et al 2011). O uso incorreto de produtos defensivos também pode afetar organismos fora do alvo, como inimigos naturais, polinizadores e microrganismos do solo, alterando a estrutura da comunidade local e do entorno (Steffen et al 2011). Herbicidas não seletivos também podem afetar a comunidade vegetal e o banco de sementes (Borges 2020). Além disso, o maquinário inapropriado pode promover a erosão e compactação do solo, modificando sua textura e estrutura (Dias & Griffith 1998; Rodrigues 2014).

A degradação da área também pode ser inerente ao processo de mineração, implicando na supressão da vegetação, remoção do solo superficial e exposição dos remanescentes aos processos erosivos (Mechi & Sanches 2010). Esses fatores podem acarretar prejuízos aos corpos de água do entorno e subterrâneos, além de causar poluição do ar e sonora, afetando toda a comunidade (Mechi & Sanches 2010). Assim, os processos de resiliência da área degradada são totalmente reduzidos ou

impossibilitados de ocorrer. Apesar disso, a maior parte dos trabalhos de recuperação de áreas degradadas em minas se baseia na execução de medidas restritas de revegetação, sem considerar os processos ecológicos necessários (Mechi & Sanches 2010).

A área a ser restaurada também pode ter sido utilizada como base para alguma construção, por exemplo, áreas de empréstimo de solo para construção de estrada ou reservatórios de água. Nesses casos, é modificada ou retirada a camada superficial do solo onde está presente a vegetação original, o banco de sementes, nutrientes, matéria orgânica e organismos edáficos essenciais para a fertilidade e a atividade biológica desses solos (Rodrigues et al. 2010; Alves et al. 2012). Ainda, as áreas de remoção de solo causam alterações na topografia local, com incremento da erosão e modificação no escoamento das águas (Mota 2008; Arduin 2018). O maquinário utilizado nesses casos também pode provocar alterações nas propriedades físicas do solo (Rodrigues 2014), dificultando a chegada de novos propágulos.

#### *Consequências da degradação ao ecossistema*

Cada uma das causas de degradação citadas acima implicará em resultados distintos nas características do ecossistema, físicas e bióticas. A redução da diversidade e a perda de espécies específicas no processo de degradação estão sempre atreladas à perda de funções dentro do ecossistema. De acordo com Petchey e Gaston (2006), isso acontece porque cada diferença ecológica, fisiológica e morfológica entre as espécies resulta em uma função específica que afeta outros níveis tróficos e influenciam as propriedades do ecossistema. Por isso, Lanari e Coutinho (2010) recomendaram a avaliação da riqueza funcional. Nesse sentido, Pérez-Harguindeguy et al. (2016) criaram um manual que expõe as características que podem ser avaliadas em cada análise do ecossistema e como cada uma delas está associada a uma função.

A estrutura de um ecossistema se baseia nas relações intra e interespecíficas e a perda de espécies também resulta na alteração da dinâmica na comunidade (Walker et al. 2007). A degradação de áreas promove a formação de paisagens fragmentadas, que tornam os habitats menores e mais isolados, selecionando espécies mais tolerantes as mudanças e reduzindo a capacidade de ocorrência de espécies mais sensíveis, além de promover depressão endogâmica (Begon et al. 2007). A fragmentação também promove o aumento das zonas sob efeito de borda, que leva o interior da floresta à intensa influência da matriz (Forman & Gordon 1986).

Áreas degradadas também se tornam mais susceptíveis à invasão biológica, pois sistemas que possuem desequilíbrio ecossistêmico podem promover o favorecimento de espécies dominantes. Essas espécies podem ser nativas, exóticas ou exóticas invasoras e causar impactos negativos na diversidade local e em uma mudança na estrutura ecológica da comunidade (Santos et al. 2009).

Além da funcionalidade interna do ecossistema, têm-se as perdas relacionadas aos serviços fornecidos por esse ecossistema a sociedade, os serviços ecossistêmicos. Ainda faltam estudos com avaliações mais acuradas das perdas desses serviços (Rodrigues et al. 2009a). Dentre os serviços ecossistêmicos afetados pela degradação, tem-se a polinização, pois a redução de organismos polinizadores pode alterar ou extinguir a produção agrícola dos locais e entorno afetados (Barbosa et al. 2017). Além disso, podem alterar a ciclagem de nutrientes e a decomposição material, que afetam a concentração e o tempo que os nutrientes serão disponíveis para as culturas (Venazzi 2015). Também há uma alteração na produção primária, que é a porta de entrada de energia na teia alimentar, afetando o fluxo de energia e matéria entre toda a cadeia produtiva (Venazzi 2015).

Além disso, têm-se as perdas diretas de fornecimento de matéria-prima de uso biocultural, como para a alimentação humana e animal, uso medicinal, veterinário, espiritual, artesanato, entre outros (Sena et al. 2021). Têm-se as consequências que atingem diretamente a população que não necessariamente convive com as zonas florestais, como as poluições do ar, que promove avanço de doenças respiratórias e o aumento do acesso a doenças que seriam restritas a natureza (Carvalho et al. 2009). Pode ser afetado também o fornecimento da água com boa qualidade, já que as relações hídricas, cursos d'água e composição da água são afetados com a degradação (Venazzi 2015).

Outro serviço ecossistêmico é a estocagem de carbono. As perdas relacionadas à redução de áreas também levam em conta a manutenção dos estoques de carbono para a biomassa florestal global. A alteração na paisagem pode transformar a floresta de sumidouro de carbono para fonte de carbono e, assim, contribuir para aumentar as emissões de carbono para a atmosfera (Clark 2004). De acordo com a FAO (2010; 2012), grande parte dos quase 50% do armazenamento em Gt de carbono mundial das florestas é representada pelas florestas tropicais e, a crescente degradação, está diminuindo as taxas em cerca de 0,5 Gt por ano. Vale ressaltar que, enquanto a

sociedade não entender a importância desses serviços, também ficará difícil de entender o porquê da necessidade da redução da degradação.

### *Degradação de áreas na Caatinga*

A Caatinga é uma Floresta Tropical Sazonalmente Seca localizada, majoritariamente, na região Nordeste do Brasil, que abrange uma área de 912,529 Km<sup>2</sup> (Silva et al. 2017). Formada por diferentes fitofisionomias, é caracterizada por condições climáticas adversas, como ventos fortes e secos, altas temperaturas e precipitações escassas e irregulares. A variação de temperatura média é em torno de 26° C a 27,5° C e nos meses mais secos a temperatura do solo pode atingir até 60° C (Embrapa 2021). Para precipitação há registros de precipitação superior a 1.000 mm no litoral Leste e inferior a 500 mm no interior da região (Embrapa 2021). É nesse ambiente extremamente sazonal e caracterizado por um alto grau de endemismo florístico (Fernandes et al. 2020) que muitas plantas que produzem sementes desenvolveram estratégias para se estabelecer e suportar as condições de aridez (Meiado et al. 2012).

O problema é que esse ecossistema está sendo destruído ou seriamente descaracterizado (Meiado et al. 2020). A partir de análise de imagens por satélite, o MapBiomas (2021) indica que 59% da cobertura do solo da Caatinga ainda é coberto por floresta; 34% por sistemas agropecuários; 4% de formação natural não florestal; 1,7% de área não vegetada e 1% de corpos d'água. Porém, a partir de mapas de cobertura da terra analisados com verificações em menor escala, Silva et al. (2017) estimaram que 63,3% da Caatinga já foi convertida em algum tipo de ecossistemas antropogênicos e que quase nenhuma grande área natural permanece intacta.

A degradação da Caatinga teve início no processo de colonização do Brasil, em decorrência da introdução da pecuária bovina associada às práticas agrícolas inadequadas (Leal et al. 2003). Para complementar, a economia da região foi construída em torno de produtos e serviços fornecidos pela natureza, áreas ilegais de mineração, agricultura intensiva sem consultoria especializada e criação de animais de forma extensiva (Leal et al. 2003; MMA 2004; Fabricante et al. 2015; Albuquerque & Melo 2018).

Dessa forma, o mosaico de terras na Caatinga determina uma maioria de pequenos agricultores com plantios em baixa escala e caprinocultura (Melo 2017). As

grandes áreas estão localizadas, principalmente, na região do submédio São Francisco, com agricultura irrigada intensiva. Como citado, as perdas relacionadas à fragmentação de áreas anteriormente conservadas podem promover alterações irreversíveis a Caatinga. No estudo de fragmentação de áreas na Caatinga, de Fonseca (2017) foi mostrado que 90% da vegetação remanescente está sob efeito de borda (até 2,5 Km). Apesar disso, o estudo também demonstra que ainda se tem alta conectividade funcional entre os fragmentos e mais da metade da vegetação remanescente está localizada em grandes fragmentos.

A abertura de grandes áreas para obras governamentais também está causando impactos na paisagem da Caatinga. A abertura do canal da transposição do rio São Francisco (Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional – PISF) causou desmatamento legalmente autorizado de 28.000 hectares, com faixas de 200m (Socolowski et al. 2021). A obra atende a demanda hídrica de quase 20 milhões de pessoas que vivem nos estados mais ao norte da região seca do Nordeste do Brasil. Outra grande obra com extensão de 1.753 km de extensão em linha principal é a ferrovia Transnordestina, a maior obra linear em execução no Brasil com objetivo de atender exportações agrícolas e minerais (Biachi & Macedo 2018).

O caso é agravado quando se leva em consideração que é uma das regiões mais densamente povoadas e com histórico de pobreza entre as florestas secas sazonais tropicais, promovendo uma pressão muito além da capacidade de carga da região (Leal et al. 2005; Silva et al. 2017). O ecossistema formado nesse contexto de interferência humana direta nos processos ecológicos é chamado de ‘neoecossistema’. De acordo com Backstrom et al. (2018), o acumulado histórico de uso de recursos naturais por numerosas populações humanas tem transformado as florestas secas do mundo em “neoecossistemas”, cujas funções ecológicas podem estar alteradas em níveis distintos. Na Caatinga, esses neoecossistemas dominam as paisagens e modificam a dinâmica das espécies do ecossistema natural, quanto à composição e funcionamento, favorecendo umas e eliminando outras, por sobre-exploração ou mesmo por competição (Albuquerque & Melo 2018).

Outra grave consequência das atividades antrópicas irregulares e da complexa interação com as variações climáticas é o risco à desertificação. As regiões semiáridas são naturalmente susceptíveis aos riscos de desertificação (Soares et al. 2011; Sá et al.

2010) e cerca de 94% da Caatinga já está em risco moderado a alto (Silva et al. 2017). Além disso, a salinização do solo é um dos motores da desertificação e ocorre com frequência em regiões semiáridas por conta da baixa precipitação e alta taxa de evaporação (Sá et al. 2010). A salinização também é agravada em caso de manejo inadequado do uso do solo, com adubações e irrigação em excesso, sendo comum na Caatinga. As áreas desertificadas são caracterizadas pela degradação extrema da terra, cobertura vegetal e biodiversidade, com perda da capacidade produtiva (Sá et al. 2010). Essas áreas já não possuem mais os mesmos fatores de resiliência nem capacidade natural de regeneração natural e as ações para restauração desses ambientes devem ser mais intensas e conseqüentemente onerosas.

Em decorrência de todos os fatores citados, tem-se o crescimento gradual do passivo ambiental para a Caatinga tornando iminente a necessidade de criar políticas públicas com embasamento técnico-científico para programas de restauração voltados ao semiárido brasileiro, bem estruturados e com implantação eficiente (Meiado et al. 2020).

## **Sucessão ecológica**

### *Conceitos e histórico*

A sucessão ecológica é o conjunto de alterações que ocorre na composição das espécies e processos ecológicos de uma área em escala temporal, espacial e biológica que culminam em um tipo de ecossistema persistente (Odum & Barrett 2007; Begon et al. 2007). Essa sucessão pode ser considerada primária, quando ocorre em uma área que a biota original foi totalmente eliminada e pode não haver sequer a estrutura de solo, ou secundária, quando a biota foi parcialmente alterada e tem-se a revegetação pós-evento (Ricklefs 2010; Sampaio et al 2021).

A sucessão dependerá inicialmente da chegada do propágulo ao ambiente e dos processos que permitirão o estabelecimento e a persistência das espécies, ou seja, da atuação dos filtros ecológicos (Kraft et al. 2015). Dessa forma, há influência direta do entorno da localidade, a distância de centros urbanos, presença de plantios agrícolas, produção animal e de fragmentos florestais. Segundo Reis et al. (2014), os fragmentos florestais representam núcleos históricos dos fluxos naturais e servirão como fontes de propágulos e de fauna dispersora de sementes, que irão permitir a recomposição da vegetação.



Além disso, está relacionada ao fitness individual da espécie e sua interação com o meio. A produção das sementes pode ser afetada pela falha na polinização, predação de flores e frutos imaturos; na dispersão pode haver ausência de dispersores; água, temperatura e pressão osmótica podem limitar a germinação; após a emergência fatores externos como herbivoria, patógenos, dessecação e competição podem limitar o estabelecimento das plântulas e o crescimento vegetal ainda pode ser afetado por fatores como sombreamento, microclima, nutrientes e água (Begon et al. 2007; Sampaio et al. 2021).

A sucessão prossegue de modo gradativo e a dinâmica do tipo da interação (planta/planta, planta/animal, planta/solo) e do modo (facilitação ou inibição) determinará a estrutura das comunidades (Walker et al. 2007). Os dois modos de interação conduzem teorias opostas para estruturação de uma comunidade até a sua capacidade de suporte (Callaway & Walker 1997). Para facilitação, entende-se que as espécies vegetais iniciais fornecem condições para que outras espécies se estabeleçam. Áreas em que as características são mais inóspitas e desfavoráveis, a facilitação é mais importante na determinação da estrutura da comunidade do que a competição, principalmente em ambientes com estresse físico (Bertness & Callaway 1994; Holmgren & Scheffer 2010), como na Caatinga. Paterno et al. (2016) demonstraram os mecanismos de facilitação entre espécies enfermeiras e beneficiárias no semiárido no processo de sucessão das comunidades ecológicas.

Em contrapartida, na inibição que é normalmente determinada pela competição, entende-se que uma comunidade será composta inicialmente por espécies que foram mais eficientes na aquisição de espaço e recursos, reduzindo a disponibilidade para indivíduos de outra espécie (Ricklefs 2010). De toda forma, com o tempo haverá a alteração na composição das espécies com diminuição da atuação de espécies pioneiras e maior participação de espécies tardias e de crescimento mais lento (Sampaio et al. 2021). Ainda, segundo as teorias de coexistência o surgimento de espécies distintas dependerá das condições limitantes do meio e do balanço entre a diferença de nichos e de fitness entre elas (Adler 2007).

Assim, durante o processo de sucessão têm-se, ao longo do tempo, aumento dos parâmetros de riqueza, diversidade, densidade e agregação espacial. Além de parâmetros que nem sempre são avaliados, como aumento da biomassa, do equilíbrio dinâmico do ecossistema com aumento da estabilidade, aumento da produtividade

primária bruta (PPB) e diminuição da produtividade primária líquida (PPL) (Begon et al. 2007). Quando se possui a necessidade de interferir e manipular a sucessão ecológica, para acelerá-la tem-se a restauração de áreas degradadas e seu estudo é essencial para determinar as ações que devem ser desenvolvidas nos programas de restauração (Luken 1990).

## **Restauração de áreas degradadas (RAD)**

### *Conceitos e histórico*

De acordo com Reis et al. (2003), a forma mais adequada para restauração de áreas degradadas (RAD) é favorecer o processo de sucessão. Segundo a lei regulamentada 9.985/2000, no Art. 225 da Constituição Federal, define-se recuperação como “a restituição de um ecossistema ou de uma população silvestre degradada a uma condição não degradada, que pode ser diferente de sua condição inicial”. Já o termo restauração é definido como “a restituição de um ecossistema ou de uma população silvestre degradada ao mais próximo possível de sua condição original” (Brasil 2000).

Para os especialistas no assunto, a ecologia da restauração é definida como “o processo de alterar intencionalmente um local para restabelecer o ecossistema que ocupava originalmente, copiando a estrutura, o funcionamento, a diversidade e a dinâmica”, descrito pela Society for Ecological Restoration (SER 1991) e replicado por Primack & Rodrigues (2001). Em complemento, Brancalion et al. (2010) afirmaram que esses ecossistemas precisam ser capazes de se autoperpetuar sem intervenções humanas constantes. No dicionário, os termos ‘recuperar’ e ‘restaurar’ tem definições similares, inclusive, em alguns casos são considerados sinônimos. Nos estudos publicados na língua inglesa, o termo ‘restoration’ também é o mais utilizado nos artigos acerca do assunto.

Segundo Walker et al. (2007), a restauração depende da melhoria do local com realocação e reparação das funções e redução da toxicidade. Assim, de acordo com a Society for Ecological Restoration (SER 2004) o ecossistema retornará a ser similar a área de referência, com abrigo de espécies nativas realizando as funções necessárias para estabilidade, com ambiente físico capaz de sustentar populações e reproduzir, integrando com os demais elementos da paisagem.

A necessidade de restauração de áreas degradadas está em ascensão, não apenas pela importância da recuperação dos processos ecológicos, mas também pelas leis que exigem a presença de áreas de reserva legal e de reposição de vegetação, quando a

degradação é autorizada (Lei 12.651/2012 da Constituição Federal, Brasil 2012). A partir dela o passivo ambiental brasileiro passou de 85 Mha para um pouco mais de 19 Mha (Guidotti et al. 2017). De acordo com essa lei, as propriedades rurais devem se regularizar por meio da recomposição, da regeneração natural da vegetação do local ou por meio da compensação por área equivalente. A Organização das Nações Unidas - ONU dedicou a década de 2021-2030 à Restauração Ecológica, ressaltando a necessidade de estudos e aplicações práticas dentro das políticas de reversão e mitigação das mudanças climáticas (Edwards et al. 2021).

Em dezembro de 2015, durante a COP21, a Conferência das Partes das Nações Unidas (ONU), o Brasil assinou o Acordo de Paris, um acordo voluntário em que cada país define a sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) com as metas individuais para reduzir as emissões de gases de efeito estufa para mitigar as mudanças climáticas. Nesse acordo, o Brasil assumiu a meta de restaurar 12 milhões de hectares de áreas desmatadas até 2030, além de implantar 5 milhões de hectares de sistemas agrícolas integrados, combinando lavoura, pecuária e florestas, e recuperar 5 milhões de hectares de pastagens degradadas, até 2020. Ainda, foi formalizado o desafio de Bonn e as Metas de Aichi para cumprir as premissas acordadas. Por isso, o Brasil aprovou em janeiro de 2017 a Política Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (PROVEG), visando promover políticas públicas e ações efetivas de acordo com o Código Florestal. Para isso, foi criado o Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (PLANAVEG) como principal instrumento de sua implantação (decreto nº 8972, Brasil 2017).

Com isso, após décadas de pesquisa, pode-se dizer que houve avanço significativo no entendimento das necessidades e métodos de RAD. Porém, Martins (2013) ressaltou que falta a incorporação do conhecimento à prática. Ainda, Guariguata e Evans (2019) afirmaram a necessidade de um monitoramento colaborativo, em que a comunidade e o governo participem de todo o processo. No Brasil, o Pacto pela restauração da Mata Atlântica também defende esses pré-requisitos como fundamentais para o sucesso e incluem a necessidade de tecnologias efetivas, divulgação, esforços de capacitação e incentivos econômicos eficazes para os proprietários de terras (Melo et al. 2013).

### *Técnicas de restauração*

A restauração pode ser realizada através da adição de “gatilhos ecológicos”, que são as diferentes técnicas de restauração ecológica (Reis et al. 2014). Na revisão de Guerra et al. (2020), as técnicas mais aplicadas nos biomas brasileiros nas últimas décadas são, em ordem decrescente, plantio de mudas, regeneração natural, semeadura direta, nucleação, transplântio de mudas, biorremediação e translocação da chuva de sementes.

A interferência na área degradada a ser restaurada pode ser realizada de forma passiva ou ativa. A restauração passiva possui intervenção antrópica nula ou reduzida no sentido de favorecer a expressão da sucessão natural, com retorno da sua composição e funções ecológicas (Brançalion et al. 2015). A grande vantagem dessa estratégia é redução dos custos operacionais (Botelho & Davide 2002). As ações realizadas normalmente estão relacionadas ao isolamento do local, podendo haver incremento em fertilização e manejo simples, como retirada de plantas invasoras. O sucesso da técnica depende do potencial de regeneração da área, que varia de acordo com os fatores de degradação, a qualidade física, química e biológica do solo, o banco de sementes viável na área abandonada e a capacidade de colonização das espécies pela chuva de sementes do entorno (Botelho & Davide 2002). Por isso, o sucesso também envolve a necessidade de fragmentos conservados com maior proximidade, que servirão como fonte de dispersores e propágulos. Nos casos que a recuperação da vegetação é lenta e há processos erosivos em ascensão, a técnica será dificilmente bem-sucedida (Kosmas et al. 2000).

Nesse contexto, para tentar acelerar o processo de restauração e garantir sua efetividade, várias técnicas de restauração ativa vêm sendo propostas nas últimas décadas (Brançalion et al. 2015). O método mais antigo e que ainda é utilizado de forma eficiente em diversos ambientes é o plantio de mudas de espécies arbóreas, principalmente nativas, que são alocadas diretamente na área a ser restaurada (Botelho & Davide 2002; Guerra et al. 2020). As mudas irão proporcionar alterações pontuais na área, como sombreamento e formação de microclima para o advento de novas espécies da flora e da fauna, alterações nas condições edáficas e dispersão de sementes para povoamento do entorno. O plantio de mudas pode ser realizado como adensamento, com espécies de rápido crescimento, enriquecimento, para aumentar diversidade local, ou plantio total, com espécies de variadas características. Além disso, com o plantio

tem-se a vantagem de escolher as mudas a serem implantadas, podendo utilizar espécies-chaves e de uso biocultural pela comunidade. A técnica é consolidada e utilizada nos programas de RAD do Pacto de Mata Atlântica com resultados favoráveis de formação florestal rápida e eficiente (Rodrigues et al. 2009b).

A sobrevivência das mudas no campo dependerá desde o manejo realizado na semeadura até as condições edafoclimáticas do local de transplante. As sementes devem ter quebra de dormência, quando necessário, substrato e recipiente adequados a cada espécie, irrigação e iluminação controlada, manejo de invasoras, de pragas e de doenças (Pereira et al. 2011). No processo pré-transplante também deve ser realizada a rustificação das mudas, com redução gradual da irrigação e aumento da exposição solar. Em campo, as características locais, como profundidade, granulometria, compactação, capacidade de retenção de umidade, presença de matéria orgânica e nutrientes também determinarão o sucesso da técnica (Maestre et al. 2003).

A introdução de espécies também pode ser realizada através da semeadura direta das espécies no solo (Brancaion et al. 2015). No Norte do Brasil, na região do Xingu, a técnica tem sido amplamente utilizada (Guimarães et al. 2021). As sementes são coletadas e comercializadas pela população e são beneficiadas e utilizadas nos programas de RAD, através da associação com sementes de espécies de outros portes, como herbáceas e arbustos, e adição de espécies exóticas cultivadas, como de adubação verde e forrageiras. O resultado é a formação de uma floresta ou agrofloresta feita a partir de sementes, com utilização de maquinários e baixa necessidade de mão de obra. A técnica depende totalmente das condições edafoclimáticas locais. A qualidade do solo com alta evaporação e baixa retenção de umidade por conta da compactação e falta de cobertura vegetal pode impedir ou dificultar a emergência. Bem como, plântulas são mais susceptíveis a ataque de organismos, como formigas cortadeiras, herbívoros e/ou doenças (Santos Junior et al. 2004; Knoechelmann 2019).

Ainda, técnicas que consideram o conceito de nucleação também estão sendo desenvolvidas, como a adição de poleiros artificiais e galharias para atração de animais dispersores e a transposição de camadas superficiais de solo para reposição de banco de sementes, matéria orgânica e fauna edáfica (Boaneres & Azevedo 2014; Reis et al. 2014). Os núcleos são formados pontualmente formando manchas de vegetação que irão se expandir para o entorno, gerando conectividade de paisagens fragmentadas e favorecendo a sucessão natural (Boaneres & Azevedo 2014). Cada núcleo

proporcionará alterações edafoclimáticas locais favoráveis ao desenvolvimento vegetal e animal.

A transposição de solo é considerada um tipo de nucleação e é realizada a partir da coleta de solo de uma área que possui condições de conservação para alocação em uma área degradada (Brancalion et al. 2015). A técnica proporciona a possibilidade de transpor o banco de sementes local com elevada riqueza e diversidade de espécies pioneiras e secundárias (Martins 2014; Boaneres & Azevedo 2014). Ainda, a transposição permite a adição de matéria orgânica, nutrientes e organismos essenciais para reestruturação do solo (Martins 2014; Brancalion et al. 2015). A técnica de transposição de solo tem demonstrado resultados satisfatórios em áreas florestais tropicais (Bechara et al. 2007; Pilon et al. 2017), com poucas publicações relacionadas aos ambientes semiáridos.

Além das técnicas citadas devem ser consideradas metodologias que incluam em maior proporção a comunidade local, como a introdução de sistemas agroflorestais e com produção animal. Estudos mais específicos com técnicas de produção e manejo das espécies que incluam o aumento da segurança alimentar, retorno financeiro e redução de riscos econômicos, além de otimização de espaços e do uso dos fatores de produção precisam ser considerados e incentivados (Miccolis et al. 2016). Pois são, em grande maioria, descritivos, como guias técnicos e estudos de caso (Florentino et al. 2007).

A caracterização de técnicas de restauração e estimativas de custo pode ser vista no relatório de pesquisa desenvolvido pela The Nature Conservancy (TNC 2018), como subsídio a programas e políticas públicas e privadas de restauração em larga escala. Os custos são especificados por bioma e varia de acordo com os tipos de: i) Controle de fatores de degradação; ii) Correção da fertilidade do solo/Manejo do solo; iii) Plantio/Semeadura; iv) Controle da vegetação competidora e v) Insumos.

### *Restauração na Caatinga*

A maior parte dos trabalhos no Brasil envolvendo a restauração de áreas degradadas ocorre nas regiões de Mata Atlântica, na região Sudeste do país, com aumento crescente de estudos no Cerrado (Martins 2013). De acordo com a revisão de Guerra et al. (2020), 56% dos estudos realizados no Brasil nas últimas décadas foram em regiões de Mata Atlântica, seguidos de 22% na Amazônia, 16% no Cerrado e apenas 4% na Caatinga, sendo todos realizados em áreas não florestais. Esses dados ressaltam

ainda mais a necessidade de se conhecer o status de degradação na Caatinga e, principalmente, propor medidas eficazes para a sua recuperação.

As técnicas utilizadas nos demais biomas brasileiros não devem ser replicadas metodologicamente em ambiente semiáridos como a Caatinga, onde as características edafoclimáticas são completamente diferentes. Segundo Gómez-Aparicio (2005), o reflorestamento, em regiões áridas e semiáridas, é frequentemente limitado pelas condições hídricas. Leal et al. (2003) afirmaram que a limitação de água interfere no desenvolvimento da planta e reduz a floração, frutificação e produção de sementes, influenciando, conseqüentemente, a taxa de reposição do banco de sementes, essenciais para a ocorrência de regeneração natural.

A regeneração natural passiva pode ser aplicada na Caatinga, a depender das características locais, desde presença de bancos de sementes até potencial de chegada de propágulos. O potencial de regeneração de áreas de Caatinga foi avaliado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA 2017) que indicou cerca de 51% das áreas degradadas com potencial de regeneração natural baixo, 27% médio e 22% alto. Nas análises dos estudos já realizados na Caatinga sobre o assunto vê-se a falta de indicação dos resultados com direcionamento nas conclusões sobre o sucesso da técnica. Existem diversos trabalhos comparativos entre áreas em regeneração e áreas de referência positiva onde os resultados são inconclusivos, fala sobre a presença de regenerantes, redução da riqueza e diversidade (Ferreira et al. 2016), mas não discutem sobre a área estar ou não em sucessão e qual estágio.

O plantio de mudas como técnica de restauração é o método mais utilizado na Caatinga (dados não publicados). Por conta das características dos solos degradados na Caatinga existem diversos estudos que promovem a melhoria da sobrevivência das espécies em campo, que vão desde tratamentos pré-germinativos, como o hidrocondicionamento (Lima & Meiado 2018), até produção de mudas em viveiro com raízes prolongadas desenvolvidos pelo grupo de pesquisa da pesquisadora Gislene Ganade na Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), e a inoculação de mudas com fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) (Oliveira et al. 2015; Texeira-Rios et al. 2016). Estes estudos se baseiam nas características individuais das mudas, mas ainda faltam estudos mais apurados que evidenciem como a presença das espécies arbóreas interfere na restauração total da área, com avaliação de regenerantes e outros parâmetros do entorno.

A semeadura direta ainda é uma técnica pouco estudada para a Caatinga e os resultados em longo prazo para espécies arbóreas ainda não são promissores, com baixa emergência e alta mortalidade (Bakke et al. 2017). Porém, estudos com a semeadura de espécies herbáceas em baixa e alta densidade têm apresentados resultados satisfatórios pelo Núcleo de Ecologia e Monitoramento Ambiental (NEMA) da Universidade Federal do Vale do São Francisco, com aumento de cobertura vegetal em áreas totalmente inóspitas, como solos rasos e pedregosos.

O NEMA possui estudos também relacionados à utilização de núcleos de restauração com diferentes metodologias, que inclui o plantio diversificado com pioneiras, rústicas e cactos, considerado núcleo de aceleração da regeneração natural, com vegetação secundária inicial, tardia e uso de galharias no entorno, chamado de núcleo de aceleração da regeneração natural com espécies secundárias e os núcleo de alta densidade que se estabelecem em torno de zonas úmidas, vales e depressões (Socolowski et al. 2021). Os resultados iniciais são positivos, com alta sobrevivência das mudas e cobertura vegetal crescente. A utilização dessa metodologia na Caatinga ainda é restrita e os estudos a respeito normalmente se referem à utilização de galharias e poleiros artificiais (dados não publicados).

Considerando os aspectos citados, as técnicas que possuem maior integração com a comunidade, como agrofloresta e o sistema agrossilvipastoril também estão sendo avaliadas para Caatinga. A fonte de renda dos pequenos agricultores baseada na produção animal, com enfoque na caprinocultura, é uma realidade e vê-se a necessidade de envolver essa produção nos programas de restauração. Porém, não são encontrados estudos publicados a respeito do assunto com diretrizes de metodologia para aplicação.

Sabe-se da existência de projetos realizados nas zonas rurais com associações e empresas públicas, como do Instituto Regional da Pequena Agropecuária Apropriada (IRPA) (IRPA 2019) que possui diversos trabalhos intitulados de Recaatingamento no semiárido. Nesse livro, os autores descrevem os estudos de casos já implantados com sucesso para características do solo, do ambiente e relacionado ao retorno financeiro para os proprietários que implantaram as técnicas. Na Caatinga, a produção de culturas e pastagem normalmente necessita de alta mão de obra para implantação e manejo, além de sistemas de irrigação que limitam os locais onde podem ser realizados e aumentam os custos de produção.



Outros aspectos devem ser levados em consideração na escolha das técnicas para a Caatinga, como as diferenças das ecorregiões, das vegetações e condições climáticas locais (Siqueira-Filho et al. 2012; Meiado et al. 2020). Além disso, têm-se as diferenças locais, econômicas, sociais e culturais, que também precisam ser levadas em consideração. A produção animal de forma extensiva interfere diretamente nos projetos de restauração, pois os caprinos podem se alimentar das espécies implantadas (Fabricante et al. 2017), destruírem estruturas colocadas e pisotear regenerantes.

De acordo com o TNC (2018), os custos para restauração na Caatinga podem chegar a R\$19.582,00 por hectare, quando há necessidade de manejo completo. O menor custo (R\$ 257,00) foi observado em áreas de regeneração natural, apenas com controle de invasoras por coroamento. Ainda, segundo o IRPA, 57,68% dos custos estão relacionados ao cercamento da área, 22,46% a preparação do solo, 18,71% na produção das mudas e 1,15% para manutenção (IRPA 2019).

#### *Diagnóstico, planejamento e monitoramento*

Múltiplos fatores interferem no sucesso de uma técnica de restauração de áreas degradadas. Xiao-Jun et al. (2003) sugeriram a necessidade de um diagnóstico prévio que tenha uma abordagem biológica, de habitat, de processos ecológicos, de função de ecossistema e de abordagem de paisagem. Para isso, é fundamental observar o mosaico ambiental e as características do entorno da área a ser restaurada (Rodrigues & Gandolfi 2000), como a proximidade com fragmentos preservados (Brancalion et al. 2015).

Em decorrência da grande variação da fitofisionomia da Caatinga e das diferentes atuações antrópicas nesse ambiente, o estudo das características da vegetação nesses fragmentos auxiliará o entendimento dos fenômenos que acontecerão durante a RAD. Esses fragmentos são chamados de área de referência e são utilizados como modelos para planejar, monitorar e conduzir a restauração (SER 2004). Dentre as características avaliadas, cita-se a composição florística associada às informações sobre estrutura e dinâmica da vegetação (Rodrigues & Gandolfi 1998; Marcuzzo 2012). Em alguns casos, esses fragmentos não são intactos e totalmente preservados, sendo considerados, por isso, como áreas de referência positiva. Guerra et al. (2020) observaram que, apesar da importância, menos de um terço dos estudos de restauração realizados no Brasil utilizaram alguma área como referência positiva ou negativa.

Além da presença dos fragmentos, a proximidade com áreas agrícolas, construções, rodovias ou outras áreas degradadas também irá interferir no processo. Nas áreas de produção, principalmente quando utiliza agricultura intensiva, a adubação química pode promover a entrada adicional de nutrientes ao sistema, favorecendo espécies específicas e mudando a estrutura e dinâmica da comunidade (Eycott et al. 2012). A monocultura pode proporcionar uniformização da paisagem e dificultar o fluxo de dispersores e polinizadores (Eycott et al. 2012). Além disso, áreas abandonadas, como pastagens, poderão servir como fonte de dispersão de espécies exóticas invasoras, assim como as margens de rodovias e áreas que apresentam grande quantidade de espécies exóticas, principalmente gramíneas (Fabricante et al. 2013). Ainda, esses ambientes podem servir como barreiras físicas à movimentação da fauna e a dispersão pela chuva de sementes. Outros fatores externos podem influenciar diretamente os programas de RAD, como a presença de animais de grande porte e da população que, porventura, se utilize da área, que demonstrará a necessidade do isolamento efetivo do local.

Em relação à área degradada propriamente dita, o conhecimento da história, persistência e intensidade de distúrbios que promoveram a degradação é essencial para compreender a capacidade de resiliência ou autorecuperação daquele local, como o fluxo de energia e ciclos biogeoquímicos (Rodrigues & Gandolfi 2000; Araki, 2005). Entre outros fatores, analisar o estado físico (ex. compactação), químico (ex. nutrientes) e biológico (ex decompositores) do solo poderá determinar a necessidade de intervenção pré-plantio para sua melhoria (Sampaio et al. 2021). Observar o banco de sementes poderá indicar a precisão de semeio de novas espécies para aumentar cobertura vegetal e diversidade, incluindo herbáceas, ou se há presença de sementes de espécies exóticas, indicando a necessidade de manejo (Costa et al. 2013).

É a partir dessas análises iniciais que poderão ser definidos os fatores limitantes para o planejamento, criando estratégias adequadas para cada situação e melhorando o sucesso da restauração. Nesse sentido, em 2018 foi criado o WebAmbiente, um sistema de informação interativo para auxiliar tomadas de decisão no processo de adequação ambiental da paisagem rural, em que é possível simular ambientes e obter as melhores estratégias de recomposição ambiental para cada situação (pela Embrapa e Secretaria de Extrativismo e Desenvolvimento Rural Sustentável – MMA) (WebAmbiente 2022). Sampaio et al. (2021) também criaram uma chave de identificação para auxiliar na

escolha das técnicas em unidades de conservação no Cerrado, que tem como ponto de partida o solo.

Além disso, o planejamento da técnica a ser utilizada também depende do objetivo previamente definido antes da sua implantação. O objetivo pode ser determinado pela legislação a depender da área, com diferenças entre áreas de reserva legal, de preservação permanente, zona de adequação ambiental e de reposição da vegetação (Sampaio et al. 2021), diferente de restauração com objetivo puramente ecológico ou em casos de necessidade de obter retorno financeiro do local. Cada uma terá regras, prazos e recursos limitados, o que altera efetivamente o planejamento da intervenção. Por isso, a escolha da técnica mais adequada de restauração de um ecossistema depende de cada situação e envolve, desde os resultados ecológicos esperados, ao recurso financeiro disponível. Em todo caso, para que o processo de restauração seja realizado de forma efetiva, deve haver uma boa relação custo-benefício (Brancaion et al. 2016).

Após o planejamento e implantação da técnica adequada é essencial que haja o monitoramento. É nesse momento que será determinado a eficácia, a necessidade de manutenção e a criação de respaldo para posteriores aplicações em locais distintos (Brancaion et al. 2013). Para isso, diversos parâmetros podem ser considerados no monitoramento, como a determinação das características físicas, químicas e a análise da fauna do solo, micro, meso ou macro, pode contribuir para determinar o grau de sustentabilidade de uma prática de RAD (Linden et al. 1994). Bem como, os parâmetros fitossociológicos, que permitem avaliações de incremento de riqueza, abundância e diversidade de espécies vegetais ao longo do tempo (Freire 2015). A identificação das espécies ainda informará a formação de grupos funcionais que ajudarão a compreender a dinâmica do ecossistema. A partir de dados morfológicos, pode-se estipular também a quantidade de incremento de estoque de carbono. Apesar disso, a revisão de Guerra et al. (2020) também revelou que os parâmetros estudados na restauração se concentraram, principalmente, no componente arbóreo (81%), com poucos estudos avaliando outras formas de vida. Rosenfield (2017) em revisão de estudos de restauração estabelece ainda os processos de ciclagem de nutrientes, produtividade, resiliência do ecossistema, relações hídricas, interações bióticas e regeneração natural como determinantes do funcionamento do ecossistema e sucesso da restauração.

Para a avaliação das técnicas é importante, também, o conhecimento de que determinados processos ecológicos e atributos funcionais só se expressarão em épocas específicas (Martins 2013). Os resultados efetivamente positivos aparecem após um longo período, reforçando como processos ecológicos podem levar muito tempo para se recuperar (Rosenfield 2017). Fato agravado para Caatinga, onde a sucessão pode ocorrer de forma mais lenta, por conta dos eventos chuvosos erráticos que afeta diretamente o recrutamento pelo banco de sementes e plântulas (Santos et al. 2009).

Por isso, a necessidade crescente do desenvolvimento de técnicas de RAD mais eficazes ecologicamente e que visem reduzir os custos da implantação (Santos 2010). Assim, este projeto de tese de doutorado tem como objetivo geral promover a viabilização de técnicas alternativas para a restauração de áreas degradadas na Caatinga.

## Capítulo 1

### **Como a retirada do solo para transposição em áreas degradadas da Caatinga afeta o ecossistema de referência doador?**

Raphaela Aguiar de Castro<sup>1,2</sup>; Renato Garcia Rodrigues<sup>3</sup> & Marcos Vinicius Meiado<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil.

<sup>2</sup> Laboratório de Fisiologia de Sementes, Departamento de Biociências, Universidade Federal de Sergipe, Itabaiana, Sergipe, Brasil.

<sup>3</sup> Núcleo de Ecologia e Monitoramento Ambiental, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Ciências Agrárias, Petrolina, Pernambuco, Brasil.

### **Implicações práticas**

- Comprovar a possibilidade de uso de áreas conservadas como doadoras de solo para técnica de restauração com transposição de solo;
- Demonstrar que as clareiras abertas no ecossistema doador retomam a colonização em curto prazo, sem prejuízos ao ecossistema.

### **Resumo**

Considerando as vantagens em decorrência da transposição de solo em áreas degradadas e a necessidade de obtenção de áreas de empréstimo de solo sem interferência negativa no ecossistema, este capítulo teve como objetivo avaliar as consequências da retirada de solo em áreas conservadas para transposição. Para tal, foram retiradas camadas de solo 10 cm em clareiras de 1 x 1 m, 2 x 2 m, 3 x 3 m, 4 x 4 m, e 5 x 5 m e uma área sem remoção (controle), conduzidas com quatro repetições. As clareiras foram avaliadas periodicamente através de uma subparcela (1 m<sup>2</sup>), no centro de cada parcela, por três anos. Contabilizou-se riqueza, densidade, diversidade e cobertura do solo, analisadas com ANOVA dois fatores com GLM. A riqueza, abundância e diversidade demonstraram diferenças estatísticas ( $p < 0,001$ ) entre os tamanhos das parcelas, os tempos e suas interações. Para riqueza, inicialmente houve maior número na parcela controle, porém a partir de 50 dias de avaliação os valores chegaram à igualdade estatística, permanecendo até última análise, com média final de  $4,1 \pm 0,8$  espécies. Os valores de densidade indicam a colonização da área, com picos em épocas chuvosas e valores mais elevados nos tratamentos de retirada do solo, em relação ao controle. Para diversidade, o padrão foi o mesmo com média final de  $0,45 \pm 0,21$ . Para cobertura, houve variação dos dados, mas demonstrou-se alta cobertura do solo por serrapilheira. Os resultados corroboram com a possibilidade de uso de áreas conservadas como fonte de solo para transposição em áreas degradadas, com retorno da vegetação após menos de três anos. As clareiras são rapidamente colonizadas pela presença de propágulos, principalmente de herbáceas pioneiras. A abertura favorece uma modificação na dinâmica estrutural, possibilitando a ocorrência de espécies que são intolerantes à sombra, gerando alterações na diversidade, microclima e consequentemente nos organismos locais. Portanto, um estímulo para regeneração natural da vegetação ao longo do tempo.

**Palavras chaves:** Clareiras, restauração, herbáceas, topsoil.

### **Abstract**

Talking about the advantages resulting from the soil transposition on degraded areas and the need to obtain areas for borrowing soil without negative interference in the ecosystem, this chapter aimed to evaluate the consequences of removing soil for transposition from natural areas. Therefore, 10 cm depth soil were removed in gaps of 1 x 1 m, 2 x 2 m, 3 x 3 m, 4 x 4 m, and 5 x 5 m, and an area without removal (control), conducted with four replications. The areas were periodically evaluated through a subplot (1 m<sup>2</sup>), at the center of each plot, during the period of three years. Richness, density, diversity, and soil cover were evaluated, analyzed with two-way ANOVA with GLM. Richness, abundance, and diversity showed statistical differences ( $p < 0.001$ ) between plot sizes, times, and their interactions. For richness, initially there was a higher number on the control plot, but after 50 days of evaluation the values reached statistical equality, remaining until the last analysis, with a final mean of  $4.1 \pm 0.8$  species. Density values indicate the colonization of the area, with peaks during the rainy seasons and higher values in soil removal treatments, in relation to the control. For diversity, the pattern was the same with a final mean of  $0.45 \pm 0.21$ . For soil cover, there was variation in the data, but high soil cover by litter was demonstrated. The results corroborate the possibility of using natural areas as a source of transposition soil on degraded areas, with vegetation growing again after at least three years. The gaps are rapidly colonized by the presence of propagules, mainly pioneer herbaceous plants. The opening favors a change in the structural dynamics, allowing the occurrence of species that are intolerant to shade, generating changes in diversity, microclimate, and consequently in local organisms. Thus, a stimulus for natural regeneration of vegetation over time.

**Keywords:** Gaps, restoration, herbs, topsoil.

## **Introdução**

A transposição do solo como técnica para restauração de áreas degradadas é uma alternativa aos métodos mais comumente utilizados como, o plantio de mudas de arbóreas nativas (Guerra et al. 2020). A ideia dessa metodologia surgiu da necessidade de restaurar processos distintos do ecossistema que podem não ser rapidamente supridos pelo plantio, como recuperação da estrutura e composição do solo. A transposição do solo promove o processo de nucleação através do banco de sementes, dos materiais vegetais como fragmentos de raiz e caule que podem rebrotar, da matéria orgânica, nutrientes, microrganismos, meso e macrofauna (Martins 2014; Ferreira et al. 2015a; Brancalion et al. 2015). A nucleação permite o favorecimento das condições locais para o advento da sucessão ecológica.

A escolha das áreas que receberão o solo transposto precisa ser avaliada com cautela. Ferreira (2015) afirmou que é desejável que o solo transposto seja depositado em locais que perderam o solo superficial, como minas inativas, cascalheiras e áreas de empréstimo de solo. Áreas em que o solo foi removido e houve exploração do subsolo, como áreas de empréstimo para construção (Alves & Souza 2008) perderam as camadas essenciais do solo, e conseqüentemente seus meios de regeneração bióticos. Essas áreas sofrem impacto direto das chuvas intensas que aceleram o processo erosivo (Leal et al. 2003). Dessa forma, apresentam baixa resiliência com possibilidade de regeneração anulada ou extremamente diminuída (Chada et al. 2004), exigindo maior intervenção para que a sucessão natural ocorra (Trujillo-Miranda et al. 2018).

A retirada de solo para técnica é normalmente recomendada em áreas onde a vegetação nativa será desmatada legalmente, seja pela agricultura, pecuária, mineração, abertura de estradas e canais ou para construção civil (Martins 2014; Brancalion et al. 2015; Ferreira 2015). Nesses casos, a camada superficial do solo seria removida e provavelmente descartada. Porém, o solo é um recurso não renovável e complexo que demora anos para chegar a sua composição física, química e biológica (Bulot et al. 2014) e não deveria ser desperdiçado. Algumas mineradoras já estocam esse material em leiras com o propósito de devolvê-lo para a cava de mineração (Ferreira 2015).

De preferência, o solo a ser transposto deve ser coletado em uma área conservada próxima à área degradada, para respeitar a diversidade regional (Brancalion et al. 2015). Esta área precisa estar sem fatores de degradação ou em menor grau para que possa favorecer a regeneração natural do local degradado (Sampaio et al 2021). A



presença de espécies exóticas invasoras no ecossistema doador, por exemplo, deve ser observada, visto que elas podem se estabelecer na área e dificultar a sucessão natural (Fabricante et al. 2013). Dessa forma, aumentando até os custos por conta da necessidade de manejo (Mesquita et al. 2013).

Ainda, se a área doadora de solo estiver atrelada apenas as áreas de desmatamento legal, o uso da técnica pode ser reduzido ou inviabilizado. Por isso, é necessário avaliar os possíveis locais que podem servir como áreas doadoras de solo e o impacto que a retirada do solo pode promover nesses locais. Ou seja, se as clareiras abertas para a retirada do solo conseguirão retomar a vegetação ao longo do tempo.

Considerando as vantagens em decorrência da transposição de solo em áreas degradadas e a necessidade de obtenção de áreas de empréstimo de solo sem interferência negativa no ecossistema, este capítulo analisou a hipótese de que as áreas de empréstimo de solo podem ser feitas em áreas conservadas sem interferência negativa no ecossistema doador. Com objetivos de: i) Determinar qual tamanho ideal para retirada de solo e ii) Em quanto tempo haverá o retorno da vegetação e funcionalidade do ecossistema doador.

## **Material e Métodos**

### ***Área de estudo***

Foram utilizadas duas áreas de 4,8 e 4,1 ha localizadas no Campus de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), em Petrolina, Pernambuco. O clima predominante é o Tropical Semiárido, com médias anuais de 26 °C de temperatura, com amplitudes que variam de 14 °C a 37 °C, e média de 535,5 mm de precipitação, também variável, como 219 mm em 2019 e 519 mm em 2021 (N = 10 anos) (Embrapa Semiárido 2010; Labmet 2022).

As áreas de estudo foram consideradas como áreas de referência positiva por apresentar características de estado de conservação, com presença de estrutura da comunidade com espécies herbáceas, arbustivas e arbóreas de grande porte como *Amburana cearensis* (Allemão) A.C.Sm. (Fabaceae) e *Pseudobombax simplicifolium* A.Robyns (Malvaceae). A cobertura do solo é majoritariamente formada por *Neoglaziovia variegata* (Arruda) Mez (Bromeliaceae), com alta abundância.

### ***Delineamento experimental***

O solo foi coletado em sistema de parcelas ao longo da área, sorteadas aleatoriamente e distantes pelo menos 10m. As dimensões foram de 1 m x 1 m (1 m<sup>2</sup>), 2 m x 2 m (4 m<sup>2</sup>), 3 m x 3 m (9 m<sup>2</sup>), 4 m x 4 m (16 m<sup>2</sup>) e 5 m x 5 m (25 m<sup>2</sup>), com quatro repetições cada. Para comparação, também foram avaliadas simultaneamente parcelas sem retirada do solo (controle), também em quatro repetições, na dimensão de 1 m x 1 m. A retirada do solo foi realizada após o fim da estação seca do local em 2019, em uma profundidade de coleta de 10 cm.

### ***Riqueza, densidade, diversidade e cobertura vegetal***

Para avaliação da riqueza, densidade e diversidade, as parcelas foram monitoradas com a avaliação da quantidade de indivíduos por espécie emergentes a partir de subparcelas fixas de 1 x 1 m no centro de cada parcela. Essa análise foi realizada semanalmente nos três primeiros meses da retirada do solo, com posterior aumento de período até a finalização do experimento, que ocorreu três anos após a sua implantação.

Ainda, a cobertura vegetal foi avaliada após três anos de experimento, na estação chuvosa, por meio de fotografia das subparcelas a uma altura média de 1,5 m, com auxílio de um gabarito feito de madeira nas dimensões exatas que definiram as margens da subparcela. As fotos foram analisadas no programa IPWIN 32, plotando um GRID com 400 quadrantes para contabilização daqueles que estavam cobertos com espécies vegetais e determinação da porcentagem de cobertura viva. Para avaliação do retorno da serrapilheira, foi somada a cobertura viva a porcentagem cobertura por qualquer meio vegetal que se caracterizasse como serrapilheira, como galhos e folhas secas, chamada de cobertura total.

### ***Composição florística***

Para a análise da composição das espécies realizou-se a análise de similaridade (ANOSIM) (Clarke & Green 1988) entre os tratamentos, e escalonamento multidimensional não paramétrico (NMDS) (Holland 2008), a fim de estabelecer o quão distante cada tratamento estava um do outro em relação à composição de espécies. Nas duas análises foi considerado o índice de Jaccard, com presença e ausência das espécies ao longo dos três anos de avaliação.

### ***Análises Estatísticas***

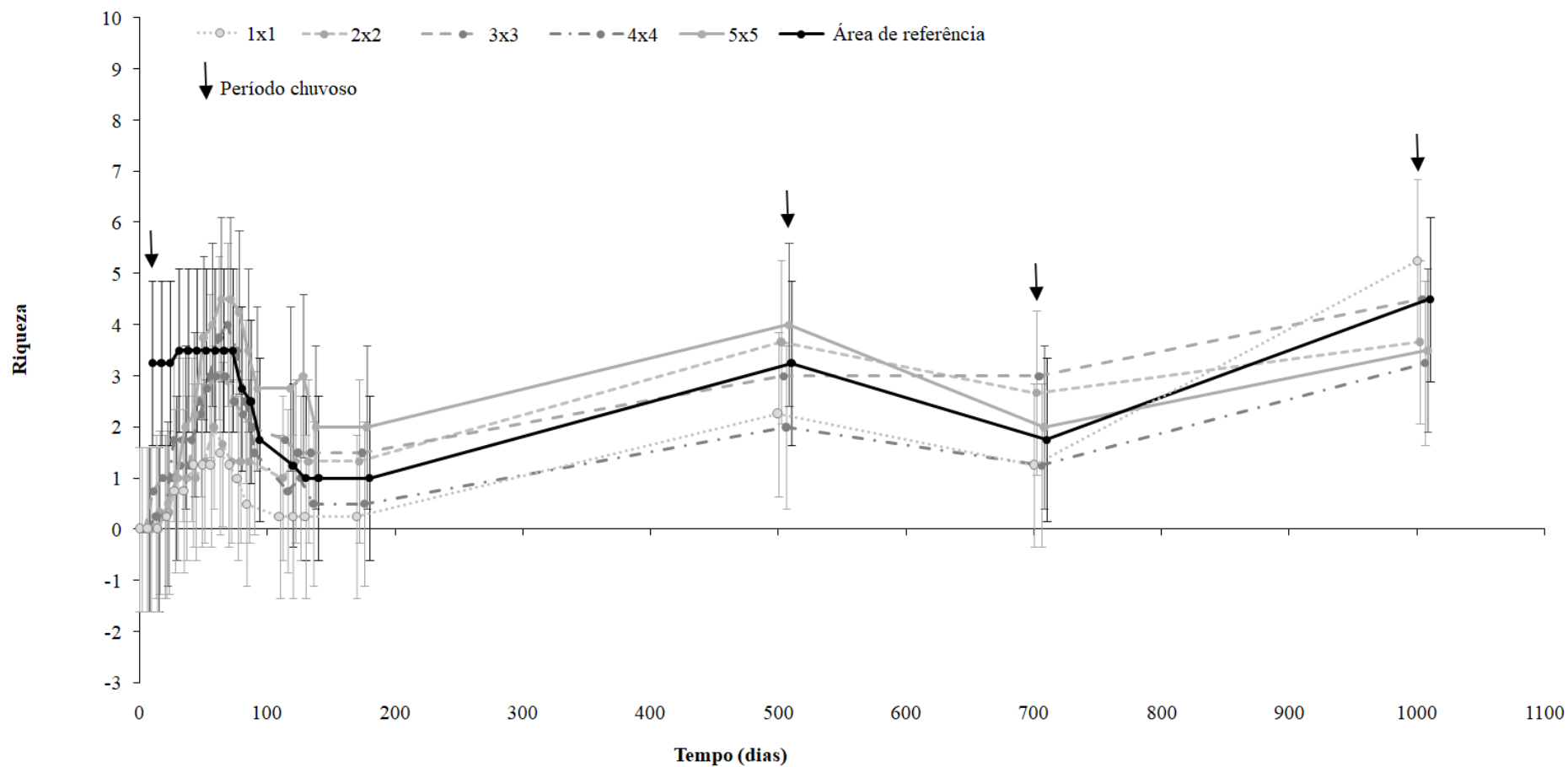
As premissas de análise dos dados, como homocedasticidade, normalidade, independência e esfericidade foram calculadas anteriormente à análise de variância (Gomes 1990). A avaliação da riqueza, densidade, diversidade e cobertura vegetal ao longo do tempo entre os tratamentos instalados foram realizadas a partir de uma ANOVA (GLM) com posterior teste Duncan (5% de significância). A comparação entre os tratamentos foi determinada através intervalo de confiança plotado nos gráficos. Todas as análises estatísticas foram realizadas nos programas STATISTICA 13, com  $\alpha = 5\%$  (StatSoft 2012) e no software R (R Development Core Team 2013).

### **Resultados**

#### ***Riqueza, densidade, diversidade e cobertura vegetal***

As análises de riqueza das áreas demonstram que as primeiras espécies nas áreas de retirada do solo começaram a emergir já na primeira semana de análise, ou seja, sete dias após a retirada do solo (média de 0,75 para o tratamento de 3 x 3 m e 0,25 em 4 x 4 m) com posterior crescimento e redução apenas nos períodos de seca. Inicialmente tem-se maior riqueza na parcela controle (média de  $3,5 \pm 1$  espécies), o que era esperado, pois não houve retirada da vegetação nesse tratamento.

Nas análises de variância, viu-se a diferença entre os tratamentos e os tempos avaliados, mas não há interação entre eles (Tabela 1.1). Ou seja, independente do período avaliado, os tratamentos respondem da mesma forma (Figura 1.1). A diferença inicial ocorre no controle em relação às demais, porém ela acaba a partir de 56 dias de avaliação, quando os valores chegam à igualdade estatística, permanecendo até última análise, com média final de  $4,1 \pm 0,8$  espécies (Figura 1.1).



**Figura 1.1** Riqueza de espécies entre os tratamentos de retirada de solo para transposição de área de referência positiva na Caatinga, no município de Petrolina, PE.\* A seta representa o início do período chuvoso na região.

\* A diferença significativa entre os tratamentos foi determinada através dos intervalos de confiança.

**Tabela 1.1** Resultados da ANOVA (GLM) para os parâmetros de riqueza, densidade, diversidade e cobertura vegetal entre os tratamentos de retirada de solo para transposição de área de referência positiva na Caatinga, no município de Petrolina, PE.

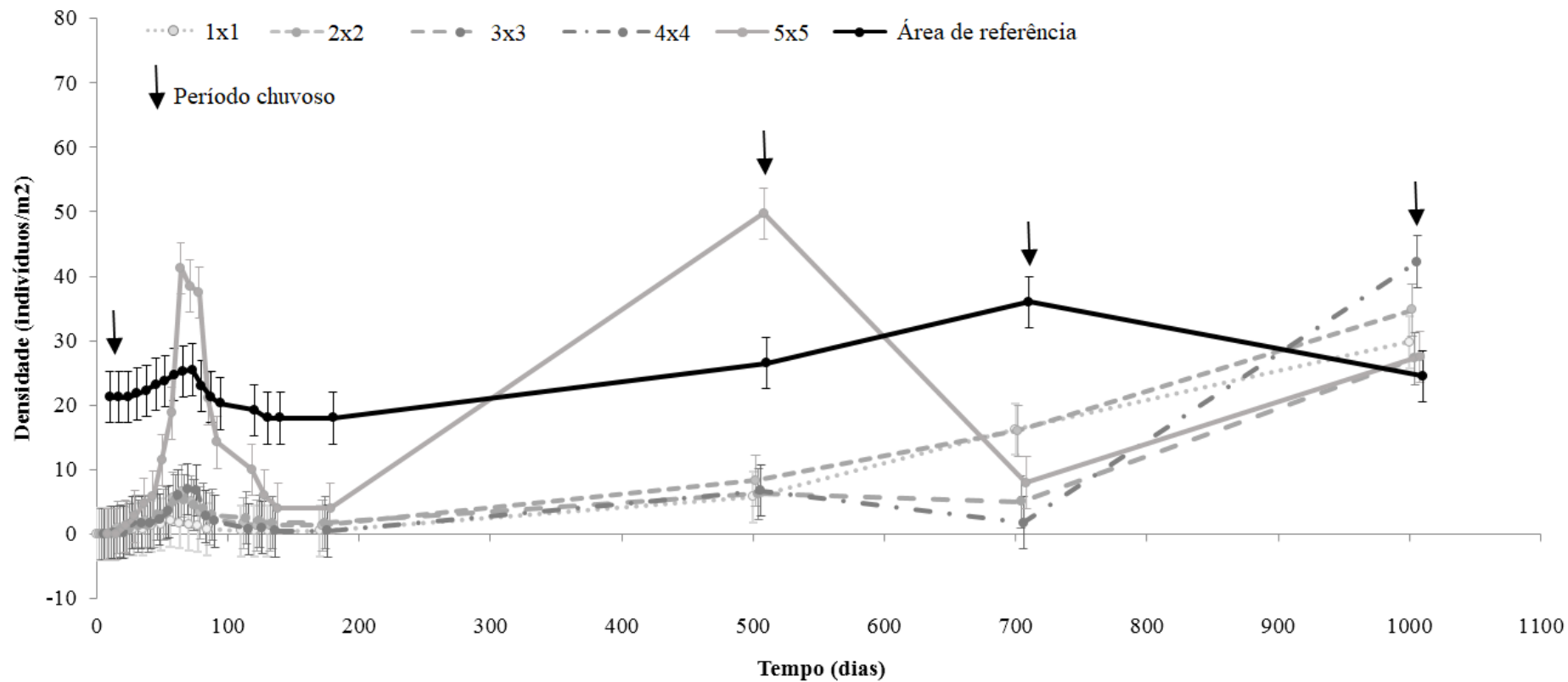
	<b>Densidade</b>								
	<b>Riqueza</b>			<b>(indivíduos/m<sup>2</sup>)</b>			<b>Diversidade</b>		
	<b>DF</b>	<b>F</b>	<b>p</b>	<b>DF</b>	<b>F</b>	<b>p</b>	<b>DF</b>	<b>F</b>	<b>p</b>
<b>Tratamentos</b>	431	15,7	<0,001*	431	69,6	<0,001*	431	8,9	<0,001*
<b>Tempo</b>	413	7,6	<0,001*	413	10,9	<0,001*	413	5,2	<0,001*
<b>Tratamentos:Tempo</b>	323	1,3	0,07	323	2,3	<0,001*	323	1,2	0,17

\* Significativo à 5%.

Para densidade, os tratamentos, os tempos e a interação entre eles foram significativos (Tabela 1.1). O número de indivíduos que emerge nas parcelas depende do período avaliado, com os tratamentos se comportando de forma distinta estatisticamente (Figura 1.2). Este fato pode ser observado principalmente nos períodos chuvosos, quando a maior parcela retirada (5 x 5 m) apresenta picos de abundância de espécies por área e alcança valores médios de 41,25 e 38,5 indivíduos/m<sup>2</sup> (nos dias 56 e 63) até 49,75 indivíduos/m<sup>2</sup> (500 dias), enquanto o maior valor observado no controle é de 26,5 indivíduos/m<sup>2</sup> (500 dias). Na análise final é possível observar que os tratamentos permanecem distintos, sendo o menor valor para o controle e o maior para as parcelas de 4 x 4 m.

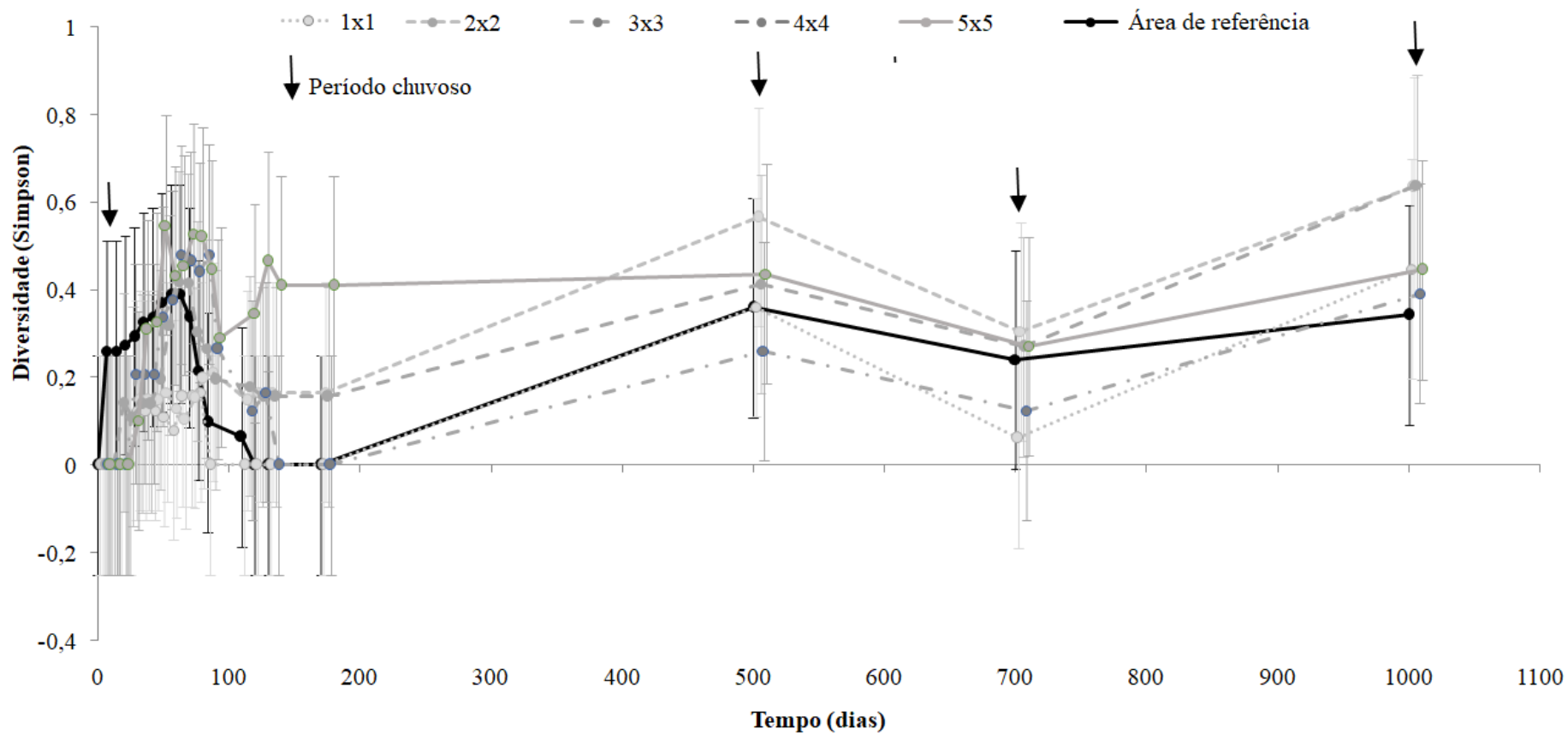
A espécie *N. variegata* representou 82% dos indivíduos totais observados no controle com média de 17,5 indivíduos/m<sup>2</sup>. Para as áreas abertas, a espécie nesses três primeiros anos de análise apareceu em baixa densidade (média de 0,58 indivíduos/m<sup>2</sup>) o que também pode ter permitido o surgimento em maior densidade das outras espécies, como *Corchorus argutus* Kunth (Malvaceae) que em uma parcela de 5 x 5 m chegou a ter 60 indivíduos/m<sup>2</sup> e no controle teve o máximo de 5 indivíduos/m<sup>2</sup>.

Para diversidade, os tratamentos apresentaram valores diferentes significativamente, bem como os tempos, mas a interação entre eles não foi significativa (Tabela 1.1). Estes dados se devem por pontos específicos das análises até 200 dias, depois, nas demais análises, os resultados se igualam estatisticamente com média final de 0,45 ± 0,21 (Figura 1.3).



**Figura 1.2** Densidade de espécies (indivíduos/m<sup>2</sup>) entre os tratamentos de retirada de solo para transposição de área de referência positiva na Caatinga, no município de Petrolina, PE.\* A seta representa o início do período chuvoso na região.

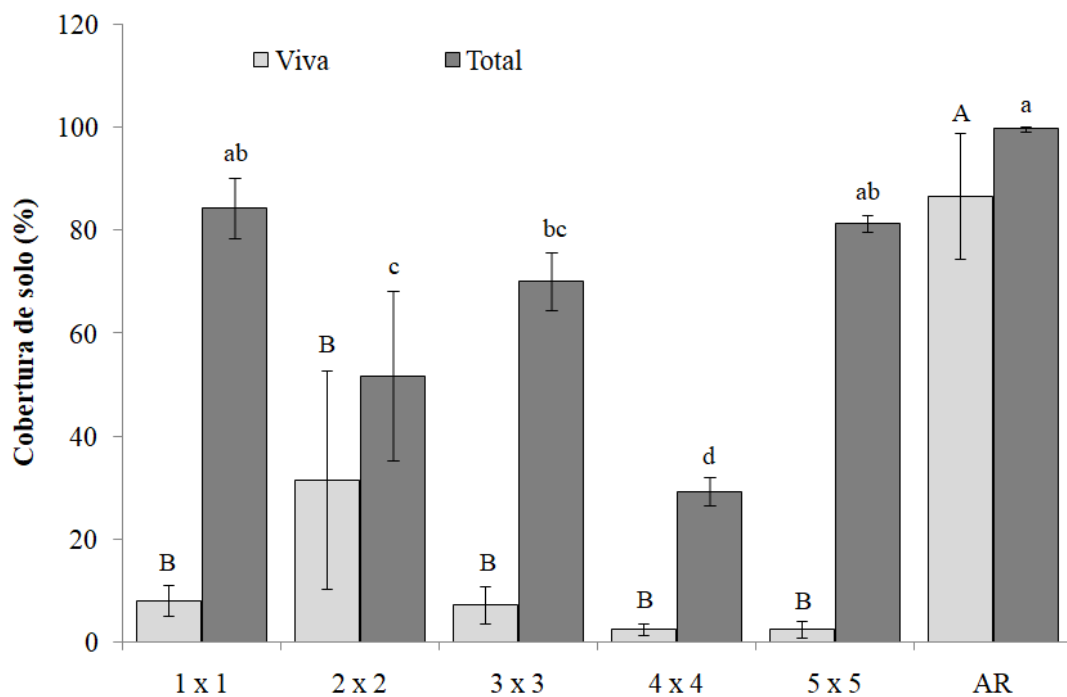
\* A diferença significativa entre os tratamentos foi determinada através dos intervalos de confiança.



**Figura 1.3** Diversidade (Simpson) entre os tratamentos de retirada de solo para transposição de área de referência positiva na Caatinga, no município de Petrolina, PE.\* A seta representa o início do período chuvoso na região.

\* A diferença significativa entre os tratamentos foi determinada através dos intervalos de confiança.

Na análise de cobertura do solo (Figura 1.4) pode-se observar como a cobertura do solo total é sempre maior que a cobertura viva. Na diferença entre os tratamentos, pode-se observar que a menor área aberta (1 x 1 m) tem alta cobertura total (média de  $84,25\% \pm 11,34\%$ ), bem como as áreas de 5 x 5 m ( $81,31\% \pm 3,32\%$ ). Em contrapartida, a cobertura viva formada pelas espécies herbáceas e regenerantes ainda é bem inferior que as áreas de referência (controle). Porém, vale destacar que a cobertura do solo no controle é predominantemente composta pela bromélia *N. variegata*. Nos demais tratamentos a espécie não é observada da mesma forma.



**Figura 1.4** Cobertura de solo (%) entre os tratamentos de retirada de solo para transposição de área de referência positiva na Caatinga, no município de Petrolina, PE.

\* Médias seguidas pela mesma letra maiúscula correspondem à igualdade significativa (5%) entre os tratamentos de cobertura viva, e as minúsculas correspondem à igualdade significativa entre os tratamentos de cobertura total. As barras representam o erro padrão.



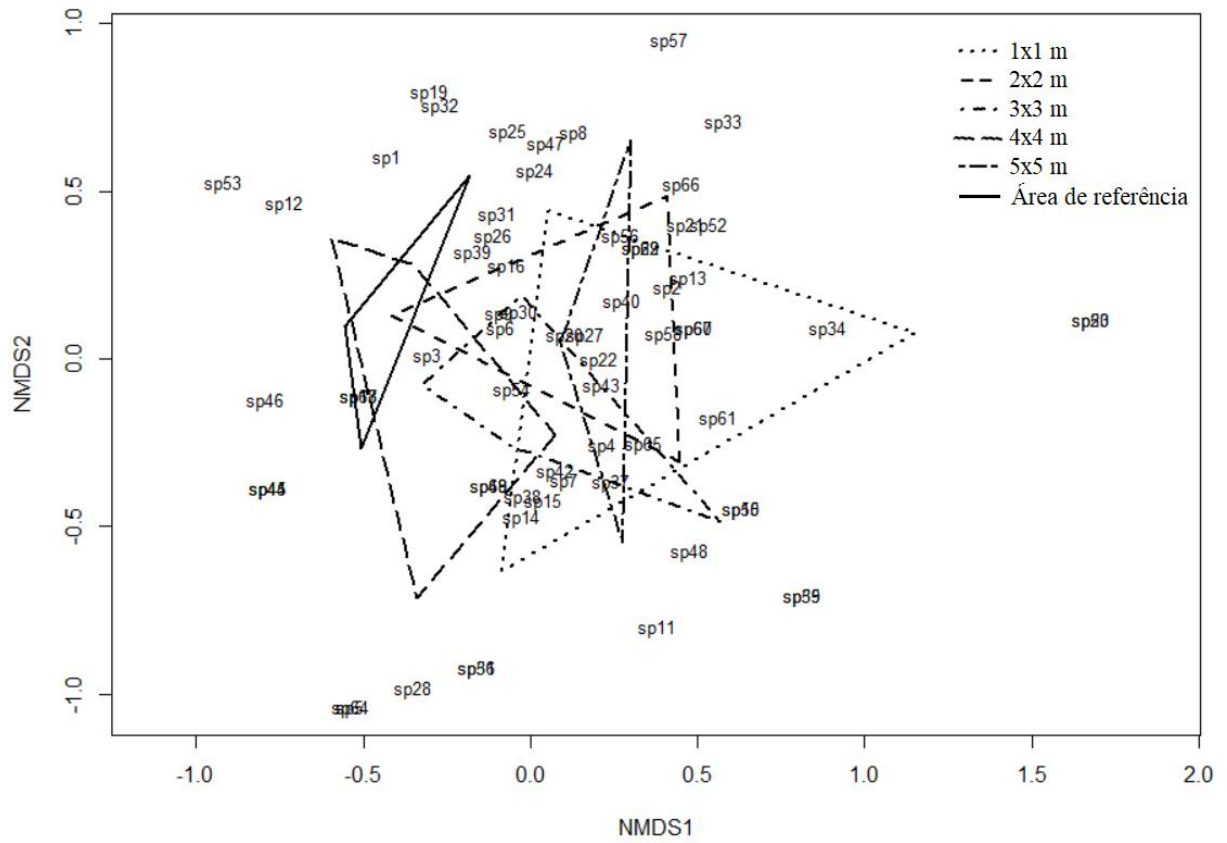
### ***Composição florística***

Ao todo, foram encontradas 69 espécies, com 89,5% do total de espécies presentes nas áreas de retirada de solo e 26,1% ocorrendo nas áreas do controle. As espécies mais presentes foram *N. variegata*, *C. argutus*, *Panicum trichoides* Sw. (Poaceae) Nex, *Cyperus fugax* Liebm. (Cyperaceae) e *Waltheria operculata* Rose (Malvaceae). Exemplos de espécies arbóreas abundantes na área também foram observadas, como *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir., *Cenostigma pyramidale* (Tul.) E. Gagnon & G.P. Lewis (Fabaceae) e *A. cearensis*.

A ANOSIM demonstrou a similaridade de espécies entre todos os tratamentos avaliados (Tabela 1.2). O fato é corroborado com a análise de NMDS que mostra a sobreposição da maioria dos polígonos (Figura 1.5). O polígono referente à área de referência é o único que sobrepõe apenas os tratamentos de 2 x 2 m e 4 x 4 m.

**Tabela 1.2** Análise de similaridade (ANOSIM) entre os tratamentos de retirada de solo para transposição de área de referência positiva na Caatinga, no município de Petrolina, PE. Os valores da tabela correspondem a significância à 5% (p).

	<b>1x1 m</b>	<b>2x2 m</b>	<b>3x3 m</b>	<b>4x4 m</b>	<b>5x5 m</b>	<b>Área de referência</b>
<b>1x1 m</b>	-	0,42	0,94	0,33	0,85	0,07
<b>2x2 m</b>	-	-	0,73	0,33	0,95	0,2
<b>3x3 m</b>	-	-	-	0,7	0,79	0,37
<b>4x4 m</b>	-	-	-	-	0,86	0,31
<b>5x5 m</b>	-	-	-	-	-	0,07
<b>Área de referência</b>	-	-	-	-	-	-



**Figura 1.5** Escalonamento multidimensional não paramétrico (NMDS) entre os tratamentos de retirada de solo para transposição de área de referência positiva na Caatinga, no município de Petrolina, PE.

## **Discussão**

### ***Riqueza, densidade, diversidade e cobertura vegetal***

Os primeiros resultados de riqueza e densidade nas áreas com retirada de solo comprovaram como ocorreu a rápida dispersão de sementes do entorno. Espécies nativas da Caatinga podem ter alta produção de frutos e sementes, especialmente as famílias mais representativas, como Fabaceae e Poaceae (Andrade et al. 2009; Sousa et al. 2020). Bem como, elas possuem germinação facilitada já nas primeiras chuvas após o período seco (Meiado 2014) e crescem de forma acelerada, permitindo a visualização da plântula em poucos dias (Oliveira et al. 2014).

No presente estudo foram retiradas 10 cm de camada superficial, removendo, portanto, parte do banco de sementes local (Rodrigues et al. 2010; Sousa et al. 2020). Dessa forma, o surgimento de novos indivíduos foi provavelmente devido à chuva de sementes. A chuva de sementes é considerada uma das principais formas de colonização de áreas para estabelecimento da comunidade vegetal (PietroSouza et al. 2014).

Em estudo com perturbação de clareiras em vegetação campestre, Pakeman e Small (2005) indicaram que as sementes oriundas da chuva de sementes tiveram maior contribuição para a regeneração da vegetação do que o banco de sementes. Esse fato é ressaltado quando se sabe que a maioria das herbáceas da Caatinga são anemocóricas e autocóricas (Lima et al. 2008; Gonçalves et al. 2021) e que os bancos de sementes na Caatinga são transitórios (Meiado 2014) e constantemente renovados a cada período chuvoso. De acordo com Peres (2012) a colonização das clareiras também pode ocorrer por conta da dispersão pela fauna, e como as áreas do entorno estão intactas, a fauna local continuou abundante e atuante, e pelo avanço da vegetação adjacente, quando lianas, herbáceas, galhos do dossel e espécies com propagação vegetativa do entorno preenchem lateralmente o espaço aberto pela clareira.

O impacto das aberturas das áreas doadoras do solo pode ser comparado a abertura de clareiras naturais em florestas. Essa abertura de clareiras já acontece por meio de queda de árvores, ou algum distúrbio que promove a abertura de uma área em pequenas proporções no centro de uma floresta conservada (Whitmore 1978). A teoria da dinâmica de sucessão natural em clareiras demonstra que a abertura no dossel favorece uma modificação na dinâmica estrutural, reduzindo a competição por espaço e luz e possibilitando a ocorrência de espécies que são intolerantes à sombra (Whitmore

1978). Além disso, gera alterações na diversidade, microclima e conseqüentemente nos organismos locais.

Estudos já comprovam que essas clareiras são rapidamente colonizadas, principalmente por herbáceas pioneiras que emergem, crescem e completam seu ciclo em um curto período (Oliveira et al. 2013; Meiado 2014). Portanto, clareiras em pequenas dimensões e quantidades podem gerar um estímulo para regeneração natural da vegetação ao longo do tempo. A retirada de camadas de serapilheira pode promover pequenos distúrbios, mas que bem manejados permitem aumento do estabelecimento inicial da vegetação (Morsing et al. 2020) e da colonização por microrganismos (Bahram et al. 2018).

Outro fator a ser considerado é que a depender da fitofisionomia da área na Caatinga o termo clareiras nem é aplicado. Algumas áreas de Caatinga possuem a vegetação espaçada de tal forma que uma área de 25 m<sup>2</sup> (máximo de abertura realizada no estudo) sem vegetação arbórea, por exemplo, podem ser observadas em campo. Esse fato se deve as diversas fitofisionomias existentes na Caatinga (Siqueira-Filho et al. 2012) e ao fato da Caatinga praticamente não possuir grandes áreas naturais sem intervenções antropogênicas (Silva et al. 2017).

Além disso, a retirada da camada superficial não causa alterações significativas à qualidade do solo. Solos em áreas conservadas possuem camadas mais profundas com características favoráveis à germinação e desenvolvimento de espécies vegetais, como ausência de compactação, boa retenção de umidade e alta matéria orgânica. Nielsen (et al. 2013) comprovaram a manutenção da estocagem de carbono e teor de carbono orgânico mesmo nas camadas abaixo de 20 cm em solos de Caatinga natural. Bem como, em solos arenosos da Caatinga como da área de estudo, até 20 cm não há alteração da estrutura do solo e do risco à compactação (Rodrigues et al. 2016).

Reis et al. (2014) em estudo na Mata Atlântica confirmaram que as áreas de empréstimo em florestas conservadas, quando pequenas e bem espaçadas, são rapidamente restabelecidas. Porém, poucos estudos avaliam o impacto causado na área doadora de solo, mas os que o fizeram também demonstram ausência de impacto severo e a rápida retomada da cobertura do solo. Silveira et al. (2021), em região de ecótono entre Cerrado e Mata Atlântica, demonstraram que as retiradas de pequenas parcelas de topsoil e serapilheira não causaram impacto significativamente as comunidades

vegetais, com aumento de riqueza e densidade em relação às parcelas controle, assim como foi observado para densidade, no presente estudo.

Em relação à cobertura do solo, apesar da porcentagem formada pela vegetação viva que surgiram nas clareiras ainda ser pequena, a formação de serrapilheira para cobertura do solo exposto é essencial. A serrapilheira proporciona diminuição da temperatura do solo, mantém e aumenta proporção de material em decomposição que melhorará as características físicas, químicas e biológicas daquele solo (Rodrigues et al. 2010).

### ***Composição florística***

As análises de ANOSIM e NMDS indicam que as áreas abertas estão sendo colonizadas pelas espécies já existentes na área de referência positiva, ressaltando como a regeneração natural foi favorecida independentemente do tamanho da clareira aberta. Ainda, a colonização por espécies herbáceas de fácil dispersão e de arbóreas abundantes na área conservada irá determinar a reposição desses ambientes com a estrutura original da comunidade. A presença da arbórea *M. tenuiflora* também é um importante indicativo, pois a espécie é facilitadora e favorece a regeneração natural (Paterno et al. 2016).

A espécie mais abundante da área de referência, *N. variegata*, se reproduz em maior proporção por via assexuada a partir do desenvolvimento de gemas e rizomas laterais (Machado & Lopes 2004), por isso o surgimento nas áreas abertas tem processo mais lento e provavelmente dependerá da colonização dos indivíduos pela borda da clareira. Assim, três anos de avaliação podem não ter sido suficientes para identificar o retorno da dominância da cobertura do solo pela espécie.

Após três anos de experimento, a análise periódica e os valores finais de riqueza, densidade, diversidade, cobertura de solo e composição florística entre os tratamentos avaliados demonstram como a retirada de solo de até 25m<sup>2</sup> em uma área de referência positiva não afeta negativamente o ecossistema doador. Assim, os resultados corroboram com a possibilidade de uso de áreas conservadas como fonte de solo para transposição em áreas degradadas na Caatinga.

Portanto, sugere-se que a técnica de transposição de solo de áreas de referência positiva pode ser utilizada em pequenas e grandes dimensões. Agricultores que possuem poucos hectares de terra e precisam de regulação ambiental poderão aproveitar as áreas de reserva como fontes de solo, com o respaldo de que o tamanho da área retirada não interferirá negativamente no ecossistema e que, em contrapartida, o benefício na área a ser restaurada é maior. Sugere-se que grandes projetos podem alegar que essa técnica reduziria custos e tempo para implantação, utilizando áreas conservadas próximas a área a ser restaurada e a possibilidade do uso de maquinário para realizar o procedimento completo. Áreas de retirada de solo com maiores dimensões e os impactos da utilização de maquinários devem ser realizadas e avaliadas visando ampliação do uso da técnica.

## Capítulo 2

### **Regeneração natural, transposição de solo e semeadura direta de herbáceas na restauração de áreas degradadas na Caatinga**

Raphaela Aguiar de Castro<sup>1,2</sup>; Leticia de Brito Rodrigues<sup>3</sup>; Patrícia Daniele de Souza<sup>3</sup>; Renato Garcia Rodrigues<sup>3</sup> & Marcos Vinicius Meiado<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil.

<sup>2</sup> Laboratório de Fisiologia de Sementes, Departamento de Biociências, Universidade Federal de Sergipe, Itabaiana, Sergipe, Brasil.

<sup>3</sup> Núcleo de Ecologia e Monitoramento Ambiental, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Ciências Agrárias, Petrolina, Pernambuco, Brasil.

### **Implicações práticas**

- Encontrar técnicas adequadas para restauração de solos degradados com estudos em campo e informações dos resultados para gerar respaldo em futuros protocolos de restauração na Caatinga;
- Demonstrar a condução da regeneração natural como uma alternativa viável de restauração na Caatinga, a depender das condições locais;
- Indicar a transposição de solo como técnica que pode ter implicações favoráveis para restauração, com boa relação custo-benefício;
- Determinar que a técnica de semeadura direta de herbáceas, apesar de prática e de baixo custo, não pode ser utilizada em qualquer situação de degradação.

### **Resumo**

O solo é um fator fundamental para o estabelecimento e manutenção de um ecossistema, por isso, deve ser considerado e recuperado em programas de restauração de áreas. Para isso, podem ser utilizados condicionadores de solo que forneçam melhorias às suas características físicas, químicas e biológicas. Podem ser utilizadas, a condução da regeneração natural, pela descompactação do solo, a introdução de solos transpostos de áreas de referência positiva ou a semeadura de espécies herbáceas. Para todos, a ideia é a facilitar a emergência de espécies vegetais que promovam cobertura do solo, aumento de serrapilheira e alterações das condições inóspitas, possibilitando a chegada de novos propágulos. Nesse sentido, o objetivo deste capítulo foi verificar como cada intervenção dessa interfere nos parâmetros estruturais da área, indicando se as técnicas e suas uniões em seus diferentes níveis são adequadas para restauração de solos degradados. Os experimentos foram realizados com condução da regeneração natural, transposição de solo e semeadura de herbáceas nativas, sendo três níveis para transposição do solo: i) Sem transposição de solo; ii) Cobertura de 15% da área total da parcela, ou iii) 30% de cobertura. Para semeadura das herbáceas: i) Sem semeadura de herbáceas; ii) Semeadura de 1 espécie; ou iii) Semeadura de seis espécies de herbáceas. Para todos foi mantida a densidade de 60 sementes/m<sup>2</sup>. Esses fatores compilados formaram nove tratamentos, desenvolvidos com cinco repetições. A partir de todas as análises no estudo foi possível inferir que as áreas de condução da regeneração natural tiveram resultados satisfatórios com aumento dos parâmetros avaliados. Os tratamentos de transposição de solo, em maior área de cobertura (30%), promoveram as maiores melhorias nos



parâmetros, proporcionando advento de novas espécies. A semeadura de espécies herbáceas teve baixa emergência e não correspondeu às expectativas. Portanto, de forma geral, para três anos de introdução de técnicas de restauração no semiárido com o nível de degradação da área anteriormente encontrada, os resultados do presente estudo já conseguem direcionar para indicar a utilização da transposição de solo como técnica de restauração.

**Palavras-chave:** Técnicas de RAD; Semiárido; Topsoil.

### **Abstract**

Soil is a fundamental factor for the establishment and maintenance of an ecosystem, therefore, it must be considered and recovered in areas of restoration programs. For this, soil conditioners that provide improvements to its physical, chemical, and biological characteristics can be used. It can be used, the conduction of natural regeneration, by the decompaction of the soil, the introduction of soils transposed from areas of positive reference or sowing herbaceous species. For all of them, the idea is to facilitate the emergence of plant species that promote soil cover, increase litter, and change inhospitable conditions, enabling the arrival of new propagules. This chapter aimed to verify how each intervention interferes in the structural parameters of the area, indicating if the techniques and their unions at different levels are suitable for the restoration of degraded soils. The experiments were carried out with the conduction of natural regeneration, soil transposition, and seeding of native herbs, with three levels for soil transposition: i) No soil transposition; ii) 15% coverage of the total area of the plot, and iii) 30% coverage. For sowing herbs: i) Without sowing herbs; ii) Sowing of 1 species; and iii) Sowing of six herbaceous species. For all trail plots, the density of 60 seeds/m<sup>2</sup> was maintained. These compiled factors formed nine treatments, developed with five replications. From all the study analyzes, it was possible to infer that the areas of conduction of natural regeneration had satisfactory results with an increase in the evaluated parameters. The soil transposition treatments, in a larger coverage area (30%), promoted the greatest improvements in the parameters, providing the advent of new species. The sowing of herbaceous species had low emergence and did not meet expectations. Therefore, in general, for three years of introduction the restoration

techniques in the semi-arid region with the level of degradation of the area previously found, the results of the present study are already able to indicate the use of soil transposition as a restoration technique.

**Keywords:** Restoration techniques; semiarid; Topsoil.

## **Introdução**

A degradação da Caatinga teve início no processo de colonização do Brasil, em decorrência da introdução da pecuária bovina associada às práticas agrícolas inadequadas (Leal et al. 2003). A Caatinga é considerada um neoeossistema e tem sua economia baseada em produtos e serviços fornecidos pela natureza. Além da criação bovina, também há a criação de caprinos e ovinos, a exploração da lenha nativa para fins energéticos de indústrias (gesso e olarias) e comércio (padarias e carvoarias), a mineração e a agricultura intensiva (MMA 2004; Leal et al. 2003; Fabricante et al. 2015; Albuquerque & Melo 2018). Como consequência, Silva et al. (2017) estimaram que 63,3% da Caatinga já foi convertida em algum tipo de ecossistemas antropogênicos e, praticamente, nenhuma grande área natural permanece intacta.

Áreas degradadas resultam em solos com alterações nas propriedades físicas, químicas e biológicas. Estas podem ser relacionadas à sua textura e estrutura, como a compactação, a alteração da composição química que incluem a acidificação, salinização e perda de fertilidade, até a redução da diversidade da fauna edáfica (Lal 1997; Pereira 2011). Assim, tem-se a necessidade crescente de restauração de áreas degradadas na Caatinga, com estudos cada vez mais especializados em técnicas de restauração efetivas, para aumento de diversidade e funcionalidade do ecossistema atrelado a baixo custo e rapidez dos processos. A avaliação das condições das áreas degradadas a serem restauradas definirá as técnicas mais adequadas de uso, podendo ser feita apenas a manutenção da regeneração natural ou haver a necessidade de intervenção direta, com metodologias ativas.

Nesse sentido, a capacidade de aplicação da técnica de restauração passiva, que consiste na condução da regeneração natural do ecossistema com baixa ou nenhuma interferência humana, foi avaliada pelo Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (PLANAVEG), que indicou áreas prioritárias para sua realização na Caatinga (decreto nº 8972, Brasil 2017). O Plano indica que a restauração passiva dependerá dos fatores locais, como a presença de bancos de sementes, solo com capacidade de germinação e desenvolvimento das espécies e características favoráveis à chegada de novos propágulos, como dispersores ativos. Por conta desses fatores, a técnica é totalmente dependente do fator de degradação da área e seu estado atual, variando em cada ponto a ser restaurado. A condução dessa técnica pode ser realizada sem grandes intervenções, como cercamento do local, manejo de invasoras e preparo do solo.

Segundo Santos Junior (2000), apenas o preparo do solo já reduz a compactação, melhora absorção de água e disponibilidade de nutrientes. Os fatores que definirão o sucesso da técnica é o avanço da sucessão natural, dependente da atuação dos filtros ecológicos (Ricklefs 2010).

A restauração de solos degradados também pode ser feita de forma ativa com adição de condicionadores do solo. Os condicionadores podem ser de origem mineral, como pó de rochas, adubos químicos e carvões vegetais ou de materiais orgânicos como restos de cultura, esterco, biofertilizante ou adubos verdes (Faria 2007). Na restauração florestal, o condicionamento pode ser adquirido através do método da transposição de solo. A transposição consiste na transferência de uma camada superficial de solo e serrapilheira de uma área conservada para uma área degradada (Brancalion et al. 2015). É nessa camada inicial do solo que está grande parte do banco de sementes do ecossistema, com elevada riqueza e diversidade (Meiado 2008; Martins 2014; Meiado 2014). Mais de 90% das espécies encontradas no estudo de Pilon et al. (2017) pós-transposição eram herbáceas, que possuem alta capacidade de recobrimento do solo. Em relação às espécies arbóreas pioneiras, que também são encontradas nesses bancos, o processo de superação de dormência é estimulado quando transferidas para áreas abertas e solos expostos, que permitam a entrada de luz (Martins 2014; Boaneres & Azevedo 2014). Ainda, a transposição de solo permite a adição de espécies que possuem dispersão limitada e que demorariam a colonizar as áreas degradadas naturalmente.

A transposição de solo também funciona como fonte de matéria orgânica, nutrientes, microrganismos, como bactérias fixadoras de nitrogênio e fungos micorrízicos, meso e macrofauna (Martins 2014; Brancalion et al. 2015). A serrapilheira também proporciona aumento da retenção de umidade do solo, até durante a estação seca, o que pode interferir na emergência e estabelecimento das espécies por um maior período do ano (Rodrigues et al. 2010). Ewel (1976) já afirmava que essa camada superficial é essencial para restauração da fertilidade de solos em início de sucessão ecológica.

Deve-se verificar a melhor época de transposição, pois o processo de dispersão de sementes na floresta é sazonal (Martins 2014). Para áreas de Caatinga, por exemplo, o período de maior diversidade de propágulos no solo corresponde ao final da estação seca (Meiado 2014). Na implantação, o solo pode ser alocado em área total ou em pequenas parcelas, que formarão núcleos de vegetação (Martins 2014). A partir destes

núcleos surgirão manchas de vegetação que terão capacidade de se expandir ao entorno. Segundo Reis et al. (2003), a nucleação promove à abertura de uma série de eventos estocásticos para regeneração natural, como o advento de novas espécies e a formação de uma rede interativa entre organismos. Além disso, a técnica possui menor custo de implantação que as demais (Martins 2014), pois o custo envolvido é a coleta e o transporte até a área a ser restaurada. O custo aumenta quando não existem fragmentos de floresta nas proximidades, podendo tornar-se inviável (Martins 2001; Araki 2005).

A reposição das espécies vegetais nas áreas que sofreram perda do banco de sementes e que serão restauradas também pode ser realizada através da semeadura direta. Nesse caso, as sementes são distribuídas com ou sem procedimento pré-germinativo sob o solo degradado, preferencialmente após o seu revolvimento (Reis et al. 2003). Podem ser utilizadas espécies arbóreas, arbustivas e/ou herbáceas, com baixa ou alta diversidade. Resultados de sucesso com rápida reposição da cobertura do solo são encontrados na região Norte do país, onde o procedimento é conhecido como “muvuca” (ISA 2018). Na técnica, são utilizadas sementes agrícolas como adubos verdes e florestais com diferentes ciclos de vida. A ideia é a reposição do banco de sementes com espécies que promovam melhorias das características do solo e permitam a emergência periódica das outras espécies semeadas (ISA 2018).

A rápida emergência das espécies semeadas proporcionará aceleração dos processos sucessionais. Elas atuam no primeiro estágio de colonização do ambiente, proporcionando um microclima favorável, através da proteção do solo, com consequente redução da incidência solar, manutenção da umidade do solo e alteração da fertilidade (Martins 2014; Ferreira et al. 2015a). Na Caatinga, naturalmente, as primeiras espécies a surgirem na sucessão são geralmente plantas herbáceas com altas taxas de dispersão, crescimento rápido e ciclos de vida curto e são elas que permitem a manutenção ao longo do tempo do banco de sementes (Santana & Souto 2006). Dessa forma, tem-se um ambiente mais bem estruturado para favorecer a sucessão ecológica, iniciando com o advento e estabelecimento de novos propágulos.

O sucesso da técnica depende principalmente das condições locais, como solo, incidência solar e disponibilidade hídrica, essenciais nos estágios iniciais de desenvolvimento da planta. Além disso, depende da disponibilidade de sementes na cadeia produtiva da restauração, em diversidade e abundância, já que a técnica exige grande quantidade de sementes disponíveis. Essa técnica se diferencia do plantio de

mudas em relação ao menor custo de implantação, pois reduz a necessidade de produção das mudas em viveiro (TNC 2018). Além disso, pode ser utilizada mecanização para preparo do solo e semeio, além de baixa manutenção.

Para que se consiga alcançar os fatores citados, a escolha das espécies a serem utilizadas deve ser feita de forma cautelosa. Primeiramente, ressalta-se a importância de utilizar espécies nativas, adaptadas às condições locais. Para isso, prospecção de nativas com características favoráveis para sua utilização em áreas degradadas, como tipo de dispersão, porcentagem de cobertura, densidade e presença de aleloquímicos pode ser realizada para cada ecossistema a ser restaurado (Carvalho 2016). Nesse sentido, espécies utilizadas na agricultura para adubação verde como, por exemplo, espécies da família Fabaceae são bastante empregadas, por conta da capacidade de estabelecer associações simbióticas com microrganismos fixadores de nitrogênio atmosférico (Lima-Filho et al. 2014).

A utilização de maior diversidade de espécies vegetais também é favorável, pois cada espécie possui funções biológicas distintas que interfere nas propriedades do solo de forma específica (Hok et al. 2015). Por isso, avaliar as herbáceas que surgem durante o processo de restauração pode ser um indicador de monitoramento eficaz, trazendo respostas sobre a sucessão e auxiliando novas aplicações. Guerra et al. (2020) observaram que menos de 10% dos estudos realizados sobre restauração no Brasil, nos últimos 30 anos, analisaram as herbáceas como parâmetro para avaliação do sucesso.

Em decorrência da importância da intervenção para restaurar áreas degradadas da Caatinga, as hipóteses deste trabalho sugerem que i) A transposição de solo e semeadura de herbáceas proporcionarão melhoria dos parâmetros de riqueza, densidade, diversidade e cobertura vegetal da área degradada; ii) As técnicas implantadas irão promover alterações da composição florística local com surgimento de espécies de difícil dispersão e/ou secundárias; iii) O banco de sementes da área degradada será incrementado na riqueza e abundância pós intervenções; iv) As técnicas mais ativas, como transposição em maior proporção com a adição de herbáceas nativas promoverão os melhores resultados.

Para isso, os objetivos deste capítulo foram verificar: i) Como cada intervenção realizada interfere na riqueza, densidade, diversidade e cobertura vegetal da área em restauração ao longo do tempo; ii) Se os condicionadores alteram a composição florística da área; iii) Como as intervenções alteraram o banco de sementes do local; iv)

Indicar se as técnicas de condução da regeneração, transposição de solo e semeadura de herbáceas em seus diferentes níveis são adequadas para restauração de solos degradados na Caatinga; v) Determinar se vale a pena compilar as técnicas da transposição com a semeadura de herbáceas.

## **Material e Métodos**

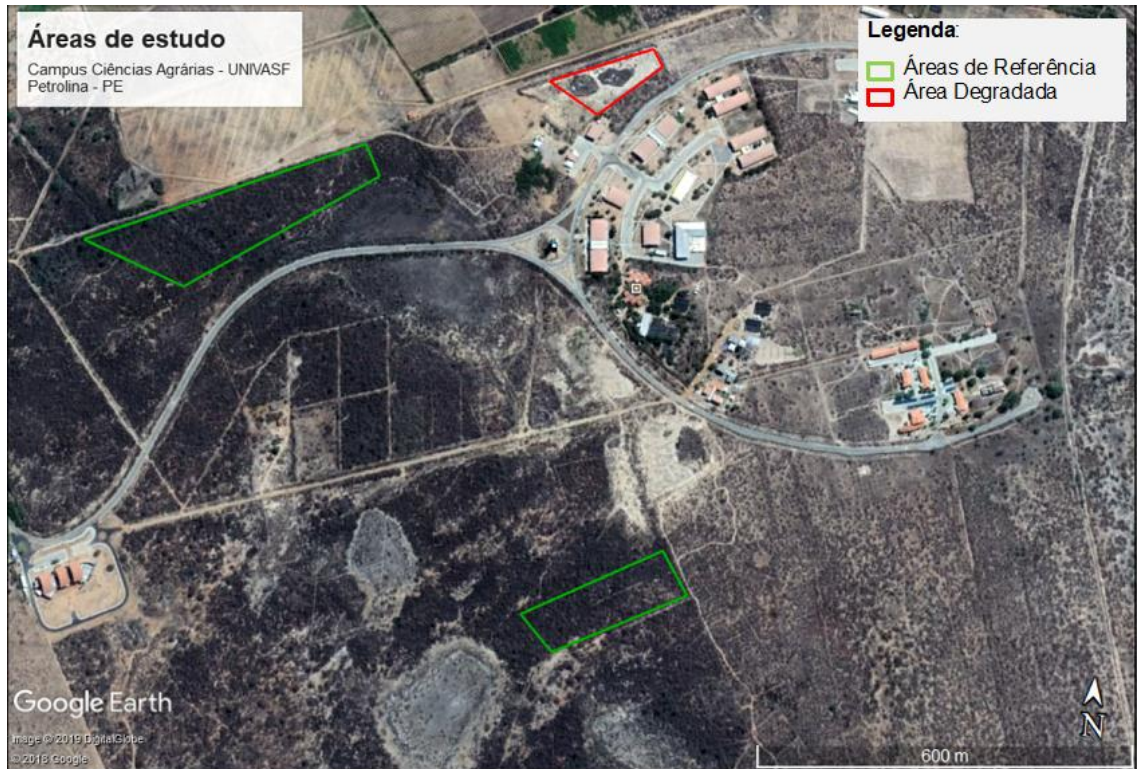
### ***Locais de estudo***

As áreas de estudo estão localizadas no Campus de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), em Petrolina, Pernambuco (Figura 2.1). O clima predominante é o Tropical Semiárido, com médias anuais de 26 °C de temperatura, com amplitudes que variam de 14 °C a 37 °C, e média de 535,5 mm de precipitação, também variável, como 219 mm em 2019 e 519 mm em 2021 (N = 10 anos) (Embrapa Semiárido 2010; Labmet 2022).

A partir dos dados históricos de imagens disponíveis pelo Google Earth e pesquisas bibliográficas da região, foi observado que a área serviu como empréstimo de solo para construção da estrada que rodeia o Campus da universidade. Essa construção foi iniciada em 2004, com área total de 1ha e retirada de pelo menos 1,5m de profundidade de solo do local. Após esse procedimento, a área foi abandonada e se encontrava há 18 anos sem interferência de restauração e sem observação de regeneração natural. O solo era extremamente compactado, dificultando até a retirada de solo para análise por trado.

As áreas de Caatinga que foram consideradas de referências positivas foram aquelas que possuíam maior grau de conservação dentro do Campus, com baixa interferência de fatores de degradação, como a estrada e as construções. As áreas possuem 4,8 e 4,1 ha e estavam localizadas a cerca de 400 e 920 m de distância da área em restauração, respectivamente. A vegetação dessas áreas é composta por arbóreas como *Amburana cearensis* (Allemão) A.C.Sm. (Fabaceae), *Cenostigma microphyllum* (Mart. ex G.Don) Gagnon & G.P.Lewis (Fabaceae), *Cnidosculus quercifolius* Pohl (Euphorbiaceae) e *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. (Fabaceae), *Pseudobombax simplicifolium* A.Robyns (Malvaceae); arbustivas como *Corchorus argutus* Kunth (Malvaceae), *Croton blanchetianus* Baill. (Euphorbiaceae), *Jatropha mollissima* (Pohl) Baill., *Jatropha ribifolia* (Pohl) Baill. (Euphorbiaceae), *Varronia leucocephala* (Moric.) J.S.Mill. (Boraginaceae) e herbáceas como, por exemplo, *Microtea celosioides* Moq. ex

Sennikov & Sukhor. (Microteaceae), *Panicum trichoides* Sw. (Poaceae), *Richardia brasiliensis* Gomes e *Richardia grandiflora* (Cham. & Schltdl.) Steud. (Rubiaceae). A cobertura do solo é majoritariamente formada por *Neoglaziovia variegata* (Arruda) Mez (Bromeliaceae), com alta abundância.



**Figura 2.1** Demarcação das áreas de referência positiva e da área em restauração na Caatinga, no Campus de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Petrolina, PE.

### ***Delineamento experimental***

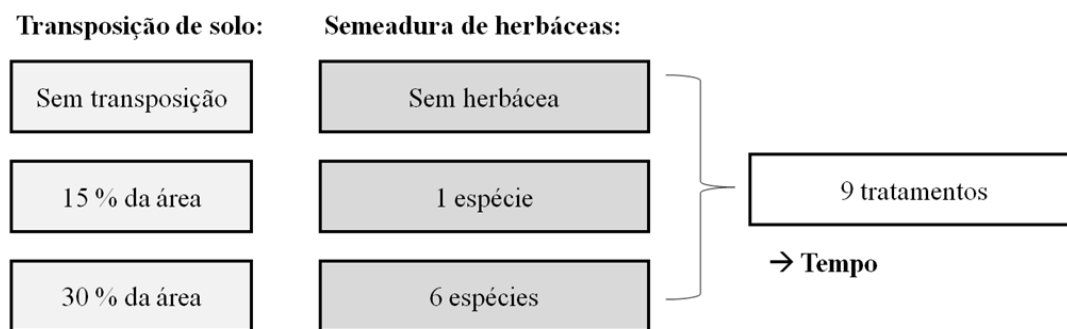
Anteriormente a implantação das técnicas, toda a área foi limpa e revolvida, com gradagem de pelo menos 30 cm de profundidade, para descompactação do solo (Figura 2.2). As parcelas instaladas possuíam dimensão de 8 m (comprimento) x 4 m (largura) e estavam distanciadas 1 m entre si.





**Figura 2.2** Foto aérea da área experimental após o revolvimento do solo, onde foram implantadas técnicas de restauração de áreas degradadas na Caatinga, no Campus de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Petrolina, PE. Foto tirada em março de 2019.

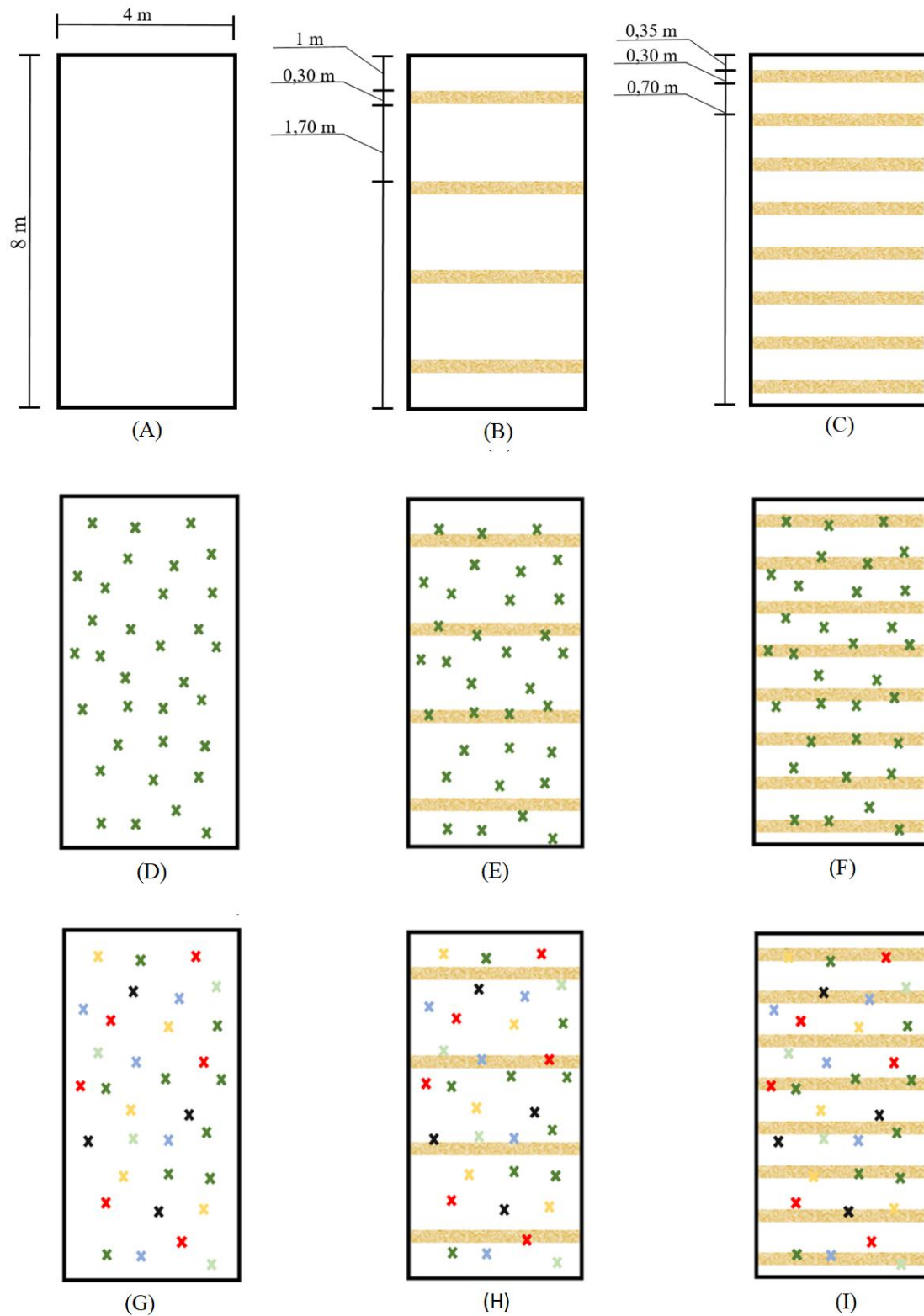
Em março de 2019, foram implantadas as técnicas relacionadas ao condicionamento do solo (Figura 2.3), com condução da regeneração natural, transposição de solo e semeadura de herbáceas nativas, sendo três níveis para transposição do solo: i) Sem transposição de solo; ii) Quatro faixas de 4 (comprimento) x 0,3 (largura) x 0,05 (altura) m, representando a cobertura de 15% da área total da parcela, ou iii) Oito faixas de 4 x 0,3 x 0,05 m, representando 30% de cobertura. Para semeadura das herbáceas, os níveis foram: i) Sem semeadura de herbáceas; ii) Semeadura de 1 espécie herbácea; ou iii) Semeadura de seis espécies de herbáceas. Para todos foi mantida a densidade de 60 sementes/m<sup>2</sup>.



**Figura 2.3** Organograma do delineamento experimental dos tratamentos de restauração de área degradada da Caatinga no município de Petrolina, PE.

Esses fatores compilados formaram nove tratamentos (Figura 2.4): (A) Sem aplicação de tratamentos, apenas com o solo descompactado, considerada como condução da regeneração natural; (B) Transposição de solo em 15% da área; (C) Transposição de solo em 30% da área; (D) Sementeira de uma herbácea; (E) Transposição de solo em 15% da área com sementeira de uma herbácea; (F) Transposição de solo em 30% da área com sementeira de uma herbácea; (G) Sementeira de seis herbáceas; (H) Transposição de solo em 15% da área com sementeira de seis herbáceas e (I) Transposição de solo em 30% da área com sementeira de seis herbáceas. Os nove tratamentos foram desenvolvidos com cinco repetições em delineamento de blocos casualizados, com cinco blocos, totalizando 45 parcelas amostrais.

O solo utilizado na transposição foi retirado das áreas de referência positiva (Figura 2.1) localizadas próximas ao local do experimento. O solo retirado formou uma amostra composta de onde foram retiradas as quantidades necessárias para cada parcela. A sementeira das herbáceas só foi realizada após a transposição do solo.



**Figura 2.4** Delineamento experimental dos tratamentos com transposição de solo (faixas de solo em marrom) e sementeira de herbáceas (espécies representadas por símbolos coloridos em X) para condicionamento do solo em restauração de área degradada na Caatinga, no município de Petrolina, PE.

### ***Espécies utilizadas***

As espécies herbáceas foram escolhidas com base no estudo de Carvalho (2016). Os resultados desse referido trabalho já estão sendo reproduzidos pelo Núcleo de ecologia e Monitoramento Ambiental (NEMA), da Universidade Federal do Vale do São Francisco, em programas de restauração. Dentre as espécies com maiores pontuações foram observados: *Senna uniflora* (Mill.) H.S. Irwin & Barneby (Fabaceae), *Raphiodon echinus* (Nees & Mart.) Schauer (Lamiaceae), *Sida galheirensis* Ulbr. (Malvaceae) e *Mesosphaerum suaveolens* (L.) Kuntze. (Lamiaceae), que foram utilizadas neste estudo.

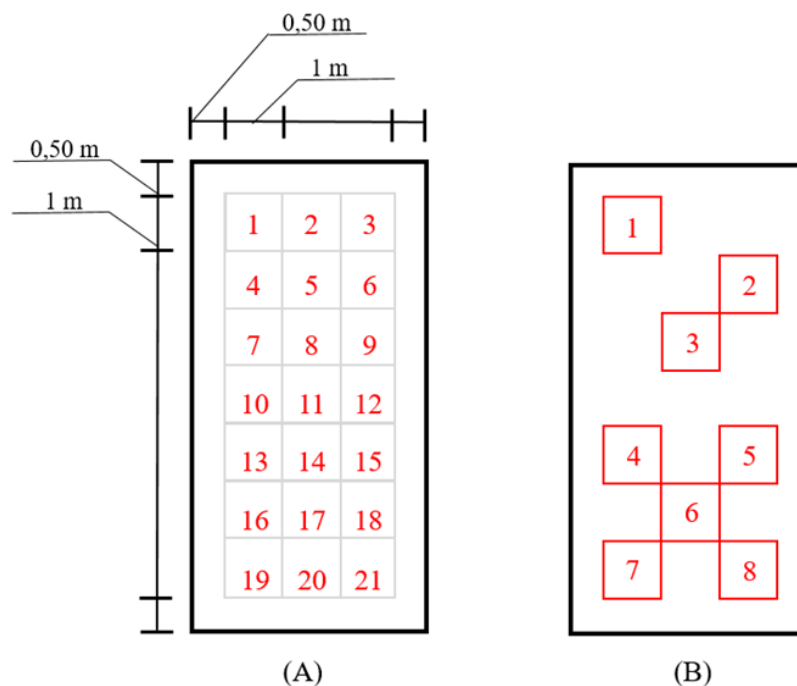
Além dessas espécies, também foram escolhidas a *Neoglaziovia variegata* (Arruda) Mez (Bromeliaceae), que é uma das herbáceas mais abundantes e com maior porcentagem de cobertura nas áreas de referência positiva próxima à área experimental e *Ipomoea asarifolia* (Desr.) Roem. & Schult. (Convolvulaceae), também presente nas proximidades e com características que favorecem a sua utilização, como rápido crescimento e cobertura do solo.

### **Parâmetros de avaliação do condicionamento**

#### ***Análise das espécies vegetais***

Para análise das espécies vegetais herbáceas e regenerantes, um GRID com 21 quadrantes de 50 x 50 cm foi criado para sorteio de oito subparcelas, que permaneceram fixas durante todo o experimento e onde as análises foram realizadas (Figura 2.5). Para avaliação da riqueza e abundância das espécies, foram utilizadas quatro subparcelas, as que representam os números ímpares, formando amostragem de 1 m<sup>2</sup> e, para análise da cobertura vegetal, foram utilizadas todas as oito subparcelas, formando uma amostragem de 2 m<sup>2</sup>. Cada parcela teve seu próprio sorteio, visando maior variabilidade possível para as análises.

Para riqueza e abundância, foram contabilizados o número de espécies que emergiram dentro das subparcelas e o número de indivíduos de cada uma delas. As avaliações ocorreram a cada 20 dias nos seis primeiros meses após a implantação dos tratamentos. A partir do sexto mês, as análises passaram a ser mais periódicas em decorrência do período de seca, com retorno no período chuvoso. A diversidade foi calculada segundo índice de Simpson.



**Figura 2.5** Modelo esquemático do GRID utilizado para o sorteio (A) das oito subparcelas (B) nas parcelas (8 m x 4 m) que foram utilizadas nas avaliações das técnicas de restauração de áreas degradadas na Caatinga, no município de Petrolina, PE.

A análise da cobertura vegetal foi realizada nos períodos de seca e chuva por meio de fotografia das subparcelas a uma altura média de 1,5 m, com auxílio de um gabarito feito de madeira nas dimensões exatas que definiram as margens da subparcela. As fotos foram analisadas no programa IPWIN 32, plotando um GRID com 400 quadrantes para contabilização daqueles que estavam cobertos com espécies vegetais e determinação da porcentagem de cobertura. Todas as análises foram realizadas até o terceiro ano de experimento.

### ***Análise de Solo***

Essa metodologia foi desenvolvida em parceria com o Laboratório de Química e Física do Solo, da Universidade Federal do Vale do São Francisco. Para caracterizar as possíveis interferências dos nove tratamentos nas características químicas e físicas do solo em restauração foi realizada a coleta do solo nas profundidades de 0 – 20 cm, em uma área de 10 cm<sup>2</sup> com um cavador do tipo trado, em seis pontos dentro de cada parcela, em cada tratamento. As amostras foram misturadas e retirada uma amostra dessa mistura, em cada parcela. Da mesma forma, a análise também foi realizada

inicialmente, antes da implantação dos experimentos, na área degradada e na área de referência positiva. As análises químicas realizadas foram de quantidade de nutrientes, pH, saturação por base e capacidade de troca de cátions (CTC). A análise física foi de determinação da composição granulométrica.

#### ***Análise da composição das espécies***

Para esta análise apenas os tratamentos de transposição foram considerados, por conta da ausência de influência das herbáceas semeadas. Por meio da identificação das espécies e da abundância, realizou-se a análise de similaridade (ANOSIM) (Clarke & Green 1988) entre os tratamentos, e escalonamento multidimensional não paramétrico (NMDS) (Holland 2008), a fim de estabelecer o quão distante cada tratamento estava um do outro em relação à composição de espécies. Para esta análise foram utilizados os dados da última avaliação realizada, após três anos.

#### ***Análise do banco de sementes***

Para a análise do banco de sementes também apenas os tratamentos de transposição foram considerados, por conta da ausência de influência das herbáceas semeadas. A avaliação da influência da transposição no banco de sementes do solo foi realizada após três anos de introdução dos experimentos, através de coletas de unidades amostrais de solo nos tratamentos. Bem como, foram amostradas as áreas de referência positiva. Para coleta das unidades amostrais, foram escolhidos aleatoriamente pontos dentro das parcelas, e utilizou-se um gabarito com 30 x 20 x 5 cm. De cada unidade amostral retirou-se 3 litros de solo, dos quais foram dispostos em bandejas de polipropileno (43,5 x 29,6 x 7,5 cm) furadas para drenagem da água, e alocadas em casa de vegetação sob tela sombrite de malha fina (30% de sombra) no NEMA, com cinco repetições, por tratamento.

As bandejas foram irrigadas diariamente por 30 minutos através de microaspersores suspensos. Juntamente às bandejas com as amostras de solo, foram dispostas bandejas com substrato comercial, compondo o controle metodológico, a fim de identificar possível ocorrência de espécies espontâneas advindas da casa de vegetação, as quais foram posteriormente excluídas. Durante 150 dias, as amostras foram avaliadas a cada 15 dias, registrando as espécies emergidas e seu número de indivíduos. Após 105 dias, com estabilização do experimento, sem a emergência de

novos indivíduos, as amostras de solo foram reviradas de modo permitir a germinação de sementes que poderiam estar contidas no fundo das bandejas. As plântulas emergentes identificadas e contabilizadas foram removidas da bandeja, de modo a não sombrear o solo e dispersar sementes no mesmo.

Por motivo de comparação, o banco de sementes também foi coletado antes da implantação dos experimentos (referido como área degradada) e avaliado nas mesmas condições das análises finais, por 90 dias, até a estabilização na emergência. Os valores de riqueza, densidade e diversidade foram avaliados no mesmo padrão das demais análises.

### ***Análises estatísticas***

As premissas de análise dos dados, como homocedasticidade, normalidade, independência e esfericidade foram calculadas anteriormente à análise de variância (Gomes 1990). A comparação da riqueza, densidade, diversidade e cobertura vegetal das herbáceas e regenerantes ao longo do tempo foram realizadas pelos Modelos Lineares Generalizados com três fatores (Transposição do solo; Semeadura das herbáceas e Tempo) (Rocha & Júnior 2018). A comparação entre os tratamentos foi determinada através intervalo de confiança plotado nos gráficos. Todas as análises estatísticas foram realizadas nos programas STATISTICA 13, com  $\alpha = 5\%$  (StatSoft 2012) e no software R (R Development Core Team 2013).

## **Resultados**

### ***Análise das espécies vegetais***

Ao todo, foram amostrados 76.397 indivíduos distribuídos em 19 famílias, 38 gêneros e 75 espécies. As famílias mais representadas foram Poaceae, Fabaceae, Malvaceae e Euphorbiaceae. Em relação ao hábito das espécies identificadas, 69% das espécies amostradas compõem o estrato herbáceo, com representantes como *Microtea celosioides* Moq. ex Sennikov & Sukhor. (Microteaceae), *Mollugo verticillata* L. (Molluginaceae), *Panicum trichoides* Sw. (Poaceae) e *Portulaca elatior* Mart. ex Rohrb. (Portulaceae), *Richardia grandiflora* (Cham. & Schltld.) Steud. (Rubiaceae) e *Zornia latifolia* Sm. (Fabaceae). *P. elatior* e *R. grandiflora* se destacando pela presença em todos os tratamentos.

Ainda, 8% de erva/subarbusto, como *Staelia virgata* (Link ex Roem. & Schult.) K.Schum. (Rubiaceae), 8% de subarbusto, como *Corchorus argutus* Kunth (Malvaceae) e *Chamaecrista pilosa* (L.) Greene (Fabaceae), 10% de arbusto, como *Waltheria brachypetala* Turcz. (Malvaceae) e *Manihot esculenta* Crantz (Euphorbiaceae) e 5% de árvores, como *Mimosa tenuiflora* (Mart.) Benth. (Fabaceae). Dessas, 21% do total são espécies exóticas invasoras, dentre elas com maior representatividade de indivíduos apareceu *Aristida adscensionis* L. (Poaceae), *Digitaria nuda* Schumach. (Poaceae), *Amaranthus viridis* L. (Amaranthaceae), *Dactyloctenium aegyptium* (L.) Willd. (Poaceae) e *Eragrostis tenella* (L.) P.Beauv. ex Roem. & Schult (Poaceae).

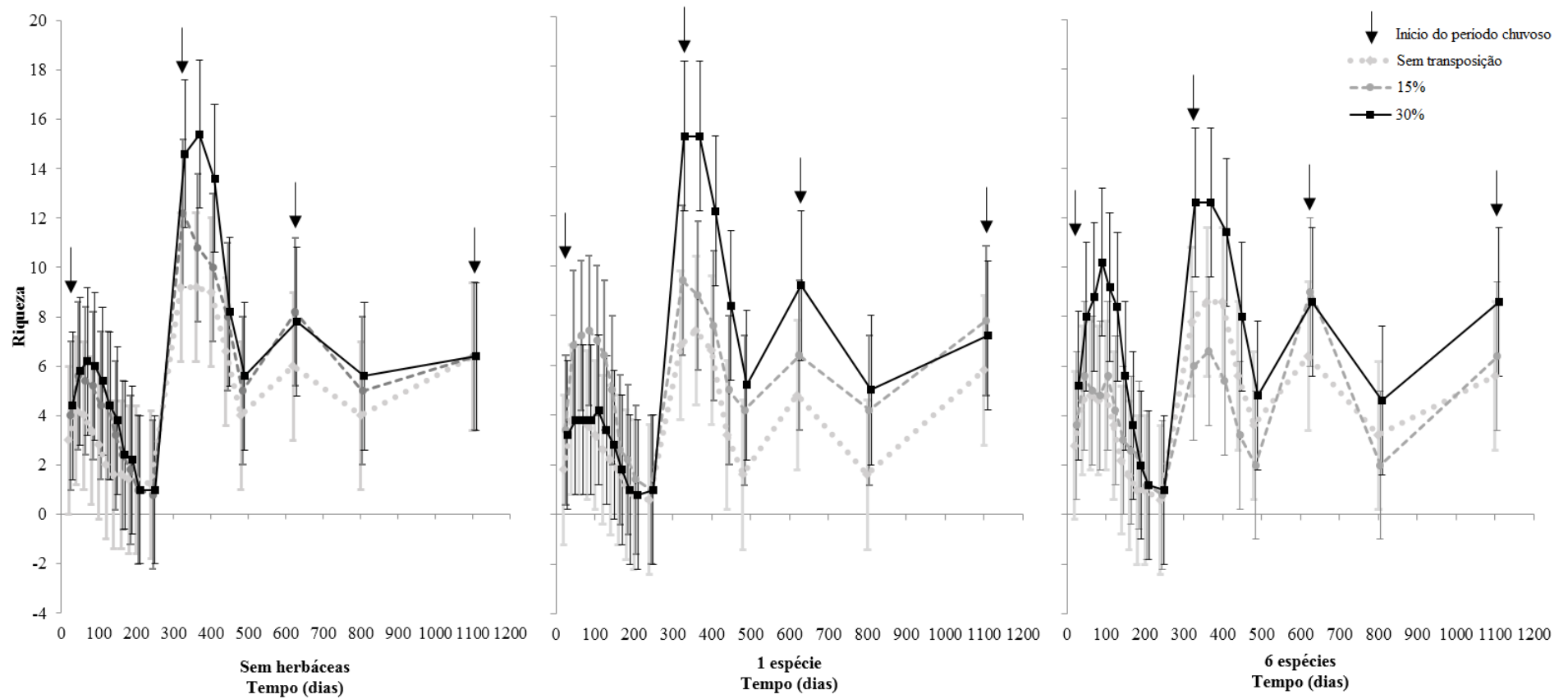
Para análise da riqueza, pode-se observar a variação em decorrência do período avaliado (Figura 2.6), sendo maiores nos períodos chuvosos. Os maiores picos de riqueza ocorreram no primeiro período de chuvas do ano seguinte após implantação dos tratamentos (análise de 320 dias), com estabilização dos valores nos dois anos seguintes de avaliação. Os fatores de transposição e tempo apresentaram diferença significativa, individualmente, mas não quando analisada a sua interação (Tabela 2.1). O fator relacionado à sementeira das herbáceas não interferiu significativamente nos resultados.

**Tabela 2.1** Resultados da ANOVA (GLM) para os parâmetros de riqueza, densidade, diversidade e cobertura vegetal entre os tratamentos com transposição de solo e sementeira de herbáceas para condicionamento do solo de área degradada na Caatinga, no município de Petrolina, PE.

	Densidade											
	Riqueza			(indivíduos/m <sup>2</sup> )			Diversidade			Cobertura		
	DF	F	p	DF	F	p	DF	F	p	DF	F	p
<b>Transposição</b>	892	30,2	<0,001*	852	19,3	<0,001*	830	0,1	0,9	267	0,8	0,5
<b>Herbáceas</b>	890	1,4	0,23	850	2,9	0,05	828	3,4	<b>0,03*</b>	265	2,4	0,09
<b>Tempo</b>	872	30,6	<0,001*	832	132,9	<0,001*	810	0,7	0,7	260	67,2	<0,001*
<b>Transposição:Herbáceas</b>	868	4,2	<b>0,002*</b>	828	5,6	<0,001*	806	2,2	0,1	256	0,9	0,4
<b>Transposição:Tempo</b>	832	0,5	0,99	792	1,1	0,35	770	0,5	0,9	246	0,3	0,97
<b>Herbáceas:Tempo</b>	796	0,7	0,92	756	0,5	0,99	734	0,6	0,9	236	0,5	0,88
<b>Transp.:Herb.:Tempo</b>	724	0,4	0,99	684	0,5	0,99	662	0,8	0,9	216	0,3	0,99

\* Significativo à 5%.





**Figura 2.6** Avaliação de riqueza entre os tratamentos de transposição de solo e semeadura de herbáceas para condicionamento do solo de área degradada na Caatinga, no município de Petrolina, PE. \* A seta representa o início do período chuvoso na região.

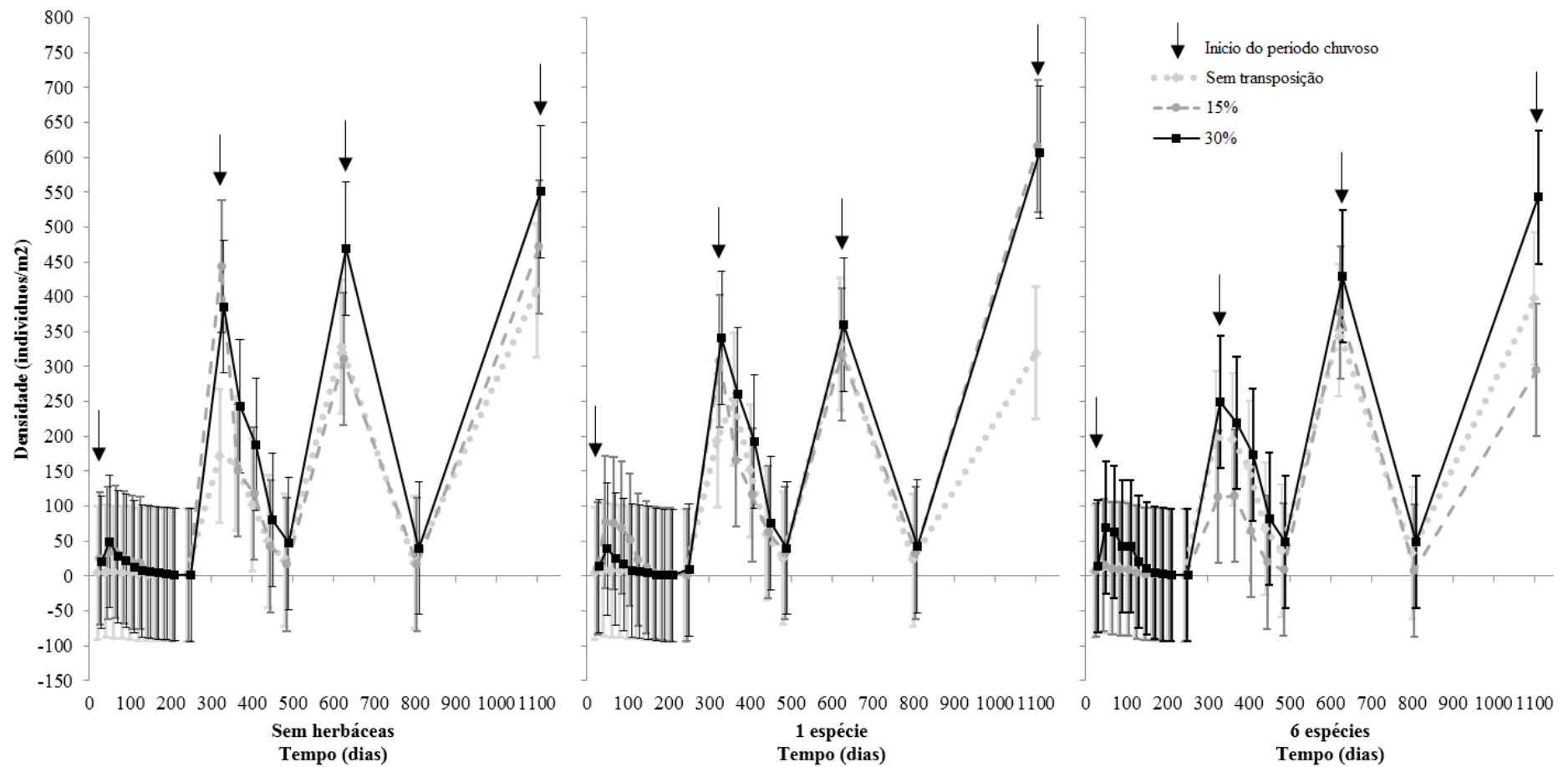
\*A diferença significativa entre os tratamentos é determinada através dos intervalos de confiança plotados nos gráficos.

A diferença entre os tratamentos de transposição implantados pode ser vista em pontos específicos ao longo do tempo. No primeiro período chuvoso do ano seguinte à implantação também aparecem os pontos em que houve diferença entre os tratamentos de transposição (análises de 320 a 400 dias, em todos os tratamentos de herbáceas). O maior índice de riqueza foi notado no tratamento de 30% de cobertura (média de até  $15,8 \pm 2,3$  em 30%) em comparação as demais (média de  $9,2 \pm 3,1$  nas áreas de condução da regeneração). De toda forma, a última análise realizada, após três anos de experimento demonstra que em todos os casos as médias se igualaram, não sendo observada diferença entre os nove tratamentos implantados. A média de riqueza encontrada nesse caso foi de nove espécies.

Para densidade, as significâncias foram similares à riqueza, porém com diferenças dos tratamentos de transposição e tempo em maior quantidade de pontos amostrados. Na última análise, para o tratamento com uma espécie de herbácea semeada é possível observar os tratamentos de transposição com o dobro de indivíduos (média de  $611,5 \pm 160$  indivíduos/m<sup>2</sup>) das áreas de condução da regeneração natural ( $319,6 \pm 115$  indivíduos/m<sup>2</sup>). Nos demais tratamentos a diferença não é observada. De forma geral, os resultados de densidade demonstram como a área está em contínuo crescimento (Figura 2.7).

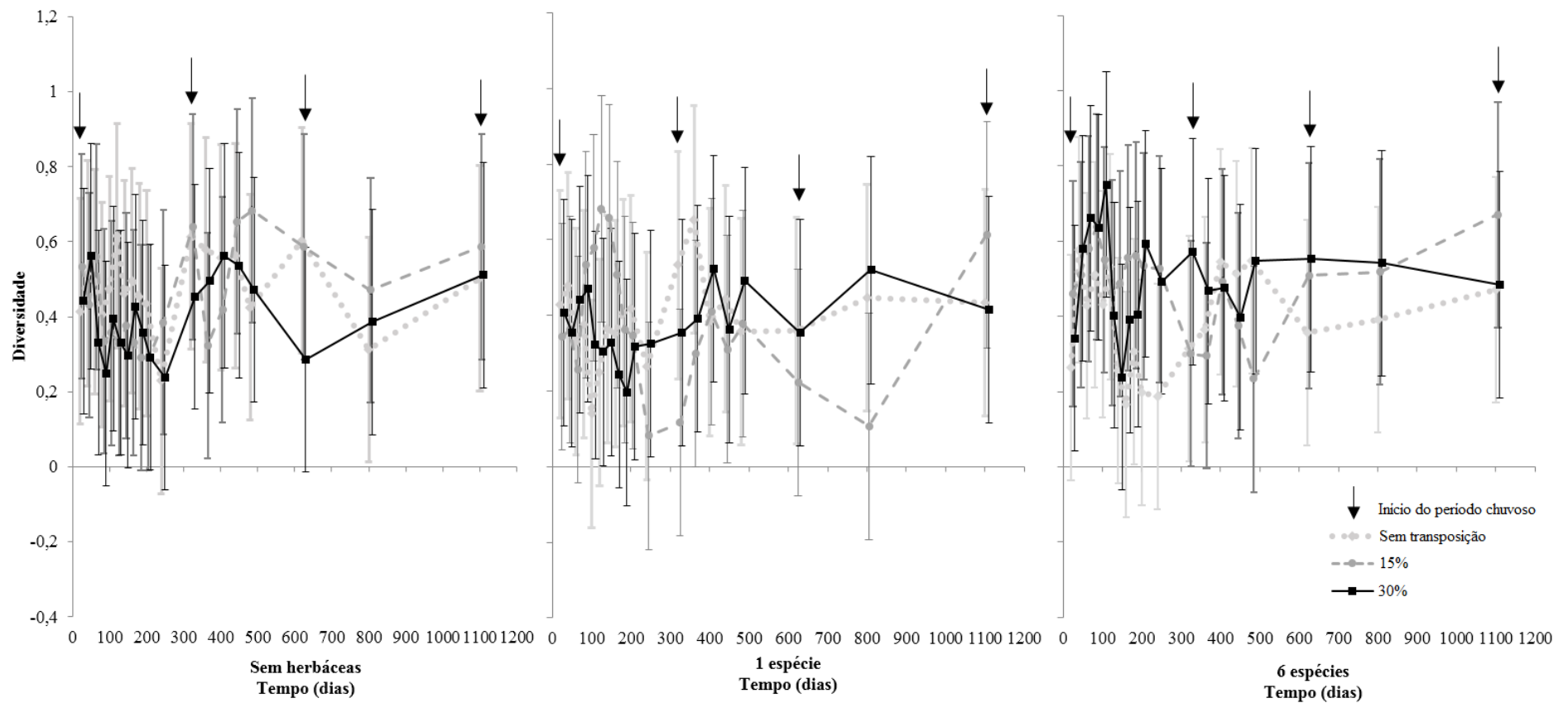
Para análise de diversidade também se pôde observar um padrão de valores independentes dos tratamentos e tempo analisados. O fato é reforçado na avaliação da última observação feita em campo, após três anos, que demonstrou uma média de diversidade de 0,49 sem diferença entre os nove tratamentos implantados (Figura 2.8).

A análise da cobertura vegetal também demonstrou a diferença apenas entre os tempos, com os tratamentos se comportando da mesma forma em cada análise. Em todos os tratamentos a cobertura aumentou ao longo do tempo a ponto de ser próximo a 100% na última análise avaliada (Figura 2.9).



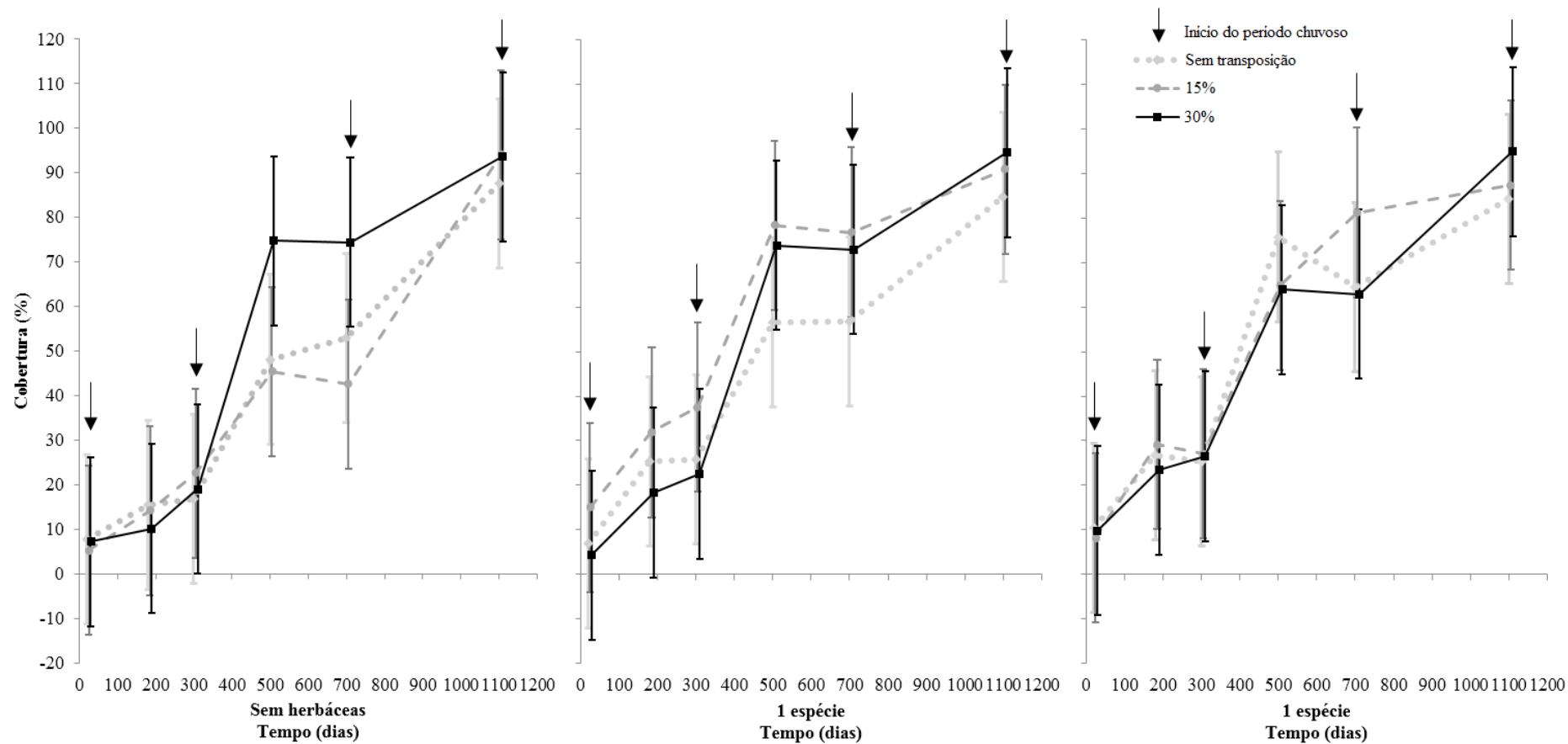
**Figura 2.7** Avaliação de densidade (indivíduos/m<sup>2</sup>) entre os tratamentos de transposição de solo e semeadura de herbáceas para condicionamento do solo de área degradada na Caatinga, no município de Petrolina, PE. A seta representa o início do período chuvoso na região.

\*A diferença significativa entre os tratamentos é determinada através dos intervalos de confiança plotados nos gráficos.



**Figura 2.8** Avaliação de diversidade (Simpson) entre os tratamentos de transposição de solo e semeadura de herbáceas para condicionamento do solo de área degradada na Caatinga, no município de Petrolina, PE. A seta representa o início do período chuvoso na região.

\*A diferença significativa entre os tratamentos é determinada através dos intervalos de confiança plotados nos gráficos.



**Figura 2.9** Avaliação da cobertura vegetal (%) entre os tratamentos de transposição de solo e semeadura de herbáceas para condicionamento do solo de área degradada na Caatinga, no município de Petrolina, PE. A seta representa o início do período chuvoso na região.

\*A diferença significativa entre os tratamentos é determinada através dos intervalos de confiança plotados nos gráficos.

Para semeadura das herbáceas, as análises dos gráficos de riqueza, densidade e cobertura confirmam a não diferença significativa para esse parâmetro (Tabela 2.1). Pode-se observar o mesmo padrão, independente das formas de semeadura de herbáceas implantadas (Figura 2.6, 2.7, 2.8 e 2.9).

### ***Análise de solo***

As análises de solo realizadas anteriormente à implantação dos tratamentos e após três anos demonstram como os parâmetros relacionados ao solo ainda não foram alterados de forma efetiva (Tabela 2.2). Esse solo é composto majoritariamente por areia (84,23%) e pelas médias por ser considerado pelo Triângulo Textural do solo como areia franca, última categoria antes de ser considerado totalmente como areia.

De forma geral, o pH ficou na média de 5,99; a condutividade elétrica está baixa, com média de 0,08 ds/m. A saturação por bases tem valores variados e dois tratamentos de condução da regeneração sem herbáceas e com apenas uma espécie ficaram com valores de 46,56% e 47,92%, respectivamente. As médias nos tratamentos com transposição chegaram a 73,8%.

O magnésio em algumas parcelas encontra-se acima do esperado, o que pode prejudicar a absorção de outros nutrientes, como o cálcio. Os demais nutrientes e parâmetros avaliados estão dentro da normalidade para a maioria das espécies se desenvolverem, apesar do Ca estar um pouco abaixo do ideal.

**Tabela 2.2** Análise de solo dos tratamentos de transposição de solo e semeadura de herbáceas para condicionamento do solo de área degradada na Caatinga, no município de Petrolina, PE. À saber: Reg: Regeneração; SH: sem herbáceas, H1: 1 herbácea e H6: 6 herbáceas.

Tratamentos		COMPLEXO SORTIVO (cmol /dm /T.F.S.A.)												
		pH	CE (ds/m)	Na (cmolc/dm <sup>3</sup> )	K (cmolc/dm <sup>3</sup> )	(H + Al) cmolc/dm <sup>3</sup>	Al (cmolc/dm <sup>3</sup> )	Ca (cmolc/dm <sup>3</sup> )	Mg (cmolc/dm <sup>3</sup> )	P (mg/dm <sup>3</sup> )	T (cmolc/dm <sup>3</sup> )	t (cmolc/dm <sup>3</sup> )		
Área de referência		5,47	0,07	0,35	0,23	2,475	0,01	1,97	0,44	0,84	5,47	3,00		
Área degradada		6,47	0,06	0,09	0,08	0,50	0,01	1,53	0,31	0,11	2,49	2,01		
Reg	SH	5,96	0,01	0,09	0,13	3,80	0,25	2,11	0,99	1,18	7,10	3,56		
Reg	H1	6,02	0,01	0,13	0,08	1,65	0,1	1,03	0,28	0,22	3,17	1,62		
Reg	H6	6,01	0,02	0,13	0,18	1,16	0,15	2,03	0,81	0,96	4,31	3,30		
15%	SH	5,56	0,59	0,74	0,18	0,83	0,05	2,08	1,06	0,73	4,89	4,11		
15%	H1	6,14	0,04	0,30	0,08	1,49	0,1	1,87	0,86	0,81	4,60	3,21		
15%	H6	6,02	0,04	0,13	0,31	1,32	0,05	2,39	1,08	2,42	5,23	3,96		
30%	SH	5,74	0,02	0,09	0,13	1,32	0,25	1,25	0,63	0,73	3,41	2,34		
30%	H1	6,38	0,01	0,13	0,10	1,16	0,1	2,07	0,76	0,44	4,23	3,17		
30%	H6	6,07	0,03	0,22	0,13	0,83	0,05	2,54	1,22	0,51	4,93	4,16		
Tratamentos		Granulometria							T: CTC potencial	t: CTC efetiva	SB: Soma de bases	V: Saturação por bases	m: Porcentagem de Saturação por Alumínio	PST: Porcentagem de Saturação por sódio
		SB (cmolc/dm <sup>3</sup> )	V (%)	M (%)	PST (%)	Areia (%)	Argila (%)	Silte (%)						
Área de referência		2,99	54,73	0,33	6,36	81,80	11,50	6,70						
Área degradada		2,00	80,15	0,50	3,49	82,49	7,30	10,21						
Reg	SH	3,31	46,56	7,03	1,22	84,46	9,60	5,94						
Reg	H1	1,52	47,92	6,18	4,12	85,29	10,80	3,91						
Reg	H6	3,15	73,19	4,54	3,03	84,26	9,00	6,74						
15%	SH	4,06	83,12	1,22	15,12	83,67	9,90	6,43						
15%	H1	3,11	67,70	3,11	6,62	85,11	7,50	7,39						
15%	H6	3,91	74,76	1,26	2,49	84,54	3,50	11,96						
30%	SH	2,09	61,31	10,67	2,55	86,04	11,20	2,76						
30%	H1	3,07	72,67	3,15	3,09	85,69	8,40	5,91						
30%	H6	4,11	83,27	1,20	4,41	83,24	10,70	6,06						

### **Análise da composição das espécies**

Em decorrência da falta de significância das espécies herbáceas semeadas e da baixa emergência em campo, as análises de composição das espécies e do banco de sementes foram desenvolvidas com comparação apenas dos tratamentos de transposição. Dessa forma, para análise de similaridade das espécies foram observadas as diferenças nas composições entre todos os tratamentos avaliados (Tabela 2.3).

**Tabela 2.3** Análise de similaridade (ANOSIM) entre os tratamentos com transposição de solo com 15% e 30% de cobertura em área de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE. Os valores da tabela correspondem a significância à 5% (p).

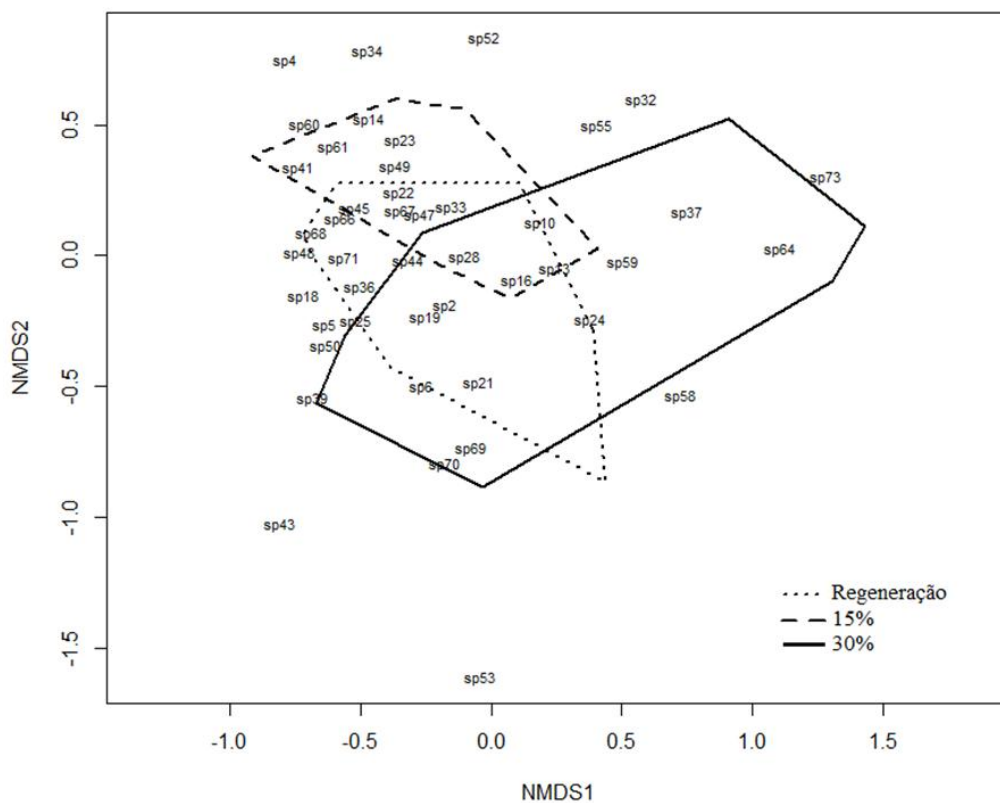
	<b>Regeneração</b>	<b>15%</b>	<b>30%</b>
<b>Regeneração</b>	-	0,013 *	0,001 *
<b>15%</b>	-	-	0,002 *
<b>30%</b>	-	-	-

\* Significativo à 5%.

A diferença na composição também pode ser observada na análise NMDS, que apesar de ter sobreposição dos polígonos, o polígono relacionado ao tratamento de 30% abrange maior proporção que os demais. Esse resultado também corrobora com os demais resultados encontrados, em que demonstra maior abrangência de espécies relacionadas ao tratamento de transposição com 30% de cobertura do solo.

Das 75 espécies encontradas 38% estão presentes no tratamento de condução da regeneração, 48% no tratamento de 15% de cobertura e 52% no tratamento de 30%. Algumas espécies só foram visualizadas nos tratamentos com transposição como *Corchorus argutus* Kunth (Malvaceae) (sp13), *Ludwigia erecta* (L.) H.Hara (Onagraceae) (sp37), *Pityrocarpa moniliformis* (Benth.) Luckow & R.W.Jobson (Fabaceae) (sp4), *Scoparia dulcis* L. (Plantaginaceae) (sp21) e *Waltheria operculata* Rose (Malvaceae) (sp44). Todas, espécies que ocorrem nas áreas de referência. Ressalta-se a presença de *P. moniliformis*, espécie arbórea presente nas áreas do entorno da área em restauração.





**Figura 2.10** Escalonamento multidimensional não paramétrico (NMDS) entre os tratamentos de transposição de solo com 15% e 30% de cobertura em área de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE.

### *Análise do banco de sementes*

As análises relacionadas ao banco de sementes registraram a emergência total de 5.103 indivíduos totais, sendo apenas 66 indivíduos visualizados no primeiro experimento com o banco de sementes da área degradada e os demais na segunda análise com os demais tratamentos. No total foram amostradas 57 espécies, distribuídas em 19 famílias, 38 gêneros e 66 espécies, sendo uma sem identificação nenhuma (Tabela 2.4).

A diferença entre os tratamentos foi observada para os parâmetros de riqueza e densidade, mas não para diversidade (Tabela 2.5). As parcelas com transposição de solo em 30% de cobertura apresentaram os melhores resultados de riqueza, com média de  $11,4 \pm 0,9$ , sendo igual estatisticamente a área de referência ( $8,8 \pm 1,6$ ) (Figura 2.11). A análise inicial da área degradada demonstra como havia um banco de sementes no local antes da implantação dos experimentos (Figura 2.11).

**Tabela 2.4.** Lista florística do banco de sementes em tratamentos de transposição de solo em área de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE. À saber: AD: Área degradada, anterior a implantação dos experimentos; ST: Área com condução de regeneração natural; 15%: área com 15% de transposição de solo; 30%: área com 30% de transposição de solo; N: nativa; EI: exótica invasora.

Família/espécie	Hábito	Tratamentos					Origem
		AD	ST	15%	30%	AR	
<b>Asteraceae</b>							
<i>Ageratum conyzoides</i> L.	Erva/ Subarbusto					X	N
<i>Centratherum punctatum</i> Cass.	Erva/ Subarbusto			X		X	N
<i>Eclipta</i> sp.	Erva			X			N
<i>Gamochaeta americana</i> (Mill.) Wedd.	Erva					X	N
<b>Boraginaceae</b>							
<i>Euploca procumbens</i> (Mill.) Diane & Hilger	Erva/ Subarbusto		X		X	X	N
<b>Cleomaceae</b>							
<i>Physostemon lanceolatum</i> Mart. & Zucc.	Erva			X	X	X	N
<b>Cyperaceae</b>							
Cyperaceae sp.					X	X	
<i>Cyperus fugax</i> Liebm.	Erva	X	X	X	X	X	N
<i>Cyperus squarrosus</i> L.	Erva		X	X	X	X	N
<i>Cyperus subsquarrosus</i> (Muhl.) Batters	Erva		X	X	X	X	N
<i>Cyperus surinamensis</i> Rottb.	Erva		X				N
<i>Eleocharis geniculata</i> (L.) Roem. & Schult.	Erva	X	X	X	X		N
<i>Eleocharis</i> sp.	Erva		X	X	X	X	N
<i>Fimbristylis dichotoma</i> (L.) Vahl	Erva		X	X	X	X	N

<i>Scleria</i> sp.	Erva	X	X	X	X	N
<b>Eriocaulaceae</b>						
<i>Eriocaulon</i> sp.	Erva				X	N
<b>Euphorbiaceae</b>						
<i>Commiphora leptophloeos</i> (Mart.) J.B.Gillett	Arbusto/ Árvore				X	N
<i>Euphorbia hirta</i> L.	Erva	X	X	X	X	N
<b>Fabaceae</b>						
<i>Mimosa tenuiflora</i> (Willd.) Poir.	Árvores/ Arbusto/ Subarbusto				X	N
<b>Lythraceae</b>						
<i>Ammannia latifolia</i> L.	Erva				X	N
<i>Cuphea circaeoides</i> Sm. ex Sims	Subarbusto		X		X	N
Lythraceae sp.			X	X	X	
<b>Malvaceae</b>						
<i>Sida galheirensis</i> Ulbr.	Subarbusto		X			N
<b>Microteaceae</b>						
<i>Microtea celosioides</i> Moq. ex Sennikov & Sukhor.	Erva		X	X	X	N
<b>Molluginaceae</b>						
<i>Mollugo verticillata</i> L.	Erva	X	X	X	X	N
<b>Onagraceae</b>						
<i>Ludwigia erecta</i> (L.) H.Hara	Arbusto	X	X	X	X	N
<i>Ludwigia octovalvis</i> (Jacq.) P.H.Raven	Subarbusto/ Arbusto				X	N
<b>Phyllanthaceae</b>						
<i>Phyllanthus niruri</i> L.	Erva/ Subarbusto	X			X	N
<b>Plantaginaceae</b>						
<i>Bacopa gratioloides</i> (Cham.) Edwall	Erva/ Subarbusto				X	N
<i>Monopera micrantha</i> (Benth.) Barringer	Erva		X	X	X	N

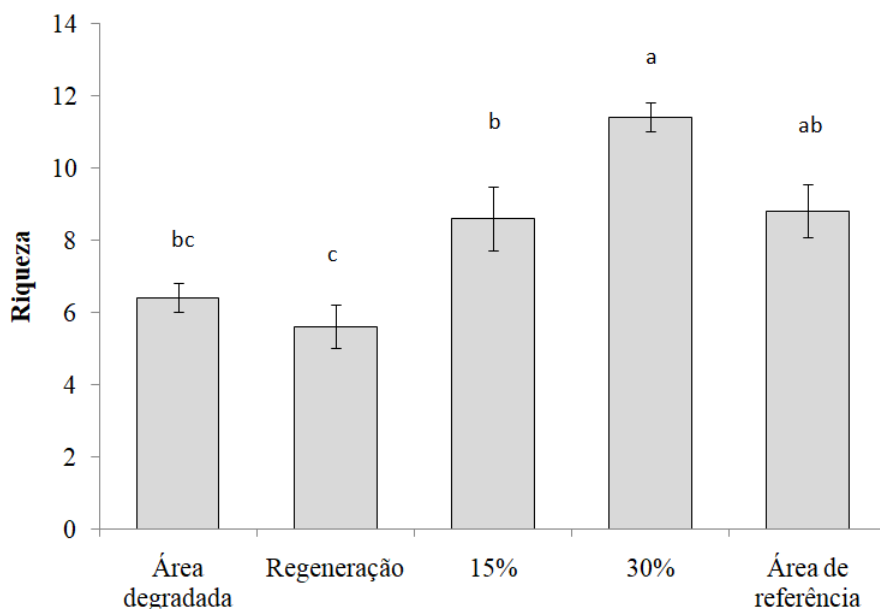
<i>Scoparia dulcis</i> L.	Erva/ Subarbusto						N
<i>Stemodia foliosa</i> Benth.	Erva/ Subarbusto/ Arbusto		X		X	X	N
Plantaginaceae sp1.			X		X	X	
Plantaginaceae sp2.					X		
<b>Poaceae</b>							
<i>Aristida adscensionis</i> L.	Erva		X	X	X	X	EI
<i>Cenchrus echinatus</i> L.	Erva		X	X	X	X	N
<i>Chloris</i> sp.	Erva			X			N
<i>Dactyloctenium aegyptium</i> (L.) Willd.	Erva		X	X	X		EI
<i>Digitaria</i> sp1.	Erva		X	X	X	X	N
<i>Digitaria</i> sp2.	Erva		X		X	X	N
<i>Eragrostis</i> cf. <i>maypurensis</i> (Kunth) Steud.	Erva			X			N
<i>Eragrostis ciliaris</i> (L.) R.Br.	Erva				X		EI
<i>Eragrostis pilosa</i> (L.) P.Beauv.	Erva					X	EI
<i>Eragrostis tenella</i> (L.) P.Beauv. ex Roem. & Schult.	Erva			X		X	EI
<i>Panicum trichoides</i> Sw.	Erva					X	N
<i>Pappophorum pappiferum</i> (Lam.) Kuntze	Erva					X	N
Poaceae sp.			X	X	X	X	
<b>Portulacaceae</b>							
<i>Portulaca elatior</i> Mart. ex Rohrb.	Erva	X	X	X	X	X	N
<i>Portulaca oleracea</i> L.	Erva					X	EI
<b>Rubiaceae</b>							
<i>Richardia brasiliensis</i> Gomes	Erva				X		N

<i>Staelia virgata</i> (Link ex Roem. & Schult.) K.Schum.	Erva/ Subarbusto		X	X	X	N
<b>Solanaceae</b>						N
<i>Schwenckia americana</i> Rooyen ex L.	Erva		X	X	X	N
<i>Solanum caatingae</i> S. Knapp & Särkinen	Erva		X	X	X	N
<b>Indeterminada</b>	Erva	X				

**Tabela 2.5** Resultados da ANOVA (GLM) para os parâmetros de riqueza, densidade e diversidade do banco de sementes em tratamentos de transposição de solo em área de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE.

	Riqueza			Densidade (indivíduos/m <sup>2</sup> )			Diversidade		
	DF	F	p	DF	F	p	DF	F	p
<b>Tratamentos</b>	20	12,4	<0,001*	24	8,9	<0,001*	32	0,8	0,5

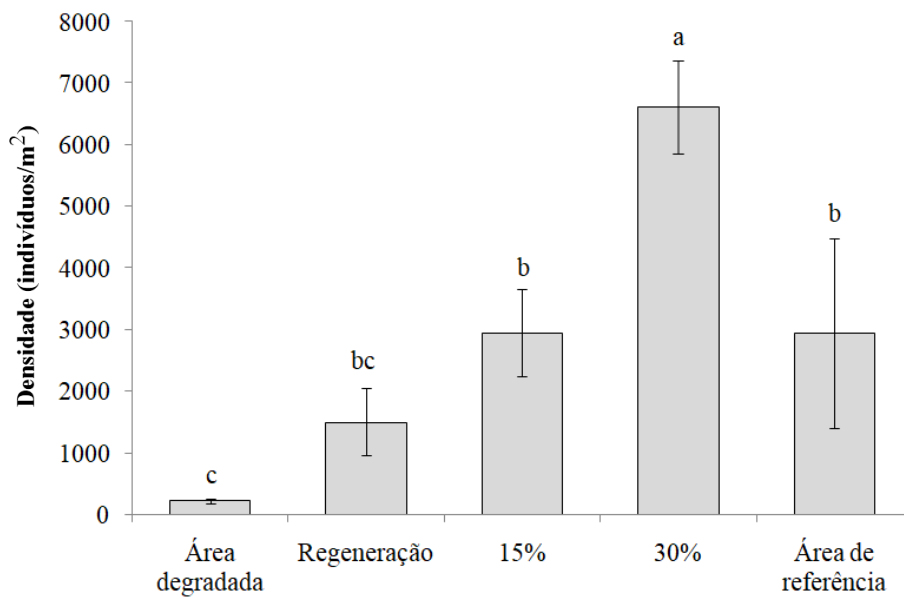
\* Significativo à 5%.



**Figura 2.11** Avaliação de riqueza do banco de sementes dos tratamentos de transposição de solo em área de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE.

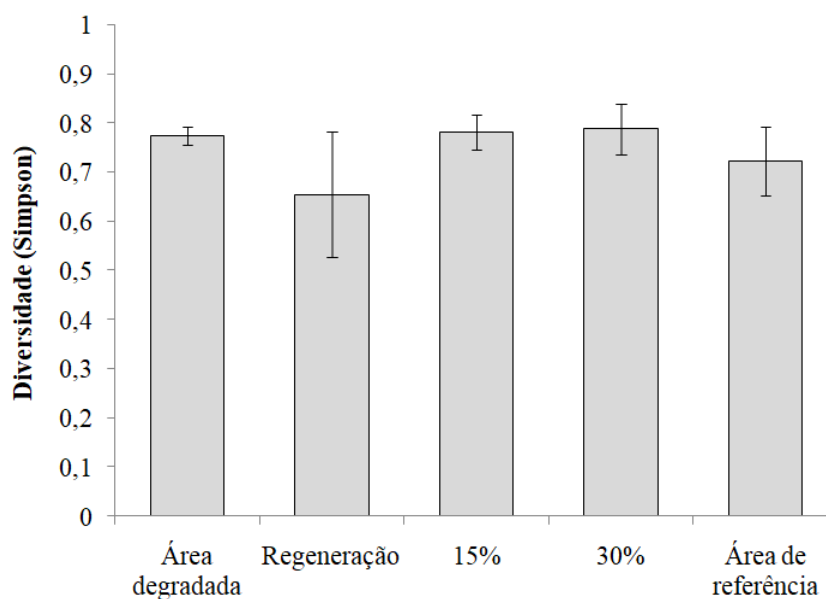
\* Médias seguidas pela mesma letra correspondem à igualdade significativa (5%).

Os resultados de densidade reafirmam as colocações abordadas, com altos valores, chegando a  $6611,1 \pm 1699,9$  indivíduos/m<sup>2</sup> nas áreas com 30% de cobertura (Figura 2.12). Nesse caso, sendo diferente estatisticamente de todos os demais tratamentos. O número de indivíduos na área degradada anteriormente aos tratamentos atingiu média máxima de emergência de  $220 \pm 85$  indivíduos/m<sup>2</sup>. As análises de diversidade do banco tiveram resultados semelhantes às avaliações em campo, com média geral de  $0,74 \pm 0,16$  (Figura 2.13).



**Figura 2.12** Avaliação da densidade (indivíduos/m<sup>2</sup>) do banco de sementes dos tratamentos de transposição de solo em área de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE.\*

\* Médias seguidas pela mesma letra correspondem à igualdade significativa (5%)



**Figura 2.13** Avaliação da diversidade (Simpson) do banco de sementes dos tratamentos de transposição de solo em área de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE.\*

\* Médias seguidas pela mesma letra correspondem à igualdade significativa (5%)

## Discussão

### *Análise das espécies vegetais*

A diferença de riqueza entre os tempos está atrelada ao comportamento da vegetação frente aos períodos de seca e chuva. Há o aumento da riqueza com a implantação dos tratamentos, redução nos períodos de seca com crescimento posterior no período de chuvas. Esse padrão já é esperado para as espécies herbáceas na Caatinga, que em grande parte são consideradas terófitas, ou seja, possuem ciclo de vida restrito a estação chuvosa, da germinação à maturação de seus frutos (Oliveira et al. 2013).

Os picos de riqueza no período chuvoso após a implantação dos tratamentos, principalmente onde o solo foi transposto em maior proporção (30%) ocorreu porque com o solo foi transposto o banco de sementes da área de referência com maior disponibilidade de propágulos viáveis a germinar. Apesar da riqueza não ter aumentado nas últimas análises, vê-se que o número de indivíduos está em ascensão, a cada período chuvoso. A diferença chega a ser 40 vezes maior de um ano para o outro nas primeiras

análises nos tratamentos com transposição. É possível observar a diferença ao longo do tempo destes tratamentos em comparação às áreas de condução da regeneração.

O resultado corrobora para a ideia de que a transposição acelera a sucessão, pois possibilita que as espécies germinem e se desenvolvam de forma mais rápida. As espécies que germinaram e produziram propágulos que possivelmente germinaram no ano seguinte. Para Caatinga, os estudos relacionados com transposição de solo como técnica de restauração são escassos, mas apresentam resultados positivos (Machado et al. 2021; Sousa 2017; Sousa et al. 2020). As análises de banco de sementes dão bons indicadores da possível utilização e transposição de pequenas parcelas, como o realizado por Souza et al. (2020) no Núcleo de Desertificação do Seridó (PB). O estudo demonstrou o aumento de maior riqueza e equabilidade de espécies em regiões que receberam solos transpostos. Machado et al. (2021) mostraram que é viável a aplicação da transposição de solo em áreas de jazidas de pirraça com colonização inicial também por herbáceas com alta diversidade. No Cerrado, Ferreira et al (2015b) demonstraram que a transposição de solo possibilitou advento efetivo de herbáceas, arbustos e árvores com alta propagação por rebrota, em uma pedreira de laterita abandonada.

Ambientes em formação tem a estrutura da comunidade definida a partir dos componentes abióticos, bióticos e da interação entre eles (Walker et al. 2007). A colonização de áreas abertas permite o estabelecimento de diversas espécies adaptadas às condições hostis e que irão coexistir sem a sobreposição de nichos e competição por recursos, como espaço ou luz (Begon et al. 2007). Isso acontece porque de acordo com a hipótese do gradiente de Stress quanto maior a severidade ambiental, menor é a atuação da competição na formação da comunidade (Bertnes & Callaway 1994). A facilitação pode ter maior força de atuação, nesses casos, reduzindo gradualmente a severidade do ambiente (Paterno et al. 2016).

Por isso, após o manejo do solo e com a presença do novo banco de sementes houve os picos de riqueza e densidade no primeiro ano após as chuvas. O fitness de cada espécie e a dinâmica da interação entre as espécies está determinando quais irão permanecer e quais serão substituídas (Begon et al. 2007). Esse fato provavelmente explica o porquê houve estabilização do número de espécies no local no último ano avaliado.

Em relação às análises de diversidade, o índice calculado foi o de Simpson, que considera a presença de espécies dominantes. Dessa forma, a igualdade dos valores



indica que não houve espécies sobressaindo em relação às demais, o que reforça a falta de competição no momento inicial da sucessão e equilibra para a presença de diferentes espécies nos diferentes tratamentos.

Os resultados de cobertura vegetal corroboram com as análises de densidade e são importantes no monitoramento de sucessão de uma área, pois comprovam que o aumento das espécies e da densidade está proporcionando a cobertura de um solo anteriormente sem vegetação. Como visto, a cobertura vegetal promove o aumento da retenção de umidade e redução da evaporação e lixiviação e aumento da resistência do solo à erosão (Guo et al. 2019). O aumento da cobertura vegetal também traz melhorias significativas para matéria orgânica por conta da decomposição dos restos vegetais, como raízes mortas (Peichl et al. 2012). A maior quantidade de serrapilheira formada a cada ciclo de chuva e seca com consequente aumento de matéria seca que será decomposta, possibilitando incremento de nutrientes e matéria orgânica ao solo e favorecendo os ciclos biogeoquímicos (Peichl et al. 2012; Rodrigues et al. 2010). Além disso, reduz tempo de exposição do solo e probabilidade de tomada por espécies exóticas invasoras, que podem causar danos irreversíveis ao processo de sucessão.

A falta de influência dos tratamentos com espécies herbáceas semeadas nos parâmetros avaliados pode ser explicada pela ausência ou baixa emergência das espécies no campo. Além disso, as herbáceas que conseguiram se estabelecer não foram suficientes para impactar os tratamentos. A espécie com maior número de sementes distribuídas, *S. uniflora*, teve emergência inferior a 1% e apareceu em poucas parcelas, espaçadas e com baixo desenvolvimento (observação dos autores). Além de ter sua ocorrência limitada ao primeiro ano de estudo. *R. echinus* foi a espécie com maior emergência (3,24%) e que permaneceu aparecendo nas parcelas até a última análise, em algumas, os indivíduos formaram alta cobertura e expansão. Por isso, é uma espécie-chave para utilização em áreas degradadas, com boas características para utilização, como dispersão facilitada, rápido crescimento, probabilidade de formar alta densidade e baixo efeito alelopático, como relato por Carvalho et al. (2022). Como visto, a demonstração desses fatores vai depender das condições da área a ser restaurada. Resultados com a espécie e outras herbáceas semeadas diretamente promoveram aumentam de cobertura de solo gradual e satisfatório em áreas afetadas por obras em diferentes estágios de degradação na Caatinga (Socolowski et al. 2021).

O solo arenoso com baixa retenção de umidade, o déficit hídrico e as chuvas irregulares da região podem ser considerados como principais causas da baixa emergência. Atrelado a isso, a alta evaporação local (até 8 mm/dia) (Cavalcante & Silva 2014) causa a rápida secagem do solo, principalmente nas camadas mais superficiais onde as sementes foram distribuídas, o que pode dificultar ou impedir a embebição das sementes necessária a germinação, ou causando estresse hídrico nas sementes recém germinadas. Ocasionalmente também uma compactação superficial local que promove uma barreira física à emergência. Além disso, sementes e plântulas são mais suscetíveis a ataques de pragas e doenças, principalmente em áreas degradadas onde o desequilíbrio ecológico agrava esses fatores (Santos Junior 2004; Knoechelmann 2019).

Esse resultado vai contra a crescente aplicação dessa técnica em outros tipos de vegetação. Isso ocorre porque, na Caatinga, as condições são diferentes, com vários tipos de solos, por vezes rasos e arenosos, com diferentes fitofisionomias e com restrições hídricas (Meiado et al. 2020). Precisa-se de estudos em diferentes locais para afirmar que a técnica pode ser adequada para a Caatinga. A semeadura direta de espécies arbóreas realizadas na mesma condição das áreas de estudo e descritas no capítulo 3, os resultados também não foram adequados, com baixa emergência e alta mortalidade.

### ***Análise de solo***

O solo é formado por materiais orgânicos e inorgânicos e a complexa interação entre eles promove as proporções da sua composição (Novais et al. 2007). As relações entre areia, argila e silte mantiveram-se as mesmas durante os anos de experimento, uma vez que alterações em nível de composição física estrutural levariam anos para ocorrer (Novais et al. 2007). Esse solo é composto majoritariamente por areia (84,23%) e pelas médias é ser considerado pelo Triângulo Textural do solo (Lemos & Santos 1996) como areia franca, uma categoria antes de ser considerado totalmente como areia.

A parte química é mais facilmente manipulada com aplicação de nutrientes na forma de fertilizantes naturais e químicos (Novais et al. 2007), o que não foi o caso do presente estudo. Nesse caso, as composições dos nutrientes dependeram exclusivamente de processos naturais como incremento de matéria orgânica e organismos decompositores, que naturalmente evoluem de forma lenta, principalmente em solos anteriormente degradados e sem intervenção por anos.

De forma geral, o pH ficou na média e o valor é considerado normal, possibilitando o desenvolvimento da maioria das espécies vegetais. A condutividade elétrica está baixa, o que demonstra que o solo não está salinizado, nem estava antes da implantação (0,06 ds/m). Solos salinos na região semiárida causam prejuízos à produção vegetal acima de 4 ds/m. Plantas da Caatinga são ainda mais tolerantes e podem suportar até 6 dS/m (Dantas et al. 2014).

A saturação por bases acima de 50% o solo é considerado fértil, eutrófico (Novais et al. 2007), e os tratamentos de condução da regeneração sem herbáceas e com apenas uma espécie ficaram perto dos limites mínimos, enquanto os tratamentos com transposição tiveram médias mais elevadas, acima de 70%. O magnésio em algumas parcelas encontra-se acima do esperado, o que pode prejudicar a absorção de outros nutrientes, como o cálcio. Os demais nutrientes e parâmetros avaliados estão dentro da normalidade para a maioria das espécies se desenvolverem, apesar do Ca estar um pouco abaixo do ideal (Novais et al. 2007).

#### ***Análise da composição das espécies***

A composição distinta nos tratamentos de transposição provavelmente ocorreu por conta dos propágulos provenientes das áreas de referência positiva que serviram como doadoras do solo. Dessa forma, espécies com dispersão limitada, como *C. argutus* e *L. erecta*, provavelmente não apareceriam nesse momento da sucessão em áreas sem intervenção. Ressaltando assim, mais uma vantagem da utilização do método.

#### ***Análise do banco de sementes***

A análise inicial da área degradada demonstra que havia um banco de sementes no local antes da implantação dos experimentos. Provavelmente essa situação foi possível pela característica do ambiente, de ser próximo às áreas de referência positiva que serviram como fonte de propágulos. Porém, as condições do solo exposto e compactado não proporcionavam o ambiente necessário para que as sementes emergissem e desenvolvessem, o que foi possível em condições controladas na casa de vegetação.

Dessa forma, viu-se que a gradagem não contruibui com a chegada de novos propágulos, na verdade, a área já tinha um banco de sementes e a melhoria do solo por conta do revolvimento pela gradagem contribuiu para que o banco germinasse. Ainda,

após três anos esse banco não evoluiu, pois permaneceu com a mesma quantidade de espécies que tinha inicialmente, como visto nas áreas de condução da regeneração.

As diferenças observadas em relação à densidade entre os tratamentos permitem afirmar que mesmo a falta de significância na riqueza avaliada em campo, as áreas de transposição estão formando um novo banco de sementes na área anteriormente degradada com maior quantidade de espécies e indivíduos que a área de condução da regeneração. Isso acontece porque além das sementes do banco de sementes transportado com a transposição, as espécies que emergiram, cresceram e produziram novos propágulos, alimentando o banco.

Um banco de sementes com alta diversidade e densidade é essencial para sucessão natural de uma área (Rodrigues 2020). Nesse caso, foi uma análise que permitiu inferir como a técnica de transposição do solo está promovendo as melhorias esperadas ao longo do tempo. Por isso, ressalta-se também a importância de se realizar análises além dos parâmetros básicos de riqueza, densidade e diversidade, normalmente utilizados nos programas de monitoramento de RAD, como cobertura de solo e banco de sementes.

### **Considerações finais**

A partir de todas as análises no estudo em campo e pelo banco de sementes foi possível inferir que os tratamentos de transposição de solo, em maior área de cobertura (30%), promoveram melhorias nos parâmetros como riqueza, densidade e alteração na composição florística da área, proporcionando advento de espécies e aceleração da sucessão natural.

O método relacionado à semeadura de espécies herbáceas precisa ser avaliado em cada situação para aplicação, não sendo recomendado a ser semeado a lanço sem incorporação do solo, em solos rasos e sem camada superficial, com características similares a área de estudo. No mesmo sentido, a compilação da técnica de transposição de solo com semeadura de herbáceas não obteve resultado satisfatório para ser recomendado.

As áreas de condução da regeneração natural, apenas com revolvimento do solo, podem ser aplicadas em situação semelhantes à área degradada de estudo, havendo aumento de riqueza, densidade e cobertura do solo. Porém, os resultados mais efetivos podem ocorrer mais lentamente do que as técnicas de metodologia ativa.

Ressalta-se, de forma geral, que para três anos de introdução de técnicas de restauração no semiárido com o nível de degradação da área anteriormente encontrada, os resultados do presente estudo já conseguem direcionar para indicar a utilização da transposição de solo como técnica de restauração.

### Capítulo 3

#### **Plantio de mudas e semeadura direta: implantação de arbóreas para restauração de áreas degradadas na Caatinga pós condicionamento do solo com transposição**

Raphaela Aguiar de Castro<sup>1,2</sup>; Renato Garcia Rodrigues<sup>3</sup> & Marcos Vinicius Meiado<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil.

<sup>2</sup> Laboratório de Fisiologia de Sementes, Departamento de Biociências, Universidade Federal de Sergipe, Itabaiana, Sergipe, Brasil.

<sup>3</sup> Núcleo de Ecologia e Monitoramento Ambiental, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Ciências Agrárias, Petrolina, Pernambuco, Brasil

### **Implicações práticas**

- Fornecer respaldo científico para introdução de espécies arbóreas em programas de restauração na Caatinga;
- Identificar e fornecer alternativa de condicionamento do solo para redução da mortalidade das espécies arbóreas em campo;
- Demonstrar que a técnica de semeadura direta de arbóreas tem restrições de implantação e não pode ser indicada em qualquer situação;
- Afirmar o plantio de mudas como técnica consolidada de restauração, mas necessidade de adaptações que aumentem sobrevivência.

### **Resumo**

Este capítulo foi desenvolvido diante da importância da inclusão de espécies arbóreas nos programas de restauração de áreas degradadas na Caatinga e da necessidade de um preparo do solo anterior à sua implantação que promova aumento da sobrevivência das espécies. Assim, o objetivo desse estudo foi verificar se a transposição de solo como condicionamento interferirá de forma efetiva no sucesso de arbóreas e comparar a sobrevivência das espécies implantadas por plantio de mudas e semeadura direta. Para isso, foram implantados os tratamentos de condicionamento: i) Sem a transposição de solo; ii) Cobertura de solo em 15% da área total da parcela; e iii) 30% de cobertura. Posteriormente foram implantadas as espécies arbóreas através do: i) Plantio de mudas de *Cnidoscolus quercifolius* Pohl, *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. e *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis.; e ii) Semeadura direta das mesmas. Esses fatores compilados formaram seis tratamentos, em 15 repetições. Nos resultados, a sobrevivência de *C. quercifolius* manteve-se elevada até a última análise ( $> 80\%$ ), quando houve a diferença estatística entre os tratamentos de transposição ( $84 \pm 5\%$ , para 15% de cobertura e  $80 \pm 27\%$ , para 30% de cobertura) e o tratamento sem ( $58 \pm 38\%$ ). *M. tenuiflora* e *C. pyramidale* não dependeram do condicionamento, reduzindo ao longo do tempo ( $26,7 \pm 5,8\%$  e  $9,7 \pm 19\%$ , médias finais). A *M. tenuiflora* apresentou melhor crescimento que as demais. Na semeadura, não houve diferença de emergência proporcionada pela transposição ( $p = 0,44$ ). Apesar das emergências chegarem a  $42,7 \pm 32,8\%$  (*C. quercifolius*);  $22,6 \pm 24,9\%$  (*M. tenuiflora*) e  $18,7 \pm 23,5\%$  (*C. pyramidale*) houve redução na porcentagem final. Na comparação, a introdução de arbóreas foi mais adequada como mudas. Assim, pode-se concluir que o

condicionamento do solo por transposição pode melhorar a sobrevivência de mudas de *C. quercifolius*. Indica-se a utilização de mudas de *C. quercifolius* e *M. tenuiflora* (com necessidade de replantio) em programas de restauração de áreas degradadas na Caatinga em condições de solos degradados que perderam suas camadas iniciais.

**Palavras-chaves:** Topsoil, técnica de RAD, Semiárido.

### **Abstract**

This chapter was developed because of the importance of including tree species in restore degraded areas programs in the Caatinga and the need for soil preparation prior to its implementation that promotes increased survival of the species. This study aimed to verify if soil transposition, as a conditioning, will effectively interfere the success of trees and to compare seedling planting and direct sowing. For this, the trail plots were implemented: i) Without soil transposition; ii) Ground cover of 15% of the total area of the plot; and iii) 30% coverage. Subsequently, the tree species were implanted through: i) Planting of seedlings of *Cnidoscolus quercifolius* Pohl, *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. and *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis.; and ii) Direct sowing of the same species. These compiled factors brought six treatments, with 15 replicates. The results showed that the survival of *C. quercifolius* remained high up to the last analysis ( $> 80\%$ ), when there was a statistical difference between the transposition treatments ( $84 \pm 5\%$ , for 15% of coverage and  $80 \pm 27\%$ , for for 30% coverage) and treatment without soil transposition ( $58 \pm 38\%$ ). *M. tenuiflora* and *C. pyramidale* did not depend on the conditioning, decreasing over time ( $26.7 \pm 5.8\%$  and  $9.7 \pm 19\%$ , final means). *M. tenuiflora* showed better growth than the others. At sowing, there was no difference in emergence provided by the transposition ( $p = 0.44$ ). Despite the emergencies reaching  $42.7 \pm 32.8\%$  (*C. quercifolius*);  $22.6 \pm 24.9\%$  (*M. tenuiflora*), and  $18.7 \pm 23.5\%$  (*C. pyramidale*), there was a reduction in the final percentage. In comparison, the introduction of trees was more suitable as seedlings. Thus, it can be concluded that soil conditioning by transposition can improve the survival of *C. quercifolius* seedlings. The use of seedlings of *C. quercifolius* and *M. tenuiflora* (needing replanting) is indicated in programs to restore degraded areas in the Caatinga in conditions of degraded soils that have lost their initial layers.

**Keywords:** Topsoil, Restoration technique, Semiarid.



## **Introdução**

O crescente aumento da necessidade de restauração de áreas degradadas na Caatinga por conta da conversão da vegetação nativa em ecossistemas antropogênicos (Silva et al. 2017) impulsiona a necessidade da aplicação de estudos práticos das técnicas recomendadas em campo. Dentre as técnicas aplicadas em programas de restauração, tem-se o plantio de mudas, que foi o primeiro método de restauração florestal utilizado no Brasil (Brancaion et al. 2015) e ainda é o mais utilizado, independente do tipo de vegetação (Guerra et al. 2020). Na Caatinga, os estudos a respeito das técnicas também se concentram com o plantio de mudas e, em sua maioria, sugerem intervenções que proporcionem aumento da sobrevivência das mudas em campo, desde manejo das sementes à produção de mudas mais tolerantes (Oliveira et al. 2015; Teixeira-Rios et al. 2016; Lima & Meiado 2018). Esses estudos são importantes porque a qualidade morfofisiológica da muda é essencial para garantir a sua sobrevivência e crescimento inicial na área a ser restaurada (Santos 2010; Martins 2014; Nascimento 2016).

Normalmente, para o plantio, utilizam-se espécies com características de iniciais, que são adaptadas à alta exposição luminosa e às condições inóspitas, possuem crescimento acelerado, alta produção de sementes e podem ser facilmente encontradas (Botelho & Davide 2002). Segundo Gonçalves et al. (1992), o sistema radicular dessas espécies é mais desenvolvido e possui maior quantidade de raízes finas, com consequente aumento das taxas de crescimento e absorção de nutrientes. Por isso, a colonização inicial por essas espécies permite o posterior advento de secundárias, proporcionando sombreamento e incorporação de nutrientes no solo (Rodrigues et al. 2009a; Martins 2014). Outra característica importante dessas espécies é a formação de ambientes adequados para a chegada de novas espécies da fauna, como dispersores. Ou seja, o plantio de mudas acelera o processo de sucessão ecológica no local (Brancaion et al. 2015). Porém, o custo elevado para esse método, por conta de todo processo de produção no viveiro, necessidade de transporte e mão de obra para plantio, torna essa técnica custosa em curto prazo e quando comparada com alternativas como semeadura direta e condução da regeneração natural (TNC 2018).

Nesse contexto, a semeadura direta das espécies arbóreas tem sido indicada como uma técnica alternativa. As sementes, previamente tratadas ou não, são colocadas para germinar diretamente no solo da área degradada. Maiores estudos acerca do

assunto já foram desenvolvidos em países de clima temperado, onde foram observados bons resultados ecológicos e econômicos (Winsa & Bergsten 1994). No Brasil, esse ainda não é um método muito utilizado, apesar de ser considerada uma alternativa viável, principalmente por reduzir os custos em comparação ao plantio direto de mudas (Santos Júnior 2000; Santos 2010; Brancalion et al. 2015) e permitir o uso de mecanização no momento do semeio (Araki 2005). Alguns autores afirmaram que, nas espécies germinadas em campo, as raízes se desenvolvem sem anormalidades e não sofrem com o transplantio, como acontecem com as mudas (Heth 1983; Smith 1986; Araki 2005). Ainda, segundo Botelho e Davide (2002), a semeadura direta assemelha-se a principal forma de regeneração natural nas florestas tropicais, que ocorre por semeadura natural.

Os resultados encontrados na Caatinga a respeito do assunto ainda não são promissores, com baixa sobrevivência das plântulas emergidas em longo prazo (Bakke et al. 2017), mesmo com a adição de condicionadores de solo, como esterco (Sales 2008). Sales (2008) avaliou a influência de caprinos e obteve 100% de perda das plântulas emergidas. Nos estudos analisados, é observada também uma variação de locais com diversas fitofisionomias, médias de precipitação e porcentagens de aridez que podem interferir nos resultados.

Um das grandes vantagens da introdução de arbóreas com mudas ou semeadura é a possibilidade de escolha das espécies que irão configurar os processos posteriores a sua implantação. Recomendam-se aquelas que ocorrem naturalmente na região, ou seja, adaptadas as condições edafoclimáticas do local (Martins 2014). As espécies nativas garantirão a preservação do banco genético natural da região (Kersten et al. 2006). Pode-se optar por plantar espécies atrativas à fauna (Martins 2014), aumentando as chances de dispersão de novos propágulos. Outra opção é o plantio de espécies que ofereçam serviços ecossistêmicos específicos à comunidade, como alimentação, plantas medicinais, cosméticos, lenha, uso madeireiro e até para artesanato (Sena et al. 2021). Normalmente, existem espécies com um denominador comum entre o fato de já ser utilizada em programas de restauração e ser de uso da comunidade local (Sena et al. 2021). Com o intuito de maximizar a eficácia dos programas, essas devem ser as espécies selecionadas para o plantio em áreas restauradas.

Para maior eficácia das técnicas citadas devem ser tomados cuidados em relação à diversidade e as características do solo, a qualidade morfofisiológica dos propágulos e

aos cuidados com as intempéries de campo. Recomenda-se a obtenção das sementes em diferentes matrizes, garantindo variabilidade fisiológica e genética (Martins 2014). Além disso, há a necessidade de um ambiente com características favoráveis para manter as espécies ao longo do tempo, cumprindo as premissas ecológicas esperadas. Maestre (2003), em levantamento dos parâmetros que interferem no sucesso de estabelecimento de uma muda, concluiu que, das 14 variáveis ambientais avaliadas, apenas a cobertura nua, o teor de areia e a compactação do solo realmente têm relação com a sobrevivência das mudas em campo. Sampaio et al. (2021) também ressalta como melhorar as características do solo influenciam diretamente no estabelecimento efetivo das mudas em programas de restauração.

Por isso, ressalta-se que o condicionamento do solo deve ser realizado antes do plantio ou semeio, para favorecer esses parâmetros necessários que manterão a espécie arbórea. Esse condicionamento deve promover melhoria nas características físicas, químicas e biológicas do solo, além do aumento da matéria orgânica, da retenção de umidade e redução da evaporação e lixiviação. Dessa forma, tem-se a possibilidade de aumentar as chances de garantir a sobrevivência das espécies (Botelho & Davide 2002), com uma reposição rápida e eficiente da cobertura vegetal (Lamb et al. 2005). O condicionamento pode ser adquirido através do método da transposição de solo, que funciona como fonte de sementes, matéria orgânica, nutrientes, microrganismos, como bactérias fixadoras de nitrogênio e fungos micorrízicos, meso e macrofauna (Martins 2014; Brancalion et al. 2015).

Em decorrência da importância da inclusão de espécies arbóreas e da necessidade de um preparo do solo anterior à sua implantação, a primeira hipótese deste capítulo é que o uso de condicionadores de solo, através da transposição, melhorara as condições locais e permite aumento de sobrevivência e manutenção das espécies arbóreas. A segunda hipótese é que a semeadura de arbóreas pós-condicionamento do solo é equiparável ao plantio de mudas no sucesso de introdução de indivíduos arbóreos na restauração. Para isso, os objetivos deste capítulo foram verificar: i) Qual o tipo de condicionamento de solo através da transposição interfere de forma mais efetiva no sucesso da implantação de espécies arbóreas (muda e semente) e, ii) Comparar os sucessos das técnicas de plantio de mudas e semeadura direta de arbóreas.

## **Material e Métodos**

### ***Área de estudo***

As parcelas de estudo estão localizadas no Campus de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), em Petrolina, Pernambuco. O clima predominante é o Tropical Semiárido, com médias anuais de 26 °C de temperatura, com amplitudes que variam de 14 °C a 37 °C, e média de 535,5 mm de precipitação, também variável, como 219 mm em 2019 e 519 mm em 2021 (N = 10 anos) (Embrapa Semiárido 2010; Labmet 2022).

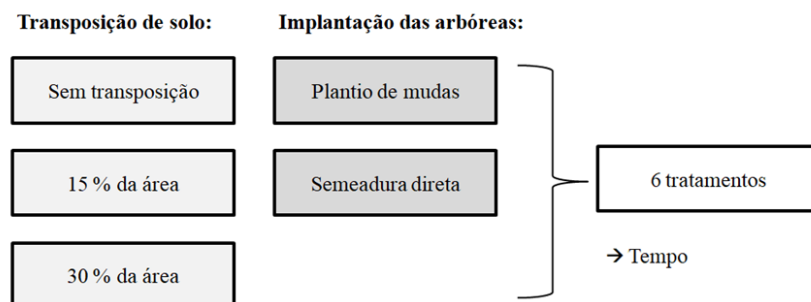
A partir dos dados históricos de imagens disponíveis pelo Google Earth e pesquisas bibliográficas da região, foi observado que a área serviu como empréstimo de solo para construção da estrada que rodeia o Campus da universidade. Essa construção foi iniciada em 2004, com área total de 1ha e retirada de pelo menos 1,5m de profundidade de solo do local. Após esse procedimento, a área foi abandonada e se encontrava há 18 anos sem interferência de restauração e sem observação de regeneração natural.

### ***Implantação de arbóreas***

No primeiro ano de experimento, em abril de 2019, foram implantadas as técnicas relacionadas ao condicionamento do solo, com transposição de solo, já especificadas no capítulo anterior. À saber: i) Sem a transposição de solo, representando a condução da regeneração natural; ii) Quatro faixas de 4 (comprimento) x 0,3 (largura) x 0,05 (altura) m, representando a cobertura de 15% da área total da parcela; iii) Oito faixas com a mesma dimensão, representando 30% de cobertura. No segundo ano de experimento, em janeiro de 2020, no início da estação chuvosa, foram implantadas as espécies arbóreas através do: i) Plantio de mudas de três espécies de arbóreas nativas; e ii) Semeadura direta de três espécies de arbóreas nativas (Figura 3.1).

Esses fatores compilados formaram seis tratamentos (Figura 3.1): (A) Apenas plantio de mudas; (B) Apenas semeadura de arbóreas; (C) Transposição de solo em 15% da área com plantio de mudas; (D) Transposição de solo em 15% da área com semeadura; (E) Transposição de solo em 30% da área com plantio de mudas; (F) Transposição de solo em 30% da área com semeadura. Os seis tratamentos foram estabelecidos em 15 repetições em delineamento experimental de blocos casualizados

(DBC), com três repetições em cada um dos cinco blocos, totalizando 90 parcelas amostrais.

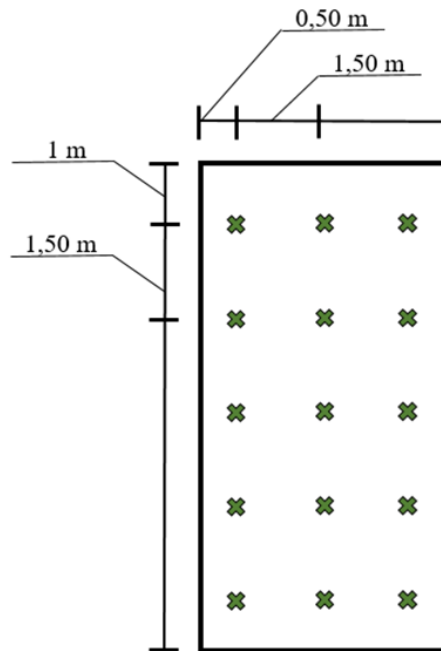


**Figura 3.1** Organograma do delineamento experimental dos tratamentos de implantação de espécies arbóreas sob tratamentos de transposição de solo em restauração de área degradada da Caatinga, no município de Petrolina, PE.

### ***Plantio das mudas***

As mudas foram produzidas no Núcleo de Ecologia e Monitoramento Ambiental (NEMA) da Universidade Federal do Vale do São Francisco, a sol pleno e com rega diária no primeiro mês e redução gradual da irrigação no mês anterior ao plantio. Para transplântio, foram feitas covas circulares com 20 cm de diâmetro e 30 cm de profundidade, adubadas com 1 L de esterco bovino curtido, implantadas de forma aleatória com no mínimo de 1,5 m de espaçamento entre mudas, totalizando 15 mudas por parcela (Figura 3.2).

Foram utilizadas três espécies arbóreas nativas da Caatinga com características de iniciais, como alta germinabilidade, rápido crescimento e adaptadas a condições de estresse hídrico: *Cnidoscolus quercifolius* Pohl, Euphorbiaceae (Faveleira), *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir., Fabaceae (Jurema-preta) e *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis., Fabaceae (Catingueira); com cinco mudas de cada por parcela. As sementes para produção das foram previamente escarificadas para superação da dormência, de acordo com a especificação de cada espécie (Meiado et al. 2012). Cada muda recebeu uma identificação numerada com plaquetas de alumínio para acompanhamento das demais análises. No transplântio também foi aferido o diâmetro ao nível do solo (DNS). O incremento em DNS foi avaliado dois anos após a implantação com valor calculado através da diferença entre o final e o inicial.



**Figura 3.2** Delineamento experimental da parcela onde foi implantado o plantio de mudas e a semeadura direta de espécies arbóreas como técnica de restauração de áreas degradadas na Caatinga, no município de Petrolina, PE.

### ***Semeadura direta***

A semeadura direta foi realizada com as mesmas três espécies citadas anteriormente e com o mesmo espaçamento utilizado no plantio das mudas, totalizando 15 pontos de plantio (Figura 3.2). Assim como para produção das mudas, as sementes também passaram pela superação de dormência. Para tal, três sementes de cada espécie foram alocadas por ponto. Cada ponto de semeio recebeu identificação específica para futuras análises. Na avaliação, foi considerada a emergência do ponto semeado, independente do número de sementes que emergiram. A porcentagem de indivíduos emergidos deu-se pela quantidade total de plântulas observadas por ponto. Bem como, não foi realizado nenhum tipo de desbaste posterior.

### **Parâmetros de avaliação das arbóreas**

#### ***Análise de sobrevivência e emergência***

No primeiro semestre, acompanhou-se a taxa de sobrevivência das mudas e emergência e sobrevivência das sementes emergentes a cada 20 dias, depois

trimestralmente, semestralmente e anualmente. A última análise foi realizada dois anos após a introdução das espécies arbóreas.

### ***Análises estatísticas***

Os parâmetros de sobrevivência e de emergência ao longo do tempo foram analisados através de Modelos Lineares Generalizado, com três fatores (Tipo de transposição; Espécie e Tempo). A análise final, referente ao último tempo avaliado, de sobrevivência, crescimento das mudas e a porcentagem final de indivíduos por semeio foi realizado com dois fatores (Tipo de transposição e Espécie). Para a comparação da sobrevivência entre o plantio de mudas e a semeadura direta foi realizada, para cada espécie, uma análise de dois fatores (Tipo de introdução da Arbórea e Tipo de transposição).

Inicialmente, a normalidade dos resíduos de todos os dados foi verificada através do teste Shapiro-Wilk. As diferenças entre as médias finais foram analisadas pelo teste à posteriori de Duncan. Todas as análises estatísticas foram realizadas no software R (R Development Core Team 2013) com  $\alpha = 5\%$ .

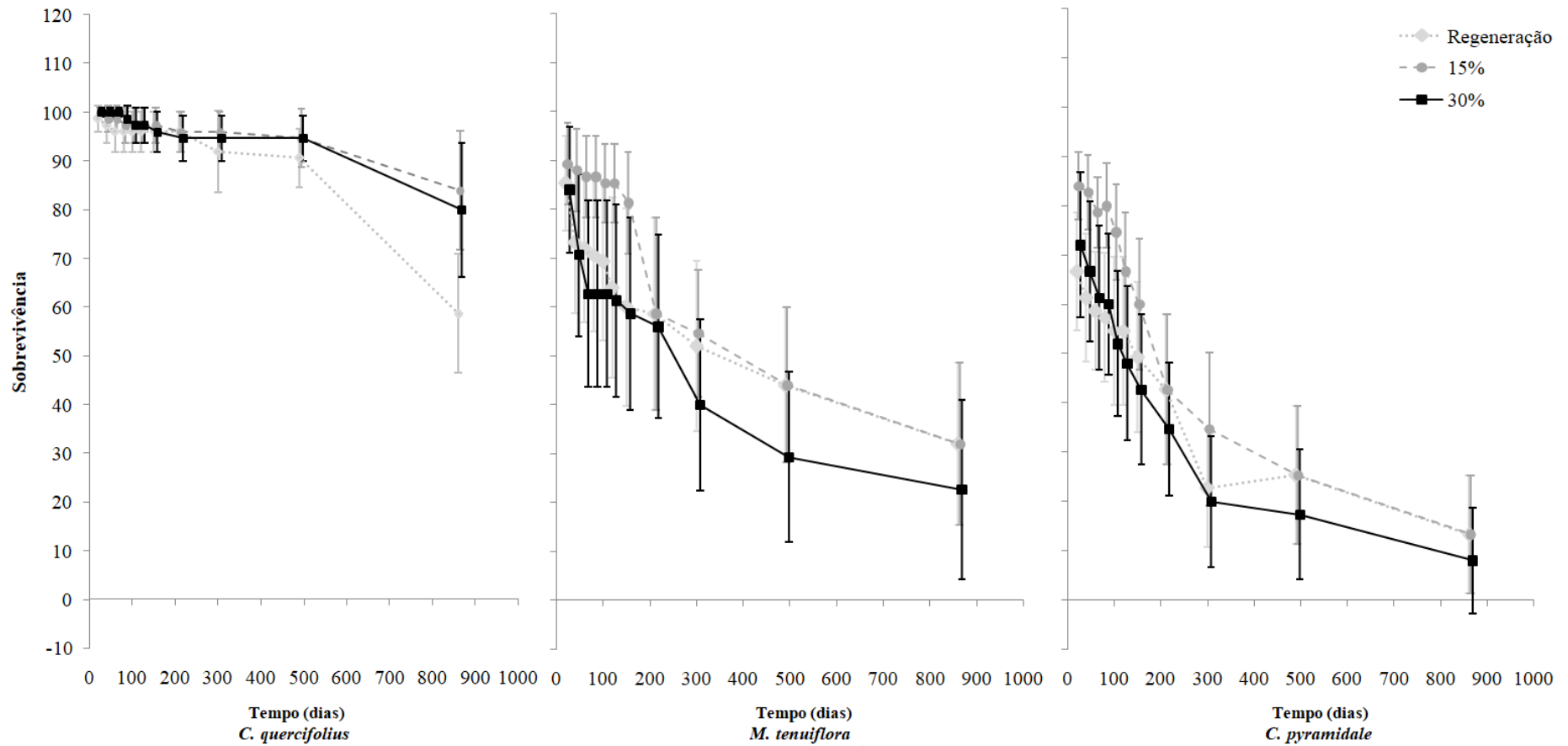
## **Resultados**

### ***Plantio das mudas***

As mudas de todas as espécies avaliadas têm resultados similares quanto à atuação do condicionamento na sobrevivência, com redução da sobrevivência ao longo do tempo (Figura 3.3). Os melhores resultados foram encontrados para *C. quercifolius* que teve alta sobrevivência após dois anos, de mais de 80% nas áreas condicionadas.

Na figura 3.3 também é possível identificar como a *C. quercifolius* manteve alta sobrevivência de indivíduos durante toda amostragem, independente do tratamento de transposição implantado. Para *M. tenuiflora* e *C. pyramidale*, a redução da sobrevivência foi mais aparente e já foi verificada desde as primeiras análises.

Para análise dos fatores foi visto que todos os fatores avaliados tiveram diferenças significativas (Tabela 3.1). Na interação entre a transposição e o tempo, foi possível verificar que os resultados da sobrevivência independem do tratamento de transposição implantado. A diferença é realmente observada entre a sobrevivência das espécies que variam entre si e ao decorrer do tempo.



**Figura 3.3** Sobrevivência (%) de mudas de *C. quercifolius*, *M. tenuiflora* e *C. pyramidale*, sob tratamentos de transposição de solo em restauração de área degradada da Caatinga, Petrolina, PE. \*

\*A diferença significativa entre os tratamentos foi determinada através dos intervalos de confiança plotados nos gráficos.



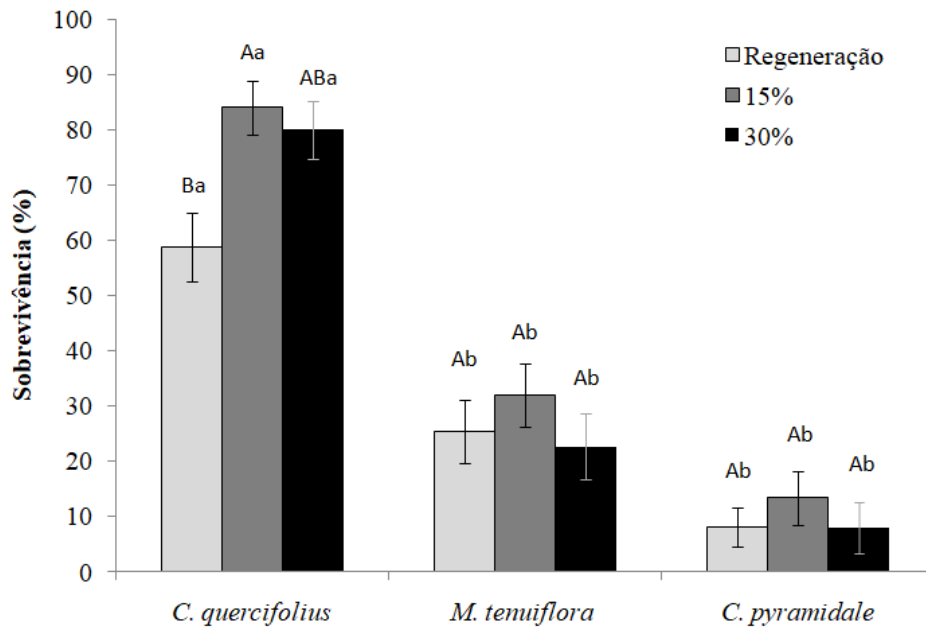
**Tabela 3.1** Análise de variância da sobrevivência de mudas de *C. quercifolius*, *M. tenuiflora* e *C. pyramidale*, sob tratamentos de transposição de solo em restauração de área degradada da Caatinga, Petrolina, PE.

	Sobrevivência (mudas)		
	DF	F	p
<b>Transposição</b>	1482	21,7	<0,0001*
<b>Espécies</b>	1480	288,92	<0,0001*
<b>Tempo</b>	1470	38,08	<0,0001*
<b>Transposição:Espécies</b>	1466	7,56	<0,0001*
<b>Transposição:Tempo</b>	1446	0,29	0,99
<b>Espécies:Tempo</b>	1426	12,43	<0,0001*
<b>Transposição:Espécie:Tempo</b>	1386	0,24	1

\*Significativo à 5%.

As análises finais, após dois anos de introdução das mudas, demonstram como a *C. quercifolius* foi influenciada em longo prazo pelo condicionamento do solo (Figura 3.4). Após passar pelo segundo período de seca, a espécie teve uma queda na sobrevivência, mantendo os valores mais elevados nos tratamentos com transposição do solo.

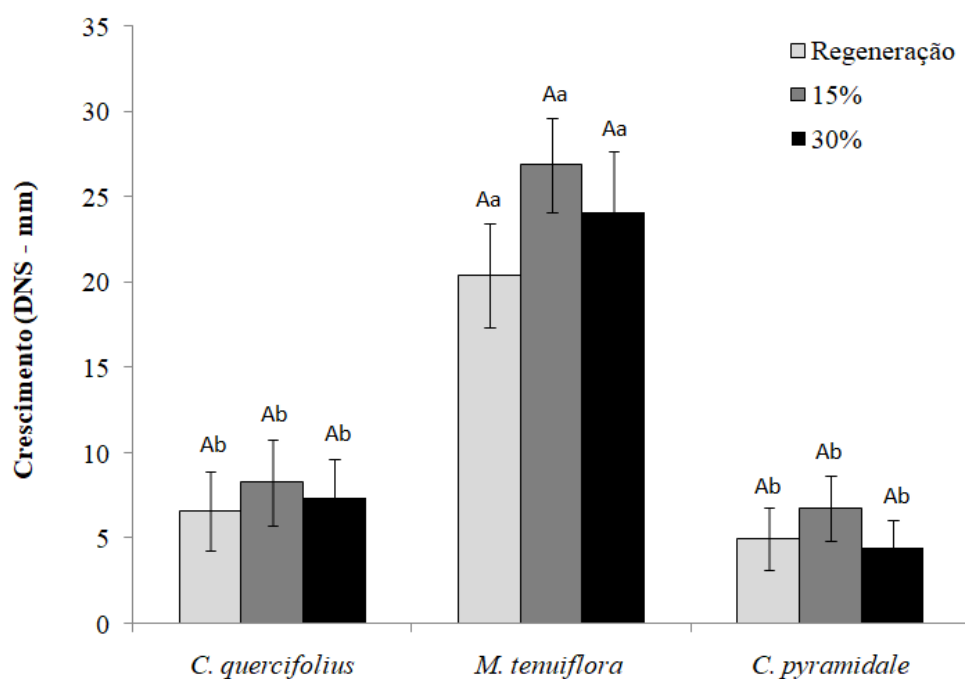
O ponto que resulta a diferença significativa entre os tratamentos de transposição é exatamente o último, onde houve diferença estatística entre o tratamento de 15% de cobertura (com média de  $84 \pm 5\%$ ) com as áreas de condução da regeneração natural ( $58 \pm 38\%$ ). A *M. tenuiflora* apresentou média final de  $26,7 \pm 5,8\%$  e a *C. pyramidale* de  $9,7 \pm 19\%$ , ambos sem diferença entre os tratamentos de transposição, sendo iguais estatisticamente e diferenciando da *C. quercifolius*.



**Figura 3.4** Sobrevivência de mudas de *C. quercifolius*, *M. tenuiflora* e *C. pyramidale*, após dois anos sob tratamentos de transposição de solo em restauração de área degradada da Caatinga, Petrolina, PE. \*

\* Médias seguidas pela mesma letra maiúscula correspondem à igualdade significativa (5%) entre os tratamentos de transposição para cada espécie, e as minúsculas correspondem à igualdade significativa entre as espécies para cada tratamento de transposição. As barras representam o erro padrão.

O crescimento das mudas variou pelas espécies e *M. tenuiflora* teve maior crescimento em campo ao longo dos dois anos com média de  $23,75 \pm 9,7$  cm (Figura 3.5). Assim como a sobrevivência, de forma geral, o crescimento das mudas não foi influenciado pelos tratamentos de transposição aplicados (Tabela 3.2), havendo diferença apenas em relação às espécies.



**Figura 3.5** Incremento em DNS (diâmetro no nível do solo) de *C. quercifolius*, *M. tenuiflora* e *C. pyramidale*, após dois anos sob tratamentos de transposição de solo em restauração de área degradada da Caatinga, Petrolina, PE. \*

\* Médias seguidas pela mesma letra maiúscula correspondem à igualdade significativa (5%) entre os tratamentos de transposição para cada espécie, e as minúsculas correspondem à igualdade significativa entre as espécies para cada tratamento de transposição. As barras representam o erro padrão.

**Tabela 3.2** Análise de variância do crescimento em DNS (diâmetro no nível do solo) de *C. quercifolius*, *M. tenuiflora* e *C. pyramidale*, sob tratamentos de transposição de solo em restauração de área degradada da Caatinga, Petrolina, PE.

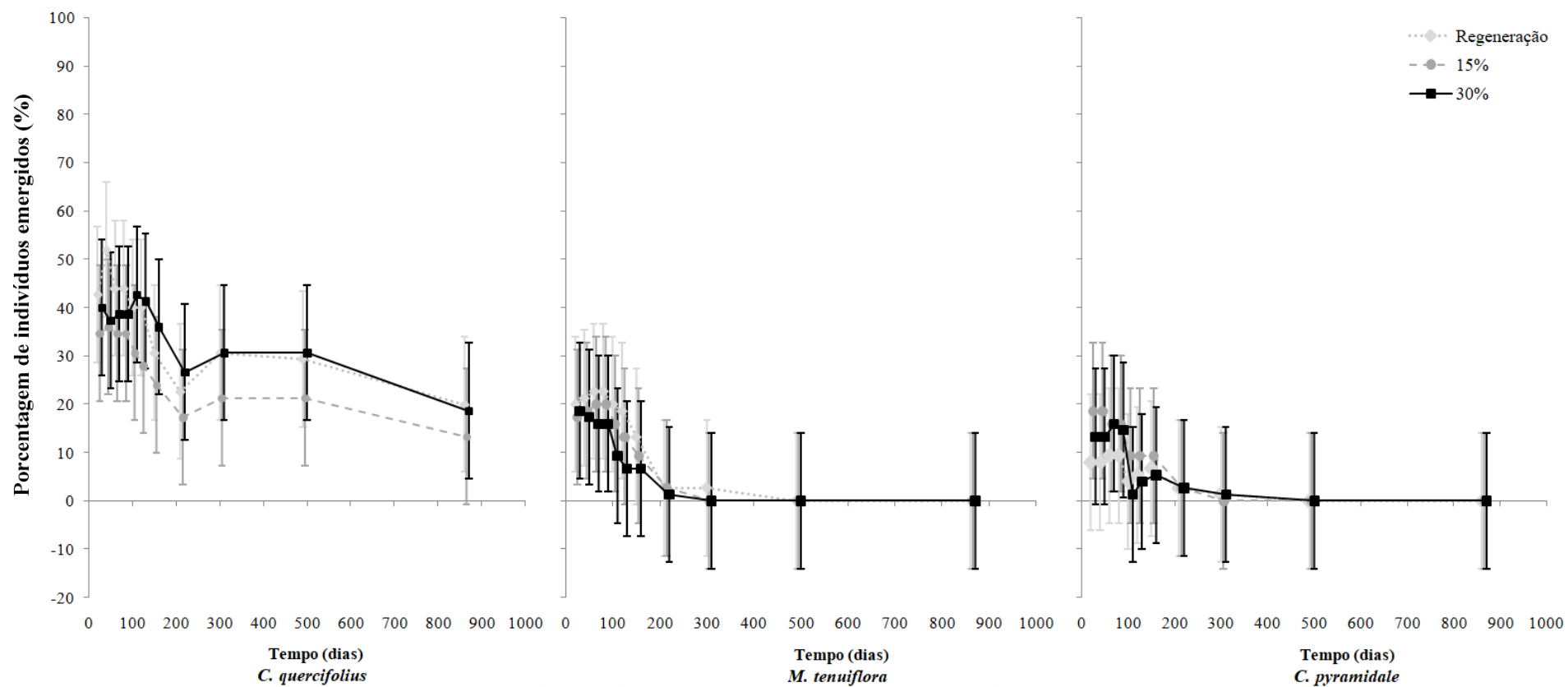
	Crescimento - DNS (mudas)		
	DF	F	p
<b>Transposição</b>	219	2,72	0,07
<b>Espécies</b>	217	106,75	<0,0001*
<b>Transposição:Espécies</b>	213	0,13	0,97

\*Significativo à 5%.

### ***Semeadura direta***

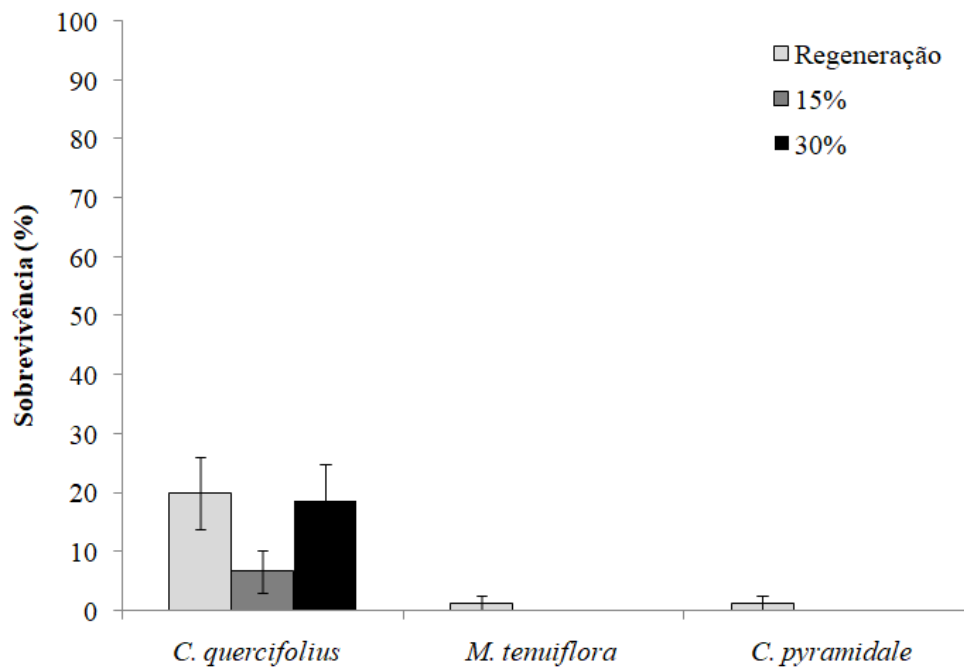
Nas primeiras avaliações (Figura 3.6), foi possível observar emergência da *C. quercifolius* com média de  $42,7 \pm 32,8$  % aos 20 dias. As máximas da *M. tenuiflora* foram de  $22,6 \pm 24,9$  % aos 60 dias e da *C. pyramidale* de  $18,7 \pm 23,5$  % aos 20 dias. Após esta emergência, houve redução na porcentagem de plântulas emergidas em relação ao semeio inicial. Em todas as análises a respeito das espécies semeadas não houve diferença de emergência proporcionada pelos tratamentos de transposição. A diferença foi entre as espécies e os tempos avaliados e sua interação (Tabela 3).

Para análises finais (Figura 3.7), verificou-se a perda da densidade de semeio implantada, com  $15,1 \pm 21$ % de indivíduos restantes para *C. quercifolius*,  $0,4 \pm 1,72$ %, para *M. tenuiflora* e  $0,4 \pm 1,72$ %, para *C. pyramidale*, todos independentes da transposição de solo implantada. Também não houve diferença significativa entre as espécies.



**Figura 3.6** Porcentagem de indivíduos emergidos de *C. quercifolius*, *M. tenuiflora* e *C. pyramidale*, semeadas sob tratamentos de transposição de solo em restauração de área degradada da Caatinga, Petrolina, PE. \*

\*A diferença significativa entre os tratamentos foi determinada através dos intervalos de confiança plotados nos gráficos.



**Figura 3.7** Sobrevivência de *C. quercifolius*, *M. tenuiflora* e *C. pyramidale*, após dois anos semeadas sob tratamentos de transposição de solo em restauração de área degradada da Caatinga, Petrolina, PE. \*

\* As barras representam o erro padrão.

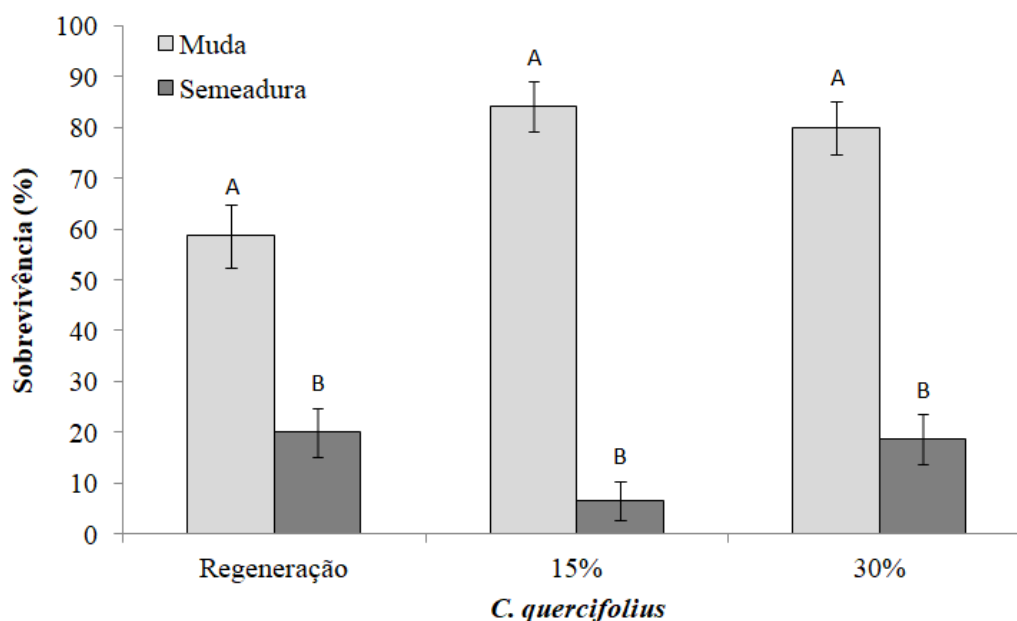
**Tabela 3.3** Análise de variância da Porcentagem de indivíduos emergidos de *C. quercifolius*, *M. tenuiflora* e *C. pyramidale*, após dois anos semeadas sob tratamentos de transposição de solo em restauração de área degradada da Caatinga, Petrolina, PE.

	Porcentagem de indivíduos emergidos (semeadura)		
	DF	F	p
<b>Transposição</b>	1482	0,83	0,44
<b>Espécies</b>	1480	177,63	<0,0001*
<b>Tempo</b>	1470	18,16	<0,0001*
<b>Transposição:Espécies</b>	1466	9,74	<0,0001*
<b>Transposição:Tempo</b>	1446	0,65	0,87
<b>Espécies:Tempo</b>	1426	5,9	<0,0001*
<b>Transposição:Espécie:Tempo</b>	1386	0,69	0,93

\*Significativo à 5%.

### ***Plantio de Mudras e Semeadura direta***

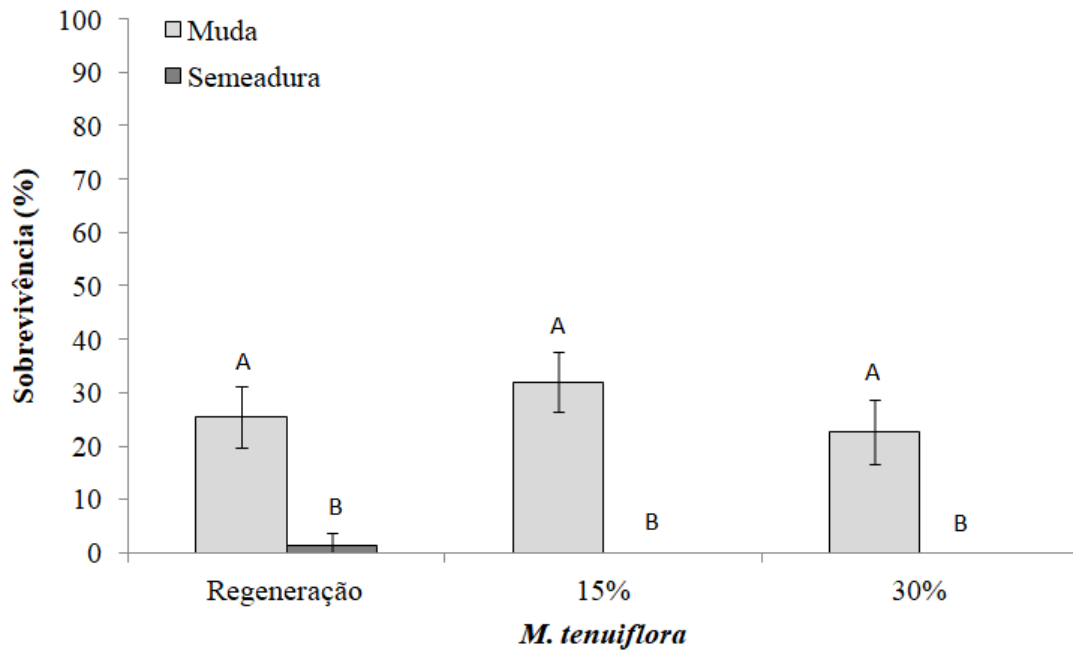
Foi observado que, para todas as espécies, a sobrevivência é maior quando as arbóreas são adicionadas na forma de mudras independente do tratamento de transposição de solo implantado (Figura 3.8 e Figura 3.9). Os valores mais elevados entre as espécies, para muda e semeadura foram de *C. quercifolius*.



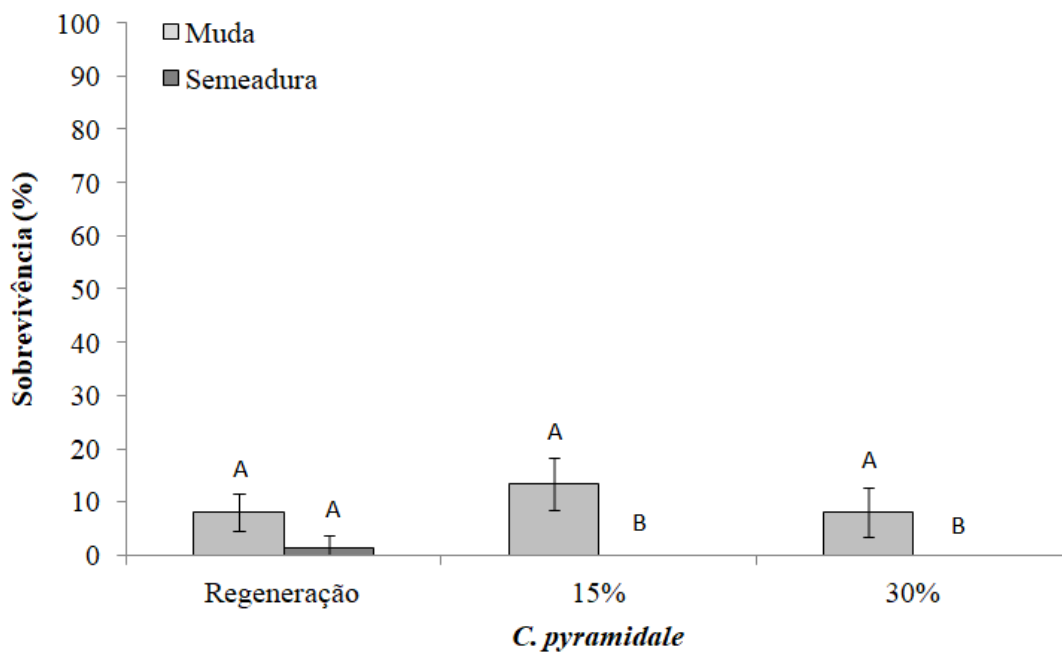
**Figura 3.8** Plantio de mudras e semeadura direta de *C. quercifolius*, após dois anos sob tratamentos de transposição de solo em restauração de área degradada da Caatinga, Petrolina, PE. \*

\* Médias seguidas pela mesma letra correspondem à igualdade significativa (5%) entre mudras e semeadura direta, em cada tratamento de transposição. As barras representam o erro padrão.

Apenas a *C. pyramidale* teve igualdade significativa nas análises finais entre mudras ou semeadura para o tratamento de condução da regeneração natural, mas com valores insatisfatórios de resposta para ambos (Figura 3.10).



**Figura 3.9** Plantio de mudas e sementeira direta de *M. tenuiflora*, após dois anos sob tratamentos de transposição de solo em restauração de área degradada da Caatinga, Petrolina, PE. \*



**Figura 3.10** Plantio de mudas e sementeira direta de *C. pyramidale*, após dois anos sob tratamentos de transposição de solo em restauração de área degradada da Caatinga, Petrolina, PE. \*

\* Médias seguidas pela mesma letra correspondem à igualdade significativa (5%) entre mudas e sementeira direta, em cada tratamento de transposição. As barras representam o erro padrão.



Na análise comparativa entre a sobrevivência das espécies implantadas por mudas ou por semeio, observou-se que a diferença está, principalmente, entre a forma como a arbórea foi introduzida, bem como a variação da resposta depende da espécie observada (Tabela 3.4), sem interferência significativa em decorrência da transposição de solo.

**Tabela 3.4** Análise de variância da sobrevivência *C. quercifolius*, *M. tenuiflora* e *C. pyramidale*, em relação a forma de introdução (Mudas ou Semeadura) e aos tratamentos de transposição de solo em restauração de área degradada da Caatinga, no município de Petrolina, PE.

	Sobrevivência (%)		
	DF	F	p
<b>Transposição</b>	267	0,98	0,33
<b>Arbórea</b>	266	142,3	<0,0001*
<b>Espécies</b>	264	81,37	<0,0001*
<b>Transposição:Arbórea</b>	262	1,85	0,16
<b>Transposição:Espécies</b>	258	0,46	0,77
<b>Arbórea:Espécies</b>	256	7,82	<0,0001*
<b>Transposição:Arbórea:Espécie</b>	252	0,67	0,61

\*Significativo à 5%.

## Discussão

### *Plantio das mudas*

As análises que demonstram a diferença significativa entre os tratamentos de transposição corroboram com as alterações que a transposição de solo pode ter causado nas características locais, melhorando o desempenho das mudas de *C. quercifolius*. O crescimento da vegetação formando cobertura do solo favorece aumento da retenção de água, redução da temperatura do solo, além do aporte de matéria orgânica e nutrientes (Rodrigues et al. 2010; Peichl et al. 2012). A análise prévia da necessidade de aplicação de algum condicionador do solo deve ser avaliada caso a caso e dependerá do balanço entre o custo e o benefício para aplicação.

A sobrevivência variada da *M. tenuiflora*, a depender das condições locais, também foi observada por Socolowski et al. (2021), quando as mudas foram

adicionadas em núcleos de restauração sem e com a presença de água acumulada naturalmente, com aumento valor de 52% e 100%, respectivamente. A baixa resposta da espécie *C. pyramidale* à introdução por mudas corrobora com as desvantagens relacionadas ao plantio de mudas na Caatinga e ressalta a necessidade de adequação das técnicas por conta da possibilidade de alta mortalidade das mudas em campo (Lima et al. 2015). As características locais de alta evaporação, chuvas escassas e irregulares e áreas com alto grau de degradação (Siqueira Filho et al. 2012) são algumas das possíveis causas da mortalidade.

Os baixos valores de sobrevivência nesses casos de programas de restauração são normalmente calculados e reorganizados no planejamento, havendo a necessidade de adição de mudas e transplântio, após um período. Porém, essas variações são inevitáveis, pois dependem do regime de chuvas de cada ano, que pode mudar bruscamente, como aconteceu em Petrolina, PE que, em 2019, teve em total de 219 mm e em 2021 mais que dobrou, para 520 mm (Labmet 2022).

Outro fator que influencia essa diferença de resposta da sobrevivência nos estudos é a forma de produção das mudas, do substrato utilizado, ao recipiente, à irrigação, ao sombreamento e à rustificação realizada. Para Caatinga, grande parte dos estudos está voltada a identificação ideal desses fatores para cada espécie, principalmente em viveiro, visando o desenvolvimento de mudas mais saudáveis e resistentes (Benedito et al. 2012; Brito et al. 2018). Ressalta-se, porém, a necessidade de verificação dos resultados em campo e da avaliação posterior da real influência das mudas para o entorno da área restaurada.

Em relação ao crescimento em DNS, a obtenção de árvores com alto crescimento em curto prazo é essencial no início das sucessões ecológicas, pois permite a melhoria das condições locais de solo, sombreamento, disponibilidade de abrigo e alimentação para dispersores. A *M. tenuiflora* já é utilizada nos programas de restauração com êxito de sobrevivência e crescimento (Mello 2016). A espécie é considerada de caráter oportunista com fácil adaptação a ambientes inóspitos e antropizados (Camargo-Ricalde 2000). É comprovado que a *M. tenuiflora*, na Caatinga, funciona como facilitadora, favorecendo a regeneração natural sob o seu dossel (Paterno et al. 2016). Além disso, ela fornece serviços ecossistêmicos, como o sequestro de carbono, comprovado por Medeiros (2022), que mostrou que quase 90% do estoque de carbono acumulado em uma área de restauração por mudas foi em decorrência da espécie. Tem utilização biocultural pela comunidade através da lenha e produção de

carvão (Oliveira et al. 2006) e na alimentação animal (Cordão 2011). Além do favorecimento na polinização do ecossistema, pela alta produção de flores ao longo do ano, inclusive no período de seca (Maia 2004).

### ***Semeadura direta***

A baixa emergência das espécies arbóreas semeadas pode ser explicada pelas condições locais. No campo as sementes estão mais sujeitas às condições estressantes do que nos viveiros de produção de mudas (Brançalion et al. 2015). A evaporação ocorre inicialmente nas camadas mais superficiais de solo, reduzindo rapidamente a disponibilidade de água para as sementes e plântulas ali presentes, principalmente em solo tão arenosos (Novais et al. 2007), como o da área de estudo. Santos et al. (2009) afirmam que as plântulas são afetadas de maneira mais severa pela escassez de água do que outros estágios de vida.

Solos compactados e sem cobertura vegetal contribuem para esse fato, aumentando temperatura do solo e reduzindo retenção de umidade. A reversão desses fatores pode ser feita com adição de herbáceas leguminosas, como comprovado por Teodoro et al. (2011) que realizaram semeadura dessas espécies em área abandonada de Caatinga e obtiveram os resultados desejados. Porém, como visto no presente estudo, a resposta para semeadura direta na Caatinga varia e pode ser insatisfatória. Sales (2008) em estudo para melhoria do solo à semeadura da *M. tenuiflora* também não obteve sucesso, com baixa emergência inicial seguida de morte das plântulas. Além disso, áreas degradadas estão com desequilíbrio ecológico e por haver predominância de organismos que afetam diretamente as plântulas, que são mais susceptíveis que as mudas, como formigas cortadeiras, herbívoros e/ou doenças (Santos Junior 2004; Knoechelmann 2019).

Apesar de ser considerada uma técnica de baixo custo quando comparada ao plantio de mudas, a redução do número de indivíduos ao longo do tempo pode ser compensada pelo aumento no número de sementes utilizadas. A conta deve ser realizada a partir da emergência das espécies em campo em comparação com o número final de indivíduos desejados por área. É comum, na técnica de semeadura, utilizar certa quantidade de sementes a mais do que seria utilizado para produção das mudas. Porém, esse fato é um gargalo para recuperação de áreas degradadas, pela necessidade de um esforço de coleta e redes de sementes em grande escala, o que atualmente é raro para Caatinga. Uma das redes que funciona é a Rede de Sementes do Projeto de Integração

do Rio São Francisco, pelo Núcleo de Ecologia e Monitoramento Ambiental (NEMA), que foi criada em 2015 a partir da necessidade de distribuição das sementes excedentes provenientes do resgate de germoplasma do programa. A rede distribui sementes para produtores, viveristas e pesquisas científicas na Caatinga.

Nesse sentido, Santo et al. (2010) estimulam a criação de políticas públicas que fomentem a coleta sustentável e a sua comercialização pelos agricultores, aumentando a cadeia produtiva que pode subsidiar os programas na restauração na Caatinga. Porém, ressalta-se que o uso da técnica depende do local a ser aplicado e que áreas com solos muito degradados, como a área desse estudo, não devem ser consideradas para aplicação.

Além disso, a coleta das sementes também é variada de acordo com a espécie e dependem de fatores como fenologia, quantidade de frutos e produção de sementes, vigor e facilidade de encontrar populações. Algumas espécies, como a própria *C. quercifolius*, têm coleta dificultada, por ser uma planta urticante, ter maturação heterogênea, com baixa produção de frutos e sementes que ainda tem explosão deiscente (Aloufa & Medeiros 2016), quando comparada, por exemplo, com a *M. tenuiflora*.

### ***Plantio de Mudanças e Semeadura direta***

A comparação entre a introdução de espécies arbóreas por meio de mudas ou semeadura direta comprovou que o plantio de mudas possui maior viabilidade de ser utilizado em programas de restauração em áreas degradadas como desse estudo. O fato se deve as mudas estarem em um estágio mais avançado de crescimento e permitir maior facilidade de adaptação e de superar intempéries, como herbivoria, estresse térmico e hídrico. Os resultados corroboram com a maioria dos estudos ser sobre plantio de mudas como técnica de restauração para Caatinga (Guerra et al. 2020), em comparação com resultados insatisfatórios de emergência de semeio, com baixa sobrevivência das plântulas (Sales 2008; Bakke et al. 2017).

É importante destacar que após dois anos, a *C. quercifolius* apresentou alto valor de sobrevivência em campo quando colocada na forma de muda e os melhores resultados em relação à semeadura, o que evidencia a sua utilização em programas de restauração. Como a *M. tenuiflora*, a *C. quercifolius* também é considerada uma espécie facilitadora, definida até como espécie chave para a Caatinga por Medeiros (2018) em estudo sobre sua atuação na manutenção das espécies vegetais sob seu dossel e da fauna

silvestre. Além disso, também fornece serviços ecossistêmicos, como alimentação humana e de animais, uso medicinal, madeireiro e para produção de energia (Aloufa & Medeiros 2016).

### **Considerações finais**

A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que o condicionamento do solo a partir da transposição pode melhorar as condições locais para a sobrevivência de mudas de *C. quercifolius*, apesar dos resultados serem positivos mesmo sem o condicionamento. O mesmo resultado não foi observado para *M. tenuiflora* e *C. pyramidale*. A introdução de espécies arbóreas nas condições do estudo é mais adequada na forma de mudas, com baixa sobrevivência das espécies emergidas por semeadura direta. Indica-se, assim, a utilização de mudas de *C. quercifolius* e *M. tenuiflora* em programas de restauração de áreas degradadas na Caatinga em condições de solos degradados que serviram como áreas de empréstimo, sem a presença das camadas iniciais. O replantio de mudas de *M. tenuiflora* pode ser necessário e deve ser contabilizado no planejamento do programa de restauração. A necessidade de condicionamento precisa ser avaliada caso a caso e os custos devem ser contabilizados.

## Capítulo 4

### **Avaliação de técnicas de restauração em área que serviu de empréstimo de solo na Caatinga**

Raphaela Aguiar de Castro<sup>1,2</sup>; Patrícia Daniele de Souza<sup>3</sup>; Leticia de Brito Rodrigues<sup>3</sup>; Renato Garcia Rodrigues<sup>3</sup> & Marcos Vinicius Meiado<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil.

<sup>2</sup> Laboratório de Fisiologia de Sementes, Departamento de Biociências, Universidade Federal de Sergipe, Itabaiana, Sergipe, Brasil.

<sup>3</sup> Núcleo de Ecologia e Monitoramento Ambiental, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Ciências Agrárias, Petrolina, Pernambuco, Brasil

### **Implicações práticas**

- Determinar metodologias alternativas de restauração na Caatinga com união de técnicas, que possibilite atuação em diferentes fatores para sucessão;
- Indicar as consequências favoráveis a sucessão por diferentes parâmetros de avaliação para favorecer a criação de protocolos de restauração na Caatinga;
- Identificar que quanto maior a intervenção ativa realizada, como fazer transposição de solo com plantio de mudas, melhores e mais rápidos os resultados esperados.

### **Resumo**

A importância de protocolos de restauração para áreas degradadas na Caatinga com técnicas viáveis que atuem em diferentes situações torna necessário o desenvolvimento e aplicações de metodologias ativas em campo. Em decorrência das diversas causas de degradação e consequências às áreas degradadas pode ser necessário a atuação de diferentes técnicas em conjunto, visando agilizar e incrementar o sucesso da restauração. Para isso, este capítulo teve como objetivo avaliar a atuação de técnicas e união de técnicas aos parâmetros estruturais e composição florística dos regenerantes de uma área de solo degradado. Para isso, em área sem regeneração e com solo exposto a mais de 18 anos, foram realizadas: T1) Condução da regeneração natural; T2) Condução da regeneração natural com plantio de mudas; T2) Transposição de solo; T3) Transposição de solo com plantio de mudas. Os tratamentos foram conduzidos em 15 repetições. Após três anos, foi visualizado que para riqueza (média de  $12,14 \pm 3,77$  espécies), densidade (média de  $510,3 \pm 222,9$  indivíduos/m<sup>2</sup>) e cobertura (média de  $90,26 \pm 9,19$  %) não houve diferença entre os tratamentos. A colonização está sendo realizada majoritariamente por espécies herbáceas, nativas e anemocóricas. Bem como, arbustivas e arbóreas similares as áreas de referência positiva. As mudas plantadas que sobreviveram também não foram suficientes para contribuir no advento de novas espécies. Porém, o crescimento lento das arbóreas em campo pode gerar contribuições apenas em longo prazo. Portanto, as intervenções realizadas melhoraram os parâmetros gerais e os resultados mais expressivos foram observados nos tratamentos com maior intervenção. Porém, a falta de efetividade de alguns tratamentos não proporcionou a diferença esperada entre eles. Ainda, três anos de avaliação de área em restauração com união de técnicas podem não ser suficientes para demonstrar diferenças significativas entre os tratamentos.

**Palavras-chave:** RAD; Plantio de mudas; Transposição de solo.

### **Abstract**

The importance of restoration protocols for degraded areas in the Caatinga with viable techniques that work in different situations makes necessary to develop and apply active methodologies on the field. As a result of the different degradation causes and consequences for the degraded areas, it may be necessary to use different techniques together, to speed up and increase the success of the restoration. This chapter aimed to evaluate the techniques performance and union to the structural parameters and floristic composition of an area with degraded soil. The following trail plots were carried out on an area without regeneration and with soil exposed for more than 18 years: T1) Conducting natural regeneration; T2) Conducting natural regeneration by seedlings planting; T2) Transposition of soil; T3) Transposition of soil with planting of seedlings. The treatments were carried out in 15 repetitions. After three years, it was observed that for richness (average of  $12.14 \pm 3.77$  species), density (average of  $510.3 \pm 222.9$  individuals/m<sup>2</sup>), and coverage (average of  $90.26 \pm 9.19$  %) there was no difference between treatments. Colonization is being carried out mainly by herbaceous, native, and anemochoric species. As well as shrubs and trees similar to positive reference areas. The planted seedlings not enough to contribute to the advent of new species. However, the slow growth of trees on the field can only generate contributions in the long term. Therefore, the interventions performed improved the general parameters and the most expressive results were observed in the treatments with higher intervention. However, the lack of effectiveness of some treatments did not provide the expected difference between them. Still, three years of evaluation of the area under restoration with the union of techniques may not be enough to demonstrate significant differences between treatments.

**Keywords:** RAD; Seedlings planting; Transposition of soil.



## **Introdução**

A revisão das técnicas de restauração desenvolvidas dentro do território brasileiro determina que a Caatinga está entre os biomas menos estudados (4% das publicações), perdendo apenas para o Pampa (1%) (Guerra et al. 2020). Os estudos também se concentram na produção das mudas em ambientes controlados, como viveiros e pequenas áreas experimentais. Esse número teve uma crescente na última década, com aumento de experimentos realizados em campo e aplicações práticas de restauração em larga escala por órgãos públicos e particulares (Socolowski et al. 2021). Além disso, sabe-se de locais em que a restauração está sendo implantada, mas que os dados não se tornam de cunho científico e publicado em revistas e anais, como projetos realizados por organizações não governamentais, como o Instituto Regional da Pequena Agropecuária Apropriada (IRPA), que incluem até sistemas agroflorestais (IRPA 2019).

A crescente necessidade de técnicas bem consolidadas com resultados satisfatórios ressalta que estudos locais devem ser impulsionados. A Caatinga possui diversas fitofisionomias, variações de tipos de solos, de amplitude de precipitação e índices de aridez (Siqueira-Filho et al. 2012; Meiado et al. 2020) que inviabilizam determinar técnicas gerais para o ecossistema. As técnicas utilizadas nos demais biomas brasileiros também não devem ser fielmente replicadas em ambiente semiáridos como a Caatinga, onde as características edafoclimáticas são completamente diferentes. Segundo Gómez-Aparicio (2005), o reflorestamento, em regiões áridas e semiáridas, é frequentemente limitado pelas condições hídricas. Leal et al. (2003) afirmaram que a limitação de água interfere em todo o ciclo de vida da planta e, conseqüentemente, na taxa de reposição do banco de sementes, essenciais para a ocorrência de regeneração natural. O estudo para restauração deve ser realizado caso a caso, avaliando as condições locais e gerando o diagnóstico.

Podem ser analisadas, inicialmente, as motivações para restauração, que pode ser relacionada à legislação, como compensação ambiental, a exemplo de grandes construções, ou adequação legislativa em áreas de reserva legal e áreas de proteção permanente (APPs), em fazendas agropecuárias e unidades de conservação (Sampaio et al. 2021). Bem como, objetivos puramente ecológicos ou em casos de necessidade de obter áreas que possam ter retorno financeiro ao proprietário. Cada objetivo terá regras, prazos e recursos específicos, o que altera efetivamente o planejamento da intervenção.

Ainda no diagnóstico, os fatores de degradação devem ser analisados para inferir as conseqüências geradas e determinar o grau de degradação e o que deve ser

recuperado. Áreas em que o solo foi degradado, perdendo camadas iniciais, banco de sementes, matéria orgânica e fauna a técnica ou as técnicas aplicadas precisam ter como prioridade recuperar o solo (Alves & Souza 2008). Entende-se cada vez mais que não adianta focar em apenas um fator, vê-se a necessidade de atuar em todas as frentes possíveis. Por isso, após toda a análise de diagnóstico, o planejamento é realizado, com a definição da melhor ou melhores técnicas para implantação e a definição do caminho a ser seguido (Sampaio et al. 2021).

A compilação de métodos e a comparação entre eles podem fornecer a base necessária que falta para a aplicação prática, exigida atualmente. Os estudos de Reis et al. (2003) já demonstraram que associar técnicas de nucleação promove a multiplicação e variação de efeitos funcionais, com maior estabilidade da comunidade e melhoramento do seu ritmo sucessional (Boaneres & Azevedo 2014). Em todo caso, para que o processo de restauração seja realizado de forma efetiva, deve haver uma boa relação custo-benefício (Brancalion et al. 2016). Cada técnica terá insumos e necessidade de mão de obra que geram custos distintos.

A condução da regeneração modifica pequenos fatores que interferem diretamente na sucessão natural, seja a retirada de animais de pastoreio, manejo de plantas exóticas invasoras ou fazendo preparo do solo. Todos com objetivo de favorecer a chegada e o estabelecimento de propágulos. Por isso, dependem diretamente do entorno e do grau de perturbação da área. Nesse caso, os custos estão relacionados a cada ação e variam. De acordo com a The Nature Conservancy (TNC 2018) os custos por hectare podem chegar a R\$10.995,00 se houver necessidade de aceiramento, cercamento, manejo de invasoras e de formigas-cortadeiras.

A transposição de solo tem como objetivo melhorar características edafoclimáticas de solo, trazendo banco de sementes, matéria orgânica e organismos para a área degradada (Brancalion et al. 2015). Dessa forma, tem-se aumento da riqueza com espécies da área doadora, aumento da cobertura vegetal e das condições locais, como retenção de umidade e redução da temperatura do solo, além do advento de espécies vegetais que formarão abrigo para atração de fauna (Martins 2014; Brancalion et al. 2015). Ainda, permitirão melhorias para entrada de outras espécies. Os custos da técnica são referentes principalmente ao maquinário necessário para retirada do solo, transporte e alocação na nova área.

A técnica do plantio de mudas é caracterizada pela introdução de espécies específicas, normalmente de arbóreas, com características desejáveis, que irão agilizar a

estruturação do ecossistema, trazendo modificações no microambiente (Rodrigues et al. 2009a; Martins 2014). Os custos e a necessidade de mão de obra e insumos para essa técnica devem considerar desde a coleta das sementes, semeio e produção das mudas no viveiro, transporte ao local e transplante (TNC 2018). Para o plantio total de mudas na Caatinga os gastos podem chegar a R\$ 28.382,00; considerando além do valor da muda, a necessidade de cercamento da área, ao preparo da área, de insumos e de manutenção posterior, como coroamento (TNC 2018). É importante citar que o monitoramento referente à técnica do plantio de mudas não deve ser analisado apenas a mortalidade e crescimento dos indivíduos, como ocorre na maioria dos estudos sobre o assunto, mas em como a introdução da espécie favorece o entorno e a sucessão local. Esse fato, no entanto, leva tempo, considerando as taxas de crescimento das arbóreas na Caatinga.

Além disso, é essencial que todas as técnicas sejam escolhidas, conduzidas e monitoradas por especialistas no assunto. Porém, os trabalhos de monitoramento e definição de sucesso das técnicas são poucos e não se tem protocolos para Caatinga, como tem para o pacto da Mata Atlântica (Mesquita et al. 2013). É importante a análise periódica da formação da estruturação da comunidade na sucessão, com parâmetros de riqueza, densidade e diversidade.

Em curto prazo, através da avaliação da lista florística também pode ser feita uma análise se haverá ausência ou presença de espécies específicas, quais espécies estão dominando, suas origens e hábitos. Por exemplo, algumas espécies são mais favoráveis dentro da comunidade, normalmente pelo seu uso biocultural, e já darão indicativos de que a estrutura da comunidade em formação terá benefícios futuros, como a presença de produtoras de frutas, determinando que aquele ecossistema prestará o serviço de abastecimento de alimentos, e a presença de espécies de madeira dura pode indicar o futuro uso como matéria-prima (fibra, madeira). Além disso, a presença de espécies mais raras dá indicativo da manutenção da diversidade genética (Silva 2016).

A partir da identificação das espécies pode-se determinar também as síndromes de dispersão e polinização que estão ocorrendo nas áreas em restauração. Esses parâmetros podem dar respostas de comportamento da sucessão na área e dos fatores que podem estar afetando o desenvolvimento. Além de visualizar retorno de grupamentos funcionais essenciais. No monitoramento também são determinados a necessidade de ações posteriores como o manejo de exóticas invasoras, coroamento de mudas, replante, cercamento e outros. Essas ações devem ser previstas já no planejamento.

Em decorrência da importância de protocolos de restauração para áreas degradadas na Caatinga com técnicas viáveis, as hipóteses deste trabalho sugerem que i) Quanto maior o nível de intervenção e compilação de técnicas, maior a resposta da área à sucessão, com melhoria dos parâmetros de riqueza, densidade, diversidade e cobertura vegetal; ii) Técnicas distintas proporcionam alterações distintas da composição florística dos regenerantes locais; iii) Quanto maior a intervenção de restauração maior será o surgimento de espécies com diferentes funcionalidades.

Para isso, os objetivos deste capítulo foram: i) Avaliar qual método proporciona maior advento de riqueza, densidade, diversidade e cobertura vegetal da área em restauração; ii) Identificar as espécies que ocorrem na sucessão após a intervenção e suas respectivas funcionalidades.

### ***Áreas de estudo***

As parcelas de estudo estão localizadas no Campus de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), em Petrolina, Pernambuco (Figura 1). O clima predominante é o Tropical Semiárido, com médias anuais de 26 °C de temperatura, com amplitudes que variam de 14 °C a 37 °C, e média de 535,5 mm de precipitação, também variável, como 219 mm em 2019 e 519 mm em 2021 (N = 10 anos) (Embrapa Semiárido 2010; Labmet 2022). As áreas que foram consideradas de referências positivas possuem 4,8 e 4,1 ha e estão localizadas a cerca de 400 e 920 m de distância da área em restauração, respectivamente.

A partir dos dados históricos de imagens disponíveis pelo Google Earth e pesquisas bibliográficas da região, foi observado que a área serviu como empréstimo de solo para construção da estrada que rodeia o Campus da universidade. Essa construção foi iniciada em 2004, com área total de 1ha e retirada de pelo menos 1,5m de profundidade de solo do local. Após esse procedimento, a área foi abandonada e se encontrava há 18 anos sem interferência de restauração e sem observação de regeneração natural.

### ***Delineamento experimental***

Para avaliar o funcionamento das técnicas e compilação de técnicas de restauração na Caatinga foram desenvolvidos quatro tratamentos: i) Condução da regeneração natural; ii) Condução da regeneração com plantio de mudas; iii) Transposição de solo; e iv) Transposição de solo com plantio de mudas. As parcelas

possuíam 8 m (comprimento) x 4 m (largura), formando 32m<sup>2</sup>, que foram analisadas em 15 repetições.

A técnica de condução da regeneração e a implantação do solo transposto foram realizadas em março de 2019, com intuito de favorecer a emergência de herbáceas que promoveriam melhorias das características de solo para posterior adição das espécies arbóreas por plantio de mudas. Para isso, toda a área foi limpa e revolvida, com gradagem de pelo menos 30 cm de profundidade, para descompactação do solo.

Para transposição, o solo foi adicionado por meio de oito faixas de 4 (comprimento) x 0,3 (largura) x 0,05 (altura) m, representando 30% de cobertura total da parcela. As espécies arbóreas, então, foram transplantadas em janeiro de 2020, início da estação chuvosa. Foram utilizadas três espécies arbóreas nativas da Caatinga: Faveleira (*Cnidoscolus quercifolius* Pohl), Jurema-preta [*Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir.] e Catingueira [*Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis.]; com cinco mudas de cada espécie por parcela.

### ***Riqueza, densidade, diversidade e cobertura vegetal***

Para avaliação da riqueza, densidade e diversidade das espécies, foram amostradas em cada parcela quatro subparcelas de 50 x 50 cm, formando de 1 m<sup>2</sup>. A análise das espécies arbustivas-arbóreas foi realizada em toda a dimensão da parcela (32 m<sup>2</sup>), onde foram considerados indivíduos arbustivo-arbóreos aqueles com diâmetro no nível do solo (DNS) igual ou superior a 2 cm. Nos resultados finais de riqueza houve somatório das espécies herbáceas, arbustivas, arbóreas, bem como, a inclusão das mudas transplantadas sobreviventes. Para densidade e diversidade, fez-se cálculo proporcional de área.

A análise da cobertura vegetal foi realizada por meio de fotografia das mesmas subparcelas com adição de mais quatro, formando 2m<sup>2</sup>, a uma altura média de 1,5 m, com auxílio de um gabarito feito de madeira nas dimensões exatas que definiram as margens da subparcela. As fotos foram analisadas no programa IPWIN 32, plotando um GRID com 400 quadrantes para contabilização daqueles que estavam cobertos com espécies vegetais e determinação da porcentagem de cobertura.

### ***Composição florística e fitossociologia***

Para análise da lista florística foi realizado um levantamento nas parcelas de tratamento. Todas as espécies que possuíam material reprodutivo, sendo herbáceas,

arbustivas e arbóreas foram coletadas. O material foi depositado no Herbário do Núcleo de Ecologia e Monitoramento Ambiental da Universidade Federal do Vale do São Francisco (NEMA-UNIVASF), onde foi feita a identificação através de consulta a especialista e comparação com material já coletado na região. Posteriormente, foi feita a categorização das espécies quanto ao hábito, quanto a origem (nativas, exóticas e exóticas invasoras) e quanto ao tipo de dispersão, visando inferir no incremento de grupamentos funcionais importantes ao processo de regeneração natural. Essas informações foram retiradas da Flora e Funga do Brasil (2020) e da literatura.

Além disso, através da identificação das espécies e da abundância também foi realizada a análise de similaridade (ANOSIM) entre os tratamentos e Escalonamento multidimensional não paramétrico (NMDS), para informação de quão distante cada tratamento está dos outros em relação à composição de espécies. Para as análises fitossociológicas as inclusões das arbustivas e arbóreas também foram feitas com cálculo proporcional de área. Os parâmetros calculados foram: Frequência relativa (FR) e Densidade relativa (DR) (Mueller-Dombois e Elleberg 1974). Além do valor de importância (VI), somando-se a densidade relativa e a frequência relativa de cada espécie, como proposto por Fabricante et al. (2016).

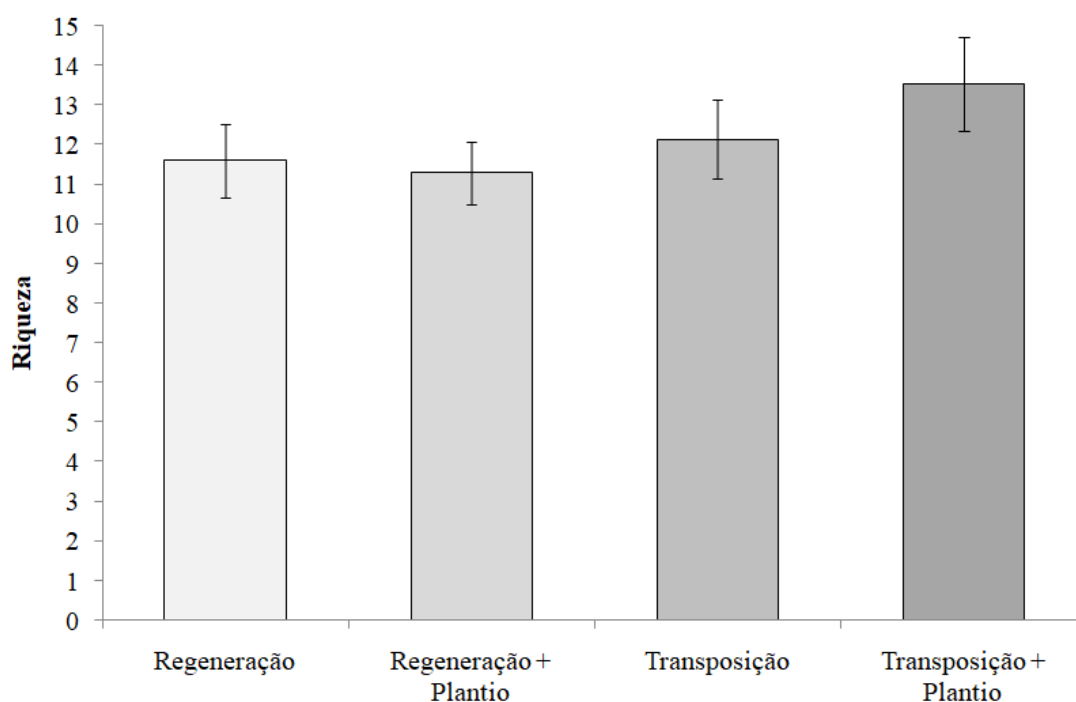
### ***Análises estatísticas***

As premissas de análise dos dados, como homocedasticidade, normalidade, independência e esfericidade foram calculadas anteriormente à análise de variância (Gomes 1990). As análises de riqueza, densidade, diversidade e cobertura vegetal foram realizadas pelo procedimento GLM da ANOVA (Rocha & Júnior 2018), com posterior teste Duncan. Todas as análises estatísticas foram realizadas nos programas STATISTICA 13, com  $\alpha = 5\%$  (StatSoft 2012) e no software R (R Development Core Team 2013).

## **Resultados**

### ***Riqueza, densidade, diversidade e cobertura vegetal***

A riqueza média observada nos tratamentos após três anos de condução do experimento foi de  $12,14 \pm 3,77$  espécies, não sendo observada diferença entre os tratamentos (Figura 4.1 e Tabela 4.1).



**Figura 4.1** Avaliação de riqueza dos tratamentos de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE.

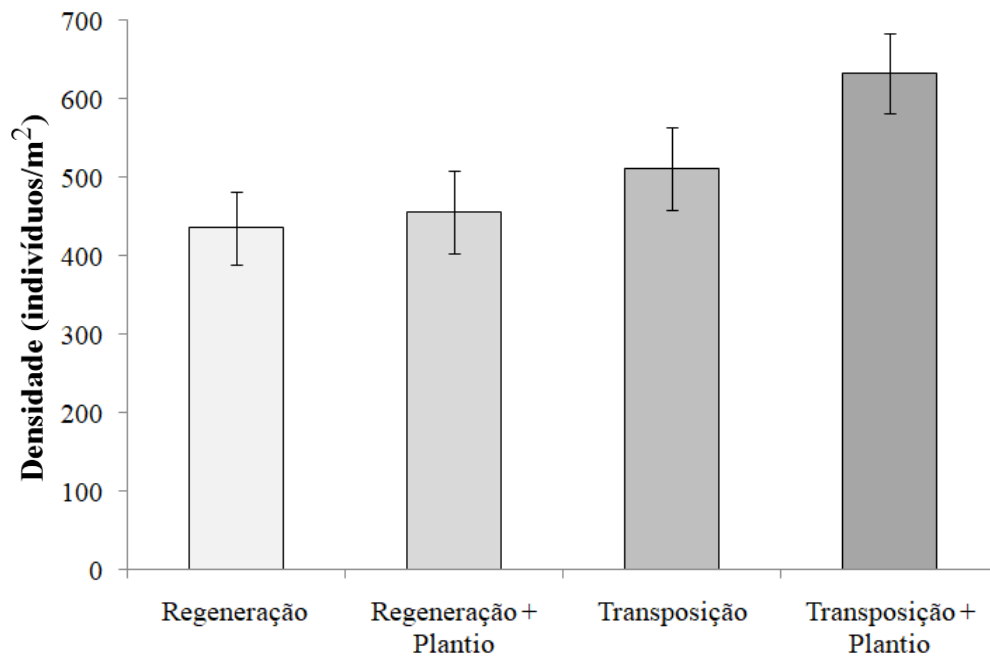
**Tabela 4.1** Resultados da ANOVA (GLM) para os parâmetros de riqueza, densidade, diversidade e cobertura do solo em tratamentos de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE.

	Densidade						Cobertura					
	Riqueza			(indivíduos/m <sup>2</sup> )			Diversidade					
	DF	F	p	DF	F	p	DF	F	p	DF	F	p
<b>Tratamentos</b>	54	0,99	0,4	52	2,51	0,06	52	4,11	0,01	55	2,2	0,09

A avaliação relacionada à densidade também não mostrou diferença do número de indivíduos entre os tratamentos (Tabela 4.1), com média final de  $510,3 \pm 222,9$  indivíduos/m<sup>2</sup>. Porém, as parcelas de transposição com plantio de mudas apresentaram os maiores valores ( $632,7 \pm 196$  indivíduos/m<sup>2</sup>) e as parcelas apenas com condução da regeneração os menores ( $435,4 \pm 177,7$  indivíduos/m<sup>2</sup>) (Figura 4.2).

Para avaliação do parâmetro de diversidade (Simpson) os valores entre os tratamentos foram distintos (Tabela 4.1). Apenas o tratamento de transposição (média

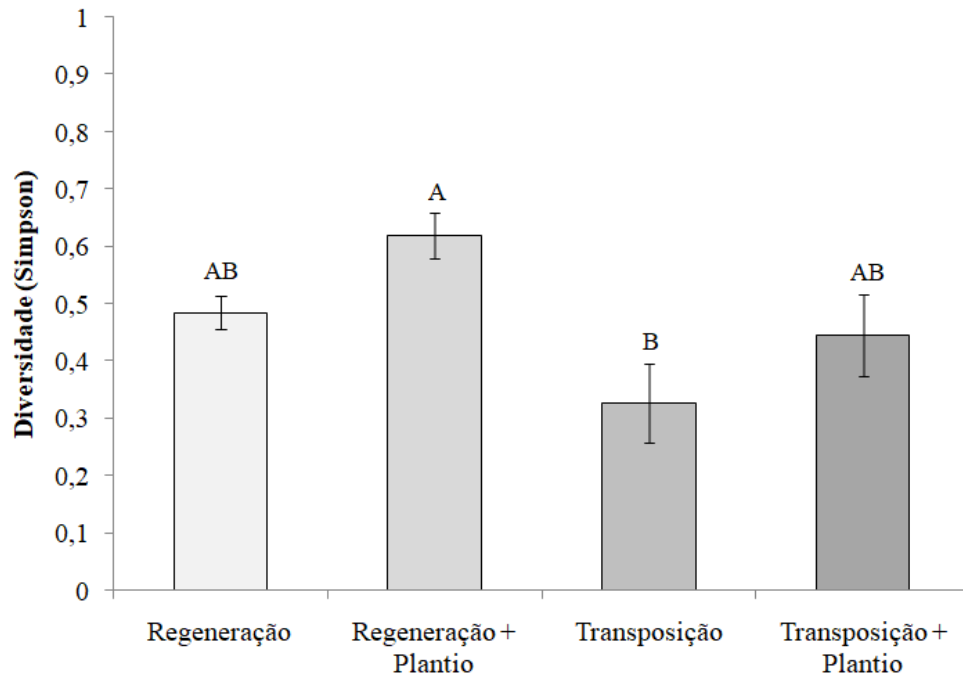
de  $0,33 \pm 0,26$ ) resultou em uma diversidade divergente do tratamento de regeneração com plantio de mudas (média de  $0,61 \pm 0,15$ ) (Figura 4.3).



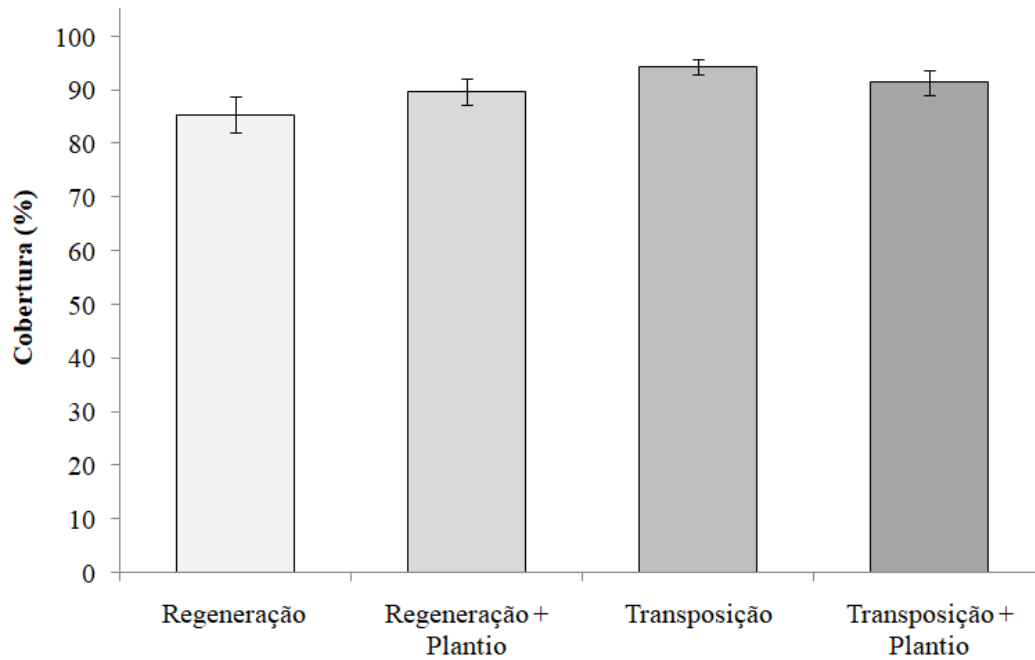
**Figura 4.2** Avaliação da densidade (indivíduos/m<sup>2</sup>) dos tratamentos de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE.

Para cobertura do solo todos os tratamentos apresentaram valores bastante satisfatórios, com média geral de  $90,26 \pm 9,19$  % e sem diferença entre os tratamentos (Tabela 4.1 e Figura 4.4).





**Figura 4.3** Avaliação da diversidade (Simpson) dos tratamentos de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE.



**Figura 4.4** Avaliação de cobertura do solo (%) dos tratamentos de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE.

### ***Composição florística e fitossociologia***

No estudo emergiram, no total, 28.580 indivíduos, sendo 33% no tratamento de transposição com plantio de mudas, 23% no tratamento de transposição, 23% no tratamento de regeneração e 21% no tratamento de regeneração mais plantio. Esses indivíduos encontram-se distribuídos em 18 famílias, 43 gêneros e 53 espécies (Figura 4.5). As famílias mais representativas foram Fabaceae, Malvaceae e Poaceae, seguidas de Euphorbiaceae e Rubiaceae (Tabela 4.2). Em relação ao hábito das espécies identificadas, 44% das espécies no estudo são classificadas apenas no estrato herbáceo, 14,5% apenas como arbusto, 0,04 de árvores ou arbusto e as demais se encaixam em mais de uma classificação (Tabela 4.2). Para origem, a maioria das espécies observadas são nativas (89,6%), mas há exóticas invasoras (14,4%). Quanto às síndromes de dispersão, 57,5% são autocóricas; 22% são anemocóricas; 18,5% são zoocóricas e 2% hidrocóricas, sendo algumas mais de um tipo.

Do total, 55% das espécies estão presentes em todos os tratamentos, como *H. crispata*, *W. brachypetala*, *Z. latifolia*. Ainda, *V. leucocephala*, *J. ribifolia* e *M. suavelons* só foram visualizadas nas parcelas em que houve transposição de solo. Bem como, *C. urens* e *M. repens*, espécie exótica invasora, apenas nas parcelas de regeneração. Espécies bem representativas do ecossistema do entorno, como *T. inamoena* e *P. moniliformis*, arbórea, também foram observadas. Vale ressaltar que outras espécies não surgiram no momento da análise em alguns tratamentos, mas foram visualizadas com abundância em anos anteriores, como *R. brasiliensis*.

A análise da composição das espécies ressalta a diferença entre os tratamentos. Os resultados de ANOSIM permitem inferir na diferença de espécies que estão colonizando as áreas apenas com condução da regeneração em relação aos demais tratamentos (Tabela 4.3). A plotagem do NMDS não permite diferir os tratamentos com sobreposição de todos os polígonos (Figura 4.6), apenas com o tratamento de condução da regeneração tendo menor amplitude que os demais.

Em relação aos parâmetros fitossociológicos, as espécies *A. adscensionis*, *P. elatior* e *R. grandiflora* estão entre as seis mais importantes na composição de todos os tratamentos, com *A. adscensionis*, espécie exótica invasora, apresentando maior número de indivíduos por área que as demais (Tabela 4.4). Inclusive no tratamento com menor intervenção corresponde a 58% do total de indivíduos nas parcelas. A herbácea nativa *P. elatior* teve sua importância maior nos tratamentos com maior intervenção, sempre com alta densidade de indivíduos.



**Figura 4.5** Prancha de fotos referente aos tratamentos de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE. A e B: Parcelas em restauração com transposição de solo e plantio de mudas. C e D: Parcelas em restauração com condução da regeneração natural.

**Tabela 4.2** Lista florística dos tratamentos de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE. À saber: Os valores descritos referem-se a densidade da espécie em cada tratamentos (indivíduos/m<sup>2</sup>). Anem: Anemocórica, Zoo: Zoocórica, Auto: Autocórica e Hidro: hidrocórica.

Código (NMDS)	Família/Espécie	Regeneração	Regeneração + Plantio	Transposição	Transposição + Plantio	Hábito	Origem	Dispersão
<b>Amaranthaceae</b>								
sp37	<i>Alternanthera brasiliana</i> (L.) Kuntze	0	11	0	0	Subarbusto	Nativa	Zoo
<b>Asteraceae</b>								
sp42	<i>Ageratum conyzoides</i> L.	1	0	0	0	Erva/ Subarbusto	Nativa	Anem
<b>Boraginaceae</b>								
sp27	<i>Euploca procumbens</i> (Mill.) Diane & Hilger	0	0	1	0	Erva/ Subarbusto	Nativa	Zoo
sp53	<i>Varronia leucocephala</i> (Moric.) J.S.Mill.	0	0	0	0,03	Arbusto	Nativa	Zoo
<b>Cactaceae</b>								
sp45	<i>Tacinga inamoena</i> (K.Schum.) N.P.Taylor & Stuppy	2	0	0	3	Suculenta/ Subarbusto	Nativa	Zoo
<b>Cyperaceae</b>								

sp9	<i>Cyperus fugax</i> Liebm.	94	32	3	36	Erva	Nativa	Anem
sp11	<i>Cyperus squarrosus</i> L.	26	3	21	34	Erva	Nativa	Auto
sp48	<i>Scleria</i> sp.	11	1	5	5	Erva		Auto
sp51	<i>Fimbristylis dichotoma</i> (L.) Vahl	8	2	52	37	Erva	Nativa	Anem/ Auto
<b>Euphorbiaceae</b>								
sp6	<i>Cnidoscolus urens</i> (L.) Arthur	0,025	0,18	0	0	Erva/ Subarbusto/ Arbusto	Nativa	Auto
sp24	<i>Jatropha mollissima</i> (Pohl) Baill.	0,03	0	0	0,06	Arbusto	Nativa	Auto
sp25	<i>Jatropha ribifolia</i> (Pohl) Baill	0	0	0,03	0,06	Arbusto	Nativa	Auto
sp34	<i>Manihot esculenta</i> Crantz	0	1	0	0	Arbusto	Nativa	Auto
<b>Fabaceae</b>								
sp2	<i>Pityrocarpa moniliformis</i> (Benth.) Luckow&R.W.Jobson	0,125	0,25	0,06	0,1	Árvore/ Arbusto	Nativa	Auto/ Zoo

sp8	Fabaceae sp.	0	5	0	0	Subarbusto	Nativa	
sp14	<i>Stylosanthes macrocephala</i> M.B.Ferreira & Sousa Costa	5	2	1	10	Subarbusto	Nativa	Auto
sp16	<i>Zornia latifolia</i> Sm.	142	17	121	21	Subarbusto	Nativa	Auto
sp18	<i>Ctenodon cf. marginatus</i> (Benth.) D.B.O.S.Cardoso, P.L.R.Moraes&H.C.Lima	11	113	0	0	Subarbusto/ Arbusto	Nativa	Auto
sp21	<i>Chamaecrista pilosa</i> (L.) Greene	45	11	39	1	Subarbusto	Nativa	Auto
sp26	<i>Mimosa tenuiflora</i> (Willd.) Poir.	3	3	0	2	Árvores/ Subarbusto/ Arbusto	Nativa	Auto
sp38	<i>Calliandra</i> sp.	0,06	0	0	0			Auto
sp43	<i>Mimosa pudica</i> L.	12	16	0	15	Erva/ Subarbusto	Nativa	Auto
sp49	<i>Senna uniflora</i> (Mill.) H.S.Irwin& Barneby	0	0	18	4	Erva	Nativa	Auto
sp52	<i>Centrosema pascuorum</i> Mart. ex Benth.	0	1	0	1	Liana/ volúvel/	Nativa	Auto

trepadeira								
<b>Lamiaceae</b>								
sp36	<i>Mesosphaerum suaveolens</i> (L.) Kuntze	0	0	2	5	Erva/ Subarbusto/ Arbusto	Nativa	Auto
sp47	<i>Rhaphiodon echinus</i> (Nees & Mart.) Schauer	49	156	11	8	Erva	Nativa	Auto
<b>Malvaceae</b>								
sp7	<i>Corchorus argutus</i> Kunth	4	0	1	2	Subarbusto	Nativa	Auto
sp28	<i>Waltheria operculata</i> Rose	11	2	12	30	Arbusto	Nativa	Auto
sp29	<i>Herissantia crispa</i> (L.) Brizicky	22	4	1	20	Erva/ Subarbusto/ Arbusto	Nativa	Anem
sp30	<i>Waltheria brachypetala</i> Turcz.	1	0	3	1	Arbusto	Nativa	Auto
sp31	<i>Pavonia cancellata</i> (L.) Cav.	5	0	0	2	Erva	Nativa	Auto
sp32	<i>Sida</i> sp.	0	5	0	1			

sp33	<i>Waltheria rotundifolia</i> Schrank	0	0	2	0	Subarbusto	Nativa	Auto
sp50	<i>Sida galheirensis</i> Ulbr.	1167	0	5	5	Subarbusto	Nativa	Auto
<b>Molluginaceae</b>								
sp17	<i>Mollugo verticillata</i> L.	0	1	0	2	Erva	Nativa	Zoo
<b>Onagraceae</b>								
sp22	<i>Ludwigia erecta</i> (L.) H.Hara	4	2	4	15	Arbusto	Nativa	Anem/ Hidro
<b>Plantaginaceae</b>								
sp12	<i>Scoparia dulcis</i> L.	1	1	0	2	Erva	Nativa	Auto
sp13	<i>Angelonia cornigera</i> Hook.f.	7	1	0	0	Erva	Nativa	Auto/ Zoo
<b>Poaceae</b>								
sp1	<i>Aristida adscensionis</i> L.	4443	2078	1782	4031	Erva	Exótica invasora	Anem
sp5	<i>Cenchrus echinatus</i> L.	0	24	32	25	Erva	Nativa	Zoo



sp15	<i>Dactyloctenium aegyptium</i> (L.) Willd.	3	2	18	8	Erva	Exótica invasora	Anem
sp19	<i>Eragrostis cilianensis</i> (All.) Vignolo ex Janch.	16	13	43	278	Erva	Exótica invasora	Anem
sp20	Poaceae sp. 1	30	576	0	118	Erva		
sp35	<i>Melinis repens</i> (Willd.) Zizka	1	1	0	0	Erva	Exótica invasora	Auto
sp39	<i>Digitaria nuda</i> Schumach.	52	179	235	53	Erva	Exótica invasora	Anem/ Auto
sp40	<i>Chloris</i> sp.	55	7	36	96	Erva	Nativa	Anem
sp41	Poacea sp. 2	16	95	0	67			
<b>Portulacaceae</b>								
sp44	<i>Portulaca elatior</i> Mart. ex Rohrb.	174	1810	3679	3324	Erva	Nativa	Anem
<b>Rubiaceae</b>								
sp3	<i>Richardia brasiliensis</i> Gomes	83	3	0	0	Erva	Nativa	Zoo
sp4	<i>Staelia virgata</i> (Link ex Roem. & Schult.) K.Schum.	27	1	17	44	Erva/ Subarbusto	Nativa	Zoo

sp46	<i>Richardia grandiflora</i> (Cham. &Schltdl.) Steud.	1058	704	471	1069	Erva/ Subarbusto	Nativa	Auto
------	--	------	-----	-----	------	---------------------	--------	------

**Solanaceae**

sp23	<i>Ipomoea asarifolia</i> (Desr.) Roem. & Schult.	0	1	2	0	Liana/ Subarbusto	Nativa	Anem
------	--	---	---	---	---	----------------------	--------	------

**Verbenaceae**

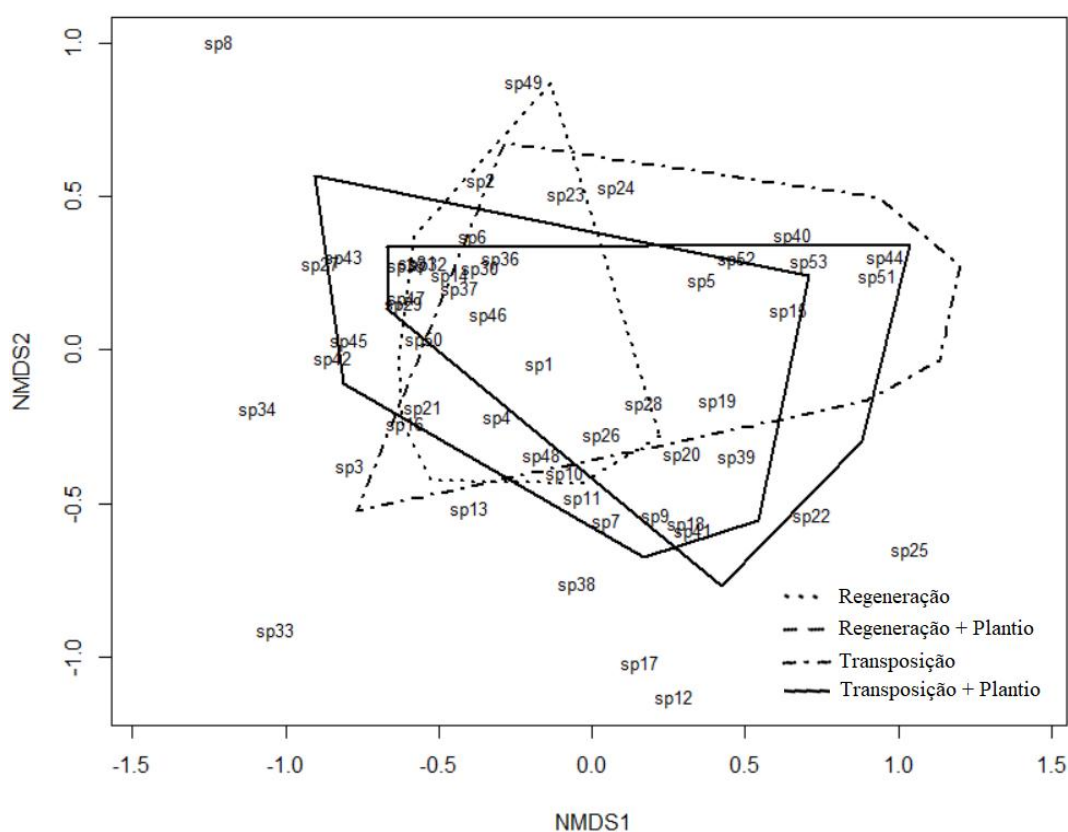
sp10	<i>Stachytarpheta sessilis</i> Moldenke	4	0	0	25	Erva	Nativa	Auto
------	--	---	---	---	----	------	--------	------

---

**Tabela 4.3** Análise de similaridade (ANOSIM) entre os tratamentos de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE. Os valores da tabela correspondem a significância à 5% (p).

	Regeneração	Regeneração + Plantio	Transposição	Transposição + Plantio
Regeneração	-	0,004 *	0,001 *	0,01 *
Regeneração + Plantio	-	-	0,09	0,2
Transposição	-	-	-	0,28
Transposição + Plantio	-	-	-	-

\* Significativo a 5%



**Figura 4.6** Escalonamento multidimensional não paramétrico (NMDS) entre os tratamentos de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE.

**Tabela 4.4** Parâmetros fitossociológicos das espécies emergidas nos tratamentos de restauração na Caatinga, no município de Petrolina, PE. A saber: FR, frequência relativa; DR, densidade relativa (%); VI, índice de valor de importância (%); Pos., Posição no ranking a partir de VI do tratamento de Regeneração. A estrutura foi montada com base na posição do ranking de valor de importância do tratamento de Regeneração Natural.

Espécies	Regeneração				Regeneração + Plantio				Transposição				Transposição + Plantio			
	FR	DR	VI	Pos.	FR	DR	VI	Pos.	FR	DR	VI	Pos.	FR	DR	VI	Pos.
<i>A. adscensionis</i>	8,1	58	66,2	1°	10,2	35,1	45,3	1°	7,5	26,8	34,3	2°	10,7	42,9	53,6	1°
<i>R. grandiflora</i>	7,6	13,8	21,4	2°	6,3	11,9	18,2	3°	5,8	7,1	12,9	3°	8,6	11,4	19,9	3°
<i>S. galheirensis</i>	4,9	15,3	20,1	3°	-	-	-	-	3,3	0,1	3,4	14°	2,9	0,1	2,9	16°
<i>C. pilosa</i>	7,6	1,3	8,9	4°	5,5	0,8	6,3	7°	5,8	0,7	6,5	4°	0,7	0,01	0,7	33°
<i>Z. latifolia</i>	4,9	1,9	6,7	5°	1,6	0,3	1,9	19°	4,2	1,8	6,0	5°	2,9	0,2	3,1	13°
<i>P. elatior</i>	3,8	2,3	6,1	6°	8,7	30,5	39,2	2°	10,0	55,4	65,4	1°	9,3	35,4	44,7	2°
<i>R. echinus</i>	4,9	0,6	5,5	7°	3,9	2,6	6,6	6°	3,3	0,2	3,5	13°	4,3	0,1	4,4	9°
<i>C. fugax</i>	3,8	1,2	5,0	8°	3,9	0,5	4,5	10°	1,7	0,1	1,7	24°	3,6	0,4	4,0	10°
<i>H. crispa</i>	4,3	0,3	4,7	9°	2,4	0,1	2,4	15°	3,3	0,01	3,4	15°	3,6	0,2	3,8	11°
<i>W. brachypetala</i>	4,3	0,01	4,4	10°	4,7	0,1	4,8	9°	4,2	0,1	4,2	9°	0,7	0,01	0,7	34°
<i>Sida</i> sp.	4,3	0,01	4,3	11°	3,2	0,1	3,2	11°	3,3	0,01	3,4	16°	0,7	0,01	0,7	35°
<i>R. brasiliensis</i>	3,2	1,1	4,3	12°	0,8	0,1	0,8	29°	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>P. cancellata</i>	3,2	0,1	3,3	13°	-	-	-	-	0,8	0,01	0,8	33°	1,4	0,01	1,5	27°

<i>S. virgata</i>	2,7	0,4	3,1	14°	0,8	0,01	0,8	31°	3,3	0,3	3,6	12°	1,4	0,5	1,9	19°
<i>M. pudica</i>	2,7	0,2	2,9	15°	1,6	0,3	1,8	20°	-	-	-	-	2,9	0,2	3,0	15°
<i>W. operculata</i>	2,7	0,1	2,9	16°	1,6	0,01	1,6	24°	1,7	0,2	1,9	23°	5,0	0,3	5,3	5°
<i>C. squarrosus</i>	2,2	0,3	2,5	17°	2,4	0,1	2,4	17°	1,7	0,3	2,0	21°	1,4	0,4	1,8	21°
Poaceae sp1.	2,2	0,2	2,4	18°	1,6	1,6	3,2	12°	-	-	-	-	0,7	0,7	1,4	28°
<i>Chloris</i> sp.	1,6	0,7	2,3	19°	2,4	0,1	2,5	14°	3,3	0,5	3,9	11°	4,3	1,0	5,3	6°
<i>A. cornigera</i>	2,2	0,1	2,3	20°	0,8	0,01	0,8	33°	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>M. tenuiflora</i>	2,2	0,01	2,2	21°	2,4	0,1	2,4	16°	5,8	0,01	5,9	6°	1,4	0,01	1,5	26°
<i>C. marginatus</i>	1,6	0,1	1,8	22°	3,9	2,0	5,9	8°	4,2	0,1	4,3	8°	-	-	-	-
<i>D. nuda</i>	1,1	0,7	1,8	23°	5,5	3,0	8,5	5°	1,7	3,5	5,2	7°	4,3	0,6	4,9	7°
<i>P. moniliformis</i>	1,6	0,01	1,6	24°	1,6	0,01	1,6	26°	1,7	0,01	1,7	26°	-	-	-	-
<i>Scleria</i> sp.	1,1	0,1	1,2	25°	0,8	0,01	0,8	37°	0,8	0,1	0,9	27°	1,4	0,1	1,5	24°
<i>S. macrocephala</i>	1,1	0,1	1,2	26°	1,6	0,01	1,6	21°	0,8	0,01	0,9	32°	1,4	0,1	1,5	22°
<i>C. argutus</i>	1,1	0,1	1,1	27°	-	-	-	-	0,8	0,01	0,9	31°	0,7	0,01	0,7	30°
<i>L. erecta</i>	1,1	0,1	1,1	28°	1,6	0,01	1,6	23°	0,8	0,1	0,9	28°	2,9	0,2	3,0	14°
<i>T. inamoena</i>	1,1	0,01	1,1	29°	-	-	-	-	-	-	-	-	1,4	0,01	1,5	25°
<i>C. urens</i>	1,1	0,01	1,1	30°	0,8	0,01	0,8	40°	-	-	-	-	-	-	-	-
Poaceae sp2.	0,5	0,4	0,9	31°	5,5	9,7	15,2	4°	-	-	-	-	3,6	1,3	4,8	8°
<i>E. cilianensis</i>	0,5	0,2	0,8	32°	2,4	0,2	2,6	13°	2,5	0,7	3,2	17°	5,0	3,0	8,0	4°
<i>F. dichotoma</i>	0,5	0,1	0,7	33°	0,8	0,01	0,8	30°	3,3	0,8	4,1	10°	1,4	0,4	1,8	20°

<i>S. sessilis</i>	0,5	0,1	0,6	34°	-	-	-	-	-	-	-	-	2,1	0,3	2,4	17°
<i>D. aegyptium</i>	0,5	0,01	0,6	35°	1,6	0,01	1,6	22°	2,5	0,3	2,8	18°	2,1	0,1	2,2	18°
<i>A. conyzoides</i>	0,5	0,01	0,6	36°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>M. repens</i>	0,5	0,01	0,6	37°	0,8	0,01	0,8	36°	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>S. dulcis</i>	0,5	0,01	0,6	38°	0,8	0,01	0,8	32°	-	-	-	-	0,7	0,01	0,7	31°
<i>E. procumbens</i>	0,5	0,01	0,5	39°	0,8	0,01	0,8	39°	2,5	0,01	2,5	19°	-	-	-	-
<i>Calliandra</i> sp.	0,5	0,01	0,5	40°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>J. mollissima</i>	0,5	0,01	0,5	41°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>A. brasiliana</i>	-	-	-	-	0,8	0,2	1,0	27°	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>C. echinatus</i>	-	-	-	-	1,6	0,4	2,0	18°	1,7	0,5	2,2	20°	2,9	0,3	3,1	12°
<i>C. pascuorum</i>	-	-	-	-	0,8	0,01	0,8	38°	0,8	0,01	0,8	34°	0,7	0,01	0,7	36°
<i>I. asarifolia</i>	-	-	-	-	1,6	0,01	1,6	25°	1,7	0,01	1,7	25°	-	-	-	-
<i>J. ribifolia</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	0,8	0,01	0,8	35°	-	-	-	-
<i>M. esculenta</i>	-	-	-	-	0,8	0,01	0,8	35°	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>M. suaveolens</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	0,8	0,01	0,9	30°	1,4	0,1	1,5	23°
<i>M. verticillata</i>	-	-	-	-	0,8	0,01	0,8	34°	-	-	-	-	0,7	0,01	0,7	32°
<i>S. uniflora</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	1,7	0,3	1,9	22°	0,7	0,01	0,8	29°
<i>V. leucocephala</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	0,8	0,01	0,8	36°	-	-	-	-
<i>W. rotundifolia</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	0,8	0,01	0,9	29°	-	-	-	-

## Discussão

### *Riqueza, densidade, diversidade e cobertura vegetal*

A análise florística da área de referência do estudo com as mesmas dimensões analisadas apresentara média de riqueza de 10,5 espécies, ou seja, similar, mas menor que todos os tratamentos de restauração implantados desse estudo (12,14), indicando que esse parâmetro teve o sucesso esperado. Como visto, as áreas de Caatinga são variadas e essa riqueza pode ser menor que a encontrada em outros estudos, mas em relação à área de referência foi equivalente. A área de referência tem a cobertura do solo majoritariamente formada pela espécie *N. variegata*, com alta abundância, o que pode formar uma barreira física para dispersão de outras espécies vegetais e interfere diretamente na composição florística local.

A diversidade de Simpson da área de referência é de 0,34, que foi similar a média geral encontrada, mas bem menor que o tratamento de regeneração com plantio. O valor, no entanto, significa que existem espécies dominando em maior quantidade as áreas de regeneração, pois quanto mais próximo de 1, maior a probabilidade dos indivíduos serem da mesma espécie e menor a diversidade (Uramoto et al. 2005). Esse valor corrobora com as análises posteriores que comprovaram a exótica invasora *A. adscensionis* dominando essas parcelas.

A cobertura média do solo na área de referência é de 86,6%, também um pouco menor que a média geral do estudo (90,26%). Porém, altos valores para ambos. A cobertura vegetal, como já visto, é essencial na regeneração natural, pois favorece retenção de umidade, reduz temperatura do solo, atrai microrganismos e fauna, favorecendo incremento de matéria orgânica no solo e ciclagem de nutrientes (Peichl et al. 2012; Guo et al. 2019). Dessa forma, permitindo a melhoria local para favorecer a sucessão.

Os valores de densidade foram mais expressivos. A área de referência tem média de 24,84 indivíduos/m<sup>2</sup>, sendo bem menor que a encontrada nesse estudo, que foi de 435,4 indivíduos/m<sup>2</sup>. Essa diferença da densidade se deve ao fato de que áreas em colonização tendem a ter maior número de indivíduos inicialmente, diferente de áreas conservadas estabilizadas. O estudo de caracterização dessa área de referência determinou que a mesma está estável e em franco processo de sucessão ecológica (Reis et al. 2022), enquanto as áreas em restauração não têm limitação de espaço e luz e os propágulos que chegam encontram o ambiente propício para expandir a população

(Begon et al. 2007). Apesar de isso acontecer apenas com as espécies adaptadas as condições hostis das áreas degradadas.

Além disso, a estrutura da vegetação ainda é distinta, pois a densidade de arbustivas e arbóreas na área total de análise (32m<sup>2</sup>) de referência teve média de 11 indivíduos e para esse estudo foi de 2,53 na regeneração: 1,84 para regeneração mais plantio; 3 para transposição e 2,67 para transposição mais plantio. Além, da diferença da idade, diâmetros e alturas dos indivíduos.

Vale ressaltar que apesar do tratamento com transposição de solo não ter dado diferença nos parâmetros avaliados nesse estudo outros resultados devem ser levados em consideração. A avaliação do banco de sementes nas áreas com e sem transposição do solo nesse mesmo experimento demonstraram aumento da densidade de indivíduos e alteração na composição de espécies nas áreas transpostas (Rodrigues 2022). Ainda, o solo é um recurso complexo e alterações mesmo com diretrizes de engenharia ecológica, como realizados por Bulot et al. (2014), não permitem restaurar totalmente a integridade da comunidade vegetal em muito curto prazo.

Outro fator a ser destacado é o plantio de mudas. As mudas utilizadas tiveram porcentagem final de sobrevivência de  $80 \pm 27\%$ , para *C. quercifolius*,  $22,7 \pm 37\%$  para *M. tenuiflora*, e  $8 \pm 22\%$  para *C. pyramidale* e dois anos de implantação das arbóreas pode não ter gerado consequências diretas na regeneração natural ainda. Porém, espera-se que com o passar do tempo as árvores implantadas promovam as modificações edáficas e microclimáticas suficientes para favorecer a sucessão. Além disso, utilizar espécies arbóreas já desenvolvidas é acrescentar espécies específicas com características desejadas, como facilitadoras, espécies atrativas à fauna, que forma abrigos e alteram microclima, que modificam características do solo, como leguminosas que formam associação com bactérias fixadoras de nitrogênio e espécies que tem facilidade em formar associações micorrízicas (Botelho & Davide 2002; Rodrigues et al. 2009a; Martins 2014). Dessa forma, acelera-se o processo de sucessão.

### ***Composição florística e fitossociologia***

As famílias mais representativas encontradas são as mesmas observadas em estudos da florística da Caatinga (Siqueira Filho et al. 2012) e nos estudos de restauração na Caatinga (Sousa 2017; Reis et al. 2022) o que permite inferir que a sucessão está andamento no sentido de ter a composição similar as áreas de referência.



A presença majoritária de espécies herbáceas é um importante indicativo de colonização das áreas, pois essas espécies com características de pioneiras são normalmente as primeiras a surgir. Essas espécies são fundamentais no processo de sucessão, proporcionando alterações locais para o estabelecimento de outras espécies vegetais e da fauna (Ferreira et al. 2015a). Esse fato também explica a alta cobertura do solo em todos os tratamentos.

Bem como, o aparecimento de arbustivas e arbóreas, como *P. moniliformis* e *M. tenuiflora* corrobora para a intenção da formação de uma comunidade estruturalmente dinâmica. Principalmente em uma área altamente degradada, como era o caso do estudo. *M. tenuiflora* é extremamente importante para a diversidade local, em levantamento florístico e fitossociológico das áreas conservadas no mesmo local das áreas de referência desse estudo ela teve o maior valor de importância dentre as espécies arbustivas e arbóreas amostradas na composição do ecossistema (Reis et al. 2022).

Em relação à origem das espécies é preocupante a presença de espécies exóticas invasoras, principalmente em alta distribuição. Além de *A. adscensionis*, *M. repens* e *D. aegyptium* também são espécies comprovadamente invasoras na Caatinga, causando prejuízos na flora local e afetando arranjos produtivos (Fabricante et al. 2013; Fabricante et al. 2014). Essas espécies são visualizadas nas áreas de entorno do experimento, o que deve ter promovido a dispersão das sementes que foram beneficiadas pelos tratamentos para se estabelecer.

Sobre a dispersão, a alta presença de autocóricas indica que a dispersão está sendo realizada mesmo sem a presença de dispersores da fauna. A dispersão anemocórica permite a chegada de propágulos de forma facilitada ao solo em locais e áreas abertas (Almeida-Cortez 2004). Ainda, Fenner e Thompson (2005) determinam a anemocoria como uma adaptação das espécies aos ambientes desfavoráveis. Porém, a baixa presença de espécies zoocóricas indica a ausência de animais dispersores no local e entorno e sabe-se que a presença de atores biológicos dispersores é vital em locais degradados e distantes de ilhas de diversidade, levando os propágulos para regiões distantes da planta mãe. Por isso, Piña-Rodrigues e Aoki (2014) indicam a necessidade de enriquecimento das áreas em restauração com espécies zoocóricas.

A distribuição variada das espécies nos tratamentos ressalta que os tratamentos de transposição podem introduzir espécies que não seriam facilmente dispersadas, por isso algumas espécies não ocorreram nas áreas de regeneração, como *V. leucocephala*, *J. ribifolia* e *M. suavelons*. Na análise da área de referência do presente estudo, de Reis

et al. (2022), a espécie *V. leucocephala* também foi identificada como uma das mais importantes na composição do ecossistema. Além disso, é uma espécie endêmica da Caatinga (Flora e Funga do Brasil 2020). *J. ribifolia* e *M. suavelons* também são espécies facilmente encontradas nas áreas de referência.

A ocorrência da espécie *C. urens* apenas em parcelas com regeneração pode ser explicada pela disposição dos tratamentos em campo. Pode-se visualizar a ocorrência da espécie restrita a poucas parcelas, mas acredita-se que a sua dispersão promoverá surgimento em outros tratamentos com o passar do tempo. A espécie é arbustiva e promove alteração na estrutura da comunidade, além de ser polinizada por beija-flores, atraindo esse importante polinizador para área (Araújo et al. 2012).

Em relação aos valores de importância das espécies, a *A. adscensionis* ser a mais importante na maioria dos tratamentos ressalta o potencial invasor da espécie. Ela consegue se estabelecer em diversos solos, amplitudes térmicas e hídricas, além de ter dispersão facilitada e florescer o ano inteiro (Fabricante et al. 2013). Ferreira et al. (2015b) em estudo de sucessão em solo transposto também demonstrou a alta colonização por gramíneas invasoras e reforçou a necessidade de manejo.

Apesar disso, outra análise realizada na mesma área do presente estudo verificou a correlação de *A. adscensionis* com riqueza e abundância de nativas e demonstrou que a presença da invasora não causa interferência direta na riqueza e densidade das nativas ao longo de três anos, com variações de valores independente da presença e número de indivíduos da espécie (Souza 2022). Porém, vale ressaltar que a análise da densidade ao longo do tempo mostrou aumento significativo de indivíduos com picos de 124 indivíduos/m<sup>2</sup> para 184 indivíduos/m<sup>2</sup> de um período chuvoso para o outro, o que demonstra que a espécie continua seu processo de estabelecimento (Souza 2022). A análise do banco de sementes da área também indica a alta presença de propágulos da espécie no solo (Rodrigues 2022).

A respeito da *P. elatior*, o VI atribuído pode ser explicado pela alta produção de sementes, conferindo uma vantagem para obter sucesso em ocupar espaço. Segundo Lorenzi (2008), o gênero *Portulaca* é constituído de espécies muito prolíferas, na qual uma única planta pode produzir cerca de 10 mil sementes. A espécie *R. grandiflora* que também está entre as mais importantes, tem ampla distribuição, é considerada uma espécie ruderal e adaptada as condições extremas e ainda é importante para a manutenção das populações de abelhas polinizadoras (Cruz & Martins 2013).

A ocorrência da espécie arbórea *P. moniliformis* reforça como o entorno é essencial para aporte de propágulos, visto que a espécie não é observada com abundância dentro da área de referência, mas alguns indivíduos circundam a área experimental. Em relação às espécies que surgiram em análises anteriores, porém não ocorreram nessa análise de três anos, a possível explicação é que as espécies herbáceas da Caatinga têm diferentes ciclos de vida que por vezes é bianual, não sendo incomum visualizar espécies em um ano e não ocorrer em outro. Além disso, as herbáceas podem ter padrões de distribuição inconstantes e altamente dependentes da sazonalidade climática, afetando tamanho e dinâmica populacional (Reis et al. 2006).

A análise da composição das espécies também permitiu comprovar como as áreas de condução da regeneração se comportam diferente das áreas com maiores intervenções, justamente por depender exclusivamente da chegada de propágulos do entorno. Por isso, algumas espécies só foram observadas nessas parcelas. Além disso, a colonização dessas parcelas está sendo feita em grande quantidade pela exótica invasora *A. adscensionis* e estudos em longo prazo do efeito da presença dessa espécie devem ser realizados.

### **Considerações finais**

De toda forma, a área experimental estava sem regeneração por 18 anos e o aumento dos parâmetros estudados indicam que pequenas intervenções, como a descompactação do solo nas áreas de condução da regeneração, já afetam significativamente a área anteriormente degradada. Considerando os custos relacionados à condução da regeneração e, a depender do prazo e objetivo final da restauração, a técnica em si foi considerada promissora. Porém, deve ser levada em consideração a necessidade de monitoramento e manejo de exóticas invasoras.

Os tratamentos com transposição de solo devem ser considerados quando a necessidade da restauração exige incremento mais rápido de densidade com espécies específicas e conseqüentemente funcionalidade ao ecossistema. Os custos de transporte e implantação e a necessidade de áreas doadoras do solo precisam ser considerados no momento de escolha da técnica.

O incremento de espécies arbóreas na forma de mudas com alta sobrevivência, como *C. quercifolius*, deve ser considerado quando se têm necessidade de acelerar processos com estruturação mais avançada do ecossistema em formação. Bem como, é uma forma de incrementar espécies arbóreas de uso biocultural com diversidade que

poderão ser aproveitadas pelo produtor e/ou comunidade. O custo-benefício relacionado à produção das mudas e transplântio deve ser avaliado.

Ainda, o surgimento de resultados expressivos de sucessão pode não ocorrer em um curto período, pois os processos ecológicos precisam ser recuperados (Rosenfield 2017) e alguns processos e atributos funcionais só se expressarão em épocas específicas (Martins 2014). Fato agravado para regiões que possuem sazonalidade de temperaturas e chuvas específicas que alteram o ciclo de vidas das espécies (Siqueira Filho et al. 2012). Nesse sentido, os resultados com apenas três anos de experimentação geral apenas sugerem diretrizes para implantação das técnicas e compilação delas e que análises futuras podem trazer novas consequências à área em restauração.

## Considerações gerais da tese

Em síntese, a tese, que sugeriu inicialmente a “Viabilização de técnicas alternativas para a restauração de áreas degradadas na Caatinga” trouxe resultados de diferentes metodologias que auxiliam a formulação de protocolos para restauração de áreas na Caatinga e enfatiza a necessidade de estudos em diferentes situações e fitofisionomais do ecossistema. Os resultados gerais ressaltam as nuances e dificuldades enfrentadas para aplicação das teorias de restauração à prática e apresenta os resultados que podem ser visualizados em curto prazo e como os parâmetros devem ser analisados.

Para o capítulo 1, as consequências da retirada do solo para transposição no ecossistema doador foram demonstradas a partir dos resultados de riqueza, densidade, diversidade, cobertura de solo e composição florística que demonstram como a retirada de solo de até 25m<sup>2</sup> não afeta negativamente o ecossistema doador.

Os resultados do capítulo 2 reforçaram a transposição de solo como técnica alternativa para restauração na Caatinga com melhorias dos parâmetros de densidade, composição e banco de sementes. No mesmo capítulo, a condução da regeneração natural mostrou resultados satisfatórios de aumento de riqueza, densidade e cobertura do solo na área degradada. Porém, a semeadura direta de espécies herbáceas não foi adequada, com baixa emergência e ausência de significância. Ainda, a compilação da técnica de transposição de solo com semeadura de herbáceas também não obteve resultado satisfatório para ser recomendado.

O capítulo 3, que avaliou a influência da transposição de solo como condicionador para introdução de mudas e sementes de arbóreas, comprovou que a transposição pode melhorar as condições locais para a sobrevivência de mudas apenas de *C. quercifolius*. Bem como, que a introdução de espécies arbóreas nas condições do estudo é mais adequada na forma de mudas do que semeadura direta, que teve baixa emergência e sobrevivência.

Por fim, o capítulo 4 que avaliou a união de técnicas para restauração em solos degradados determinou que todos os tratamentos promoveram melhorias para sucessão, com ênfase naqueles que tiveram maiores intervenções. Porém, três anos de experimentação geral não promoveu diferenciação estatística para a maioria dos parâmetros entre eles.

## Referências bibliográficas

Adler PB, Hillerislambers J, Levine JM (2007) A niche for neutrality. *Ecology Letters* 10:95-104.

Albuquerque UP, Melo, FPL (2018) Socioecologia da Caatinga. *Ciência e Cultura* 70(4):40-44.

Almeida-Cortez JS (2004) Dispersão e banco de sementes. In: Ferreira, A. G; Borghetti, F. (Eds.). Germinação: do básico ao aplicado. Artmed, Porto Alegre.

Aloufa M AI, Medeiros JA (2016) Valorização e preservação da faveleira (*C. quercifolius*) para o desenvolvimento sustentável do semiárido brasileiro. *Revista Okara: Geografia em debate* 10(3): 453-476.

Alves MC, Nascimento V, Souza ZM (2012) Recuperação em área de empréstimo usada para construção de usina hidrelétrica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 16(8):887–893.

Alves MC, Souza ZM (2008) Recuperação de área degradada por construção de hidroelétrica com adubação verde e corretivo. *Revista Brasileira de Ciência do solo* 32:2505-2516.

Alves JS, Fabricante JR, Reis LBO, Moraes GS, Silva EKC (2018) Biological invasion by *Cenchrus ciliaris* L.: is there an impact on Caatinga composition and diversity of herbaceous stratum? *Revista de Biologia Neotropical/Journal of Neotropical Biology*, Goiânia 14(2)101–110.

Andrade MVM, Andrade AP, Silva DS, Bruno RLA, Guedes DS (2009) Levantamento florístico e estrutura fitossociológica do estrato herbáceo e subarbustivo em áreas de caatinga no Cariri Paraibano. *Revista Caatinga* 22 (1)229-237.

Araki DF (2005) Avaliação da semeadura a lanço de espécies florestais nativas para recuperação de áreas degradadas. Dissertação, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

Araújo LDA, Souza AL, QuirinoZGM (2012) Fenologia e biologia floral da urtiga cansação (*Cnidoscolus urens* L., Euphorbiaceae). *Revista Brasileira de Biociências* 10(2):140-140.

Arduin RLN (2018) Uso de agromineral silicático, gesso e cal para estabilização da argila de área degradada da barragem Santa Bárbara, Pelotas – RS. Dissertação, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

Backstrom AC et al. (2018) Grappling with the social dimensions of novel ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment* 16(2):109–117.

Bahram M, Hildebrand F, Forslund SK, Anderson JL, Soudzilovskaia NA, Bodegom PM, Bengtsson-Palme J, Anslan S, Pedro Coelho L, Harend H, HuertaCepas J, Medema MH, Maltz MR, Mundra S, Olsson PA, Pent M, Pöhlme S, Sunagawa S, Ryberg M, Tedersoo L, Bork P (2018) Structure and function of the global topsoil microbiome. *Nature* 560:233–237.

Barbosa DB et al. (2017) As abelhas e seu serviço ecossistêmico de polinização. *Revista Eletrônica Científica da UERGS* 3(4):694-703.

Bakke OA, Sales FCV, Bakke IA (2017) Regeneração natural e semeadura de espécies florestais nativas em áreas degradadas da Caatinga. In: Restauração da Caatinga. Moura FBP, Silva JV (Orgs). EDUFAL, Maceió.

Bechara FA, Campos Filho EM, Barretto KD, Gabriel VO, Antunes AZ, Reis A (2007). Unidades demonstrativas de restauração ecológica através de técnicas de nucleação de biodiversidade. *Revista Brasileira de Biociências* 5:9-11.

Begon M, Townsend CR, Harper JL (2007) Ecologia de indivíduos a ecossistemas. 4ª Edição. Artmed Editora S/A, Porto Alegre.

Benedito CP, Coelho MFB, Guimarães IP, Amaral J, Vital P, Maia SSS, Batista PF (2012) Emergência e crescimento inicial de plântulas de *Caesalpinia ferrea* Mart. ex Tul. var. *ferrea* em diferentes substratos. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias* 7(3):508-513.

Bertness M, Callaway RM (1994). Positive interactions in communities. *Trends in Ecology and Evolution* 9:191–193.

Biachi APT, Macedo FC (2018) Ferrovia Nova Transnordestina e Organização Espacial. Mercator, Fortaleza 17.

Boaneres D, Azevedo CS (2014) The use of nucleation techniques to restore the environment: a bibliometric analysis. *Natureza e Conservação* 12(2):93-98.

Botelho SA, Davide AC (2002) Métodos silviculturais para recuperação de nascentes e recomposição de matas ciliares. Simpósio nacional sobre recuperação de áreas degradadas: Água e biodiversidade. Belo Horizonte.

Borges MPDS (2020) Glyphosate como possível agente de seleção de espécies do cerrado e da caatinga brasileira: avaliando a sensibilidade das espécies a duas vias de contaminação. Dissertação, Universidade federal rural do semiárido, Mossoró.

Brancalion PHS, Viani RAG, Rodrigues RR, Gandolfi S. (2013). Avaliação e monitoramento de áreas em processo de restauração. In Restauração Ecológica de Ecossistemas Degradados. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Viçosa.

Brancalion PHS, Gandolfi S, Rodrigues RR (2015). Restauração Florestal. Oficina de Textos, São Paulo.

Brancalion PHS, Rodrigues RR, Gandolfi S, Kageyama PY, Nave AG, Gandara FB, Barbosa LM, Tabarelli M (2010) Instrumentos legais podem contribuir para a restauração de florestas tropicais biodiversas. *Revista Árvore* 34:455-470.



Brancalion PHS, Schweizer D, Gaudare U, Mangueira JR, Lamonato F, Farah FT, Nave AG, Rodrigues RR (2016). Balancing economic costs and ecological outcomes of passive and active restoration in agricultural landscapes: the case of Brazil. *Biotropica* 48(6):856–867.

Brasil. Sistema nacional de unidades de conservação. Lei número 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. [http://www.ibama.gov.br/parna\\_itatiaia/download.php?id\\_download=158](http://www.ibama.gov.br/parna_itatiaia/download.php?id_download=158) (acessado 10 Setembro 2019).

Brasil. Sistema nacional de unidades de conservação. Lei número 12.651, de 25 de maio de 2012. Regulamenta os art. 61A à 65225 da Constituição Federal, institui o Novo Código Florestal e dá outras providências. [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm) (acessado 10 Setembro 2019).

Brasil. Presidência da República. Casa Civil. Decreto 8.972, de 23 de janeiro de 2017. Institui a Política Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa. Resolução CONABIO no 6. Metas Nacionais de Biodiversidade para 2020, 2013. [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2017/decreto/D8972.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/decreto/D8972.htm) (acessado 10 Setembro 2019).

Brito, LPS, Bezerra TT, Nunes EM, Beckmann MZ, Siqueira Filho JA (2018) Produção de mudas de *Schinopsis brasiliensis* Engler sob prévia lavagem do pó de coco e submetidas a doses crescentes de fertilizante de liberação controlada. *Ciência Florestal* 28(3):1022-1034.

Bulot A, Provost E, Dutoit T (2014) A comparison of different soil transfer strategies for restoring a Mediterranean steppe after a pipeline leak (La Crau plain, South-Eastern France). *Ecological Engineering* 71: 690–702.

Callaway RM, Walker LM (1997) Competition and facilitation: a synthetic approach to interactions in plant communities. *Ecology* 78(7):1958–1965.

Camargo-Ricalde SL (2000) Descripción, distribución, anatomía, composición química y usos de *Mimosa tenuiflora* (Fabaceae-Mimosoideae) em México. *Revista de Biología Tropical* 48(4):1-23.

Carvalho JN (2016) Espécies nativas da Caatinga para recuperação de áreas degradadas: prospecção, ecofisiologia da germinação e crescimento de plantas. Dissertação, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Petrolina.

Carvalho JA, Teixeira SRF, Carvalho MP, Vieira V, Alves FA (2009). Doenças emergentes: uma análise sobre a relação do homem com o seu ambiente. *Revista Práxis* 1(1).

Carvalho JND, Beckmann-Cavalcante MZ, Rodrigues RG, Fontana AP, Pifano DS (2022) Native caatinga species for the recovery of degraded areas in the brazilian semiarid region. *Revista Árvore* 46:1-12

Cavalcante H, Silva MT (2014) Comparação entre métodos de estimativa da Evapotranspiração de Referência (ET<sub>o</sub>) na região de Petrolina-PE. *Ciência e Natura* 36:456–461.

Chada SS, Campello EFC, Faria SM (2004) Sucessão vegetal em uma encosta reflorestada com leguminosas arbóreas em Angra dos Reis, RJ. *Revista Árvore* 28:801-809.

Clark DA (2004) Florestas tropicais e aquecimento global: desacelerando ou acelerando? *Front Ecol Cerca* 2:73–80.

Clarke KR, Green RH (1988) Statistical design and analysis for a 'biological effects' study. *Marine Ecology Progress Series* 213-226.

Cordão MA (2011) Inclusão de ramos e frutos de jurema preta (*Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poiret) e farelo de palma forrageira (*Opuntia fícus indica* Mill) e na dieta de cordeiros. Dissertação, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

Costa RC, Fontes JRA, Moraes RR (2013) Bancos de Sementes do Solo em Áreas Naturais e Cultivos Agrícolas. Embrapa Amazônia Ocidental, Manaus.

Cruz RM, Martins CF (2013). Pollinators of *Richardia grandiflora* (Rubiaceae): an Important Ruderal Species for Bees. *Neotropical Entomology* 44:21–29.

Dantas BF, Ribeiro RC, Matias JR, Araújo GGL (2014) Germinative metabolismo f Caatinga Forest species in biosaline agriculture. *Journal of Seed Science* 36(2):194-203.

Dias LE, Griffith JJ (1998) Conceituação e caracterização de áreas degradadas. In: Dias LE, Mello JWU. (eds) Recuperação de áreas degradadas. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

Edwards DP et al. (2021) Upscaling tropical restoration to deliver environmental benefits and socially equitable outcomes. *Current Biology* 31(19):R1326–R1341.

EMBRAPA (1999) Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Sistema Brasileiro de classificação de solos. SPI, Brasília.

EMBRAPA (2021) Bioma Caatinga. <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/bioma-caatinga/clima/> (acessado 05 Outubro 2021).

Eycott AE, Stewart GB, Buyung-Ali LM, Bowler DE, Watts K, Pullin AS (2012) A meta-analysis on the impact of different matrix structures on species movement rates. *Landscape Ecology* 27:1263–1278.

Ewel JJ (1976) Litter fall and leaf decomposition in a tropical forest succession in eastern Guatemala. *Journal of Ecology* 64(1):293-308.

Fabricante JR et al. (2013) Plantas Exóticas e Exóticas Invasoras da Caatinga. V 1. Bookess, Santa Catarina.

Fabricante JR et al. (2014) Plantas Exóticas e Exóticas Invasoras da Caatinga. V 4. Bookess, Santa Catarina.

Fabricante JR, Araújo KCT, Oliveira DRS, Oliveira CPB, Castro RA, Siqueira-Filho JA (2015) Isso Vai Dar Bode! *Ciência Hoje* 56:40-44.

Fabricante JR, Araújo KC, Castro RA, Cotarelli VM (2016) Banco de sementes do solo de sítios de Caatinga sob influência do Projeto de Integração do Rio São Francisco. *Scientia Plena* 12(4).

Fabricante JR, Araújo KCT, Manfio M, Siqueira-Filho JA (2017) Mortalidade de mudas de espécies nativas sob efeito do pastejo de caprinos, ovinos e emas: implicações para projetos de recuperação/restauração de áreas degradadas na caatinga. *Nativa Sinop* 5:410–413.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations (2000). Land resource potential and constraints at regional and country scales. World Soil Resource Report, Roma.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations (2010). Global forest resources assessment: main report. Forestry Paper - 163. <http://www.fao.org/docrep/013/i1757e/i1757e00.htm> (acessado 10 Maio 2018).

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations (2012) State of the world's forests. <http://www.fao.org/docrep/016/i3010e/i3010e00.htm>. (acessado 10 Maio 2018).

Faria NA (2007) Agricultura Orgânica. Dossiê técnico. Centro de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico da Universidade de Brasília – CDT/UnB.

Fenner M, Thompson K (2005) The ecology of seeds. Cambridge University Press, New York.

Fernandes MF, Cardoso D, Queiroz LP (2020) An updated plant checklist of the Brazilian Caatinga seasonally dry forests and woodlands reveals high species richness and endemismo. *Journal of arid environments* 1774:1-8.

Ferreira MC (2015) Dinâmica da regeneração natural de áreas em restauração pela transposição de solo superficial de cerrado e de floresta estacional. Dissertação, Universidade de Brasília, Brasília.

Ferreira JMC, Vieira DLM, Walter BMT (2015a) Transposição de “Topsoil” (Camada Superficial do Solo) para a Restauração Ecológica no Cerrado. Brasília: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia. Comunicado Técnico 197:5.

Ferreira JMC, Vieira DLM, Walter BMT (2015b) Topsoil translocation for Brazilian savanna restoration: propagation of herbs, shrubs, and trees. *Restoration Ecology* 23 (6):723-728.

Ferreira RLC, Silva SO, Silva JAA, Lira MA, Alves FTJR, Nascimento LM (2016) Richness and diversity of Caatinga areas in different successional stages in northeastern Brazil. *Scientia Forestalis* 44(112):1-13.

Flora e Funga do Brasil. 2020. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/> (acessado 12 Outubro 2022).

Florentino ATN, Araújo EL, Albuquerque UP (2007) Contribuição de quintais agroflorestais na conservação de plantas da Caatinga, Município de Caruaru, PE, Brasil. *Acta Botanica Brasilica* 21(1):37-47.

Fonseca MA (2017) Fragmentação, conservação e restauração da caatinga. Tese, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

Forman RTT, Godron M (1986) *Landscape ecology*. New York, John Wiley.

Freire RLS (2015) Regeneração natural da caatinga arbórea e sua eficácia na recuperação ambiental. Monografia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

Guidotti V, Freitas FLM, Sparovek G, Pinto LFG, Hamamura C, Carvalho T, Cerignoni F (2017) Números detalhados do Novo Código Florestal e suas implicações para os PRAs. *Sustentabilidade em Debate* (5):1-12.

Gkioungkis I, Kallioras A, Pliakas F, Pechtelidis A, Diamantis V, Diamantis I, Ziogas A, Dafnis I (2015) Assessment of soil salinization at the eastern Nestos River Delta, N.E. Greece. *Catena* 128:238-251.

Gómez-Aparicio L, Gómez JM, Zamora R (2005) Microhabitats shift rank in suitability for seedling establishment depending on habitat type and climate. *Journal of Ecology* 93:1194-1202.

Gomes FP (1990) Curso de estatística experimental. 13. ed. Nobel, Piracicaba.

Gonçalves FB, Ferreira RA, Gama DC, Freitas BAL (2021) Chuva de sementes em remanescente de Caatinga, Porto da Folha, Sergipe, Brasil. *Advances in Forestry Science* 8(1):1279-1290.

Gonçalves JLM, Freixêdas VM, Kageyama PV, Gonçalves JC, Dias JHP (1992) Produção de biomassa e sistema radicular de espécies de diferentes estágios sucessionais. *Revista Instituto Florestal* 4(1):363-368.

Guariguata MR, Evans K (2019) A diagnostic for collaborative monitoring in forest landscape restoration. *Restoration Ecology* 1-8.

Guerra A, Reis LK, Borges FLG, Ojeda PTA, Pineda DAM, Miranda CO, Maidana DPFL, Santos TMR, Shibuya PS, Marques MCM, Laurance SGW, Garcia LC (2020) Ecological restoration in Brazilian biomes: Identifying advances and gaps. *Forest Ecology and Management* 458.

Guimaraes VS, Zaidan FH, Braga JL (2021) Inovação na Rede de Sementes do Xingu: proposta para o aprimoramento da eficiência na cadeia de suprimentos| Innovation in Xingu Seeds Network: proposal for the improved supply chain efficiency. *Meio Ambiente (Brasil)* 3(1).

Guo MM, Wang WL, Kang HL, Yang B, Li JM (2019) Changes in soil properties and resistance to concentrated flow across a 25-year passive restoration chronosequence of grasslands on the Chinese Loess Plateau. *Restoration Ecology* 1-11.

Heth D (1983) Spot sowing of mediterranean pines under shelter. *Tree Planters' Notes* 34(4):23-27.

Hok L, Sá JCM, Boulakia S, Reyes M, Leng V, Kong R, Tivet FE, Briedis C, Hartman D, Ferreira LA, Magno T, Pheav S. (2015) Short-term conservation agriculture and biomass-C input impacts on soil C dynamics in a savanna ecosystem in Cambodia. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 214:54-67.

Holland SM (2008) Non-metric multidimensional scaling (MDS). Department of Geology, University of Georgia, Athens, Tech. Rep. GA.

Holmgren M, Scheffer M (2010) Strong facilitation in mild environments: The stress gradient hypothesis revisited. *Journal of Ecology* 98(6):1269–1275.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2004) Mapa de Biomas do Brasil. Escala 1:5.000. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Rio de Janeiro.

Instrução Normativa IBAMA n° 04, de 13 de abril de 2011. Procedimentos para elaboração de Projeto de Recuperação de Área Degradada – PRAD ou Área Alterada. <http://www.mp.rs.gov.br/ambiente/legislacao/id5845.htm?impressao=1> (acessado 20 setembro 2018).

IRPA - Instituto Regional da Pequena Agropecuária Apropriada (2019) Experiências de Reaatingamento no Semiárido Brasileiro, IRPA, Bahia.

ISA - Instituto Socioambiental. Muvuca que vira floresta (2018) <https://site-antigo.socioambiental.org/pt-br/blog/blog-do-xingu/muvuca-que-vira-floresta> (acessado 09 Abril 2022).

Kersten RA (2006) Epifitismo vascular na Bacia do Alto Iguaçu, Paraná. Tese, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

Kraft NJ, Adler PB, Godoy O, James EC, Fuller S, Levine JM (2015) Community assembly, coexistence and the environmental filtering metaphor. *Functional ecology* 29(5):592-599.

Knoechelmann CM (2019) Efeito das formigas cortadeiras sobre a regeneração na Caatinga. Tese, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

Kosmas C, Gerontidis S, Marathianou M (2000) The effect of land use change on soils and vegetation over various lithological formations on Lesbos (Greece). *Catena* 40:51-68.

Lal R (1997) Degradation and resilience of soils. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. The Royal Society Printed in Great Britain* 352:997-1010.

Lamb D, Erskine PD, Parrotta J (2005) Restoration of degraded tropical forest landscapes. *Science* 310:1628-1632.

Lanari MO, Coutinho R (2010) Biodiversidade e Funcionamento de Ecossistemas: síntese de um paradigma e sua expansão em ambientes marinhos. *Oecologia Australis* 14(4):959-988.

Lanzanova ME, Nicoloso RS, Lovato T, Eltz FLF, Amado TJC, Reinert DJ (2007) Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 31:1131-1140.



Leal IR, Silva JD, Tabarelli M, Lacher JrTE (2005) Changing the course of biodiversity conservation in the Caatinga of Northeastern Brazil. *Conservation Biology* 19:701– 706.

Leal IR, Tabarelli M, Silva JMC (2003) Ecologia e conservação da Caatinga. Editora Universitária da UFPE, Recife.

Lemos RC, Santos RD (1996) Manual de descrição e coleta de solo no campo. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Centro Nacional de Pesquisa de Solos.

Lima AT, Meiado MV (2018) Effect of hydration and dehydration cycles on *Mimosa tenuiflora* seeds during germination and initial development. *South African Journal of Botany* 116:164-167.

Lima-Filho OF, Ambrosano EJ, Rossi F, Carlos JAD (2014) (eds.) Adubação verde e plantas de cobertura do Brasil. Embrapa, Brasília.

Lima MM, Santos LA, Moura FBP, Nogueira SEM (2015) Sobrevivência inicial de seis espécies usadas na recuperação de uma área degradada na Caatinga. *Revista Ouricuri* 5(2):132-137.

Linden RD, Hendrix PF, Coleman DC, Van Vilet PCJ (1994) Faunal indicators of soil quality. In: Doran JW, Coleman DC, Bezdicek DF, Stewart BA (eds.). Defining soil quality for a sustainable environment. *Soil Science Society of American* 91-106.

Lobe I, Amenlung W, Du Preez CC (2001) Losses of carbon and nitrogen with prolonged arable cropping from sandy soils of the South African Highveld. *European Journal of Soil Science* 52:93-101.

Lorenzi H (2008) Plantas daninhas do Brasil: terrestres, aquáticas e tóxicas. 4.ed. Instituto Plantarum, São Paulo.

Luken JO (1990) Dirigindo a sucessão ecológica. Chapman e Hall, Londres.

Machado IC, Lopes AV (2004) Floral traits and pollination systems in the Caatinga, a Brazilian tropical dry forest. *Annals of Botany* 94:365-376.

Machado FS, Gonçalves FLA, Silva FF, Lima KDR, Cavalcanti CR, Campello EFC, Cunha CF, Araújo JE, Fontes MA, Resende AS (2021) Estratégias de recuperação ambiental de áreas de produção de petróleo e gás em terra na caatinga. In Resende AS, Chaer GM (ed.). *Recuperação ambiental em áreas de produção de petróleo e gás em terra na Caatinga*. Embrapa, Brasília.

Maestre FT, Bautista S, Bellot J (2003) Vallejo, R. Small-scale Environmental Heterogeneity and Spatiotemporal Dynamics of Seedling Establishment in a Semiarid Degraded Ecosystem. *Ecosystems* 6:630–643.

Maia GN (2004) *Caatinga: árvores e arbustos e suas utilidades*. D&Z, São Paulo.

MapBiomias, Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil, (2021). <https://mapbiomas.org/> (acessado 10 Abril 2022).

Marcuzzo SB (2012) *Métodos e espécies potenciais à restauração de áreas degradadas no Parque Estadual Quarta Colônia, RS*. Tese, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

Martins SV (2001) *Recuperação de matas ciliares*. Aprenda Fácil, Viçosa.

Martins SV (2014) *Recuperação de Áreas Degradadas: Ações em áreas de preservação permanente, voçorocas, taludes rodoviários e de mineração*. Aprenda Fácil, Viçosa.

Mechi A, Sanches DL (2010) Impactos ambientais da mineração no estado de São Paulo. *Revista de Estudos Avançados* 24(68).

Medeiros JA (2018) *Reabilitação de áreas em processo de desertificação no semiárido norterio-grandense com a faveleira: espécie-chave cultura do bioma caatinga*. Tese, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

Medeiros UTO (2022) Projeção de produção de biomassa em um programa de restauração da caatinga. Monografia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte.

Meiado MV (2008) A planta facilitadora *Trischidium molle* (Benth) H. E. Ireland (Leguminosae) e sua relação com a comunidade de plantas em ambiente semiárido no Nordeste do Brasil. Dissertação, Universidade Federal do Pernambuco, Recife.

Meiado MV (2014) Banco de sementes no solo da Caatinga, uma Floresta Tropical Seca no Nordeste do Brasil. *Informativo Abrates* 24:39-43.

Meiado MV, Rafael LM, Castro RA, Rodrigues RG (2020) Challenges and perspectives for recovering socioecological systems in the Caatinga, a Brazilian Tropical Dry Forest. In: Severino RR, Pinto FC, Santos CP (org.). *Forest Landscape Restoration and Social Opportunities in the Tropical World*. 1ed. Centro de Pesquisas Ambientais do Nordeste, Recife 1:126-156.

Meiado MV, Silva FFS, Barbosa DCA, Siqueira Filho JA (2012) Diásporos da Caatinga: uma revisão. In: Siqueira Filho JA (Org.). *Flora das Caatingas do Rio São Francisco: História Natural e Conservação*. Andrea Jakobsson Estúdio Editorial, Rio de Janeiro 306-365.

Mello BLC (2016) *Mimosa tenuiflora*: potencial para uso em programas de restauração florestal da caatinga. Monografia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

Melo FPL (2017) The socio-ecology of the Caatinga: Understanding how natural resource use shapes an ecosystem. In: [s.l.] Springer, Cham.

Melo FPL, Pinto SRR, Brancalion PHS, Castro PS, Rodrigues RR, Aronson J, Tabarelli M (2013) Priority setting for scaling-up tropical forest restoration projects: Early lessons from the Atlantic Forest Restoration Pact. *Environmental Science & Policy* 33:395-404.

Mesquita B et al. (2013) Protocolo de Monitoramento para Programas e Projetos de Restauração Florestal. Pacto pela restauração da Mata Atlântica.

Miccolis A, Peneireiro FM, Marques HR, Vieira DLM, Arco-Verde MF, Hoffmann MR, Rehder T, Pereira AVB (2016) Restauração ecológica com sistemas agroflorestais: como conciliar conservação com produção. Embrapa Cerrados.

MMA - Ministério do Meio Ambiente (2004) Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca PAN – Brasil. [http://www.mma.gov.br/estruturas/sedr\\_desertif/\\_arquivos/pan\\_brasil\\_portugues.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/sedr_desertif/_arquivos/pan_brasil_portugues.pdf) (acessado 20 Setembro 2018).

MMA - Ministério do Meio Ambiente (2017) Potencial de regeneração natural da vegetação na Caatinga. [https://antigo.mma.gov.br/images/arquivos/biomas/mata\\_atlantica/Potencial%20de%20regeneracao%20natural%20caatinga.pdf](https://antigo.mma.gov.br/images/arquivos/biomas/mata_atlantica/Potencial%20de%20regeneracao%20natural%20caatinga.pdf) (acessado 10 Fevereiro 2020).

Morsing J, Kepfer-Rojasa S, Baastrup-Spohrb L, Rodríguez AL, Raulund-Rasmussen K (2020) Litter legacy after spruce plantation removal hampers initial vegetation establishment. *Basic and Applied Ecology* 42:4–14.

Mota S (2008) Gestão Ambiental de Recursos Hídricos. ABES, Rio de Janeiro.

Müeller-dombois D, ElleMBERG H (1974) Aims and methods of vegetation ecology. J. Wiley & Sons, New York.

Nascimento JPB (2016) Hidratação descontínua de sementes como nova alternativa para a produção de mudas destinadas à recuperação de ambientes degradados na Caatinga. Dissertação, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe.

Nielsen S, Santiago F, Dias I, Jalfim F, Blackburn R (2013) Estoque de carbon organic no solo em área de manejo agroecológico da caatinga no sertão do Piauí. *Cadernos de Agroecologia* 8(2).

Novais RF, Alvarez VVH, Barros NF, Fontes RLF, Cantarutti RB, Neves JCL (2007) Fertilidade do Solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, Minas Gerais.

Odum E, Barrett GW (2007) Ecologia da Paisagem. In Odum, E.; Barrett, G. W. Fundamentos de ecologia. Thomson Learning, São Paulo.

Oliveira E, Vital BR, Pimenta AS, Della Lucia RM, Ladeira AMM, Carneiro ACO (2006) Estrutura anatômica da madeira e qualidade do carvão de *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. *Revista Árvore* 30(2):311-318.

Oliveira DG, Prata APN, Ferreira RA (2013) Herbáceas da Caatinga: composição florística, fitossociologia e estratégias de sobrevivência em uma comunidade vegetal. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias* 8(4):623-633.

Oliveira GM, Barbosa LG, Matias JR, Silva JE, Ribeiro RC, Dantas BF (2014) Germinação de sementes de espécies arbóreas nativas da Caatinga em diferentes temperaturas. *Scientia Plena* 10(4).

Oliveira JRG, Silva EM, Teixeira-Rios T, Melo NF, Yano-Melo AM (2015) Response of an endangered tree species from Caatinga to Arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus in the initial development of *Mimosa tenuiflora* mycorrhization and phosphorus fertilization. *Acta Botanica Brasilica* 29:94–102.

Pakeman RJA, Small JLA (2005) The role of the seed bank, seed rain and the timing of disturbance in gap regeneration. *Journal of Vegetation Science* 16:121-130.

Paterno GB, Siqueira-Filho JA, Ganade G (2016) Species-specific facilitation, ontogenetic shifts and consequences for plant community succession. *Journal of Vegetation Science* 1-10.

Pedrotti A, Chagas RM, Ramos VC, Prata APN, Lucas AAT, Santos PB (2015) Causas e consequências do processo de salinização dos solos. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental* 19(2):1308-1324.

Peichl M, Leava NA, Kiely G (2012) Above- and below-ground ecosystem biomass, carbon and nitrogen allocation in recently afforested grassland and adjacent intensively managed grassland. *Plant and Soil* 350:281–296.

Pereira ON (2011) Reintrodução de espécies nativas em área degradada de caatinga e sua relação com os atributos do solo. Dissertação, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba.

Peres MCL (2012) Efeito de clareiras naturais sobre as assembléias de formigas (Formicidae) e aranhas (Araneae) num trecho de Mata Atlântica. Tese, Instituto de Biologia da Universidade Federal da Bahia, Bahia.

Pereira MS et al. (2011) Manual técnico Conhecendo e produzindo sementes e mudas da caatinga. Associação Caatinga, Fortaleza.

Perez-Harguindeguy, N. et al. (2016) Corrigendum to: new handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of botany* 64(8):715-716.

Petchey OL, Gaston KJ (2006) Functional diversity: back to basics and looking forward. *Ecological Letters* 9(6)741-758.

Pietro-Souza W, Silva NMD, Campos EPD (2014) Chuva de sementes em remanescentes florestais de Campo Verde, MT. *Revista Árvore* 38(4):689-698.

Pilon NAL, Buisson E, Durigan G (2017) Restoring Brazilian savanna ground layer vegetation by topsoil and hay transfer. *Restoration Ecology* 26(1)73–81.

Piña-Rodrigues FCM, Aoki J (2014). Chuva de sementes como indicadora do estágio de conservação de fragmentos florestais em Sorocaba-SP. *Ciência Florestal* 24:911-923.

Primack RB, Rodrigues E (2001) Biologia da Conservação, Londrina, Editora Planta.

R Development Core Team. (2013) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <https://www.r-project.org/about.html> (acessado em 10 Abril 2018).

Reis A, Becchara FC, Espíndola MB, Vieira NK, Souza LL (2003) Restauração de áreas degradadas: a nucleação como base para incrementar os processos sucessionais. *Natureza e Conservação* 1(1).

Reis A, Bechara C, Tres DR (2010) A Nucleação na restauração ecológica de ecossistemas tropicais. *Revista Scientia Agricola* 67(2):244-250.

Reis A, Bechara FC, Tres DR, Trentin BE (2014) Nucleação: concepção biocêntrica para a restauração ecológica. *Ciência Florestal* 24(2):509-518.

Reis AM, Araújo, EL, Ferraz EMN, Moura NA (2006) Inter-annual variations in the floristic and population structure of an herbaceous community of “caatinga” vegetation in Pernambuco, Brazil. *Revista Brasil. Bot.* 29(3):497-508.

Reis DO, Mendonça DA, Fabricante JR (2022) Levantamento florístico e fitossociológico do estrato arbustivo-arbóreo de uma área de Caatinga em Pernambuco, Brasil. *Journal of Environmental Analysis and Progress* 7(1):041-051.

Ricklefs RE (2010) A economia da Natureza. 6 ed. Guanabara Koogan, Rio de Janeiro.

Rocha KR, Bacelar Júnior AJ (2018) Anova medidas repetidas e seus pressupostos: análise passo a passo de um experimento. *Perspectivas da Ciência e Tecnologia* 10:29-51.

Rodal MJNF, Sampaio EVSB, Figueiredo MA (1992) Manual sobre métodos de estudos florísticos e fitossociológicos: ecossistema caatinga. Sociedade Botânica do Brasil, Brasília.

Rodrigues BD, Martins SV, Leita HG (2010) Avaliação do potencial da transposição da serapilheira e do banco de sementes do solo para restauração florestal em áreas degradadas. *Revista árvore* 34(1):65-73.

Rodrigues LB (2022) Avaliação do banco de sementes de uma área em processo de recuperação na Caatinga. Monografia, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Petrolina, Pernambuco.

Rodrigues LP (2014) Efeito da compactação do solo por máquinas pesadas. Monografia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná.

Rodrigues MS, Souza C, Lima DD, Silva SDP, Alves DC, Silva NM (2016). Impacto do cultivo do coqueiro irrigado na qualidade física do solo na região semiárida brasileira. *Ciencia del Suelo* 34(1):139-144.

Rodrigues RR, Lima RAF, Gandolfi S, Nave AG (2009a) On the restoration of high diversity forests: 30 years of experience in the Brazilian Atlantic Forest. *Biological Conservation* 142:1242–1251.

Rodrigues RR, Gandolfi S (1998) Restauração de florestas tropicais: subsídios para uma definição metodológica e indicadores de avaliação e monitoramento. In: Dias LE, Mello JWV (eds.). Recuperação de áreas degradadas. UFV, Viçosa.

Rodrigues RR, Gandolfi S (2000) Conceitos, tendências e ações para a recuperação de florestas ciliares. In: Rodrigues RR, Leitão-Filho H (eds.). Matas Ciliares: Conservação e Recuperação, São Paulo.

Rodrigues RR, Santin Brancalion PH, Iserhagen I (2009b) Pacto pela restauração da mata atlântica: referencial dos conceitos e ações de restauração florestal. LERF/ESALQ: Instituto BioAtlântica, São Paulo.

Rosenfield MF (2017) Processos ecossistêmicos e funcionalidade de florestas em restauração. Tese, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.



Sales FCV (2008) Revegetação de área degradada da caatinga por meio da semeadura ou transplantio de mudas de espécies arbóreas em substrato enriquecido com matéria orgânica. Dissertação, Universidade Federal de Campina Grande, Patos, Paraíba.

Sampaio AB, Ribeiro KT, Vieira DM, Silva DCB (2021) Guia de restauração ecológica para gestores de unidades de conservação. 1. ed. Instituto Chico Mendes, Brasília..

Santana JAS, Souto JS (2006) Diversidade e estrutura fitossociológica da caatinga na estação ecológica do Seridó-RN. *Revista de Biologia e Ciências da Terra* 6(2):232-242.

Santo FSE, Siqueira Filho JA, Melo Júnior JCF, Gervásio ES, Oliveira AMB (2010) Quanto vale as sementes da Caatinga? uma proposta metodológica. *Revista Caatinga* 23(3):137-144.

Santos Júnior NA, Botelho AS, Davide AC (2004) Estudo da germinação e sobrevivência de espécies arbóreas em sistema de semeadura direta, visando à recomposição de mata ciliar. *Cerne* 10(1):103-117.

Santos Júnior NA (2000) Estabelecimento inicial de espécies florestais nativas em sistema de semeadura direta. Dissertação, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais.

Santos MFAV, Guerra TNF, Sotero MC, Santos JIN (2009) Diversidade e densidade de espécies vegetais da caatinga com diferentes graus de degradação no município de Floresta, Pernambuco, Brasil. *Rodriguésia* 60:389-402.

Santos PL (2010) Semeadura direta com espécies florestais nativas para a recuperação de agroecossistemas degradados. Dissertação, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão.

Sá IB, Cunha TJF, Teixeira AHC, Angelotti F, Drumond MA (2010) Processos de desertificação no Semiárido brasileiro. In: Sá B, Silva PCG (eds.) *Semiárido brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação* (I). EMBRAPA, Brasília.

SENA PHA et al. (2021) Biocultural restoration improves delivery of ecosystem services in social-ecological landscapes. *Restoration Ecology* v. n/a, n. n/a, p. e13599.

SER - Society for Ecological Restoration (1991) Program and abstracts, 3rd Annual Conference, Orlando, Flórida.

SER - Society for Ecological Restoration International e Policy Working Group (2004). The SER International Primer on Ecological Restoration. [www.ser.org](http://www.ser.org) (acessado 10 Janeiro 2019).

Silva JMC, Leal IR, Tabarelli M (2017) Caatinga: The Largest Tropical Dry Forest Region in South America. Springer.

Silva LND (2016). Diversidade genética em três espécies de *Chascolytrum* Desv (Proaceae, Pooideae, Poeae) ameaçadas de extinção. Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul.

Silveira BR, Nascimento JM, Kozovits AR, Messias MCTB, Bahia TO (2021) Florestas tropicais podem ser doadoras sustentáveis de topsoil e serrapilheira para recuperação de áreas degradadas? Anais do II Workshop Fênix - Emborcação P&D 0602 – Estratégias para acelerar a sucessão em áreas degradadas no entorno da UHE - Emborcação.

Siqueira-Filho JA et al. (2012) Flora das Caatingas do Rio São Francisco: História Natural e Conservação. Andrea Jakobsson Estúdio Editorial, Rio do Janeiro.

Smith DM (1986) The practice of silviculture. 8.ed. John Wiley, New York.

Soares DB, Mota Filho FO, Nóbrega RS (2011) Sobre o processo de desertificação. *Revista Brasileira de Geografia Física* 1:174-188.

Socolowski F, Vieira DC, Souza BR, Melo FP, Rodrigues RG (2021) Restauración de la Caatinga: métodos propuestos para recuperar el más exclusivo y menos conocido ecosistema de Brasil. *Multequina* 30 (2):247-263.

Sousa FQ (2017) Transposição do solo para restauração de uma área degradada no núcleo de desertificação do Seridó, na Paraíba. Tese, Universidade Federal da Paraíba, Areia, Paraíba.

Sousa FQ, Souto JS, Leite AP, Holanda AC, Agra PFM, Santos LC (2020) Transposição do banco de sementes do solo para restauração ecológica da caatinga no Núcleo de Desertificação do Seridó. *Brazilian Journal of Development* 6(7):50120-50138.

Souza, PD (2022) Avaliação de exótica invasora *Aristida adscensionis* L. (Poaceae) na riqueza e abundância de uma área de recuperação ecológica na Caatinga. Monografia, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Petrolina, Pernambuco.

StatSoft. STATISTICA 13 (2012) StatSoft South America. <http://www.statsoft.com.br> (acessado 20 Abril 2020).

Steffen GPK, Steffen RB, Antonioli ZI (2011). Contaminação do solo e da água pelo uso de agrotóxicos. *Tecnológica* 15(1):15-21.

Teodoro RB, Oliveira FLD, Silva DMND, Fávero C, Quaresma MAL (2011). Leguminosas herbáceas perenes para utilização como coberturas permanentes de solo na Caatinga Mineira. *Revista Ciência Agronômica* 42:292-300.

Texeira-Rios T, Oliveira JRG, Yano-Melo AM (2016) Arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus in the initial development of *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. *Brazilian Journal of Botany* 39(4):997-1004.

The Nature Conservancy, TNC (2018) Restauração da vegetação nativa do Brasil: Caracterização de técnicas e estimativas de custo como subsídio a programas e políticas públicas e privadas de restauração em larga escala. <https://www.tnc.org.br/content/dam/tnc/nature/en/documents/brasil/restauracao-da-vegetacao-nativa-no-brasil.pdf> (acessado 15. Fevereiro 2022).

Trujillo-Miranda AL, Toledo-Aceves T, López-Barrera F, Gerez-Fernández P (2019) Active versus passive restoration: Recovery of cloud forest structure, diversity and soil condition in abandoned pastures. *Ecological Engineering* 117:50–61.

Uramoto K, Walder JM, Zucchi RA (2005) Análise quantitativa e distribuição de populações de espécies de *Anastrepha* (Diptera: Tephritidae) no campus Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP. *Neotropical Entomology* 34:33-39.

Vezzani FM (2015). Solos e os serviços ecossistêmicos. *Revista Brasileira de Geografia Física* 8:673-684.

WebAmbiente (2022) <https://www.webambiente.gov.br/> (acessado 18 Maio 2022).

Winsa H, Bergsten U (1994) Direct seeding of *Pinus sylvestris* using microsite preparation and invigorated seed lots of different quality: 2-year results. *Canadian Journal of Forest Research* 24(1):77-86.

Whitmore TC (1978) Gaps in the forest canopy. In: Tomlinson, Z. Tropical trees as living systems. London, Cambridge Univ. Press.

Xiao-Jun DU, Xian-Ming GAO, Ke-Ping MA (2003) Diagnosis of the degree of degradation of an ecosystem: the basis and precondition of ecological restoration. *Acta Phytocologica Sinica* 27(5):700-708.

Zhao WZ, Xiao HL, Liu ZM, Li J (2005) Soil degradation and restoration as affected by land use change in the semiarid Bashang area, northern China. *Catena* 59:173–186.