

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE BIOCÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ECOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA BACHARELADO

**QUANTO CUSTA RESTAURAR A CAATINGA? UMA ANÁLISE DE CUSTO-BENEFÍCIO
DE MÉTODOS DE RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA**

EDJANE SILVA DAMASCENO

NATAL, RN
2016

EDJANE SILVA DAMASCENO

**QUANTO CUSTA RESTAURAR A CAATINGA? UMA ANÁLISE DE CUSTO-BENEFÍCIO
DE MÉTODOS DE RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA**

Monografia apresentada, como pré-requisito para a conclusão do Curso de Graduação em Ecologia pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Orientadora: Prof^a. Dr^a Gislene Maria da Silva Ganade
Co-orientadora: Prof^a Dr^a Adriana Rosa Carvalho

NATAL, RN
2016

EDJANE SILVA DAMASCENO

**QUANTO CUSTA RESTAURAR A CAATINGA? UMA ANÁLISE DE CUSTO-BENEFÍCIO
DE MÉTODOS DE RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA**

Monografia apresentada, como pré-requisito para a
conclusão do Curso de Graduação em Ecologia pela
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Natal, 10 de Junho de 2016.

BANCA AVALIADORA

Dr. Guilherme Gerhardt Mazzochini
Departamento de Ecologia – UFRN

Prof. Dr. Ronaldo Angelini
Departamento de Engenharia Civil – UFRN

Prof^ª. Dr^ª. Alexandre Fadigas de Souza
Departamento de Ecologia – UFRN
(Suplente)

“Acima de tudo, tenham amor, pois o amor une
perfeitamente todas as coisas”.

Apóstolo São Paulo.

AGRADECIMENTOS

Sou grata Aquele que me mostrou o sentido da vida, O qual acredito ser o Único merecedor de toda honra e glória, “porque Dele, por Ele e para Ele são todas as coisas”. Ao Deus que se faz presente nas pequenas ações de amor, sou grata.

A minha mãe por todo amor, esforço e perseverança para nunca deixar faltar absolutamente nada durante minha vida. A minha vó, pelo cuidado e amor demonstrado em ações e pelo apoio, mesmo sem entender claramente o que eu realmente estudo/trabalho. A minha querida irmã Janaína pelo incondicional apoio e por ter sido o exemplo de nunca desistir da educação. Ao meu pai que apesar de não poder estar aqui para vivenciar esse momento, viveu e morreu para me oferecer educação. Obrigada, pai!

A minha amada orientadora, Gis, pelo cuidado nos campos, pela compreensão nas ausências, por todo amor e orientação que foram dados durante esses quatro anos de graduação. A minha querida co-orientadora, Adriana Carvalho, pelo companheirismo, paciência e cuidado durante a fase de desenvolvimento deste trabalho.

Ao homem da minha vida, pelo amor, carinho, cuidado e por sempre suportar os estresses do cotidiano juntos. Por contribuir de forma inquestionável na minha formação intelectual e pessoal, ao Adler meus carinhosos agradecimentos.

Aos discentes do Departamento de Ecologia, por todo conhecimento transferido e aos discentes dos demais departamentos, dos quais pude adquirir conhecimento.

A Dri pelo incentivo e ajuda na elaboração desse trabalho. Ao Guiga pela ajuda nas análises estatísticas e gráficos.

Ao amigo Paulo Ivo, pela contribuição nas correções textuais.

Aos amigos que ecologia me trouxe, em especial a Carvalho, Garrido, Aninha, Samara, Luan e Ed por estarem sempre apoiando e ajudando uns aos outros numa amizade recíproca.

A equipe do Laboratório de Ecologia da Restauração, que ajudou na montagem do experimento e coletas dos dados, em especial: Léo, Felipe, May, Gustavão, Adler, Tida, Bruna e aos escoteiros de Assú/RN.

A esta universidade, pela estrutura educacional. A CAPES e CNPq, agencias financiadoras do projeto de pesquisa, e a PROPESQ/UFRN pela bolsa de Iniciação Científica, que contribuiu para realização deste trabalho de conclusão de curso.

SUMÁRIO

1	RESUMO	6
2	ABSTRACT	7
3	INTRODUÇÃO	8
4	MATERIAIS E MÉTODOS	11
	4.1. Descrição da área de estudo	11
	4.2. O experimento de restauração ecológica no semiárido	12
	4.3. Custo	13
	4.4. Custo-benefício	14
	4.5. Análise estatística	15
5	RESULTADOS	16
	5.1. Custo	16
	5.2. Benefício: Altura média das plantas	17
	5.3. Custo-benefício	18
6	DISCUSSÃO	20
7	CONCLUSÃO	22
8	REFERÊNCIAS	23
9	MATERIAL SUPLEMENTAR	26

1 RESUMO

O processo de restauração ecológica é uma atividade indispensável na recuperação de ecossistemas degradados. Diversos métodos de restauração vem sendo empregadas de acordo com o bioma a ser restaurado, seu estado de degradação e os recursos disponíveis. A maioria dos trabalhos de restauração focam na eficiência da recuperação ambiental com pouca ou nenhuma ênfase no custo-benefício deste processo. Alguns métodos tem produzido resultados insatisfatórios por terem baixo benefício, como baixo crescimento das plantas, e possuem alto custo. Dentre os métodos de alto benefício, pouco se sabe de seu custo de implementação e monitoramento, já que esta informação não é avaliada em relação à eficiência da restauração. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar o custo-benefício de 20 métodos de restauração ecológica formados a partir da combinação de cinco técnicas de plantio (água, folha sobre o solo, água e folha, agrofloresta e controle) e quatro tratamentos de forma das mudas. A altura média das plantas após um ano foi usada como benefício na análise de Custo-Benefício. O custo dos métodos variou de R\$ 14,18 a R\$ 61,42 por planta, com o menor custo no tratamento controle usando muda pequena. No entanto, a muda grande (raiz e parte aérea) no controle teve menor custo-benefício, pois os gastos para se produzir esta muda foi compensado pela maior altura final das plantas que sobreviveram. Logo, muda de parte aérea e raiz grandes tem menor custo-benefício e são indicadas para se obter sucesso na restauração da Caatinga sem adição de água e/ou folhíço.

2 ABSTRACT

Ecological restoration process is a key activity for recovering degraded ecosystems. Several restoration methods have been applied depending on the biome to be restored, its state actual degradation and the resources available. Most studies on restoration focus on the efficiency of environmental recovery with few or no emphasis on the cost-benefit of the entire process. Some methods have produced unfeasible results due to the low benefit produced, such as low growth of plants and due to the high expenses involved. Among the most benefiting methods, there is not enough knowledge available on their cost for implementing and monitoring, given that economic costs are not evaluated in relation to the efficiency of the restoration. Here we aimed to evaluate the cost-benefit of 20 methods for ecological restoration. Methods were formed by combining five plantation techniques [using (1) water, (2) litter on soil, (3) water and litter, (4) agroforestry and (5) the control, with four treatments of seedlings shape. The average height of the plants after one year was used as benefit in the cost-benefit analysis. The economic cost of the methods ranged from USD 6.36 to USD 27.55 per plant. The lowest cost was registered in the control treatment using small seedlings (i.e. short root and small biomass aboveground). However, large seedlings (longer root and large biomass aboveground) in the control were the best option and was less cost-effective method, given that the costs to produce the seedlings were compensated by the higher final height of the survivor individuals. Therefore, seedlings with longer root and large biomass aboveground have less cost-benefit and are recommended to successfully restore of Caatinga areas without the use of irrigation system and /or litter addition.

3 INTRODUÇÃO

Áreas semiáridas estão presentes em todo o globo terrestre. Mais de 33% da cobertura da Terra é ocupada por áreas áridas e semiáridas (Reynolds, 2001) e com as alterações climáticas que são esperadas, esse número pode aumentar (Schlesinger *et al.* 1990). Em decorrência das condições ambientais e grande pressão antrópica, essas áreas possuem uma alta probabilidade de degradação (Puigdefabregas & Mendizabal, 1998). Devido sua alta fragilidade, a restauração ecológica nesses ambientes semiáridos é extremamente importante. A restauração ecológica tem por fim recuperar os serviços ecossistêmicos como por exemplo, sequestro de carbono atmosférico e proteção dos solos (Keller & Goldstein, 1998, Castillo *et al.* 1997). Também é de vital importância para evitar a expansão da desertificação, processo comum de degradação da terra em ambientes semiáridos (Reynolds, 2001).

A Caatinga é um ecossistema inserido na região semiárida brasileira com baixa resiliência. Dados do Ministério do Meio Ambiente mostram que 46% de sua área encontra-se desmatada e cerca de 15% em processo de desertificação (Leal *et al.*, 2005). Este ecossistema semiárido é alvo constante de interferência humana e atualmente está ameaçada pelo avanço do desmatamento e perturbações antropogênicas, como corte intenso de madeira nativa e criação de animais pastadores em áreas naturais (MMA, 2016). Essas perturbações são denominadas crônicas, por serem provenientes de diferentes fontes e ocorrerem de forma constante, modificando gradualmente a paisagem (Martorell & Peters, 2005) e afetam negativamente comunidades de plantas, principalmente no estágio inicial de vida, podendo também estar contribuindo para formação de florestas arbustivas na Caatinga (Ribeiro *et al.* 2015) e que pode proporcionar ambientes ainda mais propícios à desertificação nesse ecossistema. O pastejo extensivo de animais influencia negativamente a altura da vegetação de caatinga e também impede a regeneração natural das plantas neste ecossistema (Marinho *et al.* 2016).

Este cenário de perturbação antropogênica e desertificação aliado às condições climáticas torna a Caatinga um ambiente prioritário para a restauração. Contudo, os investimentos financeiros para essas ações são relativamente altos, principalmente devido a necessidade do uso de irrigação. Porém, o sucesso desses projetos ainda é pouco satisfatório, com uma alta taxa de mortalidade. Isso faz com que a restauração no semiárido brasileiro tenha um alto custo e baixo benefício, podendo não alcançar o propósito da restauração ecológica, que é retornar as funções do ecossistema próximas àquelas antes da perturbação ocorrida (Perrow & Davy, 2002). A falta de conhecimento ecológico, além de poucos estudos relacionados ao custo de restauração, são dificuldades enfrentadas nos projetos de restauração ecológica nestes ambientes semiáridos. (Azevêdo *et al.* 2012).

Existem diversas formas para analisar a eficiência dos projetos de restauração ecológica. A eficiência na restauração ecológica pode ser medida tanto com a quantificação da regeneração natural

e número de plantas sobreviventes, quanto o crescimento das mudas plantadas em campo (Ahtikoski *et al.* 2010, Grose, 2013, Rigueira & Neto, 2013). No entanto, ainda são poucos os trabalhos que agregam valor econômico à eficiência da restauração ecológica, como a avaliação se esses métodos trarão o benefício desejado a um menor custo (Robbins & Daniels, 2012). A dificuldade de análise econômica por parte de muitos profissionais que trabalham com restauração ecológica pode ser um fator que explica porque ainda há poucos trabalhos de economia ecológica sobre a restauração (Robbins & Daniels, 2012). Muitos trabalhos de restauração ecológica são publicados considerando principalmente teorias ecológicas na aplicação de novos métodos (Suding *et al.* 2004;Verdu *et al.* 2012). No entanto, apenas 2,5% dos estudos publicados sobre restauração fornecem informações econômicas juntamente às informações ecológicas dos métodos (Wortley *et al.* 2013). Os trabalhos que incluíram análises econômicas demonstraram que a restauração passiva (quando não há intervenção humana no processo) tem menor custo-benefício, ao passo que a restauração ativa (quanto tem contribuição humana no processo) normalmente tem seus custos relativamente altos compensados pelos benefícios gerados pela restauração (Birch *et al.* 2010). Para ambientes aquáticos, mostraram que é possível indicar o método de coleta de sementes de espécies aquáticas com maior eficiência, bem como aprimorar técnicas de armazenamento das sementes e também definir os custos estimados para restauração de populações das plantas aquáticas marinhas em larga escala por meio de sementes (Busch *et al.* 2010). O entendimento da forma do sucesso da restauração e a clareza sobre a variação ambiental local atrelada ao conhecimento dos custos dos métodos, podem contribuir para tomadas de decisões econômicas na restauração (Kimball *et al.*, 2015).

O uso de ferramentas para desenvolvimento de trabalhos como estes é interessante para auxiliar a aplicabilidade dos métodos. Análises de custo-benefício tornam-se uma importante ferramenta de planejamento, escolha e avaliação de técnicas implementadas nos projetos de restauração ecológica (Robbins & Daniels, 2012). Tais análises garantem que o orçamento disponível para ações de restauração sejam investidos da melhor maneira possível, garantindo assim, a eficiência da restauração (Birch *et al.* 2010; Wilson *et al.* 2011; Auerbach *et al.* 2014).

A Caatinga ainda é um ambiente de informações obscuras. Conhecer este ambiente e desenvolver tecnologias para garantir o sucesso da restauração é o que a base de pesquisa do Laboratório de Ecologia da Restauração da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (LER-UFRN) tem feito a mais de quatro anos. A partir do entendimento de características físicas e climáticas da região, foi desenvolvido uma tecnologia para produção de mudas com raízes de um metro de comprimento (melhor descrita nos materiais e métodos) a qual proporciona um contato imediato com áreas úmidas do solo. Com isso, o objetivo desse trabalho foi avaliar o custo-benefício de 20 métodos

de restauração em um projeto de restauração ecológica na Caatinga. E a partir dessa avaliação identificar qual o método mais eficiente para restauração ecológica de ambientes como a Caatinga. Nós acreditamos que a utilização da tecnologia desenvolvida pelo LER-UFRN será mais eficiente, uma vez que o uso da raiz grande garante o estabelecimento e desenvolvimento das mudas, que representa um bom sucesso de restauração. Visto que a muda atinge imediatamente áreas mais úmidas do solo assim que colocadas em campo, mediado pelo fato da água ser o recurso limitante para plantas em regiões áridas e semiáridas como a Caatinga (Weiss *et al.*, 2004).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Descrição da área de estudo

O estudo foi conduzido no ecossistema de Caatinga, uma área de clima semiárido localizada no nordeste brasileiro. A vegetação da Caatinga é formada por um mosaico de habitats que estão sujeitos à pluviosidade abaixo de 500mm/ano, temperatura média anual de 27°C e um regime hídrico de estiagem distribuídos nos meses de agosto a setembro (Figura 1S). De maneira geral, os solos são ricos em minerais, apresentam baixa retenção de água e são pedregosos (Alves, 2007).

As informações usadas neste trabalho foram geradas em um experimento de restauração ecológica da Caatinga implementado na Floresta Nacional de Açu, uma unidade de conservação de 413,42 ha localizada no município de Açu no Rio Grande do Norte (Figura 1). A área já sofreu impactos negativos como o corte seletivo de madeira e pecuária extensiva. Desde a criação da Unidade de Conservação em 1950, os impactos cessaram, porém, a vegetação não se recuperou naturalmente nos últimos 65 anos. O alto grau de degradação ambiental local e a ausência de regeneração natural aparente determinaram a escolha desta área para o experimento de restauração realizado.

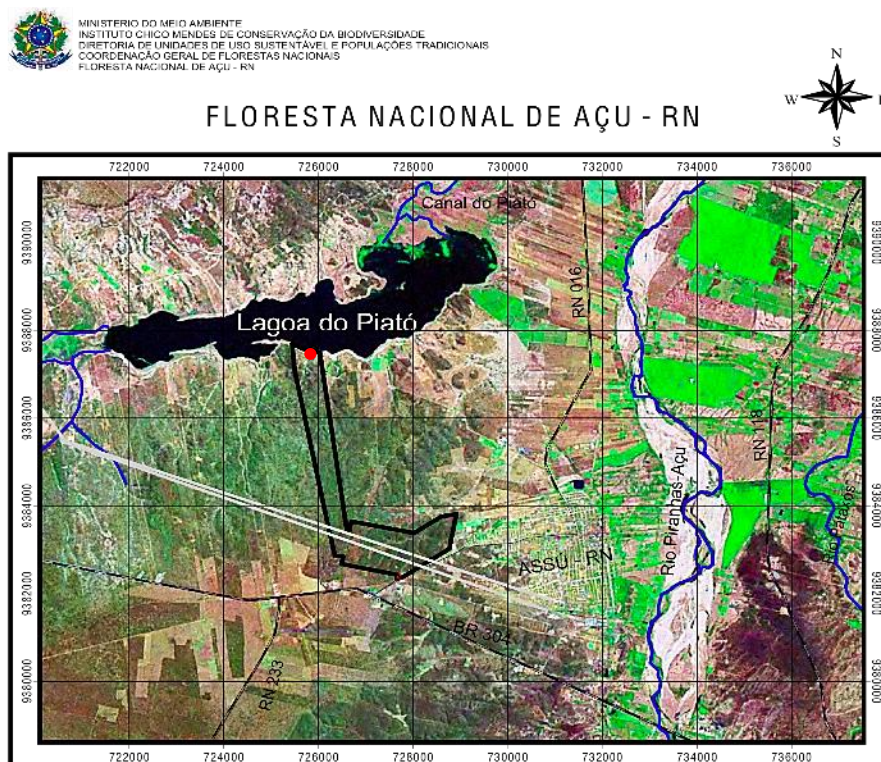


Figura 1. Mapa da FLONA de Açu. A área do experimento se encontra em frente à Lagoa do Piató (círculo vermelho). Fonte: Diagnóstico interno do ICMBio para a elaboração do Plano de Manejo da FLONA de Açu, 2008.

4.2 O experimento de restauração ecológica no semiárido

O experimento de restauração ecológica foi estabelecido em julho de 2013 ao final da estação chuvosa, quando ainda havia vestígio de chuva na região. O local onde foi estabelecido apresentava 4 hectares de área e recebeu o plantio de um total de 600 mudas de 6 espécies arbóreas nativas da Caatinga (Tabela 1S).

Os métodos de restauração foram estabelecidos usando dois fatores: (i) técnicas de plantio e (ii) forma da muda; que combinados totalizaram 20 métodos de restauração ecológica. As técnicas de plantio foram divididas em cinco tratamentos e a forma das mudas resultou em quatro tratamentos. Os métodos testados foram dispostos em parcelas de 12 x 8 m e espaçadas entre si por 2 m, replicados cinco vezes em blocos experimentais (Figura 2). As seis espécies nativas usadas no experimento não foram consideradas como fatores.

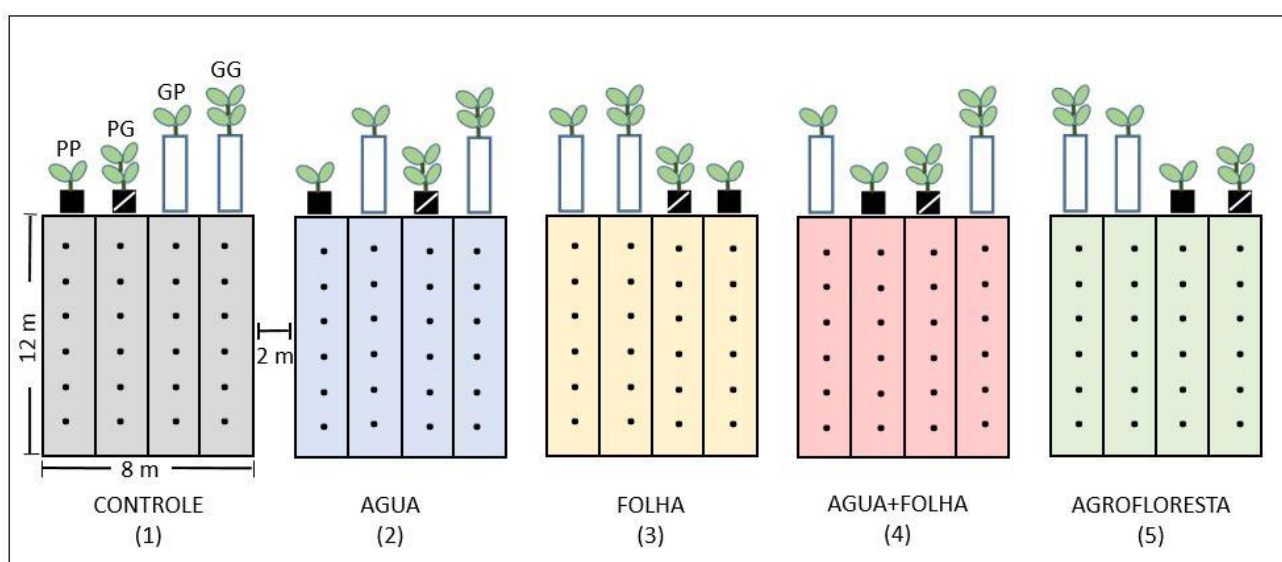


Figura 2. Exemplo do delineamento de um bloco experimental com os 20 métodos de restauração. PP = Planta de raiz e parte aérea pequenas; PG = Planta de raiz pequena e parte aérea grande; GP = Planta de raiz grande e parte aérea pequena e GG = Planta de raiz e parte aérea grandes. As raízes pequenas tinham aproximadamente 30 cm e as raízes grandes tinham 100 cm. A parte aérea das mudas foi considerada pequena se media entre 20 e 40 cm e foi classificada como grande quando era maior que 40 cm.

Todos os tratamentos receberam uma irrigação inicial durante um mês para o estabelecimento das mudas, depois desse período os tratamentos foram iniciados. Nos tratamentos de técnicas de plantio, o CONTROLE representa a forma tradicional de restauração, sem o efeito de nenhum dos tratamentos. O tratamento 2 foi submetido à irrigação por gotejamento durante uma hora por duas vezes na semana. Para o tratamento 3, as parcelas foram cobertas com folhiço transposto de uma mata

conservada adjacente ao experimento. No tratamento 4 foram combinados os tratamentos 2 e 3 (água e folhiço). Por fim, no tratamento 5 cada espécie arbórea foco de restauração recebeu em seu entorno o plantio de três espécies cultivadas tradicionalmente na agricultura local: *Zea mays* (milho), *Phaseolus vulgaris* (feijão) e *Cucurbita maxima* (jerimum). Este tratamento foi conduzido sem o uso de agroquímicos, recebeu irrigação equivalente à irrigação utilizada no tratamento 2 e não houve produção agrícola satisfatória para ser incluída também como benefício para este método.

Os tratamentos definidos pela forma da muda se diferenciam pelo tamanho da raiz e da parte aérea, conforme indicado na Figura 2. As mudas com raízes grandes foram produzidas a partir da tecnologia desenvolvida pelo Laboratório de Ecologia da Restauração da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (LER-UFRN). Esta tecnologia consiste na produção de mudas dentro de tubos de PVC de 100 cm de comprimento e 75 mm de largura. Essas mudas passam de 1 a 3 meses em casa de vegetação recebendo irrigação diária para o total desenvolvimento da raiz de 100 centímetros. As mudas de raízes pequenas são mudas produzidas convencionalmente em sacos plásticos de no máximo 30 cm de comprimento. Todas as mudas foram submetidas a um regime diário de irrigação em casa de vegetação durante cerca de 3 meses antes de ser utilizado no experimento em campo.

4.3 Custo

Para determinar o custo total de cada método, foram contabilizados os custos associados às fases de produção de mudas, instalação dos métodos em campo e monitoramento das plantas durante um ano. Esses custos foram gerados utilizando custos fixos e variáveis proporcionalmente para cada método. O custo total dos métodos foi obtido usada a fórmula:

$$Ct_{(n)} = P_{(n)} + I_{(n)} + M_{(n)}$$

em que $Ct_{(n)}$ é o custo total do método n em R\$/planta; $P_{(n)}$ é o custo inerente da produção das mudas para o método n ; $I_{(n)}$ é o gasto advindo da instalação do método n ; e $M_{(n)}$ representa os gastos provenientes do monitoramento para o método n . Esse custo reflete de maneira geral, por exemplo, o valor necessário para plantar uma muda de raiz e parte aérea grandes, remover as herbáceas da área com trator, instalar sistema de irrigação para pelo menos um mês de irrigação e investir em capital humano para manutenção e monitorando por um ano (método de controle utilizando mudas GG).

Como todos os tratamentos de técnica de plantio receberam irrigação inicial de um mês para estabelecimento das mudas em campo, foram incluídos os gastos de instalação do sistema de irrigação e do capital humano para o sistema funcionar nos tratamentos 1 e 3 (controle e folhiço, respectivamente) que não necessitavam de água após esse período. Os gastos de irrigação incluídos

nesses tratamentos sem irrigação foram referentes apenas ao período de um mês, utilizado para o estabelecimento das mudas em campo.

O valor final para restaurar uma área de Caatinga degradada foi obtido a partir do método de custo de reposição. Este método fornece os custos provenientes dos gastos em bens substitutos que um agente tem, a fim de garantir o nível desejado de recuperação de um ambiente (Motta, 1997). Estes custos representam o valor do capital natural e indicam custos que a sociedade não precisaria ter se o serviço ou bem ambiental estivesse disponível no ecossistema (Hougner *et. al.*, 2006). Com isso, o custo total para restaurar uma área degradada utilizando cada método testado foi calculado da seguinte forma:

$$C_{ha} = C_{m(n)} * 2480$$

em que C_{ha} é o custo em hectares para restaurar a Caatinga degradada utilizando o método n , $C_{m(n)}$ é o custo do método n e 2480 é o número médio de plantas necessárias para reflorestar uma área de 1 ha com espaçamento de 2 m entre plantas. Nestes cálculos foi utilizada uma taxa de desconto de 7%, que adiciona a variação monetária anual dos custos na análise.

4.4 Custo-benefício

O custo-benefício é uma análise que compara os custos gerados e seus benefícios para uma atividade (Robbins & Daniels, 2012). O custo é a somatória dos gastos monetários e o benefício é a receita, ou seja, o ganho (Motta, 1997). Aqui a análise de custo-benefício foi usada para comparar os métodos e indicar o método de restauração ecológica mais eficiente. Para isto, foi utilizado o valor proporcional entre o custo dos métodos (R\$/planta) e seus respectivos benefícios, como na fórmula abaixo:

$$\log CB = \frac{c_i / c_{max}}{b_i / b_{max}}$$

em que $\log CB$ é o logaritmo do custo-benefício proporcional do método n ; c_i e b_i são o custo e o benefício de cada método, respectivamente, c_{max} e b_{max} são os maiores valores de custo e benefício atingido nos métodos, respectivamente. A análise de custo-benefício identifica os métodos mais eficientes a um menor custo proporcional. Resultados de custo-benefício negativos (< 0) indicam métodos mais eficientes para restauração, pois mostram que os custos foram superados pelos

benefícios proporcionais, ao passo que resultados positivos (≥ 0) indicam métodos menos eficientes, uma vez que refletem custos proporcionais elevados comparado aos benefícios gerados pelo método.

Para isso, os gastos econômicos totais de cada método foram usados como custo e a altura média que as plantas atingiram ao fim de um ano em campo, foi considerada como benefício. Esse benefício representa o estabelecimento das plantas em campo e aumenta a probabilidade de rápida cobertura florestal da área restaurada. A fórmula de custo-benefício foi logaritimizada para atender as premissas do teste estatístico, que utiliza médias para comparação.

4.5 Análise estatística

Para testar se a altura média das plantas e o custo-benefício foram diferentes entre os tratamentos de forma da muda e técnicas de plantio foi realizada uma ANOVA Split-plot em blocos. O valor do custo-benefício do método convencional de restauração (Planta de raiz e parte aérea pequena sem nenhum manejo de solo – CONTROLE) foi usado como intercepto para comparar aos demais métodos na análise. Os métodos de restauração foram a variável independente. Como variável resposta foram usadas a altura média (que representa a diferença entre altura inicial da planta no momento do plantio e a altura final após 1 ano de crescimento em campo) e o custo-benefício proporcional. As análises foram realizadas no software R (R Development team, 2015) usando os pacotes base Matrix e Stats.

5 RESULTADOS

5.1 Custo

A presença de irrigação e a forma das mudas determinaram o custo dos métodos de restauração ecológica. De maneira geral, os métodos que utilizaram irrigação (AGUA, AGUA+FOLHA e AGRO) e aqueles que usaram mudas com a tecnologia desenvolvida pelo LER-UFRN (mudas de raiz grande e parte aérea pequena - GP e mudas de raiz e parte aérea grandes - GG) foram mais dispendiosos que os métodos que não usaram irrigação (CONTROLE e FOLHA) e que usaram mudas produzidas convencionalmente, ou seja, que usaram mudas com raiz e parte aérea pequenas - PP e mudas com raiz pequena e parte aérea grande - PG (Figura 3).

Sendo assim, o método que utilizou a combinação água + folhido e planta de raiz e parte aérea grandes (AGUA+FOLHA e GG) foi o método de maior custo econômico para restaurar um hectare de área degradada da Caatinga (157.624,66 R\$/ha, Tabela 1), enquanto que o método sem nenhum manejo de solo (CONTROLE) e que usou mudas de raiz e parte aérea pequenas foi de menor custo econômico (35.170,54 R\$/ha, Tabela 1).

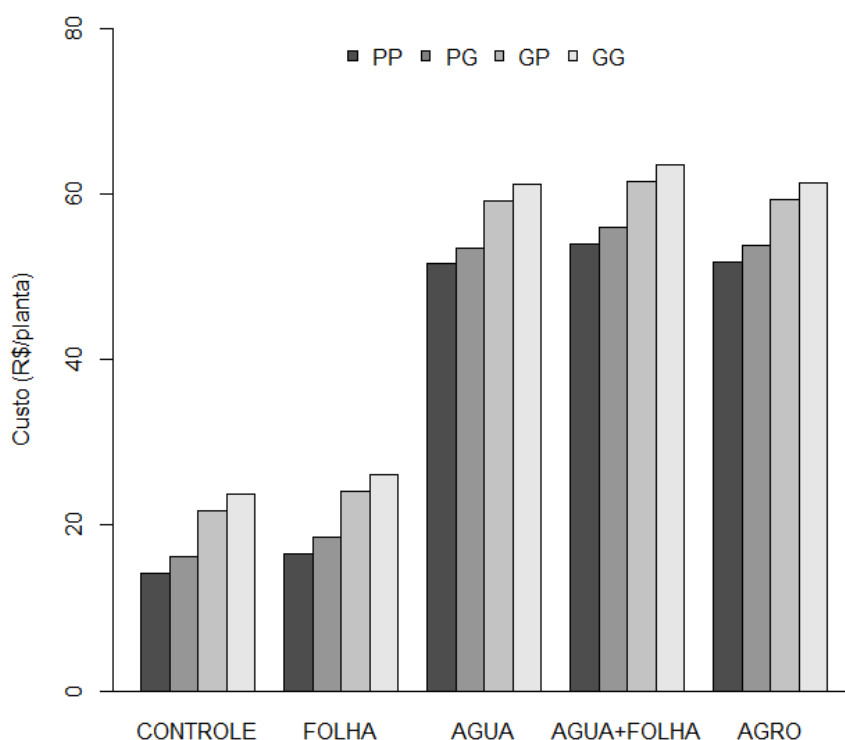


Figura 3. Custo dos métodos de restauração ecológica. Técnica de plantio: CONTROLE – sem nenhum manejo de solo; FOLHA – com folhido sobre o solo; AGUA – com irrigação por gotejamento; AGUA+FOLHA – com folhido e irrigação; AGRO – com uso de plantas agrícolas junto da planta nativa. Forma da Muda: PP – planta de raiz e parte aérea pequenas; PG – planta de raiz pequena e parte aérea grande; GP – planta de raiz grande e parte aérea pequena; GG – planta de raiz e parte aérea grandes.

Tabela 1. Métodos de restauração ecológica (técnica de plantio e forma da muda) e seus respectivos benefícios (altura média), custos (R\$/planta e R\$/ha) e relação custo-benefício proporcional (CB proporcional). CB proporcional = proporção entre o custo econômico dos métodos e o benefício para restauração medido pela altura média das plantas. CB proporcional < 0: indica métodos mais eficientes para restauração. CB proporcional ≥ 0: indica métodos menos eficientes para restauração. O custo-benefício foi logaritimizado para atender as premissas do teste estatístico. CB em negrito indica os métodos mais eficientes.

<i>Métodos de restauração ecológica</i>		<i>Benefício</i>	<i>Custo</i>		<i>CB proporcional</i>
Técnica de plantio	Forma da muda	Altura média (m)	R\$/planta	R\$/ha	Logaritmo
CONTROLE	Raiz pequena e parte aérea pequena	0,5 (±0,19)	14,18	35170,54	-0,11 (±0,33)
CONTROLE	Raiz pequena e parte aérea grande	0,8 (±0,30)	16,18	40130,54	-0,40 (±0,40)
CONTROLE	Raiz grande e parte aérea pequena	1,1 (±0,19)	21,77	53985,46	-0,41 (±0,20)
CONTROLE	Raiz grande e parte aérea grande	1,3 (±0,20)	23,77	58945,46	-0,55 (±0,14)
ÁGUA	Raiz pequena e parte aérea pequena	1,0 (±0,23)	51,58	127906,00	0,52 (±0,24)
ÁGUA	Raiz pequena e parte aérea grande	1,1 (±0,20)	53,58	132866,00	0,44 (±0,18)
ÁGUA	Raiz grande e parte aérea pequena	1,3 (±0,22)	59,16	146720,94	0,37 (±0,18)
ÁGUA	Raiz grande e parte aérea grande	1,6 (±0,21)	61,16	151680,94	0,19 (±0,14)
FOLHA	Raiz pequena e parte aérea pequena	0,4 (±0,32)	16,58	41110,14	0,38 (±0,69)
FOLHA	Raiz pequena e parte aérea grande	0,7 (±0,27)	18,58	46070,14	-0,01 (±0,49)
FOLHA	Raiz grande e parte aérea pequena	1,0 (±0,35)	24,17	59929,20	-0,16 (±0,41)
FOLHA	Raiz grande e parte aérea grande	1,3 (±0,25)	26,17	64889,20	-0,42 (±0,19)
AGUA+FOLHA	Raiz pequena e parte aérea pequena	1,0 (±0,11)	53,97	133845,60	0,61 (±0,12)
AGUA+FOLHA	Raiz pequena e parte aérea grande	1,2 (±0,21)	55,97	138805,60	0,46 (±0,17)
AGUA+FOLHA	Raiz grande e parte aérea pequena	1,4 (±0,18)	61,56	152664,66	0,33 (±0,13)
AGUA+FOLHA	Raiz grande e parte aérea grande	1,6 (±0,35)	63,56	157624,66	0,26 (±0,23)
AGRO	Raiz pequena e parte aérea pequena	1,2 (±0,25)	51,83	128542,54	0,37 (±0,23)
AGRO	Raiz pequena e parte aérea grande	1,1 (±0,32)	53,83	133502,54	0,49 (±0,34)
AGRO	Raiz grande e parte aérea pequena	1,5 (±0,21)	59,42	147361,60	0,28 (±0,14)
AGRO	Raiz grande e parte aérea grande	1,8 (±0,12)	61,42	152321,60	0,11 (±0,07)

5.2 Benefício: altura média das plantas

As técnicas de plantio individualmente influenciaram a altura média das plantas ($gl = 4, 16; F = 28,13$ e $p < 0,01$), assim como a forma das mudas ($gl = 3, 60; F = 81,20$ e $p < 0,01$). Contudo, a interação entre os dois fatores não foi significativa ($gl = 12, 60; F = 0,91$ e $p = 0,542$), mostrando que o efeito da forma da muda não foi potencializado pela técnica de plantio. Assim, o maior crescimento em altura das plantas ocorreu em mudas com raízes grandes, independente da técnica de plantio utilizada (Figura 4; Tabela 1).

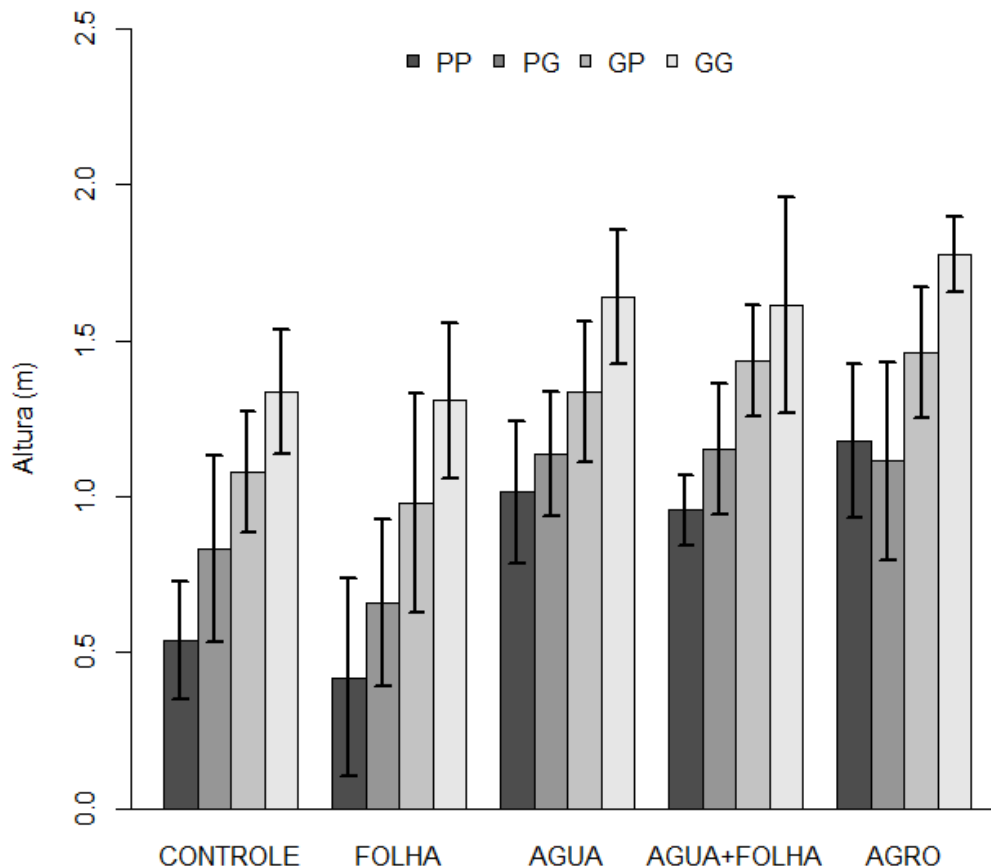


Figura 4. Altura média (metros) das mudas de diferentes formas submetidas às cinco técnicas de plantio. Técnicas de plantio: CONTROLE – sem nenhum manejo de solo; FOLHA – com uso de folhiço sobre o solo; AGUA – com irrigação por gotejamento; AGUA+FOLHA – com folhiço e irrigação; AGRO – com uso de plantas agrícolas junto da planta nativa. Forma da Muda: PP – planta de raiz e parte aérea pequenas; PG – planta de raiz pequena e parte aérea grande; GP – planta de raiz grande e parte aérea pequena; GG – planta de raiz e parte aérea grandes.

5.3 Custo-benefício

O custo-benefício foi influenciado tanto pelas técnicas de plantio quanto pela forma das mudas ($gl = 4, 16; F = 29,51$ e $p < 0,01$; $gl = 3, 60; F = 16,88$ e $p < 0,01$; respectivamente). Este custo-benefício não foi influenciado pela interação entre os dois fatores ($gl = 12, 60; F = 1,17$ e $p = 0,323$). Desta maneira, o método mais eficiente foi aquele independente da técnica de plantio, uma vez que os menores custo-benefício ($\log CB < 0$) foram relacionados à forma da muda (Figura 4), corroborando nossa premissa de que a utilização da tecnologia de produção de mudas com um metro de comprimento desenvolvida pelo LER-UFRN traria mais eficiência ao sucesso da restauração.

Como custos-benefícios negativos ($\log CB < 0$) indicam métodos mais eficientes à restauração, a análise de custo-benefício mostrou que os métodos de FOLHA utilizando mudas GG e CONTROLE

utilizando mudas GP e GG foram os mais eficientes, por apresentarem menores custos quando comparado proporcionalmente ao elevado benefício gerado pelos métodos (Figura 5; Tabela 1).

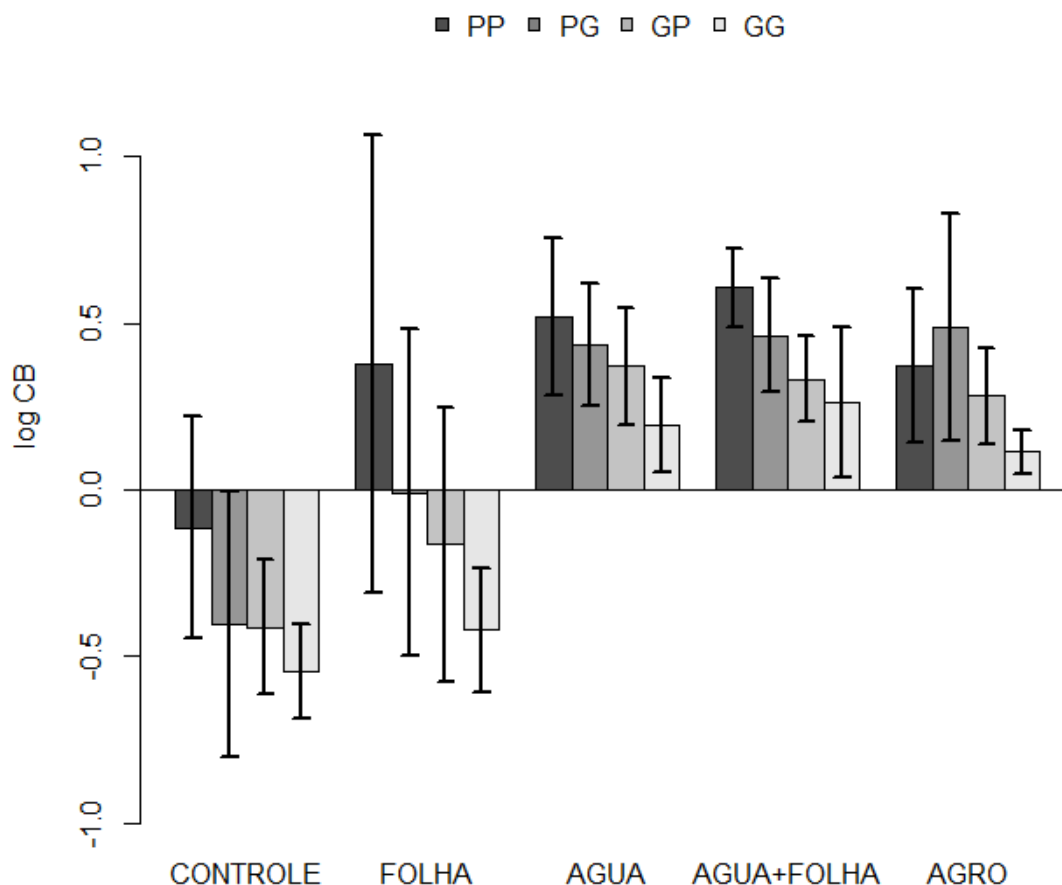


Figura 5. Relação da Análise de custo-benefício dos métodos de restauração ecológica. Técnica de plantio: CONTROLE – sem nenhum manejo de solo; FOLHA – com uso de folhiço sobre o solo; AGUA – com irrigação por gotejamento; AGUA+FOLHA – com folhiço e irrigação; AGRO – com uso de plantas agrícolas junto da planta nativa. Forma da Muda: PP – planta de raiz e parte aérea pequenas; PG – planta de raiz pequena e parte aérea grande; GP – planta de raiz grande e parte aérea pequena; GG – planta de raiz e parte aérea grandes. log CB indica a proporção entre o custo econômico dos métodos e o benefício para restauração medido pela altura média da planta. log CB < 0: indica métodos mais eficientes para restauração; log CB ≥ 0: indica métodos menos eficientes para restauração. O custo-benefício foi logaritimizado para atender as premissas do teste estatístico.

6 DISCUSSÃO

Neste trabalho foi feita uma avaliação da eficiência da restauração ecológica na Caatinga, testando a premissa de que a eficiência seria determinada pela forma das mudas utilizadas, principalmente pelo tamanho da raiz. Nossa análise econômica mostrou que métodos que utilizam técnicas de plantio sem irrigação combinadas com mudas de raiz grande e parte aérea grande geraram métodos de menor custo-benefício (Figura 5; Tabela 1). Apesar do uso de plantas com raiz grande ter contribuído para elevar o custo da restauração, as mudas de raiz grande apresentaram maior benefício em altura média das plantas, se comparado aos métodos com irrigação. Análises de custo considerando seu benefício em restauração apresenta informações mais clara sobre a eficiência dos métodos utilizados. Neste sentido, esta é uma avaliação pioneira em estudos de restauração, particularmente na Caatinga. Com a utilização esta tecnologia de muda com raiz grande, diminui-se relativamente o custo ao elevar-se o benefício da restauração ecológica na Caatinga.

Os altos custos representam o maior impedimento às intervenções de restauração em florestas secas, pois requerem altos investimentos em capital físico (cerca e matérias em geral) e em capital humano (Birch *et al.*, 2010). Em grande parte dos projetos de restauração estes custos são acrescidos ainda do tempo de monitoramento e reposição de plantas mortas. Neste sentido, o maior custo investido em mudas com raiz e parte aérea grandes é compensado em áreas de florestas secas pela maior eficiência, pois seu maior custo é revertido em maior altura das plantas. Formas eficientes de restaurar ambientes degradados a custos relativamente mais baixos são a solução para programas de restauração ecológica no semiárido brasileiro.

O fator que mais encarece projetos de restauração ecológica na Caatinga é a utilização de irrigação por períodos longos de tempo. Os solos da Caatinga em geral são rasos e pedregosos o que diminui a retenção de água nas camadas mais superficiais do solo (Alves, 2007). As mudas com raízes de um metro de comprimento conferiram maior vantagem que as mudas de raiz pequena por atingirem as partes mais profundas e úmidas do solo. As mudas com raízes pequenas tem menor probabilidade de acesso a água no solo, o que pode ter contribuído para seu estabelecimento e conseqüentemente, para o menor desenvolvimento em altura. Este fato explica a maior sobrevivência e crescimento em altura das mudas com raízes grande, já que a água é um recurso limitante nestes ambientes áridos e semiáridos (Weiss *et al.*, 2004).

Em muitos projetos de restauração ecológica na Caatinga, mesmo o uso constante da irrigação pode não garantir o crescimento das mudas em campo e até mesmo sua sobrevivência. A falta de nutrientes no solo pode ser uma explicação para isto, já que solos degradados geralmente são pobres em nutrientes em decorrência do carreamento desses nutrientes para corpos d'água por meio da

lixiviação que ocorre de forma mais frequente em solos degradados (Carpenter et al., 2008). O uso do folhiço pode contribuir para o estabelecimento e desenvolvimento das mudas em campo, pois adiciona nutrientes necessários para a planta se desenvolver inicialmente no campo (Ganade & Brown, 2002). A adição de folhiço também modifica a microfauna presente no solo, pois adiciona esporos e hifas de micorrizas e bactérias, que aumenta a captação de nutrientes e a umidade do solo, favorecendo o crescimento das plantas (Fraga et al., 2012; Huante *et al.* 2012 e Augé 2004). Apesar do uso do folhiço ser indicado para restaurar ambientes semiáridos como a Caatinga, sua adição requer maior custo e deve ser usado em solos mais pobres em nutrientes, que não é necessariamente o caso da Caatinga, exceto quando se trata de solos extremamente degradados, ou que não haja adição de nenhum outro adubo que o substitua. Por isso, métodos aplicados na restauração ecológica de ambientes semiáridos necessitam que novas tecnologias sejam desenvolvidas visando a convivência com a seca frequente destes ambientes. O uso da irrigação em plantios de restauração pode exaurir um recurso raro nesses ambientes, que poderia ser utilizado para abastecimento humano ou dessedentação de animais. Isso nos faz considerar que a utilização da tecnologia mudas com raiz de um metro desenvolvida pelo LER-UFRN, como o método mais promissor, visto que não requer o uso de irrigação para garantir a eficiência da restauração a um menor custo, principalmente se o plantio for feito em época chuvosa e receber irrigação inicial de um mês para estabelecimento das mudas.

Outras técnicas promissoras tem sido desenvolvida na Caatinga para aumentar eficiência nos projetos de restauração. Como por exemplo o uso de osmocote que libera nutrientes de forma gradual para a planta no campo e o pó e fibra de coco que garante umidade no solo para as plantas (Carvalho et al., 2011). Novas pesquisas na área de tecnologias para projetos de restauração ecológica em ambientes semiáridos devem ser desenvolvidas, principalmente referente ao menor uso de água e sempre que possível associadas a seus custos. Este trabalho é uma contribuição à novas tecnologias de restauração em florestas secas. A potencialização do custo-benefício, contudo, requer aprimoramento da técnica de forma a reduzir os custos de produção das mudas com raiz grande. O método aqui testado contribui neste sentido e futuros trabalhos deverão visar no desenvolvimento de recipientes menos onerosos para garantir o desenvolvimento de mudas com raiz grande, diminuindo o custo desta tecnologia.

7 CONCLUSÃO

A partir dos resultados aqui encontrados nós podemos concluir que (1) a tecnologia de produção de muda com raiz de um metro de comprimento é o método indicado para restauração de ambientes semiáridos como a Caatinga, por promover menor custo-benefício; (2) a utilização da tecnologia de produção de muda com raiz de um metro, faz com que não haja a necessidade de mais de um mês de irrigação das mudas em campo; (3) se um agente não tiver restrição orçamentária para executar projetos de restauração na Caatinga, aconselha-se a utilização de irrigação, pois irrigar mudas por mais de um mês favorece o crescimento das plantas em campo, contudo, se o agente não dispuser de muitos recursos financeiros é mais vantajoso investir tempo e recurso na produção de mudas de raízes de um metro, uma vez que este método é mais eficiente por garantir o sucesso da restauração a um menor custo e (4) é necessário testar métodos que diminuam o custo de produção de mudas com raízes grandes.

8 REFERÊNCIAS

- Ahtikoski A, Alenius V, Makitalo K (2010) Scots pine stand establishment with special emphasis on uncertainty and cost-effectiveness, the case of northern Finland. *New Forests* 40:69–84
- Alves JJA (2007) Geologia da Caatinga no semi-árido do nordeste Brasileiro. *Climatologia e Estudo da Paisagem Rio Claro* 2:58–71
- Auerbach NA, Tulloch AIT, Possingham HP (2014) Informed actions: where to cost effectively manage multiple threats to species to maximize return on investment. *Ecological Applications* 24:1357–1373
- Augé RM (2004) Arbuscular mycorrhizae an soil/plant water relations. *Canadian Journal of Soil Science* 84:373–381
- Azevêdo SMA, Bakke IA, Bakke OA, Freire ALO (2012) Crescimento de plântulas de jurema preta (*Mimosa tenuiflora* (Wild) poiret) em solos de áreas degradadas da Caatinga. *Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal* 9: 150–160
- Birch JC, Newton AC, Aquino CA, Cantarello E, Echeverria C, Kitzberger T, Schiappacasse I, Garavito NT (2010) Cost-effectiveness of dryland forest restoration evaluated by spatial analysis of ecosystem services. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107:21925–21930
- Busch KE, Golden RR, Parham TA, Karrh LP, Lewandowski MJ, Naylor MD (2010) Large-scale *Zostera marina* (eelgrass) restoration in Chesapeake Bay, Maryland, U.S.A. Part I: a comparison of techniques and associated costs. *Restoration Ecology* 18:490–500
- Carpenter SR (2008) Phosphorus control is critical to mitigating eutrophication. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105: 11039–11040
- Carvalho MMP, Silva ACCP, Fabricante JR, Filho JAS (2011) Composição Florística de Parcelas Permanentes em áreas de Savana Estépica, Petrolina, PE. III Simpósio de Mudanças Climáticas e Desertificação no Semiárido Brasileiro “Experiências de Mitigação e Adaptação”. Disponível em: www.cpatia.embrapa.br/smud/trabalhos/39_1_inscrito_1.doc
- Castillo VM, Martnez-Mena M, Albaladejo J (1997) Runoff and soil loss response to vegetation removal in a semiarid environment. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 1116–1121

- Fraga, ME, Braz DM, Rocha JF, Pereira MG, Figueiredo DV (2012) Interação microrganismo, solo e flora como condutores da diversidade na Mata Atlântica. *Acta Botânica Brasil* 26:857–865
- Grose PJ (2013) Cost-effectiveness of different revegetation techniques for slender *Banksia*. *Ecological Restoration* 31:237–240
- Hougnier C, Colding J, Söderqvist T (2006) Economic valuation of a seed dispersal service in the Stockholm National Urban Park, Sweden. *Ecological Economics* 59:364–374
- Huante P, Ceccon E, Orozco-segovia A, Sánchez-coronado ME, Acosta I, Chamela EM (2012) The role of arbuscular mycorrhizal fungi on the early-stage restoration of seasonally dry tropical forest in Chamela, México. *Revista Árvore* 36:279–290
- Keller AA, Goldstein RA (1998) Impact of carbon storage through restoration of drylands on the global carbon cycle. *Environmental Management* 22:757–766
- Kimball S, Lulow M, Sorenson Q, Balazs K, Fang Y, Davis SJ, O'Connell M, Huxman TE (2015) Cost-effective ecological restoration. *Restoration Ecology* 23:1800–810
- Leal IR, Silva JD, Tabarelli M, Lacher Jr TE (2005) Mudando o curso da conservação da biodiversidade na Caatinga do Nordeste do Brasil. *Megadiversidade* 1: 139–146
- Marinho FP, Mazzochini GG, Manhães AP, Weisser WW, Ganade MG (2016) Effects of past and present land use on vegetation cover and regeneration in a tropical dryland forest. *Journal of Arid Environments*. *Journal of Arid Environments* 132: 26–33
- Martorell C, Peters E (2005) The measurement of chronic disturbance and its effects on the threatened cactus *Mammillaria pectinifera*. *Biological Conservation* 124: 199–207
- Ministério do Meio Ambiente (2016) *Biomass: Caatinga*. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/biomass/caatinga>
- Motta RS (1997) Manual para valoração econômica de recursos ambientais. IPEA/MMA/PNUD/CNPq 11– 31
- Perrow MR, Davy AJ (2002) *Handbook of ecological restoration*. Vol. 2: Restoration in practice. Ed. Cambridge

- Puigdefábregas J, Mendizába T (1998) Perspectives on desertification: western Mediterranean. *Journal of Arid Environments* 39: 209–224
- Reynolds JF (2001) Desertification. In: Levin, S.A. (Ed.), *Encyclopedia of Biodiversity*, vol. 2. Academic Press, London, pp. 61–78
- Ribeiro EMS, Arroyo-Rodríguez V, Santos BA, Tabarelli M, Leal IR (2015) Chronic anthropogenic disturbance drives the biological impoverishment of the Brazilian Caatinga vegetation. *Journal of Applied Ecology* 52: 611–620
- Rigueira DMG, Neto EM (2013) Monitoramento: uma proposta integrada para avaliação do sucesso em projetos de restauração ecológica em áreas florestais brasileiras. *Revista Caititu*, Salvador 1: 73–88
- Robbins AST, Daniels JM (2012) Restoration and Economics: A Union Waiting to Happen? *Restoration Ecology* 20: 10–17
- Schlesinger WH, Reynolds JF, Cunningham GL, Huenneke LF, Jarrell WM, Virginia R, Whitford WG (1990) Biological Feedbacks in Global desertification. *Science* 247: 1043–1048
- Suding KN, Gross KL, Houseman GR (2004) Alternative states and positive feedbacks in restoration ecology. *Trends in Ecology & Evolution* 19:46–5
- Verdu M, Gomez-Aparicio L, Valiente-Banuet A (2012) Phylogenetic relatedness as a tool in restoration ecology: a meta-analysis. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 279:1761–1767
- Weiss JL, Gutzler DS, Coonrod JE, Dahm CAN (2004) Long-term vegetation monitoring with NDVI in a diverse semi-arid setting, central New Mexico, USA. *Journal of Arid Environments* 58:249–272
- Wilson KA, Evans MC, Di Marco M, Green DC, Boitani L, Possingham HP, Chiozza F, Rondinini C (2011) Prioritizing conservation investments for mammal species globally. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 366:2670–2680
- Wortley L, Hero JM, Howes M (2013) Evaluating ecological restoration success: a review of the literature. *Restoration Ecology* 21:537–543

9 MATERIAL SUPLEMENTAR

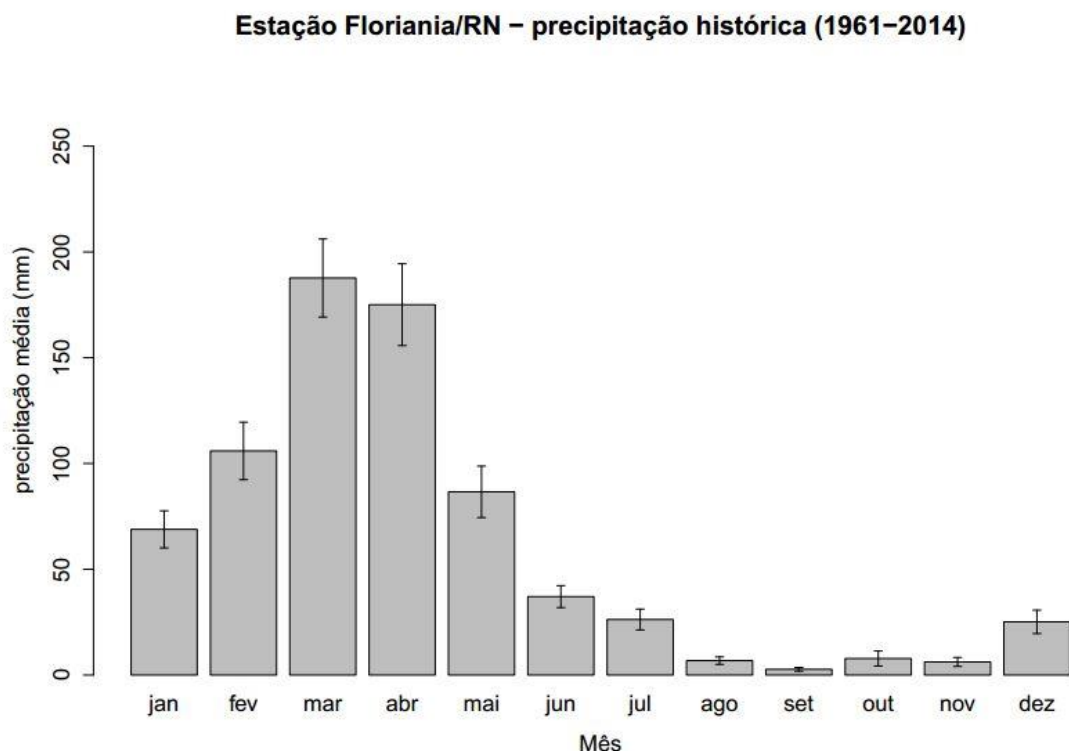


Figura 1S. Precipitação histórica do município de Florânia, distante 65 km de Assú/RN. O experimento de restauração ecológica foi estabelecido no mês de julho, quando ainda havia chuva na região. Base de dados: Instituto Nacional de Meteorologia

Tabela S1. Lista de espécies utilizadas no experimento de restauração ecológica em Assú/RN.

Nome científico	Família	Nome popular
<i>Anadenanthera colubrine</i> (Vell.) Brenan	Fabaceae	Angico
<i>Mimosa tenuiflora</i> (Willd.) Poir.	Fabaceae	Jurema preta
<i>Poincianella gardneriana</i> (Benth.) L.P.Queiroz	Fabaceae	Catingueira
<i>Bauhinia cheilantha</i> (Bong.) Steud.	Fabaceae	Mororó
<i>Myracrodruon urundeuva</i> Allemão	Anacardiaceae	Aroeira
<i>Senna spectabilis</i> (DC.) H.S.Irwin & Barneby	Fabaceae	São João