



## Avaliação de nucleários como técnica de restauração florestal em Mariana, MG, Brasil

Sebastião Venâncio Martins<sup>1</sup>, Josmaile de Paula Braz<sup>1</sup>, Pedro Manuel Villa<sup>1\*</sup>, William Victor Lisboa Alves<sup>1</sup>, Mirian Lago Valente<sup>1</sup>  
Gabriel Corrêa Kruschewsky<sup>2</sup>, Andréia Aparecida Dias<sup>2</sup>, Fabio Haruki Nabeta<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Florestal, Avenida Purdue, s/nº, Campus Universitário, CEP 36570-000, Viçosa, MG, Brasil

<sup>2</sup>Fundação Renova, Avenida Getúlio Vargas, 671, Funcionários, CEP 30112-020, Belo Horizonte, MG, Brasil

\*Autor correspondente:  
[pedro.villa@ufv.br](mailto:pedro.villa@ufv.br)

### Termos para indexação:

Crescimento de mudas  
Rejeito de mineração  
Sobrevivência de mudas

### Index terms:

Mining tailings  
Seedling growth  
Seedling survival

### Histórico do artigo:

Recebido em 09/09/2020  
Aprovado em 23/03/2022  
Publicado em 31/12/2022

**Resumo** - Este estudo teve como objetivo testar a eficiência do uso de um novo equipamento denominado nucleário, na sobrevivência e crescimento de mudas de espécies arbóreas visando à restauração florestal em áreas atingidas pelo rejeito da barragem de Fundão, em Mariana, MG. Foram avaliadas, por 12 meses, duas espécies arbóreas nativas (*Piptadenia gonoacantha* (Mart.) J.F. Macbr. e *Inga edulis* Mart.), sob um desenho de blocos aleatorizados e três tratamentos: hidrogel (T1), nucleário (T2) e controle (T3). Analisou-se o efeito dos tratamentos e do tempo após o plantio sobre a sobrevivência e crescimento das mudas, por comparação múltipla de médias e modelos lineares mistos. Foram observadas diferenças significativas de crescimento em altura e em diâmetro ao nível do solo (DNS) entre os tratamentos. As taxas de crescimento relativo para altura e DNS das duas espécies se mantiveram relativamente constantes, sem diferenças entre os tratamentos. Constatou-se que *I. edulis* apresentou sobrevivência maior na presença do nucleário, em comparação com os demais tratamentos. Os resultados indicam que apenas o uso de nucleários não foi suficiente para garantir o bom desenvolvimento e sobrevivência das mudas em campo, sendo recomendada sua avaliação para outras espécies arbóreas nativas.

## Evaluation of nuclears as a forest restoration technique in Mariana, Minas Gerais State, Brazil



**Abstract** - The study aimed to test the efficiency of a new alternative technology, named nuclear, on the survival and growth of tree species seedlings aiming at the forest restoration in areas affected by the tailings of the Fundão dam, in Mariana, Minas Gerais State, Brazil. Two native tree species (*Piptadenia gonoacantha* (Mart.) J.F. Macbr. and *Inga edulis* Mart.) were evaluated during 12 months, under a randomized block design and three treatments: hydrogel (T1), nuclear (T2) and control (T3). The effect of treatments and time after planting on seedling survival and growth was analyzed by differences between means and mixed linear models. Significant differences were observed in the two growth in height and in diameter at ground level (DGL) between treatments. The relative growth rates for height and DGL of the two species remained relatively constant with no differences between treatments. We observed that *I. edulis* presented higher survival under nuclears compared to the other treatments. The results indicate that the use of nuclears alone was not sufficient to guarantee the growth and survival of seedlings, and we recommend its evaluation for other tree native species.

## Introdução

Desde o rompimento da barragem de Fundão ocorrido em 2015, em Mariana, Minas Gerais, Brasil, a Fundação Renova e seus parceiros têm investido em pesquisas visando gerar novas descobertas sobre as trajetórias de restauração da vegetação nativa nas áreas que foram atingidas pelo rejeito, o que tem ajudado no planejamento de ações para atingir metas de restauração. Por este motivo, atualmente diferentes métodos de restauração ecológica continuam sendo testados nessas áreas afetadas, como por exemplo, métodos de restauração ativa e passiva (Martins et al., 2020). Apesar de recentemente ter sido demonstrado que a restauração passiva, através da regeneração natural sobre o rejeito, tem mostrado uma relação positiva com a recuperação de diferentes atributos florestais em Mariana (Martins et al., 2020; Campanharo et al., 2021), ainda existem áreas que precisam de restauração ativa, como por exemplo, pelo plantio de mudas de espécies nativas (Holl et al., 2010; Holl & Aide, 2011; Martins, 2018). A restauração ativa, através do plantio de mudas, é uma das técnicas amplamente aplicadas para induzir uma rápida recuperação inicial de um ecossistema degradado onde existe limitação da regeneração natural (Holl & Aide, 2011; Martins, 2018; Philipson et al., 2020). No entanto, ainda existe a necessidade de avaliar o efeito de diferentes técnicas de plantio sobre a sobrevivência e crescimento de espécies arbóreas nativas e potenciais para a restauração florestal da região, com a finalidade de melhorar critérios de seleção de espécies e técnicas de acordo com as condições ambientais locais.

Neste contexto, uma das principais premissas para a aplicação desta técnica é que as mudas devem ser plantadas em condições ambientais apropriadas, para garantir uma alta probabilidade de sobrevivência, o sucesso no estabelecimento das espécies e manter crescimento satisfatório durante seus estágios iniciais (Grossnickle, 2012; Grossnickle & MacDonald, 2018). A probabilidade de sobrevivência das mudas pode ser influenciada por vários fatores bióticos, como herbivoria e competição com plantas daninhas, e abióticos, como fertilidade do solo e déficit hídrico, variando sua importância relativa ao longo do tempo (Charles et al., 2017; Jesus et al., 2020). As principais causas da mortalidade de mudas se devem ao déficit hídrico, à matocompetição com gramíneas exóticas e ao ataque de formigas cortadeiras (Paul et al., 2012; Santos et al.,

2020). Consequentemente, a mortalidade de plântulas durante a fase de estabelecimento pode alterar as trajetórias sucessionais iniciais e retardar a recuperação do ecossistema degradado (Charles et al., 2017). Por esse motivo, é importante a seleção das espécies e avaliação de como respondem em ambientes heterogêneos e degradados através de diferentes técnicas de restauração florestal (Cheesman et al., 2018; Martins, 2018). A seleção de espécies com base no status sucessionial deve ser ajustada, de acordo com o tipo de restauração e nível de degradação do ecossistema (Rodrigues et al., 2011; Charles et al., 2017). Por exemplo, espécies pioneiras colonizadoras exigentes de luz e de rápido crescimento são dominantes após intenso distúrbio, favorecendo a regeneração natural em florestas tropicais (Villa et al., 2019, 2020), sendo recomendado seu plantio em áreas degradadas (Martins, 2018). No entanto, estudos sobre as probabilidades de sobrevivência e taxas de crescimento de mudas em áreas degradadas ainda são limitados, especialmente em florestas tropicais.

As mudas durante os estágios iniciais de plantio de restauração são altamente suscetíveis a muitos fatores bióticos e abióticos. O impacto desses fatores pode ser potencializado pelas condições do local e técnicas de plantio inadequadas (Charles et al., 2017). Algumas técnicas alternativas têm sido utilizadas, como polímeros hidroretentores (hidrogel), valorizados por sua capacidade de absorver e armazenar água próximo à rizosfera (Navroski et al., 2014; Ahmed, 2015), o uso de formicidas, para controlar as populações de formigas cortadeiras e coroamentos manuais e roçadas mecânicas, para diminuir a matocompetição (Silveira et al., 2013; Santos et al., 2020). Contudo, ainda existe a necessidade de se aplicar técnicas sustentáveis e de baixo custo na manutenção das mudas durante o pós-plantio (Prieto-Rodão, 2018). Assim, a criação de novas tecnologias tem sido uma prioridade nas pesquisas de restauração. Por exemplo, o disco ou placa de papelão, que é um dispositivo usado no coroamento de mudas, pode reduzir a incidência da matocompetição nos primeiros anos de plantio, além de substituir o coroamento convencional que pode demandar maior investimento de recursos (Dias et al., 2019). Por outro lado, a manta geotêxtil tem sido usada como alternativa para reduzir o nível de infestação de plantas daninhas e sua influência negativa sobre a sobrevivência e crescimento das espécies arbóreas plantadas ou provenientes da regeneração natural (Polster, 2002; Artioli & Correa,

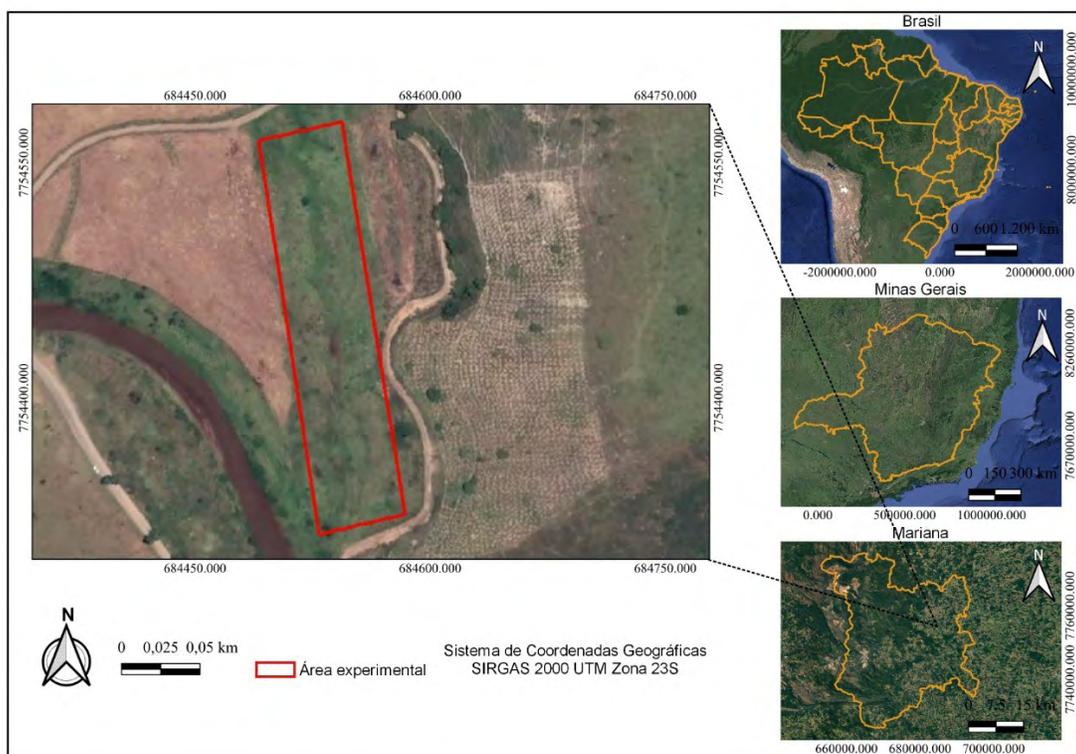
2019). Recentemente surgiu o nucleário, como novo equipamento para auxiliar a restauração florestal, que tem como proposta aumentar a sobrevivência e taxa de crescimento das mudas após o plantio. De acordo com seus idealizadores, os nucleários aumentam a captação, armazenamento e disponibilidade gradual de água da chuva para as mudas e reduzem a incidência da matocompetição e de formigas cortadeiras (Nucleário, 2020). No entanto, ainda são necessárias pesquisas para avaliar sua real eficiência no plantio de mudas em projetos de restauração florestal.

Dessa forma, o presente estudo teve por objetivo testar a eficiência do nucleário, quanto ao crescimento e sobrevivência de mudas de *Inga edulis* e *Piptadenia gonoacantha*. Essas são espécies nativas da Mata Atlântica com potencial para serem usadas em projeto de restauração florestal em uma área impactada pelo rejeito de mineração, após a ruptura da barragem de Fundão em Mariana, MG. Assim, propõe-se como hipótese que o nucleário apresenta uma relação positiva significativa com a sobrevivência e crescimento das mudas durante os estágios iniciais pós-plantio das duas espécies arbóreas testadas.

## Material e métodos

### Área de estudo

O estudo foi realizado em uma área atingida pelo rejeito da barragem de Fundão, localizada em Paracatu de Baixo (20°16'S; 43°12'W), distrito de Mariana, MG (Figura 1). O clima no município é típico tropical úmido (Cwa), com uma estação seca de maio a setembro e uma chuvosa entre dezembro e março. A umidade relativa anual média é de aproximadamente 80%, a temperatura média anual do ar de 19 °C e a precipitação média anual de 1.340 mm (Alvares et al., 2013). A área de estudo corresponde a uma paisagem do Bioma da Mata Atlântica com um longo histórico de uso do solo com dominância de pastagem para pecuária e fragmentos florestais. Segundo Carmo et al. (2017), a vegetação florestal é caracterizada pela Floresta Estacional Semidecidual. O acúmulo de rejeitos de mineração ao longo deste gradiente ambiental (pastagem-floresta) apresenta profundidades diferentes (50-100 cm), em uma topografia plana e homogênea ao longo do rio (Campanharo et al., 2021).



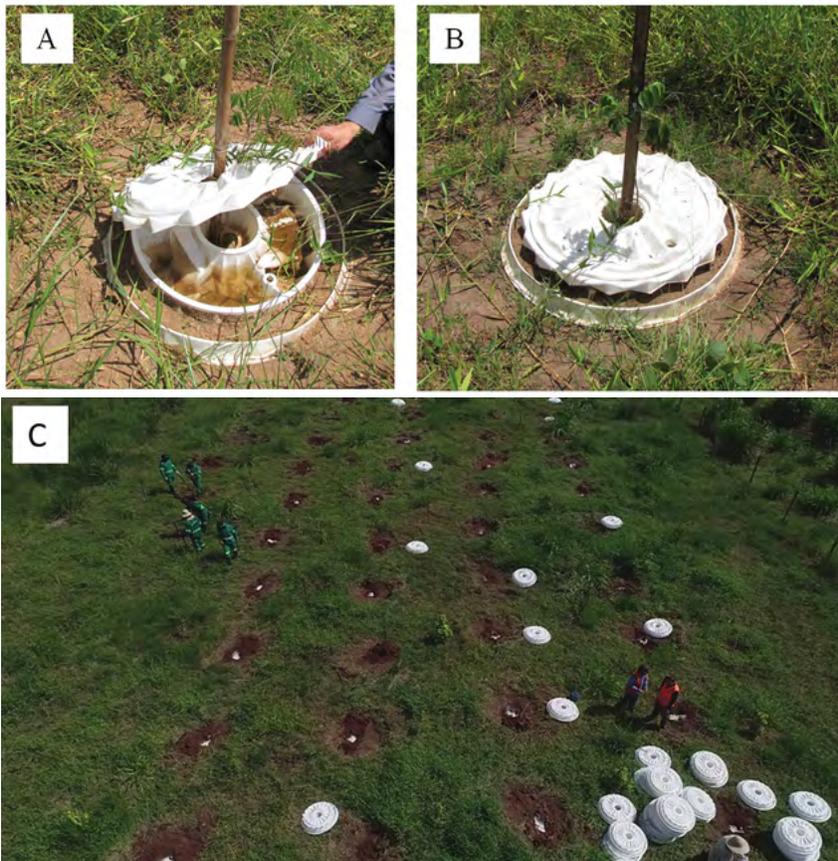
**Figura 1.** Localização da área experimental no distrito de Paracatu de Baixo, Mariana, Minas Gerais, Brasil.

**Figure 1.** Location of the experimental area in the district of Paracatu de Baixo, Mariana, Minas Gerais, Brazil.

### Delineamento experimental e coleta de dados

Aplicou-se um delineamento em blocos aleatorizados, com três tratamentos de plantio de mudas de *Piptadenia gonoacantha* e *Inga edulis*. Essas espécies foram escolhidas por ocorrerem na região de Mariana e por apresentarem alto potencial para a restauração florestal. As espécies ocorrem em diferentes condições ambientais: *I. edulis* é típica de solos mais úmidos, como matas ciliares, e *P. gonoacantha* é mais adaptada a

terrenos bem drenados, como encostas e topos de morros. Antes da implantação do experimento, foi realizada roçada total da área, abertura das covas de plantio e adubação de base nas mesmas. O espaçamento utilizado no plantio foi 3 m × 3 m. O experimento foi organizado em cinco blocos para cada espécie, composto por 25 repetições para cada tratamento: plantio de mudas com aplicação de hidrogel (T1), plantio com uso de nucleário (T2) (Figura 2) e controle, sem aplicação de hidrogel e sem uso de nucleários (T3).



Fotos: William Alves

**Figura 2.** A. Nucleários com estrutura convexa e pequenos poros na superfície da estrutura, para a acumulação de água. B. Nucleário com muda de árvore. C. Área experimental no momento da implantação da pesquisa.

**Figure 2.** A. Nuclear with convex structure and small pores on the surface of the structure for water accumulation. B. Nuclear with tree seedling. C. Experimental area at the time of the research establishment.

A implantação dos experimentos ocorreu durante o mês de dezembro de 2018, e a coleta mensal de dados entre fevereiro de 2019 a janeiro de 2020. Os parâmetros de crescimento das mudas, diâmetro ao nível do solo (DNS) e altura (h), foram mensurados mensalmente a partir dos 60 dias após o plantio, por 12 meses (até 390 dias após o plantio). A porcentagem de matocompetição

foi estimada por meio das proporções de cobertura (25, 50, 75 e 100%) do nucleário para as mudas que receberam esse equipamento e em um círculo de arame de mesmo diâmetro (80 cm) colocado durante as medições ao redor das mudas sem nucleário. Além disso, a umidade do solo foi mensurada por sensor de umidade de solo eletrônico, modelo FieldScout Spectrum®.

### Análise de crescimento

A mudança no crescimento das mudas ao longo do tempo foi avaliada pelo cálculo da taxa de crescimento relativo (TCR), que expressa crescimento em termos de aumento em h e DNS por unidade de tamanho inicial (Hoffmann & Poorter, 2002), utilizando as Equações 1 e 2, respectivamente. A TCR foi calculada mensalmente para cada parâmetro de crescimento, para todas as mudas sobreviventes de cada espécie, desde a fase inicial (60 dias após o plantio) até 390 dias após o plantio.

$$TCR_h = \frac{(\log(h \text{ no tempo } 2) - \log(h \text{ no tempo } 1))}{(\text{tempo } 2 - \text{tempo } 1)} \quad (1)$$

$$TCR_{dns} = \frac{(\log(dns \text{ no tempo } 2) - \log(dns \text{ no tempo } 1))}{(\text{tempo } 2 - \text{tempo } 1)} \quad (2)$$

onde TCR = taxa de crescimento relativo para altura (h) e diâmetro (DNS), em diferentes intervalos de tempo (tempo2 – tempo1).

### Análise de sobrevivência

Para avaliar o efeito dos tratamentos de técnicas de plantio sobre a sobrevivência de plântulas ao longo do tempo, foi aplicada uma análise de sobrevivência, usando o método de Kaplan-Meier (Goel et al., 2010) para grupos censitários (Ley-López et al., 2016). Para cada espécie, foram testadas diferenças nas curvas de sobrevivência entre indivíduos que crescem em diferentes tratamentos de plantio, aplicando o teste de Mantel-Haenszel com o pacote *survival* (Therneau, 2020). As curvas de sobrevivência foram desenhadas usando o pacote *ggplot2* (Hadley, 2015), do programa R (R Foundation for Statistical Computing, 2019).

### Análise estatística dos dados

Todas as análises estatísticas foram realizadas no programa R 3.6.0 (R Foundation for Statistical Computing, 2019). Testaram-se a distribuição normal dos parâmetros de crescimento (h e DNS) de cada espécie com o teste Shapiro-Wilk e gráfico Q-Q, e a homogeneidade da variância pelo teste de Bartlett, usando o pacote *dplyr* (Crawley, 2013). Para comparar os parâmetros de crescimento, cobertura de herbáceas, h e DNS (dados sem distribuição normal) de cada espécie, utilizou-se o teste de Kruskal-Wallis seguido do teste de Dunn (Crawley, 2013).

Diferentes modelos lineares de efeitos mistos (LMM com efeitos aleatórios e fixos), com uma distribuição Gaussiana, foram testados para investigar o principal efeito dos tratamentos (técnicas de plantio), e o tempo desde o plantio sobre o crescimento relativo das mudas em relação à h e ao DNS de cada espécie. Além disso, modelos lineares generalizados de efeitos mistos (GLMM), com distribuição binomial negativa, foram usados para avaliar os efeitos destes preditores sobre a sobrevivência das mudas de cada espécie. Para a escolha de cada um destes modelos, as distribuições de erro Gaussiano e Poisson foram testadas. Adicionalmente, as distribuições de resíduos foram verificadas visualmente, sendo avaliada a distribuição mais adequada e a função de ligação, ou seja, a normalidade foi confirmada pelo gráfico QQ e teste de Shapiro-Wilk (Zuur et al., 2009).

Finalmente, foram utilizados modelos de regressão linear para testar o efeito da cobertura (matocompetição) sobre a sobrevivência. Os modelos foram testados de forma independente para cada uma das espécies. As variáveis para a construção dos modelos foram agrupadas em quatro categorias: i) crescimento expresso em h e DNS das mudas (variáveis respostas contínuas), ii) sobrevivência das mudas (variável resposta discreta), iii) tratamentos sobre técnicas de plantio (variável resposta categórica, com três níveis com efeito fixo); e iv) tempo após o plantio, expresso em dias (variáveis explicativas contínuas, com efeitos fixos). Foram testados também os efeitos do tempo, representado pelo coeficiente de efeito fixo para o tempo-1, dos tratamentos de plantio (Equação 3), e a interação entre o tempo (tempo-1) e os tratamentos, considerando modelos separados e sem interações (Equação 4).

$$lmer(Y_{idt} = t + d + (t:d) + (1|i)) \quad (3)$$

$$glmer.nb(Y_{idt} = t + d + (t:d) + (1|i)) \quad (4)$$

Em que: *lmer* = função para analisar LMM, usando o pacote *lme4* (Bates et al., 2019); *glmer* = função para GLMM, usando o pacote *nlme* (Pinheiro et al., 2017). Onde *Y* representa as variáveis respostas dos parâmetros de crescimento (altura e DNS das mudas) e sobrevivência de cada espécie, seguido de *i* que denota a muda individual, *d* corresponde ao dia após o plantio, e *t* refere-se ao tratamento de plantio de mudas, portanto  $Y_{idt}$  é a medida da TCR da altura, TCR do diâmetro, e sobrevivência. Por

outro lado, os preditores  $t$ ,  $d$ , que correspondem aos efeitos fixos “tratamento” e “dias”, respectivamente,  $(1 | i)$  é o efeito aleatório “individual” dos modelos, e  $(t:d)$  é o termo de interação entre preditores (Crawley, 2013).

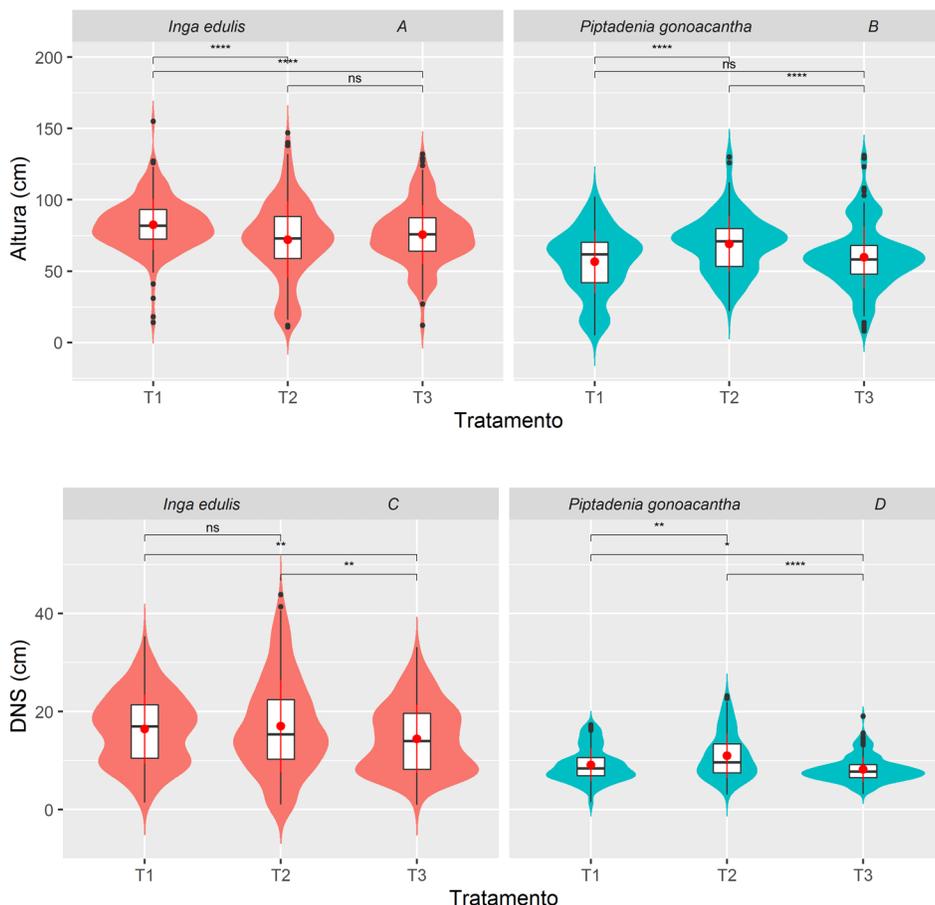
## Resultados

### Diferenças em parâmetros de crescimento e taxa de crescimento relativo

Foram observadas diferenças significativas de crescimento em altura ( $h$ ) e diâmetro ao nível do solo (DNS) entre os tratamentos de plantio (Figura 3). Unicamente em *Piptadenia gonoacantha* foram observadas as maiores diferenças em  $h$  e DNS entre

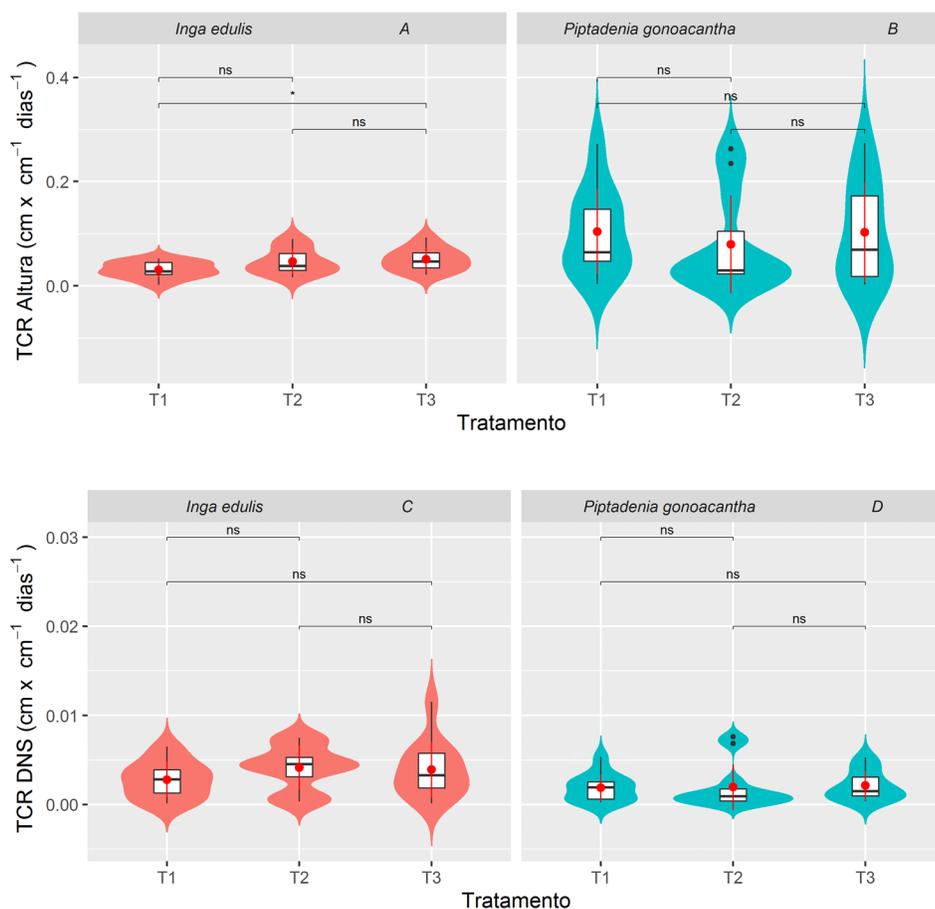
todos os tratamentos, exceto a  $h$  entre os tratamentos com aplicação de hidrogel (T1) e o controle, sem hidrogel e nucleários (T3) que não apresentou diferenças significativas.

Assim, no plantio com *P. gonoacantha*, o tratamento com uso de nucleários mostrou as maiores médias mensais de DNS e  $h$ , sendo elas: 14,52 mm e 81,90 cm, respectivamente. Para os demais tratamentos, as médias foram de DNS = 12,15 mm e  $h$  = 68,60 cm em T1 e DNS = 10,05 mm e  $h$  = 71,03 cm em T3. Apesar das diferenças nos valores absolutos dos parâmetros de crescimento (Figura 3), os resultados das taxas de crescimento relativo para altura (TCRh) e DNS (TCRdns) das duas espécies indicaram que estes se mantêm relativamente constante, sem diferenças ( $p > 0,05$ ) entre os tratamentos (Figura 4).



**Figura 3.** Diferenças de altura (A, B) e diâmetro ao nível do solo - DNS (C, D) entre tratamentos para *Inga edulis* e *Piptadenia gonoacantha*. T1: hidrogel; T2: nucleário e T3: controle. Os pontos vermelhos indicam os valores médios e a forma do violino indica a distribuição da variabilidade dos dados. Prova de Kruskal-Wallis são indicadas: \*\*\*\* $p < 0,001$ ; \*\*\* $p < 0,01$ ; \*\* $p < 0,05$ ; \* $p < 0,05$ , e ns significa sem diferenças significativas.

**Figure 3.** Differences in height (A, B) and diameter at ground level - DNS (C, D) between treatments for *Inga edulis* and *Piptadenia gonoacantha*. T1: hydrogel; T2: nuclearies and T3: control. The red dots indicate the average values and the violin shape indicates the distribution of data variability. Kruskal-Wallis test are indicated. \*\*\*\* $p < 0.001$ ; \*\*\* $p < 0.01$ ; \*\* $p < 0.05$ , and ns means no significant differences.



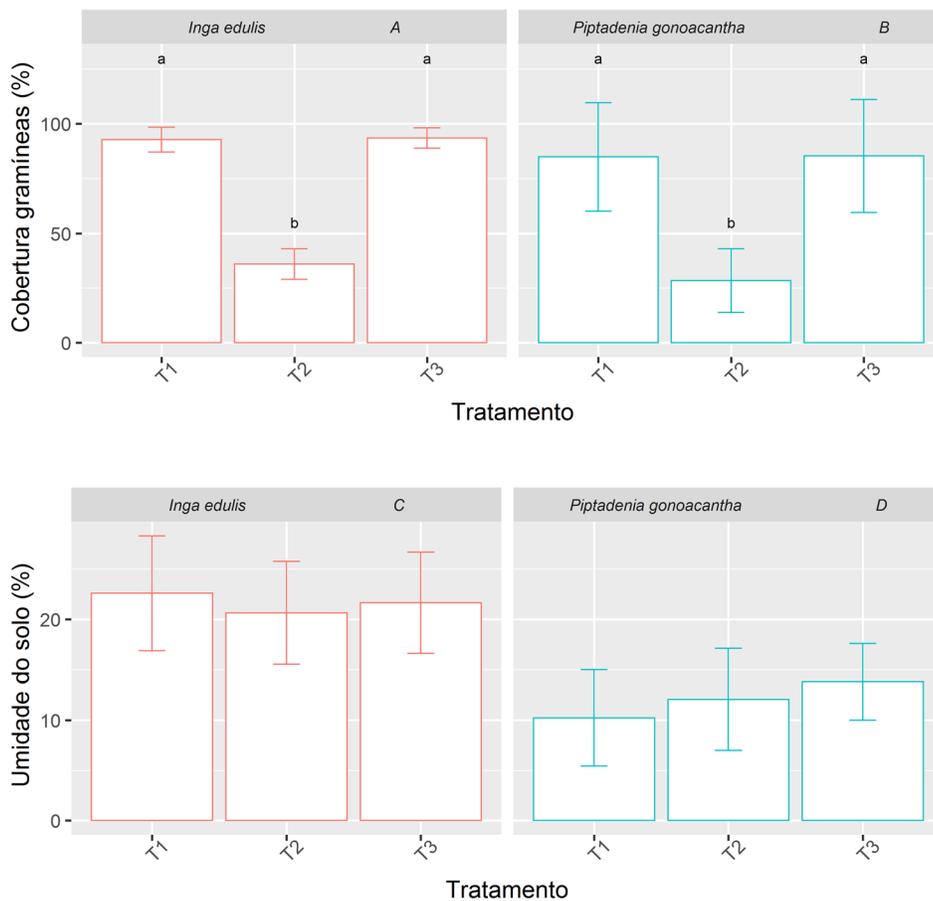
**Figura 4.** Diferenças nas taxas de crescimento relativo para a altura (TCRh, A, B) e DNS (TCRdns, C, D) entre os tratamentos para as espécies *Inga edulis* e *Piptadenia gonoacantha*. T1: hidrogel; T2: nucleário e T3: controle. Os pontos vermelhos indicam os valores médios e a forma do violino indica a distribuição da variabilidade dos dados. Prova de Kruskal-Wallis são indicadas: \*\*\* $p < 0,001$ ; \*\* $p < 0,01$ ; \* $p < 0,05$ , e ns significa sem diferenças significativas.

**Figure 4.** Differences in relative growth rates for height (TCRh, A, B) and DNS (TCRdns, C, D) between treatments for the species *Inga edulis* and *Piptadenia gonoacantha*. T1: hidrogel; T2: nuclearies and T3: control. The red dots indicate the average values and the violin shape indicates the distribution of data variability. Kruskal-Wallis test are indicated. \*\*\* $p < 0.001$ ; \*\* $p < 0.01$ ; \* $p < 0.05$ , and ns means no significant differences.

### Matocompetição e umidade relativa do solo

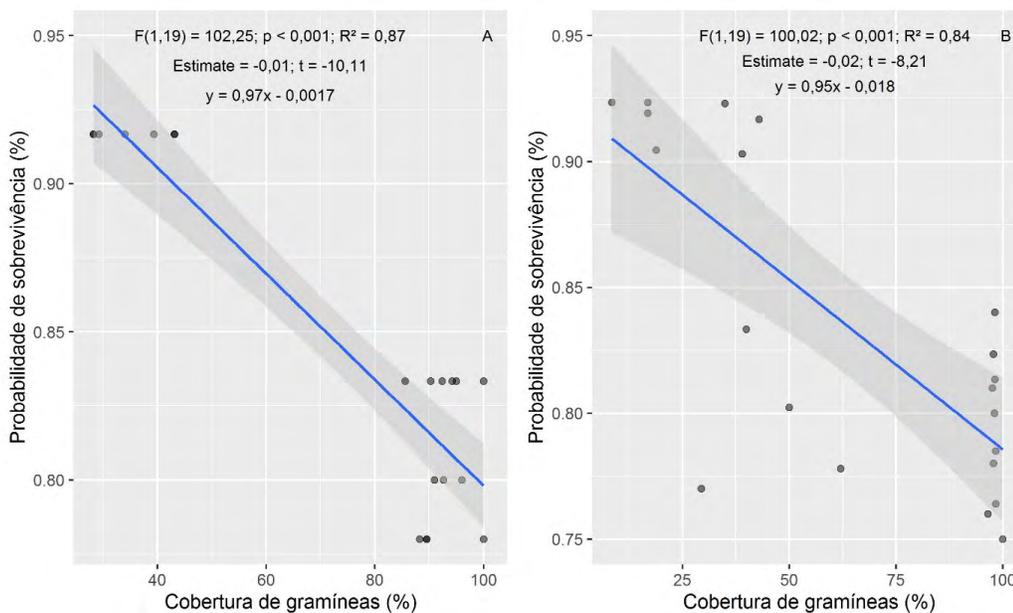
Constatarem-se diferenças significativas da cobertura de gramíneas exóticas (*Urochloa* spp.) entre tratamentos para as duas espécies, mas sem diferenças ( $p > 0,05$ ) com relação à umidade relativa do solo (Figura 5), contudo, os resultados demonstraram que a cobertura de gramíneas teve efeitos negativos significativos sobre a sobrevivência das mudas, devido à matocompetição (Figura 6).

Os tratamentos com nucleários apresentaram os menores valores médios de cobertura por matocompetição. No tratamento com nucleários a média foi de 28 e 36%, para *P. gonoacantha* e *I. edulis*, respectivamente. Para os demais tratamentos, as médias observadas no plantio com *P. gonoacantha*, com uso de hidrogel e controle foram similares, sendo de 84,8 e 85,3% respectivamente, e para *I. edulis* de 92,8 e 93,4%, respectivamente.



**Figura 5.** Matocompetição: cobertura de gramíneas (A-B) e umidade do solo (C-D) para *Piptadenia gonoacantha* e *Inga edulis*. T1: hidrogel; T2: nucleário e T3: controle. Letras diferentes indicam diferenças significativas ( $p < 0,05$ ); sem letras significa que não apresentam diferenças significativas.

**Figure 5.** Weed competition: grass cover (A-B) and soil moisture (C-D) for *Piptadenia gonoacantha* and *Inga edulis*. Different letters indicate significant differences ( $p < 0.05$ ); and no letters indicate that there are not significant differences.



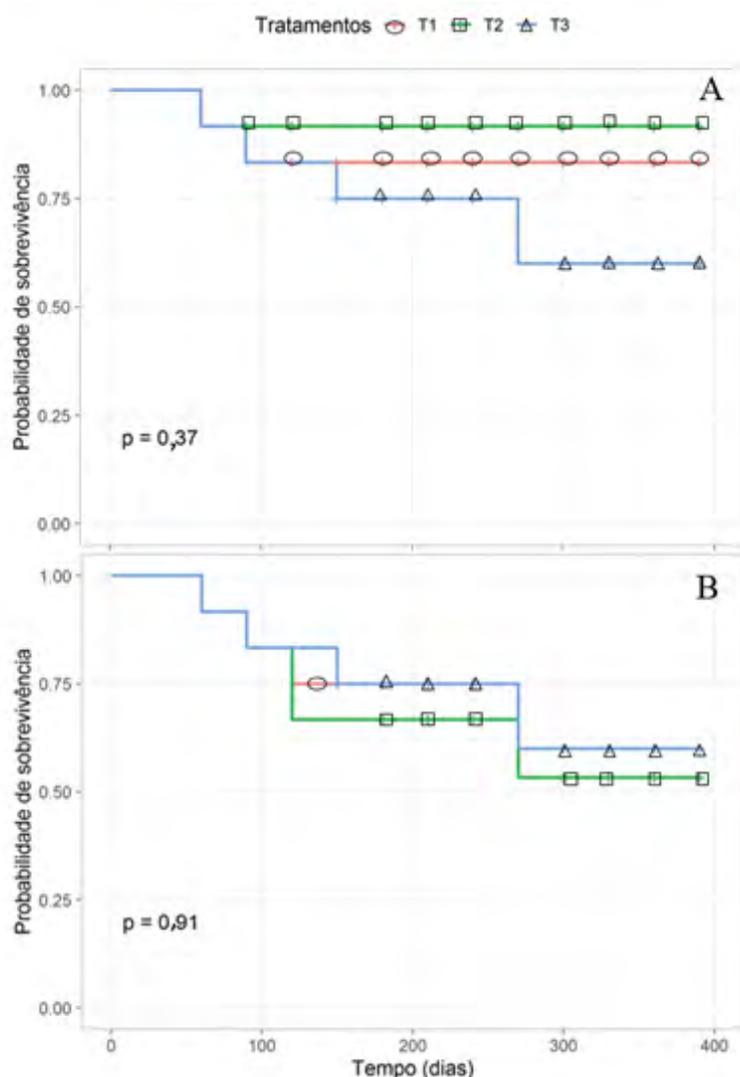
**Figura 6.** Efeito da cobertura de gramíneas exóticas (matocompetição) sobre a sobrevivência de *Inga edulis* (A) e *Piptadenia gonoacantha* (B).

**Figure 6.** Effect of exotic grass cover (competition) on survival of *Inga edulis* (A) and *Piptadenia gonoacantha* (B)

### Sobrevivência entre espécies e tratamentos

Em geral, as taxas de sobrevivência ao longo do tempo não variaram significativamente entre as duas espécies ( $p = 0,18$ ). Foi observada uma probabilidade de sobrevivência de aproximadamente 80% ( $\pm 3\%$ ) aos 90 dias após o plantio, até aproximadamente 50% ( $\pm 5\%$ ) ao final do monitoramento aos 390 dias após o plantio (Figura 6). Estes resultados também sugerem que a mortalidade das duas espécies se manteve constante ao longo do tempo. No entanto, apesar de não observar marcadas diferenças nas tendências de probabilidades entre espécies, observou-se que *P. gonoacantha* apresentou menor probabilidade de sobrevivência ( $30 \pm 4\%$ ), em comparação *I. edulis* ( $61 \pm 2\%$ ) ao final do período de avaliação.

Quando se analisa as probabilidades de sobrevivência por espécie, comparando os tratamentos, *I. edulis* apresentou menor probabilidade sobrevivência ( $60 \pm 5\%$ ) no tratamento controle aos 280 dias após o plantio, mantendo-se constante até o final do monitoramento (Figura 7a). O contrário foi verificado no tratamento com nucleários, o qual manteve uma constante e alta probabilidade de sobrevivência ( $80 \pm 3\%$ ), em comparação aos demais tratamentos, estabilizando-se ao longo do tempo até aos 390 dias após o plantio. Em contraste, *P. gonoacantha* apresentou probabilidades de sobrevivência semelhantes entre tratamentos, diminuindo até 50% ao final do monitoramento (Figura 7b).



**Figura 7.** Curvas de probabilidade de sobrevivência de mudas entre os tratamentos, para *Inga edulis* (A) e *Piptadenia gonoacantha* (B). Tratamentos: T1: hidrogel; T2: nucleário e T3: controle.

**Figure 7.** Seedling survival probability curves between treatments, for *Inga edulis* (A) and *Piptadenia gonoacantha* (B). Treatments: T1: hydrogel; T2: nuclearies and T3: control.

*Efeitos dos tratamentos sobre o crescimento e sobrevivência das mudas*

De acordo com os modelos avaliados para *I. edulis*, observou-se que o tratamento com nucleários teve uma relação positiva significativa, explicando maior variação da sobrevivência (GLMM: Estimativa = 0,076;  $t = 6,4$ ;  $p < 0,001$ ) (Tabela 1). No entanto, o tratamento controle (T3) teve efeitos negativos significativos sobre a

sobrevivência das mudas (GLMM: Estimativa = -0,032;  $t = -2,68$ ;  $p < 0,001$ ), apesar do crescimento em altura desta espécie nessas condições continuar aumentando positivamente.

Com relação a *P. gonoacantha*, os melhores modelos indicam que a sobrevivência foi negativamente afetada em todos os tratamentos (LMM: estimativa = -0,010;  $t = -10,63$ ;  $p < 0,001$ ) ao longo do tempo (Tabela 1).

**Tabela 1.** Modelos lineares de efeitos mistos (LMM, com efeitos aleatórios e fixos).

**Table 1.** Linear mixed effect models (LMM, with random and fixed effects).

Variável resposta	Efeito fixo	Estimativa	SE	T	R <sup>2</sup>
<i>Inga Edulis</i>					
Sobrevivência	Tempo				0,04
	Dias	-0,01	0,019	-1,30	
	Tratamentos				0,72
	T2	0,076	0,10	6,44***	
	T3	-0,032	-0,08	-2,68**	
	T1	0,01	0,02	1,01	
TCRh	~ Tempo				0,06
	~ Dias	0,021	0,03	0,49	
	~ Tratamentos				0,10
	~ T2	0,016	0,04	0,08	
	~ T3	0,02	-0,038	0,03*	
	~ T1	0,001	0,01	0,23	
TCRdns	~ Tempo				0,11
	~ Dias	0,01	0,57	0,56	
	~ Tratamentos				0,14
	~ T2	0,01	1,20	0,23	
	~ T3	0,02	1,04	0,30	
	~ T1	0,01	0,023	0,01	
<i>Piptadenia gonoacantha</i>					
Sobrevivência	~ Tempo				0,77
	~ Dias	-0,01	-0,03	-10,63***	
	~ Tratamentos				0,10
	~ T2	-0,06	0,03	-1,26	
	~ T3	0,05	0,10	0,15	
	~ T1	0,02	0,011	0,05	
TCRh	~ Tempo				0,08
	~ Dias	-0,01	0,02	-1,50	
	~ Tratamentos				0,04
	~ T2	-0,025	0,054	-0,64	
	~ T3	-0,01	0,03	-0,03	
	~ T1	0,001	0,01	0,23	
TCRdns	~ Tempo				0,10
	~ Dias	-0,012	0,57	0,56	
	~ Tratamentos				0,12
	~ T2	0,01	0,03	0,10	
	~ T3	0,03	0,03	0,26	
	~ T1	0,012	0,021	0,05	

Onde: \*, \*\* e \*\*\* =  $p < 0,05$ ;  $p < 0,01$ ;  $p < 0,001$ , respectivamente, pelo teste Anova dos Modelos lineares de efeitos mistos. Se indica o coeficiente de qualidade de ajuste R<sup>2</sup>; TCRdns e TCRh taxa de crescimento relativo para o diâmetro ao nível do solo e para a altura, respectivamente. Tratamentos: T1: hidrogel; T2: nucleário e T3: controle.

## Discussão

Foram observadas diferenças significativas dos valores médios absolutos de parâmetros de crescimento das mudas apenas entre tratamentos, onde os nucleários induziram maiores valores de altura (h) e diâmetro ao nível do solo (DNS) em relação aos outros tratamentos. Esse resultado reforça a importância de se avaliar as taxas de crescimento relativo em relação ao tempo, para estimar os efeitos e eficiência dos tratamentos, ao invés de se avaliar valores médios absolutos, que podem gerar resultados tendenciosos (Hoffmann & Poorter, 2002). Contudo, para parâmetros de crescimento de *Piptadenia gonoacantha* e *Inga edulis*, alguns estudos reportaram valores maiores durante a etapa inicial de restauração florestal (Silva & Côrrea, 2008; Holl et al., 2010; Sobanski & Marques, 2014; Galindo et al., 2017). Por exemplo, foi observado que as espécies *I. marginata*, *Genipa americana* e *Tapirira guianensis* apresentaram incremento de altura igual a 500, 492 e 464% após 18 meses do plantio em áreas com atividade prévia de mineração (Silva & Côrrea, 2008). Por outro lado, em outros estudos foram constatadas grandes diferenças, com altas taxas de crescimento relativo, quando os métodos são eficientes e quando existem condições favoráveis de crescimento (Holl et al., 2010; Sobanski & Marques, 2014; Galindo et al., 2017).

Os resultados revelaram que as probabilidades de sobrevivência foram iguais a 75% e 80% para *I. edulis* e *P. gonoacantha*, o que demonstra que as técnicas não foram completamente eficientes para garantir uma maior probabilidade de sobrevivência durante o período inicial de estabelecimento e crescimento das mudas. Os resultados indicaram que o uso de nucleários determinou uma maior média de indivíduos sobreviventes para *I. edulis* (75%) ao longo do tempo. Contudo, para *P. gonoacantha*, a maior sobrevivência foi obtida no tratamento controle (T3), interações com um valor médio de 55,3%. Diferenças em taxas de sobrevivência podem ser observadas na literatura. Por exemplo, Araújo (2020) avaliou diferentes espécies florestais em um plantio com 11 meses de restauração na Amazônia, tendo encontrado uma taxa de sobrevivência de 76,5%, valor próximo para *I. edulis* (70,33% em T1, neste estudo) e superior para todos os valores de sobrevivência observados em *P. gonoacantha* (50,5%). Estas diferenças contrastantes podem ser devidas às interações de múltiplos fatores abióticos (ex., clima, solo, topografia), bióticos (ex.,

genética das espécies, estratégias de regeneração, competição) e antropogênicos (ex., tipo de restauração florestal, manejo para preparação de plantios), os quais devem ser considerados para futuras pesquisas. Em geral, a taxa de sobrevivência média, para os três primeiros anos, corresponde a 70%, e os principais fatores que induzem a mortalidade estão relacionados ao ataque de formigas, doenças e à matocompetição (Schievenin et al., 2011; Santos et al., 2020).

Embora o nucleário (T2) tenha favorecido *I. edulis*, quando comparado aos outros tratamentos, ainda segue sendo baixa a sobrevivência, uma vez que em alguns projetos de restauração florestal foram encontrados valores de sobrevivência superior (90 a 95%) durante o primeiro ano de crescimento (Holl et al., 2010; Sobanski & Marques, 2014). Cabe destacar que, ao contrário de muitos experimentos em campo onde as condições de matocompetição e umidade do solo são controladas por intervenções periódicas, aumentando a sobrevivência e o crescimento, no presente estudo não foram realizadas manutenções, como coroamentos ao redor das mudas, aplicação de herbicidas, replantios ou irrigação, uma vez que a proposta foi justamente avaliar a eficiência dos nucleários como alternativa para dispensar estes custos da restauração. No programa de restauração florestal em curso nessa mesma região de Mariana, por exemplo, as manutenções e irrigação são realizadas sempre que necessário, para atingir o mínimo de 95% de sobrevivência das mudas (Martins et al., 2020).

De acordo com os diferentes modelos testados, observou-se que as taxas relativas de crescimento ( $TCR_h$  e  $TCR_{dns}$ ) e sobrevivência das espécies apresentam diferentes respostas, em função dos preditores avaliados. No entanto, apenas o tratamento com hidrogel (T1) não explica variações da sobrevivência de crescimento. De acordo com outras pesquisas de restauração florestal, espécies de *Inga* (exemplo, *I. edulis* e *I. densiflora*) apresentaram maiores taxas relativas de crescimento e probabilidade de sobrevivência, em áreas de pastagens degradadas com técnicas de plantio básicas (Holl et al., 2010; Sobanski & Marques, 2014; Ley-López et al., 2016; Galindo et al., 2017), sendo até três e quatro vezes superiores ao observado nesta pesquisa. Davidson et al. (1998) também relataram níveis de sobrevivência de *I. densiflora* superiores a 90% em pastagens degradadas, e *I. edulis* em mais de 95% em florestas da Mata Atlântica (Sobanski & Marques, 2014). Por este motivo, presume-se que os baixos valores de sobrevivência de *I. edulis*

observados neste estudo podem estar relacionados aos fatores ambientais em conjunto com os efeitos diretos dos tratamentos, por exemplo, alteração das condições microclimáticas geradas pelos nucleários, afetando também processos de decomposição e mineralização de nutrientes.

Este experimento corrobora outros estudos sobre o papel negativo da cobertura de gramíneas na sobrevivência de mudas de espécies nativas, provavelmente pelos efeitos da competição por recursos (ex. luz e nutrientes) entre as espécies (Maciel et al., 2011; Galindo et al., 2017; Santos et al., 2020). Neste sentido, um aspecto importante diz respeito ao diâmetro dos nucleários, onde 80 cm parece não ter sido suficiente para evitar a competição das gramíneas exóticas com as mudas. Alguns estudos mostram como a variação do diâmetro de coroamento é determinante para o controle de plantas daninhas, sendo que com o coroamento e eliminação de gramíneas num diâmetro de 1 e 2 m tem sido possível garantir maior sobrevivência e crescimento de mudas (Maciel et al., 2011; Santos et al., 2020), por exemplo para *I. fagifolia* e *Schinus terebinthifolius*, até 14 meses após o plantio (Maciel et al., 2011). Por outro lado, a eliminação de gramíneas agressivas como braquiária (*Urochloa* spp.) das unidades experimentais também garante maior oferta de recursos, como luz e nutrientes, durante o crescimento inicial das mudas (Santos et al., 2020). Neste sentido, esta tendência de diminuição da sobrevivência de mudas com o aumento da cobertura de herbáceas invasoras tem sido amplamente registrada em estudos de restauração florestal (Maciel et al., 2011; Santos et al., 2020). Por outro lado, apesar de não ter detectado diferenças entre tratamentos, existem evidências de que o tamanho e diâmetro de caule podem ser importantes em locais onde a água do solo e os nutrientes não são limitantes, sendo esse outro fator que limita o crescimento quando ocorre competição por luz entre as mudas plantadas e outra vegetação (Grossnickle, 2012; Grossnickle & MacDonald, 2018).

Na tentativa de continuar explorando alternativas de restauração nas áreas com rejeito acumulado, estes resultados baseados em modelos lineares permitiram avaliar os efeitos independentes dos tratamentos e o tempo após o plantio sobre a sobrevivência e as taxas de crescimento relativo da altura e do DNS das duas espécies. Provavelmente, isso também pode estar relacionado às diferentes respostas das características específicas de cada espécie (traços funcionais) frente

a diferentes condições ambientais, como por exemplo, exigência de luz, competição interespecífica e umidade do solo (Holl et al., 2010; Sobanski & Marques, 2014; Ley-López et al., 2016; Galindo et al., 2017). Estes traços funcionais (altura, diâmetro) determinam as respostas de crescimento das espécies à variabilidade ambiental (disponibilidade de recursos, distúrbios), portanto, podem ser importantes preditores de restauração (Laughlin, 2014; Grossnickle & MacDonald, 2018; Chessman et al., 2018). Esta premissa é fundamental para a seleção de espécies durante a restauração, conectando a importância relativa dos traços funcionais na escala dos indivíduos à do ecossistema. Além disso, é possível categorizar áreas de restauração potencial com base na relação dos filtros ambientais com as estratégias e taxas de crescimento das espécies, viabilizando estimativas das trajetórias de sucessão florestal das áreas degradadas em processo de restauração.

## Conclusões

A tecnologia alternativa nucleário não foi completamente eficiente para garantir a sobrevivência e crescimento de *Inga edulis* e *Piptadenia gonoacantha* por 12 meses a partir do plantio, em uma área atingida pelo rejeito da barragem de Fundão em Mariana, MG. Por este motivo, recomenda-se a condução de novos testes de materiais alternativos aos nucleários, de baixo custo, que possam cumprir diferentes funções positivas simultaneamente, por exemplo, reduzir a incidência do matocompetição e manter condições microclimáticas apropriadas para garantir a sobrevivência e o crescimento das mudas. Adicionalmente, recomenda-se avaliar o uso de nucleários com diferentes espécies nativas, em áreas com diferentes níveis de degradação e condições ambientais, com a finalidade de ajustar e melhorar a eficiência desta tecnologia.

Foi observada uma relação negativa significativa da cobertura de gramíneas (matocompetição) com a sobrevivência das mudas das duas espécies, provavelmente sendo essa a principal variável que induziu a alta mortalidade de indivíduos. Embora a probabilidade de sobrevivência tenha sido baixa para as duas espécies, observou-se maior sobrevivência de *I. edulis* na presença do nucleário, em comparação com os demais tratamentos. Entretanto, não foram observadas diferenças nas taxas de crescimento relativo entre os tratamentos como se esperava. Assim, espera-

se que as calibrações de novas tecnologias de baixo custo permitam garantir tanto a sobrevivência como o crescimento das mudas em programas e projetos de restauração no Brasil.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Brasil (CNPq), pela bolsa de pesquisa PDJ para o terceiro autor e à Fundação Renova pela infraestrutura e apoio financeiro ao projeto. Agradecemos aos revisores anônimos pelos comentários importantes sobre este manuscrito.

## Referências

- Ahmed, E. M. Hydrogel: preparation, characterization, and applications: a review. **Journal of Advanced Research**, v. 6, n. 2, p. 105-121, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.07.006>.
- Alvares, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- Araujo, H. J. B. Ações de restauração de florestas exploradas seletivamente no sudoeste da Amazônia brasileira/Restoration of selectively harvested forests in southwestern Brazilian Amazon. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 3, n. 1, p. 43-59, 2020.
- Artioli, C. G. & Corrêa, R. S. Uso de mantas geotêxteis na revegetação de um fragmento de mata de galeria no Jardim Botânico de Brasília-DF: sobrevivência e desenvolvimento de mudas. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 2, p. 795-810, 2019. <https://doi.org/10.5902/198050984016>.
- Bates, D. et al. 'lme4': Linear Mixed-Effects Models using 'Eigen' and S4. R package version 1.1-21. 2019. Available from: <https://cran.r-project.org/web/packages/lme4/lme4.pdf>. Access on: June, 25, 2019.
- Campanharo, I. T. et al. Forest restoration methods, seasonality, and penetration resistance does not influence aboveground biomass stock on mining tailings in Mariana, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 93, e20201209, 2021. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120201209>.
- Carmo, F. F., et al. Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 15, n. 3, p. 145-151, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.06.002>.
- Charles, L. S. et al. Species wood density and the location of planted seedlings drive early-stage seedling survival during tropical forest restoration. **Journal of Applied Ecology**, v. 55, n. 2, p. 1009-1018, 2017. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13031>.
- Cheesman, A. W. et al. The role of topography and plant functional traits in determining tropical reforestation success. **Journal of Applied Ecology**, v. 55, n. 2, p. 1029-1039, 2018. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12980>.
- Crawley, M. J. **The R Book**. 2nd ed. London: Wiley, 2013.
- Davidson, R. et al. Early survival, growth and foliar nutrients in native Ecuadorian trees planted on degraded volcanic soil. **Forest Ecology and Management**, v. 105, p. 1-19, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00295-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00295-8).
- Dias, M. M. M. et al. Coroamento com papelão para controle de braquiária na formação de povoamento para restauração florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 39 n. 1. p. 1-6, 2019. <https://doi.org/10.4336/2019.pfb.39e201801713>.
- Galindo, V. et al. Facilitation by pioneer shrubs for the ecological restoration of riparian forests in the Central Andes of Colombia. **Restoration Ecology**, v. 25, n. 5, p. 731-737, 2017. <https://doi.org/10.1111/rec.12490>.
- Goel, M. K. et al. Understanding survival analysis: Kaplan-Meier estimate. **International Journal of Ayurveda Research**, v. 1, n. 4, p. 274, 2010. <https://doi.org/10.4103/0974-7788.76794>.
- Grossnickle, S. C. & MacDonald, J. E. Why seedlings grow: influence of plant attributes. **New Forests**, v. 49, n. 1, p. 1-34, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11056-017-9606-4>.
- Grossnickle, S. C. Why seedlings survive: influence of plant attributes. **New Forests**, v. 43, n. 5-6, p. 711-738, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9336-6>.
- Hadley, W. R ggplot2 package: an implementation of the grammar of graphics. 2015. Available from: <https://ggplot2.tidyverse.org/>. Access on: June, 25, 2019.
- Holl, K. D. & Aide, T. M. When and where to actively restore ecosystems? **Forest Ecology and Management**, v. 261, n. 10, p. 1558-1563, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.07.004>.
- Holl, K. D. et al. Planting seedlings in tree islands versus plantations as a large-scale tropical forest restoration strategy. **Restoration Ecology**, v. 19, p. 470-479, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2010.00674.x>.
- Hoffmann, W. A. & Poorter, H. Avoiding bias in calculations of relative growth rate. **Annals of Botany**, v. 90, n. 1, p. 37-42, 2002. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf140>.
- Jesus, J. B. et al. Sobrevivência de plântulas de espécies florestais nativas, em mata ciliar no estado de Sergipe. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 40, 2020. <https://doi.org/10.4336/2020.pfb.40e201801>.
- Laughlin, D. C. Applying trait-based models to achieve functional targets for theory-driven ecological restoration. **Ecology Letters**, v. 17, n. 7, p. 771-784, 2014. <https://doi.org/10.1111/ele.12288>.
- Ley-López, J. M. et al. Seedling growth and survival of five tree species in secondary forests and adjacent pastures in the montane rain forests of Southern Costa Rica. **Revista de Biología Tropical**, v. 64, n. 4, p. 1565-1583, 2016. <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v64i4.22775>.
- Maciel, C. D. G. et al. Coroamento no controle de plantas daninhas e desenvolvimento inicial de espécies florestais nativas. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, n. 1, p. 119-128, 2011.

- Martins, S. V. Alternative forest restoration techniques. In: Viana, H. F. S. & García-Morote, F. A. (ed.). **New Perspectives in Forest Science**. London: United Kingdom. IntechOpen, 2018. p. 131-148. <https://doi.org/10.5772/intechopen.72908>.
- Martins, S. V. et al. Monitoring the passive and active ecological restoration of areas impacted by the Fundão tailings dam disruption in Mariana, Minas Gerais, Brazil. In: de Vlieger, K. (ed.). **Recent Advances in Ecological Restoration**. New York: Nova Science Publishers, 2020. p. 51-95.
- Navroski, M. C. et al. Influência do hidrogel no crescimento e no teor de nutrientes das mudas de *Eucalyptus dunnii*. **Floresta**, v. 45, n. 2, p. 315-328, 2014. <http://dx.doi.org/10.5380/ufv.v45i2.34411>.
- Nucleário. **Restauração florestal**: inovação para plantio de mudas. 2020. Disponível em: <https://www.cbd.org.br/cases/nucleario/#:~:text=Nucle%C3%A1rio%20%C3%A9%20uma%20startup%20que,%20ataque%20de%20formigas%20cortadeiras>. Acesso em: 6 abr. 2020.
- Paul, G. S. et al. Foliar herbivory and leaf traits of five native tree species in a young plantation of Central Panama. **New Forests**, v. 43, n. 1, p. 69-87, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11056-011-9267-7>.
- Philipson, C. D. et al. Active restoration accelerates the carbon recovery of human-modified tropical forests. **Science**, v. 369, n. 6505, p. 838-841, 2020. <https://doi.org/10.1126/science.aay4490>.
- Pinheiro, J. et al. 'nlme': Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. **R package**, 2017. Available from: <https://cran.r-project.org/web/packages/nlme/nlme.pdf>. R package version 3.1-131. (20 January 2020, date last accessed).
- Polster, D. F. Soil bioengineering techniques for riparian restoration. In: Proceedings of the 26th Annual British Columbia Mine Reclamation Symposium. British Columbia: The Technical and Research Committee on Reclamation Dawson Creek, 2002. p. 230-239.
- Prieto-Rodão, E. et al. A cost-benefit evaluation of direct seeding with and without protector for two native tree species in a tropical rainforest. **Restoration Ecology**, v. 27, n. 2, p. 247-253, 2018. <https://doi.org/10.1111/rec.12853>.
- R Foundation for Statistical Computing. **R Development Core Team**: R version 3.6.0. Vienna, 2019. Available from: <https://www.R-project.org/>. Access on: Feb. 15, 2020.
- Rodrigues, R. R. et al. Large-scale ecological restoration of high-diversity tropical forests in SE Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 261, n. 10, p. 1605-1613, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.07.005>.
- Santos, F. A. M. et al. Estratégias de controle de braquiárias *Urochloa* spp. na formação de povoamento para restauração florestal. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 1, p. 29-42, 2020. <https://doi.org/10.5902/1980509825559>.
- Schievenin, D. F. et al. Monitoramento de indicadores de uma área de restauração florestal em Sorocaba-SP. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, v. 19, n. 1, p. 95-108, 2012.
- Silva, L. C. R. & Corrêa, R. S. Sobrevivência e crescimento de seis espécies arbóreas submetidas a quatro tratamentos em área minerada no cerrado. **Revista Árvore**, v. 32, n. 4, p. 731-740, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622008000400015>.
- Silveira, E. R. et al. Controle de gramíneas exóticas em plantio de restauração do Cerrado. In: Durigan, G. & Ramos, V. S. (ed.). **Manejo adaptativo**: primeiras experiências na restauração de ecossistemas. São Paulo: Páginas e Letras, 2013. p. 5-8.
- Sobanski, N. & Marques, M. C. M. Effects of soil characteristics and exotic grass cover on the forest restoration of the Atlantic Forest region. **Journal for Nature Conservation**, v. 22, n. 3, p. 217-222, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2014.01.001>.
- Therneau, T. M. Package 'survival'. **Survival analysis Published on CRAN**, 2020. Available from: <https://cran.r-project.org/web/packages/survival/survival.pdf>. 2020. Access on: June, 27, 2019.
- Villa, P. M. et al. Stand structural attributes and functional trait composition overrule the effects of functional divergence on aboveground biomass during Amazon forest succession. **Forest Ecology and Management**, v. 477, 18481, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118481>.
- Villa, P. M. et al. Testing species abundance distribution models in tropical forest successions: implications for fine-scale passive restoration. **Ecological Engineering**, v. 135, p. 687-694, 2019.
- Zuur, A. et al. (ed.). **Mixed effects models and extensions in ecology with R**. New York: Springer Science & Business Media, 2009.