



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO
CURSO DE AGRONOMIA**

LAÍS CAVALCANTE DO NASCIMENTO

**DOSES E MODO DE APLICAÇÃO DE HIDROGEL PARA DESENVOLVIMENTO
INICIAL DE ESPÉCIE ARBÓREA NATIVA**

FORTALEZA

2021

LAÍS CAVALCANTE DO NASCIMENTO

**DOSES E MODO DE APLICAÇÃO DE HIDROGEL PARA DESENVOLVIMENTO
INICIAL DE ESPÉCIE ARBÓREA NATIVA**

Monografia apresentada ao Curso de Agronomia do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, como parte das exigências da disciplina de trabalho de conclusão de curso para obtenção do título de Engenheira Agrônoma.

Orientadora: Prof^a. Dra. Mirian Cristina Gomes Costa.

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- N196d Nascimento, Laís Cavalcante do.
Doses e modo de aplicação de hidrogel para desenvolvimento inicial de espécie arbórea nativa / Laís Cavalcante do Nascimento. – 2021.
73 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Curso de Agronomia, Fortaleza, 2021.
Orientação: Profa. Dra. Mirian Cristina Gomes Costa.
1. Polímeros hidrorretentores. 2. Caatinga. 3. Estresse hídrico. I. Título.

CDD 630

LAÍS CAVALCANTE DO NASCIMENTO

**DOSES E MODO DE APLICAÇÃO DE HIDROGEL PARA DESENVOLVIMENTO
INICIAL DE ESPÉCIE ARBÓREA NATIVA**

Monografia apresentada ao Curso de Agronomia do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, como parte das exigências da disciplina de trabalho de conclusão de curso para obtenção do título de Engenheira Agrônoma.

Aprovada em: 31/03/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dra. Mirian Cristina Gomes Costa (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dra. Carla Danielle Vasconcelos do Nascimento
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Msc. Luan Alves Lima
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À todas as vítimas do COVID-19, em especial
meu tio, Francisco Edimar (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

A Deus e Nossa Senhora, por me proporcionarem saúde e força para ir em busca dos meus sonhos.

Aos meus pais, Edivaldecio Paulo e Francisca Francizalva, a minha irmã, Lara Cavalcante, que são a razão do meu esforço diário e por priorizarem sempre a educação, me fazendo crer em um mundo melhor.

Aos meus avós Carmezinda Costa e Antônio Leandro por me ensinarem a importância da família.

Aos meus avós Edna Paulo e Cícero Rufino (*in memoriam*) por sempre lutarem diariamente por uma vida melhor.

Ao meu companheiro de vida, Marcos Antônio, por, diariamente, me motivar e apoiar bastante.

Às minhas tias, tios e primos, por não hesitarem em me apoiar.

À Universidade Federal do Ceará, pelo ensino público e de qualidade.

À professora Mirian Cristina, por todo auxílio, pela enorme paciência e por ter o dom de ser uma excelente orientadora e professora.

Ao professor Carlos Tadeu, por todo auxílio na parte estatística do trabalho e por estar sempre prontamente disponível para tirar dúvidas.

À banca examinadora, pela disponibilidade e pelas contribuições neste trabalho. Ao MEC-Sesu pela concessão da bolsa PET durante grande parte da minha graduação.

Ao PET-Agronomia UFC e aos amigos criados durante essa trajetória de quase 4 anos como bolsista, impactando diretamente na minha formação pessoal e profissional.

Ao professor Ervino Bleicher por ter sido meu primeiro orientador acadêmico e ter me ensinado bastante do que sei e ter gerado em mim o amor pela ciência.

Às professoras Cândida Bertini e Rosilene Mesquita, por terem aceitado o desafio de tutoria, em especial a prof. Rosilene, por ter prontamente realizado as análises com o IRGA para compor este trabalho.

À Deyse Maia, por todo seu amor e dedicação com os alunos no Laboratório de Manejo do Solo.

Ao José Lucas e Rafaela Batista, pela paciência, amizade e auxílio no laboratório.

Ao banco Santander pela concessão da bolsa Ibero-americana para estudar na Espanha, me fazendo realizar o meu maior sonho.

À Universidade de Santiago de Compostela, a cidade de Lugo, a Marina e Leandro por me receberem tão bem e serem praticamente meus avós durante o intercâmbio, a todos os amigos feitos na minha estância, em especial Thaysis Felix.

À Josivânia Francelino, por ser minha mais antinha e fiel amiga.

Às minhas amigas Erika Aragão, Larissa Mendes e Paloma Paiva pelos vários anos de amizade e companheirismo.

Ao meu amigo, Antonio Aristides, pela irmandade e apoio em todos os momentos.

A todos os amigos feitos durante o curso de graduação, em especial Maria Edilene, Jarlane Viana, Valeska Alves, Mariane Pereira, Sávio Justino, Mirelysia Meireles, Nicholas Ribeiro, Wesley Eusébio, Luiza Rayol e Mariana Vieira.

A todos que compõem o Sítio Carcará e a empresa Agrocert Quality, por me proporcionarem meu primeiro contato com agricultura orgânica e por todos os ensinamentos.

Ao CNPq e a CAPES, pela concessão do auxílio financeiro necessário para realização do estudo.

A todos que de alguma forma contribuíram e incentivaram a realização deste trabalho, sou eternamente grata!

RESUMO

O semiárido está em um contexto edafoclimático que origina desafios para o desenvolvimento vegetal. No caso das espécies florestais, importantes nos florestamentos e reflorestamentos, o déficit hídrico compromete desde a fase de desenvolvimento das mudas. Para diminuir os impactos da escassez hídrica, se torna imprescindível utilizar tecnologias como os polímeros superabsorventes (hidrogéis). Esses materiais, ao entrar em contato com a água, se expandem e retêm umidade, indicando potencial de reter e disponibilizar água às plantas paulatinamente mediante aplicação ao solo. Mesmo com o aumento da utilização dos polímeros no setor florestal, ainda há questionamentos sobre a dose e o modo mais adequados de aplicação no solo. Neste estudo objetivou-se determinar a dose e o modo de aplicação de hidrogel que resultassem em melhor desenvolvimento inicial de mudas de sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia*). O experimento foi conduzido em casa de vegetação com delineamento inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial $2 \times 5 + 1$ com 4 repetições, totalizando 44 unidades experimentais constituídas por vasos contendo 2,5 kg de solo. O primeiro fator de tratamento foi constituído por duas formas de aplicação do polímero Forth Gel[®] (incorporado ou aplicado na cova); o segundo fator foi constituído por cinco doses do polímero (0,4; 0,8; 1,6; 3,2; 6,4 gramas/vaso, correspondentes a 0,02; 0,03; 0,06; 0,13; 0,26% m/m) e o tratamento adicional sem aplicação do polímero. A umidade do solo foi mantida a 70% de sua capacidade de campo durante todo o experimento, através de pesagem e irrigações diárias. Durante 60 dias a partir da semeadura foram obtidos dados de volume total de água evapotranspirado por vaso e desenvolvimento das mudas. Aos 60 dias a partir da semeadura foram avaliadas as trocas gasosas, biomassa, atributos radiculares, nodulação e acúmulo de nitrogênio nas plantas. Os dados que não atenderam à normalidade de BOX-COX foram transformados. Realizou-se a análise de variância (ANOVA), a regressão para as doses e o teste de Tukey ao nível de significância de 5% para o modo de aplicação. A dose de hidrogel 6,4 g/muda (0,26% m/m) na cova promoveu 3,9 L de água evapotranspirada, 1,18 vezes menor que o volume observado para o tratamento com hidrogel incorporado e 1,33 vezes menor que o observado para o tratamento controle. Os resultados de desenvolvimento de mudas, atributos radiculares e acúmulo de nitrogênio indicam que a ausência do polímero ou a aplicação incorporada de 0,4 g/muda (0,02% m/m) foram mais favoráveis às mudas. As trocas gasosas indicaram que a aplicação incorporada foi mais favorável ao desempenho das mudas. A aplicação de hidrogel incorporada no solo nas menores doses ou a não aplicação do polímero acarretou no melhor metabolismo e crescimento das mudas de *M. caesalpiniaefolia*.

Diante disso, a aplicação do polímero superabsorvente incorporada ao solo favoreceu o desenvolvimento das mudas de *M. caesalpiniaefolia*, em comparação à aplicação localizada. A dose de hidrogel recomendada pelo fabricante (0,24% m/m), não proporcionou o desenvolvimento de mudas de sabiá com melhor qualidade, recomenda-se o uso da dose de 0,4 g/muda (0,02% m/m) ou a não aplicação do produto.

Palavras-chave: Polímeros hidrorretentores. Caatinga. Estresse hídrico.

ABSTRACT

The semi-arid region is in an edaphoclimatic scenario which leads into challenges concerning the development of plants. Regarding forest species, fundamental to afforestation and reforestation, the water deficit is compromising since the development of seedlings. With the aim of reducing the impacts of the water scarcity, it is crucial to utilize technologies such as superabsorbent polymers (hydrogel). These materials, when approaching the water, expand and retain humidity, indicating a potential to retain and supply water to plants gradually through its application into soil. Despite the increasing of utilization of polymers in the first sector, there is, nonetheless, the questioning over the dosage and proper application method of hydrogel resulting in a better initial development of Sabiá seedlings (*Mimosa caesalpiniaefolia*). The experiment has been conducted into a greenhouse with completely randomized design, with factorial arrangement $2 \times 5 + 1$ with 4 repetitions, totalizing 44 experimental units formed by vases containing 2.5 kg of soil. The first treatment factor has been constituted of two methods of application of the polymer Forth Gel® (incorporated or applied into the pit); the second treatment factor has been constituted of five dosages of polymer (0.4; 0.8; 1.6; 3.2; 6.4 grams/vase, correspondent to 0.02; 0.03; 0.06; 0.13; 0.26% m/m) and the additional treatment with no application of polymer. The humidity of the soil has been maintained to 70% of its field capacity during the entire experiment, through weighing and daily irrigations. During 60 days as of the sowing, it was obtained data concerning the total water volume under evapotranspiration by vase and development of seedlings. 60 days upon the sowing, it was evaluated the gas exchanges, biomass, root attributes, noduling and accumulation of nitrogen in the plants. The data which did not correspond to normality of BOX-COX has been transformed. An analysis of variance (ANOVA) has been performed, a linear regression to the dosages and a Tukey test A 5% significance level was adopted to the application method. The dosage of hydrogel 6.4 g/vase (0,26% m/m) in the pit has promotes 3.9 L of water evapotranspirated, 1.18 times lower than the volume observed regarding the treatment with hydrogel incorporated and 1.33 times lower than the observed regarding the additional treatment of type control. The results of development of seedlings, root attributes and nitrogen accumulation indicate that the absence of the polymer or the application incorporated of 0.4g/vase 0.02% m/m) has been more favorable to the seedlings. The gas exchanges have indicated the incorporated application has been more favorable to the performance of the seedlings. The application of hydrogel incorporated into the soil in the smallest dosages or non-application of the polymer have led

to a better metabolism and growth of the seedlings of *M. caesalpiniaefolia*. Therefore, the application of the superabsorbent polymer incorporated into the soil has favored the development of the seedling of *M. caesalpiniaefolia*, in comparison to the localized application. The dosage of hydrogel recommended by the producer was not the most suitable for seedlings of sabiá, it is recommended, hence, the use of a 0.4 g/vase dosage (0.02% m/m) or the non-application of the product.

Keywords: Hydrophilic polymers. Caatinga. Hydrical stress.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Imagem ilustrativa do hidrogel comercial da marca Forth Gel® que foi utilizado no experimento.....	33
Figura 2	– Vaso com os 2,5 kg de solo, sendo aberta a cova e realizada a aplicação de 6,4 g/vaso de hidrogel	34
Figura 3	– Raiz de <i>M. caesalpiniaefolia</i> sendo lavada com água destilada para a máxima retirada de resquícios solo e hidrogel, e separada com o auxílio da peneira.....	37
Figura 4	– Raiz de <i>M. caesalpiniaefolia</i> após a segunda lavagem para retirada de excesso de hidrogel	38
Figura 5	– Volume de água evapotranspirado no período de condução do experimento dos tratamentos sem aplicação de hidrogel e em resposta às doses de hidrogel aplicada incorporada ou na cova (A) e modo de aplicação do polímero (B)	41
Figura 6	– Diâmetro do colo dos tratamentos sem aplicação de hidrogel e em resposta às doses de hidrogel aplicada incorporada ou na cova (A) e modo de aplicação do polímero (B).....	44
Figura 7	– Massa seca da raiz dos tratamentos sem aplicação de hidrogel e em resposta às doses de hidrogel aplicada incorporada ou na cova (A) e modo de aplicação do polímero (B)	45
Figura 8	– Índice de Qualidade de Dickson dos tratamentos sem aplicação de hidrogel e em resposta às doses de hidrogel aplicada incorporada ou na cova (A) e modo de aplicação do polímero (B).....	46
Figura 9	– Altura da <i>M. caesalpiniaefolia</i> em resposta ao tratamento sem de hidrogel e em resposta às doses (A) e modo de aplicação do polímero (B).....	47
Figura 10	– Massa seca da parte aérea das plantas de <i>M. caesalpiniaefolia</i> em resposta ao tratamento sem de hidrogel e em resposta às doses (A) e modo de aplicação do polímero (B).....	48
Figura 11	– Massa seca total das plantas de <i>M. caesalpiniaefolia</i> em resposta ao	49

tratamento sem de hidrogel e em reposta às doses (A) e modo de aplicação do polímero (B).....	
Figura 12 – Relação MSR/MSPA plantas de <i>M. caesalpiniaefolia</i> em resposta ao tratamento sem de hidrogel e em reposta às doses (A) e modo de aplicação do polímero (B).....	50
Figura 13 – Mudas de <i>M. caesalpiniaefolia</i> aos 60 dias de desenvolvimento em solos sem aplicação de hidrogel (A), as siglas da esquerda para direita dos tratamentos são TR1 TR2, TR3 e TR4. Aplicação incorporada (B) as siglas dos tratamentos são ID1R3, ID2R2, ID3R1, ID4R2 e ID5R3. Aplicação na cova (C) as siglas dos tratamentos são CD1R1, CD2R1, CD3R4, CD4R1 e CD5R4.....	51
Figura 14 – Planta de <i>M. caesalpiniaefolia</i> aos 59 dias de desenvolvimento com a aplicação em cova de 6,4 g/muda de hidrogel, com folhas de tamanho insuficiente para realização da leitura com o IRGA.....	52
Figura 15 – Fotossíntese para os tratamentos sem aplicação de hidrogel e em resposta às doses de hidrogel aplicada incorporada ou na cova (A) e modo de aplicação do polímero (B).....	53
Figura 16 – Transpiração para os tratamentos sem aplicação de hidrogel e em resposta às doses de hidrogel aplicada incorporada ou na cova (A) e modo de aplicação do polímero (B).....	54
Figura 17 – Condutância estomática para os tratamentos sem aplicação de hidrogel e em resposta às doses de hidrogel aplicada incorporada ou na cova (A) e modo de aplicação do polímero (B).....	55
Figura 18 – Razão Ci/Ca para os tratamentos sem aplicação de hidrogel e em resposta às doses de hidrogel aplicada incorporada ou na cova (A) e modo de aplicação do polímero (B).....	56
Figura 19 – Eficiência instantânea do uso da água para os tratamentos sem aplicação de hidrogel e em resposta às doses de hidrogel aplicada incorporada ou na cova (A) e modo de aplicação do polímero (B).....	58
Figura 20 – Eficiência instantânea de carboxilação para os tratamentos sem aplicação de	59

	hidrogel e em resposta às doses de hidrogel aplicada incorporada ou na cova (A) e modo de aplicação do polímero (B).....	
Figura 21	– Grumos de hidrogel na superfície do solo no tratamento CD5R4 das mudas de <i>M. caesalpiniaefolia</i>	62
Figura 22	– Imagens através de microscópio da raiz do tratamento ID5R3, em diferentes ângulos (A e B), encharcada de hidrogel ao seu redor mesmo após a primeira lavagem.....	63
Figura 23	– Raiz do tratamento TR1 (testemunha – repetição 1) (A) e do tratamento CD5R4 (aplicação via cova – dose 5 - repetição 4) (B) escaneado através do programa WinRHIZO.....	63
Figura 24	– Gráfico de barras com as de nitrogênio acumulado durante o desenvolvimento de mudas de <i>M. caesalpiniaefolia</i> para o tratamento sem aplicação de hidrogel, com aplicação incorporada ou via cova. Médias seguidas pelas mesmas letras não difeririam estatisticamente no teste de Tukey a 5%.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Atributos físicos e químicos para caracterização da camada de 0-20 cm do solo coletado no Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará para realização do estudo.....	30
Tabela 2	– Resumo da análise de variância (ANOVA) para o teste de comparação de médias do volume de água evapotranspirado no período de condução do experimento.....	40
Tabela 3	– Resumo da análise de variância (ANOVA) para o teste de comparação de médias de altura (Alt), diâmetro (Diam), massa seca de parte aérea (MSPA), massa seca de raiz (MSR), matéria seca total (MST), relação MSR/MSPA e Índice de Dickson (IQD) da espécie <i>M. caesalpiniaefolia</i>	43
Tabela 4	– Resumo da análise de variância (ANOVA) para o teste de comparação de médias de fotossíntese (A), condutância estomática (G_s), transpiração (E), razão C_i/C_a (C_i/C_a), eficiência instantânea do uso da água (A/E) e eficiência instantânea de carboxilação (A/ C_i) nas mudas da espécie <i>M. caesalpiniaefolia</i>	52
Tabela 5	– Resumo da análise descritiva das raízes lavadas com a utilização do programa WinRHIZO, obtendo os seguintes parâmetros: área superficial (AS) em cm^2 , diâmetro médio das raízes (DM) em milímetros e comprimento total de raízes por volume de solo (CT), em $cm\ cm^{-3}$, bifurcações e pontas nas mudas da espécie <i>M. caesalpiniaefolia</i>	60
Tabela 6	– Resumo da análise de variância (ANOVA) para o teste de comparação de médias de número total de nódulos (TN), massa seca de nódulos (MN), porcentagem de nódulos eficientes ($\%N_{ef}$) nas raízes e para o acúmulo de nitrogênio (N_{acum}) nas mudas da espécie <i>M. caesalpiniaefolia</i>	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Taxa de fotossíntese líquida
A/E	Eficiência no Uso da Água
ANOVA	Análise de Variância
AS	Área Superficial
CC	Capacidade de Campo
CE	Condutividade Elétrica
Ci/Ca	Razão entre a concentração interna e externa de CO ₂
COT	Carbono Orgânico Total
CT	Comprimento Total de Raízes por Volume de Solo
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
DC	Diâmetro do Colo
DH	Dose de hidrogel
DM	Diâmetro Médio das Raízes
D _s	Densidade do Solo
E	Transpiração
FBN	Fixação Biológica de Nitrogênio
G _s	Condutância Estomática
H	Altura
IQD	Índice de Qualidade de Dickson
m/m	Massa/massa
M%	Saturação por Alumínio
MA	Modo de aplicação do hidrogel
MF	Massa Fresca
MOS	Matéria Orgânica do Solo
MS	Massa Seca
MSN	Massa Seca de Nódulos
MSPA	Massa Seca da Parte Aérea
MSR	Massa Seca das Raízes
MST	Massa Seca Total
N _{acum.}	Acúmulo de Nitrogênio na Parte Aérea
N _{ef} %	Porcentagem de Nódulos Eficientes

SAP	Polímeros Superabsorvente
SB	Soma de Bases
TFSA	Terra Fina Seca ao Ar
TN	Número de Nódulos Total
V%	Saturação por Bases

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1	Degradação de solos no semiárido	21
2.2	Revegetação para recuperar solos degradados no semiárido.....	22
2.3	Efeitos fisiológicos do estresse hídrico em plantas.....	23
2.4	Potencial da espécie sabiá (<i>Mimosa caesalpiniaefolia</i>) para revegetar solos degradados no semiárido.....	25
2.5	Polímeros superabsorventes em ações para revegetar áreas degradadas.....	26
3	MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1	Solo utilizado e área experimental	29
3.1.1	<i>Local de coleta do solo.....</i>	29
3.1.2	<i>Características do solo utilizado.....</i>	30
3.1.3	<i>Área experimental</i>	32
3.2	Hidrogel e espécie vegetal utilizada.....	33
3.3	Delineamento experimental.....	33
3.4	Instalação e condução do experimento.....	34
3.5	Avaliações e análises.....	35
3.5.1	<i>Volume de água evapotranspirado.....</i>	35
3.5.2	<i>Desenvolvimento das mudas.....</i>	35
3.5.3	<i>Análises de trocas gasosas.....</i>	36
3.5.4	<i>Análises das raízes lavadas e da nodulação.....</i>	37
3.5.5	<i>Acúmulo de N no material vegetal.....</i>	39
3.6	Abordagem estatística.....	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
4.1	Volume de água evapotranspirado.....	40
4.2	Desenvolvimento das mudas.....	43
4.3	Análise das trocas gasosas.....	52
4.4	Análise das raízes lavadas.....	60
4.5	Análise da nodulação e acúmulo de N no material vegetal.....	64
5	CONCLUSÃO.....	66
6	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

No semiárido brasileiro há problemas ambientais severos como, por exemplo, a degradação dos solos. Essa degradação pode acontecer naturalmente devido a ocorrência de solos pouco profundos e precipitações pluviiais intensas e concentradas em poucos meses do ano que agravam os processos erosivos. Ademais, a degradação dos solos ocorre de forma mais acelerada quando há intervenções antrópicas negativas por meio da agropecuária sem uso de práticas conservacionistas.

Com a degradação há redução na qualidade do solo, prejudicando a disponibilidade de nutrientes, sua estrutura, a atividade microbiana e outros parâmetros que, juntamente com os fatores climáticos limitantes do semiárido, representados principalmente pela escassez hídrica, dificultam revegetação de áreas degradadas. Estratégias são necessárias para viabilizar essa revegetação, caso contrário o solo ficará descoberto e continuará sofrendo ação dos agentes erosivos, acentuando a degradação no decorrer do tempo. São necessárias tecnologias que proporcionem melhor desenvolvimento de mudas de espécies arbóreas e que favoreçam seu estabelecimento inicial em campo. Desse modo, são necessárias alternativas para que a baixa disponibilidade hídrica não limite o desenvolvimento de mudas de espécies perenes.

Diante das limitações hídricas para irrigar viveiros de mudas e áreas em processo inicial de florestamento em região semiárida, a utilização de polímeros superabsorventes (hidrogéis) é promissora. Esses polímeros, quando umedecidos, se expandem e retêm água, de modo que, quando aplicados ao solo, podem aumentar a capacidade de retenção e de disponibilização de água às plantas. Mudas de espécies perenes produzidas com aplicação de hidrogel deverão apresentar maior qualidade, resultando em plantas mais vigorosas no campo. Contudo, há dúvidas sobre a forma e a melhor dose de aplicação do polímero ao solo para o desenvolvimento inicial de mudas de espécies perenes como a *Mimosa caesalpiniaefolia*.

Este estudo foi realizado para investigar as seguintes hipóteses:

1) A aplicação do hidrogel incorporado ao solo favorece o desenvolvimento inicial de *M. caesalpiniaefolia* em relação à aplicação localizada do polímero;

2) A dose de 0,24% massa/massa ou 6 g/muda, recomendada pelo fabricante de um polímero comercial, resulta em mudas de *M. caesalpiniaefolia* de melhor qualidade. Se há relação entre forma de aplicação e dose do polímero, logo quanto maior a dose, maior será o efeito da forma de aplicação na absorção de água pelo polímero e, conseqüentemente, na retenção de água no solo.

Os objetivos do estudo foram: quantificar o volume de água evapotranspirado, avaliar o desenvolvimento das mudas, analisar as trocas gasosas, atributos radiculares, nodulação e o acúmulo de nitrogênio em mudas de *M. caesalpiniaefolia* mediante aplicação de doses crescentes de hidrogel de forma incorporada e localizada.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Degradação dos solos em regiões semiáridas

As regiões semiáridas apresentam alta variabilidade espacial e temporal em relação às condições climáticas e processos hidrológicos, bem como quanto as rápidas mudanças ocasionadas pela atividade antrópica, afetando os serviços ambientais nos agroecossistemas. Isso gera preocupação, pois as regiões áridas e semiáridas cobrem 1/3 dos continentes e concentram 20% da população mundial (ALAZARD *et al.*, 2015). Em relação as áreas agrícolas do mundo, 54% delas localizam-se nas regiões áridas e semiáridas e nelas há 1/3 de toda a população rural (ROCHA; SOARES, 2015).

Para caracterizar a região como semiárida, é necessário que sejam atendidos três critérios técnicos: precipitação pluvial média anual igual ou inferior a 800 mm, índice de Aridez de Thornthwaite igual ou inferior a 0,50 e percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60% (considerando todos os dias do ano) (BRASIL, 2017). Com base nesses critérios, o semiárido brasileiro é composto por 1.262 municípios nos estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e Minas Gerais. A extensão total do semiárido brasileiro é de 982.563,3 km², sendo 89,5% ocupados pelos Estados da Região Nordeste, exceto o Maranhão e os 10,5% restantes situado na Região Sudeste representado pelo Estado de Minas Gerais (BRASIL, 2017).

A geologia no ambiente semiárido é variável, porém há predomínio de rochas cristalinas, seguidas de áreas sedimentares. Em menor proporção, há áreas de cristalino com cobertura de sedimentos arenosos ou arenoargilosos (CUNHA *et al.*, 2010).

As principais classes de solo predominante no semiárido são: Neossolos ocupando 27,32% da região, seguidas por Latossolos (25,94%), Argissolos (15,59%), Luvisolos (12,18%), Planossolos (10,84%) e Cambissolos (6,02%), que juntas respondem por 97,89% (BRASIL, 2010). Em sua maioria, os solos do semiárido brasileiro são pouco desenvolvidos, com limitações ao uso pela deficiência de água, têm fertilidade natural média a alta e alta suscetibilidade à erosão e à salinidade. A união das características naturais dos solos com a falta de manejo adequado e as atividades exploratórias do homem, resulta na aceleração e no agravamento da degradação de solos na região semiárida (CUNHA *et al.*, 2010).

A degradação do solo pode ser definida como um processo no qual há redução na capacidade atual e futura que o solo tem em produzir bens ou serviços (OLDEMAN, 1992). A degradação do solo afeta diretamente a vida na terra, pois limita as funções que o solo exerce

nos agroecossistemas e, porque não é facilmente reversível, uma vez que processos de formação e regeneração do solo são muito lentos (ARAÚJO *et al.*, 2005).

Em 2015, a degradação de solos em decorrência da erosão, salinização, contaminação e acidificação, representou 33% dos solos agricultáveis do mundo (FAO, 2015). Na América Latina a FAO (Food and Agriculture Organization) estimou que cerca de 50% dos solos estavam degradados no ano de 2015. Segundo Vale (2004), no Brasil, mais de 100 milhões de hectares de solo encontram-se em estado de degradação em virtude do desmatamento, exploração agrícola, grandes obras civis, expansão de áreas urbanas e exploração mineral.

No semiárido brasileiro raramente o uso das terras agrícolas é de acordo com sua capacidade de uso ou aptidão agrícola. A sobreutilização das terras, somada ao superpastoreio, associado com o desmatamento e com os cultivos sem adoção de práticas conservacionistas, resulta em grandes extensões de terras exauridas e sem utilização econômica que acabam sendo abandonadas. Essas áreas apresentam baixa capacidade de auto renovação, principalmente, aquelas que sofreram intensa perturbação (UHL *et al.*, 1991; BIRTHAL *et al.*, 2015).

Diante do apresentado, é necessário buscar a recuperação de áreas degradadas nas regiões semiáridas para garantir que serviços ambientais continuem sendo prestados, seja para a produção de alimentos e matérias-primas ou para a prestação de outros serviços ecossistêmicos fundamentais ao desenvolvimento das populações (AQUINO *et al.*, 2009).

2.2 Revegetação para recuperar solos degradados no semiárido

As caatingas, vegetação presente no semiárido brasileiro, são caracterizadas como florestas arbóreas ou arbustivas, compreendendo principalmente árvores e arbustos baixos muitos dos quais apresentam espinhos, microfilia e algumas características xerofíticas (PRADO, 2003). Essas características naturais dificultam a ocorrência da revegetação natural, por na época seca o solo ficar desprotegido e favorecer a erosão (ACCIOLY, 2010).

Então, a alternativa é a recuperação de solos degradados. A recuperação de um solo degradado deve ter como princípio básico o retorno das condições mínimas para o desenvolvimento vegetal. A revegetação de áreas degradadas é uma estratégia necessária para melhorar os atributos químicos e físicos do solo. Além disso, a cobertura vegetal protegerá o solo contra a erosão (SILVA *et al.*, 2011). Então, a revegetação é a cobertura vegetal do solo, reduzindo a ação e o impacto das chuvas, do vento e do clima que são fatores que favorecem a

lixiviação de nutrientes e que acentuam a erosão no ambiente em degradação (SANTOS *et al.*, 2011; NOGUEIRA *et al.*, 2012).

As áreas consideradas como degradadas podem ser restauradas ou reabilitadas. A reabilitação promove a restauração das funções do ambiente, se aproximando às condições ambientais antes do impacto. Já a recuperação é a restauração da estrutura, da dinâmica e das interações biológicas do ambiente, sejam elas econômicas ou ambientais ao que era antes da degradação, mas o retorno do ambiente ao seu estado original é considerado praticamente impossível (ENGEL; PARROTA, 2003).

Após a escolha adequada das espécies e o reestabelecimento da vegetação no ambiente degradado, há fixação de carbono (C) por meio da fotossíntese. Parte da biomassa vegetal é devolvida ao solo e, por meio de sua decomposição, há ciclagem de nutrientes que tem função fundamental na reabilitação de áreas degradadas (COSTA *et al.*, 2004). Há melhoria nos teores de matéria orgânica do solo (MOS), pois sua formação é favorecida pelo acúmulo de material vegetal e de serapilheira na superfície do solo, enquanto em profundidade a MOS está relacionada com os exsudatos de raízes e fungos micorrízicos. A quantidade insuficiente de MOS no solo degradado, limita o crescimento e sobrevivência de espécies introduzidas para revegetação devido à inadequada retenção de água, baixo fornecimento de nutrientes ou falta de organismos benéficos do solo, como fungos micorrízicos (LARNEY; ANGERS, 2012).

Uma dificuldade para o desenvolvimento vegetal no semiárido é a baixa produção de biomassa devido às condições climáticas. Espécies vegetais da Caatinga geralmente apresentam maior resistência às condições ambientais. Geralmente, nessas condições, a sobrevivência é mais importante do que a alta produtividade (SAMPAIO *et al.*, 2017). Entretanto, as plantas podem não se desenvolver o suficiente para reduzir problemas de erosão e escoamento superficial, acelerando a degradação dos solos (BOCHET, 2015).

O estresse hídrico afeta a fisiologia das plantas e pode comprometer seu desenvolvimento. Mediante estratégias para favorecer a revegetação de áreas degradadas no semiárido, convém observar aspectos fisiológicos das plantas para verificar o seu desenvolvimento.

2.3 Efeitos fisiológicos do estresse hídrico em plantas

As plantas terrestres absorvem água do solo e perdem-na continuamente pelo processo de evaporação. Entretanto, elas desenvolveram mecanismos para evitar a morte pelo

processo de dessecação, como a transpiração que dissipa o calor para o ambiente e ajuda a resfriar a folha. Plantas que estão sob sistema de produção com limitação de água, têm sua absorção dependente diretamente da quantidade total de água disponível no solo e da eficiência do uso da água pela planta. Logo, uma planta que é capaz de adquirir mais água ou que tem maior eficiência no uso de água resistirá melhor à seca por apresentar melhor balanço hídrico nos seus tecidos. Algumas plantas possuem adaptações morfofisiológicas que lhes permitem explorar ambientes mais áridos ou mecanismos de aclimatação que são ativados em resposta ao estresse hídrico (TAIZ *et al.*, 2017).

Um dos mecanismos fisiológicos mais relevantes para minimizar os prejuízos gerados pelo déficit hídrico é o fechamento estomático. Como consequência desse fechamento há aumento da resistência difusiva ao vapor de água, diminuindo a transpiração e, conseqüentemente, o suprimento de CO₂ necessário para a fotossíntese (SCALON *et al.*, 2011; PADMAVATHI; RAO, 2013). Dessa forma, em plantas sujeitas ao estresse hídrico há a redução na atividade fotossintética, sendo imprescindível realizar análises fisiológicas para comprovar este mecanismo nas plantas do presente estudo, tendo em vista que todas foram submetidas a um déficit hídrico.

No estudo de Felipe *et al.* (2016) as mudas de eucalipto (*Eucalyptus benthamii*) foram observadas as trocas gasosas em plantas com e sem hidrogel submetidas a diferentes frequências de irrigações. A utilização do polímero não resultou em diferença estatística significativa, mas as plantas que estavam com estresse hídrico de 24 horas demonstraram que os tratamentos sem hidrogel apresentaram melhores médias para todas variáveis fisiológicas analisadas (assimilação líquida de CO₂ (A), condutância estomática (g_s), transpiração (E), relação entre a concentração intercelular e atmosférica de CO₂ (C_i/C_a) e eficiência no uso da água (A/E). Esses valores ocorreram pelo fato de o estresse hídrico desencadear a osmorregulação e com ela haver maior produção e/ou acúmulo de solutos osmoticamente ativos (prolina, glutamina, betaína, sorbitol e manitol), para manter o turgor e equilíbrio do potencial hídrico celular.

A absorção efetiva de água pelas raízes tem como aspectos fundamentais o volume de solo a ser explorado pelas raízes e o contato entre a superfície das raízes e o solo. Esse contato é maximizado pela emissão dos pelos radiculares e aumento na área superficial e na capacidade de absorção de água. Mediante déficit hídrico há estímulo à expansão do sistema radicular para zonas mais profundas e úmidas do perfil do solo (SANTOS; CARLESSO, 1998).

O déficit hídrico tem efeitos no crescimento, como a limitação da expansão foliar e do crescimento do caule. Porém, de modo geral, há maior desenvolvimento das raízes. A área foliar é um fator importante no desenvolvimento vegetal, pois apresenta relação diretamente proporcional com a fotossíntese (TAIZ *et al.*, 2017).

Segundo Ball *et al.* (1994), a expansão das raízes em campo foi mais afetada pelo déficit hídrico do que a das folhas. As raízes pequenas foram mais sensíveis ao déficit hídrico que as raízes médias e grandes. Além dos problemas com alongamento do caule, expansão foliar e foliar, alguns autores também relatam respostas ao déficit hídrico no diâmetro do colo das plantas, na produção de matéria seca e na razão parte aérea/raiz (SCALON *et al.*, 2011; FELIPPE *et al.*, 2016).

Então, o fechamento dos estômatos, a aceleração no processo de senescência foliar o ajustamento osmótico e comportamento caducifólio das espécies do semiárido são uma forma de adaptação às condições de baixa disponibilidade hídrica (SANTOS; CARLESSO, 1998). Uma alternativa para contornar as limitações causadas pelo déficit hídrico é usar espécies nativas para a revegetação de solos degradados no semiárido. Se a espécie escolhida apresentar interações com microrganismos do solo para potencializar seu estabelecimento, será ainda mais promissor, como é o que ocorre com a *M. caesalpiniaefolia*.

2.4 Potencial da espécie sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia*) para revegetar solos degradados no semiárido

O nordeste brasileiro tem grande parte de seu território, cerca de 11% do território, ocupado por vegetação que tem como características o xerofitismo e a caducifólia, apresentando fisionomia e florística variada e que é conhecida como “caatinga” (DRUMOND *et al.*, 2000).

Dentre as espécies nativas da caatinga, tem-se a *Mimosa caesalpiniaefolia* Benth., pertence à família Fabaceae (ou Leguminosae) e subfamília Mimosaceae, que é conhecida regionalmente como sansão do campo ou sabiá pelo fato de que a cor da casca da árvore se assemelha com a plumagem do pássaro do mesmo nome (CARVALHO, 2007).

A capacidade de fixar o nitrogênio (N) atmosférico vem da relação de simbiose entre as leguminosas e os rizóbios - bactérias fixadoras de N presentes no solo - na qual a leguminosa fornece energia e carbono para o Rhizobium através dos produtos da fotossíntese, e as bactérias, por sua vez, fornecem o N à planta, principalmente na forma de amônio. A simbiose começa com a infecção das raízes das leguminosas por Rhizobium, formando assim

nódulos radiculares. Esse processo de fixação de N é conhecido como fixação biológica de nitrogênio (FBN) (LIU *et al.*, 2011).

Diante da necessidade da adoção de um processo de recuperação de áreas degradadas, a utilização de espécies da família Fabaceae é necessária, pois possibilitará o crescimento das mudas mesmo em condições limitantes. Isso ocorrer porque as espécies dessa família têm a capacidade de se associarem com bactérias e fixarem o N atmosférico (TAVARES; FRANCO; SILVA, 2016). As estirpes de rizóbio NFB 539, NFB 577 e NFB 578 (STAMFORD; SILVA, 2000), UFLA0271 (FERREIRA *et al.*, 2012) e BR3405 (MENDES *et al.*, 2013) têm eficiência comprovada na fixação de nitrogênio em *M. caesalpiniaefolia*.

A *M. caesalpiniaefolia* apresenta tolerância aos períodos longos de estiagem, possuindo acúleos (espinho semelhante ao da roseira) que são a representação evolutiva da adaptação das plantas para reduzirem a perda de água. Todavia, há exemplares sem acúleos (exemplares com gene recessivo). A *M. caesalpiniaefolia* apresenta características interessantes para uso em reabilitação de áreas degradadas, produzindo madeira de boa qualidade, possuindo bom índice de rebrota, tolerando cortes drásticos, fogo e pastejo (FRANCO; DE RESENDE; CAMPELLO, 2011).

A espécie *M. caesalpiniaefolia* é encontrada nos sertões cearenses de baixa a elevada altitude, na maioria dos solos da região. Ocorre em Luvisolos Crômicos órticos, Latossolos, Argissolos e Planossolos Háplicos. A espécie que pode apresentar até 9 m de altura, tem crescimento rápido, com sistema radicular lateral e caule de densidade específica de 880 kg/m³. Esta árvore deve ser rebaixada, com posterior manejo da rebrota, para que possa exercer de forma mais eficiente sua dupla aptidão, para forragem e madeira (ARAÚJO FILHO, 2013).

Apesar de espécies nativas do semiárido serem mais tolerantes ao déficit hídrico, alternativas que favoreçam a retenção e a disponibilidade de água no solo são interessantes em estratégias de revegetação de solos degradados no semiárido. Nesse contexto, se enquadra o uso dos polímeros superabsorventes.

2.5 Polímeros superabsorventes em ações para revegetar áreas degradadas

Polímeros superabsorventes (SAPs), também denominados hidrogéis, são materiais hidrofílicos dispostos em matriz tridimensional (3D) que absorvem e retêm grandes volumes de água e moléculas de soluto no seu estado de expansão. Esse efeito ocorre devido a

existência de grupos carboxil, amino, hidroxila e outros grupos hidrofílicos anexados ao esqueleto polimérico (HENNINK; VAN NOSTRUM, 2012; FENG *et al.*, 2014).

Hidrogéis secos apresentam forma granular e quebradiça. Entretanto, quando são hidratados transformam-se em gel (PREVEDELLO; BALENA, 2000). A taxa de absorção de água de polímeros superabsorventes é de até 400 vezes, mas pode ser ainda maior a depender de sua formulação e da presença de sais no solo ou na água de umedecimento do hidrogel (ALS; BETON, 2005). As partículas que compõem os polímeros superabsorventes são consideradas como "pequenos reservatórios de água" no solo. A água é removida desses reservatórios mediante a demanda da raiz por meio de diferença na pressão osmótica em condições de déficit hídrico (ZOHOURIAN; KABIRI, 2008).

Os hidrogéis podem ser classificados como condicionadores de solo, apresentando capacidade de reter água, reduzir a evaporação e aumentar a disponibilidade de água no solo. A utilização dos hidrogéis mostrou-se eficaz na agricultura, em especial na produção de mudas florestais, por aumentar a disponibilidade de água no solo, reduzir a evaporação, induzir a resistência dos vegetais à seca e também melhorar a sobrevivência de diversas espécies. Então, com a ajuda dos SAPs é possível converter terras degradadas em uma área fértil (HUTTERMANN; ZOMMORODI; REISE, 1999; ZOHOURIAN; KABIRI, 2008; HUTTERMANN *et al.*, 2009; COELLO *et al.*, 2018).

Em áreas áridas ou semiáridas, o uso de hidrogel em solo arenoso - meio predominantemente macroporoso - aumenta a capacidade de reter água e, conseqüentemente, de melhorar a qualidade das plantas que se desenvolvem nesse tipo de solo (AGABA *et al.*, 2010). O uso de hidrogel permitiu reduzir a quantidade total de água para irrigação em 15 a 50% (HUTTERMANN; ZOMMORODI; REISE, 1999; DABHI *et al.*, 2013).

Segundo Saad *et al.* (2009) mudas de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*) plantadas em solo arenoso com a adição de hidrogel, apresentaram mais tardiamente sintomas de déficit hídrico quando comparadas as plantas que estavam sem o polímero, no experimento deste autor, o uso dos SAPs representou um custo adicional R\$ 9,00/ha, tornando-o economicamente viável já que o valor fica bastante diluído durante o desenvolvimento do vegetal e além disso, com hidrogel já presente no solo, ele pode ser reidratado.

A dose de aplicação desse polímero deve ser determinada considerando fatores como o tipo de solo, qualidade da água e do tipo de cultura a ser irrigada (DABHI *et al.*, 2013). A aplicação de 7 g de hidrogel/cova de plantio causou sobre dosagem e conseqüente mortalidade das mudas de *Pinus sylvestris* L. A aplicação de hidrogel na forma de pó é

simples, entretanto aumenta a probabilidade de ocorrer sobre dosagem devido à alta capacidade de dilatação do hidrogel (SARVAŠ; PAVLENDÁ; TAKÁČOVÁ, 2007).

O uso dos SAPs também se mostrou positivo quando usado com adubos e na melhoria do acúmulo de nutrientes pelas plantas. A aplicação dos polímeros reduziu as perdas de nitrogênio por lixiviação em até 45% durante as primeiras quatro semanas, em comparação ao adubo nitrato de amônio (32% de N) sozinho. Quando o nitrato de amônio foi aplicado com os polímeros, o crescimento da festuca (*Festuca arundinacea* L.) aumentou em até 40% e o acúmulo de N em até 50% em comparação com o tratamento só com o adubo (MIKKELSEN; BEHEL; WILLIAMS, 1993).

Em contraponto a esses resultados, a utilização do polímero hidroretentor incorporado ao substrato não afetou o crescimento da parte aérea de *Anadenanthera peregrina*, mas doses acima de 4g/litro de substrato influenciaram negativamente a qualidade das mudas, afetando principalmente o desenvolvimento radicular (SOUSA *et al.*, 2013). Foram observados efeitos semelhantes por Vallone *et al.* (2004) em mudas de cafeeiro com a incorporação de 10 kg hidrogel/m³ de substrato, reduzindo a altura, o diâmetro de coleto, o teor de matéria seca na parte aérea e a radicular quando comparado aos tratamentos sem o polímero e ainda aumentou o tempo da formação de mudas de cafeeiro.

As doses (0,0; 2,5; 5,0; 7,5 e 10,0 g L⁻¹) e os métodos de aplicação de hidrogel (imersão das raízes no polímero previamente hidratado e aplicação de 0,5 L via cova) afetaram a sobrevivência e crescimento inicial de mudas de pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) A dose de 7,0 g L⁻¹ de hidrogel aplicado diretamente na cova com volume de 0,5 L cova⁻¹ foi a que aumentou o estabelecimento e a sobrevivência do pinhão-manso. Doses acima dessa diminuíram a altura e o diâmetro do coleto dessas, pois o hidrogel afeta características hidráulicas e físicas do solo (DRANSKI *et al.*, 2013).

Como se constatou no experimento de Lejcuš; Špitalniak; Dąbrowska (2018) um dos principais fatores que influenciam a capacidade de retenção de água do hidrogel é a carga de solo sobre o ele, que pode reduzir a sua capacidade de intumescimento mediante diferentes formas de aplicação. O tratamento com maior carga (3,83 kPa), carga equivalente a uma camada de solo de 30 cm de profundidade com densidade aparente de 1,3 g cm⁻³, a absorção de água pelo SAP sob carga (AUL) foi de apenas 2 g g⁻¹, enquanto nas amostras controle (sem carga) foi de 48 g g⁻¹. Logo, percebe-se que com a diminuição da carga há maior absorção de água. A diferença percentual no AUL sob carga e nas testemunhas foi de até 4000%.

Então, para a aplicação de hidrogel no solo, há parâmetros básicos que determinam a limitação da absorção de água pelo polímero, como a profundidade de aplicação e a densidade do solo. Esses dois fatores devem ser considerados para que a utilização em campo possa ser realizada de maneira mais eficiente, escolhendo o melhor modo de aplicação e a sua profundidade (LEJCUŚ; ŚPITALNIAK; DĄBROWSKA, 2018).

Em trabalho de revisão recente Saha *et al.* (2020), foi destacado que ainda são necessários estudos para definir a melhor dose de hidrogel para diferentes espécies vegetais em solos distintos. A literatura carece de informações quanto ao melhor modo de aplicação de hidrogéis para favorecer o desenvolvimento inicial de espécies perenes sem comprometimento do sistema radicular das plantas. Também são escassas as informações quanto a atributos fisiológicos das plantas em resposta a doses e modo de aplicação dos polímeros superabsorventes

Diante de todo o exposto, torna-se importante avaliar a influência das doses do hidrogel e o seu modo de aplicação, sobre a qualidade de mudas de espécies florestais, principalmente as nativas da caatinga. Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência de diferentes dosagens do polímero hidrorretentor, incorporado ao substrato ou aplicado via cova, na produção de mudas de *M. caesalpiniaefolia*.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Solo utilizado e área experimental

3.1.1 Local de coleta do solo

A coleta de solo para a execução deste estudo foi realizada no dia 21/02/2020, no Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará (UFC), em local com as seguintes coordenadas geográficas: -3.739360 UTM (latitude sul) e -38.574421 UTM (longitude oeste).

A área apresentava cobertura vegetal predominante de gramíneas. Foi realizada remoção superficial da vegetação para posterior retirada do solo da camada de 0 – 20 cm. O solo coletado foi colocado em saco de ráfia, transportado para casa de vegetação onde foi espalhado sobre bancada previamente limpa onde permaneceu até secagem completa. Posteriormente, para obtenção da Terra Fina Seca ao Ar (TFSA), o solo foi destorroado, homogeneizado e passado em peneira com malha de abertura de 4 mm para a montagem do

experimento. Para realização das análises de caracterização, o solo foi passado em peneira com malha de abertura de 2 mm.

3.1.2 Características do solo utilizado

Foram realizadas análises físicas para determinar a umidade na capacidade de campo (CC), a granulometria e a densidade do solo (D_s). A capacidade de campo foi determinada com uso da mesa de tensão, que tem como princípio a aplicação do potencial de tensão até parar a drenagem da água retida nos poros do solo com força menor que o potencial aplicado, para isso foi estabelecida a tensão de 10 kPa para a determinação do valor da CC, segundo o método descrito em Teixeira *et al.* (2017). Amostras deformadas de solo foram colocadas sobre a mesa de tensão e saturadas com água, utilizando-se os anéis de borracha. O nível da coluna de água abaixo da mesa foi ajustado para 100 cm obtendo, assim, a tensão de 10 kPa, que, por sua vez, pela sucção do vácuo existente na mesa de tensão, ocasiona a drenagem da água retida nos poros (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta (GEE; BAUDER, 1986), com dispersão de 20 g de TFSA com hexametáfosfato de sódio 1 mol L^{-1} (TEIXEIRA *et al.*, 2017). As areias foram separadas em peneira com abertura da malha de 0,053 mm de diâmetro e fracionadas segundo a classificação granulométrica do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA). O silte e a argila foram separados por sedimentação, conforme a Lei de Stokes. Ao final foi determinada a textura do solo (Tabela 1)

A densidade do solo (D_s) foi determinada pelo método do cilindro volumétrico descrito por Teixeira *et al.* (2017) em que há a obtenção da massa por pesagem e do volume pela coleta de amostras de solo com estrutura indeformada por meio de um cilindro de volume interno conhecido (Tabela 1).

Tabela 1 - Atributos físicos e químicos para caracterização da camada de 0-20 cm do solo coletado no Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará para realização do estudo

Atributos físico-químicos analisados	Resultados (0 – 20 cm)
P (mg kg^{-1})	32,1
Ca ²⁺ ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	0,9
Mg ²⁺ ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	0,2
K ⁺ ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	0,1
Na ⁺ ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	0,1

$H^+ + Al^{3+}$ (cmol _c kg ⁻¹)	5,6
Al^{3+} (cmol _c kg ⁻¹)	0,4
CTC efet. (cmol _c kg ⁻¹)	1,6
CTC total	6,8
SB	1,3
V (%)	18,6
m (%)	23
CE (dS m ⁻¹)	0,5
CO org (g kg ⁻¹)	0,7
pH (1:2,5)	4,1
D_s (g/cm ³)	1,5
CC	0,12
Areia (%)	83,4
Argila (%)	9,3
Silte (%)	7,3
Classificação textural	Arenosa

Fonte: Autor, 2020.

As análises químicas de caracterização, cujos resultados estão apresentados na Tabela 1, foram pH em água, condutividade elétrica (CE), teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , P assimilável, Al^{3+} , $H^+ + Al^{3+}$ e carbono orgânico total (COT). Também foram determinados os atributos calculados Capacidade de Troca de Cátions (CTC) efetiva e potencial, Soma de Bases (SB), Saturação por Bases (V%) e Saturação por Alumínio (m%).

As análises químicas foram feitas conforme métodos descritos em Teixeira *et al.* (2017). Foi analisado P (assimilável) utilizando solução extratora de Mehlich 1 (HCl 0,05 mol L⁻¹ e H₂SO₄ 0,025 mol L⁻¹) e a leitura foi efetuada por fotolorimetria. Para analisar os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} foi feita extração com solução de acetato de amônio 1 mol L⁻¹ a pH 7,0 e a quantificação foi por espectrofotometria de absorção atômica. Para determinar Na^+ e K^+ a extração foi com solução de acetato de amônio 1 mol L⁻¹ pH 7,0 e a quantificação foi por fotometria de emissão de chama. Para determinar a acidez trocável ($H^+ + Al^{3+}$) foi utilizada solução de HCl 1 mol L⁻¹ como extrator e titulação com NaOH 0,1 mol L⁻¹.

O potencial hidrogeniônico foi determinado por meio de pHmetro com eletrodo combinado imerso em suspensão solo: líquido (água), na proporção 1:2,5. A condutividade elétrica (CE) foi determinada através método do extrato da pasta de saturada, em que é

utilizado em sistema de vácuo (funil de Büchner-kitassato-bomba) para obtenção do extrato. Para obtenção das soluções extraídas foi utilizada uma bomba de vácuo a uma tensão de 75 kPa, e posteriormente foram realizadas as medidas de condutividade elétrica CE, com o auxílio de condutivímetro digital para todos os métodos citados anteriormente.

O COT do solo foi determinado a partir da oxidação da matéria orgânica via úmida com dicromato de potássio, em presença de H₂SO₄ e aquecimento externo, titulando-se o excesso de dicromato com sulfato ferroso amoniacal (YEOMANS; BREMNER, 1988). Então, a matéria orgânica (MO) foi obtida por meio do carbono orgânico multiplicado pelo fator de “van Bemmelen” que é 1,724.

Com as leituras supracitadas tem-se os teores de nutrientes usados no cálculo da Soma de Bases (SB) (equação 1), da Capacidade de Troca de Cátions (CTC) total ou potencial (T) (cmol_c dm⁻³), calculada pela equação 2, e da CTC efetiva (t) que foi calculada pela equação 3. A saturação por bases (V%) foi calculada pela equação 4 e a saturação por alumínio (m%) pela equação 5.

$$SB = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+ \quad (1)$$

$$CTC (T) = [(SB) + (Al + H)] \quad (2)$$

$$CTC (t) = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Al^{3+} \quad (3)$$

$$V\% = \left[\frac{(SB \times 100)}{T} \right] \quad (4)$$

$$m\% = \left[\frac{(AL^{3+} \times 100)}{T} \right] \quad (5)$$

3.1.3 Área experimental

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Ciências do Solo da Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Fortaleza – Ceará. O sítio experimental está inserido em região de clima tropical úmido, classificado como Aw’ de acordo com a classificação de Köppen (AGUIAR *et al.*, 2002).

3.2 Hidrogel e espécie vegetal utilizados

No presente experimento foi utilizado um hidrogel comercial à base de acrilamida e acrilato de potássio chamado Forth Gel® (Figura 1). O produto apresenta 39,7% de carbono, 6,7% de hidrogênio, 15% de nitrogênio e relação C/N de 2,6 (ALBUQUERQUE, 2019).

Figura 1 - Imagem ilustrativa do hidrogel comercial da marca Forth Gel® que foi utilizado no experimento.



Fonte: Forth Jardim.

A espécie vegetal utilizada no estudo foi o sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia* Benth). As sementes da espécie foram adquiridas já com a quebra de dormência.

3.3 Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi realizado com delineamento inteiramente casualizado (DIC), em fatorial 2 x 5 + tratamento adicional. O primeiro fator de tratamento correspondeu a duas formas de aplicação do hidrogel (incorporação total no solo e aplicação localizada na cova de semeadura); o segundo fator de tratamento foi constituído por cinco doses do Forth Gel® (0,016%, 0,032%, 0,064%, 0,128% e 0,26% m/m). O tratamento adicional foi constituído por um controle sem aplicação de hidrogel. Considerando a massa de solo a ser utilizada em cada vaso (2,5 kg) as doses de hidrogel foram 0,4; 0,8; 1,6; 3,2; 6,4 g/muda. Ressaltando sempre que para essas doses deve ser considerado um volume de solo de 2,5 kg. As doses que foram avaliadas no presente estudo correspondem a 0,16; 0,32; 0,64; 1,28 e 2,56 g/kg de solo.

É relevante ressaltar que a dose de hidrogel recomendada pelo fabricante para espécies perenes é 2,40 g/kg de solo (ALBUQUERQUE, 2019), 0,24% m/m ou 6 gramas de hidrogel por muda considerando 2,5 kg de solo.

O estudo foi realizado com 4 repetições totalizando 44 unidades experimentais. Cada unidade experimental foi constituída por vasos com capacidade para três litros.

3.4 Instalação e condução do experimento

A instalação do experimento foi em 17/08/2020 e a condução foi por 60 dias. A quantidade de 2,5 kg de solo foi previamente pesada e depois armazenada em saco plástico. Os vasos foram preenchidos com solo deixando cerca de 10 cm da borda livre para garantir espaço suficiente para a expansão do hidrogel mediante adição de água, de modo que o conteúdo não transbordasse.

As doses de hidrogel foram previamente pesadas no Laboratório de Manejo do Solo e separadas em sacos plásticos. No tratamento com hidrogel incorporado, o polímero foi misturado ao solo sobre um saco plástico com posterior deposição nos vasos, buscando a maior homogeneidade possível na aplicação.

No tratamento com o hidrogel aplicado de forma localizada, foi colocada uma camada de solo de cerca de 15 cm nos vasos, posteriormente foi depositado o hidrogel na área correspondente à cova (Figura 2) que depois foi coberto com uma camada de cerca de 10 cm de solo. O tratamento adicional não teve aplicação de doses de hidrogel.

Figura 2 – Vaso com os 2,5 kg de solo, sendo aberta a cova e realizada a aplicação de 6,4 g de hidrogel.



Fonte: Autor, 2020.

Na parte inferior de todos os vasos foram colocadas telas para evitar perda de solo e do hidrogel aplicado. Conforme já informado, as sementes de *M. caesalpiniaefolia* já estavam com a quebra de dormência. Foi realizada a semeadura de quatro sementes por vaso

e, após 7 dias da germinação, foi realizado o desbaste deixando apenas uma planta com melhor desenvolvimento.

Para a irrigação dos vasos foi utilizada a informação da umidade na capacidade de campo que foi de 314 ml de água em cada vaso de 3 litros contendo 2,5 kg de solo em cada vaso. A primeira irrigação foi com volume de água correspondente a 70% da CC (220 ml de água) para simular condição de déficit hídrico. Cada vaso foi pesado logo após a primeira irrigação e, a partir disso, foram feitas pesagens diárias. A diferença de massa em relação à pesagem inicial correspondeu à água evapotranspirada e direcionou a reposição do volume de água para manter a umidade em 70% da capacidade de campo. Foi utilizada água destilada para a irrigação diária das plantas.

3.5 Avaliações e análises

3.5.1 Volume de água evapotranspirado

Para saber o volume de água evapotranspirado diariamente foi realizada a pesagem diária dos vasos. Após a primeira irrigação, no dia da instalação do experimento, todos os vasos foram pesados para saber o peso (kg) de cada um após a irrigação com 220 ml de água. Com esses valores anotados, nos demais dias os vasos foram pesados individualmente. Do peso inicial (após a primeira irrigação) foi subtraído o peso que cada vaso apresentou diariamente (equação 6). O resultado dessa subtração foi correspondente à quantidade de água evapotranspirada e que teve de ser reposta diariamente para manter o solo em 70% da sua CC.

$$Ve = (\textit{peso inicial} - \textit{peso diário}) \quad (6)$$

Ao final do experimento, foi calculado o volume total de água evapotranspirado neste experimento para cada tratamento através do somatório da evapotranspiração (equação 7) diária de cada vaso.

$$VT = \sum Ve \quad (7)$$

3.5.2 Desenvolvimento das mudas

Foram realizadas avaliações biométricas no material vegetal 59 dias após a semeadura, obtendo, assim, valor de altura e diâmetro do caule das mudas. As medições de altura e diâmetro foram realizadas com o auxílio de uma régua graduada de 30 cm e um paquímetro digital. Ao final do experimento (60 dias após semeadura) foi determinada a biomassa de parte aérea e de raízes.

Para avaliação da massa seca de parte aérea e raízes as plantas foram removidas do substrato com auxílio de água corrente e lavadas com água destilada, sendo então separadas em parte aérea e radicular. Após a etapa de separação de raiz e parte aérea, o excesso de água foi retirado colocando-se as amostras expostas ao ar sobre papel toalha para posterior determinação da massa fresca (MF). Com sacos de papel previamente identificados o material foi colocado em estufa com circulação forçada e renovação de ar a 65°C durante 72 horas até peso constante. Posteriormente as amostras foram pesadas em balança de precisão, determinando-se a massa seca (MS) (PEGORARO *et al.*, 2014).

Foi determinado o Índice de Qualidade de Dickson (IQD), segundo Dickson *et al.* (1960). O índice foi determinado por meio de cálculo em função da altura da parte aérea (H), do diâmetro do colo (DC), massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca das raízes (MSR), conforme equação 8.

$$IQD = \frac{MST(g)}{\frac{H(cm)}{D(mm)} + \frac{MSPA(g)}{MSR(g)}} \quad (8)$$

3.5.3 Análises das trocas gasosas

As trocas gasosas foram avaliadas aos 59 dias após a semeadura da *M. caesalpiniaefolia*, utilizando sistema aberto portátil de fotossíntese e analisador de CO₂ por radiação infravermelha (“Infra Red Gas Analyser - IRGA”, Modelo Li-6400 XT, LI-COR, Lincoln NE, USA). A avaliação foi feita na porção mediana de folhas de *M. caesalpiniaefolia* que estavam com o limbo foliar completamente expandido, preferencialmente no horário entre 7:30 e 9:00 horas (SILVA *et al.*, 2015).

As variáveis de trocas gasosas mensuradas foram: taxa de fotossíntese líquida (A) ($\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática (Gs) ($\text{mol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), transpiração (E) ($\text{mmol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), razão entre a concentração interna e externa de CO₂ (Ci/Ca) (mol mol^{-1}), eficiência instantânea no uso da água (A/E) ($\mu\text{mol mmol}^{-1}$) e eficiência instantânea de

carboxilação (A/Ci) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$) (SILVA *et al.*, 2015).

3.5.4 Análise das raízes lavadas e da nodulação

Ao final do experimento (60 dias após a germinação), as plantas foram retiradas dos vasos, separando parte aérea e raízes. Houve cuidado de coletar todas as raízes das plantas de cada vaso. As raízes foram lavadas com água destilada, com o auxílio de peneiras para que as raízes finas e menores também fossem coletadas (Figura 3).

Figura 3 – Raiz de *M. caesalpiniaefolia* sendo lavada com água destilada para a máxima retirada de resquícios solo e hidrogel, e separada com o auxílio da peneira.



Fonte: Autor, 2020.

Após essa primeira lavagem, determinou-se o número de nódulos total (TN), quantidade e porcentagem de nódulos eficientes (% Nef), e massa seca (MSN) de nódulos totais. Os nódulos foram contados determinar TN, depois foram partidos ao meio para verificar se estão ativos de acordo com a coloração avermelhada para determinar %Nef e depois as amostras foram secas na estufa a 65° até atingir peso constante, podendo, assim, e determinar os valores de MSN e MFN.

Para as demais análises radiculares, foi necessário realizar outra lavagem das raízes (Figura 4), pois mesmo após a primeira lavagem quantidade significativa de hidrogel persistiu nas raízes. Foi necessário deixar o material imerso em água destilada durante dois dias e realizar uma segunda lavagem utilizando peneiras e pinças para retirar resíduos de solo ou do polímero mais resistentes à remoção na primeira lavagem. As raízes dos tratamentos com as maiores doses de hidrogel ainda ficaram com resquícios do polímero e solo.

Figura 4 – Raiz de *M. caesalpiniaefolia* após a segunda lavagem para retirada de excesso de hidrogel.



Fonte: Autor, 2020.

Após a segunda lavagem as raízes foram armazenadas em recipientes plásticos com tampa, contendo álcool 70% para preservar as amostras até realização das análises. Tendo em vista que para analisar todas as amostras seriam necessários cerca de dois meses, foi decidido analisar atributos radiculares de amostras representativas dos tratamentos. Foi realizada análise descritiva da imagem das raízes lavadas dos seguintes tratamentos e repetições: Testemunha repetição 1 (TR 1), incorporado dose 1 (0,4 g) repetição 3 (ID1R3), incorporado dose 5 (6,4 g) repetição 3 (ID5R3), cova dose 1 (0,4 g) repetição 1 (CD1R1), cova dose 5 (6,4 g) repetição 4 (CD5R4).

Foi usado o programa WinRHIZO *basic* associado a scanner da marca Epson, modelo Perfection V800 Photo para obtenção de imagens das raízes lavadas e análise dos atributos radiculares. Como cada amostra apresentava quantidade considerável de raízes, houve separação do material e obtenção de imagens em mais de um escaneamento. Com isso foi evitada a sobreposição de raízes e a redução na precisão das análises.

As raízes foram dispostas em bandeja de acrílico transparente de 20 x 25 cm. Em seguida, a bandeja foi colocada sobre a parte de vidro do scanner para obtenção da imagem. Os parâmetros de aquisição foram: prioridade em velocidade (*speed priority*), imagens do tipo tons de cinza (*grey levels*), resolução média (400 dpi) e sistema de posicionamento via bandeja (*tray*) de 20 cm (MAYER *et al.*, 2018).

As análises morfológicas geradas pelo software foram salvas em bloco de notas, no formato .TXT. Posteriormente, as imagens foram importadas para a extensão do sistema WinRHIZO (XLRHIZO) que é uma planilha do Excel que transforma os dados do bloco de notas em planilha com os dados dispostos de forma organizada. Depois de estar no XLRHIZO

os dados das análises foram salvos em Excel. As imagens geradas pelo programa foram salvas em .TIF, que é um formato padrão.

Com as análises realizadas foram estimados os seguintes parâmetros relacionados à morfologia do sistema radicular: área superficial (AS) em cm², diâmetro médio das raízes (DM) em milímetros, comprimento total de raízes por volume de solo (CT), em cm cm⁻³, bifurcações e pontas em número total por imagem das raízes.

3.5.5 Acúmulo de N no material vegetal

Foram realizadas análises químicas de parte aérea das plantas para determinar o teor de nitrogênio e posteriormente quantificar o acúmulo nitrogênio (N) nas plantas.

O material vegetal seco em estufa foi triturado em moinho tipo Willey e acondicionado em sacos de papel previamente identificados para a realização das análises químicas. Foram retiradas do material amostras de 50 mg de cada material moído, que foram pesadas com o auxílio de uma balança de precisão.

O material resultante da moagem foi submetido a digestão úmida, segundo método descrito em Malavolta *et al.* (1997) para a determinação de N. A determinação do teor de N no tecido vegetal foi realizada a partir da digestão com ácido sulfúrico (H₂SO₄) concentrado juntamente com os catalisadores, sulfato de cobre (CuSO₄), sulfato de potássio (K₂SO₄) e peróxido de hidrogênio (H₂O₂). Na titulação foi usado ácido bórico (H₃BO₃) e hidróxido de sódio (NaOH) 0,01N, seguindo o método Kjeldhal (AOAC, 1995).

O conteúdo de nitrogênio na parte aérea (galhos e folhas) do sabiá foi estimado por meio da equação do Acúmulo de Nitrogênio da Parte Aérea (N_{acum.}) (equação 9).

$$N_{acum} = \left[\frac{(massa\ seca \times acúmulo\ do\ nutriente)}{1000} \right] \quad (9)$$

3.6 Abordagem estatística

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade de BOX-COX. Nos dados de massa seca de parte aérea (MSPA), massa seca de raiz (MSR), matéria seca total (MST), relação MSR/MSPA (MSR/MSPA), Índice de Qualidade Dickson (IQD) e nitrogênio acumulado (N_{acum.}) houve ausência de distribuição normal, então foram realizadas as seguintes

transformações: $MSPA=(MSPA+0.5)^{0.5}$; $MSR=(MSR+0.5)^{0.2}$; $MST=MST^{0.6}$; $MSR/MSPA=MSR/MSPA^{0.2}$; $IQD=IQD^{0.7}$; $N_{acum}=N_{acum}^{0.6}$.

Em seguida, foi feita a análise da variância (ANOVA) e, havendo diferença significativa, foi aplicado o teste de Tukey ao nível de significância ($p < 0,05$) para comparação de médias do fator qualitativo (modo de aplicação do hidrogel) e análise de regressão para fator quantitativo (doses de hidrogel). Quando a interação foi significativa, foram feitos os desdobramentos. Para as análises estatísticas foi utilizado o software SAS/STAT 15.2. (SAS INSTITUTE INC., 2020).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Volume de água evapotranspirado

Houve interação entre modo de aplicação (MA) e dose de hidrogel (DH) ($p < 0,01$) afetando o volume de água evapotranspirado (Tabela 2).

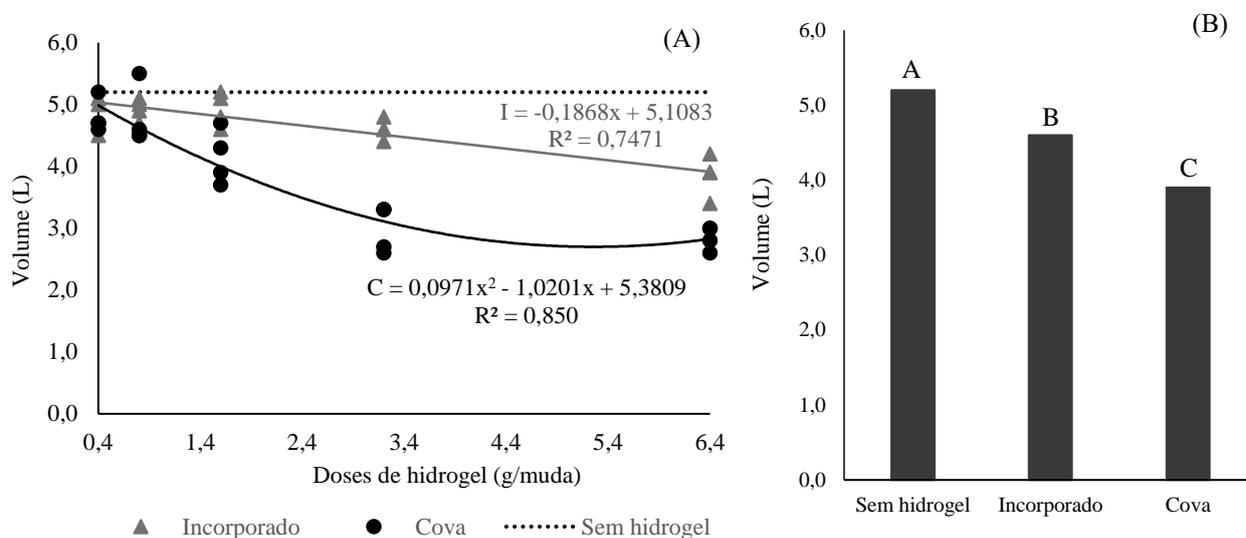
Tabela 2. Resumo da análise de variância (ANOVA) para o volume de água evapotranspirado no período de condução do experimento

Fonte de variação (FV)	Volume de água evapotranspirado
	-----Valor F-----
Modo de aplicação do hidrogel (MA)	48**
Dose de hidrogel (DH)	32**
MA x DH	7,1**
CV (%) ¹	7,7

¹ CV = coeficiente de variação; * significativo a 5% de probabilidade; ** significativo a 1% de probabilidade; ^{ns} não significativo.

A evapotranspiração média nos tratamentos com hidrogel variou de 3,9 a 4,6 litros e foi inferior à evapotranspiração média de 5,2 litros observada no tratamento sem hidrogel (Figura 5). A aplicação de hidrogel na cova resultou na menor média de evapotranspiração (3,9 litros) quando comparada à aplicação incorporada do polímero (4,6 litros). Vale destacar que para a aplicação em cova, a menor evapotranspiração ocorreu a partir da dose 3,2 g/muda (0,13% m/m) de hidrogel, enquanto para a aplicação incorporada a menor evapotranspiração ocorreu para a dose 6,4 g/muda de hidrogel (0,26% m/m).

Figura 5 – Volume de água evapotranspirado no período de condução do experimento dos tratamentos sem aplicação de hidrogel e em resposta às doses de hidrogel aplicada incorporada ou na cova (A) e modo de aplicação do polímero (B)



Fonte: Autor, 2020.

A aplicação de hidrogel reduziu a evapotranspiração, gerando resultados positivos na retenção de umidade no solo, isso aconteceu porque os hidrogéis têm a capacidade de reter umidade (YÁÑEZ-CHÁVEZ *et al.*, 2014). No trabalho desses autores, plantas de milho aos 52 dias de desenvolvimento que cresceram sem aplicação de hidrogel, com 12,5 kg ha⁻¹ e com 25 kg ha⁻¹ do polímero, apresentaram respectivamente 38, 51 e 43,7 cm de altura e retenção de 14, 18,1 e 20% de umidade no solo. Esses resultados demonstram que o solo com a maior dose de hidrogel (25 kg ha⁻¹), reteve mais umidade (menor evapotranspiração). Essa redução na evapotranspiração pode ter ocorrido devido à altura reduzida da planta e assim ela ter perdido menos umidade quando comparada à dose intermediária (12,5 kg ha⁻¹), que esta, por sua vez, proporcionou maior crescimento vegetal, entretanto, reteve menos umidade (evapotranspirou mais).

Os resultados citados no parágrafo acima estão corroborando com a Figura 5, em que a redução na evapotranspiração foi mais acentuada no tratamento em cova na dose de 3,2 g/muda, que pode ter ocorrido em virtude do menor desenvolvimento vegetal nesse tratamento.

No estudo de Huttermann; Zommodi; Reise (1999), solos arenosos corrigidos com as altas concentrações de hidrogéis foram capazes de armazenar maior quantidade de água do que o solo controle (sem hidrogel) e assim reduzirem suas evapotranspirações. No experimento dos autores, aproximadamente 90% da água que estava presente no início nos

solos controle evaporou, enquanto nos solos com 0,4% de aplicação do polímero, apenas cerca de 50% foi perdida. Isso foi explicado por ocorrer a transferência direta da água captada pelo hidrogel superabsorvente para o vegetal. Nos solos com incorporação de hidrogel, a água foi retida durante o período de irrigação e assim aumentou a capacidade de retenção de água quando comparado ao tratamento não houve aplicação do polímero (HUTTERMANN; ZOMMORODI; REISE, 1999)

Na revisão de Huttermann *et al.* (2009), foram apresentados resultados de estudo em que mudas de *Grevillea robusta*, plantadas em areia sem hidrogel ou com 0,2 e 0,4% m/m do polímero superabsorvente. Os resultados indicaram que o hidrogel levou ao maior armazenamento de água e diminuiu evapotranspiração diária em comparação com o controle. Segundo os autores, o tratamento com 0,2% m/m de hidrogel foi o que apresentou menor evapotranspiração, sendo a dose ideal para a espécie e tipo de solo estudado.

Agaba *et al.* (2010) observaram que a dose 0,4% m/m de hidrogel foi mais eficiente em reduzir a evapotranspiração mediante plantio de mudas de espécies arbóreas. Nesse estudo, também se observou que a alteração das características dos solos com a aplicação de hidrogéis diminui a condutividade hidráulica dos solos, o que pode reduzir a transpiração da planta e a evaporação do solo (evapotranspiração).

A capacidade de retenção de água pelos SAPs é influenciada pela carga de solo sobre o polímero, de modo que a diminuição da carga aumenta absorção de água (LEJCUŚ; ŚPITALNIAK; DĄBROWSKA, 2018). Diante disso, a aplicação de hidrogel na cova deveria ter sofrido maior ação da carga de solo, por ser localizada e ocorrer a deposição do polímero em maior profundidade. Contudo, com a aplicação em cova houve menor perda de água por evapotranspiração e até sinais de excesso de água comprometendo o desenvolvimento vegetal.

Nesse caso, é possível que na aplicação incorporada tenha ocorrido redução na absorção de água devido ao maior contato do polímero com os íons da solução do solo, que é outro fator a reduzir a absorção de água pelo hidrogel. Autores que estudaram a capacidade de absorção do poliacrilato de sódio sob diferentes concentrações salinas, observaram que, a absorção foi reduzida cerca de 12 vezes, quando o poliacrilato de sódio estava em contato com a solução com a maior quantidade de íons em comparação à água destilada (MARCONATO; FRANCHETTI, 2002).

A camada de cobertura do solo sobre o SAP diminuiu a evapotranspiração em cada camada em relação ao controle. Logo, a camada inferior de solo é menos afetada pela evapotranspiração, de modo que o teor de umidade da camada inferior diminui lentamente. Então, o SAP aplicado incorporado não reduziu tanto a evapotranspiração, quando comparado

à cova, por ter uma porção que estava na parte superficial do solo e isso aumenta a sua capacidade de perder água por evapotranspiração (ZHAO *et al.*, 2019).

No presente estudo a dose de hidrogel correspondente a 3,2 g/muda (0,128% m/m), aplicada em cova foi a que resultou em menor evapotranspiração para *M. caesalpiniaefolia*.

4.2 Desenvolvimento das mudas

Houve interação entre modo de aplicação (MA) e dose de hidrogel (DH) afetando diâmetro, matéria seca da raiz (MSR) ($p < 0,01$) e Índice de Qualidade de Dickson ($p < 0,05$) das plantas de *M. caesalpiniaefolia* (Tabela 3). A altura, a matéria seca da parte aérea (MSPA) e a matéria seca total responderam aos dois fatores de tratamento isoladamente ($p < 0,05$), enquanto MSR/MSPA respondeu somente às doses de hidrogel ($p < 0,05$) (Tabela 3).

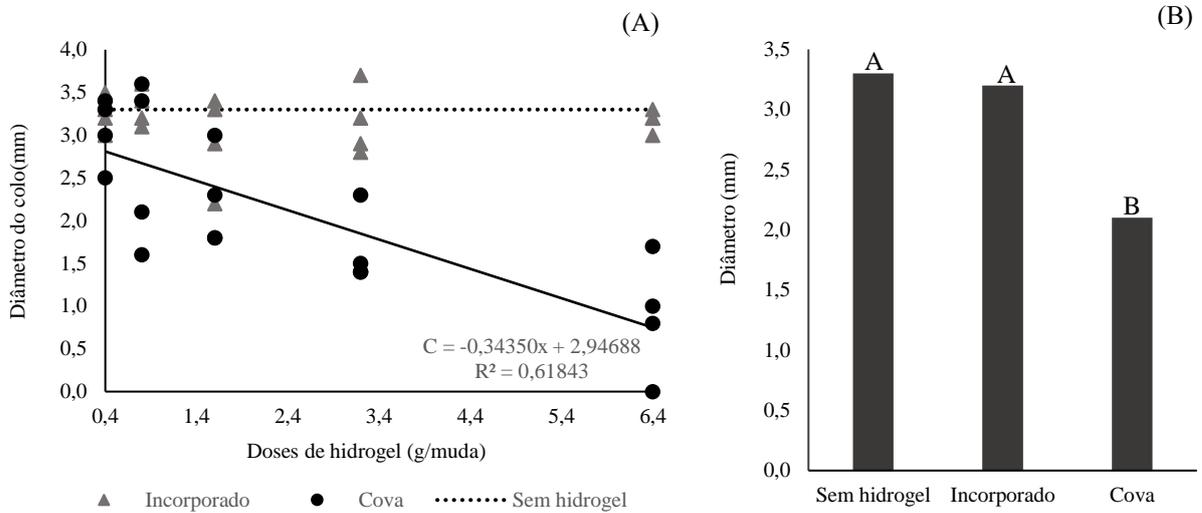
Tabela 3. Resumo da análise de variância (ANOVA) para altura (H), diâmetro do colo (DC), massa seca de parte aérea (MSPA), massa seca de raiz (MSR), matéria seca total (MST), relação MSR/MSPA e Índice Qualidade de Dickson (IQD) da espécie *M. caesalpiniaefolia*

Fonte de variação (FV)	H	DC	MSPA	MSR ²	MST ²	MSR/MSPA	IQD ²
	-----Valor F-----						
Modo de aplicação do hidrogel (MA)	49,2**	40,1**	42,3**	52,6**	59,5**	4,2*	50,2**
Dose de hidrogel (DH)	6,1**	5,8**	6,3**	6,3**	8,2**	3,4*	9,9**
MA x DH	1,1 ^{ns}	4,9**	0,9 ^{ns}	4,4**	2,1 ^{ns}	1,7 ^{ns}	3,8*
CV (%) ¹	22,7	19,7	15,5	2,7	28,1	4,4	29,2

¹ CV = coeficiente de variação; ² Dados transformados por BOX-COX; * significativo a 5% de probabilidade; ** significativo a 1% de probabilidade; ^{ns} não significativo.

O diâmetro do colo das mudas nos tratamentos com hidrogel variou entre 2,1 e 3,2 mm e foi inferior ao diâmetro médio de 3,3 mm observado no tratamento sem hidrogel (Figura 6). A aplicação de hidrogel na cova resultou na menor média de diâmetro (2,1 mm) quando comparada à aplicação incorporada (3,2 mm). Na aplicação na cova, o maior diâmetro (3,4 mm) foi observado a partir da dose 0,4 g/muda de hidrogel. Não houve significância para a curva de regressão da aplicação incorporada (Figura 6A). Em relação ao modo de aplicação, as plantas sem aplicação do polímero ou com aplicação incorporada, apresentaram médias semelhantes e não diferiram estatisticamente entre si, mas diferiram estatisticamente da aplicação em cova, que esta, por sua vez, apresentou a menor média de diâmetro (Figura 6B).

Figura 6 – Diâmetro do colo dos tratamentos sem aplicação de hidrogel e em resposta às doses de hidrogel aplicada incorporada ou na cova (A) e modo de aplicação do polímero (B)

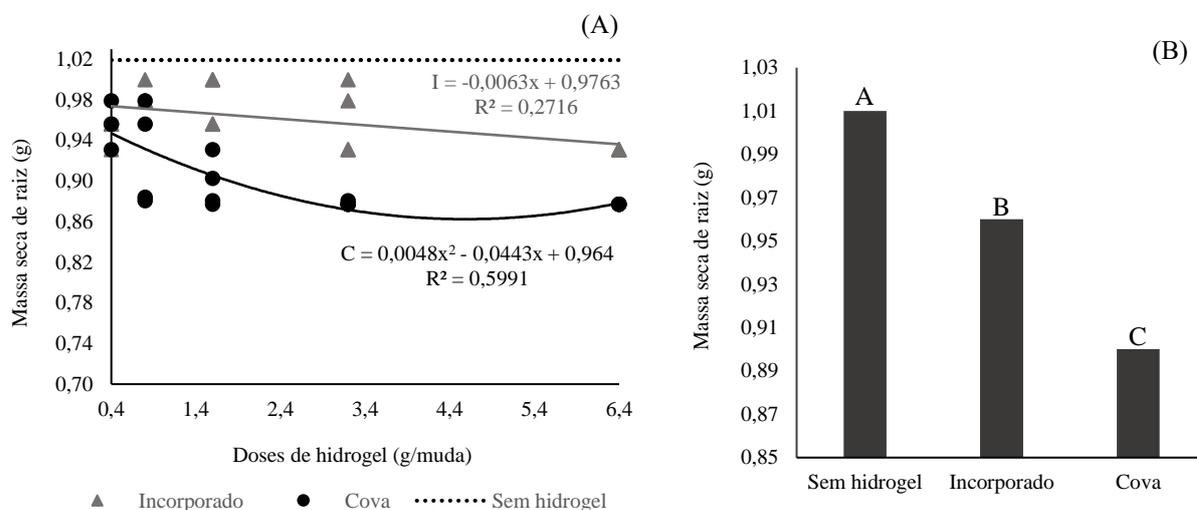


Fonte: Autor, 2020.

No experimento de Dranski *et al.* (2013) mudas de pinhão-manso apresentaram maiores médias de diâmetro na dose $6,7 \text{ g L}^{-1}$ de hidrogel aplicado na cova. Segundos os autores, a redução no diâmetro das mudas aconteceu nas doses maiores que 7 g L^{-1} , pois altas doses do polímero modificam a porosidade do solo, reduzindo o movimento da solução ao elevar a capilaridade e minimiza a relação água/ar. No presente estudo, efeito semelhante na redução do diâmetro em detrimento às altas doses do polímero são observados na Figura 6A, pois as plantas com $6,4 \text{ g/muda}$ de hidrogel em cova tiveram seu diâmetro reduzido e algumas chegaram a morrer.

A média da massa seca de raiz nos tratamentos com hidrogel variou de $0,981$ a $1,0 \text{ g}$ e foi menor que a média de MSR observada no tratamento sem hidrogel ($1,02 \text{ g}$) (Figura 7). A aplicação de hidrogel na cova resultou na menor média de MSR ($0,907 \text{ g}$) quando comparada à aplicação incorporada do polímero ($0,961 \text{ g}$). Vale destacar que para a aplicação incorporada ou em cova, a maior MSR ocorreu na dose de $0,4 \text{ g/muda}$ (Figura 7A). Em relação ao modo de aplicação, as plantas sem aplicação apresentaram as maiores médias de MSR, seguidas pela aplicação incorporada e depois a aplicação em cova, os três modos de aplicação diferiram estatisticamente entre si (Figura 7B).

Figura 7 – Massa seca da raiz dos tratamentos sem aplicação de hidrogel e em resposta às doses de hidrogel aplicada incorporada ou na cova (A) e modo de aplicação do polímero (B)



Dados transformados por BOX-COX através da equação $MSR = (MSR + 0,5)^{0,2}$, Fonte: Autor, 2020.

No estudo de Marques; Cripa; Martinez (2013), mudas de cafeeiro aos 240 dias de desenvolvimento com a dose de 2 g de hidrogel apresentaram maior MSR (1,36 g) em relação aos demais tratamentos. Segundo os autores, esse resultado ocorreu por as plantas estarem a mais dias sob estresse hídrico e o hidrogel auxiliou no suprimento de água para que a planta não cessasse seu crescimento, como observado nos tratamentos com menos de 2 g do polímero. Os autores também informaram que na dose 3 g de hidrogel, o desenvolvimento radicular não foi tão favorecido quanto na dose de 2 g, pelo fato de que o excesso do SAP formou grumos no solo e afetou o sistema radicular das mudas.

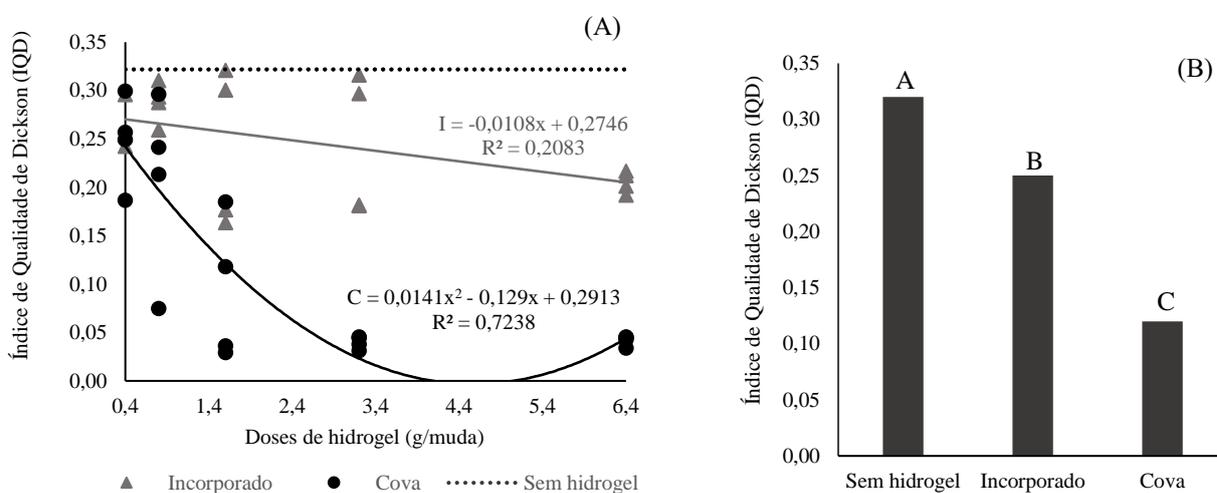
Vallone *et al.* (2004), estudando plantas de café, observaram 1,57 g de MSR para plantas com hidrogel e 1,75 g para plantas sem o polímero no substrato. Os autores também constaram que as plantas com hidrogel demoraram 96,85 dias para chegar no estágio de desenvolvimento pré-determinado, enquanto as plantas sem hidrogel demoraram 94,25 dias.

Em estudo que corrobora com a Figura 7 do presente trabalho, foi observado que em *Anadenanthera peregrina* que a MSR foi afetada negativamente pelo hidrogel incorporado ao substrato, com decréscimo na MSR nas maiores doses (SOUSA *et al.*, 2013). A maior média de MSR no tratamento testemunha foi 38,12% superior ao observado com a dose de 8g do polímero (SOUSA *et al.*, 2013). Doses acima de 4 g/L de substrato causam umidade excessiva no solo, então há menor aeração e desenvolvimento radicular (SOUSA *et al.*, 2013).

O Índice de Qualidade de Dickson (IDQ) variou entre 0,12 e 0,25 nos tratamentos

com hidrogel e foi inferior ao valor médio (0,32) observado no tratamento sem hidrogel (Figura 8). A aplicação do polímero na cova resultou no menor IQD (0,12) quando comparado à aplicação incorporada do polímero (0,25). Tanto na aplicação em cova quanto na incorporada, o maior IQD ocorreu na dose de 0,4 g/muda de hidrogel (Figura 8A). Em relação ao modo de aplicação, as plantas sem aplicação apresentaram as maiores médias de IQD, seguidas pela aplicação incorporada e depois a aplicação em cova, os três modos de aplicação diferiram estatisticamente entre si (Figura 8B).

Figura 8 – Índice de Qualidade de Dickson dos tratamentos sem aplicação de hidrogel e em resposta às doses de hidrogel aplicada incorporada ou na cova (A) e modo de aplicação do polímero (B)



Dados transformados por BOX-COX através da equação $IQD = IQD^{0.7}$. Fonte: Autor, 2020.

O IQD é um índice completo para representar a qualidade de mudas florestais, pois sua fórmula relaciona os parâmetros morfológicos altura, diâmetro, peso da matéria seca da parte aérea, peso da matéria seca das raízes e peso da matéria seca total. Além disso, quanto maior for o IQD das mudas, melhor seu padrão de qualidade (ABREU *et al.*, 2014).

Em concordância com os dados da Figura 8, no estudo de Sousa *et al.* (2013) o SAP incorporado ao substrato reduziu linearmente o IQD de mudas de *Anadenanthera peregrina*. No trabalho citado, sem a aplicação do polímero o IDQ foi 0,293, enquanto a maior dose de hidrogel (8g) resultou em menor valor (0,180). Segundo os autores, doses acima de 4g/litro de substrato causam umidade em excesso no solo, reduzindo a aeração e comprometendo a fisiologia do vegetal. Então, mudas produzidas em substrato com incorporação do SAP em dose superior a 4g/litro de substrato, não são mudas de qualidade, não sendo robustas o suficiente para bom desenvolvimento em campo (SOUSA *et al.*, 2013).

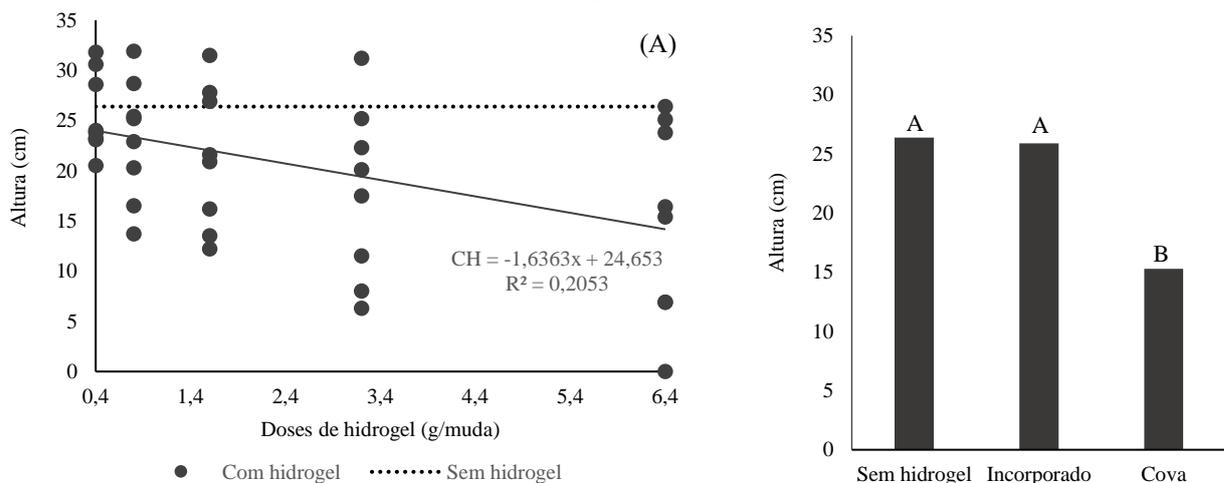
Na prática, a dose de 6,4 g/muda é inviável, pois mesmo que tenha apresentado

resultado similar à dose de 3,2 g/muda, o IDQ é baixo quando comparado ao obtido com a dose 0,4 g/muda. Então, é mais viável utilizar 0,4 g/muda do polímero na cova.

Nas Figuras 6B, 7B e 8B, nota-se que as plantas com aplicação em cova apresentaram desenvolvimento mais afetado, isso pode ter ocorrido devido ao intenso contato da raiz com o hidrogel, desde a sua germinação, dificultando o seu crescimento radicular, por ter que se desenvolver no substrato com grande quantidade de hidrogel no ambiente radicular.

Na análise dos fatores de tratamento isoladamente, a altura média das plantas foi 26,4 cm sem hidrogel e 20,6 cm com a aplicação do polímero, sendo que a maior média de altura (31,8 cm) foi observada na dose de 0,4 g/muda de hidrogel (Figura 9A). Na aplicação do polímero incorporado, a altura das plantas foi 25,9 cm, não diferindo do tratamento sem hidrogel (Figura 9B). Quando o hidrogel foi aplicado na cova, a altura média das plantas foi 15,3 cm de altura, diferindo dos tratamentos sem hidrogel e incorporado (Figura 9B).

Figura 9 – Altura da *M. caesalpiniaefolia* em resposta ao tratamento sem de hidrogel e em reposta às doses (A) e modo de aplicação do polímero (B)



Fonte: Autor, 2020.

Vallone *et al.* (2004) observaram que mudas de cafeeiro com a incorporação de 10 kg hidrogel/m³ de substrato tiveram altura reduzida em 1,34 cm quando comparadas com plantas do tratamento controle. Os autores explicam que isso ocorreu por o polímero ter reduzido a porosidade e a aeração, parâmetro importante para um bom desenvolvimento de mudas. Então, o desenvolvimento das mudas de café foi prejudicado pela aplicação do polímero, semelhante ao que foi observado na Figura 9.

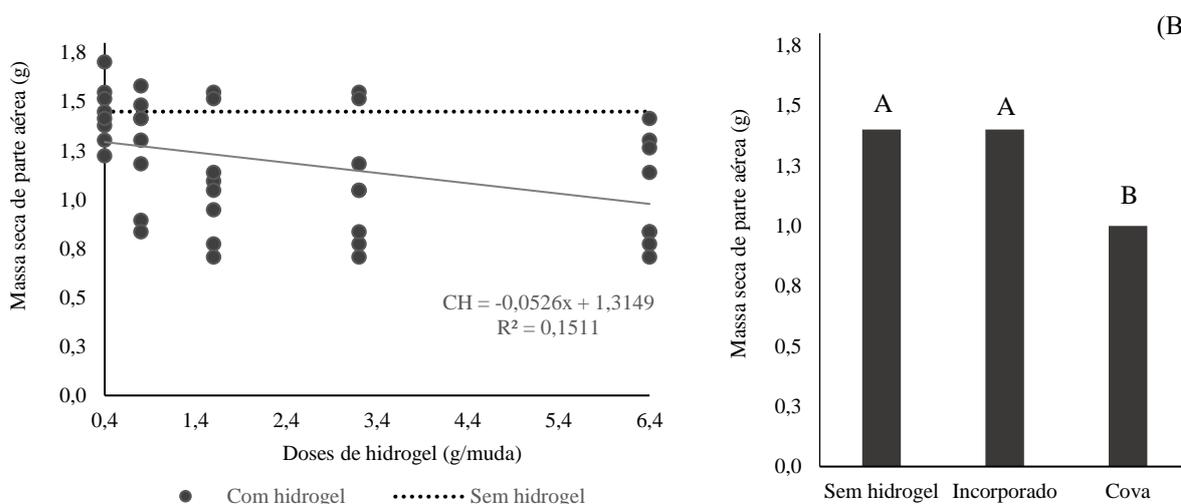
A aplicação de 6,3 g L⁻¹ de hidrogel na cova resultou em maior incremento na altura (32,81 cm) de pinhão manso, havendo redução de altura mediante doses maiores que 7 g L⁻¹ (DRANSKI *et al.*, 2013). Segundo os autores, isso ocorreu, pois, altas doses do polímero

modificam a porosidade do solo, reduzindo o movimento da solução ao elevar a capilaridade e minimizar a relação água/ar. Situação semelhante foi observada no presente estudo em que a maior dose de polímero (6,4 g/muda) reduziu a altura e até proporcionou a morte de plantas.

No trabalho de Dranski *et al.* (2013), a aplicação do hidrogel em cova foi realizada mediante hidratação prévia, enquanto no presente estudo o hidrogel foi aplicado na cova ainda granulado e posteriormente hidratado, o que pode ter prejudicado o crescimento das plantas em altura quando comparado com a aplicação incorporada, já que o polímero esteve em contato direto com as sementes e isso pode ter retardado o seu desenvolvimento. Na aplicação mediante umedecimento prévio, tem-se mais controle de onde será depositado o conteúdo com o polímero e na aplicação granulada ele vai expandindo no solo de uma maneira em não se pode ter o controle direto da sua localização.

Na análise dos fatores de tratamento isoladamente, a MSPA média das mudas sem hidrogel foi de 1,4 g, enquanto nos tratamentos com hidrogel a média foi de 1,2 g. A maior média com hidrogel (2,4 g) ocorreu na dose de 0,4 g/muda (0,02% m/m) (Figura 10A). Sem hidrogel e na aplicação incorporada obteve-se 1,4 g de MSPA em média, sem diferença entre tratamentos, indicando efeito positivo de ambos os tratamentos no ganho de matéria seca pelas mudas de *M. caesalpiniaefolia*. Com a aplicação de hidrogel na cova a média foi de 1 g de MSPA, diferindo dos tratamentos sem hidrogel e incorporado e representando o desfavorecimento no ganho de matéria seca de mudas de *M. caesalpiniaefolia* (Figura 10B).

Figura 10 – Massa seca da parte aérea das plantas de *M. caesalpiniaefolia* em resposta ao tratamento sem de hidrogel e em resposta às doses (A) e modo de aplicação do polímero (B)



Dados transformados por BOX-COX através da equação $MSPA=(MSPA+0.5)^{0.5}$. Fonte: Autor, 2020.

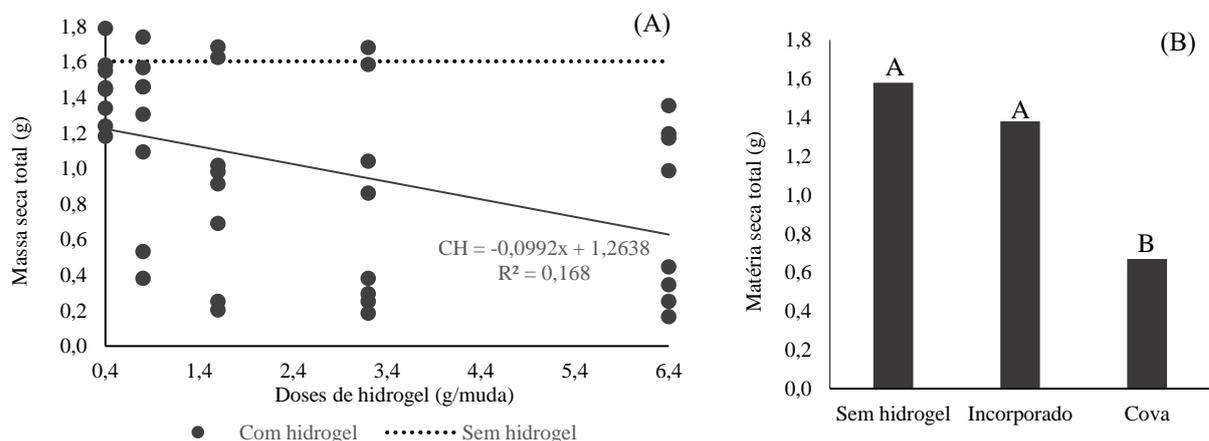
No experimento de Sousa *et al.* (2013), a utilização do polímero superabsorvente incorporado ao substrato não afetou significativamente a MSPA da leguminosa *Anadenanthera peregrina*. Mas, a maior MSPA da espécie foi observada no tratamento sem o polímero. Segundo os autores, supõe-se que valores acima de 4 g de hidrogel por vaso causem umidade excessiva no solo, reduzindo a aeração e comprometendo a fisiologia do vegetal.

Resultados semelhantes foram observados para mudas de cafeeiro aos 240 dias de desenvolvimento. O tratamento com 2 g de polímero por saco de muda resultou em 2,95 g de MSPA, enquanto no tratamento sem hidrogel a MSPA foi 3,01 g (MARQUES; CRIPA; MARTINEZ, 2013). Segundo os autores, ao final do experimento se constatou que na dose de 3 g/saco havia grumos de gel que devem ter prejudicado o desenvolvimento das mudas.

A umidade excessiva próxima ao ambiente radicular e a formação de grumos de hidrogel também foram observados no experimento deste trabalho, principalmente na dose 6,4 g/muda em cova. Isso afetou o desenvolvimento radicular (Figura 7) e refletiu em menor desenvolvimento da parte aérea, resultando em menor MSPA (Figura 10) nas mudas de sabiá.

Na análise dos fatores de tratamento isoladamente, a MST média de mudas de *M. caesalpiniaefolia* sem hidrogel foi de 1,58 g, enquanto com aplicação do polímero foi 1,02 g (Figura 11A). A maior média de MST com hidrogel ocorreu na dose 0,4 g/cova (Figura 11A). O tratamento sem hidrogel resultou em maior média de MST (1,58 g), enquanto a aplicação incorporada do polímero resultou em 1,38 g, sem diferença significativa entre tratamentos que afetaram positivamente o ganho de matéria seca total nas mudas (Figura 11B). Com a aplicação na cova a média de MST foi 0,67 g e diferiu dos tratamentos sem hidrogel e com aplicação incorporada (Figura 11B), sendo o modo de aplicação que menos contribuiu para a MST em mudas de *M. caesalpiniaefolia*.

Figura 11 – Massa seca total das plantas de *M. caesalpiniaefolia* em resposta ao tratamento sem de hidrogel e em reposta às doses (A) e modo de aplicação do polímero (B)

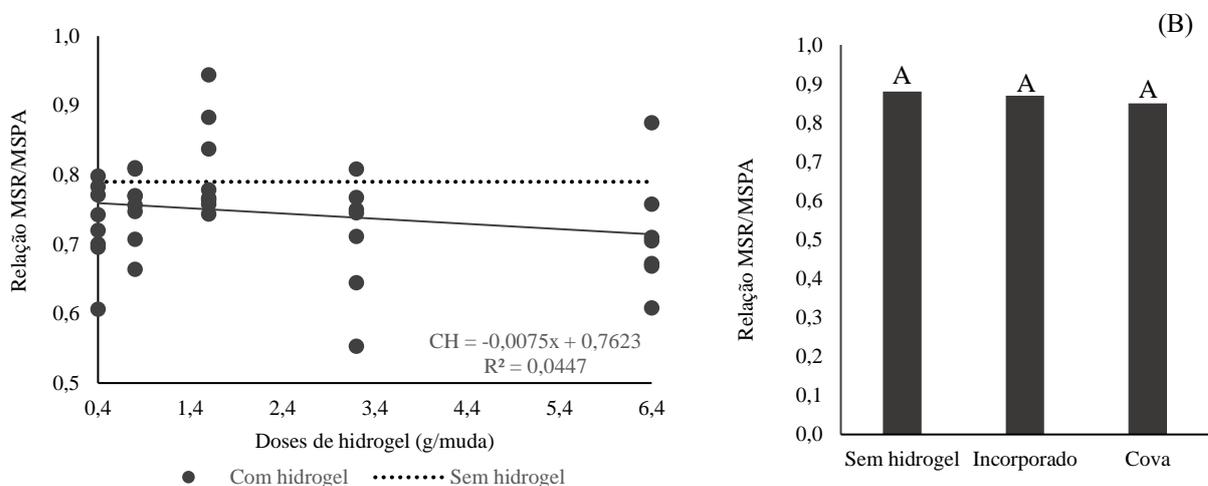


Dados transformados por BOX-COX através da equação $MST = MST^{0.7}$. Fonte: Autor, 2020.

No estudo de Sousa *et al.* (2013), em que a aplicação de hidrogel foi avaliada para a leguminosa *Anadenanthera peregrina*, foram observados resultados de MST semelhantes aos deste trabalho. A MST em mudas sem hidrogel foi maior (1,73 g), diferindo daquele observado quando as mudas cresceram mediante aplicação ao solo de 6g e 8g de hidrogel. Segundo os autores, a resposta foi linear decrescente, de modo que quanto maior a dose, menor a MST, concordando com encontrado neste estudo (Figura 11).

Na análise dos fatores de tratamento isoladamente, a MSR/MSPA média de mudas de *M. caesalpiniaefolia* sem hidrogel foi de 0,88, enquanto com aplicação do polímero foi 0,86 (Figura 12A). A maior média de MSR/MSPA com hidrogel ocorreu na dose 0,4 g/cova (Figura 12A). O tratamento sem hidrogel resultou em maior média de MSR/MSPA (0,88), enquanto a aplicação incorporada do polímero resultou em 0,87 e em cova 0,85, sem diferença significativa entre tratamentos para a variável MSR/MSPA (Figura 12B).

Figura 12 – Relação MSR/MSPA plantas de *M. caesalpiniaefolia* em resposta ao tratamento sem de hidrogel e em reposta às doses (A) e modo de aplicação do polímero (B)



Dados transformados por BOX-COX através da equação $MSR/MSPA = MSR/MSPA^{0.2}$. Fonte: Autor, 2020.

Conforme proposto por Brissette (1984), a relação MSR/MSPA igual a 2,0 é considerada ideal; mas, os valores variam com a espécie, o lugar de plantio e outras características. Por enquanto, não há dados na literatura do valor ideal da relação MSR/MSPA para *M. caesalpiniaefolia*. Na Figura 12 observa-se que plantas sem hidrogel apresentaram maior relação MSR/MSPA (0,88). Por outro lado, houve decréscimo linear na relação com a elevação nas doses de hidrogel, o valor se distanciou da relação de 2,0 principalmente na dose

de 6,4 g/muda. Indicando que as maiores doses de hidrogel afetam negativamente a relação MSR/MSPA em mudas de sabiá.

Nos resultados obtidos por Marques; Cripa; Martinez (2013), em mudas de cafeeiro aos 240 dias de desenvolvimento, plantas sem hidrogel apresentaram maior média da relação MSR/MSPA (3,67) indicando que a presença de hidrogel pode afetar a relação MSR/MSPA, gerando mudas de menor qualidade e que sobreviveram menos em campo.

As variáveis referentes ao desenvolvimento das mudas indicam que os tratamentos sem hidrogel (Figura 13A) e com aplicação incorporada do polímero (Figura 13B) geraram mudas melhores quando comparados a aplicação em cova (Figura 13C).

Figura 13 – Mudas de *M. caesalpiniaefolia* aos 60 dias de desenvolvimento em solos sem aplicação de hidrogel (A), as siglas da esquerda para direita dos tratamentos são TR1 TR2, TR3 e TR4. Aplicação incorporada (B) as siglas dos tratamentos são ID1R3, ID2R2, ID3R1, ID4R2 e ID5R3. Aplicação na cova (C) as siglas dos tratamentos são CD1R1, CD2R1, CD3R4, CD4R1 e CD5R4





Fonte: Autor, 2020.

4.3 Análise das trocas gasosas

Houve interação entre modo de aplicação (MA) e doses de hidrogel (DH) para todos atributos fotossintéticos avaliados ($p < 0,01$), conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Resumo da análise de variância (ANOVA) para fotossíntese (A), transpiração (E), condutância estomática (G_s), razão entre a concentração interna e externa de CO_2 (Ci/Ca), eficiência instantânea do uso da água (A/E) e eficiência instantânea de carboxilação (A/Ci) nas mudas de *M. caesalpiniaefolia* em resposta aos tratamentos avaliados

Fonte de variação (FV)	A	E	G_s	Ci/Ca	A/E	A/Ci
	-----Valor F-----					
Modo de aplicação do hidrogel (MA)	367,1**	496,3**	197,3**	1732,8**	24,7**	303,4**
Dose de hidrogel (DH)	55,4**	48,3**	22,0**	550,3**	90,7**	54,1**
MA x DH	71,3**	62,5**	73,8**	611,4**	61,9**	69**
CV (%) ¹	13,4	15,5	16	4	15,3	14,3

¹ CV = coeficiente de variação; * significativo a 5% de probabilidade; ** significativo a 1% de probabilidade; ^{ns} não significativo.

A aplicação da dose de hidrogel 6,4 g/muda na cova resultou em valor 0 para todos atributos de trocas gasosas, pois as plantas não apresentaram desenvolvimento foliar suficiente para realização das leituras com o IRGA (Figura 14).

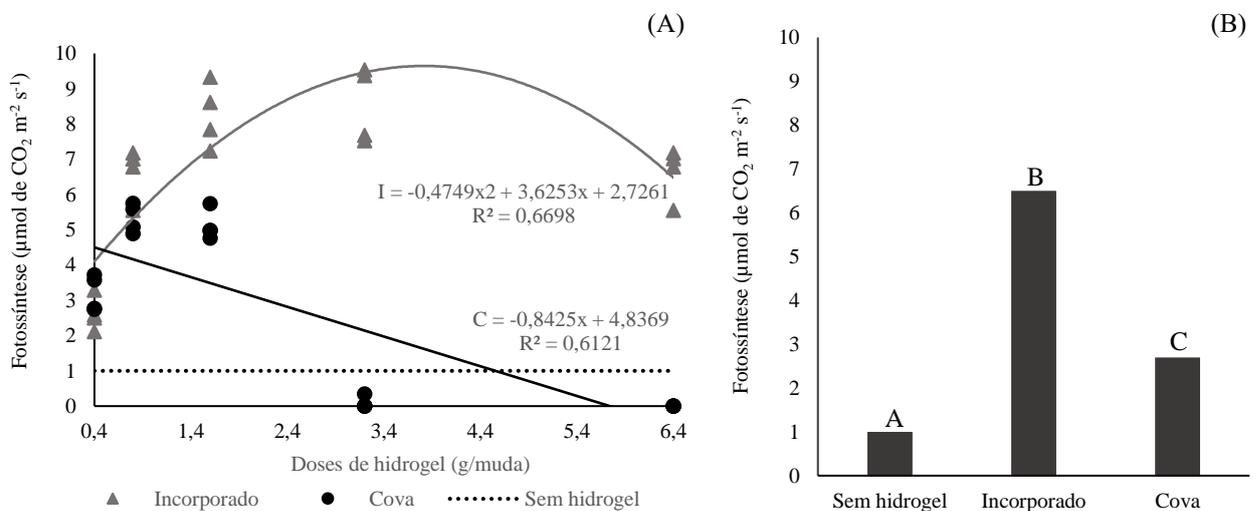
Figura 14 - Planta de *M. caesalpiniaefolia* aos 59 dias de desenvolvimento com a aplicação em cova de 6,4 g/muda de hidrogel, com folhas de tamanho insuficiente para realização da leitura com o IRGA



Fonte: Autor, 2020.

A fotossíntese (A) com hidrogel variou de 2,7 a 6,5 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e foi superior 1 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ observado no tratamento sem hidrogel (Figura 15). O hidrogel incorporado resultou na maior média de A (6,5 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) quando comparada à aplicação na cova (2,7 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Para a aplicação incorporada, a maior taxa de fotossíntese ocorreu a partir da dose de hidrogel 3,2 g/muda, enquanto para a aplicação na cova a maior taxa foi na dose de 0,4 g/muda. Após a dose de hidrogel 3,2 g/muda, a aplicação na cova praticamente se igualou ou foi inferior ao desempenho do tratamento sem hidrogel (Figura 15A). Em relação ao modo de aplicação, as plantas com aplicação incorporada apresentaram as maiores médias de A, seguidas pela aplicação em cova e o tratamento sem hidrogel, os três modos de aplicação diferiram estatisticamente entre si (Figura 15B).

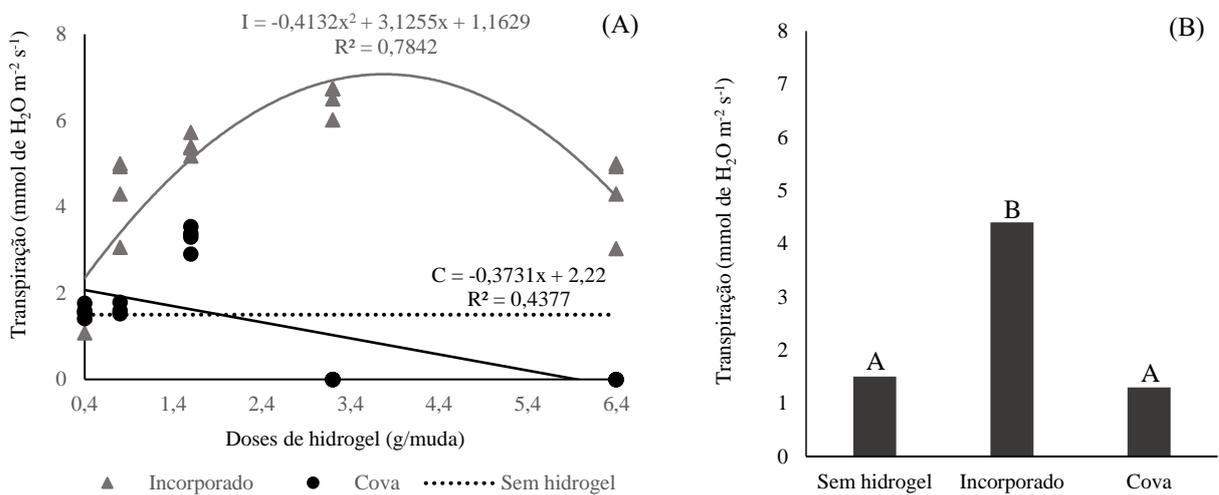
Figura 15 – Fotossíntese para os tratamentos sem aplicação de hidrogel e em resposta às doses de hidrogel aplicada incorporada ou na cova (A) e modo de aplicação do polímero (B)



Fonte: Autor, 2020.

A transpiração (E) média variou nos tratamentos com hidrogel de 1,3 a 4,4 mmol de H₂O m⁻² s⁻¹, enquanto no tratamento sem hidrogel a média de E foi 1,5 mmol de H₂O m⁻² s⁻¹ (Figura 16). O hidrogel incorporado resultou na maior média de E (4,4 mmol de H₂O m⁻² s⁻¹) quando comparado à aplicação na cova (1,3 mmol de H₂O m⁻² s⁻¹). Sem hidrogel foi observada a média maior de E (1,5 mmol de H₂O m⁻² s⁻¹) em comparação à aplicação na cova (1,3 mmol de H₂O m⁻² s⁻¹). Para a aplicação incorporada, a maior taxa de transpiração (6,7 mmol de H₂O m⁻² s⁻¹) ocorreu na dose de hidrogel 3,2 g/muda, enquanto para a aplicação na cova o maior valor (1,8 mmol de H₂O m⁻² s⁻¹) foi na dose de 0,4 g/muda. Nas doses do hidrogel superiores a 1,6 g/muda de hidrogel, a aplicação na cova resultou em valores inferiores ao observado no controle sem hidrogel (Figura 16A). Em relação ao modo de aplicação, as plantas com aplicação incorporada apresentaram as maiores médias de E, diferindo estatisticamente da aplicação em cova e do tratamento sem hidrogel, estes tratamentos além de não diferirem estatisticamente entre si, apresentaram médias semelhantes (Figura 16B).

Figura 16 – Transpiração para os tratamentos sem aplicação de hidrogel e em resposta às doses de hidrogel aplicada incorporada ou na cova (A) e modo de aplicação do polímero (B)

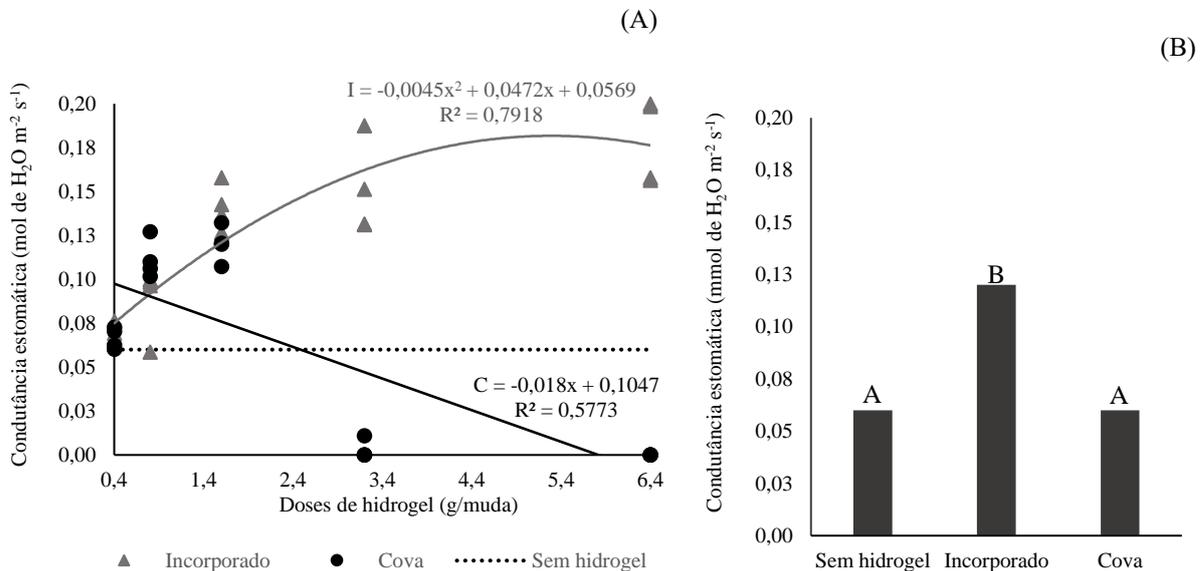


Fonte: Autor, 2020.

A condutância estomática (Gs) média variou de 0,06 a 0,13 mol de H₂O m⁻² s⁻¹ com hidrogel e foi superior à média 0,06 mol de H₂O m⁻² s⁻¹ observada sem hidrogel (Figura 17). O hidrogel incorporado resultou na maior média de Gs (0,13 mol de H₂O m⁻² s⁻¹) quando comparada à aplicação na cova (0,06 mol de H₂O m⁻² s⁻¹). Para a aplicação incorporada, a

maior Gs ocorreu a partir da dose de hidrogel 3,2 g/muda, enquanto para a aplicação na cova a maior foi na dose de 0,4 g/muda (Figura 17A). Em dose de hidrogel superior a 3,2 g/muda, a aplicação na cova resultou em desempenho inferior ao controle sem hidrogel (Figura 17A). Em relação ao modo de aplicação, as plantas com aplicação incorporada apresentaram as maiores médias de Gs, diferindo estatisticamente da aplicação em cova e do tratamento sem hidrogel, estes tratamentos além de não diferirem estatisticamente entre si, apresentaram médias semelhantes (Figura 17B).

Figura 17 – Condutância estomática para os tratamentos sem aplicação de hidrogel e em resposta às doses de hidrogel aplicada incorporada ou na cova (A) e modo de aplicação do polímero (B)



Fonte: Autor, 2020.

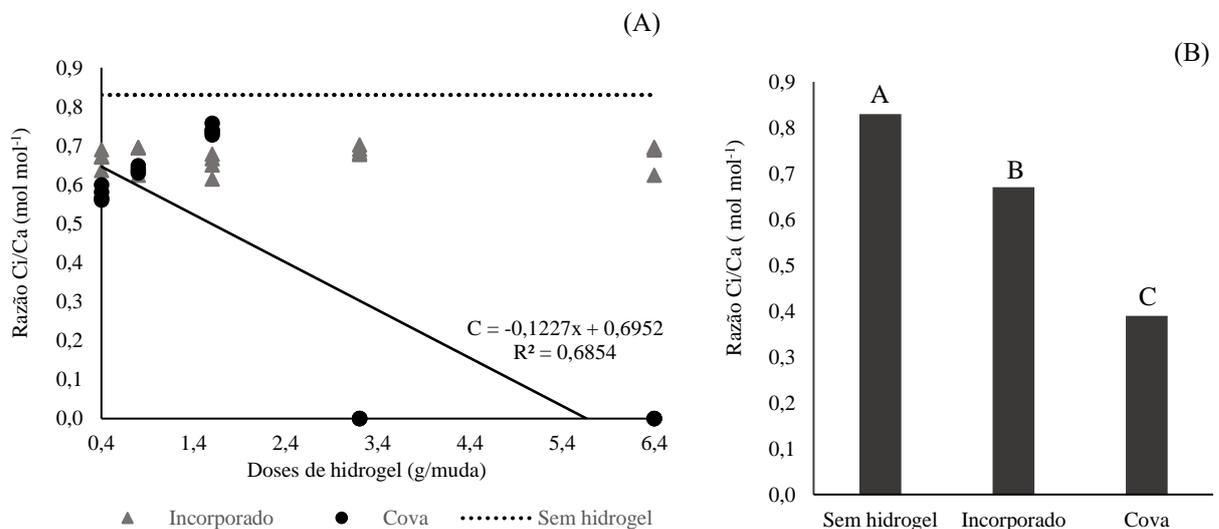
Trabalhos sobre a relação entre aplicação de hidrogel e a fisiologia vegetal, são escassos na literatura, principalmente para espécies arbóreas. Entretanto, segundo Felipe *et al.* (2016), analisando mudas de eucalipto sob influência do hidrogel e frequências de irrigação, mediante trocas gasosas analisadas 24 horas após a irrigação, plantas sem hidrogel apresentaram menores valores de A (8,14 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), E (1,231 $\text{mmol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e Gs (0,083 $\text{mol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) quando comparadas às plantas que receberam o polímero, nas quais foram observadas as maiores médias de A (9,50 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), E (1,623 $\text{mmol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e Gs (0,103 $\text{mol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Os autores explicam que isso ocorreu devido ao poder dos SAPs em reter água e disponibilizá-la lentamente, favorecendo a resiliência das plantas, fazendo com que as mudas retornem ao estado normal após estresse

hídrico. Esses resultados estão de acordo com o encontrado no presente estudo.

Plantas de *Guazuma ulmifolia* Lam. com 100% de disponibilidade hídrica apresentaram valores de A, E e Gs de $4,3 \mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $0,83 \text{ mmol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $0,110 \text{ mol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente (SCALON et al., 2011). Já nas plantas com apenas 12,5% de disponibilidade hídrica as médias de A, E e Gs foram, respectivamente, $3,1 \mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $0,52 \text{ mmol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $0,06 \text{ mol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (SCALON et al., 2011). Isso evidencia que vegetais submetidos ao estresse hídrico têm sua fisiologia comprometida devido a diminuição do metabolismo do mesófilo foliar ao reduzir a ativação e a atividade da enzima Rubisco carboxilase (SCALON et al., 2011).

A razão Ci/Ca média com hidrogel foi de 0,39 a 0,67 mol mol^{-1} e foi inferior à média do tratamento sem hidrogel ($0,83 \text{ mol mol}^{-1}$), conforme apresentado na figura 18. O polímero incorporado ao solo resultou em maior média de Ci/Ca ($0,67 \text{ mol mol}^{-1}$) em comparação à aplicação na cova ($0,39 \text{ mol mol}^{-1}$). Todavia, o tratamento com menor média para Ci/Ca ($0,57 \text{ mol mol}^{-1}$) foi o com aplicação via cova. A regressão para Ci/Ca em resposta às doses do polímero incorporado não foi significativa (Figura 18A). Na aplicação na cova, a maior Ci/Ca ocorreu na dose de hidrogel 0,4 g/muda e decresceu linearmente com o aumento das doses (Figura 18A). Em relação ao modo de aplicação, as plantas sem aplicação do polímero apresentaram as maiores médias de Ci/Ca seguidas pela aplicação incorporada e depois a aplicação em cova, os três modos de aplicação diferiram estatisticamente entre si (Figura 18B).

Figura 18 – Razão Ci/Ca para os tratamentos sem aplicação de hidrogel e em resposta às doses de hidrogel aplicada incorporada ou na cova (A) e modo de aplicação do polímero (B)



Fonte: Autor, 2020.

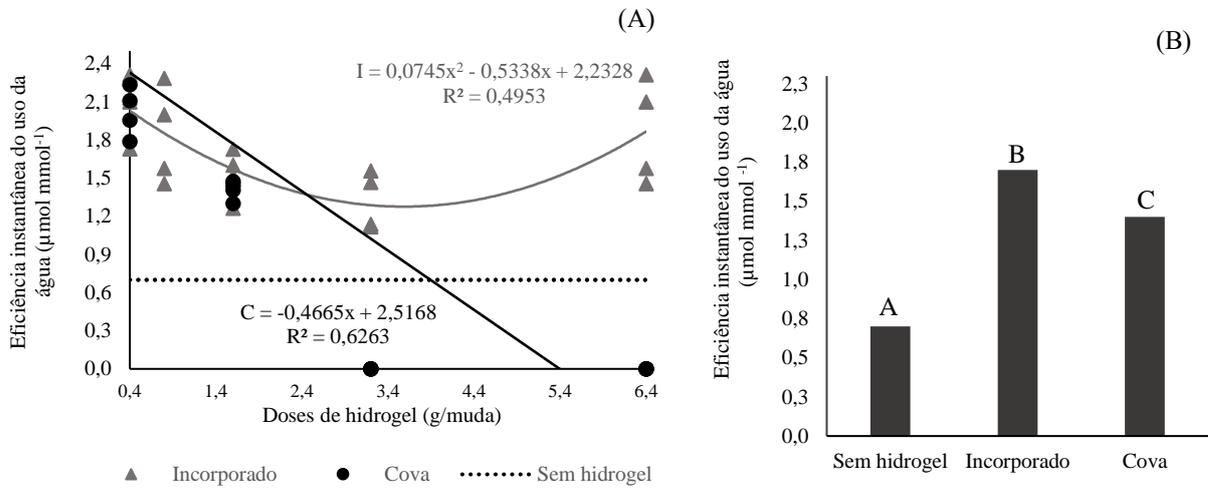
Modificações na fotossíntese (A) podem ser ocasionadas por limitações estomáticas pelas mudanças na abertura dos estômatos e resistência ao influxo de CO₂, ou nas reações bioquímicas e inibição da atividade da Rubisco, como citado anteriormente (SCALON et al., 2011). A razão Ci/Ca indica a eficiência ou ineficiência nas reações de fixação de C, de modo que quanto mais próxima a razão for de 1, menos eficiente é o processo (GUERRA; COSTA; TAVARES, 2017). Valores mais reduzidos da razão Ci/Ca são encontrados em plantas com menos sintomas de estresse (GUERRA; COSTA; TAVARES, 2017).

No estudo de Felipe *et al.* (2016) com mudas de eucalipto, 24 horas após a irrigação, a razão Ci/Ca foi de 0,562 mol mol⁻¹ para plantas com aplicação de hidrogel e de 0,541 mol mol⁻¹, sendo médias muito próximas e não apresentando diferença significativa. Então, ambos tratamentos apresentaram boa razão Ci/Ca.

No tratamento sem hidrogel houve maior valor da razão Ci/Ca (0,83 mol mol⁻¹) quando comparado à aplicação de hidrogel na cova. Sem a aplicação do polímero a razão Ci/Ca foi próxima de 1, indicando maior estresse hídrico nas plantas em relação ao observado mediante aplicação do hidrogel na cova. O valor de Ci/Ca decresceu com o aumento nas doses de hidrogel, indicando que o polímero favoreceu o desenvolvimento vegetal. Contudo, vale lembrar que nas plantas em que Ci/Ca foi 0, não houve desenvolvimento de boa área foliar para realização das análises fotossintéticas, o que representa que o valor de 0 não é favorável. São necessários estudos para determinar valores limítrofes de Ci/Ca para que se tenha conhecimento dos valores máximo e mínimo considerados ideais para a *M. caesalpiniaefolia*.

A eficiência instantânea do uso da água (A/E) com hidrogel variou de 1,4 a 1,7 μmol mmol⁻¹ e foi maior que o valor médio 0,7 μmol mmol⁻¹ observado no tratamento sem hidrogel (Figura 19). A aplicação de hidrogel incorporado resultou na maior média de A/E (1,7 μmol mmol⁻¹) quando comparada à aplicação na cova (1,4 μmol mmol⁻¹). Na aplicação incorporada, os maiores valores de A/E (2,3 e 2,1 μmol mmol⁻¹) ocorreram nas doses de hidrogel 0,4 e 6,4 g/muda, enquanto para a aplicação na cova o maior A/E (2,2 μmol mmol⁻¹) foi na dose 0,4 g/muda de hidrogel (Figura 19A). Em relação ao modo de aplicação do polímero, plantas sem aplicação apresentaram menores médias de A/E, seguidas pela aplicação em cova e depois incorporada, os três modos de aplicação diferiram estatisticamente entre si (Figura 19B).

Figura 19 – Eficiência instantânea do uso da água para os tratamentos sem aplicação de hidrogel e em resposta às doses de hidrogel aplicada incorporada ou na cova (A) e modo de aplicação do polímero (B)



Fonte: Autor, 2020.

A eficiência instantânea de uso da água (E/A) representa a quantidade de carbono fixado durante a fotossíntese para cada molécula de água perdida nesse processo (JAIMEZ *et al.*, 2005). Em estudo realizado com eucalipto, as mudas do tratamento sem hidrogel apresentaram maiores médias de A/E, tanto antes quanto 24 horas após a irrigação (FELIPPE *et al.* 2016). Os autores explicam os vegetais sob estresse hídrico usam a água de forma mais eficiente e isso justifica os valores de A/E mais altos nos tratamentos sem hidrogel quando comparados aos com hidrogel (FELIPPE *et al.*, 2016).

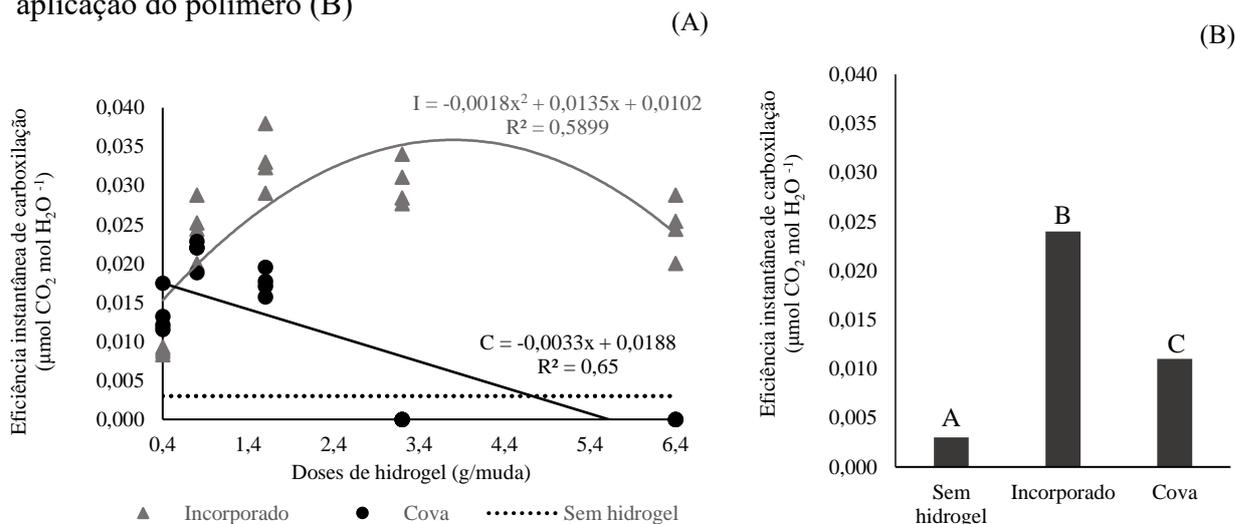
Neste estudo ocorreu o inverso do relatado pelos autores supracitados (Figura 19). Entretanto, a resposta de A/E está diretamente ligada à E e a A que contribuem para o melhor uso da água pelas plantas. Nas aplicações incorporada e em cova, obteve-se valor alto de A/E ($2,3$ e $2,2 \mu\text{mol mmol}^{-1}$) na dose de hidrogel $0,4 \text{ g/muda}$, por esta ser a menor dose, ela poderia não estar suprindo a necessidade hídrica do vegetal, então as plantas que se desenvolveram na dose de $0,4 \text{ g/muda}$ estavam sob estresse hídrico, logo usam a água de forma mais eficiente para suprir sua necessidade. Na aplicação incorporada, com o aumento das doses a A/E diminuiu, pois o polímero estava fazendo com que as plantas não passassem por estresse hídrico e não necessitassem aumentar sua A/E.

Apesar do tratamento sem hidrogel estar passando por estresse hídrico, ele não resultou em elevada A/E porque esse fator também está relacionado com a condutância estomática e, como observado na Figura 17, as mudas de sabiá sem hidrogel apresentaram baixa Gs, menor abertura estomatal, menor quantidade de carbono fixado e menos moléculas

de água utilizadas, por esse processo estar ocorrendo de forma mais lenta e menos eficiente.

A eficiência instantânea de carboxilação (A/C_i) média com aplicação do polímero foi entre 0,011 e 0,024 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$ sendo superior à média observada no tratamento sem hidrogel (0,003 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$), conforme apresentado na Figura 20. O hidrogel incorporado ao solo resultou em maior A/C_i (0,024 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$) quando comparado à aplicação na cova (0,011 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$). Para a aplicação em cova o maior valor de A/C_i (0,017 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$) ocorreu na dose de 0,4 g/muda de hidrogel, já para a aplicação incorporada o maior valor (0,034 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$) ocorreu na dose de hidrogel 3,2 g/muda (Figura 20A). Em relação ao modo de aplicação, plantas sem aplicação de hidrogel apresentaram menores médias de A/C_i , seguidas pela aplicação em cova e depois incorporada, os três modos de aplicação diferiram estatisticamente entre si (Figura 20B).

Figura 20 – Eficiência instantânea de carboxilação para os tratamentos sem aplicação de hidrogel e em resposta às doses de hidrogel aplicada incorporada ou na cova (A) e modo de aplicação do polímero (B)



Fonte: Autor, 2020.

A eficiência de carboxilação (A/C_i) é a quantidade de CO_2 que foi utilizado na fotossíntese, refletindo a velocidade que o CO_2 fixado é processado, sendo limitada principalmente pela quantidade e atividade enzimática e pela disponibilidade de CO_2 , ou também pela concentração do aceptor, temperatura, grau hidratação do protoplasma, suprimento de substâncias minerais e grau de desenvolvimento e atividade da planta (KONRAD *et al.*, 2015). Segundo Dutra *et al.* (2015), a redução da A/C_i é influenciada por diversos fatores, dentre eles o estresse hídrico, causando menor absorção de CO_2 e consequente redução na A/C_i .

Em outras espécies vegetais, a exemplo do cajueiro, plantas que não receberam hidrogel apresentaram média de A/C_i de $0.037 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$, inferior à média observada para as plantas que se desenvolveram em solo com hidrogel que, por sua vez, apresentaram A/C_i de $0.045 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$ (COSTA, 2019). Concordando com os dados apresetandos na figura 12F deste estudo, em que mudas de sabiá sem hidrogel apresentaram menor A/C_i ($0,003 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$) quando comparadas à aplicação de hidrogel incorporado e em cova ($0,024$ e $0,011 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$), sendo que a aplicação via cova só superou o controle sem hidrogel em doses menores que $6,4 \text{ g/muda}$. Mudas de *M. caesalpiniaefolia* sem hidrogel estiveram mais sujeitas ao estresse hídrico e apresentaram menores médias de A/C_i .

Para a maioria dos dados fisiológicos, exceto a razão C_i/C_a , a aplicação de hidrogel na cova apresentou resultados inferiores quando comparada à aplicação incorporada e até ao tratamento sem hidrogel, evidenciando que a aplicação na cova não é a mais adequada, principalmente nas maiores doses do polímero. Isso ocorreu devido ao excesso de água quando o hidrogel foi aplicado de forma localizada.

4.4 Análise das raízes lavadas

Para a análise descritiva das raízes lavadas a AS variou de 2 a $265,4 \text{ cm}^2$, o CT variou de $5,5$ a $1336,1 \text{ cm cm}^{-3}$, as bifurcações variaram de 2 a 4329 e a pontas variaram de 69 a 12225, nos tratamentos CD5R4 e TR1, respectivamente. A variável DM variou entre $0,5$ (CD5R4) e $2,6$ (TR1 e ID1R3) mm.

Tabela 5. Área superficial (AS) em cm^2 , comprimento total de raízes por volume de solo (CT) em cm cm^{-3} , diâmetro médio das raízes (DM) em milímetros, bifurcações e pontas de raízes lavadas de mudas de *M. caesalpiniaefolia*, obtidas em amostras representativas dos tratamentos por meio do programa WinRHIZO.

Tratamentos	AS (cm^2)	CT (cm cm^{-3})	DM (mm)	Bifurcações	Pontas
TR1	265,4	1336,1	2,6	4329	12225
CD1R1	129,2	747,2	1,5	2907	7356
CD5R4	2,0	5,5	0,5	2	69
ID1R3	215,7	1097,0	2,6	3887	12052
ID5R3	102,8	444,4	1,2	1559	3906

T – Testemunha; C – Cova; I – Incorporado; D – doses (1 a 5); R – Repetição (1 a 4).

Os principais índices morfológicos gerados pelo WinRHIZO e que estão sendo utilizados na literatura para relacionar com tolerância à seca, são AS, CT, bifurcações e pontas (WANG *et al.*, 2020). Os atributos AS e CT refletiram informações relevantes sobre as diferenças de tolerância à seca entre oito forrageiras, auxiliando na seleção daquelas com forte tolerância à seca e que podem ser utilizadas para revegetar áreas degradadas (WANG *et al.*, 2020). Segundo os autores, para que as plantas possam absorver mais água e nutrientes, é importante haver maiores valores de AS e CT. Observando os dados deste estudo, nota-se que o tratamento TR1(sem hidrogel) resultou em maior AS e CT, enquanto na dose 6,4 g/muda de hidrogel incorporado ou em cova, foram observados os menores valores de AS e CT.

Raízes de *Populus euphratica* desenvolvidas em condições salinas e com a incorporação de hidrogel apresentaram AS de aproximadamente 470 cm². Quando as raízes que não estavam em condições salinas foram cobertas por hidrogel, simulando o que ocorre quando há dose elevada do polímero no solo, a AS reduziu para 29 cm². Para o parâmetro CT, as raízes com hidrogel apresentaram 3.190 cm cm⁻³ e aqueles que foram somente cobertas com hidrogel apresentaram CT de 194,2 cm cm⁻³ (CHEN *et al.*, 2004).

A menor AS radicular em mudas de *M. caesalpiniaefolia* observada neste estudo ocorreu em virtude das maiores doses de hidrogel que tiveram efeito deletério às plantas. O envolvimento das raízes pelo excesso de hidrogel e a maior umidade acumulada afetaram o seu desenvolvimento radicular principalmente na aplicação em cova.

Quanto ao DM, quando as raízes são mais finas (menor diâmetro), geralmente apresentam maior AS. Porém, não foi o que ocorreu neste estudo, de modo que o CT das raízes foi o que contribuiu mais para a maior área superficial, e não o DM. Nesse caso, raízes mais grossas afetam positivamente, por contribuírem com a melhor sustentação do vegetal, proporcionando mudas de boa qualidade e mais vigorosas para sobreviver ao processo de revegetação, proporcionando a efetiva recuperação de áreas degradadas.

Starkey *et al.* (2012) estudaram efeitos do hidrogel em mudas de *Pinus taeda* L. Pequenas bolsas preenchidas com hidrogel foram colocadas nas covas de plantio e causaram mortalidade de 28% das mudas, enquanto no controle sem hidrogel houve mortalidade de apenas 2% das mudas. No tratamento com hidrogel na cova, as mudas pareceram ter sido empurradas para fora da cova com a expansão do polímero que chegou a alcançar a superfície do solo. Os resultados de Starkey *et al.* (2012) se assemelham aos obtidos neste estudo, principalmente quanto a maior dose de hidrogel ter resultado na exposição do polímero na superfície do solo (Figura 21) nos tratamentos ID5R3 e CD5R4.

Figura 21 – Grumos de hidrogel na superfície do solo no tratamento CD5R4 das mudas de *M. caesalpiniaefolia*.



Fonte: Autor, 2020.

Bifurcações e pontas refletem a capacidade de absorção de água das raízes das plantas sob estresse hídrico quanto maior a quantidade de bifurcações e pontas, melhor a resistência do vegetal ao déficit hídrico representando adaptação ao ambiente árido por explorarem maiores volumes e profundidades de solo (STARKEY *et al.*, 2012; WANG *et al.*, 2020). O TR1 apresentou maior quantidade de bifurcações e pontos, enquanto ID5R3 e CD5R4 apresentaram menores valores desse atributo.

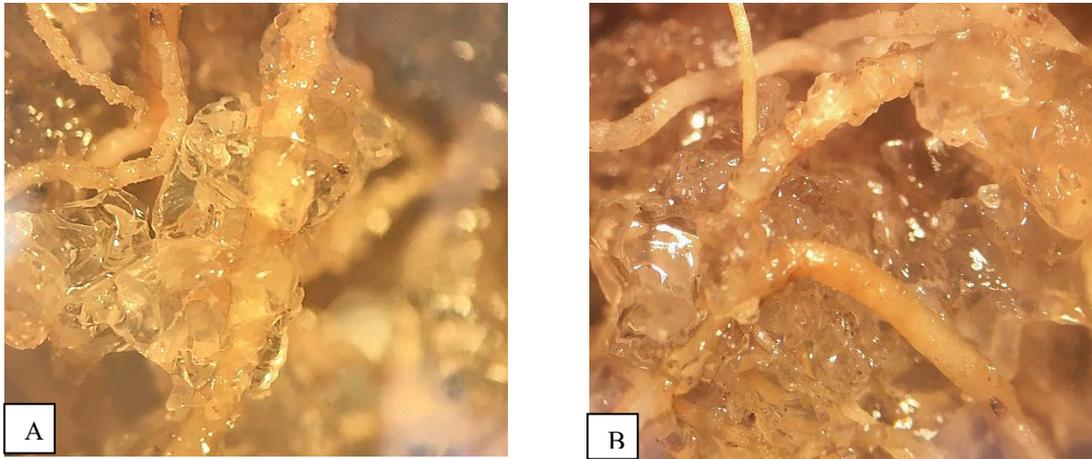
Forageiras cujas raízes apresentaram maiores quantidade de bifurcações foram as que apresentaram maior tolerância à seca (WANG *et al.*, 2020). A espécie *Bromus inermis* que se mostrou mais tolerante à seca apresentou 3332 bifurcações, enquanto a espécie menos tolerante *Medicago sativa* apenas 89 bifurcações nas raízes (WANG *et al.*, 2020).

No experimento de Starkey *et al.* (2012), as raízes das plantas de *Pinus taeda* L. do controle sem hidrogel apresentaram mais pontas (1286), enquanto as plantas com a aplicação de hidrogel apresentaram menos pontas (978), representando redução na resistência das plantas ao déficit hídrico mediante aplicação do polímero.

As plantas aumentam a quantidade de bifurcações e pontas de raízes para absorver água de forma mais eficiente. Logo, nos tratamentos controle sem hidrogel foi preciso aumentar a quantidade de bifurcações e pontas nas raízes para garantir a sobrevivência das plantas. Já nos tratamentos com doses de hidrogel não foi necessário aumentar as bifurcações e pontas radiculares pelo fato de que o polímero estava auxiliando no suprimento de água. Contudo, plantas que se desenvolveram mediante dose elevada de hidrogel tiveram seu

desenvolvimento comprometido pela quantidade excessiva do polímero (Figura 22) e consequente encharcamento do ambiente radicular.

Figura 22 – Imagens através de microscópio da raiz do tratamento ID5R3, em diferentes ângulos (A e B), encharcada de hidrogel ao seu redor mesmo após a primeira lavagem



Fonte: Autor, 2020.

As maiores doses do polímero e sua localização próxima ao ambiente radicular afetaram negativamente o desenvolvimento das raízes. Além das evidências com os valores morfológicos (Tabela 5), as imagens obtidas com o programa WinRHIZO ilustram que o tratamento TR1 (Figura 23A) apresentou mais raízes e necessitou de 10 escaneamentos separados para analisar toda amostra, enquanto o CD5R4 necessitou de apenas um escaneamento devido a quantidade reduzida de raízes (Figura 23B).

Figura 23 – Raiz do tratamento TR1 (testemunha – repetição 1) (A) e do tratamento CD5R4 (aplicação via cova – dose 5 - repetição 4) (B) escaneado através do programa WinRHIZO



Fonte: Autor, 2020.

4.5 Análise da nodulação e acúmulo de N no material vegetal

Para os atributos referentes à nodulação não responderam a nenhum dos tratamentos avaliados. O acúmulo de nitrogênio pelas mudas de *M. caesalpiniaefolia* respondeu somente ao modo de aplicação do polímero ($p < 0,01$) (Tabela 6).

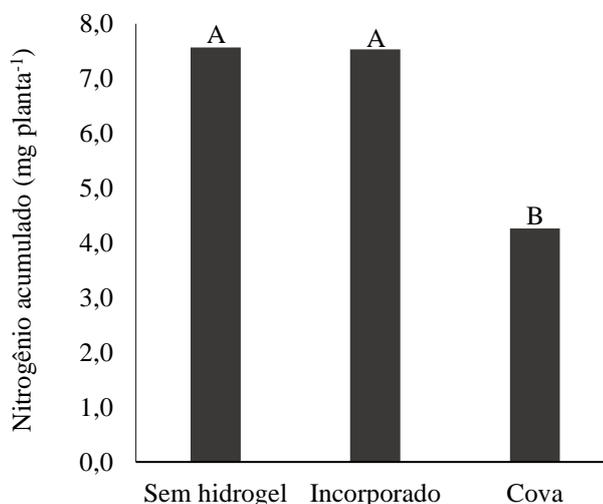
Tabela 6. Resumo da análise de variância (ANOVA) para número total de nódulos (TN), massa seca de nódulos (MN), porcentagem de nódulos eficientes (%N_{ef}) nas raízes e para nitrogênio acumulado na parte aérea (N_{acum}) nas mudas da espécie *M. caesalpiniaefolia*

Fonte de variação (FV)	TN	MN	%N _{ef}	N _{acum} ²
	-----Valor F-----			
Modo de aplicação do hidrogel (MA)	0,1 ^{ns}	0,8 ^{ns}	0,4 ^{ns}	40,5 ^{**}
Dose de hidrogel (DH)	0,4 ^{ns}	0,3 ^{ns}	0,3 ^{ns}	2,0 ^{ns}
MA x DH	0,3 ^{ns}	1,2 ^{ns}	0,0 ^{ns}	2,2 ^{ns}
CV (%) ¹	8	8,7	15,7	26,8

¹ CV = coeficiente de variação; ² Dados transformados por BOX-COX; * significativo a 5% de probabilidade; ** significativo a 1% de probabilidade; ^{ns} não significativo.

O N_{acum} sem hidrogel foi 7,57 mg planta⁻¹, enquanto para a aplicação incorporada foi de 7,53 mg planta⁻¹ sem diferença entre tratamentos. Quando o hidrogel foi aplicado na cova, o N_{acum} foi menor (4,26 mg planta⁻¹) e diferiu dos demais tratamentos (Figura 24).

Figura 24 – Gráfico de barras com as de nitrogênio acumulado durante o desenvolvimento de mudas de *M. caesalpiniaefolia* para o tratamento sem aplicação de hidrogel, com aplicação incorporada ou via cova. Médias seguidas pelas mesmas letras não difeririam estatisticamente no teste de Tukey a 5%



Dados transformados por BOX-COX através da equação $N_{acum} = N_{acum}^{0.6}$. Fonte: Autor, 2020.

O acúmulo de N nas mudas foi afetado pela presença de nódulos, que foram mais observados em casa de vegetação nos tratamentos sem hidrogel e com o polímero incorporado, proporcionando melhor fixação do nitrogênio atmosférico e melhor acúmulo de nitrogênio na parte aérea. Adicionalmente, nesses tratamentos também houve maior produção de biomassa nas mudas de leguminosas, também contribuindo com maiores valores de acúmulo de N. Enquanto as plantas do tratamento em cova, apresentaram poucos nódulos e então menor acúmulo de nitrogênio na parte aérea.

5 CONCLUSÃO

A aplicação do hidrogel incorporado ao solo favoreceu o desenvolvimento inicial das mudas de *M. caesalpiniaefolia* quando comparada à aplicação em cova do polímero superabsorvente.

Em relação à dose recomendada pelo fabricante do Forth Gel[®] (0,24% m/m ou 6g/muda para 2,5 kg de solo), não foi a mais adequada para o desenvolvimento das mudas de *M. caesalpiniaefolia*. Então, recomenda-se o uso da dose de 0,02% m/m (0,4 g/muda) ou a não aplicação do produto, pois estes tratamentos proporcionaram melhores resultados nas mudas de sabiá. Sendo a dose ideal (0,4 g/muda) 15 vezes menor do que a recomendada pelo fabricante (6 g/muda).

6 REFERÊNCIAS

ABREU, A. H. M.; LELES, P. S. S.; MELO, L. A.; FERREIRA, D. H. A. A.; MONTEIRO, F. A. S. Produção de mudas e crescimento inicial em campo de *Enterolobium contortisiliquum* produzidas em diferentes recipientes. **Floresta**, Curitiba, v. 45, n. 1, p. 141-150, 2014.

ACCIOLY, LJ de O. Degradação do solo e desertificação no Nordeste do Brasil. **Embrapa Solos-Artigo de divulgação na mídia (INFOTECA-E)**, 2010.

AGABA, H.; BAGUMA ORIKIRIZA, L. J.; OSOTO ESEGU, J. F.; OBUA, J.; KABASA, J. D.; HÜTTERMANN, A. Effects of hydrogel amendment to different soils on plant available water and survival of trees under drought conditions. **Clean-Soil, Air, Water**, [s.l.], v. 38, n. 4, p. 328-335, 2010.

AGUIAR, M. J. N.; VIANA, T. V. A.; AGUIAR, J. V.; LIMA, J. B.; CRISÓSTOMO JÚNIOR, R. R.; AQUINO, F. C.; CARNEIRO, F. A.; BARRETO, J. H. C. Dados Climatológicos: Estação de Fortaleza, 2001. **Embrapa Agroindústria Tropical. Fortaleza**, n. 61, 2002.

ALAZARD, M.; LEDUC, C.; TRAVI, Y.; BOULET, G.; BEM SALEM, A. Estimating evaporation in semi-arid areas facing data scarcity: Example of the El Haouareb dam (Merguellil catchment, Central Tunisia). **Jornal of Hidrology: Regional Studies**, [s.l.], v. 3, p. 265-284, 2015.

ALBUQUERQUE, G. H. S. **Hidrogel de acrilamida e acrilato para estratégias de recuperação de um Argissolo em processo de degradação**. 2019. 124 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

ALS, W. S. P.; BETON, Z. F. H. Water saturated super-absorbent polymers used in high strength concrete. **Otto-Graf-Journal**, [s.l.], v. 16, p. 193, 2005.

AQUINO F.G.; OLIVEIRA M.C.; RIBEIRO J.F.; PASSOS F.B. Módulos para recuperação de Cerrado com espécies nativas de uso múltiplo. **Embrapa Cerrados. Documentos**, 2009.

ARAÚJO FILHO, J. **Manejo pastoril sustentável da caatinga**. IICA, Brasília (Brasil) Projeto Dom Helder Câmara, Recife (Brasil) Projeto SEMEAR, Brasília (Brasil) Associação Brasileira de Agroecologia, Rio Grande do Sul (Brasil), 2013.

ARAUJO, G.H.S.; ALMEIDA, J.R.; GUERRA, A.J.T. Gestão ambiental de áreas degradadas. Rio de Janeiro, **Bertrand Brasil**, 320p, 2005.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS - AOAC. **Official methods of analysis**. 16 ed., v. 1, 1995.

BALL, R.A.; OOSTERHUIS, D.M.; MAUROMOUSTAKOS, A. Growth dynamics of the cotton plant during water-deficit stress. **Agronomy Journal**, Madison, v.86, p. 788-795, 1994.

BIRTHAL, P. S.; NEGI, D. S.; KHAN, M. T.; AGARWAL, S. Is Indian Agriculture becoming resilient to droughts? Evidence from rice production systems. **Food Policy**, [s.l.], v. 56, p. 1-12, 2015.

BOCHET, E. The fate of seeds in the soil: a review of the influence of overland flow on seed removal and its consequences for the vegetation of arid and semiarid patchy ecosystems. **Soil** 1, Munich, p. 131–146, 2015.

BRASIL. **Acervo digital geográfico e populacional do semiárido nordestino**. Instituto Nacional do Semiárido e Sistema de Gestão da Informação e do Conhecimento do Semiárido Brasileiro - INSA/SIGSAB, 2010. Disponível em:<http://sigsab.insa.gov.br/acervoDigital>. Acesso em: 11 nov. 2020.

BRASIL. Resolução nº 115, de 23 de novembro de 2017. Aprova a Proposição nº 113/2017, que acrescenta municípios a relação aprovada pela Resolução CONDEL nº 107, e 27 de julho de 2017. **Diário Oficial da União. Poder Executivo**, Brasília, 05 dez. 2017. Seção 1, p.32. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/mapasregionais/15974-semiarido-brasileiro.html?=&t=sobre>. Acesso em: 11 nov. 2020.

BRISSETTE, J. C. Summary of discussions about seedling quality. In: **Southern Nursery Conferences**. New Orleans: USDA, Forest Service/Southern Forest Experiment Station, 1984. p. 127-128.

CARVALHO, P. E. R. *Sabiá-Mimosa caesalpinifolia*. **Embrapa Florestas-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 2007.

CHEN, S.; ZOMMORODI, M.; FRITZ, E.; WANG, S.; HÜTTERMANN, A. Hydrogel modified uptake of salt ions and calcium in *Populus euphratica* under saline conditions. **Trees**, [s.l.], v. 18, n. 2, p. 175-183, 2004.

COELLO, J.; AMEZTEGUI, A.; ROVIRA, P.; FUENTES, C.; PIQUÉ, M. Innovative soil conditioners and mulches for forest restoration in semiarid conditions in northeast Spain. **Ecological Engineering**, [s.l.], v. 118, p. 52-65, 2018.

COSTA, J. E. **Atributos químicos do solo, crescimento e estado nutricional de cajueiro adubado com farinha de ossos e tratado com hidrogel**. 2019. 58 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2019.

COSTA, G. S.; FRANCO, A. A.; DAMASCENO, R. N.; FARIA, S. D. Aporte de nutrientes pela serapilheira em uma área degradada e revegetada com leguminosas arbóreas. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, [s.l.], v. 28, n. 5, p. 919-927, 2004.

CUNHA, T. J. F.; PETRERE, V. G.; SILVA, D. J.; MENDES, A. M. S.; MELO, R. F.; NETO, M. B. O. SILVA, M. S. L.; ALVAREZ, I. A. Principais solos do semiárido tropical brasileiro: caracterização, potencialidades, limitações, fertilidade e manejo. **Embrapa Semiárido-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2010.

DABHI, R.; BHATT, N.; PANDIT, B. Superabsorbent polymersan innovative water saving technique for optimizing crop yield. **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, [s.l.], v. 2, n. 10, p. 5333-5340, 2013.

DICKSON, A., LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **Forest Chronicle**, [s.l.], v.36, p.10-13, 1960.

DRANSKI, J. A.; PINTO JUNIOR, A. S.; CAMPAGNOLO, M. A.; MALAVASI, U. C.; MALAVASI, M. M. Sobrevivência e crescimento do pinhão-mans em função do método de aplicação e formulações de hidrogel. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 5, p. 537-542, 2013.

DRUMOND, M. A.; KILL, L. H. P.; LIMA, P. C. F.; OLIVEIRA, M. C. de; OLIVEIRA, V. R. de; ALBUQUERQUE, S. G. de; NASCIMENTO, C. E. de S.; CAVALCANTI, J. Estratégias para o Uso Sustentável da Biodiversidade da Caatinga. **Embrapa Semiárido-Fôlder/Folheto/Cartilha (INFOTECA-E)**, 2000.

DUTRA, A. F.; MELO, A. S.; FILGUEIRAS, L. M. B.; DA SILVA, Á. R. F.; DE OLIVEIRA, I. M.; BRITO, M. E. B. Parâmetros fisiológicos e componentes de produção de feijão-caupi cultivado sob deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Pernambuco, v. 10, n. 2, p. 189-197, 2015.

ENGEL V. L.; PARROTA; J.A. Definindo a restauração ecológica: tendências e perspectivas mundiais. Definindo a restauração ecológica: tendências e perspectivas mundiais. **Book chapter (in Portuguese)**, 2003.

FAO, ITPS (Intergovernmental Technical Panel on Soils). **Status of the World's Soil Resources (SWSR)** – main report. FAO, Rome, 2015.

FELIPPE, D.; NAVROSKI, M. C., SAMPIETRO; J. A., FRIGOTTO, T., ALBUQUERQUE, J. A.; MOTA, C. S.; PEREIRA, M. O. Efeito do hidrogel no crescimento de mudas de *Eucalyptus benthamii* submetidas a diferentes frequências de irrigação. **Floresta**, Curitiba, v. 46, n. 2, p. 215-225, 2016.

FENG, D.; BAI, B.; DING, C.; WANG, H.; SUO, Y. Synthesis and swelling behaviors of yeast-g-poly (acrylic acid) superabsorbent co-polymer. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, [s.l.], v. 53, n. 32, p. 12760-12769, 2014.

FERRAZ, A. V.; ENGEL, V. L. Efeito do tamanho de tubetes na qualidade de mudas de jatobá (*Hymenaea courbaril* L. VAR. *stilbocarpa* (Hayne) Lee Et Lang.), ipê-amarelo (*Tabebuia chrysotricha* (Mart. ex DC.) Sandl.) e guarucaia (*Parapiptadenia rigida* (Benth.) Brenan). **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 413-423, 2011.

FERREIRA, P. A. A.; BOMFETI, C. A.; SILVA JÚNIOR, R. D.; SOARES, B. L.; SOARES, C. R. F. S.; MOREIRA, F. M. D. S. Eficiência simbiótica de estirpes de *Cupriavidus necator* tolerantes a zinco, cádmio, cobre e chumbo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 1, p. 85-95, 2012.

FRANCO, A. A.; DE RESENDE, A. S.; CAMPELLO, E.F.C. Importância das leguminosas arbóreas na recuperação de áreas degradadas e na sustentabilidade de sistemas agroflorestais. In: **Embrapa Caprinos e Ovinos-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: seminário sistemas agroflorestais e desenvolvimento sustentável, 2003, Campo Grande: Embrapa Gado de Corte; Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste; Corumbá: Embrapa Pantanal, 24 f., 2011.

GUERRA, A. M. N. M.; COSTA, A. C. M.; TAVARES, P. R. F. Atividade fotossintética e produtividade de alface cultivada sob sombreamento. **Revista Agropecuária Técnica**, [s.l.], v. 38, n. 3, p. 125-132, 2017.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, p. 383–411, 1986.

HENNINK, W. E.; VAN NOSTRUM, C. F. Novel crosslinking methods to design hydrogels. **Advanced Drug Delivery Reviews**, [s.l.], v. 64, p. 223–236, 2012.

HUTTERMANN, A.; ORIKIRIZA, L.J.; AGABA, H. Application of superabsorbent polymers for improving the ecological chemistry of degraded or polluted lands. **Clean – Soil, Air, Water**, [s.l.], v. 37, p. 517 – 526, 2009.

HUTTERMANN, A.; ZOMMORODI, M.; REISE, K. Addition of hydrogels to soil for prolonging the survival of *Pinus halepensis* seedlings subjected to drought. **Soil and tillage research**, [s.l.], v. 50, n. 3-4, p. 295-304, 1999.

JAIMEZ, R. E.; RADA, F.; GARCÍA N. C.; AZÓCAR, A. Seasonal variations in leaf gas exchange of plantain cv. Hartón (*Musa AAB*) under different soil water conditions in a humid tropical region. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 104, n. 1, p. 79-89, 2005.

KONRAD, M. L. F.; SILVA, J.A.B.D.; FURLANI, P.R.; MACHADO, E.C. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila em seis cultivares de cafeeiro sob estresse de alumínio. **Bragantia**, Campinas, v. 64, n. 3, p. 339-347, 2005.

LARNEY, F. J.; ANGERS, D. A. The role of organic amendments in soil reclamation: A review. **Canadian Journal of Soil Science**, [s.l.], v. 92, n. 1, p. 19-38, 2012.

LEJCUŚ, K.; ŚPITALNIAK, M.; DĄBROWSKA, J. Swelling behaviour of superabsorbent polymers for soil amendment under different loads. **Polymers**, Poland, v. 10, n. 3, p. 271, 2018.

LIU, Y.; WU, L.; BADDELEY, J. A.; WATSON, C. A. Models of biological nitrogen fixation of legumes. **Sustainable Agriculture**, Dordrecht, v. 2, p. 883-905, 2011.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: POTAFÓS, 319p. 1997.

MARCONATO, J. C.; FRANCHETTI, S. M. M. Polímeros superabsorventes e as fraldas descartáveis: um material alternativo para o ensino de polímeros. 15 ed. **Química nova na escola**, [s.l.], v. 14, p. 42-44, 2002.

MARQUES, P. A. A.; CRIPA, M. A. D. M.; MARTINEZ, E. H. Hidrogel como substituto da irrigação complementar em viveiro telado de mudas de cafeeiro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 1, p. 1-7, 2013.

MAYER, J. D.; GARCIA, A. F. C.; FRANCO, J. R.; DA FONSECA, Z. P.; FALATE, R. Estimando e comparando comprimentos de objetos cilíndricos por meio dos sistemas winrhizo e safira. **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia**, 2018.

MENDES, M. M. C.; CHAVES, L. D. F. D. C.; PONTES NETO, T. P.; SILVA, J. A. A. D.; FIGUEIREDO, M. D. V. B. Crescimento e sobrevivência de mudas de sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia* Benth.) inoculadas com micro-organismos simbiotes em condições de campo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 2, p. 309-320, 2013.

MIKKELSEN, R. L.; BEHEL, A. D.; WILLIAMS, H. M. Addition of gel-forming hydrophilic polymers to nitrogen fertilizer solutions. **Fertilizer Research**, Raleigh, v.36, p. 55-61,1993.

NOGUEIRA, N. O.; OLIVEIRA, O. M.; MARTINS, C. A. S; BERNARDES, C. O. Utilização de leguminosas para recuperação de áreas degradadas. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 8, n. 14; p. 21- 22, 2012.

OLDEMAN, L. R. Global extent of soil degradation. In: **Bi-Annual Report**, p. 19-36, 1992.

PADMAVATHI, T. A.; RAO, D. M. Differential accumulation of osmolytes in 4 cultivars of peanut (*Arachis hypogaea* L.) under drought stress. **Journal of Crop Science and Biotechnology**, [s.l.], v. 16, n. 2, p. 151-159, 2013.

PEGORARO, R.F.; OLIVEIRA, D.; MOREIRA, C.G.; KONDO, M.K.; PORTUGAL, A.F. Partição de biomassa e absorção de nutrientes pelo feijoeiro comum. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 27, p. 41-52, 2014.

PRADO, D.E. As Caatingas da América do Sul. In: LEAL, R.I.; TABARELLI, M.; SILVA, J.M.C. da. **Ecologia e conservação da Caatinga**, Recife, 823p, 2003.

PREVEDELLO, C. L.; BALENA, S. P. Efeitos de polímeros hidrorretentores nas propriedades físico-hídricas de dois meios porosos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 2, p. 251-258, 2000.

ROCHA, R.; SOARES, R. R. Water scarcity and birth outcomes in the Brazilian semiarid. **Journal of Development Economics**, [s.l.], v. 112, p. 72-91, 2015.

SAAD, J. C. C.; LOPES, J.L. W.; SANTOS, T. A. Manejo hídrico em viveiro e uso de hidrogel na sobrevivência pós-plantio de *Eucalyptus urograndis* em dois solos diferentes. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v. 29, n. 3, p. 404-411, Sept. 2009.

SAHA, A.; SEKHARAN, S.; MANNA, Ut. Superabsorbent hydrogel (SAH) as a soil amendment for drought management: a review. **Soil and Tillage Research**, [s.l.], v. 204, p. 104736, 2020.

SAMPAIO, E. V. D. S. B.; MENEZES, R. S. C.; SAMPAIO, Y. D. S. B.; DE FREITAS, A. D. S. Sustainable agricultural uses in the Caatinga. In: **Caatinga**. Springer, Cham, p. 413-428, 2017.

SANTOS, A. M.; TARGA, M. S.; BATISTA, G. T.; DIAS, N. W. Florestamento compensatório com vistas à retenção de água no solo em bacias hidrográficas do município de Campos do Jordão, SP, Brasil. **Ambiente e Água**, Taubaté, v. 6, n. 3, p. 110- 126, 2011.

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 287-294, 1998.

SARVAŠ, M.; PAVLENDÁ, P.; TAKÁČOVÁ, E. Effect of hydrogel application on survival and growth of pine seedlings in reclamations. **Journal of Forest Science**, [s.l.], v. 53, n. 5, p. 204-209, 2007.

STITUTE INC. **User's Guide for SAS/STAT 15.2**. Cary, NC: SAS Institute Inc., 2020.

SCALON, S. D. P. Q.; MUSSURY, R. M.; DE MELLO EUZÉBIO V. L.; KODAMA F. M.; KISSMANN, C. Estresse hídrico no metabolismo e crescimento inicial de mudas de mutambo (*Guazuma ulmifolia* Lam.). **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 4, p. 655-662, 2011.

SILVA F.G.; DUTRA W.F.; DUTRA A.F.; OLIVEIRA I.M.; FILGUEIRAS L.M.B.; MELO A.S. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila em plantas de berinjela sob lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, p. 946-952, 2015.

SILVA, R. F. D.; LUPATINI, M.; ANTONIOLLI, Z. I.; LEAL, L. T.; MORO JUNIOR, C. A. Comportamento de *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub., *Parapiptadenia rigida* (Benth.) Brenan e *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong cultivadas em solo contaminado com cobre. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 1, p. 103-110, 2011.

SOUSA G.T.O.; AZEVEDO G.B.; SOUSA J.R.L.; MEWS C.L.; SOUZA A.M. Incorporação de polímero hidrorretentor no substrato de produção de mudas de *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 9, n. 16, p 1270-1278, 2013.

STAMFORD, N. P.; SILVA, R. A. Efeito da calagem e inoculação de sabiá em solo da mata úmida e do semi-árido de Pernambuco. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 35, n. 5, p. 1037-1045, 2000.

STARKEY, T. E.; ENEBAK, S. A.; SOUTH, D. B.; CROSS, R. E. Particle size and composition of polymer root gels affect loblolly pine seedling survival. **Native Plants Journal**, [s.l.], v. 13, n. 1, p. 19-26, 2012.

TAIZ, L.; ZEIGER, E; MOLLER, I.M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Artmed Editora, 2017.

TAVARES, S. D. L.; FRANCO, A. A.; SILVA, E. M. R. Produção de mudas de *Acacia mangium* Willd noduladas e micorrizadas em diferentes substratos. **Embrapa Solos-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2016.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, v. 4, 2017.

UHL, C.; NEPSTAD, D.; SILVA, J. M. C.; VIEIRA, I. Restauração de floresta em pastagens degradadas. **Ciência Hoje**, [s.l.], v. 13, n. 76, p. 22-31, 1991.

VALE, R. S. **Agrossilvicultura com eucalipto como alternativa para o desenvolvimento sustentável da zona da Mata de Minas Gerais**. 2004. 101f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2004.

VALLONE, H. S.; GUIMARÃES, R. J., SOUZA, C. A. S., CARVALHO, J. D. A., FERREIRA, R. D. S.; OLIVEIRA, S. D. Substituição do substrato comercial por casca de arroz carbonizada para produção de mudas de cafeeiro em tubetes na presença de polímero hidrorretentor. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 28, n. 3, p. 593-599, 2004.

WANG, G.; LIU, S.; FANG, Y.; SHANGGUAN, Z. Adaptive changes in root morphological traits of Gramineae and Leguminosae seedlings in the ecological restoration of the semiarid region of northwest China. **Land Degradation & Development**, [s.l.], v. 31, n. 16, p. 2417-2429, 2020.

YÁÑEZ-CHÁVEZ, L. G.; PEDROZA-SANDOVAL, A.; SÁNCHEZ-COHEN, I.; SAMANIEGO-GAXIOLA, J. A. Assessment of the impact of compost and hydrogel as soil moisture retainers on the growth and development of forage maize (*Zea mays* L.). **Journal of Agriculture and Environmental Sciences**, [s.l.], v. 3, n. 4, p. 93-106, 2014.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communication in Soil Science and Plant Analyses**, [s.l.], v. 19, p. 1467-1476, 1988.

ZHAO, W.; CAO, T.; DOU, P.; SHENG, J.; LUO, M. Effect of various concentrations of superabsorbent polymers on soil particle-size distribution and evaporation with sand mulching. **Scientific Reports**, [s.l.], v. 9, n. 3511, 2019.

ZOHOURIAN, M. M.; KABIRI, K. Superabsorbent polymer materials: a review. **Iranian Polymer Journal**, Theran, v. 17, p. 451, 2008.