

SAIS SOLÚVEIS E ATRIBUTOS FÍSICOS DE CAMBISSOLO EUTRÓFICO SUBMETIDO À DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE POLÍMERO ACRILAMIDA-CO-ACRILATO

Soluble salts and physical attributes of Eutrophic Cambisol subjected to different concentrations of acrylamide-co-acrylate polymer

Vanessa Ohana Gomes Moreira

Engenheira Agrônoma, Doutora Ciência do Solo. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, Funceme

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7881-1629>

vanessa.moreira@funceme.br

Raimundo Nonato de Assis Júnior

Engenheiro Agrônomo, Doutor em Solos e Nutrição de Plantas. Universidade Federal do Ceará

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5892-0454>

assisjr@ufc.br

Judith Pessoa de Andrade Feitosa

Engenheira Química, Doutora em Química. Universidade Federal do Ceará

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4466-0452>

judith@dqi.ufc.br

Túlio Cordeiro Aragão

Químico. Universidade Federal do Ceará

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4466-0452>

tuliocaragao@gmail.com

Artigo recebido em jan/2024 e aceito em abr/2024

RESUMO

O uso adequado do hidrogel na agricultura aumenta a umidade do solo e reduz o estresse hídrico das plantas. O objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos da aplicação de hidrogel (acrilamida-co-acrilato) na concentração de sais solúveis e nas propriedades físico-hidráulicas de um Cambissolo Eutrófico do estado do Ceará, Brasil. As concentrações de polímero foram representadas por 0%, 0,1%, 0,25% e 0,5%. O substrato foi incubado por 10 dias em tubos de PVC medindo 10 x 12 cm. Posteriormente, foram realizadas análises químicas, incluindo condutividade elétrica e quantificação de sais solúveis como cálcio, magnésio, sódio e potássio no extrato de saturação. As análises físicas incluíram condutividade hidráulica saturada, porosidade total, macro e microporosidade. Os resultados foram submetidos à análise estatística a um nível de significância de 5% e análise de regressão. Houve diferença significativa nos atributos avaliados com base na concentração de hidrogel. A condutividade elétrica e a quantidade de íons monovalentes no extrato solúvel aumentaram, mas houve redução nos íons divalentes quando a concentração de polímero mais alta foi aplicada. Houve uma redução significativa na microporosidade do solo e na condutividade hidráulica, apesar do aumento na porosidade total e macroporosidade. Conclui-se que o hidrogel tem a capacidade de

adsorver e liberar íons e reduzir a microporosidade do solo e a condutividade hidráulica saturada, apesar de aumentar a macroporosidade e a porosidade total no Cambissolo Eutrófico.

Palavras-chave: Polímero Superabsorvente; Atributos do solo; Cambissolo.

ABSTRACT

The proper use of hydrogel in agriculture increases soil moisture and reduces plant water stress. The objective of this study was to evaluate the effects of hydrogel application (acrylamide-co-acrylate) on the concentration of soluble salts and the physical-hydraulic properties of a Eutrophic Cambisol in the state of Ceará, Brazil. The polymer concentrations were represented by 0%, 0,10%, 0,25%, and 0,5%. The substrate was incubated for 10 days in PVC tubes measuring 10 x 12 cm. Afterward, chemical analyses were conducted, including electrical conductivity and the quantification of soluble salts such as calcium, magnesium, sodium, and potassium in the saturation extract. Physical analyses included saturated hydraulic conductivity, total porosity, macro, and microporosity. The results were subjected to statistical analysis at a 5% significance level and regression analysis. There was a significant difference in the evaluated attributes based on the hydrogel concentration. Electrical conductivity and the quantity of monovalent ions in the soluble extract increased, but there was a reduction in divalent ions when the highest polymer concentration was applied. There was a significant reduction in soil microporosity and hydraulic conductivity, despite an increase in total porosity and macroporosity. It is concluded that the hydrogel has the capacity to adsorb and release ions and reduce soil microporosity and saturated hydraulic conductivity, despite increasing macroporosity and total porosity in the Eutrophic Cambisol.

Keywords: Superabsorbent polymer; Soil attributes; Cambisol.

1. INTRODUÇÃO

Os ecossistemas agrícolas são os principais consumidores de recursos hídricos no mundo, utilizando aproximadamente 80% desses recursos, com variações regionais decorrentes do desenvolvimento econômico e da climatologia. Em países desenvolvidos, o consumo de água para irrigação utiliza, aproximadamente, 60% dos recursos hídricos disponíveis, enquanto esse percentual pode atingir 90% em países em desenvolvimento (ADEYEMI *et al.*, 2017).

A utilização de novas tecnologias para aumentar a eficiência da irrigação é fundamental e imprescindível ao longo do tempo. Nesse contexto, o uso de hidrogéis, como condicionador do solo, visando o aumento da disponibilidade de água para as culturas tem ganhado aceitação, pois aumenta a eficiência do uso da água e a produtividade na agricultura (MENDONÇA *et al.*, 2013), principalmente em regiões semiáridas, onde a disponibilidade limitada de água é o principal fator que dificulta a exploração agrícola.

Conceitualmente, os hidrogéis constituem uma classe de polímeros formados por redes tridimensionais hidrofílicas e grupos iônicos, com a capacidade de absorver grande quantidade de água ou fluidos em um curto espaço de tempo, além de retê-los de forma eficiente (ABOBATTA, 2018). Sendo assim, podem ser utilizados para melhorar a capacidade do solo de absorver água em

áreas secas, dispersando a água absorvida no solo. Como resultado, são também designados por polímeros superabsorventes (SAP) (OLADOSU *et al.*, 2022).

Os hidrogéis para solo são compostos tanto por fontes naturais quanto por materiais sintéticos. Os materiais naturais podem incluir os componentes mais comuns e degradáveis, que são polissacarídeos e polipeptídeos, enquanto os materiais sintéticos (baseados em petroquímicos) consistem em ácido acrílico, seus sais e acrilamida. Sendo assim, as propriedades de expansão dos hidrogéis dependem da natureza e densidade do monômero que constitui a extensa rede de cadeia polimérica (RANGANATHAN *et al.*, 2019).

O uso de hidrogel para o aumento da capacidade de armazenamento de água no solo tem sido bastante relatado na literatura (ABOBATTA, 2018; Mendonça *et al.*, 2013; MONTESANO *et al.*, 2015; SENA *et al.*, 2015). Mudanças nas propriedades físico-hídricas e químicas dos solos após o uso de hidrogel também são discutidas (EL-HADY; EL-KADER; SHAFI, 2009; ZONATTO *et al.*, 2017; HELALIA; EL- ALMIR; SHAWKY, 1992), bem como a remoção de elementos tóxicos por processos de adsorção no tratamento de água (TRAN; PARK; LEE, 2018) e a atenuação dos efeitos dos sais para as plantas (LJUBOJEIC *et al.*, 2016).

A escassez hídrica na região semiárida do Brasil é um dos principais fatores limitantes para a produção agrícola, causada, principalmente, por dois aspectos: o clima semiárido, com suas altas temperaturas e níveis reduzidos de chuva por longos períodos, e problemas relacionados à disponibilidade de água (BARBOSA *et al.*, 2021). Além disso, a região é caracterizada por intensos processos de degradação do solo, como erosão, salinização e desertificação (SILVA *et al.*, 2023; LINS *et al.*, 2023).

A salinização do solo é uma forma de degradação devido ao acúmulo de sais solúveis na superfície do solo ou próximo a ela. É um dos problemas ambientais mais antigos e é considerado um dos sete principais caminhos para a desertificação. A agricultura irrigada em todo o mundo é afetada pela salinização, sendo as condições climáticas das regiões semiáridas e áridas propícias para a ocorrência do fenômeno.

Os Cambissolos compreendem uma das principais classes de solos existentes na região semiárida do Brasil (Gama; Jesus, 2020). São solos constituídos por material mineral e caracterizados por possuírem horizonte B incipiente (SEVERIANO *et al.*, 2008). São rasos a profundos, bem drenados, com textura média ou argilosa, com alta a baixa saturação por bases e atividade química da argila (SANTOS *et al.*, 2018). Por possuírem, em geral, boa fertilidade, contribuem para o desenvolvimento da agricultura em diversas regiões. No entanto, poucos são os estudos com uso de

polímero superabsorvente e suas implicações em atributos físico-hídricos e químicos dos Cambissolos.

Diante disso, objetivou-se com esse trabalho avaliar os efeitos da aplicação de concentrações crescentes de um hidrogel sintetizado em laboratório à base de acrilamida e acrilato de potássio (acrilamida-co-acrilato) na concentração de sais solúveis, na condutividade hidráulica e na porosidade de amostras de Cambissolo Eutrófico do estado do Ceará, Brasil.

2. MATERIAL E MÉTODO

Um experimento foi montado em casa de vegetação pertencente ao Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal do Ceará (latitude 3°44'25.45"S, longitude 38°34'31.62"O). Segundo a classificação de Köppen, o local de realização do estudo apresenta clima do tipo Aw', considerado tropical chuvoso (CAJAZEIRA; ASSIS JÚNIOR, 2011).

O solo utilizado foi coletado na camada de (0 - 0,25 m) de uma área de mata nativa da Chapada do Apodi-CE, área de potencial agrícola do município de Limoeiro do Norte, distante 198 km de distância da cidade de Fortaleza, sendo classificado como Cambissolo Háplico Ta Eutrófico (SANTOS *et al.*, 2018).

Na caracterização granulométrica e química do solo obteve-se os seguintes resultados: 51,5 g dm⁻³ de areia, 17,3 g dm⁻³ de silte e 31,2 g dm⁻³ de argila, resultando em textura franco argilo-arenosa; pH em H₂O = 7,6; CE = 0,62 dS m⁻¹; matéria orgânica = 27,68 g dm⁻³; K⁺ = 0,36 cmolc dm⁻³, Ca²⁺ = 6,30 cmolc dm⁻³, Mg²⁺ = 3,40 cmolc dm⁻³; H + Al = 2,23 cmolc dm⁻³, SB = 9,2 cmolc dm⁻³; V = 80% e CTC = 11,5 cmolc dm⁻³.

O hidrogel utilizado no estudo foi sintetizado com 40% de acrilamida (C₃H₅NO) e 60% de acrilato de potássio (K₂S₂O₈) (acrilamida-co-acrilato) pelo Laboratório de Polímeros da Universidade Federal do Ceará (LABPOL), com as seguintes propriedades: cinética de intumescimento em água destilada de 600 g g⁻¹; iônico; cor branca; estrutura formada por microgrânulos ou grânulos, com partículas de tamanho que variam de 0,3 a 1,0 mm (Figura 1).



Figura 1 - Síntese do hidrogel no Laboratório de Polímeros da UFC.
Fonte: Autora (2021).

Para início do experimento, o hidrogel foi intumescido em água destilada e misturado ao solo até homogeneização completa. As concentrações do polímero misturadas ao solo, correspondentes aos tratamentos, foram representadas por T1 = 0% (correspondendo o controle); T2: 0,10%; T3: 0,25% e T4: 0,5% de hidrogel.

O intumescimento foi realizado com uso de uma bandeja de plástico limpa. À medida que eram realizadas as misturas, a bandeja era lavada e seca para receber o novo tratamento. A densidade do solo de 1,3 g cm⁻³ foi utilizada para o preenchimento de canos de PVC com o substrato obtido após a homogeneização. Com isso, cada vaso foi preenchido com 2kg de substrato, conforme os respectivos tratamentos. Teve-se o cuidado de deixar dois centímetros na extremidade superior dos tubos sem substrato, para que não ocorressem perdas de material devido à expansão do polímero.

As parcelas foram distribuídas sobre a bancada da casa de vegetação seguindo o delineamento inteiramente casualizado. Foram realizadas 4 repetições para cada tratamento. O solo ficou incubado com hidrogel por 10 dias em tubos de PVC com dimensões de 10 x 12 cm. Manteve-se o solo na umidade da capacidade de campo, previamente determinada em laboratório (BONFIM-SILVA *et al.*, 2011), com uso de água destilada.

Após os 10 dias de incubação, foram retiradas amostras deformadas do substrato para avaliação da condutividade elétrica (CE) e determinação da concentração de sais solúveis de cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺), sódio (Na⁺) e potássio (K⁺). Tais avaliações foram realizadas em extrato solo-água, na relação 1:1 (EMBRAPA, 1997). A CE1:1 foi medida em condutivímetro de leitura direta com célula de 1cm; os elementos K⁺ e Na⁺ por meio de fotômetro de chama e Ca²⁺ e Mg²⁺ por espectrometria de absorção atômica.

A condutividade hidráulica saturada (Ksat) (mm h⁻¹) foi determinada pelo método do permeâmetro de carga constante (YOUNGS, 1991). Para isso, canos de PVC de dimensão 4,3 x 5 cm

foram utilizados para coletar amostras indeformadas dos canos de PVC maiores. Durante a análise, em cada amostra, manteve-se uma carga de coluna de água com a utilização de frascos de Mariotte. O volume de água coletado foi medido com proveta em intervalo de tempo determinado. Duas a quatro medições consecutivas de vazão com resultados semelhantes foi considerado fluxo constante. Utilizou-se a equação de Darcy-Buckingham para o cálculo Ksat.

A quantificação dos valores de macroporosidade (poros com diâmetro $\geq 50 \mu\text{m}$) e microporosidade (poros com diâmetro $< 50 \mu\text{m}$) ($\text{cm}^3 \text{ m}^{-3}$) foi obtida submetendo amostras de solo com estrutura indeformada e saturadas ao potencial de 6 kPa, utilizando a mesa de tensão. A determinação da porosidade total do solo foi calculada a partir da relação entre a densidade de partículas e a densidade do solo (EMBRAPA, 1997).

Os resultados obtidos foram submetidos à análise estatística ao nível de 5% de significância pelo teste F. Os parâmetros avaliados em função das concentrações do hidrogel foram submetidos à análise de regressão. Utilizou-se o software SISVAR versão 5.6 para análise estatística (FERREIRA, 2013) e SIGMAPLOT 14.0 para confecção dos gráficos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observou-se diferença significativa pelo teste F, ao nível de 5% de significância, em pelo menos um dos tratamentos em relação à condutividade elétrica (CE 1:1) e os sais solúveis de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), sódio (Na^+) e potássio (K^+) presentes no extrato de saturação do solo e avaliado aos 10 dias de incubação com o hidrogel (Tabela 1).

Tabela 1: Resumo da análise de variância (ANAVA) da condutividade elétrica (CE1:1) e dos sais solúveis de sódio (Na^+), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) do extrato de saturação do solo aos 10 dias de incubação.

FV	GL	QUADRADO MÉDIO				
		CE _{1:1}	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Tratamentos	3	0,02509*	8,8700*	3868,23*	18,428*	7,79*
Res.	12	0,001271	0,10355	6,4324	2,458	0,478
C.V. (%)	-	4,70	2,92	4,09	6,41	4,22

FV: Fonte de variação; G.L: Grau de liberdade; * Significativo pelo Teste F ($p < 0,05$); Res: resíduo; CV (%): coeficiente de variação

Os comportamentos da CE1:1 e dos sais solúveis no extrato de saturação ajustaram-se ao modelo quadrático de regressão (Figura 2). A CE1:1 apresentou maior média com a concentração de 0,5% de hidrogel (T4), atingindo $0,85 \text{ dS m}^{-1}$. A menor média da CE 1:1, foi encontrada no tratamento sem aplicação do hidrogel, resultando em $0,66 \text{ dS m}^{-1}$ (Figura 2A).

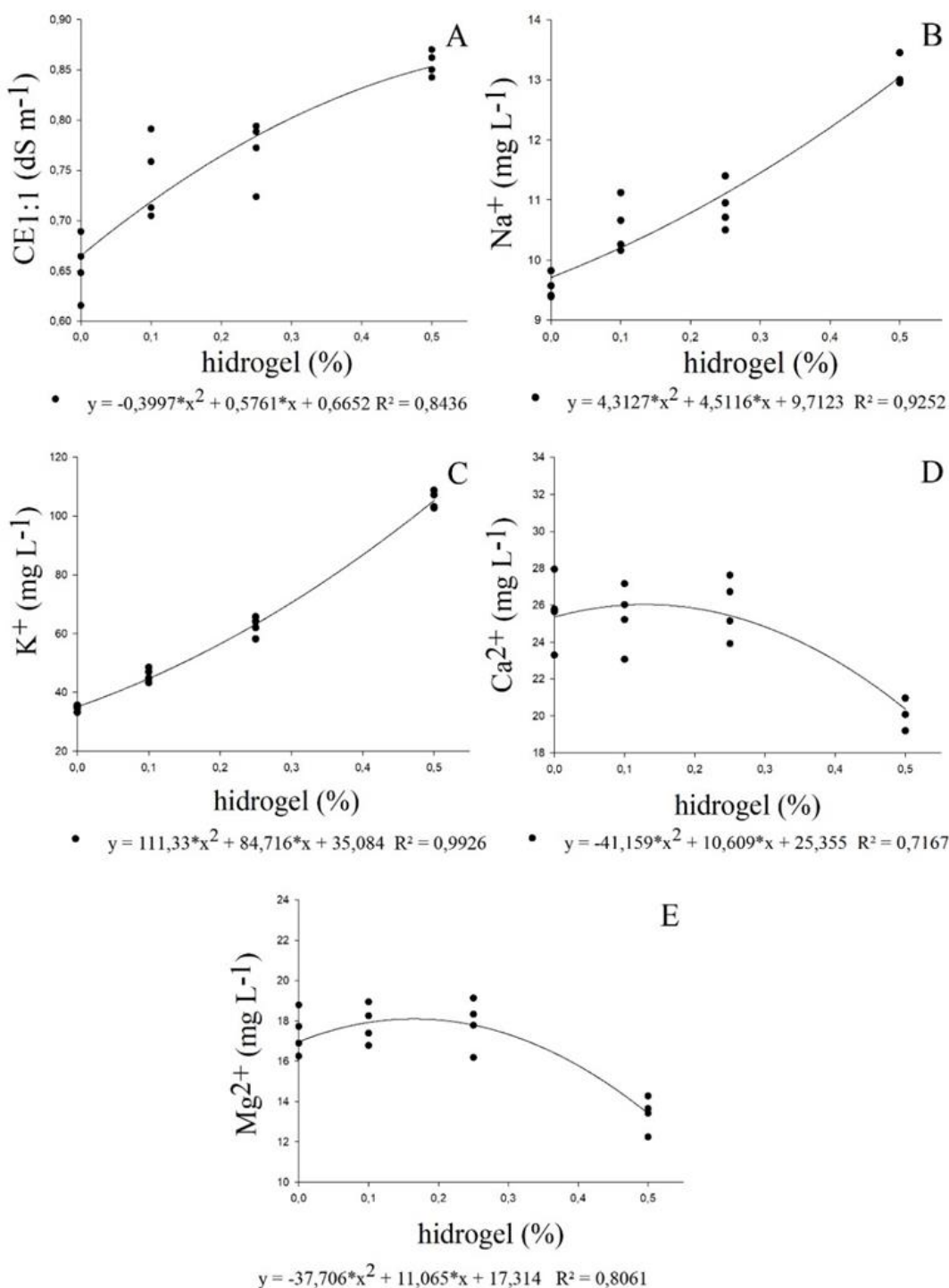


Figura 2 - Comportamento da condutividade elétrica do solo (A) e dos sais solúveis de sódio (B); potássio (C); cálcio (D) e magnésio (E) do extrato de saturação do solo em função das concentrações de hidrogel aos 10 dias de incubação.

Com isso, percebe-se que o incremento da CE1:1 do solo está relacionado ao aumento da concentração do produto, sugerindo que o hidrogel atua na liberação de sais para o meio externo. Para Mendonça *et al.* (2013), esse fenômeno ocorre após o intumescimento do hidrogel seco, pois as moléculas de água se difundem para o interior do material e interagem com os sítios hidrofílicos do polímero, liberando os íons de K⁺, para se difundirem do interior do gel para o meio externo.

Para Shahid *et al.* (2012) o aumento da CE tem relação com a estrutura química do polímero superabsorvente e as características do solo. Apesar disso, a maior concentração aplicada nesse estudo resultou em valor bem inferior os valores de CE recomendados por Richards (1954), onde alerta que $CE \geq 4 \text{ dS m}^{-1}$ no extrato de saturação do solo pode iniciar o processo de salinização, ocasionando perdas na produção agrícola e a degradação do solo.

Os íons monovalentes Na^+ e K^+ tiveram o mesmo comportamento em função do aumento do hidrogel no solo, com incremento em solução à medida que aumentava a concentração do polímero. Portanto, o Na^+ atingiu a maior média ($13,04 \text{ mg L}^{-1}$) no tratamento com 0,5% do polímero e a menor média foi obtida no extrato de saturação do tratamento sem a utilização do gel, média representada por $9,71 \text{ mg L}^{-1}$ (Figura 2B).

Seguindo o mesmo comportamento do Na^+ , a maior média do íon K^+ ($105,24 \text{ mg L}^{-1}$) foi obtida com a utilização de 0,5% de hidrogel. A menor média ($35,08 \text{ mg L}^{-1}$) foi obtida no tratamento sem a presença do polímero no solo (Figura 2C).

A alta quantidade liberada do elemento deve-se à presença do potássio na constituição do polímero, que, por sua vez, foi sintetizado com acrilato de potássio. Com isso, percebe-se que o íon K^+ teve a maior participação no aumento da CE 1:1 do solo em estudo. Resultados semelhantes são relatados por Aouada *et al.* (2008).

Em trabalho realizado por Costa *et al.* (2021) para analisar a capacidade de retenção de hidrogel e perdas tanto na absorção de água quanto na mitigação da salinidade, dependendo da composição do hidrogel e dos íons envolvidos na salinidade, os autores verificaram que os teores de K^+ no solo demonstraram superioridade do tratamento com hidrogel em todos os níveis de salinidade da água de irrigação. O K^+ apesar de mais lixiviado, teve um teor mais elevado no solo, pois o hidrogel era composto basicamente de copolímero de acrilato de K^+ e acrilamida, atuando como uma fonte de K^+ para o solo, corroborando com os encontrados.

Bogarim (2014) trabalhando com a utilização de hidrogel à base de acrilato de potássio para análise da retenção de água e/ou sais minerais percebeu que, em condições de sodicidade, houve a redução da capacidade de retenção de água pelo polímero devido à troca dos íons potássio presentes na estrutura do hidrogel e o sódio do solo, corroborando os resultados encontrados e o que já foi discutido.

Os íons divalentes Ca^{2+} e Mg^{2+} tiveram respostas semelhantes com o aumento do hidrogel no solo. O Ca^{2+} reduziu significativamente a partir da concentração de 0,25% de hidrogel, atingindo a menor média ($20,37 \text{ mg L}^{-1}$) com 0,5% do polímero (Figura 2D).

O Mg^{2+} no extrato saturação também reduziu significativamente a partir da concentração de 0,25% de hidrogel, atingindo a menor média (13,42 mg L⁻¹) no tratamento com 0,5% de gel (Figura 2E). Vale ressaltar que as médias obtidas nos demais tratamentos (T0, T1 e T2) foram semelhantes para Ca^{2+} e Mg^{2+} .

A redução da concentração dos íons divalentes no extrato solúvel pode ser explicada pelo mecanismo de adsorção desses elementos aos grupos funcionais eletrostaticamente ativos existentes na cadeia polimérica (TRAN; PARK; LEE, 2018; OZAY *et al.*, 2009). Dessa forma, o polímero pode ter atuado como uma resina de troca iônica, adsorvendo íons de maior valência, preferencialmente, e liberando íons de menor carga, como sódio e potássio.

Os colóides dos solos adsorvem íons de forma semelhante, ou seja, devido às valências, raio e propriedades hidratantes, cátions são adsorvidos nas micelas carregadas negativamente com diferentes graus de preferência, seguindo a ordem: $Al^{3+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > NH_4^+ > K^+ > Na^+ > Li^+$ (FERREIRA; SILVA; RUIZ, 2016). Pushpamalar *et al.* (2012) explicam que a capacidade de sorção dos hidrogéis depende da extensão e quantidade de reticulação existente, sendo menor à medida que essa condição aumenta.

Tefera *et al.* (2022), em experimento com uso de hidrogel à base de bagaço de cana-de-açúcar, álcool polivinílico e tetraborato de sódio, demonstraram que o hidrogel reduziu significativamente a CE da água dos poros do solo. Além disso, reduziu as concentrações de cloro, fósforo, cálcio e alumínio com reduções máximas observadas no tratamento com 3% de hidrogel. Em contrapartida, a aplicação do hidrogel no solo causou o aumento do nitrogênio (NH_4^+). Para os autores, o hidrogel mostrou resultados promissores na redução da salinidade do solo e poderia ser potencialmente usado como corretivo de solos salinos. Além disso, Silva *et al.* (2018) testando água salina e a utilização do hidrogel no crescimento de mudas de pinha, perceberam que o polímero reduz o efeito osmótico dos sais.

Em relação aos atributos físicos das amostras de solo, observou-se diferença significativa pelo teste F, ao nível de 5% de significância, em pelo menos um dos tratamentos em relação condutividade hidráulica do solo (Ksat), porosidade total (PT), macroporosidade e microporosidade do solo avaliados aos 10 dias de incubação com o hidrogel (Tabela 2).

Tabela 2: Resumo da análise de variância (ANAVA) da condutividade hidráulica saturada (Ksat), porosidade total (PT), macro e microporosidade do solo aos 10 dias de incubação.

FV	GL	QUADRADO MÉDIO			
		Ksat	PT	Macroporosidade	Microporosidade
Tratamentos	3	1932,38*	0,011024*	0,058372*	0,018334*
Resíduo	12	20,98	0,000137	0,000684	0,000467
C.V (%)	-	10,24	2,11	8,35	8,63

FV: Fonte de variação; G.L: Grau de liberdade; * Significativo pelo Teste F ($p < 0,05$); Res: resíduo; CV (%): coeficiente de variação

A condutividade hidráulica saturada, a porosidade total, a macroporosidade e microporos avaliadas no solo do estudo em função da concentração do hidrogel ajustaram-se melhor ao modelo quadrático de regressão (Figura 3).

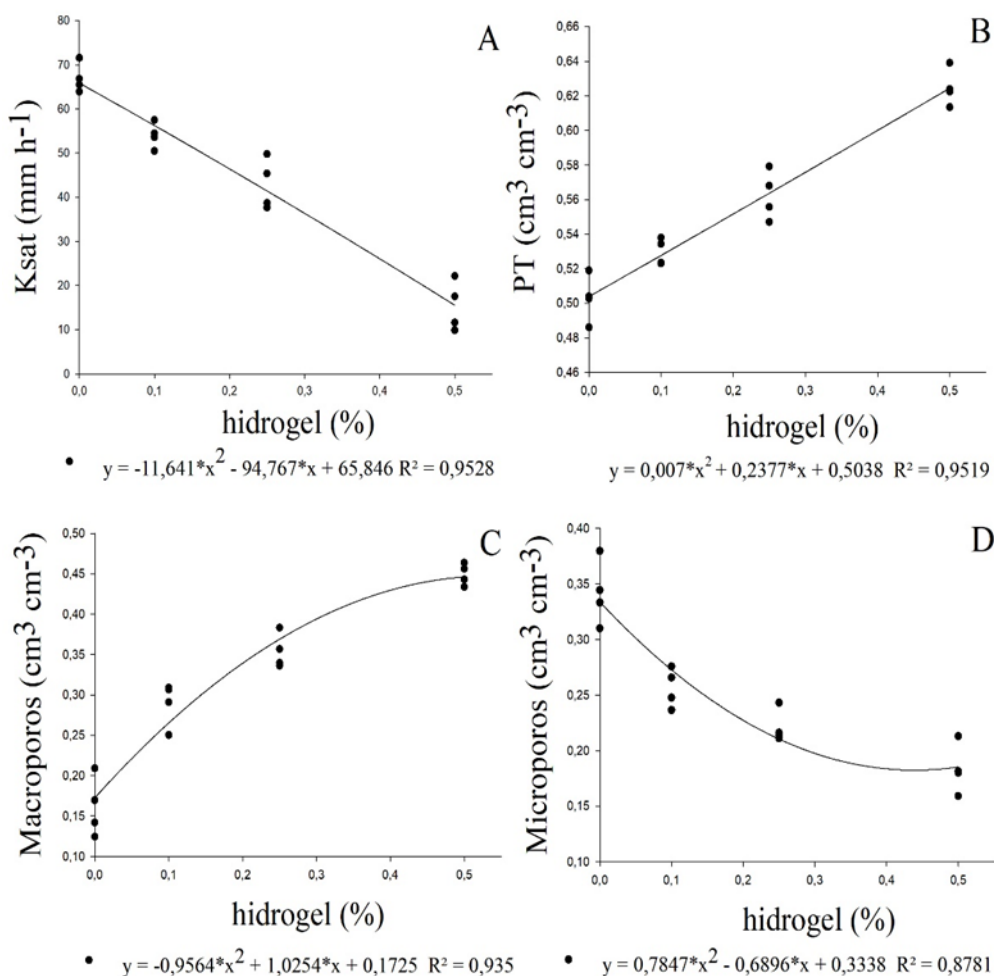


Figura 3 - (A) Comportamento da condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}); (B) porosidade total (PT); (C) quantidade de macroporos; (D) microporos em função das concentrações de hidrogel aos 10 dias de incubação.

A K_{sat} atingiu menor média ($15,55 \text{ mm h}^{-1}$) com 0,5% de hidrogel e maior média ($65,84 \text{ mm h}^{-1}$) no tratamento controle (T0) (Figura 3A). Com isso, pode-se inferir que o aumento da concentração do hidrogel causa decréscimo no movimento e na infiltração da água no solo.

A adição de 0,10%, 0,25% e 0,50% de hidrogel reduziu a condutividade hidráulica do solo em 14,57%, 35,9% e 76,39%, respectivamente, comparado ao tratamento controle. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Shahid *et al.* (2012) em um estudo anterior no qual avaliou-se a influência de nanocompósito hidrogel superabsorvente na condutividade hidráulica de solo franco-

arenoso. Os autores também verificaram incremento significativo na retenção de água e na água disponível para as plantas com a aplicação de concentrações crescentes do polímero no solo.

A redução da Ksat com a adição de hidrogel já foi relatada anteriormente para Latossolo e Areias Quartzosas (PREVEDELLO; BALENA, 2000) e para solo arenoso (AL-DARBY, 1996) (MOHAMESH; DUNER, 2019). Para Brardwaj *et al.* (2007), a menor condutividade pode ser explicada pelo aumento do volume do solo resultante do inchaço do polímero durante a saturação, e ao bloqueio dos poros devido ao intumescimento dos grãos do gel. Al-Darby (1996) sugere que, com expansão do gel, há redução do raio médio dos poros do solo, resultando em aumento da retenção da umidade e disponibilidade de água.

Apesar disso, a porosidade total do solo aumentou em função das concentrações de hidrogel, atingindo maior média ($0,624 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) no tratamento com 0,5% (T4) (Figura 3B). A menor média ($0,499 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) da porosidade total foi obtida no tratamento controle. Esse resultado sugere que o polímero contribui para a formação de espaços vazios no solo. Fato que pode estar relacionado ao processo de inchaço dentro dos poros sob condições úmidas e ao encolhimento, conforme o solo seca devido à drenagem ou à evaporação.

Diversos trabalhos relatam resultados semelhantes referentes ao aumento da porosidade total do solo com a utilização de polímero superabsorvente (PALUSKEK, 2011; HUSSIEN *et al.*, 2012; HELALIA; EL-ALMIR; SHAWKY, 1992; THOMBARE *et al.*, 2018; BHARDWAJ *et al.*, 2007). Para Demitri *et al.* (2013), a maior quantidade de poros, que surge à medida que o gel perde umidade, auxilia na aeração do solo e na oxigenação para as plantas.

Em relação à ocorrência dos poros por tamanho, foi observado aumento significativo na quantidade de poros de maior tamanho (macroporos) (Figura 3C) e a redução significativa do número de poros menores (microporos) (Figura 3D) em função da concentração do hidrogel aplicada. A maior média da quantidade de macroporos ($0,4375 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) foi encontrada em 0,5% de hidrogel, que por sua vez, foi a concentração que resultou na menor média ($0,1745 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) de ocorrência de microporos.

Esse resultado apoia a hipótese de que a secagem e intumescimento do gel contribui para o aumento dos espaços vazios, favorecendo a formação de poros maiores. Resultados semelhantes são relatados na literatura (PICCOLI *et al.*, 2020), assim como casos contrários, onde a aplicação de hidrogel resultou no aumento da microporosidade, quando os poros foram avaliados por modelagem matemática do espaço poroso (ZHENG *et al.*, 2020).

Bouma (1982) explica que poros maiores em uma dada seção podem não contribuir para o fluxo quando apresentam descontinuidade no perfil. Dessa forma, a classificação dos poros por tamanho

não reflete necessariamente o importante padrão de continuidade dos poros do solo (GONÇALVES; LIBARDI, 2013) e, com isso, na permissividade de água através do perfil.

Apesar disso, o presente estudo demonstra que em Cambissolo de textura franco argiloarenosa, o hidrogel pode ser uma tecnologia importante, atuando no aumento, não apenas da porosidade total, mas, em particular, da fração de macroporosidade, podendo desempenhar um papel fundamental no funcionamento do solo e nos serviços do ecossistema.

4. CONCLUSÃO

O hidrogel sintetizado à base de acrilamida e acrilato de potássio aplicado em Cambissolo Eutrófico possui a capacidade de troca iônica, preferencialmente, liberando íons monovalentes de K^+ e Na^+ . A adsorção dos íons divalentes de Ca^{2+} e Mg^{2+} pelo polímero ocorre significativamente quando aplicada concentração acima de 0,25%.

O hidrogel tem a capacidade de aumentar a porosidade total e a macroporosidade, apesar de reduzir a microporosidade e a condutividade hidráulica saturada de Cambissolo Eutrófico.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Ceará, em especial aos técnicos dos laboratórios de Química e Física do Solo, do Departamento de Ciência dos Solos e do Laboratório de Polímeros, pelo ambiente de estudo e pesquisa. A CAPES pelo apoio financeiro com a bolsa de estudo.

REFERÊNCIAS

- ABOBATTA, W. Impact of hydrogel polymer in agricultural sector. **Advances in Agriculture and Environmental Science**, v. 1, n. 2, p. 59-64, 2018.
- ADEYEMI, O. *et al.* Advanced monitoring and management systems for improving sustainability in precision irrigation. **Sustainability**, v. 9, n. 3, p. 2-29, 2017.
- AL-DARBY, A. M. The hydraulic properties of a sandy soil treated with gel-forming soil conditioner. **Soil Technology**, v. 9, n. 1, p. 15-28, 1996.
- AOUADA, F. A. *et al.* Síntese de hidrogéis e cinética de liberação de amônio e potássio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1643-1649, 2008.
- BARBOSA, F. E. L. *et al.* Hydrogel associated with soil in a semi-arid Environment. **International Journal of Conservation Science**, v. 12, n. 3, p. 1153-1162, 2021.

BHARDWAJ, A. K. *et al.* Water Retention and Hydraulic Conductivity of Cross-Linked Polyacrylamides in Sandy Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 71, n. 2, p. 406–412, 2007.

BOGARIM, E. P. A. **Uso de hidrogel no desenvolvimento de espécies nativas, visando aplicações em áreas degradadas**. 2014. 48 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2014.

BONFIM-SILVA, E. M. *et al.* Desenvolvimento inicial de gramíneas submetidas ao estresse hídrico. **Revista Caatinga**, v. 24, n. 2, p. 180–186, 2011.

BOUMA, J. Measuring the conductivity of soil horizons with continuous macropores. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, n. 2, p. 438–441, 1982.

CAJAZEIRA, J. P.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; Variabilidade espacial das frações primárias e agregados de um Argissolo no estado do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 2, p. 258–267, 2011.

COSTA, M. C. G. *et al.* Hydrogel composed of potassium acrylat, acrylamide and mineral as soil conditioner under saline conditions. **Scientia Agricola**, v. 79, n. 4, p. 1–10, 2022.

DEMITRI, C. *et al.* Potential of cellulose-based superabsorbent hydrogels as water reservoir in agriculture. **International Journal of Polymer Science**, v. 2013, p. 1–6, 2013.

EL-HADY, O. A.; EL-KADER, A. A. A.; SHAFI, A. M. Physico-bio-chemical properties of sandy soil conditioned with acrylamide hydrogels after cucumber plantation. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 3, n. 4, p. 3145–3151, 2009.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997. 212p.

FERREIRA, D. F.; SISVAR: A computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039–1042, 2013.

FERREIRA, P. A.; SILCA, J. B. L.; RUIZ, H. Aspectos físicos e químicos de solos em regiões semiáridas. In: GHEYI, H. R. *et al.* **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. Fortaleza: INCTSal, 2016. p. 17–34.

GAMA, D. C.; JESUS, J. B. Principais solos da região semiárida do Brasil favoráveis ao cultivo do Eucalyptus L' Heritier. **Biofix Scientific Journal**, v. 5 n. 2 p. 214–221, 2020.

GONÇALVES, A. D. M. A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 5, p. 1174–1184, 2013.

HELALIA, A. M.; EL-ALMIR, S.; SHAWKY, M. E. Effects of Acryhope and Aquastore polymers on water regime and porosity in sandy soil. **International Agrophysics**, v. 6, n. 1–2, p. 19–25, 1992.

HUANG, J. *et al.* Global semi-arid climate change over last 60 years. **Climate Dynamics**, v. 46, p. 1131–1150, 2016.

- HUSSIEN, R. A. *et al.* Studying some hydro-physical properties of two soils amended with kaolinite-modified cross-linked poly-acrylamides. **Catena**, v. 92, p. 172-178, 2012.
- LINS, C. M. T. *et al.* Influence of vegetation cover and rainfall intensity on soil attributes in an area undergoing desertification in Brazil. **Catena**, v. 221, 2023.
- LJUBOJEVIC, M. *et al.* Effects of hydrogel on growth and visual damage of ornamental salvia species exposed to salinity. *Clean Soil Air Water*, v. 45, n. 2, p. 1-8, 2016.
- MENDONÇA, T. M. *et al.* Hidrogel como alternativa no aumento da capacidade de armazenamento de água no solo. **Water Resources and Irrigation Management**, v. 2, n. 2, p. 87-92, 2013.
- MOHAWESH, O.; DURNER, W. Effects of Bentonite, Hydrogel and Biochar Amendments on Soil Hydraulic Properties from Saturation to Oven Dryness. **Pedosphere**, v. 29, n. 5, p. 598-607, 2019.
- MONTESANO, F. F. *et al.* Biodegradable superabsorbent hydrogel increases water retention properties of growing media and plant growth. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, v. 4, p. 451-458, 2015.
- OLADOSU, Y. *et al.* Superabsorbent Polymer Hydrogels for Sustainable. **Horticulturae**, v. 8, n. 7, p. 2-17, 2022.
- OZAY, O. *et al.* Removal of toxic metal ions with magnetic hydrogels. **Water Research**, v. 43, p. 4403-4411, 2009.
- PALUSZEK, J. Physical quality of eroded soil amended with gel-forming polymer. **International Agrophysics**, v. 25, n. 4, p. 375-382, 2011.
- PICCOLI, I. *et al.* **Investigating hydrogel potentialities for improving soil pore network by using X-ray computed microtomography**. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-9985>. Acesso em: 15 nov. de 2020.
- PREVEDELLO, C. L.; BALENA, S. P; Efeitos de polímeros hidroretentores nas propriedades físico-hídricas de dois meios porosos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 2, p. 251-258, 2000.
- PUSHPAMALAR, V. *et al.* Absorption characterization of Ca²⁺, Na⁺, and K⁺ on irradiation crosslinked carboxymethyl sago pulp hydrogel. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 128, n. 3, p. 1828-1833, 2013.
- RANGANATHAN, N. *et al.* Synthesis and Properties of Hydrogels Prepared by Various Polymerization Reaction Systems. In: MONDAL, M. **Cellulose-Based Superabsorbent Hydrogels**. Polymers and Polymeric Composites: A Reference. Springer, 2018.
- RICHARDS, L. A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Riverside: USDA, 1954. 166p.
- SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: EMBRAPA, 2018. 355p.

SENNA, A. M. *et al.* Synthesis, characterization and application of hydrogel derived from cellulose acetate as a substrate for slow-release NPK fertilizer and water retention in soil. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 3, n. 2, p. 996-1002, 2015.

SEVERIANO, E. C. *et al.* Pressão de preconsoidação e intervalo hídrico ótimo como indicadores de alterações estruturais de um latossolo e de um Cambissolo sob cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1419-1427, 2008.

SILVA, A. R. *et al.* Frequência de irrigação com água salina na qualidade de mudas de pinha produzidas em substrato com polímero. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 12, p. 825-830, 2018.

SILVA, J. A. *et al.* Uso de águas salinas como alternativa na irrigação e produção de forragem no semiárido nordestino. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. supl., p. 66-72, 2014.

SILVA, B. F. *et al.* Evaluating the temporal patterns of land use and precipitation under desertification in the semi-arid region of Brazil. **Ecological Informatics**, v. 77, 2023.

SHAHID, S. A. *et al.* Improvement in the water retention characteristics of sandy loam soil using a new synthesized poly (acrylamide-co-acrylic acid)/AlZnFe₂O₄ superabsorbent hydrogel nanocomposite material. **Molecules**, v. 17, n. 8, p. 9397-9412, 2012.

TEFERA, B. B. *et al.* Using liquefied biomass hydrogel to mitigate salinity in salt affected soils. **Chemosphere**, v. 309, n. 1, p. 1-11, 2022.

THOMBARE, N. *et al.* Design and development of guar gum-based novel, superabsorbent and moisture retaining hydrogels for agricultural applications. **Carbohydrate Polymers**, v. 185, p. 169-178, 2018.

TRAN, V. V.; PARK, D.; LEE, Y. C. Hydrogel applications for adsorption of contaminants in water and wastewater treatment. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, p. 24569-24599, 2018.

ZHENG, W. *et al.* Revealing soil-borne hydrogel effects on soil hydraulic properties using a roughness-triangular pore space model. **Vadose Zone Journal**, v. 19, n. 1, p. 1-14, 2020.

ZONATTO, F. *et al.* Adsorption and controlled release of potassium, phosphate and ammonia from modified Arabic gum-based hydrogel. **International journal of biological macromolecules**, v. 105, n. 1, p. 363-369, 2017.

YOUNGS, E. G. Hydraulic conductivity of saturated soils. In: SMITH, K. A.; MULLINS, C. E. **Soil analysis: Physical methods**. New York: Marcel Dekker. 1991. p. 161-207.