

Utilização de água residuária tratada na recuperação da fertilidade de solo degradado no semiárido paraibano

Emanoel Lima Martins^[1], Vânia da Silva Fraga^[2], Salomão de Sousa Medeiros^[3]

^[1]emanoel.martins@insa.gov.br. ^[2]salomao.medeiros@insa.gov.br. Instituto Nacional do Semiárido / Núcleo de Recursos Hídricos.

^[2]vanciasfraga@gmail.com. Universidade Federal da Paraíba / Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.

RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da aplicação de água residuária tratada na recuperação dos teores de matéria orgânica e fósforo em um solo degradado na região semiárida. Foi realizado um experimento com irrigação de cinco espécies florestais da caatinga, no qual foram aplicados três tratamentos que consistiram na variação do tipo e do volume de água aplicados ao solo: 7 L por semana de água de abastecimento; 7 L por semana de água residuária; e 14 L por semana de água residuária. Após decorridos dois anos de irrigação, foram retiradas amostras do solo e analisadas quanto aos teores de matéria orgânica e fósforo. O teor de matéria orgânica no tratamento com aplicação de 14 L de água residuária em relação à aplicação de água de abastecimento foi cinco vezes superior na camada superficial e oito vezes na subsuperficial, respectivamente. A partir dos resultados encontrados, pode-se considerar que a utilização de água residuária de esgotos domésticos tratados é uma alternativa para a recuperação da capacidade produtiva do solo, pelo incremento nos teores de matéria orgânica e fósforo. A irrigação com água residuária tratada pode proporcionar incremento elevado nos teores de matéria orgânica e fósforo no solo até os 30 cm de profundidade.

Palavras-chave: Fósforo. Matéria orgânica. Reúso de água.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the effect of treated wastewater application on soil organic matter and phosphorus recovery in an Anthroposol in the semiarid region. An experiment was carried out with irrigation of five caatinga forest species, in which three treatments were applied that consisted of the variation of water type and volume applied to the soil, 7 L per week of water supply, 7 L and 14 L per week of wastewater. After two years of irrigation, soil samples were taken and analyzed for soil organic matter and phosphorus. The organic matter content in the treatment with 14 L application of wastewater was five times higher in relation to the application of supply water in the superficial layer and eight times in the sub-surface, respectively. Based on the results found, we can say that the use of wastewater from treated domestic sewage can be considered an alternative for the recovery of the productive capacity of the soil by the increase in the organic matter and soil phosphorus contents. Irrigation with treated wastewater can provide a considerable increase in soil organic matter and phosphorus content up to 30 cm deep

Keywords: Phosphorus. Soil organic matter. Wastewater.

1 Introdução

A degradação do solo é um grande problema que incide sobre 33% da superfície terrestre, atingindo em torno de 42% da população mundial, provocando a perda da capacidade produtiva dos solos e a escassez de alimentos. Entre as principais causas de degradação, está a retirada de camadas de solo para a construção civil, prática comum e muito agressiva, que resulta na remoção total ou parcial de horizontes superficiais e na exposição de camadas subjacentes, causando impactos diretos na qualidade do solo e danos irreversíveis a sua fertilidade (DOETTERL *et al.*, 2016). Como agravante, os estudos de viabilidade ambiental de mineração e extração de solo, quando realizados, são geralmente incipientes e não contemplam técnicas de recuperação do solo (SANTOS; TAVARES; MEYER, 2015).

Nas regiões com deficiência hídrica acentuada, a recuperação de áreas para fins agrícolas é mais difícil, pela limitação hídrica para produção de biomassa vegetal. No entanto, a utilização de água proveniente de estações de tratamento de esgoto doméstico (ETE) tem se mostrado uma prática apropriada, tanto na produção florestal ou de forragem quanto na recuperação de solos degradados (BECERRA-CASTRO *et al.*, 2015; BONINI; ALVES; MONTANARI, 2015).

Apesar de o uso dessas águas apresentar desafios técnicos, legais, econômicos e sociais, pelo fato de a água residuária incluir conteúdos variáveis de sólidos em suspensão, matéria orgânica e elementos químicos, a possibilidade de recuperar os teores de nutrientes no solo e viabilizar a produção de biomassa apresenta-se como uma alternativa promissora, embora não tenham sido encontrados trabalhos publicados nesse sentido em escala de campo. Algumas pesquisas têm avaliado o transporte de solutos de águas residuárias em diversas classes de solos, mas limitadas a colunas de solo ou vasos (MEDEIROS *et al.*, 2005; ANAMI *et al.*, 2008; CARVALHO *et al.*, 2013).

Entre esses solutos, o fósforo (P) é normalmente encontrado em concentrações elevadas em águas residuárias, com valores variando de 11 mg L⁻¹ a 22 mg L⁻¹, em formas orgânicas e inorgânicas, e por esse motivo é considerado um poluente de cursos de água, causando eutrofização das águas em ambientes não poluídos pelo acúmulo exagerado de nitrogênio (N) e P (KLEIN; AGNE, 2012). Por outro lado, na região semiárida, o P é frequentemente o nutriente mais limitante para a produtividade agrícola, devido aos baixos teores em que se encontra no solo, em torno

de 3 mg kg⁻¹ (SALCEDO; SAMPAIO, 2008), fato que, juntamente com a baixa disponibilidade hídrica, limita a produção de biomassa. Embora a adubação com esterco seja uma prática comum na região, estudos têm demonstrado o transporte vertical de P em solos arenosos (GALVÃO; SALCEDO, 2009).

Nesse sentido, objetivou-se avaliar o efeito da aplicação de água residuária tratada na recuperação dos teores de matéria orgânica e de fósforo em um Antropossolo Decapítico em região semiárida.

2 Referencial teórico

Os principais fatores de degradação do solo estão, essencialmente, associados a ações antrópicas, como o desmatamento, as queimadas, a mineração, a agropecuária intensiva e a remoção de solo para a construção civil. Dessa forma, os solos antropogênicos constituem a classe em maior expansão no mundo (CURCIO; LIMA; GIAROLA, 2004). Nesses solos, a capacidade produtiva é fortemente reduzida pela alteração das características físicas, químicas e biológicas, em decorrência da remoção da cobertura vegetal e das camadas superficiais. Aliada à escassez de água e nutrientes no solo em regiões áridas e semiáridas, a degradação é uma das principais causas do processo de desertificação, que provoca mudanças na paisagem, tornando-a semelhante aos desertos (SOARES *et al.*, 2016).

Desde que o termo desertificação foi introduzido no Brasil por Vasconcelos Sobrinho (1978), diversos estudos foram publicados sobre o tema. Sampaio, Araújo e Sampaio (2005) dividiram esses estudos em quatro grupos. No primeiro grupo, os autores relacionaram os trabalhos que tratam apenas da identificação de áreas desertificadas ou em processo de desertificação; no segundo grupo, os estudos que têm discutido o conceito de desertificação e seus possíveis indicadores; no terceiro grupo, os trabalhos que têm tratado das características da desertificação nos núcleos ou em outras áreas específicas; já o quarto grupo se refere aos trabalhos que tratam nominalmente a desertificação. Há uma vasta literatura sobre secas e seus efeitos e sobre diferentes formas de degradação das terras no semiárido nordestino que não relacionou seus temas à desertificação, embora a ligação possa ser feita. A maior parte dos trabalhos sobre secas trata da queda na produção agrícola e das suas consequências econômicas e sociais (DUARTE, 2002), deixando de lado a degradação ambiental.

Mais recentemente, muitos trabalhos têm focado o uso de alternativas para recuperação de áreas degradadas. Ferreira *et al.* (2016) destacaram a importância da adubação verde nessa recuperação. Por sua vez, Nascimento (2015), estudando a recuperação de uma área degradada pela mineração, verificou lenta revegetação natural, destacando a necessidade de alternativas mais efetivas e de baixo custo. Todos esses trabalhos colaboram na busca de soluções que atendam as demandas de recuperação de áreas degradadas, a fim de mitigar seus efeitos para a população e atingir os objetivos da Convenção das Nações Unidas para o Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos das Secas.

Nesse sentido, segundo Sampaio *et al.* (2005), a utilização do lodo de esgoto para a recuperação de áreas degradadas já se mostrou uma prática promissora, pois, além do incremento na fertilidade, proporciona aumento na agregação e porosidade do solo conforme o aumento das doses de lodo. Portanto, a utilização de água residuária proveniente de estações de tratamento de esgoto doméstico tem atraído a atenção de pesquisadores por ser uma prática que, além de fornecer benefícios similares aos do lodo de esgoto para a recuperação de áreas, apresenta diversas vantagens para o meio ambiente, como o suprimento hídrico, gerando economia de água e fertilizantes, uma vez que promove o reúso sustentável da água, proporcionando o aproveitamento dos nutrientes.

3 Método da pesquisa

O estudo foi conduzido em área experimental localizada nas imediações da sede do Instituto Nacional do Semiárido (INSA), em Campina Grande – PB (7°15'11"S a 7°15'13"S e 35°56'49"W a 35°56'51"W), com dimensões de 60 m de largura por 60 m de comprimento, totalizando 3.600 m².

A região é caracterizada por um clima quente e úmido, com regime pluviométrico irregular e longo período de estiagem, classificado como As' de acordo com a classificação de Köppen. A temperatura do ar varia entre a máxima anual de 28,6 °C e a mínima de 19,5 °C, e a umidade relativa do ar é de, em média, 80% (MARTINS, 2017).

O relevo da área de estudo é suave ondulado, e o solo corresponde a um Planossolo Nátrico na classificação do Ministério da Agricultura (JACOMINE *et al.*, 1972), com histórico de utilização como área de empréstimo para retirada de solo; foi classificado como

Antropossolo Decapítico de acordo com a proposta de Curcio, Lima e Giarola (2004).

Atualmente, a área tem sido cultivada com as seguintes espécies florestais: aroeira (*Astronium urundeuva* Allemão/Engl.), braúna (*Schinopsis brasiliensis* Engl.), catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul.), freijó (*Cordia trichotoma* Vell.) e ipê roxo (*Handroanthus impetiginosus* Mart.).

3.1 Caracterização da água residuária

A água residuária utilizada na irrigação do experimento foi obtida da estação de tratamento do esgoto proveniente de banheiros e cozinha do INSA. Foi realizada caracterização química da água quanto ao pH, condutividade elétrica (CE), nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e sódio, de acordo com metodologia-padrão para águas residuárias (APHA, 2012).

3.2 Delineamento experimental

O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados em esquema de parcelas subdivididas, constituído por quatro blocos com cinco parcelas – correspondentes às espécies florestais – e três tratamentos – correspondentes aos tipos e volumes de água utilizados: aplicação de lâmina de 7 L por semana de água de abastecimento, 7 L por semana de água residuária tratada e 14 L por semana de água residuária tratada. Em todos os tratamentos, a irrigação foi realizada por gotejamento, aplicada a uma distância de 10 cm do caule das plantas.

3.3 Caracterização inicial do solo

A amostragem de solo foi realizada com o auxílio de um cavador, por se tratar de uma área com muita pedregosidade. Para caracterização química e física inicial da área, foram definidos 80 pontos amostrais e retiradas amostras de solo nas camadas de 0 cm a 15 cm e de 15 cm a 30 cm de profundidade no ano de 2012, antes da implantação dos tratamentos. O solo coletado foi seco e peneirado em malha de 2 mm e analisado quanto aos seguintes atributos químicos: pH, nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, sódio, alumínio e acidez potencial (H+Al) (Tabela 1), conforme metodologia de Teixeira *et al.* (2017), enquanto a matéria orgânica do solo (MOS) foi analisada pelo método de ignição em mufla a 550 °C (SCHULTE; PETERS; HODGSON, 1987) e a granulometria (Tabela 1), de acordo com metodologia da Embrapa (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

Tabela 1 – Atributos físico-químicos do solo

Atributos químicos			
Componente		0 – 15 cm	15 – 30 cm
pH	H ₂ O	5,90	6,00
MO	g kg ⁻¹	3,01	3,12
N	g kg ⁻¹	0,60	0,50
P	mg dm ⁻³	2,33	0,65
K	mg dm ⁻³	54,6	46,8
Ca	cmol _c kg ⁻¹	1,52	1,67
Mg	cmol _c kg ⁻¹	0,22	0,18
Na	cmol _c kg ⁻¹	0,51	0,50
Al	cmol _c kg ⁻¹	0,25	0,25
H+Al	cmol _c kg ⁻¹	26,4	26,9
Granulometria			
Fração		0 – 15 cm	15 – 30 cm
Areia	g kg ⁻¹	716	707
Silte	g kg ⁻¹	150	146
Argila	g kg ⁻¹	134	147

MO: matéria orgânica; **N:** nitrogênio; **P:** fósforo; **K:** potássio; **Ca:** cálcio; **Mg:** magnésio; **Na:** sódio; **Al:** alumínio; **H+Al:** acidez potencial.

Fonte: Dados da pesquisa

3.4 Caracterização final do solo

Dois anos após a implantação dos tratamentos, foi realizada nova amostragem de solo, seguindo o mesmo procedimento adotado na amostragem inicial. Nessa nova amostragem, foram coletados 10 pontos em cada linha correspondente aos tratamentos, retirando-se amostras de solo em duas profundidades, 0 cm a 15 cm e 15 cm a 30 cm, distanciadas 30 cm do caule das plantas, totalizando 30 pontos por bloco.

O solo coletado foi seco e peneirado em malha de 2 mm e analisado conforme os mesmos métodos da caracterização inicial.

3.5 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos a análise de variância pelo teste F, e as médias foram comparadas por contrastes ortogonais ao nível máximo de significância de 0,05 de probabilidade, utilizando o pacote estatístico R (THE R CORE TEAM, 2018). Em seguida, foi realizada análise de componentes principais (ACP) para verificar as interrelações entre os atributos químicos nos tratamentos avaliados e na condição inicial do solo.

4 Resultados da pesquisa

4.1 Qualidade da água e aporte de nutrientes ao solo

A caracterização química da água de abastecimento e da água residuária utilizadas no experimento encontra-se na Tabela 2. Pode-se observar que, do ponto de vista da adequabilidade das águas para uso na irrigação, tanto a água de abastecimento quanto a água residuária apresentaram restrição de uso devido a problemas relacionados à salinidade. Por apresentarem CE entre 0,7 dS m⁻¹ e 3,0 dS m⁻¹, de acordo com classificação de Ayers e Westcot (1999), ambos os tipos de água utilizados apresentaram adequabilidade de ligeira a moderada. Entretanto, vale salientar que essa classificação não corresponde às condições específicas de solos degradados em região semiárida, apenas sendo usada como parâmetro para gerenciar o risco de contaminação do solo, pelo fato de não existir uma classificação mais adequada para o semiárido brasileiro.

Tabela 2 – Caracterização química da água de abastecimento e da água residuária tratada utilizadas na irrigação da área experimental

Atributo		Água	
		Abastecimento	Residuária
pH	-	7,5	8,3
CE	dS m ⁻¹	0,79	1,35
COT	mg L ⁻¹	1,72	3,7
N	mg L ⁻¹	0,28	26,3
NH ₄ ⁺	mg L ⁻¹	-	22,3
NO ₂ ³⁻	mg L ⁻¹	-	4,5
P	mg L ⁻¹	1,68	14
PO ₄ ³⁻	mg L ⁻¹	-	9,4
K ⁺	mg L ⁻¹	5,4	27,6
Ca ²⁺	mg L ⁻¹	11,2	24,5
Mg ²⁺	mg L ⁻¹	6,4	10,7
SO ₄ ³⁻	mg L ⁻¹	-	51,9
Na ⁺	mg L ⁻¹	9,1	22,3
Cl ⁻	mg L ⁻¹	178	270
RAS	mmol L ⁻¹	3,06	5,31

CE: condutividade elétrica; **COT:** carbono orgânico total; **N:** nitrogênio; **NH₄⁺:** amônio; **NO₂³⁻:** nitrito; **P:** fósforo; **PO₄³⁻:** fosfato; **K⁺:** potássio; **Ca²⁺:** cálcio; **Mg²⁺:** magnésio; **SO₄³⁻:** sulfato; **Na⁺:** sódio; **Cl⁻:** cloro; **RAS:** razão de adsorção de sódio.

Fonte: Dados da pesquisa

O pH de ambos os tipos de água utilizados apresentou faixa normal, equivalente a pH entre 6,5 e 8,4, pela classificação de Ayers e Westcot (1999) (Tabela 2). Nessa faixa de pH, a concentração de H⁺ e OH⁻, contida nas águas de irrigação, exerce menor influência na disponibilidade e absorção de nutrientes pelas plantas, nas propriedades do solo e nos sistemas de irrigação.

No que se refere à toxicidade de íons específicos, a concentração de sódio não apresentou restrição para uso em nenhum dos tipos de água: em ambos, a concentração desse elemento foi inferior a 69 mg L⁻¹, valor a partir do qual a água já apresentaria grau de restrição para a irrigação. A concentração de cloreto, em ambas as águas, apresentou grau de restrição ligeira a moderada, correspondente a teores de cloro entre 142 mg L⁻¹ e 355 mg L⁻¹.

O aporte de nutrientes ao solo feito via irrigação com água residuária (Tabela 3) foi superior ao feito com água de abastecimento, em virtude dos teores de nutrientes mais elevados presentes naquela, como pode ser visto na Tabela 4. Vale ressaltar que a composição e o tipo de tratamento da água residuária tratada são fatores determinantes para o aporte de quantidades expressivas de nutrientes pela irrigação com esse tipo de água.

Tabela 3 – Aporte de nutrientes ao solo em dois anos de irrigação com água residuária

Atributo		Tratamento		
		AA	AR7	AR14
MO	g m ⁻³	20,2	65,7	131
N	g m ⁻³	2,90	270	541
P	g m ⁻³	17,3	144	288
K ⁺	g m ⁻³	55,6	284	568
Ca ²⁺	g m ⁻³	115	252	504
Mg ²⁺	g m ⁻³	65,9	110	220
Na ⁺	g m ⁻³	93,7	229	459

MO: matéria orgânica; **N:** nitrogênio; **P:** fósforo; **K:** potássio; **Ca:** cálcio; **Mg:** magnésio; **Na:** sódio; **AA:** 7 L por semana de água de abastecimento; **AR7:** 7 L por semana de água residuária tratada; **AR14:** 14 L por semana de água residuária tratada.

Fonte: Dados da pesquisa

4.2 Efeito nos atributos químicos do solo

O pH do solo não diferiu entre os tratamentos irrigados com água de abastecimento e com água residuária quando utilizada a lâmina de 7 L semana⁻¹. No entanto, quando se utilizou a lâmina de 14 L semana⁻¹ de água residuária, houve diferença significativa ($p < 0,05$), com valores inferiores nesse tratamento (Tabela 4). Em relação à condição inicial, esse tratamento proporcionou ligeira acidificação do solo pela redução do pH, enquanto o tratamento com água de abastecimento elevou sensivelmente os valores de pH em ambas as profundidades avaliadas.

Tabela 4 – Contrastes ortogonais e médias de atributos químicos em um solo degradado irrigado com água de abastecimento e com água residuária em região semiárida

Atributo	Tratamentos		
	AA;AR7	AA;AR14	AR7;AR14
0 – 15 cm			
pH	6,11;5,98 ^{ns}	6,11;5,58*	5,98;5,58*
MO	2,66;7,84 _*	2,66;14,66**	7,84;14,66**
P	2,32;4,82**	2,32;9,48**	4,82;9,48**
PO	6,64;19,23*	6,62;36,66**	19,23;36,66**
15 – 30 cm			
pH	6,11;6,04 ^{ns}	6,11;5,66*	6,04;5,66*
MO	1,37;6,26**	1,37;11,29**	6,26;11,29*
P	1,57;2,93*	1,57;4,60**	2,93;4,60*
PO	3,43;15,65*	3,43;28,21**	15,65;28,21*

pH: potencial hidrogeniônico; **MO:** matéria orgânica; **P:** fósforo; **PO:** fósforo orgânico. **AA:** 7 L por semana de água de abastecimento; **AR7:** 7 L por semana de água residuária tratada; **AR14:** 14 L por semana de água residuária tratada; **ns:** não significativo; ****:** significativo a 1%; *****: significativo a 5%.

Fonte: Dados da pesquisa

A irrigação com água residuária proporcionou aumento significativo ($p < 0,05$) nos teores de matéria orgânica e fósforo em todas as camadas avaliadas, em comparação com a irrigação com água de abastecimento (Tabela 4). Na profundidade de 0 cm a 15 cm, os teores de matéria orgânica no solo, quando da aplicação de lâmina de 14 L, foram até 5 vezes superiores em relação à aplicação da água de abastecimento; já na profundidade de 15 cm a 30 cm, essa diferença foi ainda maior, com valores até 8 vezes superiores.

O incremento dos teores de MOS aumenta a capacidade de retenção e armazenamento de água e nutrientes como P e N, elevando ainda a capacidade de troca de cátions, que auxilia na retenção de K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} . Apesar de a matéria orgânica contida na água residuária de origem doméstica geralmente apresentar concentrações relativamente baixas, com irrigação frequente, ocorre o aporte de elevadas quantidades de MOS. Medeiros *et al.* (2005) relataram influência da MOS sobre propriedades físicas do solo como estrutura e estabilidade dos agregados, aeração, drenagem e retenção de água.

Os teores de P Mehlich⁻¹ no solo na camada superficial (0 cm a 15 cm) quando irrigado com AR foram até 4 vezes superiores aos do solo irrigado com AA, com diferença menor na camada de 15 cm a 30 cm, cujos teores foram 3 vezes superiores aos resultados com AA. Em relação aos teores de P orgânico, a diferença foi ainda maior entre os tratamentos, da ordem de 6 a 8 vezes superiores no solo irrigado com 14 L de AR em relação ao solo irrigado com AA. A irrigação com AA reduziu os teores de P em ambas as profundidades devido à ausência ou baixo teor desse nutriente na AA.

O aumento significativo dos teores de P após a aplicação de AR também foi observado por outros autores que estudaram as características químicas de solos cultivados irrigados com água residuária (ANAMI *et al.*, 2008). É importante destacar a ocorrência do aumento dos teores de P na camada subsuperficial: os valores médios observados na amostragem inicial passaram de 0,65 mg kg⁻¹ para até 4,61 mg kg⁻¹ na camada de 15 cm a 30 cm de profundidade após a aplicação de água residuária. Essa condição não era esperada, uma vez que o P é considerado um ânion relativamente imóvel em solos e interage com a fase sólida formando precipitados com Ca, Fe e Al, reduzindo sua mobilidade, principalmente em solos com maiores teores de argila (OLATUYI *et al.*, 2009).

Nesse sentido, o deslocamento vertical de P em solos com textura arenosa a franco-arenosa tem sido relatado na literatura (ANAMI *et al.*, 2008). Em casos em que a fonte de P é um fertilizante líquido ou quando é aplicado via fertirrigação por gotejamento, esse deslocamento é ainda mais acentuado do que quando o adubo é aplicado ao solo na forma sólida. O aumento na concentração desse nutriente em camadas subsuperficiais tem sido relatado em solos de textura arenosa até os 50 cm de profundidade, em colunas de lixiviação (AZEVEDO *et al.*, 2018).

Devido à menor capacidade de adsorção de P em solos de textura arenosa, ocorre um maior transporte vertical do P, considerado inexistente em solos argilosos, devido a sua alta afinidade com os colóides do solo. Dessa forma, em solos arenosos, o aporte de P no solo via irrigação por água residuária proporciona o aumento das concentrações do P disponível, tanto em camadas superficiais como em subsuperficiais.

Portanto, o aumento nos teores de fósforo constatado no presente estudo certamente está associado à textura do solo, mais arenosa, que permitiu a movimentação vertical do P adsorvido aplicado na camada superficial para as camadas subsuperficiais. A capacidade do solo de reter P contribui para prevenir a lixiviação do P abaixo da zona radicular, podendo determinar a sustentabilidade dos cultivos em que se utilize água residuária na irrigação. Todavia, na aplicação de águas residuárias ao solo, é assumido que o P é altamente retido no solo, mas estudos demonstram aumento na concentração de P nas camadas mais profundas, embora muitas vezes esses incrementos do P na solução sejam pouco significativos.

4.3 Análise de componentes principais

A análise de componentes principais das propriedades químicas do solo submetido aos tratamentos com água de abastecimento e com água residuária em duas profundidades encontra-se na Tabela 5 (na página seguinte). A primeira componente principal (CP1) apresentou correlação positiva com os atributos MOS, P e P orgânico, enquanto a segunda componente principal (CP2) apresentou correlação elevada com o atributo pH. As componentes principais 1 e 2 explicaram 93,5% da variância acumulada na profundidade de 0 cm a 15 cm: os atributos MOS, P e P orgânico apresentaram comportamentos semelhantes, aumentando em função do tratamento com aplicação de 14 L semana⁻¹ de AR; por outro lado, o pH apresentou valores mais elevados na condição inicial e na irrigação com água de abastecimento (Figura 1). Do mesmo modo, na profundidade de 15 cm a 30 cm, as componentes principais 1 e 2 explicaram 91,3% da variância acumulada, gerando agrupamento semelhante ao da profundidade de 0 cm a 15 cm.

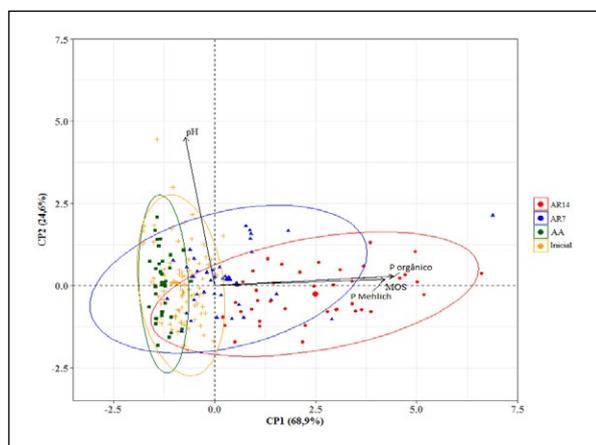
Tabela 5 – Autovetores dos componentes principais de atributos químicos de um Antropossolo Decápítico com aplicação de água residuária tratada

Variável	CP 1	CP 2
0 – 15 cm		
P	0,556	0,040
PO	0,585	0,063
MO	0,581	0,061
pH	-0,096	0,995
Ve (%)	68,9	24,6
Va (%)	68,9	93,5
15 – 30 cm		
P	0,544	-0,023
PO	0,592	0,124
MO	0,577	0,128
pH	-0,137	0,983
Ve (%)	66,9	24,4
Va (%)	66,9	91,3

pH: potencial hidrogeniônico; MO: matéria orgânica;
P: fósforo; PO: fósforo orgânico; Ve: variância
estimada; Va: variância acumulada.

Fonte: Dados da pesquisa

Figura 1 – Análise de componentes principais para atributos químicos de um Antropossolo Decápítico com aplicação semanal de 7 L de água de abastecimento (AA) e 7 L (AR7) e 14 L (AR14) de água residuária tratada



Fonte: Elaborada pelos autores

Os atributos MOS, P e P orgânico apresentaram correlação positiva entre si e correlação negativa com o pH na CP1, indicando que, à medida que aumentam os teores desses atributos, há uma diminuição no pH do solo (Figura 1). Por meio dos vetores que indicam o sentido do aumento dos valores das variáveis

estudadas que apresentam maior representatividade, é possível visualizar o sentido do aumento dos teores dos atributos nos diferentes tratamentos. Dessa forma, observa-se que a irrigação com água de abastecimento apresentou grande semelhança com a condição inicial e que os tratamentos com água residuária com 7 L semana¹ e 14 L semana¹ promovem aumento dos teores de MOS, P e P orgânico e redução do pH.

Bonini, Alves e Montanari (2015) evidenciaram que a aplicação de efluentes de esgoto pode acidificar ligeiramente o solo, sendo essa acidificação atribuída às reações de nitrificação do NH₄⁺. Entretanto, a possibilidade de alteração do pH no solo é reduzida à medida que aumentam os teores de MOS no solo, que apresenta capacidade de tamponamento, reduzindo a possibilidade de acidificação do solo. Falkiner e Smith (1997) observaram aumento no valor de pH de solos irrigados com água residuária por longos períodos e diminuição do teor de Al trocável, devido ao aumento dos cátions trocáveis no solo.

5 Conclusão

A irrigação com água residuária tratada pode proporcionar o aumento dos teores de matéria orgânica e de fósforo no solo até os 30 cm de profundidade.

Por promover o aumento dos teores de matéria orgânica e de fósforo no solo, a utilização de água residuária tratada pode ser considerada uma alternativa para a recuperação da capacidade produtiva de solos degradados na região semiárida.

REFERÊNCIAS

ANAMI, M. H.; SAMPAIO, S. C.; SUSZEK, M.; GOMES, S. D.; QUEIROZ, M. M. F. Deslocamento miscível de nitrato e fosfato proveniente de água residuária da suinocultura em colunas de solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 1, p. 75-80, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000100011>.

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. Washington, D.C.: APHA, 2012. 406 p.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **A qualidade da água na agricultura**. 2. ed. Campina Grande: UFPB, 1999. 153 p.

AZEVEDO, R. P.; SALCEDO, I. H.; LIMA, P. A.; FRAGA, V. S.; LANA, R. M. Q. Mobility of phosphorus from organic and inorganic source materials in a sandy soil. **International Journal of Recycling of**

Organic Waste in Agriculture, v. 7, p. 153-163, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40093-018-0201-2>.

BECERRA-CASTRO, C.; LOPES, A. R.; VAZ-MOREIRA, I.; SILVA, E. F.; MANAIA, C. M.; NUNES, O. C. Wastewater reuse in irrigation: A microbiological perspective on implications in soil fertility and human and environmental health. **Environment International**, v. 75, p. 117-135, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.001>.

BONINI, C. S. B.; ALVES, M. C.; MONTANARI, R. Lodo de esgoto e adubação mineral na recuperação de atributos químicos de solo degradado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 4, p. 388-393, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n4p388-393>.

CARVALHO, R. S.; SANTOS FILHO, J. S.; SANTANA, L. O. G.; GOMES, D. A.; MENDONÇA, L. C.; FACCIOLI, G. G. Influência do reúso de águas residuárias na qualidade microbiológica do girassol destinado à alimentação animal. **Ambiente & Água**, v. 8, n. 2, p. 157-167, 2013. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1116>.

CURCIO, G. R.; LIMA, V. C.; GIAROLA, N. F. B. **Antropossolos**: proposta de ordem (1ª aproximação). Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2004. 148 p.

DOETTERL, S.; BERHE, A. A.; NADEU, E.; WANG, Z.; SOMMER, M.; FIENER, P. Erosion, deposition and soil carbon: A review of process-level controls, experimental tools and models to address C cycling in dynamic landscapes. **Earth-Science Reviews**, v. 154, p. 102-122, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.12.005>.

DUARTE, R. (org.). **Do desastre natural à calamidade pública**: a seca de 1998-1999. Fortaleza: BNB; Recife: Fundação Joaquim Nabuco, 2002. 144 p.

FALKNER, R. A.; SMITH, C. J. Changes in soil chemistry in an effluent-irrigated *Pinus radiata* and *Eucalyptus grandis* plantation. **Australian Journal of Soil Research**, v. 35, p. 131-147, 1997. Disponível em: <http://hdl.handle.net/102.100.100/223496?index=1>. Acesso em: 23 jun. 2020.

FERREIRA, E. M.; ANDRAUS, M. P.; CARDOSO, A. A.; COSTA, L. F. S.; LÔBO, L. M.; LEANDRO, W. M. Recuperação de áreas degradadas, adubação verde e qualidade da água. **Revista Monografias Ambientais**, v. 15, n. 1, p. 228-246, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5902/2236130819594>.

GALVÃO, S. R. S.; SALCEDO, I. H. Soil phosphorus fractions in sandy soils amended with cattle manure

for long periods. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 3, p. 613-622, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832009000300014>.

JACOMINE, P. K. T.; RIBEIRO, M. R.; MONTENEGRO, J. O.; SILVA, A. P.; MELO FILHO, H. F. R. **Levantamento Exploratório – Reconhecimento de Solos do Estado da Paraíba**. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura; Sudene, 1972. 670 p. (Boletim Técnico nº 15; Série Pedologia nº 8).

KLEIN, C.; AGNE, S. A. A. Fósforo: de nutriente à poluente! **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 8, n. 8, p. 1713-1721, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/223611706430>.

MARTINS, E. L. **Variabilidade Espacial de Atributos Físicos e Químicos de um Antropossolo Decapítico com Aplicação de Água Residuária Tratada**. 2017. 82 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal da Paraíba, Areia, PB, 2017.

MEDEIROS, S. S.; SOARES, A. A.; FERREIRA, P. A.; SOUZA, J. A. A.; SOUZA, J. A.; MATOS, A. T. Comportamento dos atributos químicos do solo em resposta à aplicação de água residuária de origem doméstica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, (suplemento), p. 268-273, 2005. Disponível em: http://www.agriambi.com.br/revista/suplemento/index_arquivos/PDF/268.pdf. Acesso em: 23 jun. 2020.

NASCIMENTO, A. R. V. J. **Atributos físicos e químicos de áreas degradadas pela mineração de scheelita na região tropical semiárida**. 2015. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

OLATUYI, S. O.; AKINREMI, O. O.; FLATEN, D. N.; CROW, G. H. Accompanying cations and anions affect the diffusive transport of phosphate in a model calcareous soil system. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 89, n. 2, p. 179-188, 2009. DOI: <https://doi.org/10.4141/CJSS07118>.

SALCEDO, I. H.; SAMPAIO, E. V. S. B. Matéria orgânica do solo no bioma caatinga. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. O. (ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo**: ecossistemas tropicais e subtropicais. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 419-441.

SAMPAIO, E. V. S. B.; ARAÚJO, M. S. B.; SAMPAIO, Y. S. B. Impactos ambientais da agricultura no processo de desertificação no Nordeste do Brasil. **Revista de**

Geografia, v. 22, n. 1, p. 93-117, 2005. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/view/228637/23060>. Acesso em: 23 jun. 2020.

SANTOS, I. M.; TAVARES, V. M.; MEYER, M. F. Avaliação de viabilidade ambiental, técnica e econômica da atividade de extração de cascalho no município de Arês – RN. *In*: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 2., 2015, Fortaleza. **Anais** [...]. Fortaleza: CONFEA, 2015. v.1, p. 514-522.

SCHULTE, E. E.; PETERS, J. B.; HODGSON, P. R. (ed.). **Wisconsin procedures for soil testing, plant analysis and feed & forage analysis**. Madison, WI: University of Wisconsin-Extension, Department of Soil Science, 1987. 9 p. (Soil Fertility Series, 6).

SOARES, D. B.; NÓBREGA, R. S.; MOTA FILHO, F. O.; PASSOS, C. R. F.; BORGES FILHO, E. F. A. Degradação dos solos por sais em Pernambuco, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 5, p. 1621-1628, 2016. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.5.p1621-1628>.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.

THE R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**: Reference Index. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2018. Disponível em: <https://cran.r-project.org/doc/manuals/r-release/fullrefman.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2020.

VASCONCELOS SOBRINHO, J. **Metodologia para identificação dos processos de desertificação**: manual de indicadores. Recife: Sudene, 1978. 18 p.