

Utilização do lodo de esgoto na agricultura: uma análise cienciométrica

Use of sewage sludge in agriculture: a scientometric analysis

Juliana Caroni Silva Guimarães

Fundação Comunitária de Ensino Superior de Itabira, Brasil

E-mail: julianacaroni@yahoo.com.br

Juni Cordeiro

Fundação Comunitária de Ensino Superior de Itabira, Brasil

E-mail: juni.cordeiro@funcesi.br

Diego Carlos Ferreira Rosa Vitorino

Fundação Comunitária de Ensino Superior de Itabira, Brasil

E-mail: diegocarlosrosa@yahoo.com.br

Recebido: 15/05/2018 – Aceito: 28/05/2018

Resumo

O lodo de esgoto é rico em matéria orgânica e nutrientes que podem favorecer as propriedades físico-químicas dos solos e o desenvolvimento de culturas. Entretanto, a concentração de microrganismos patogênicos, elementos-traço e poluentes orgânicos persistentes são fatores limitantes para a aplicação deste material no solo. Este trabalho objetivou verificar a evolução da publicação de artigos sobre o uso agrícola do lodo de esgoto, entre os anos de 1980 a 2017. Para isso, foi realizada uma pesquisa de artigos científicos indexados no banco de dados *Web of Science* relacionados ao tema, sendo encontrados 1.166 artigos. Os resultados obtidos mostram que houve um aumento gradativo do número de publicações entre as décadas. Dentre os países que mais publicaram sobre o tema destacam-se os Estados Unidos, Espanha e Brasil. Verificou-se nos artigos que tratavam da presença de poluentes que 35,5% apresentaram informações sobre os elementos-traço; 13,7% acerca dos patógenos; 15% sobre os poluentes orgânicos; enquanto 27% abordavam os nutrientes, com destaque para o fósforo, nitrogênio e potássio. Com relação às culturas, as mais mencionadas foram os cereais, destacando-se o milho. A partir dos dados analisados foi possível observar o aumento no percentual de publicações ao longo dos anos sobre o tema, o que sugere uma preocupação cada vez maior com a destinação do lodo, contudo, a presença de poluentes ainda representa um desafio para seu uso agrícola, devendo, por isso, ser submetido a tratamentos para reduzir

sua carga poluidora e ser utilizado cautelosamente de acordo com o estabelecido pela legislação.

Palavras-chave: Lodo de Águas Residuárias; Lodo de Efluentes; Uso agrícola.

Abstract

Sewage sludge is rich in organic matter and nutrients that can favor soil physico-chemical properties and crop development. However, the concentration of pathogenic microorganisms, trace elements and persistent organic pollutants are limiting factors for the application of this material to soil. This work aimed to verify the evolution of the publication of articles on the agricultural use of sewage sludge, between the years of 1980 and 2017. For this, a research of scientific articles indexed in the Web of Science database related to the subject was carried out found 1,166 articles. The results show that there has been a gradual increase in the number of publications between the decades. Among the countries that most published on the subject stand out the United States, Spain and Brazil. The articles dealing with the presence of pollutants showed that 35.5% had information about trace elements; 13.7% on pathogens; 15% on organic pollutants; while 27% approached nutrients, with emphasis on phosphorus, nitrogen and potassium. Regarding crops, the most mentioned were cereals, especially corn. From the analysis of data it was possible to observe the increase in the percentage of publications over the years on the subject, which suggests an increasing concern with the destination of the sludge, however, the presence of pollutants still represents a challenge for its use and should therefore be subjected to treatments to reduce its pollutant load and be used cautiously in accordance with the legislation.

Keywords: Wastewater Sludge; Effluent Sludge; Agricultural use.

1. Introdução

O tratamento de águas residuárias é indispensável para manter a sanidade ambiental e evitar a disseminação de doenças, entretanto, durante esse processo é gerado um subproduto denominado lodo de esgoto, cuja disposição final tem se tornado um grande problema, uma vez que seu volume aumenta conforme cresce o número de pessoas que têm acesso ao esgotamento sanitário.

Segundo Bettiol e Camargo (2006), dentre as diversas opções de disposição final do lodo, a agricultura tem se mostrado a mais conveniente, visto que o lodo é um insumo rico em matéria orgânica e nutrientes para as plantas e para o solo. Por outro lado, a presença de

elementos-traço, microrganismos patogênicos, poluentes orgânicos e até mesmo os nutrientes, se tornam fatores limitantes para a sua destinação agrícola, posto que podem causar danos à saúde, contaminação do meio ambiente e até mesmo perda de produção das culturas (TSUTIYA *et al.*, 2002).

Diante disso, antes de sua disposição final, o lodo deve ser submetido a tratamentos com o intuito de diminuir sua carga de poluentes e patógenos, a fim de evitar a contaminação do meio ambiente e problemas à saúde pública. Dentre as principais etapas de tratamento, von Sperling (2005) destaca o adensamento, a estabilização, o condicionamento, o desaguamento e a higienização.

Assim, este trabalho visou avaliar a evolução espaço-temporal da publicação de trabalhos abordando a disposição final do lodo de esgoto na agricultura, entre os anos de 1980 e 2017 com base em uma análise ciênciométrica dos artigos obtidos no banco de dados *Web of Science*.

2. Metodologia

Para esta investigação foi utilizada a pesquisa descritiva que, de acordo com Cervo *et al.* (2007), tem como objetivo descrever e caracterizar a periodicidade de um dado fenômeno, assim como seu comportamento diante de outros eventos e suas propriedades, tendo em vista o menor índice de erros possível.

Como método de pesquisa foi utilizada a ciênciometria que, conforme Chapula (1998), é um segmento sociológico da ciência que estuda os fenômenos por meio de métodos quantitativos, sendo utilizada como base para o desenvolvimento de políticas científicas. Atualmente a ciênciometria possui grande relevância no meio acadêmico e vem sendo amplamente utilizada para mensurar o conhecimento científico (VANTI, 2002).

Nesta pesquisa foram utilizadas a abordagens quantitativa e qualitativa. De acordo com Prodanov e Freitas (2013), a pesquisa quantitativa pode ser definida como o método que utiliza a estatística para explorar informações e desta forma, compreendê-las por meio de números. Além disso, visa examinar numericamente variáveis predefinidas para estudar sua influência sobre outras variáveis de forma generalizada (APPOLINÁRIO, 2009). Já segundo Kauark *et al.* (2010), a pesquisa qualitativa conjectura uma relação dinâmica entre o abstrato e fatos que não podem ser compreendidos por meio de números. Assim, a pesquisa qualitativa se propõe a entender o fenômeno com maior profundidade, com o objetivo de descrever e

comparar as variáveis do estudo sem a utilização de técnicas estatísticas (BOTELHO; CRUZ, 2013).

A coleta de dados foi realizada por meio da pesquisa documental a partir das planilhas que foram geradas pela pesquisa de palavras-chave realizada no banco de dados *Web of Science*. As palavras selecionadas para esta busca foram “*waste water sludge*” (lodo de águas residuais) AND “*agriculture*” (agricultura) OR “*sewage sludge*” (lodo de esgoto) AND “*agriculture*” OR “*effluents sludge*” (lodo de efluentes) AND “*agriculture*”. A busca foi feita em inglês, pois este é o idioma predominante no meio científico, o que possibilitou encontrar 1.166 artigos com o tema relacionado à utilização do lodo de esgoto no meio agrícola, que correspondem à amostra desta pesquisa.

Com relação ao tratamento dos dados, foram utilizadas as estatísticas descritiva e inferencial. A estatística descritiva tem como objetivo agrupar as informações coletadas de forma resumida para que as análises estatísticas possam ser realizadas de forma eficiente (PEROVANO, 2016). Por sua vez, de acordo com Correa (2003), a inferência estatística corresponde à associação de técnicas e procedimentos que possibilitam ao pesquisador o alcance de um grau de confiabilidade nas afirmações que realiza para a população, baseadas nos resultados observados nas amostras.

Desta forma, a estatística descritiva foi utilizada neste estudo com o objetivo de descrever e quantificar as informações publicadas sobre o tema “lodo de esgoto na agricultura”, possibilitando examinar e comparar os dados obtidos, já a estatística inferencial foi empregada para verificar se ocorreu um aumento significativo do número de publicações de artigos entre os anos de 1980 e 2017 por meio de regressão polinomial ao nível de 5% de significância.

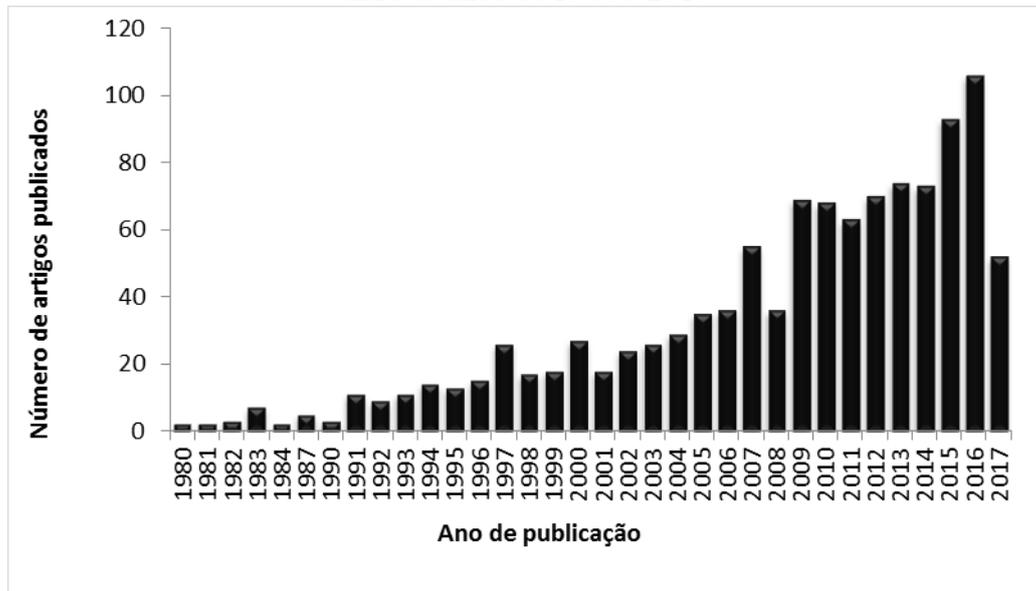
3. Resultados e discussão

Uma das consequências do crescimento demográfico nas últimas décadas foi o aumento do volume de esgoto produzido, principalmente nas grandes cidades. Como consequência há o aumento na produção do lodo que, segundo Nuvolari (2009) tem se tornado uma preocupação cada vez maior devido ao grande volume produzido. Assim, a destinação agrícola tem se mostrado a alternativa mais adequada, pois o lodo possui propriedades nutricionais e matéria orgânica que favorecem as culturas e o solo (BETTIOL; CAMARGO, 2006).

De acordo com Tsutiya *et al.* (2002), embora a escassez de informações científicas a respeito do uso agrícola do lodo possa gerar preconceito e pouca aceitação por parte dos agricultores e da população, verifica-se o aumento do número de publicações relacionadas às pesquisas sobre o uso do lodo na agricultura, demonstrando um aumento no investimento em estudos nesta temática.

Neste sentido, considerando a evolução espaço-temporal dos trabalhos publicados sobre a utilização do lodo de esgoto na agricultura é possível observar no Gráfico 1 um aumento gradativo das publicações de artigos científicos acerca do tema, a partir de 1980. Faz-se importante salientar que este ano foi delimitado pela disponibilidade de artigos presentes no banco de dados *Web of Science* e pelas palavras-chave utilizadas na pesquisa.

Gráfico 1 - Evolução dos artigos publicados sobre o uso agrícola do lodo de esgoto entre os anos de 1980 a 2017.

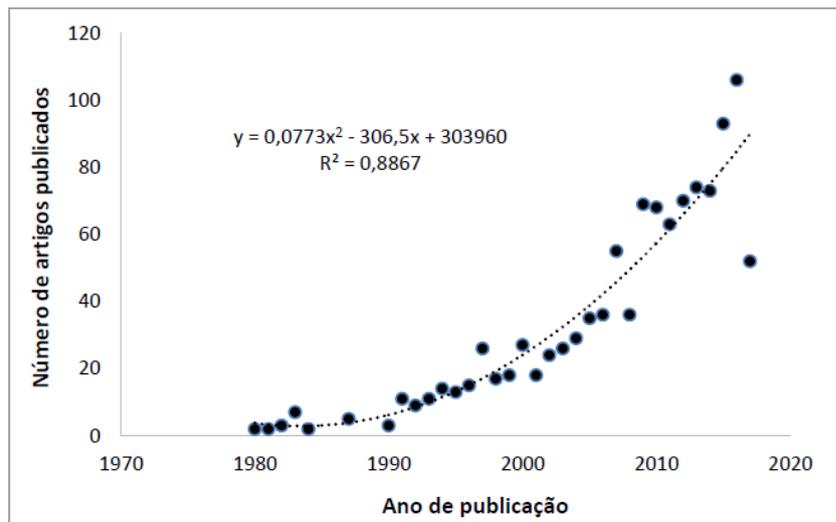


Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

Com base nos dados do Gráfico 1, é possível observar que o número de publicações aumentou ao longo das décadas. Assim, 2% dos artigos foram publicados entre os anos de 1980 a 1989 ($n=22$); 12% ($n=138$) entre 1990 e 1999; 30% ($n=348$) entre 2000 e 2009 e 56% dos artigos ($n=658$) foram publicados entre 2010 e 2017. É possível notar ainda que os anos de 2015, 2016 e 2017 correspondem àqueles com maior número de publicações, correspondendo a 102 artigos (8,7%), 106 artigos (9,1%) e 101 artigos (8,7%) respectivamente.

Considerando a hipótese de que ocorreu um aumento no número de artigos publicados após a proibição acerca do lançamento do lodo de esgoto nos oceanos foi averiguada por meio da regressão polinomial a relação entre o número de artigos publicados e o ano de publicação. Assim, verificou-se uma relação estatisticamente significativa ($y = 0,0773x^2 - 306,5x + 303960$; $R^2 = 0,8867$; $p < 0,01$), indicando que houve um aumento exponencial no número de artigos publicados, principalmente após o ano de 2009 (Gráf. 2).

Gráfico 2 - Número de artigos publicados entre os anos de 1980 e 2017



Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

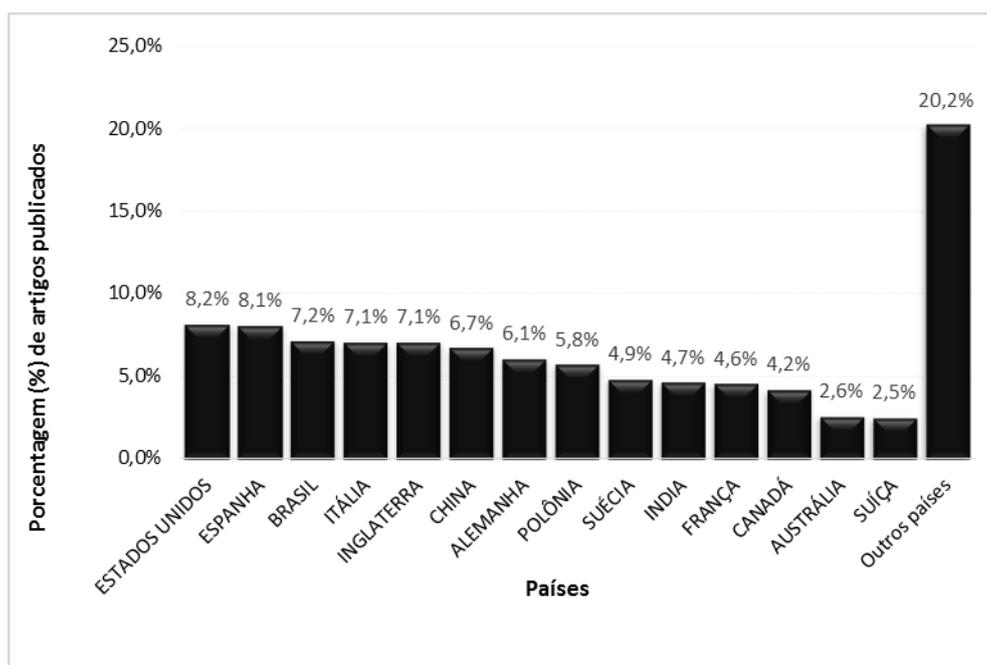
Um fator que pode ter influenciado o crescimento gradativo das publicações em relação ao uso do lodo na agricultura, foi a proibição de seu lançamento nos oceanos, em 1992 nos Estados Unidos e em 1998 na Europa (NUVOLARI, 2009). Dessa forma, a proibição do lançamento do lodo nos oceanos pode ter motivado a procura por outras formas de destinação, ocorrendo, conseqüentemente, aumento no número de pesquisas e artigos publicados acerca do uso agrícola do lodo.

3.1 Países com maior número de publicações acerca da utilização de lodo na agricultura

Foram analisados 1.166 artigos, provenientes de 72 países e publicados em 116 revistas científicas distintas. Dentre os países com maior número de publicações sobre o tema estudado, destacam-se os EUA com 8,2% do total e a Espanha com 8,1%. O Brasil publicou 7,2% dos artigos e em seguida a Itália e Inglaterra, ambas com 7,1% das publicações.

Destaca-se ainda que a China, Alemanha e Polônia publicaram entre 5 a 7% dos trabalhos; a Suécia, Índia, França e Canadá publicaram entre 4 e 5%; enquanto a Austrália e Suíça tiveram entre 2 e 3% de publicações. O Gráfico 3 apresenta a porcentagem dos artigos publicados por cada país, ressaltando-se que a categoria “outros países” foi inserida para representar os 58 países restantes que tiveram número de publicações inferiores a 2%, totalizando 20,2% dos artigos.

Gráfico 3 - Porcentagem de artigos publicados por países entre os anos de 1980 a 2017



Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

Com base no Gráfico 3, é possível observar que a soma do número de publicações dos países Europeus (Espanha, Itália, Inglaterra, Alemanha, Polônia, Suécia, França e Suíça) representa 46,2% dos artigos publicados. Tal fato pode ser justificado por se tratar de um continente que possui um conjunto de regulamentos e restrições agrícolas para o uso de agrotóxicos e adubação orgânica, que visam o bem-estar da população e a sustentabilidade da cadeia produtiva (UNIÃO EUROPEIA, 2002). Segundo Khai (2007), mais de 30% do lodo gerado nas estações de tratamento dos países do continente europeu são destinados à agricultura.

A Espanha foi o país da Europa que obteve o maior percentual, com 90 publicações (correspondendo a 8,1%). Neste país, em 2005, eram produzidos em média 1.120.000 toneladas de lodo de esgoto, dos quais, aproximadamente 65% já eram descartados no solo

(BARNETO *et al.*, 2009). Por outro lado, os EUA alcançaram o maior percentual de publicações entre os países citados, com 91 trabalhos (correspondendo a 8,2%). Segundo Erickson (2002), os EUA possuem um alto índice de investimento em pesquisas e desenvolvimento, o que pode justificar o maior número de publicação de artigos em relação aos outros países.

No Brasil, segundo Bettiol e Camargo (2006), o uso do lodo na agricultura não é uma prática difundida como em outros países, pois ainda são poucas as cidades que possuem Estação de Tratamento de Esgoto e, por isso, o volume de lodo produzido é menor. De acordo com o Instituto Trata Brasil (2017), no país, aproximadamente 42,7% do esgoto que é coletado, recebe tratamento, ou seja, mais da metade da população ainda não tem acesso ao esgotamento sanitário. Entretanto, o Brasil é um dos maiores exportadores de produtos agrícolas, ficando pouco atrás dos EUA no ranking mundial de produção de milho e de soja (ABBOUD, 2013). Este fato pode justificar a necessidade de busca por formas para aumentar a produção agrícola sem a utilização de fertilizantes sintéticos, visando a disposição adequada do lodo, quando sua produção aumentar, e a universalização do saneamento for atingida.

Com relação às publicações nas 116 revistas científicas, aquelas que apresentaram a maior porcentagem de publicações foram a *Water Science and Technology* com 6% e a *Science of the Total Environment* com 4%, enquanto as revistas *Environmental Science and Pollution Research*, *Bioresource Technology* e *Chemosphere* publicaram entre 2 e 3%.

A Tabela 1 apresenta a porcentagem de artigos publicados nas diferentes revistas citadas, com o tema relacionado à destinação agrícola do lodo de esgoto. O grupo “outras revistas” foi inserido para caracterizar as demais revistas que tiveram publicação de artigos inferior a 1%, totalizando, juntas, 63%.

Tabela 1 - Porcentagem de artigos publicados por revista científica

Revista	Porcentagem (%) de artigos publicados
WATER SCIENCE AND TECHNOLOGY	6%
SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	4%
ENVIRONMENTAL SCIENCE AND POLLUTION RESERACH	3%
BIORESOURCETECHNOLOGY	3%
CHEMOSPHERE	2%
COMMUNICATIONS IN SOIL SCIENCE AND PLANT ANALYSIS	2%
WASTE MANAGEMENT	2%
RESOURCES CONSERVATION AND RECYCLING	2%
ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY	2%
ECOLOGICAL ENGINEERING	1%
WATER RESEARCH	1%

WATER AIR AND SOIL POLLUTION	1%
JOURNAL OF ENVIRONMENTAL QUALITY	1%
ENVIRONMENTAL POLLUTION	1%
AGRICULTURE ECOSYSTEMS ENVIRONMENT	1%
(Continua)	
(Continuação)	
Revista	Porcentagem (%) de artigos publicados
ENVIRONMENTAL MONITORING AND ASSESSMENT	1%
REVISTA BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO	1%
JOURNAL OF SOILS AND SEDIMENTS	1%
JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT	1%
DESALINATION AND WATER TREATMENT	1%
OUTRAS REVISTAS	63%

Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

Percebe-se na Tabela 1 que o uso do lodo de esgoto como insumo agrícola é uma questão abordada em revistas de diversas áreas, tais como engenharia, agricultura, recursos hídricos, química, microbiologia, geologia, ciência dos materiais, combustível, ecologia, entre outras, o que indica a transdisciplinaridade e a importância do tema.

Destaca-se que a revista inglesa *Water Science and Technology* da área de recursos hídricos, publicou 74 artigos e a holandesa *Science of the Total Environment* da área do meio ambiente, publicou 46 artigos, representando assim, as revistas que mais publicaram acerca do tema estudado.

Neste sentido, o descarte do lodo gerado nas estações de tratamento de esgoto, tem sido alvo de pesquisas para que possa ser utilizado de forma sustentável. Contudo, o reaproveitamento agrícola tem se mostrado a melhor forma de disposição devido à presença de nutrientes e propriedades orgânicas benéficas ao solo.

3.2 Principais fatores limitantes para a aplicação do lodo de esgoto no solo citados

Embora a disposição do lodo de esgoto na agricultura seja uma das alternativas mais viáveis, a presença de elementos-traço, microrganismos patogênicos, poluentes orgânicos persistentes e até mesmo os nutrientes encontrados no lodo, se tornam fatores limitantes para sua destinação agrícola, principalmente no que se refere aos riscos de contaminação dos solos e transferência aos seres humanos por meio da cadeia alimentar, riscos de lixiviação dos nutrientes e riscos de infecção por patógenos (COSCIONE *et al.*, 2010).

Conforme os dados apresentados na Tabela 2 constatou-se que os elementos-traço foram mencionados em 396 artigos (n=1.166). Salienta-se que esses artigos citaram mais de um elemento, totalizando 1.076 citações. Dentre os mais citados, destacam-se o zinco (Zn) com 15,5% e o Cu com 15,1%, já os elementos cádmio (Cd), chumbo (Pb) e níquel (Ni) foram citados entre 10 e 15%; cromo (Cr) e manganês (Mn) entre 5 e 10%; ferro (Fe), cobalto (Co), mercúrio (Hg) e arsênio (As) entre 0 a 5%. Além disso, 66 artigos (n=396) fizeram referência a outras substâncias, tais como selênio (Se), alumínio (Al), molibdênio (Mo), bromo (Br), boro (B), que juntas totalizaram 8,5% das citações.

Tabela 2 - Principais substâncias inorgânicas citadas (n=1076) nos artigos publicados entre os anos de 1980 a 2017

Substâncias inorgânicas	Frequência	(%)
Zn	167	15,5%
Cu	163	15,1%
Cd	143	13,4%
Pb	129	12,0%
Ni	114	10,6%
Cr	98	9,1%
Mn	60	5,6%
Fe	40	3,7%
Co	26	2,4%
Hg	23	2,1%
As	22	2,0%
Outras substâncias	91	8,5%
Total	1076	100%

Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

Segundo Tsutiya *et al.* (2002), para a aplicação dos bio-sólidos na agricultura, devem ser levadas em consideração as concentrações máximas de substâncias inorgânicas permitidas de acordo com a legislação de cada país, assim como as cargas cumulativas em solos agrícolas. Desta forma, uma maior preocupação acerca dos elementos Cd, Cu, Cr, Pb, Hg, Ni, Zn e As pode ser justificada, por se tratarem dos principais parâmetros que determinam o potencial do lodo de esgoto para o uso agrícola em diversos países (NUVOLARI, 2009).

Na concepção de Moreira e Siqueira (2006) é importante conhecer as concentrações dos elementos-traço presentes no bio-sólido, visto que estes são liberados por meio da biodegradação, produzindo quelatos orgânicos e metais livres, que vão para a biomassa e se acumulam no solo ou são absorvidos pelas plantas ou até mesmo lixiviados.

Segundo Andreoli *et al.* (2014), os elementos que mais oferecem riscos são o As, Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Mo, Pb, Se, Zn e Co. Por outro lado, faz-se importante ressaltar que segundo

Coscione *et al.* (2010), elementos como As, Co, Cr, Se, Zn, Fe e Cu são micronutrientes essenciais para o desenvolvimento de plantas, contudo, as concentrações elevadas desses no solo podem provocar efeitos tóxicos, diminuindo seu potencial produtivo, ou acumulando-se nas partes comestíveis, tornando-se um risco à cadeia alimentar.

O Zn é considerado um micronutriente essencial para a nutrição das plantas e é prontamente absorvido e translocado com facilidade para as partes aéreas destas, no entanto, a maior parte dos efeitos tóxicos do Zn está relacionada à sua mistura com outros metais (ANDREOLI *et al.*, 2014).

Além disso, os elementos-traço possuem características de fixação distintas, assim, de acordo com Tsutiya *et al.* (2002), o Cu é um dos metais menos móveis, pois é fortemente fixado pela matéria orgânica e por óxidos como Fe, Al e Mn, tendendo, por isso, a se acumular na superfície do solo, ou mesmo em restos vegetais encontrados neste. Porém, a intoxicação por Cu dificilmente ocorre nos animais e no homem, pois sua interação com outros metais e nutrientes promove sua absorção, mas pode ser altamente tóxico aos organismos aquáticos quando presente na forma iônica (ANDREOLI *et al.*, 2014).

Já o Pb, Hg, Cd, Al e Cr não ocorrem naturalmente e não possuem funções nutricionais ou bioquímicas nos organismos vivos. Assim, a presença desses metais se torna prejudicial em quaisquer concentrações (TSUTIYA *et al.*, 2002). O Cd é um elemento de grande interesse quando se trata da destinação agrícola do lodo, pois é considerado o metal mais perigoso, visto que oferece riscos potenciais para a saúde humana (LARA *et al.*, 1999).

Segundo Andreoli *et al.* (2014), embora os elementos-traço possam ser tóxicos para as plantas e os animais em determinadas concentrações, a quantidade presente nos biossólidos oriundos de esgotos domésticos não representa riscos para os organismos vivos. Contudo, o mesmo não pode ser dito quanto aos biossólidos provenientes de indústrias, pois estas são as principais fontes de elementos potencialmente tóxicos.

De maneira geral, a disposição do lodo na agricultura mostra-se a forma mais adequada de descarte, entretanto, o teor de elementos-traço e outros poluentes presentes no lodo ainda representam uma preocupação para sua destinação agrícola devido ao seu potencial poluidor e suas propriedades biocumuladoras. Assim, o teor desses poluentes no lodo deve ser constantemente monitorado a fim de evitar danos à saúde e ao meio ambiente.

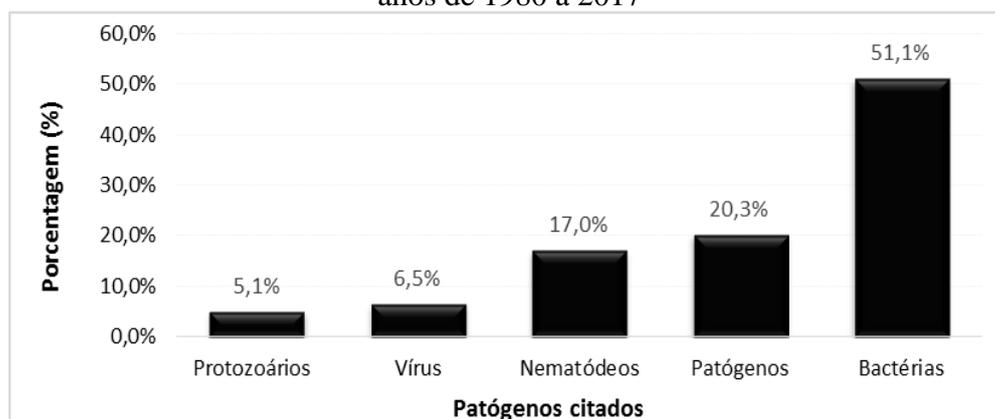
3.2.1 Patógenos

Com relação aos patógenos, segundo Andreoli *et al.* (2014), a quantidade presente no lodo depende das condições socioeconômicas de cada país e região, das condições sanitárias de onde foi gerado e dos métodos de tratamento aplicados ao lodo.

Neste contexto, 153 artigos (n=1.166) mencionaram a presença de patógenos no biossólido, totalizando 283 citações. Dentre os mais citados, destacam-se as bactérias com 51,1% de citações, salientando-se a *Escherichia coli* e a *Salmonella spp* (ambas com 34 citações), os coliformes totais foram apontados em 24 trabalhos e *Clostridium perfringens* em 13, as demais bactérias, totalizaram juntas 39 citações.

Já os ovos de nematódeos foram citados em 17% dos artigos (n=283), destacando-se os ovos de helmintos com 21 citações e *Ascaris lumbricoides* com 18. Por sua vez, os vírus alcançaram o percentual de 6,5% e os protozoários foram mencionados em 5,1% dos trabalhos. Destaca-se que, a expressão “patógenos” foi mencionada em 20% dos artigos, como mostra o Gráfico 4.

Gráfico 4 - Percentual de patógenos citados (n=283) nos trabalhos amostrados entre os anos de 1980 a 2017



Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

Salienta-se que a porcentagem de citações de 6,5% alcançada pelos vírus e de 5,1% pelos protozoários pode ser justificada pelo fato de que são microrganismos menos resistentes às condições adversas do meio ambiente do que os ovos de helmintos, protozoários e *Salmonella spp.* e, por isso, não requerem demasiada atenção quanto à disposição do lodo no solo (MOTA, 2006).

A preocupação em relação às bactérias, em especial do grupo coliforme, pode ser explicada devido a sua abundância no trato intestinal humano e animais de sangue quente, sendo eliminadas em grande número pelas fezes. Esta bactéria está comumente presente em

águas contaminadas, e, por isso, a concentração de *E. coli* é o parâmetro universal utilizado para indicar contaminação fecal e determinar a qualidade da água destinada ao consumo humano (NUVOLARI, 2009).

A *Salmonella* spp. e *Shigella* spp. são as bactérias mais encontradas no esgoto doméstico e por isso representam maior risco de infecção (ANDREOLI *et al.*, 2014). Neste sentido, a porcentagem de citações de 12% atingida pela *Salmonella* spp. pode ser justificada devido sua alta incidência no biossólido, uma vez que normalmente os métodos empregados no tratamento de esgoto aglomeram no lodo elevados teores de patógenos (NUVOLARI, 2009).

Segundo Tsutiya *et al.* (2002), as infecções causadas por vírus e bactérias dependem de doses infectantes mais elevadas, e por isso, a presença destes microrganismos não asseguraria a infecção. Por outro lado, os ovos de helmintos demandam maior atenção, uma vez que, apenas um ovo viável pode infectar um hospedeiro. Destaca-se que essa característica pode justificar a porcentagem de 17% atingida pelos ovos de nematódeos na amostra analisada. Além disso, segundo Andreoli *et al.* (2014) a *Ascaris lumbricoides* é um nematoide hospedeiro do intestino delgado humano de alta persistência no meio ambiente, sendo que os principais efeitos colaterais são as dores abdominais, vômito e diarreia.

De um modo geral, apesar do pequeno número de citações em relação à *Taenia solium*, pertencente ao grupo dos helmintos, segundo Andreoli *et al.* (2014), tal patógeno merece destaque, pois possui alta incidência na América Latina. Além disso, apesar de serem menos resistentes que *Ascaris* sp., apenas um ovo pode gerar um cisticerco e comprometer o cérebro ou os olhos de uma pessoa de forma irreversível ou letal (COSCIONE *et al.*, 2010).

De acordo com Andreoli *et al.* (2014), a sobrevivência de patógenos nos vegetais depende do tipo de microrganismo e da vegetação, sendo os ovos de helmintos os mais persistentes. Contudo, os vegetais que têm contato direto com o solo, como raízes e legumes, são os mais propícios a causarem infecção.

Desta forma, a presença de microrganismos patogênicos no lodo de esgoto consiste em um fator limitante para sua destinação agrícola, uma vez que pode causar a contaminação do meio ambiente e consequentes problemas para a saúde pública e animais, sendo por isso, indispensável a correta higienização do lodo para inativar os agentes causadores de doenças.

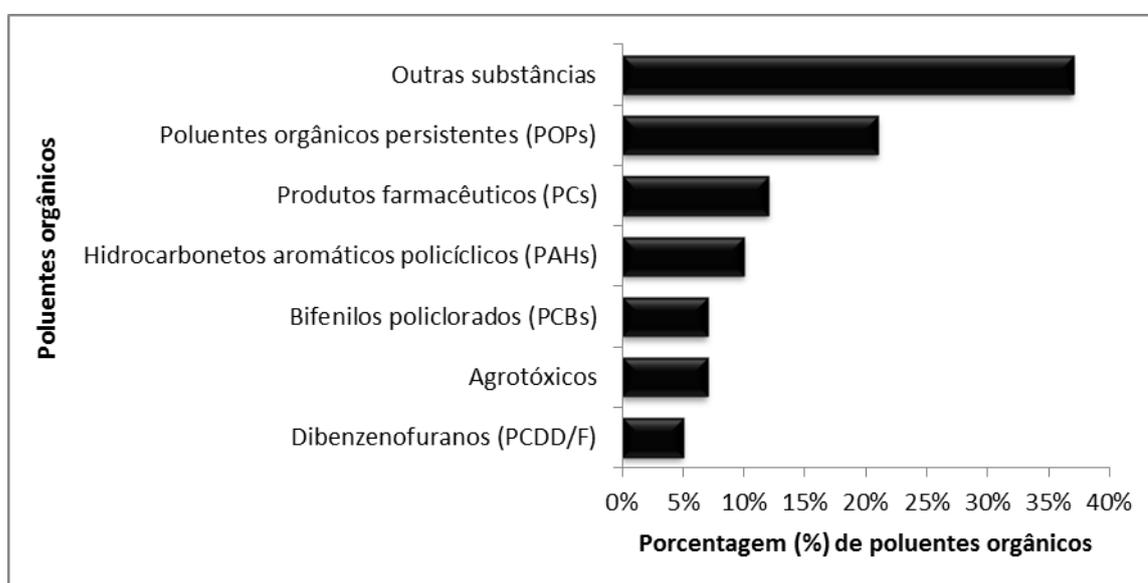
3.2.2 Poluentes orgânicos persistentes

Além dos elementos-traço e microrganismos patogênicos, o bio sólido pode conter em concentrações variáveis, um grande número de outras substâncias orgânicas persistentes que podem causar impacto ambiental, especialmente se o bio sólido tiver origem industrial (TSUTIYA *et al.*, 2002).

Assim, os poluentes orgânicos foram objetos de considerável interesse em 167 artigos (n=1.166) totalizando 269 citações. Salienta-se que alguns trabalhos mencionaram mais de um poluente, além disso, o termo “poluentes orgânicos persistentes” obteve o percentual de 21% (n=269) de citações, contudo, nesses trabalhos os poluentes não foram individualizados, sendo apontados apenas os impactos destes no meio ambiente.

Com relação aos contaminantes mais citados, os compostos farmacêuticos e os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs) foram mencionados entre 10 e 15% dos artigos; já os agrotóxicos, bifenilos policlorados (PCBs) e dibenzofuranos (PCDD/F) foram citados entre 5 e 10%. Destaca-se que o grupo “outras substâncias” abarca os compostos que alcançaram até 5% das citações nos artigos, tais como nonifenóis, dioxinas, entre outros, representando juntos 37% das citações (Gráf. 5).

Gráfico 5 - Poluentes orgânicos com maior número de citações (n = 269) nos artigos selecionados do banco de dados Web of Science entre os anos de 1980 a 2017



Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

Segundo Tsutiya *et al.* (2002), os poluentes orgânicos persistentes (POPs), não têm recebido a devida atenção do governo e dos órgãos ambientais, uma vez que as substâncias inorgânicas e os microrganismos patogênicos são as principais preocupações em relação às

condições sanitárias do lodo. No Brasil não existem normas e limites para a concentração de poluentes orgânicos no lodo, entretanto, em 2004 entrou em vigor a Convenção de Estocolmo sobre Poluentes Orgânicos, constituída por 152 partes, incluindo o Brasil, que devem adotar medidas de controle de 23 substâncias, dentre as quais se destacam os PCBs, Dicloro-Difenil-Tricloroetano (DDT), PCDD/PCDF, HCBs entre outros (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2017).

Neste contexto, de acordo com Saito (2007) os países dão ênfase aos microrganismos e substâncias inorgânicas, mas não estabelecem diretrizes para os poluentes orgânicos no que se refere à destinação agrícola do lodo. Assim, dos 167 artigos analisados, 21% mencionaram a expressão “poluentes orgânicos persistentes”, o que pode ser justificado devido ao potencial contaminante e bioacumulativo destas substâncias, que podem interferir na qualidade do solo, e desencadear efeitos negativos para a saúde pública (FELIX *et al.*, 2007).

Em relação aos compostos farmacêuticos, 12% dos artigos apontam uma preocupação sobre o uso do lodo de esgoto contaminado com esses compostos. Segundo Saito (2007), apesar dos testes realizados com os produtos, não se tem informações sobre a ecotoxicologia destes poluentes, mas há uma grande preocupação com seu uso prolongado e em grandes escalas, pois as bactérias podem se tornar resistentes. Por outro lado, de acordo com Pereira Neto (2007), a presença de alguns antibióticos e ácidos fenólicos no adubo orgânico, pode ajudar a planta a tornar-se mais resistente ao ataque de patógenos.

Nesta acepção destaca-se que Rodrigues *et al.* (2018) realizaram uma análise cienciométrica constatando que os produtos fármacos mais encontrados nos artigos publicados entre os anos de 1998 e 2016 foram a carbamazepina, o acetaminofeno, o diclofenaco, cafeína, ibuprofeno e o triclosan. Dentre os hormônios mais citados destacam-se o nonifenol, 17-beta-estradiol, estrona, 17-alfa-etinilestradiol, estriol e o Bisfenol A.

Os PAHs são poluentes resultantes da queima incompleta de substâncias que contêm carbono e persistem por muito tempo no solo (TSUTIYA *et al.*, 2002). Dada sua baixa solubilidade em água, o solo é o principal receptor de PAHs, principalmente em áreas expostas às emissões industriais e em locais que sofrem com as queimadas em vegetação. O mesmo ocorre em áreas industriais abandonadas e também onde os resíduos de origem domiciliar ou industrial são depositados no solo (SISSINO; OLIVEIRA-FILHO, 2013).

Ainda segundo Sissino e Oliveira-Filho (2013) os PAHs constituem um fator de risco à saúde, pois estão associados a vários tipos de cânceres em seres humanos, tais como pulmão, bexiga, colo, reto e esôfago, dentre outros. Ressalta-se que a exposição aos seres

humanos e outros animais ocorre por diferentes vias, podendo ser destacadas a ingestão de alimentos ou água contaminada e a inalação de ar poluído.

Neste sentido, a porcentagem de 10% atingida pelas citações referentes aos PAHs, pode ser justificada por se tratar de uma substância pouco solúvel na água e persistente no solo, podendo, dessa forma, alcançar a cadeia alimentar por meio da vegetação contaminada, causando distúrbios nos seres humanos e animais.

As bifenilas policloradas (PCBs) constituem um grupo de produtos químicos industriais organoclorados que se tornaram objeto de uma maior preocupação ambiental nas décadas de 1980 e 1990 (BAIRD, 2002). Segundo Tsutiya *et al.* (2002), os PCBs são bastante estáveis e resistentes à decomposição e, por isso, podem permanecer inalterados no solo por muito tempo.

Além disso, 7% dos artigos fizeram alusão aos PCBs, o que pode estar relacionado ao fato de que se trata de um poluente que é facilmente absorvido pelas plantas, podendo, dessa forma, entrar na cadeia alimentar (TSUTIYA *et al.*, 2002). Destaca-se ainda que, segundo Brady e Weil (2013), estas substâncias podem causar câncer e alterações hormonais em humanos, além de prejudicar a reprodução de animais.

De acordo com Bettiol e Camargo (2006), os agrotóxicos, assim como os PCBs, são compostos persistentes e hidrofóbicos, que se aglomeram nas partículas sólidas do lodo após seu condicionamento e desaguamento. Devido ao potencial de se acumular e a baixa solubilidade na água, os agrotóxicos podem ser introduzidos na cadeia alimentar por meio da vegetação contaminada, com graves sequelas para a saúde pública e dos animais (MOTA, 2006).

Em geral, os agrotóxicos podem ser subdivididos em três grupos principais: os inseticidas, que são utilizados no controle de pragas; fungicidas, que atuam no combate aos fungos; e herbicidas, utilizados para controlar ervas daninhas e outras plantas oportunistas (MOTA, 2006). Do ponto de vista ambiental, os herbicidas são os mais preocupantes devido à facilidade com que se infiltram no solo, o que justifica serem detectados em águas subterrâneas com maior frequência (SISSINO; OLIVEIRA-FILHO, 2013).

As dibenzodioxinas (PCDD) e dibenzofuranos policlorados (PCDF), também chamados de dioxinas e furanos, são formados a partir da produção de clorofenóis, PCBs, cloranil, incineração de resíduos sólidos urbanos e emissões veiculares (BETTIOL, CAMARGO, 2006). Ainda segundo os autores, existem cerca de 75 substâncias da classe PCDD e 135 da classe dos PCDF, as quais possuem estruturas químicas semelhantes se diferindo apenas no fato de que os furanos possuem um oxigênio a menos no anel central.

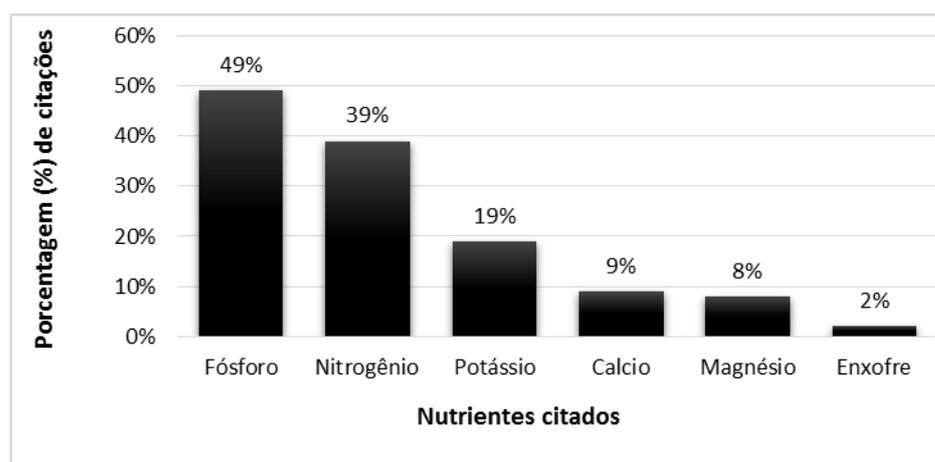
Segundo Tsutiya *et al.* (2002), os PCDDs e PCDFs têm recebido maior atenção devido à sua persistência e tendência a se acumular no solo em virtude da baixa solubilidade em água e elevada toxicidade aos organismos vivos. Segundo Saito (2007), nos seres humanos há registros no aumento da incidência de tumores e na taxa de mortalidade como consequência da exposição às dioxinas e furanos.

Logo, os poluentes orgânicos presentes no lodo não têm recebido os devidos cuidados para disposição agrícola, uma vez que é difícil detectar estes compostos no lodo, além do alto custo para realizar o processo, o que se torna um problema, visto que os poluentes orgânicos são pouco solúveis em água e tendem a se acumular no solo, contaminando as plantas e animais, podendo, conseqüentemente, entrar na cadeia alimentar.

3.2.3 Nutrientes

Com relação aos nutrientes, constatou-se que estes foram citados em 303 artigos (n=1.166), totalizando 390 citações. O fósforo (P) obteve o maior percentual de citações, com 49%, o nitrogênio (N) com 39% e o potássio (K) com 19%. Além disso, outros macronutrientes como o cálcio (Ca), magnésio (Mg) e o enxofre (S) foram mencionados, respectivamente, em 9%, 8% e 2% dos artigos analisados (Gráf. 6).

Gráfico 6 - Nutrientes com maior número de citações (n = 390) nos artigos selecionados do banco de dados Web of Science entre os anos de 1980 a 2017



Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

De acordo com Brady e Weil (2013) o nitrogênio é indispensável para que as plantas possam fazer o uso do carboidrato. As plantas que apresentam deficiência deste nutriente

tendem a apresentar cor amarelada ou verde-clara das floras, conhecido como clorose, e uma aparência definhada. Ainda segundo Brady e Weil (2013), o fósforo auxilia no processo da fotossíntese, fixação de nitrogênio, floração, frutificação e sazonalidade. Já o potássio é essencial para facilitar a absorção de água do solo pelas raízes, pois o nutriente auxilia a planta na redução do potencial osmótico das células.

Segundo Tsutiya *et al.* (2002), o valor de nitrogênio nos biossólidos de um modo geral é maior que o valor do fósforo. Ademais, as plantas necessitam de maiores quantidades de nitrogênio para o seu desenvolvimento do que de fósforo. Contudo, as citações em relação ao fósforo atingiram o maior percentual de citações (49%), podendo ser justificada por se tratar de um elemento esgotável.

Dessa forma, segundo Moreira e Siquera (2006), a principal fonte de fósforo para os seres vivos são as rochas fosfáticas que constituem um recurso natural não renovável e, por isso, precisam ter seu uso racionalizado, pois se estima que as reservas do elemento se esgotem nos próximos 80 a 100 anos. Assim, o lodo de esgoto mostra-se uma forma sustentável para fornecer este elemento às plantas, pois permite sua reciclagem e minimiza a necessidade de exploração deste recurso.

Nesta acepção, 1,2% dos artigos (n=1.166) abordam a importância da reciclagem de fósforo utilizando o lodo de esgoto, uma vez que as reservas de fósforo são finitas e podem se esgotar em um futuro próximo. Todavia, embora a reciclagem do fósforo seja uma forma sustentável de gerenciar as reservas naturais, é de extrema importância monitorar seus efeitos sobre o meio ambiente, uma vez que níveis excessivos de fósforo no solo estão relacionados à eutrofização e deterioração da qualidade das águas superficiais e subterrâneas (TSUTIYA *et al.*, 2002).

Apesar do percentual de citações acerca do fósforo e a importância de sua reciclagem, o nitrogênio é o nutriente mais importante e limitante para a aplicação do lodo no solo, pois em elevadas concentrações, pode ser lixiviado em forma de nitrato e contaminar o lençol freático, além de causar danos aos organismos vivos (BRADY; WEIL, 2013).

No que diz respeito ao potássio, o menor índice de citações deste elemento pode ser decorrente da sua baixa concentração no lodo, que não fornece quantidades suficientes para o desenvolvimento das plantas, e por isso precisa ser complementado com outras fontes. Contudo, apesar do baixo teor nos biossólidos, este elemento é 100% assimilável pelas plantas (TSUTIYA *et al.*, 2002).

Outros elementos como Ca e Mg são encontrados em pequenas concentrações no lodo, exceto quando o mesmo é higienizado por meio da caleação, processo no qual são

adicionadas grandes quantidades desses nutrientes. Porém, mesmo as baixas concentrações destes elementos são suficientes para suprir as necessidades da maioria das culturas agrícolas (ANDREOLI *et al.*, 2014).

Assim como o nitrogênio, o enxofre quando mineralizado à forma de sulfato pode ser lixiviado e contaminar as águas subterrâneas devido à sua alta solubilidade. Entretanto, destaca-se que o enxofre é essencial para o desenvolvimento de plantas e animais, sendo que sua deficiência é responsável pela pequenez e delgadeza dos vegetais e coloração amarelada das folhas mais novas (BRADY; WEIL, 2013).

Desta forma, a aplicação de lodo de esgoto em solos agrícolas se torna uma alternativa sustentável e econômica, pois possibilita a reciclagem de nutrientes, principalmente no que se refere ao fósforo, podendo, assim, contribuir substancialmente para a redução da demanda de suas reservas naturais. No entanto, seu manejo deve ser realizado conforme as regulamentações de cada país em relação ao teor de nitrogênio no solo, uma vez que quando presente em altas concentrações pode ser lixiviado em forma de nitratos e comprometer os organismos vivos e a qualidade do meio ambiente.

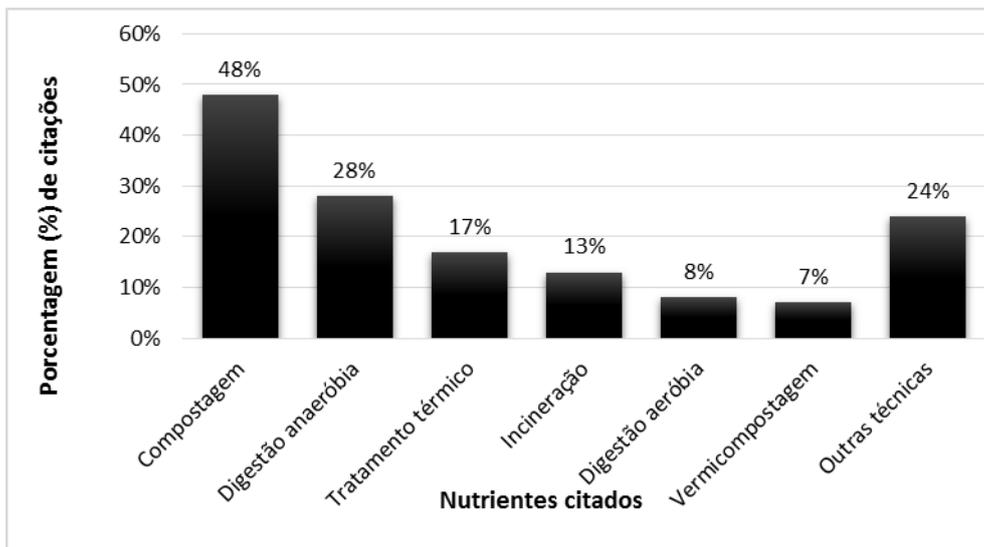
3.3 Principais técnicas para o tratamento do lodo de esgoto abordadas na literatura científica amostrada

Segundo Andreoli *et al.* (2014), todas as formas de tratamento e disposição do lodo apresentam vantagens e desvantagens, muitas destas relativas à possibilidade de contaminação do solo, corpos receptores ou mesmo da atmosfera. Os métodos de tratamento do lodo mais empregados no Brasil para sua destinação agrícola são a caleação, a compostagem e a secagem térmica.

Neste contexto, 391 trabalhos (n=1.166) citaram formas de tratamento do lodo de esgoto, sendo que alguns trabalhos citaram mais de uma técnica de tratamento. A compostagem foi o método mais citado representando 48% dos trabalhos, a digestão anaeróbia foi citada em 28% dos artigos, o tratamento térmico em 17%, a incineração em 13%, a digestão aeróbia foi citada em 8% e a vermicompostagem foi citada em 7% dos artigos, conforme ilustra o Gráfico 7.

Destaca-se que o grupo “outras técnicas”, abarcando a calagem com cal, digestão ácida, gaseificação, hidrólise, lagoa de estabilização, oxidação úmida, pasteurização, entre outras, foi inserido no Gráfico 7, para representar as formas de tratamento que obtiveram menos de 1% das citações, totalizando 24%.

Gráfico 7 - Técnicas de tratamento do lodo de esgoto citadas em 391 artigos (n=1.166) entre os anos de 1980 a 2017



Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

A porcentagem de 48% atingida pela compostagem pode ser justificada pela sua eficiência na remoção de patógenos e seu custo acessível, além disso, esta técnica possibilita a formação de um produto que pode ser utilizado na agricultura, recuperação de áreas degradadas, além de reduzir a necessidade do uso de fertilizantes sintéticos (TSUTIYA *et al.*, 2002).

Segundo Philippi Jr. (2005) a compostagem é eficiente na remoção de patógenos visto que, em uma das etapas da decomposição da matéria orgânica, a temperatura pode chegar a 70°C. Contudo, a aplicação desse composto não é aconselhável em culturas que serão ingeridas cruas, pois alguns cistos e ovos ainda resistem a esta temperatura.

O percentual de 28% alcançado pela digestão anaeróbica pode ser explicado por ser um método econômico para o tratamento do lodo. Além disso, o biogás formado no processo da digestão pode ser usado para a produção de calor e eletricidade, enquanto os resíduos do digestor podem ser reciclados na agricultura como fertilizantes orgânicos (ANDREOLI *et al.*, 2014).

A incineração tem como objetivo gerar um resíduo menos volumoso, menos tóxico ou atóxico, ou ainda eliminá-lo, convertendo-o em gases ou resíduos incombustíveis (TSUTIYA

et al., 2002). Segundo Andreoli *et al.* (2014), apesar deste método reduzir os riscos de contaminação causados por patógenos e poluentes orgânicos, é um processo caro e não elimina os elementos-traço. Além disso, causa preocupações em relação à poluição atmosférica devido à emissão de dioxinas e furanos e outras substâncias tóxicas e cancerígena. De acordo com Philippi Jr. (2005) em comunidades onde a área do aterro não está mais disponível e há escassez de energia, a incineração é amplamente utilizada, como no caso do Japão, onde 70% de seus resíduos sólidos são incinerados.

Segundo Tsutiya *et al.* (2002) o tratamento térmico utiliza o calor para remover a água contida no lodo por processo de evaporação. De acordo com Andreoli *et al.* (2014), o produto gerado na secagem térmica pode ser utilizado como combustível em caldeiras, aquecedores industriais, fornos de cimento, ser incinerado ou disposto em aterros sanitários. Apesar disso, a secagem térmica é um processo interessante quando se tem como objetivo destinar o lodo à agricultura, podendo ser utilizado de forma irrestrita, pois o processo, além de manter a matéria orgânica presente no composto elimina os patógenos com eficiência (LARA *et al.*, 1999).

Dentre os tipos de tratamento térmico, a pirólise alcançou o percentual de 3%. Este processo consiste em desmembrar os compostos orgânicos em seus elementos mais simples na ausência de oxigênio (LIMA, 2004). Segundo Philippi Jr. (2005) esta técnica é pouco empregada no Brasil e resulta na produção de gases e óleos combustíveis, alcatrão, sulfato de amônia e carvão.

A digestão aeróbia apresenta melhor desempenho na remoção de resíduos voláteis e microrganismos patogênicos, entretanto, não permite o aproveitamento do gás que é produzido na digestão anaeróbia para geração de energia (LARA *et al.*, 1999). Ademais, a digestão aeróbia é restringida às estações de tratamento de pequeno porte, constituindo um processo de elevado custo operacional (TSUTIYA *et al.*, 2002).

De acordo com Tsutiya *et al.* (2002), a vermicompostagem consiste em um tipo de compostagem na qual minhocas são utilizadas para a produção de composto orgânico aproveitável pelas plantas, denominado húmus ou vermicomposto. A vermicompostagem produz um húmus aproximadamente 70% mais rico em nutrientes se comparado ao húmus produzido por processos convencionais, pois os produtos gerados na compostagem com minhocas possuem características que favorecem a correção do pH do composto (LONGO, 1987).

De acordo com Bidone (1999) antes de passar pela vermicompostagem, o resíduo deve ser submetido ao processo de compostagem. Além disso, esse processo apresenta como

desvantagem o monitoramento contínuo para aferir as condições de umidade, temperatura e arejamento do composto para que as minhocas não morram ou percam a produtividade (DIAZ *et al.*, 1993).

Logo, as características de que se deseja obter do lodo variam em função das técnicas de tratamento que são utilizadas, que apresentam vantagens e desvantagens em relação aos custos de implantação e manutenção, assim como com relação à eficiência na remoção de patógenos, elementos-traço e poluentes orgânicos.

3.4 Culturas mais citadas na literatura científica entre os anos de 1980 a 2017

Em relação ao uso do lodo na agricultura, 202 artigos mencionaram as culturas que comumente recebem o lodo, classificadas em cereais, leguminosas, verduras, legumes, frutas e outros, conforme mostra a Tabela 3. Destaca-se que alguns artigos mencionaram mais de uma cultura, totalizando 290 citações. A categoria “outros” foi inserida na Tabela 7 para classificar plantações florestais, pastagens, flores e demais vegetações que não se aplicam às classes anteriormente citadas, e tiveram menos de 2% das citações, totalizando juntas, 21%.

Tabela 3 – Principais culturas citadas (n = 290) nos artigos selecionados do banco de dados *Web of Science* entre os anos de 1980 a 2017

Culturas	Número de citações	(%)
Cereais	127	43,8%
Leguminosas	27	9,3%
Verduras	42	14,5%
Legumes	26	9%
Frutas	7	2,4%
Outros	61	21%
Total	290	100

Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

Conforme pode ser observado na Tabela 3, as culturas mais mencionadas foram os cereais com 44,2% de citações, sendo que dentre mais citados (n=290), destacam-se o milho com 20% das citações, trigo com 9%, cevada com 6% e arroz com 4%. Outras gramíneas tais como a aveia, cana-de-açúcar, centeio, sorgo e triticale tiveram menos de 1% de citações.

Com relação às leguminosas, o feijão e a soja foram as mais citadas, com 3,3% e 2,2% de citações respectivamente; as demais leguminosas como a ervilha, fava, galega e grão-de-

bico corresponderam juntas a 3,3% das citações. Por sua vez, as principais verduras citadas foram a alface com 4,7% das citações, mostarda com 3% e rabanete com 2%. Já o principal legume foi o tomate, correspondendo a 3,6% das citações.

As frutas como o morango, melancia, pêsego, laranja e frutas cítricas tiveram, juntas, apenas 3% das citações. Nesta acepção, ressalta-se que as frutas apresentaram o menor percentual de citações, pois segundo Andreoli (2006), as culturas que entram em contato direto com o solo, tais como as olerícolas, tubérculos e culturas consumidas *in natura*, oferecem maior risco de contaminação ao receberem o lodo de esgoto.

Segundo Mota (2006) as culturas mais recomendadas para a aplicação do bio-sólido são aquelas cujos produtos são consumidos após a industrialização, tais como o milho, feijão, soja, sorgo, canola, trigo, aveia, cevada e forrageiras para adubação verde, dentre outros. De acordo com Tsutiya *et al.* (2002) o milho e outras gramíneas como o trigo, a cana e o sorgo, são as culturas mais recomendadas devido às suas características e vêm mostrando melhores resultados com a aplicação do bio-sólido.

Neste sentido, ressalta-se que as culturas do milho, trigo e arroz ocupam as maiores extensões de cultivo mundialmente. Além disso, dada a capacidade de adaptação, podem ser encontradas em variadas regiões e condições climáticas adversas (BARROS; CALADO, 2014). Assim, o maior percentual de citações acerca do milho pode estar relacionado à sua integração a essas variadas condições.

Ademais, segundo Chagas (1999) o longo período de vegetação do milho se adapta à mineralização do nitrogênio e da matéria orgânica do lodo, evitando eventuais perdas por lixiviação do nitrato. Ressalta-se ainda que os grãos do milho não entram em contato com o solo e a colheita é realizada por meios mecânicos, reduzindo as chances de contato com o lodo. Por outro lado, o feijão e outras leguminosas apresentam respostas menos intensas que as gramíneas, pois são capazes de fixar o nitrogênio atmosférico por simbiose, sendo o fósforo o mineral mais importante neste caso.

De um modo geral, Gomes *et al.* (2006) constataram que o lodo tem sido mais estudado e vem mostrando resultados positivos em solo cultivado com milho, não ocorrendo a contaminação dos grãos por nenhum metal pesado. Segundo Nogueira *et al.* (2008), a adição de lodo por períodos prolongados apresentou resultados semelhantes quanto a produtividade dos grãos quando cultivados com fertilizantes minerais. Além disso, o teor de substâncias inorgânicas se situou abaixo dos limites estabelecidos pela legislação para utilização agrícola (NASCIMENTO *et al.*, 2004).

Segundo Coscione *et al.* (2010) a aplicação dos biossólidos nas plantações florestais demonstra ser o método mais adequado, uma vez que tais culturas não se destinam à alimentação humana e animal, possibilitando uma maior segurança quanto à dispersão de eventuais contaminantes.

Assim, pode-se concluir que a aplicação mais adequada do lodo se refere às plantações que não entram em contato com o solo e não são consumidas *in natura*, evitando assim, riscos de contaminação por elementos-traço, poluentes orgânicos e principalmente microrganismos patogênicos.

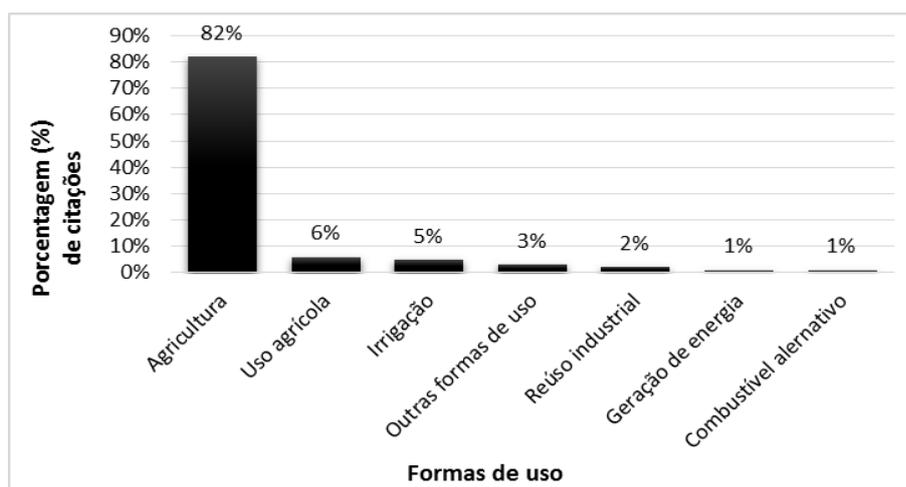
3.5 Principais formas de uso do lodo de esgoto mais citadas nos trabalhos analisados

De acordo com Bettiol e Camargo (2006) as alternativas mais comuns para reaproveitar o lodo ou realizar sua disposição final são a disposição em aterro sanitário, reuso industrial para produção de agregado leve, fabricação de tijolos e produção de cimento; incineração, conversão em óleo combustível; recuperação de solos degradados; *landfarming*; uso agrícola e florestal com aplicação direta no solo; compostagem; e fertilizante orgânico.

Assim, as formas de uso foram citadas em 780 artigos (n=1.166), podendo ser observadas no Gráfico 8. A palavra “agricultura” foi mencionada 639 vezes, representando 82% das citações; a irrigação foi citada em 5% dos artigos, o uso agrícola (horticultura, silvicultura, fertilizante, aplicação no solo e recuperação de áreas degradadas) em 6%, geração de energia em 1%, reuso industrial (agregado leve para construção civil, fabricação de tijolos, cimento e cerâmica) em 2%, e combustível alternativo, em 1% dos artigos.

A categoria “outras formas de uso” foi inserida no gráfico para representar as formas de utilização que tiveram menos de 1% de citação nos artigos, tais como adsorvente, disposição em aterro, disposição oceânica, dentre outras, totalizando juntas 3% das citações.

Gráfico 8 - Porcentagem das formas de uso mais citadas em 780 artigos (n=1.166) entre os anos de 1980 a 2017



Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

O fato de a agricultura ter sido mencionada em 82% dos artigos pode ser justificado devido às palavras-chave utilizadas para a busca dos artigos no banco de dados do *Web of Science*. Além disso, segundo Bettiol e Camargo (2006) entre as diversas formas de disposição, a agricultura é a forma mais conveniente e sustentável de descarte do lodo, pois permite a reciclagem de nutrientes, além de agir como condicionador e fertilizante para o solo, fornecendo matéria orgânica e melhorando suas propriedades físico-químicas.

Segundo Jordão e Pessoa (2009) o uso agrícola inclui diversas opções, tais como a aplicação no solo com fins agrícolas, aplicação em áreas de reflorestamento, produção de composto ou fertilizante organo-mineral e restauração de terras. Neste contexto, a destinação do lodo aos solos agrícolas, áreas degradadas e florestas, facilita a formação de agregados, melhorando a infiltração, a retenção de água e a aeração do solo (NUVOLARI, 2009).

A área degradada é caracterizada por não oferecer condições adequadas para o desenvolvimento e fixação da vegetação devido à falta de matéria orgânica e de nutrientes no solo e da atividade biológica. Dessa forma, como o biossólido melhora as propriedades do solo, é possível recuperá-lo e proporcionar um ambiente adequado para o reaparecimento da vegetação (TSUTIYA *et al.*, 2002).

Ainda no contexto do uso agrícola, o lodo pode ser utilizado nas indústrias de fertilizantes como fertilizante granulado complexo, como complemento para os fertilizantes minerais e orgânicos ou como carga em uma formulação mineral, para atingir o valor padrão de carga de uma tonelada para que o transporte possa ser realizado (TSUTIYA *et al.*, 2012).

A atividade agrícola utiliza cerca de 70% a 80% da água potável disponível para o consumo humano, entretanto, segundo Azevedo *et al.* (2014), essa forma de emprego não é econômica e ambientalmente viável, pois nem toda água é incorporada no solo. Desta forma,

o percentual das citações acerca da irrigação foi de 5%, e pode ser justificado visto que, a reutilização de águas residuais e do lodo para irrigação pode aliviar a pressão sobre os recursos hídricos e atender à crescente demanda da agricultura, principalmente em regiões áridas e semiáridas, onde muitas vezes há carência de água potável para abastecimento público (MOTA, 2006).

Além das finalidades agrícolas, o lodo pode ser utilizado na indústria para produzir agregados leves para construção civil, tijolos, cimento, entre outros, vigorando-se como uma prática sustentável, a fim de reduzir os impactos ambientais negativos, transformando rejeitos em matéria-prima ou energia (ANDREOLI, 2006). Desse modo, visto que o lodo possui propriedades semelhantes à argila, este material pode ser utilizado para a produção de agregados leves e cimento sem gerar qualquer outro resíduo (TSUTIYA *et al.*, 2002).

Ainda segundo Tsutiya *et al.*, (2002) a fabricação de tijolos a partir do lodo apresenta diversas vantagens como, por exemplo, a economia de água, produtos mais leves com menor custo de transporte, melhor rendimento operacional da fornalha devido ao poder calorífico do lodo e a reutilização da energia térmica da queima dos gases produzidos na etapa de secagem.

Em relação à geração de energia, esta pode ser obtida por processos de queima do biogás gerado em aterros ou biodigestores, incineração ou gaseificação. A gaseificação consiste em um processo de conversão térmica para obtenção de um gás combustível utilizado na geração de energia. Já na incineração, o poder calorífico do material combustível existente no resíduo é aproveitado para a geração de energia térmica (JARDIM *et al.*, 2012).

Por sua vez, a conversão do lodo em óleo combustível permite sua completa reciclagem, a recuperação de energia, imobilização de metais pesados, destruição de patógenos, vírus e compostos organoclorados além de produzir uma quantidade de gás insignificante (TSUTIYA *et al.*, 2002). Entretanto Nuvolari (2009) afirma que existem apenas algumas plantas-piloto desta técnica no Canadá e na Austrália, pois esta não é uma prática comum e é economicamente inviável, devido à sobra do produto no mercado mundial resultante da produção de derivados de petróleo.

Assim, o lodo pode ser utilizado de várias formas, contudo, segundo Andreoli (2006), Tsutiya (2002), Bettiol e Camargo (2006), Nuvolari (2009), von Sperling (2005), Jordão e Pessoa (2009), entre outros autores, a destinação agrícola se constitui na forma mais sustentável, pois proporciona a reciclagem de nutrientes, conservando os recursos naturais e oferecendo matéria orgânica ao solo, melhorando suas propriedades físico-químicas e biológicas.

4. Conclusões

O lodo de esgoto é um subproduto gerado no processo de tratamento de águas residuais, rico em matéria orgânica e nutrientes. Quando higienizado de forma adequada, pode ser utilizado para fins agrícolas. Entretanto, a presença de poluentes, tais como os elementos-traço, microrganismos patogênicos e poluentes orgânicos persistentes, ainda representa um desafio para o seu descarte agrícola.

Assim, tendo como objetivo geral analisar a evolução espaço-temporal dos trabalhos científicos que abordam o uso do lodo na agricultura foi possível observar por meio da análise cienciométrica dos artigos indexados no banco de dados *Web of Science*, que houve um aumento crescente do número de publicações entre os anos de 1980 e 2017 sobre esse tema. Além disso, foi possível observar que os países desenvolvidos, destacando-se os EUA e a Espanha, apresentaram o maior número de publicações, seguidos pelo Brasil.

Dentre os poluentes citados, os elementos-traço foram objeto de maior interesse nos artigos analisados, destacando-se o Zn, Cu, Cd, Pb e Ni. Já em relação aos patógenos, as bactérias alcançaram o maior percentual de citações, com destaque para a *Escherichia Coli* e *Salmonella* spp; os nematódeos também foram frequentemente citados, salientando-se os ovos de helmintos e a *Ascaris lumbricoides*. Os poluentes orgânicos que obtiveram maior número de citações foram os compostos farmacêuticos, PAH, PCBs, agrotóxicos e PCDD/F.

Em relação aos nutrientes, apesar do nitrogênio estar presente em maior concentração no lodo, o fósforo foi o elemento mais mencionado, seguido pelo nitrogênio e potássio. Outros elementos, tais como cálcio, magnésio e enxofre obtiveram menor percentual de citações.

No que se refere às tecnologias de tratamento, a compostagem alcançou o maior percentual de citações, seguida pela digestão anaeróbia, além disso outras técnicas de tratamento foram pouco citadas, tais como calagem com cal, digestão ácida, gaseificação, hidrólise, lagoa de estabilização, oxidação úmida, pasteurização; incineração, tratamento térmico, digestão aeróbia e vermicompostagem.

As culturas mais citadas foram os cereais, dentre os quais o que obteve maior número de citações nos artigos foi o milho, seguido do trigo, cevada e arroz. Por fim, dentre as formas de uso mais citadas, a agricultura alcançou o maior percentual, seguida pela irrigação.

Diante dos resultados expostos neste trabalho, é possível observar que as pesquisas direcionadas ao uso agrícola do lodo vem ganhando força ao longo das décadas, com esta prática se tornando mais comum visando aumentar a vida útil dos aterros e amenizar a pressão

sobre o meio ambiente, reduzindo a necessidade de exploração dos recursos naturais para produção de fertilizantes sintéticos, entre outras atividades.

Entretanto, nota-se que é necessário o aumento de trabalhos direcionados aos diversos poluentes presentes no lodo e seus impactos sobre o meio ambiente, principalmente no que concerne os poluentes orgânicos persistentes, que têm recebido menor atenção dos pesquisadores e da legislação. Além disso, mostra-se essencial a realização de investimentos em pesquisas médicas objetivando estudar os possíveis danos causados à saúde pública pelo consumo de insumos adubados com o lodo.

Ademais, recomenda-se um aumento de investimento nas pesquisas relacionadas ao tratamento do lodo para remoção de substâncias inorgânicas e poluentes orgânicos persistentes, uma vez que os métodos empregados atualmente dão maior ênfase à inativação de patógenos. Por fim, recomenda-se a expansão acerca dos estudos relacionados ao lodo oriundo de indústrias, que em sua maioria não podem ser utilizados na agricultura, visando analisar sua melhor aplicabilidade.

Referências

ABBOUD, A. C. S. **Introdução à agronomia**. Rio de Janeiro, Interciência, 2013.

ANDREOLI, C. V. **Biossólidos**: alternativas de uso de resíduos do saneamento. Rio de Janeiro: Abes, 2006. 417p.

ANDREOLI, C. V; PEGORINI, E. S. Reciclagem agrícola de biossólidos: Impactos e regulamentação. In: XXIX Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. **Anais...** Ribeirão Preto, 2003.

ANDREOLI, C. V; VON SPERLING, M; FERNANDES, F. **Lodo de esgoto**: tratamento e disposição final. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. 444 p.

APPOLINÁRIO, F. **Metodologia da Ciência**: filosofia e prática da pesquisa. São Paulo: Cengage Learning, 2009.

AZEVEDO, J. S; FRESQUI, M; TRSIC, M. **Curso de química para engenharia**: volume III: água. Barueri, SP: Manole, 2014.

BARNETO, A. G; CARMONA, J. A; ALFONSO, J. E. M; BLANCO, J. D. Kinetic models based in biomass components for the combustion and pyrolysis of sewage sludge and its compost. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. v. 86, p. 108-114.

BARROS, J. F. C; CALADO, J. G. A. **Cultura do Milho**. Évora: Universidade de Évora, 2005.

BETTIOL, W; CAMARGO, O. A. **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 349p.

BIDONE, F. R. A. **Uso da vermicompostagem no tratamento de percolado/lixiviado de aterro sanitário.** In: PROSAB. Metodologias e técnicas de minimização, reciclagem e reutilização de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, ABES, 1999.

BOTELHO, J. M; CRUZ, V. A. G. **Metodologia científica.** São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013.

BRADY, N.C; WEIL, R.R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos.** 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 704p.

CERVO, A. L; BERVIAN, P. A; DA SILVA, R. **Metodologia científica.** 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.

CHAGAS, W. F. **Estudo de patógenos e metais em lodo digerido bruto e higienizado para fins agrícolas, das estações de tratamento de esgotos da Ilha do Governador e da Penha no estado do Rio de Janeiro.** FIOCRUZ/ ENSP, M.Sc., Engenharia Sanitária e Saúde Pública. Rio de Janeiro, 1999 XIII, 89 p.

CHAPULA, C. A. M. O papel da infometria e da ciênciometria e sua perspectiva nacional e internacional, Brasília, **Ciência da Informação**, v. 27, n.2, p. 134-140, maio/ago 1998. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/%0D/ci/v27n2/macias.pdf>>. Acesso em: 15 março 2018.

CORREA, S. M. B. B. **Probabilidade e estatística.** 2. ed. Belo Horizonte: Universidade Católica de Minas Gerais, Minas Gerais, PUC - Minas Virtual, 2003. 116p.

COSCIONE, A. R; NOGUEIRA, T. A. R; PIRES, A. M. M. **Uso agrícola de lodo de esgoto: Avaliação após a Resolução n° 375 do CONAMA.** Botucatu: FEPAF, 2010. 407p.

DIAZ, L. F; SAVAGE, G. M; EGGERTH, L. L; GOLUEKE, C. G. **Composting and Recycling Municipal Solid Waste.** Florida, EUA: Lewis Publishers, 1993.

ERICKSON, B. E., 2002, Analyzing the ignored environmental contaminants. **Environmental Science & Technology**, 36: 140A-145A.

FELIX; F. F; NAVICKIENE, S; DÓREA, H. S. **Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs) como Indicadores da Qualidade dos Solos.** Revista da Fapese, v.3, n. 2, p. 39-62, jul./dez. 2007. Disponível em: < http://www.fapese.org.br/revista_fapese/v3n2/artigo4.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2018.

GOMES, S. B. V; NASCIMENTO, C. W. A; BIONDI, C. M; ACCIOLY, A. M. A. **Distribuição de metais pesados em plantas de milho cultivadas em Argissolo tratado com lodo de esgoto.** Ciência Rural, Santa Maria, v.36, n.6, p.1689-1695, nov-dez, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/cr/v36n6/a04v36n6.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2018.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Ranking do Saneamento 2017**. Instituto Trata Brasil. São Paulo: Go Associados, 2017. Disponível em: <<http://www.tratabrasil.org.br/datafiles/estudos/ranking/2017/relatorio-completo.pdf>>. Acesso em: 13 abr. 2018.

JARDIM, A; YOSHIDA, C; MACHADO FILHO, J. V. **Política nacional, gestão e gerenciamento de resíduos sólidos**. Barueri, SP: Manole, 2012.

JORDÃO, E. P; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 5. ed. Rio de Janeiro: Synergia Editora, 2009. 940p.

KAUARK, F; MANHÃES, F. C; MEDEIROS, C. H. **Metodologia da pesquisa: guia prático**. Itabuna: Vita Litterarum, 2010. 88p.

KHAI, N. M. **Effects of using wastewater and biosolids as nutrient sources on accumulation and behaviour of trace metals in Vietnamese soils**. 2007. 71p. Tese (Doutorado) - Universidade Sueca de Ciências Agrícolas. 2007. Uppsala: 2007.

LARA, A. L; FERREIRA, A. C; ANDREOLI, C. V; PEGORINI, E. S; INLENFELD, R. G. K. **Uso e manejo do lodo na agricultura**. Curitiba: SANEPAR/ PROSAB, 1999. 98p.

LIMA, L. M. Q. **Lixo: tratamento e biorremediação**. 3. ed. São Paulo: Hemus, 2004. 265p.

LONGO, A. D. **Minhoca, de fertilizadora do solo a fonte alimentar**. São Paulo: Ícone, 1987.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Agenda 21**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/agenda-21>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

MOREIRA, F. M. S; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2 ed. atualizada e ampliada. Lavras: Editora UFLA, 2006. 729.

MOTA, S. **Introdução à engenharia ambiental**. 4. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2006.

NASCIMENTO, C. W. A; BARROS, D. A. S; MELO, E. E. C; OLIVEIRA, A. B. Alterações químicas em solos e crescimento de milho e feijoeiro após aplicação de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28:385-392, 2004. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v28n2/20221.pdf>>. Acesso em: 22 mar. 2018.

PEREIRA NETO, J. T. **Manual de compostagem: processo de baixo custo**. ed. rev. e aum. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2007. 81p.

NOGUEIRA, T. A; OLIVEIRA, L. R; MELO, W. J; FONSECA, I. M; MELO, M. P; MELO, V. P; MARQUES, M. O. Cádmio, cromo, chumbo e zinco em plantas de milho e em latossolo após nove aplicações anuais de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.5, p.2195-2207, 2008. Disponível em: <<http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/3280/material/metaispesados1.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2018.

NUVOLARI, A. **Esgoto sanitário**: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

PEROVANO, D. G. **Manual de metodologia da pesquisa científica** [livro eletrônico]. Curitiba: InterSaberes, 2016.

PHILIPPI JR, A. **Saneamento, saúde e ambiente**: fundamentos para um desenvolvimento sustentável. Barueri, SP: Manole, 2005.

PRODANOV, C. C; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico [recurso eletrônico]**: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. 2. ed. Novo Hamburgo, Feevale, 2013.

RODRIGUES, J. S.; CORDEIRO, J.; CALAZANS, G. M.; CORDEIRO, J. L.; GUIMARÃES, J. C. S. Presença de fármacos e hormônios na água: uma análise cienciométrica. **Research, Society and Development**, v. 7, n. 6, p. 01-22.

SAITO, M. L. **O uso do lodo de esgoto na agricultura**: precauções com os contaminantes orgânicos. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2007. 35p.

SISSINO, C. L. S; OLVEIRA-FILHO, E. C. **Princípios de toxicologia ambiental**: conceitos e aplicações. Rio de Janeiro: Interciência, 2013. 216p.

TSUTIYA, M. T; COMPARINI, J. B.; SOBRINHO, P. A; HESPANHOL, I; MELO, J. MARQUES, M. O. **Biossólidos na agricultura**. 2. ed. São Paulo: ABES, 2002. 468p.

VANTI, N. A. P. Da bibliometria à webometria: uma exploração conceitual dos mecanismos utilizados para medir o registro da informação e a difusão do conhecimento, Brasília, **Ciência da Informação**, v. 31, n. 2, p. 152-162, maio/ago 2002. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ci/v31n2/12918.pdf>>. Acesso em: 16 mar. 2018.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2005. 452p.