

# **SUSTENTABILIDADE NA ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DE NANOMATERIAIS APLICADOS NA REMEDIAÇÃO DE SOLOS**

## **SUSTAINABILITY IN LIFE CYCLE ANALYSIS OF NANOMATERIALS APPLIED IN SOIL REMEDIATION**

Visentin, Caroline; Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, Brazil, caroline.visentin.rs@gmail.com  
Thomé, Antônio; Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, Brazil, thome@upf.br  
Braun, Adeli Beatriz; Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, Brazil, adelibeatrizbraun@hotmail.com  
Trentin, Adan Adan William Da Silva; Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, Brazil, adan\_trentin@hotmail.com  
Balestrin, Deisi; Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, Brazil, deisibalestrin@hotmail.com  
Rampanelli, Greice Barufaldi; Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, Brazil, greice.barufaldi@gmail.com

### **RESUMO**

A utilização de nanopartículas na remediação dos solos é uma tecnologia emergente e inovadora, que nasceu na década de 90 nos EUA. Com o avanço da remediação sustentável, a preocupação com a sustentabilidade das tecnologias de remediação deve ser considerada como critério na tomada de decisão. Inúmeras ferramentas podem ser empregadas de forma a avaliar a sustentabilidade na remediação de solos, como por exemplo, a Análise do Ciclo de Vida (ACV) que abrange a avaliação dos impactos ambientais. Entretanto, para ser considerada sustentável a ACV deve compreender também os pilares econômicos e sociais, deste modo uma abordagem mais ampla e holística é necessária. Neste contexto a ACV-Sustentável vem com uma ferramenta mais completa para avaliação da sustentabilidade na remediação de áreas contaminadas. Este estudo objetiva realizar uma análise sistemática e bibliométrica da produção científica do campo da ACV, Sustentabilidade e Nanopartículas aplicados na remediação de áreas contaminadas, representada pelos artigos científicos indexados na base de dados Scopus e ISI Web of Science. Assim, apresenta-se a evolução teórica do tema, os autores e países com maior número de publicações sobre o assunto. A primeira fase da pesquisa analisou a distribuição temporal da sustentabilidade na ACV e na remediação dos solos, na qual foram encontrados 60 publicações, entre os anos de 1998 a 2017. A segunda fase avaliou a aplicação da sustentabilidade na ACV na remediação de solos com nanomateriais, na qual foram encontradas apenas três publicações em 2008, 2011 e 2017. Sendo que apenas um avaliando de forma mais ampla o ciclo de vida do Nanoferro através de uma ACV e análise de custos. Conclui-se que a avaliação da sustentabilidade por meio da ACV-Sustentável na remediação de solos é uma ferramenta inovadora, sendo que a aplicação da sustentabilidade nos seus princípios, ambiental, econômico e social, ainda não foi realizada na nanoremediação.

### **ABSTRACT**

The use of nanoparticles in soil remediation is an emerging and innovative technology, which was born in the decade of 90 in the USA. With the advancement of sustainable remediation, the concern for the sustainability of remediation technologies should be regarded as a criterion in decision-making. Numerous tools can be employed to assess sustainability in soil remediation, such as the analysis of the Lifecycle (LCA) covering the evaluation of environmental impacts. However, to be considered sustainable the LCA must also understand the economic and social pillars, thereby a broader and holistic approach is needed. In this context, LCA-sustainable comes with a more comprehensive tool for assessing sustainability in the remediation of contaminated areas. This study aims to conduct a systematic and bibliometric analysis of the scientific production of the field of life cycle analysis, sustainability and nanoparticles applied in the remediation of contaminated areas, represented by the indexed scientific articles. In the database Scopus and ISI Web of Science. Thus, the theoretical evolution of the theme is presented, the authors and countries with the highest number of publications on the subject. The first phase of the research analyzed the temporal distribution of sustainability in LCA and the remediation of the soil, in which 60 publications were found, distributed among the years 1998 to 2017. The second phase evaluated the implementation of sustainability in LCA in the remediation of soils with nanomaterials, in which only three publications were found in 2008, 2011 and 2017. Only one more widely assessing the life cycle of Nanoiron through an LCA and cost analysis. It is concluded that the evaluation of sustainability through LCA-sustainable in soil remediation is an innovative tool, and the implementation of sustainability in its principles, environmental, economic and social, has not yet been carried out in the Nanoremediation.

## 1 - INTRODUÇÃO

O advento da nanotecnologia desencadeou um enorme potencial para o desenvolvimento de novos produtos e aplicações em vários setores industriais e de consumo (SOM, et al., 2010). A utilização de nanopartículas na remediação dos solos é uma tecnologia emergente e inovadora, que nasceu na década de 90 nos EUA, com aplicação para inúmeros poluentes, principalmente os compostos tóxicos persistentes, solventes orgânicos clorados, pesticidas e metais pesados (THOMÉ, et al., 2015; CECCHIN, et al., 2016). A crescente aplicação da nanoremediação ocorre devido à elevada eficiência desta técnica, menores tempos de tratamento, além de melhores custos e benefícios (GIL-DÍAZ, et al., 2017).

Desde 1997, muitos materiais em nanoescala foram pesquisados para remediação, como zeólitos, óxidos nanometálicos, nanotubos e fibras de carbono, enzimas e, nanopartículas bimetalicas (THOMÉ, et al., 2015). No entanto, dentre os nanomateriais empregados na remediação, o ferro nanoescala zero-valente, também conhecido como nanoferro (nZVI), se destaca como um dos nanomateriais mais utilizados para a remediação de sítios contaminados com compostos tóxicos (CECCHIN, et al., 2016). O seu amplo uso se dá em virtude da sua eficiência de remoção, sua praticidade para injetar em ambientes subsuperficiais, a sua baixa toxicidade e custo de produção (THOMÉ, et al., 2015; CECCHIN, et al., 2016; ZHAO, et al., 2016).

Ao longo dos anos, inúmeras mudanças na gestão de áreas contaminadas foram observadas. Em 1970, as preocupações dos tomadores de decisão baseavam-se nos custos dos processos de remediação, passando em 1980 a uma abordagem baseada na disponibilidade e viabilidade das tecnologias (POLLARD et al., 2004). Em 1990 a abordagem baseava-se no risco, sendo que em nos anos 2000, a preocupação com os impactos ambientais, sociais e econômicos passaram a ser empregados no processo de tomada de decisão, por meio da aplicação dos conceitos da remediação sustentável (RIZZO et al., 2016).

A remediação sustentável é considerada uma abordagem mais ampla e holística dos processos de remediação, na qual visa equilibrar o desenvolvimento econômico e social com os benefícios ambientais, através do uso criterioso/limitado dos recursos das ações corretivas (FORUM, 2009). As tecnologias de remediação tradicionais são baseadas nos custos do processo, na facilidade de implantação, no tempo e eficiência da descontaminação. Na sua essência estas técnicas compreendem a processos de escavação, lavagem, aquecimento, dentre outros, os quais resultam em consumo de energia e recursos naturais, geração de resíduos, efluentes e contaminação do ar. Estas abordagens ignoram os impactos econômicos e sociais associados, além de impactos ambientais mais amplos (HARCLERODE et al., 2015). Neste contexto, a inserção da sustentabilidade na remediação de solos se dá como uma ferramenta de suporte a tomada de decisão, de forma a promover as melhores opções de remediação considerando os aspectos ambientais, sociais e econômicos (REDDY e ADAMS, 2015).

Para uma técnica ser considerada sustentável, inúmeros fatores devem ser levados em conta nesta avaliação. Não basta apenas analisar os impactos e benefícios das diferentes tecnologias apenas durante o processo de remediação. A sustentabilidade é um processo mais amplo que deve englobar todos os aspectos ambientais, sociais e econômicos do processo ao longo de todo o seu ciclo de vida, considerando desde a extração do material empregado na tecnologia até a destinação final do material da remediação (RIZZO et al., 2016).

Neste sentido, torna-se fundamental a utilização de métodos e ferramentas com a finalidade de avaliar a sustentabilidade das técnicas de remediação, considerando todo o processo, em uma perspectiva do seu ciclo de vida. A Análise do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta de avaliação de impactos ambientais causados por um produto ou serviço ao longo do seu ciclo de vida, desde a extração de matéria-prima, até a destinação final, considerando todos os fluxos de materiais e energia em todas as fases de vida do produto (HEIJUNGS e WILOSO, 2014; MARTINS, et al., 2017). Em virtude desta característica de análise de todo o sistema, a ACV é utilizada como um meio de avaliação da sustentabilidade das tecnologias de remediação, além de ser uma ferramenta ambiental importante de apoio à decisão (SINGH, et al., 2008; HOTZE e LOWRY, 2011; HEIJUNGS e WILOSO, 2014; ISO, 2006). Entretanto, a Análise do Ciclo de Vida (ACV) na sua essência, não considera os aspectos sociais e econômicos do produto, deste modo, uma abordagem mais ampla é necessária, neste contexto aplicação da análise da sustentabilidade do ciclo de vida vem de forma a suprir as carências da ACV.

A Análise de Sustentabilidade do Ciclo de Vida (ASCV) consiste em uma ferramenta de avaliação de sustentabilidade que considera tanto os aspectos ambientais, quanto sociais e econômicos em uma análise das tecnologias de remediação (FINKBEINER, et al., 2010). A ASCV auxilia na determinação das técnicas, em uma perspectiva de ciclo de vida, com os menores impactos e maiores benefícios ambientais, sociais e econômicos, de forma a auxiliar os tomadores de decisão em busca de métodos mais sustentáveis. Equilibrando o consumo de recursos necessários para a remediação e os benefícios alcançados em termos de viabilidade econômica, conservação de recursos naturais e biodiversidade, e o aprimoramento da qualidade de vida nas comunidades vizinhas da área (FORUM, 2009; SLENDERS et al., 2017). Neste sentido, este estudo tem com objetivo realizar uma análise sistemática e bibliométrica da

produção científica do campo da ACV, Sustentabilidade e Nanopartículas aplicados na remediação de áreas contaminadas, representada pelos artigos científicos indexados na base de dados Scopus e ISI Web of Science.

## **2 - METODOLOGIA**

O presente estudo foi desenvolvido a partir de uma pesquisa sistemática e bibliométrica temporal de cunho quantitativo, objetivando ampliar o conhecimento referente às publicações relacionadas à Análise do Ciclo de Vida, Sustentabilidade e Nanopartículas, aplicados na remediação de áreas contaminadas, representada pelos artigos científicos indexados na base de dados Scopus (scopus.com) e ISI Web of Science (wokinfo.com).

A pesquisa bibliométrica, de acordo com Marcelo e Hayashi (2013), é uma técnica que surgiu no início do século XX como uma resposta a necessidade de estudos e avaliações da produção e comunicação científica, tendo como principais características a elaboração de índices de produção conhecimento científico. Além disso, esta pesquisa proporciona a análise da evolução teórica do tema, verificando os autores e países com maior número de publicações, além dos periódicos que são mais publicados, dentre outros índices.

A escolha pela utilização da base de dados Scopus e ISI Web of Science se deve ao fato destas serem as maiores bases de dados de resumos e citações de literatura revisada por pares, com ferramentas bibliométricas para acompanhar, analisar e visualizar a pesquisa. A Scopus contém mais de 22.000 títulos de mais de 5.000 editores em todo o mundo, abrangendo diferentes áreas. A ISI Web of Science, por sua vez, conta com mais de 55 milhões de registros nos principais periódicos, atas de congressos e livros para identificar as melhores pesquisas relevantes para de interesse (WEB OF SCIENCE, 2014). Deste modo, estas bases de dados permitem uma visão multidisciplinar da ciência e integram todas as fontes relevantes para a pesquisa básica, aplicada e inovação tecnológica através de patentes, fontes da web de conteúdo científico, periódicos de acesso aberto, memórias de congressos e conferências (SCOPUS, 2015).

A pesquisa foi realizada em duas fases, sendo que a primeira fase analisou a distribuição temporal da sustentabilidade na ACV e na remediação de solos, por meio dos tópicos "ACV/ Life Cycle Analyses, Life Cycle Assessment, Sustainability, Remediation", e a segunda fase avaliou a aplicação da sustentabilidade na ACV na remediação de solos com nanomateriais, empregando os seguintes tópicos "ACV/ Life Cycle Analyses, Life Cycle Assessment, Sustainability, Remediation, Nanomaterial(s)/ Nanoparticle(s)/ Nanotechnology, Nanoiron/ Nano scale zero valent iron". Em cada uma das fases foram avaliadas a evolução teórica do tema e os países e autores com maior número de publicações sobre o assunto.

## **3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Na primeira fase da pesquisa com os tópicos "ACV/ Life Cycle Analyses, Life Cycle Assessment, Sustainability e Remediation" foram encontradas 60 publicações. A distribuição destes artigos é referente ao recorte temporal entre os anos de 2007 a 2018, conforme apresentados na Figura 1.

A preocupação com a sustentabilidade das técnicas de remediação foi verificada a partir dos anos 2000, de acordo com Rizzo et al. (2016) em virtude da crescente inclusão da sustentabilidade na remediação dos solos, a qual foi um mecanismo incorporado nos processos de tomada de decisão quanto à remediação de áreas contaminadas, por meio da disseminação do termo "remediação sustentável", e da ACV como uma ferramenta de análise da sustentabilidade na remediação, através de uma abordagem do ciclo de vida (RIZZO, et al., 2016; TRENTIN, et al., 2017). Entretanto, a aplicação dos princípios da remediação sustentável e da ACV na remediação foi observada apenas em 2007.

A publicação do ano de 2007, referente à análise da sustentabilidade da técnica de estabilização e solidificação comparando com a disposição do solo contaminado em aterro sanitário, por meio de uma análise de ciclo de vida e de custos. A comparação realizada por Harbottle et al. (2007) indicou que os menores impactos ambientais referentes a geração de resíduo, transporte e utilização de matéria-prima foram verificados na utilização da técnica de estabilização e solidificação. Por meio de uma análise de multicritérios foi-se verificada a relação de custos-benefícios, ilustrando que a técnica de estabilização e solidificação é mais ambientalmente sustentável do que a disposição final em aterro sanitário (HARBOTTLE, et al., 2007).

Em 2008, os mesmos autores avaliaram, por meio de uma análise multicritérios com base nas etapas da ACV, a sustentabilidade de diferentes tecnologias de remediação, empregadas em cinco projetos distintos de remediação de solo contaminado concluídas no Reino Unido entre 1997 e 2002 (HARBOTTLE, et al., 2008). As tecnologias de remediação empregadas foram estabilização e solidificação *in-situ*, lavagem do

solo, biorremediação *ex-situ*, sistema de cobertura e escavação, e disposição para aterro sanitário (HARBOTTLE, et al., 2008). Com base nas tecnologias empregadas em cada projeto de remediação, Harbottle, et al. (2008) verificaram que o projeto do sistema de cobertura foi classificado como tecnicamente/ambientalmente sustentável, enquanto que os processos *in-situ* resultaram em menores impactos ambientais que os processos realizados *ex-situ*, uma vez que, a escavação do solo contaminado para tratamento, resulta em maior exposição dos trabalhadores aos poluentes. Os processos de escavação e destinação em aterros são aqueles que geram os maiores impactos ambientais (HARBOTTLE, et al., 2008).

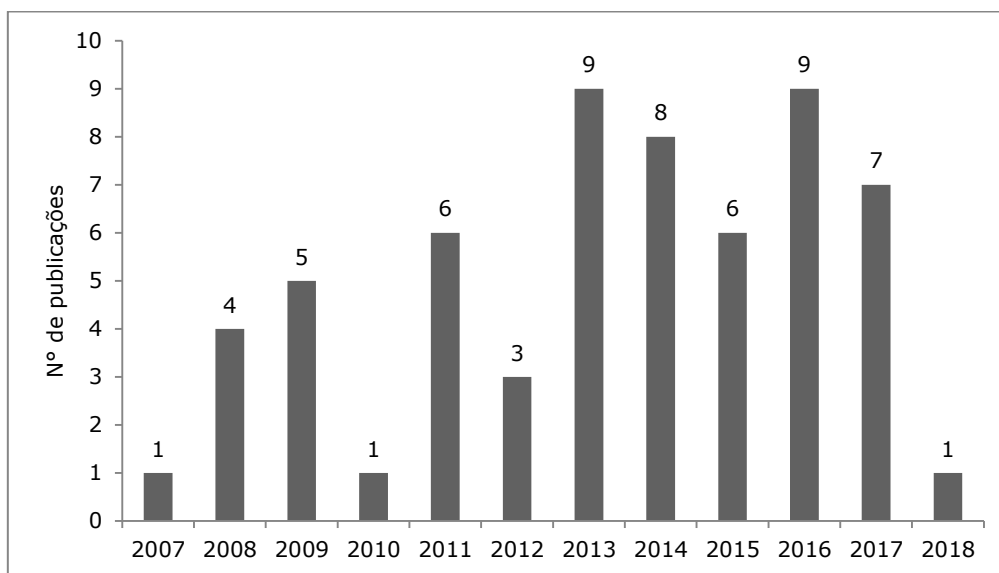


Figura 1 - Evolução temporal da produção científica sobre Análise do Ciclo de Vida, Sustentabilidade e Remediação.

Fonte: Elaborado pelo autor com base Scopus e Web of Science (2007 – 2018).

A combinação das três técnicas da ACV (ambiental, econômica e social), para uma abordagem de ciclo de vida sustentável, tem sido teorizada desde 2008 (KLOEPFFER, 2008), sendo que em 2012 a publicação "Rumo a uma Avaliação de Sustentabilidade do Ciclo de Vida (ASCV)" (VALDIVIA, et al., 2012), demonstra a viabilidade desta abordagem por meio de um quadro orientativo, juntamente com seus benefícios potenciais. Neste sentido, observa-se um aumento nos estudos sobre Análise do Ciclo de Vida, Sustentabilidade e Remediação a partir de 2008, com declínio em 2010 e 2012. Entretanto, a partir de 2013, observa-se um crescimento nas publicações, sendo que estas do período de 2013 a 2018 correspondem a 67% do total. Este crescimento é explicado devido à disseminação da aplicação da sustentabilidade tanto na remediação de solos quanto na ACV (VALDIVIA, et al., 2012; RIZZO, et al., 2016; TRENTIN, et al., 2017).

Inúmeros estudos buscavam avaliar de que forma a ACV-Sustentável poderia ser inserida em uma análise da sustentabilidade dos processos de remediação. Hou et al. (2014a) em seu trabalho propôs a utilização de um modelo híbrido de ACV para a análise da sustentabilidade da remediação dos sedimentos do parque Olímpico de Londres. Através da comparação dos impactos ambientais referentes ao processo de lavagem de solos e destinação em aterro sanitário. O modelo proposto auxilia na redução dos erros de truncamento; na incorporação dos benefícios consequentes (isto é, impacto terciário) de remediação; na avaliação dos impactos sociais e econômicos além do impacto ambiental (HOU, et al., 2014a). Da mesma forma que concluído por Harbottle et al. (2007), a tecnologia de remediação, no caso, a lavagem de solos, mostrou ser mais sustentável do que a destinação final em aterro. A ACV auxilia na verificação dos impactos do ciclo de vida das tecnologias de remediação, analisando o consumo de energia e água, a geração de resíduos e efluentes, dentre outros, auxiliando os tomadores de decisão na verificação de alternativas mais sustentáveis, como por exemplo, a utilização de energias menos poluentes (HOU, et al., 2014b).

De acordo com Martins, et al. (2017) a ACV foi aplicada com sucesso em várias áreas, auxiliando no desenvolvimento e melhoria de produtos e processos, e também na tomada de decisões (SINGH, et al., 2008). Na remediação de solos, a ACV é geralmente usada para avaliar o desempenho de diferentes tecnologias, comparando os impactos ambientais associados a cada tecnologia de remediação, sendo que vários estudos indicam que a escavação e tratamento *ex-situ* de solo contaminado resultam nos maiores impactos ambientais, em virtude do alto consumo de energia e elevada emissões (por exemplo HARBOTTLE, et al., 2007; HARBOTTLE, et al., 2008; CAPPUYNS, 2010; HOU, et al. 2014a; VIGIL, et al.,

2015; HOU, et al., 2016; SONG, et al., 2018). Entretanto, os métodos de remediação *in-situ* são muitas vezes mais demorados, além de haver muito mais incertezas em relação ao prazo em que a remediação pode ser alcançada e a sua eficiência (CAPPUYNS, 2010).

O desenvolvimento sustentável traz na sua essência três áreas: econômica, ambiental e social. A interpretação estreita em que a sustentabilidade e o desenvolvimento sustentável se restringem apenas ao pilar ecológico é substituída pela interpretação mais ampla na qual os três pilares devem ser considerados de forma igual, sendo que, para a sustentabilidade ser alcançada os três aspectos devem estar em equilíbrio (EIZENBERG, et al., 2017).

Uma das grandes carências dos estudos já realizados consiste na aplicação do conceito de sustentabilidade de forma errônea, uma vez que, para ser sustentável, os aspectos ambientais, econômicos e sociais devem ser considerados de forma conjunta. A maioria dos estudos realiza uma análise de "sustentabilidade" considerando apenas o pilar ambiental (CAPPUYNS, 2013; FERDOS e ROSÉN, 2013; GALLAGHER, et al., 2013; HOU, et al., 2014b; BRECHEISEN e THEIS, 2015; VIGIL, et al., 2015; HOU, et al., 2016; VOCCIANTE, et al., 2016), econômico (GALLAGHER e SPATARI, 2011) ou ambiental e econômico (HARBOTTLE, et al., 2007; MARTINS, et al., 2017). A avaliação de sustentabilidade considerando os três pilares é realizada por meio de ACV, análise socioeconômica e análise de multicritérios (HOU, et al., 2014a; GOLDENBERG e REDDY, 2014; SØNDERGAARD, et al., 2017; HOU, et al., 2017; SONG, et al., 2018).

Considerando a tendência a inclusão da sustentabilidade na ACV, por meio de uma abordagem mais ampla através da Análise do Ciclo de Vida Sustentável, e o crescimento destes conceitos, a perspectiva para as publicações, é dessa análise de sustentabilidade abrangendo além dos impactos ambientais das tecnologias de remediação, os impactos sociais e econômicos. No estudo de Song, et al. (2018) esta abordagem já é observada, por meio do desenvolvimento de um conjunto de indicadores para a avaliação da remediação sustentável na China. Através destes indicadores, uma ACV foi desenvolvida para avaliar os impactos ambientais, e uma análise de multicritérios para os impactos econômicos e sociais, de forma a comparar duas alternativas de remediação de um local contaminado com metais pesados e compostos orgânicos, localizado na China. As alternativas de comparação dos impactos foram: (1) método de tratamento múltiplo incluindo os processos de lavagem de solos, dessorção termal e estabilização e solidificação; e (2) correspondendo à escavação do solo contaminado e destinação em aterro. Por meio desta análise de sustentabilidade do ciclo de vida, Song, et al. (2018) concluíram que a alternativa (1) resultou em uma menor geração de resíduos, melhor segurança do trabalhador e impactos locais preferenciais, levando a maiores pontuações nas áreas ambiental e social e econômicos. De acordo com Song, et al. (2018) na análise da sustentabilidade, principalmente em relação aos aspectos sociais, a participação da sociedade é fundamental para promover um estudo mais abrangente e de acordo com a realidade do local.

Os autores que mais publicaram sobre a ACV, sustentabilidade e remediação no período analisado na base de dados Scopus e Web of Science são apresentados na Figura 2. Nesta análise foram considerados todos os autores que publicaram sobre o tema, sendo destacados aqueles com as maiores publicações, tanto como autores principais, como autores colaboradores. Com isso, destaca-se o pesquisador Hou, D. (seis publicações), Al-Tabbaa, A. (cinco publicações) e Cappuyns, V. (quatro publicações). Em seguida os autores com Harbottle, M. J., Gallagher, P. M., Favara, P. e Brecheisen, T. com três publicações cada.

O autor Hou, D. (Deyi Hou) é o principal autor das publicações referentes a ACV, sustentabilidade e remediação, com apenas uma colaboração, e as demais como autor principal. As suas publicações podem ser divididas em estudos de comparação dos impactos ambientais entre diferentes tecnologias de remediação (HOU, et al., 2014a; HOU, et al., 2014b; HOU, et al., 2016; HOU et al., 2017; SONG, et al., 2018), e também em uma análise detalhada sobre o crescimento da remediação sustentável, bem como, a proposta de um quadro para a avaliação da sustentabilidade e a tomada de decisões (HOU; AL-TABBAA, 2014). Além disso, destaca-se também o desenvolvimento e aplicações de diferentes metodologias para a análise do ciclo de vida, como um modelo híbrido de ACV (HOU, et al., 2014b), uma metodologia para a avaliação a sustentabilidade em solos agrícolas da China, propondo indicadores ambientais, econômicos e sociais para a avaliação (HOU, et al., 2017), e também através da seleção de indicadores ambientais, sociais e econômicos para uma análise de sustentabilidade do ciclo de vida (SONG, et al., 2018).

As publicações de Al-Tabbaa, A. (Abir Al-Tabbaa) referem-se a colaborações com os autores Hou, D. (HOU e AL-TABBAA, 2014; HOU, et al., 2014b) e Harbottle, M. J. (HARBOTTLE, et al., 2007; HARBOTTLE, et al., 2008). As publicações de Cappuyns, V. (Valerie Cappuyns) trazem uma visão geral sobre a aplicação da ACV (e suas metodologias), bem como as limitações de muitos estudos, os quais não consideram os aspectos monetários destas técnicas e muito menos os impactos para a saúde humana e a ecotoxicidade (CAPPUYNS, 2011). A aplicação da ACV para avaliar os impactos ambientais de diferentes tecnologias de remediação (para três estudos de caso) também foi realizado por Cappuyns, por meio de uma análise empregando de forma simultânea as ferramentas de "Melhor Técnica Disponível Não Incluindo Custos

Excessivos", ACV e uma calculadora de CO2 (CAPPUYNS, 2013). Além de uma análise das ferramentas avaliação da sustentabilidade na remediação, elencando critérios que abrangem os aspectos ambientais, econômicos e sociais em um quadro de suporte a tomada de decisão (HUYSEGOMS; CAPPUYNS, 2017).

Os demais autores, Gallagher, P. M., Favara, P., e Brecheisen, T., avaliaram os custos (GALLAGHER e SPATARI, 2011), impactos ambientais de diferentes processos de remediação (GALLAGHER, et al., 2013; BRECHEISEN e THEIS, 2013; BRECHEISEN e THEIS, 2015; FAVARA, et al., 2016; FAVARA e GAMLIN, 2017).

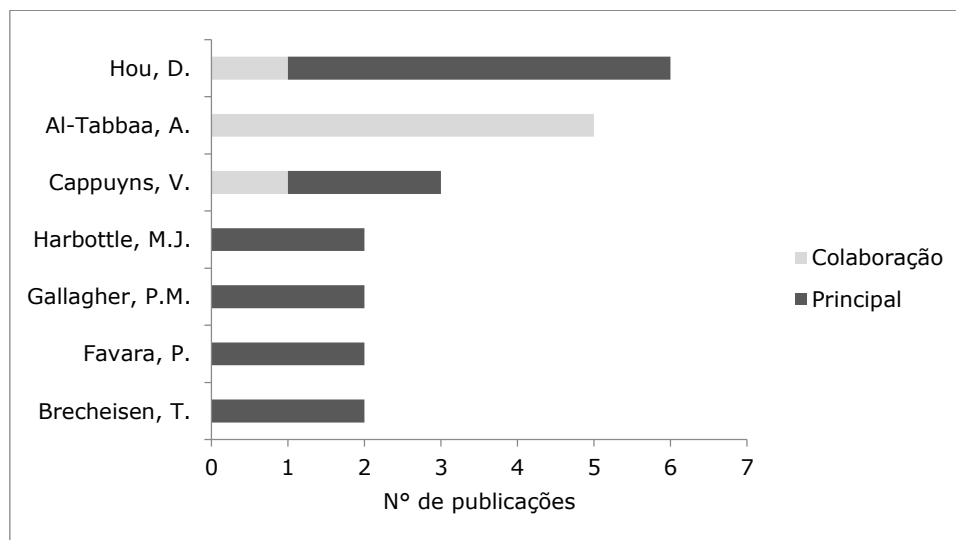


Figura 2 - Principais autores da produção científica sobre Análise do Ciclo de Vida, Sustentabilidade e Remediação.

Fonte: Elaborado pelo autor com base Scopus e Web of Science (2007 – 2018).

De acordo com Reddy e Adams (2015) a ACV atua como uma ferramenta de avaliação da sustentabilidade ambiental, por meio de uma análise dos impactos ambientais associados a um produto ou serviço ao longo do seu ciclo de vida. Em virtude da inserção da ACV como uma ferramenta da remediação sustentável, pode-se verificar a presença dos autores levantados nesta primeira fase da pesquisa (Figura 2), em inúmeras publicações referentes à remediação sustentável. Conforme detalhado por Trentin, et al., (2017) os principais autores relacionados a publicações referentes a remediação sustentável, também foram observados nos estudos de ACV, sustentabilidade e remediação, sendo estes: Hou, D., Al-Tabbaa, A. e Cappuyns, V. (totalizando juntos 27 publicações referentes a remediação sustentável) (TRENTIN, et al., 2017).

Os países com maior número de publicações são apresentados na Figura 3, sendo os Estados Unidos aquele com maior destaque em número de publicações, com um total de 19. Após estão o Reino Unido, com oito publicações, A China com cinco publicações, a Alemanha, Bélgica e Itália com quatro publicações. Dinamarca, Espanha, Finlândia e Noruega possuem duas publicações.

O maior número de publicações é identificado nas principais economias globais, com EUA e Reino Unido, sendo estes países apresentam altas taxas de conscientização e adoção da remediação sustentável, em comparação com os países em desenvolvimento, os quais apresentam menor sensibilização com a sustentabilidade de áreas contaminadas (TRENTIN, et al., 2017). A maior preocupação dos países desenvolvidos com a remediação sustentável se dá em virtude da existência de organizações e instituições voltadas exclusivamente para a introdução e difusão dos conceitos de sustentabilidade nas atividades de remediação (TRENTIN, et al., 2017). Além disso, de acordo com Song et al., (2018) a China apresenta-se com um dos maiores mercados da remediação do mundo, e com base nos avanços da remediação sustentável, está buscando adotar estes princípios nos projetos de remediação do país.

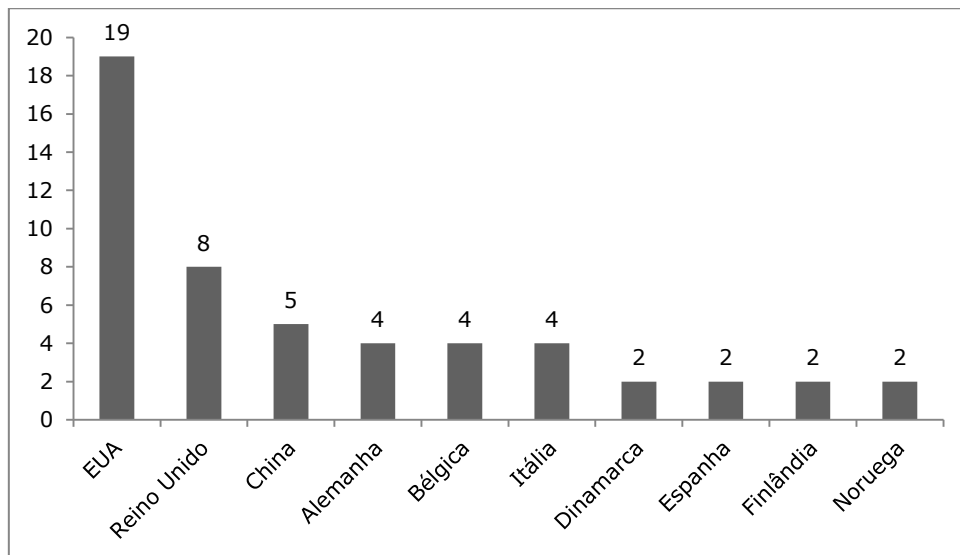


Figura 3 - Principais países da produção científica sobre Análise do Ciclo de Vida, Sustentabilidade e Remediação.

Fonte: Elaborado pelo autor com base Scopus e Web of Science (2007 – 2018).

A segunda fase desta pesquisa avaliou a aplicação da sustentabilidade na ACV e na remediação de solos com nanomateriais, em especial o nanoferro, em virtude da sua ampla aplicação nos processos de nanoremediação. Os tópicos empregados nesta fase foram: "ACV/Life Cycle Analyses/Life Cycle Assessment, Sustainability, Remediation, Nanomaterial(s)/Nanoparticle(s)/Nanotechnology, Nanoiron/Nano scale zero valent iron". Nesta etapa foram encontradas apenas três publicações, sendo estas em 2008 (SINGH, et al., 2008), 2011 (HOTZE e LOWRY, 2011) e 2017 (MARTINS, et al., 2017).

Os autores principais das publicações desta segunda fase da pesquisa (SINGH, et al., 2008; HOTZE e LOWRY, 2011; MARTINS, et al., 2017) não foram observados em nenhum dos estudos da primeira fase. Em relação aos países, duas das publicações são dos Estados Unidos (SINGH, et al., 2008; HOTZE e LOWRY, 2011), e uma de Portugal (MARTINS, et al., 2017).

Diferentemente do observado na análise da aplicação da ACV e sustentabilidade na remediação de áreas contaminadas com inúmeros estudos de caso referentes a diferentes análises, considerando os impactos ambientais, ambientais e econômicos, e também os impactos dos três pilares da sustentabilidade. Os estudos com nanomateriais ainda estão em fase inicial do conhecimento dos impactos ambientais associados à produção, comparando diferentes processos de fabricação (MARTINS, et al., 2017). Em virtude do fato da aplicação de nanomateriais na remediação de solos ser um processo relativamente novo, os estudos concentram-se na análise de impactos ambientais resultante na fabricação dos nanomateriais, enquanto que, em comparação com as técnicas de remediação, as quais são constantemente aplicadas, além de estarem consolidadas no mercado internacional da remediação.

Em relação à aplicação dos nanomateriais na remediação de áreas contaminadas, e suas publicações, esta teve o seu início em 2003 (LEDOUX, et al., 2003), sendo que ao longo dos anos inúmeros estudos foram realizados de forma a avaliar diferentes aplicações dos nanomateriais na descontaminação do ambiente. A inclusão da Análise do Ciclo de Vida na nanoremediação ocorreu a partir de 2008, com o estudo de Singh, et al. (2008).

Com a crescente disseminação dos princípios da remediação sustentável, a necessidade de empregar ferramentas de avaliação da sustentabilidade das técnicas de remediação, fez com que, em 2004, por meio do estudo de Beaver e Tanzil (2004), a ACV foi proposta como uma ferramenta de avaliação dos impactos do ciclo de vida dos nanoprodutos, de forma a identificar os benefícios e riscos associados aos nanomateriais. Em 2007, Rickerby e Morrison (2007) avaliaram a perspectiva europeia dos nanomateriais e a sua relação com o ambiente, elencando os pontos positivos e negativos da nanotecnologia, bem como as principais aplicações dos nanomateriais neste cenário. De acordo com os autores, a ACV é uma ferramenta importante para a avaliação dos impactos ambientais dos nanomateriais, a qual auxilia em uma análise mais aprofundada sobre os impactos do ciclo de vida destes nanoprodutos (RICKERBY e MORRISON, 2007).

Em relação aos estudos resultantes da segunda fase desta pesquisa, Singh, et al. (2008), compara os impactos ambientais da produção de nanotubos de carbono purificados, de dois processos catalíticos de deposição de vapor químico. Os nanotubos de carbono consistem em camadas de átomos de carbono enroladas em tubos com diâmetro de nano-escala (SINGH, et al., 2008). Podem ser aplicados na

fabricação de fibras compostas para melhores propriedades térmicas, elétricas e mecânicas, na eletrônica e óptica, além de aplicações ambientais como na remediação de solos e águas subterrâneas, no tratamento de águas superficiais, e também no monitoramento da qualidade das águas, detectando poluentes e agentes patogênicos (SINGH, et al., 2008; SONG, et al., 2017; XUE, et al., 2017).

A avaliação dos impactos ambientais da produção de nanotubos de carbono, do estudo de Singh et al. (2008), foi feita através de uma análise detalhada de dois processos produtivos: (1) desproporção de monóxido de carbono de alta pressão em um reator de fluxo de encapsulamento, e (2) reator catalítico de leito fluidizado de cobalto-molibdênio. De acordo com os autores, ambos os processos resultam em um alto consumo de recursos como água, gás natural, carvão, dentre outros, além da geração de resíduos e efluentes (não convencionais como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Co}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MoO}_3$ ,  $\text{NaOH}$ ), bem como, emissões atmosféricas (contendo  $\text{FeCl}_2$ ,  $\text{CoCl}_2$  e  $\text{MoCl}_2$  juntamente com carbono) (SINGH, et al., 2008).

Os impactos ambientais resultantes dos dois processos produtivos de nanotubos de carbono avaliados por Singh et al. (2008) foram analisados por meio dois estudos de caso, o primeiro denominado projeto base, no qual considera-se que todas as saídas dos processos correspondem a emissões e resíduos, ou seja, supõe-se que os fluxos de saída, exceto o fluxo principal do produto, estão dispostos ao meio ambiente; e o segundo, compreende ao novo design, que considera a reciclagem das saídas dos processos, assumindo que todo o material que está sendo gerado além do produto principal é um subproduto e pode ser usado para gerar receita para cada processo. A ACV realizada no estudo foi feita por meio da metodologia TRACI, no programa computacional SimaPro<sup>®</sup>7.0. Em relação aos impactos ambientais do primeiro estudo de caso, o desempenho do processo produtivo (2) é melhor, uma vez que, a sua contribuição na maioria das categorias de impacto é menor (SINGH, et al., 2008).

No segundo estudo de caso, do estudo de Singh et al. (2008), considerando a reciclagem dos subprodutos, os impactos e ambos os processos reduziu o número de contribuições para o aquecimento global e a formação de poluição atmosférica. Em uma análise geral, o processo (2) resulta em menores impactos ambientais também neste novo projeto, considerando a reciclagem. Ainda, de acordo com Singh et al., (2008) em algumas categorias de impactos cenários diferentes foram observados, demonstrando que, dependendo do cenário de reciclagem e eliminação de resíduos considerados, o desempenho de cada processo pode mudar significativamente.

No estudo de Singh et al. (2008) os resultados da ACV fornecem ao fabricante informações mais abrangentes sobre cada processo para uma melhor tomada de decisões. Por meio da análise de diferentes configurações, pode-se melhorar o processo produtivo, melhorando o desempenho ambiental, diminuindo a geração de resíduos, efluentes e emissões, bem como, na diminuição dos impactos ambientais. A possibilidade de melhoria do processo produtivo, de forma a auxiliar na tomada de decisão, é uma das principais vantagens dos estudos de ACV. De acordo com Singh, et al., (2008), os resultados da ACV fornecem informações importantes, que podem ser utilizadas na fase de projeto dos processos produtivos, de forma a promover uma melhoria da sustentabilidade ambiental dos métodos de fabricação dos nanomateriais, como os nanotubos de carbono.

O estudo de Hotze e Lowry (2011) avaliou o potencial dos nanomateriais para melhorar a sustentabilidade do tratamento e remediação de águas superficiais e subterrâneas, por meio da utilização destes nanoproductos de forma a melhorar as tecnologias existentes (HOTZE e LOWRY, 2011). Ao longo do estudo são avaliados e detalhados inúmeros processos de tratamento (tecnologias de desinfecção e oxidação, utilização de membrana), e remediação de águas subterrâneas empregando nanomateriais, em especial o ferro nanoescala zero valente (nZVI).

De acordo com Hotze e Lowry (2011) os processos de fabricação dos nanomateriais devem ser projetados em conjunto com a ACV, uma vez que, a ACV auxilia na análise da aquisição de matérias-primas, na fabricação, no uso e na destinação final dos nanomateriais, bem como, os custos associados nestas etapas. As matérias-primas de muitos nanoproductos são oriundas de processos com alta demanda de recursos, como energia; atividades geradoras de impactos ambientais, como no caso da mineração para a extração de titânio, por exemplo, (HOTZE e LOWRY, 2011). Além disso, muitos dos processos possuem altos custos, como os minérios metálicos, por exemplo, o paládio. Entretanto, muitas fontes de energia para a produção dos nanomateriais, são oriundas de fontes renováveis ou recicláveis, como, por exemplo, a obtenção de metais e de polímeros de acetato (HOTZE e LOWRY, 2011).

Os processos de fabricação dos nanomateriais também compreendem a atividades com alto consumo de energia, além de gerarem inúmeros impactos ao meio ambiente (HOTZE e LOWRY, 2011; THOMÉ, et al., 2015; SRIVASTAVA, et al., 2016). Em contrapartida aos métodos tradicionais de fabricação dos nanomateriais, os métodos verdes vêm ganhando força devido às reduções das emissões, baixa toxicidade e custos de produção (YADAV, et al., 2016; SRIVASTAVA, et al., 2016). Hotze e Lowry (2011) relatam também a carência de estudos referentes a uma análise mais aprofundada dos impactos gerados



ao longo do ciclo de vida dos nanomateriais, bem como, os produtos e subprodutos gerados ao longo da sua fabricação. Além disso, outra preocupação relatada por Hotze e Lowry (2011) se dá no comportamento dos nanomateriais empregados na remediação, e no tratamento de água, uma vez que, quando em contato com o contaminante, o nanoproduto pode liberar durante o ciclo de vida, inúmeros produtos (THOMÉ, et al., 2015; CECCHIN, et al., 2016). Deste modo, de acordo com os autores, é importante projetar processos enquanto conscientes do destino final dos nanomateriais (HOTZE e LOWRY, 2011).

Uma análise mais abrangente e inserida nos objetivos deste trabalho, consiste na publicação de Martins et al. (2017), a qual compreendeu na comparação dos custos e impactos ambientais da produção do nanoferro em escala laboratorial, por dois métodos de síntese, tradicional (utilizando a redução através do boro-hidreto de sódio) e verde (usando extratos de produtos naturais ou resíduos), através de uma análise do ciclo de vida. De acordo com Cecchin, et al. (2016) o nanoferro é um dos principais nanomateriais empregados na remediação, correspondendo a 90% dos estudos realizados na área. Em virtude das suas características, que conferem maiores eficiências de tratamento, menor tempo comparado com outras tecnologias, além de possuir melhores custos e benefícios, fazem com que esta técnica seja aplicada em inúmeros projetos, principalmente na América do Norte, Europa e Ásia (THOMÉ, et al., 2015; CECCHIN, et al., 2016).

A avaliação dos impactos estudo de Martins et al. (2017) foi realizada por meio de uma abordagem "cradle to gate", ou seja, desde a extração da matéria prima até a síntese do nanoferro, e a metodologia empregada foi a IMPACT 2002+. Neste sentido, a ACV foi empregada de forma a avaliar os impactos ambientais dos dois métodos, sendo que no método tradicional foram observados os maiores impactos (aproximadamente 50% superior a síntese verde) em todas as categorias de danos, em especial na saúde humana e mudanças climáticas. Os principais impactos da síntese verde dependem principalmente da produção de eletricidade devido ao estágio de extração da matéria-prima (representando 80% dos impactos ambientais do processo de síntese). Conforme os autores, os impactos ambientais do método de síntese verde podem ser reduzidos pela otimização do estágio de extração, o qual consiste no ponto de acesso deste método (MARTINS, et al., 2017).

Outra vantagem dos estudos de ACV consiste na verificação dos estágios críticos de cada processos de síntese dos nanomateriais, o qual pode auxiliar na melhoria destes processos, bem como na tomada de decisão. No caso do nanoferro, conforme detalhado por Martins, et al. (2017), na síntese tradicional, o estágio crítico consiste na adição de boro-hidreto de sódio (relacionado ao boro-hidreto de sódio produção) e na síntese verde (o estágio crítico é verificado na fase de extração).

Em relação aos custos de produção, o método de síntese verde também resultou em menores custos que o método de síntese tradicional (aproximadamente oito vezes menor) (MARTINS, et al., 2017). O principal custo associado ao método tradicional consiste na aquisição do boro-hidreto.

De acordo com Yadav, et al. (2016) a obtenção de nanomateriais por meio de métodos de síntese verde ou biológica são uma forma de diminuir os impactos adversos resultantes da produção por técnicas físicas e químicas, através de uma produção eco amigáveis, econômicos e estáveis. A vantagem da utilização da produção por meio da via biológica se dá devido à rapidez e facilidade de síntese, além do controle da toxicidade e características como o tamanho (YADAV, et al., 2016). Em relação aos métodos de síntese verde, as suas principais vantagens resultam no baixo custo de produção, a geração de menores impactos ambientais (YADAV, et al., 2016; MARTINS, et al., 2017)

Outra forma de melhorar os aspectos ambientais negativos resultantes da produção da nanotecnologia é proposta por Srivastava et al (2016), através da nanotecnologia verde, a qual busca na sua produção incorporar métodos que sejam ambientalmente amigáveis, seguras para o meio ambiente e com um custo-benefício adequado, como no caso a química verde, os princípios de engenharia verde, e a biossíntese. Uma das soluções propostas pela nanotecnologia verde aos desafios ambientais é a produção de nanomateriais com menor deterioração do meio ambiente, e a saúde humana (SRIVASTAVA, et, al., 2016).

Apesar das inúmeras vantagens de aplicação dos nanomateriais na remediação ambiental, conforme analisado nos estudos de Singh, et al., (2008), Hotze e Lowry (2011) e Martins, et al. (2017), uma das desvantagens do uso da nanotecnologia refere-se aos impactos ambientais de produção das nanoprodutos, os quais além de consumirem uma grande quantidade de recursos como água e energia, dependem de elevada mão-de-obra, o que geram altos custos de produção (SRIVASTAVA, et, al., 2016). Além disso, inúmeras incertezas estão associadas ao uso de nanomateriais nos produtos, e pouco se sabe sobre os efeitos em longo prazo da utilização destes nanoprodutos (BEAVER e TANZIL, 2004; BARBERIO, et al., 2014; VAN HARMELEN, et al., 2016; SUBRAMANIAN, et al., 2016).

## 4 - CONCLUSÕES

A análise bibliométrica proporciona uma visão geral dos estudos publicados sobre a Análise do Ciclo de Vida e sustentabilidade na remediação de áreas contaminadas e também em relação ao uso de Nanomateriais neste processo. Além disso, estas informações trazem o conhecimento científico sobre a evolução do tema, sua distribuição temporal, bem como, os principais autores e países destas publicações.

A pesquisa demonstrou que a sustentabilidade na ACV e a remediação é um tema ainda novo, mas em ascensão, verificado pelo maior número de publicações nos últimos cinco anos, atingindo o ápice nos anos de 2013 e 2016. Entretanto, a maioria destas publicações concentra-se em avaliações da sustentabilidade considerando apenas o pilar ambiental, porém, observa-se um maior interesse na abordagem da sustentabilidade como um todo, considerando os impactos ambientais, sociais e econômicos das tecnologias de remediação, principalmente no ano de 2017. Neste sentido, a perspectiva é que os estudos da ACV na remediação de solos caminhem para uma análise da sustentabilidade completa das tecnologias de remediação.

Conforme os dados analisados na primeira fase da pesquisa, o autor que mais obteve publicações foi Deyi Hou com seis, sendo destas cinco como autor principal, e em segundo lugar o autor Al-Tabbaa, A. com cinco publicações e Cappuyns, V. com quatro publicações. Nesta fase ainda, os Estados Unidos são o país que mais publica artigos na área da ACV, sustentabilidade e remediação, seguido pelo Reino Unido e China.

Na segunda fase desta pesquisa foram analisadas as publicações referentes à aplicação da sustentabilidade na ACV na remediação com nanomateriais, resultando em apenas três publicações. Destas, duas avaliaram os impactos ambientais da produção de nanomateriais de forma teórica e quantitativa, enquanto que uma comparou os impactos ambientais e custos de dois processos produtivos do nanoferro. Destas publicações, duas são dos Estados Unidos e uma de Portugal.

Em virtude do aumento das áreas contaminadas, e dos projetos de remediação, novas tecnologias foram desenvolvidas, como o caso da nanoremediação. Neste sentido, com base nas análises realizadas nesta pesquisa, percebe-se que a ACV em uma abordagem sustentável, pode ser aplicada como uma ferramenta de avaliação dos impactos das tecnologias de remediação (tradicionais e aquelas com nanomateriais), auxiliando na tomada de decisão, considerando os princípios da remediação sustentável.

## REFERÊNCIAS

- Barberio, G. et al. (2014). Combining life cycle assessment and qualitative risk assessment: The case study of alumina nanofluid production. *Science Of The Total Environment*, v. 496, p.122-131.
- Beaver, E. R., Tanzil, D. (2004). Application of sustainability tools to nanotechnology *In: 2004 AIChE Spring National Meeting, Conference Proceedings*, pp.3006 – 3033.
- Brecheisen, T.; Theis, T. (2013). The Chicago Center for Green Technology: life-cycle assessment of a brownfield redevelopment project. *Environmental Research Letters*, [s.l.], v. 8, n. 1, p.1-13, 1 mar. 2013.
- Brecheisen, T.; Theis, T. (2015). Life cycle assessment as a comparative analysis tool for sustainable brownfield redevelopment projects. *Assessing And Measuring Environmental Impact And Sustainability*, p.323-365.
- Cappuyns, V. (2011). Possibilities and limitations of LCA for the evaluation of soil remediation and cleanup. *Sustainable Chemistry*, p.213-223.
- Cappuyns, V. (2013). Environmental impacts of soil remediation activities: quantitative and qualitative tools applied on three case studies. *Journal Of Cleaner Production*, v. 52, p.145-154.
- Cecchin, Iziquiel et al. (2017). Nanobioremediation: Integration of nanoparticles and bioremediation for sustainable remediation of chlorinated organic contaminants in soils. *International Biodeterioration & Biodegradation*, v. 119, p.419-428.
- Eizenberg, E.; Jabareen, Y. (2017). Social Sustainability: A New Conceptual Framework. *Sustainability*, v. 9, n. 1, p.68-84.
- Favara, P. et al. (2016). Sustainable Remediation Considerations for Treatment of 1,4-Dioxane in Groundwater. *Remediation Journal*, v. 27, n. 1, p.133-158.
- Favara, P.; Gamlin, J. (2017). Utilization of waste materials, non-refined materials, and renewable energy in in situ remediation and their sustainability benefits. *Journal Of Environmental Management*, v. 204, p.730-737.

- Ferdos, F. and Rosén, L. (2013). Quantitative Environmental Footprints and Sustainability Evaluation of Contaminated Land Remediation Alternatives for Two Case Studies. *Remediation*, v. 24, p. 77–98.
- Finkbeiner, Matthias et al. (2010). Towards Life Cycle Sustainability Assessment. *Sustainability*, v. 2, n. 10, p.3309-3322.
- Gil-díaz, M. et al. (2016). A nanoremediation strategy for the recovery of an As-polluted soil. *Chemosphere*, v. 149, p.137-145.
- Gallagher, P. M.; Spatari, S. (2011). Life Cycle Approaches for Brownfields Redevelopment. *Geotechnical Risk Assessment and Management*. ASCE, p. 736-746.
- Gallagher, P. M.; Spatari, S.; Cucura, J.. (2013). Hybrid life cycle assessment comparison of colloidal silica and cement grouted soil barrier remediation technologies. *Journal Of Hazardous Materials*, v. 250-251, p.421-430.
- Goldenberg, M.; Reddy, K. R. (2014). Sustainability Assessment of Excavation and Disposal versus In Situ Stabilization of Heavy Metal-Contaminated Soil at a Superfund Site in Illinois. *In: Geo-Congress 2014: Geo-characterization and Modeling for Sustainability*, p. 2245-2254.
- Harbottle, M. J.; Al-Tabbaa, A.; Evans, C. W. (2007). A comparison of the technical sustainability of in situ stabilisation/solidification with disposal to landfill. *Journal Of Hazardous Materials*, v. 141, n. 2, p.430-440.
- Harbottle, M. J., Al-Tabbaa, A., & Evans, C. W. (2008). Sustainability of land remediation. Part 1: overall analysis. *Proceedings of the ICE-Geotechnical Engineering*, v. 161, n. 2, p. 75-92.
- Heijungs, R.; Wiloso, E. I. (2014). Life cycle assessment of bioenergy systems. In L. Wang (Ed.), *Sustainable bioenergy production* Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Hotze, M.; Lowry, G. (2011). Nanotechnology for Sustainable Water Treatment. *Issues In Environmental Science And Technology*, p.138-164.
- Hou, D.; Al-Tabbaa, A. (2014). Sustainability: A new imperative in contaminated land remediation. *Environmental Science & Policy*, v. 39, p.25-34.
- Hou, D. et al. (2014a). Using a hybrid LCA method to evaluate the sustainability of sediment remediation at the London Olympic Park. *Journal Of Cleaner Production*, v. 83, p.87-95.
- Hou, D.; Al-Tabbaa, A.; Luo, J. (2014b). Assessing effects of site characteristics on remediation secondary life cycle impact with a generalised framework. *Journal Of Environmental Planning And Management*, v. 57, n. 7, p.1083-1100.
- Hou, D. et al. (2016). Life cycle assessment comparison of thermal desorption and stabilization/solidification of mercury contaminated soil on agricultural land. *Journal Of Cleaner Production*, v. 139, p.949-956.
- Hou, D. et al. (2017). A Sustainability Assessment Framework for Agricultural Land Remediation in China. *Land Degradation & Development*, p.1-14.
- Huysegoms, L.; Cappuyns, V.. (2017). Critical review of decision support tools for sustainability assessment of site remediation options. *Journal Of Environmental Management*, v. 196, p.278-296.
- International Standards Organisation. (2006). ISO 14.040. Environmental management: life cycle assessment, principles and framework. Geneva, p. 10.
- Kloepffer, W. (2008). Life cycle sustainability assessment of products. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 13, n. 2, p. 89.
- Ledoux, M.J. et al. (2003). New catalytic phenomena on nanostructured (fibers and tubes) catalysts. *Journal Of Catalysis*, v. 216, n. 1-2, p.333-342.
- Marcelo, J. F.; Hayashi, M. C. P. I. (2013). Estudo bibliométrico sobre a produção científica no campo da sociologia da ciência. *Revista Informação e Informação, Londrina*, v. 18, n. 3, p. 138 – 153.
- Martins, F. et al. (2017). LCA applied to nano scale zero valent iron synthesis. *The International Journal Of Life Cycle Assessment*, v. 22, n. 5, p.707-714.
- Pollard, S et al. (2004). Integrating decision tools for the sustainable management of land contamination. *Science Of The Total Environment*, v. 325, n. 1-3, p.15-28, 5 jun. 2004.
- Rizzo, E. et al. (2016). Comparison of international approaches to sustainable remediation. *Journal Of Environmental Management*, v. 184, p.4-17.

- Scopus. (2015). Guia Rápida de Referência. Disponível em: <<http://www.americalatina.elsevier.com>> Acesso em 23 de setembro de 2017.
- Singh, A. K.; et al. (2008). Environmental impact assessment for potential continuous process for the production of carbon nanotubes. *American Journal of Environmental Sciences*, v. 4, n. 5, p. 522-534.
- Som, C. et al. (2010). The importance of life cycle concepts for the development of safe nanoproducts. *Toxicology*, [s.l.], v. 269, n. 2-3, p.160-169.
- Søndergaard, G. L. et al. (2017). Multi-criteria assessment tool for sustainability appraisal of remediation alternatives for a contaminated site. *Journal of Soils and Sediments*, p.1-15.
- Song, B.; Zeng, G.; Gong, J.; Zhang, P.; Deng, J.; Deng, C.; Cheng, M. (2017). Effect of multi-walled carbon nanotubes on phytotoxicity of sediments contaminated by phenanthrene and cadmium. *Chemosphere*, v. 172, p.449-458.
- Song, Y. et al. (2018) Environmental and socio-economic sustainability appraisal of contaminated land remediation strategies: A case study at a mega-site in China. *Science of the Total Environment*, v. 610-611, p.391-401.
- Srivastava, S.. (2016). Green Nanotechnology. *Journal Of Nanotechnology And Materials Science*, v. 3, n. 1, p.1-7.
- Subramanian, V. et al. (2016). Sustainable nanotechnology decision support system: bridging risk management, sustainable innovation and risk governance. *Journal of Nanoparticle Research*, v. 18, n. 4, p.1-13.
- Reddy, K. R.; Adams, J. A. (2015). *Sustainable Remediation of Contaminated Sites*. New York: Momentum Press, LLC, 268 p.
- Rickerby, D.G.; Morrison, M. (2007). Nanotechnology and the environment: A European perspective. *Science And Technology Of Advanced Materials*, v. 8, n. 1-2, p.19-24.
- Thomé, A. et al. (2015). Review of Nanotechnology for Soil and Groundwater Remediation: Brazilian Perspectives. *Water, Air, & Soil Pollution*, v. 226, n. 4, p.1-20.
- Trentin, A. W. S.; Braun, A. B.; Thomé, A. (2017). Características das Publicações Sobre Remediação Sustentável no Período de 1980-2016. In: *IX Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul, 2017, Caxias do Sul - RS. Anais: IX Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul*.
- Valdivia, S. et al. (2012). A UNEP/SETAC approach towards a life cycle sustainability assessment—our contribution to Rio+20. *The International Journal Of Life Cycle Assessment*, v. 18, n. 9, p.1673-1685.
- Van Harmelen, (2016). Toon et al. LICARA nanoSCAN - A tool for the self-assessment of benefits and risks of nanoproducts. *Environment International*, v. 91, p.150-160.
- Vigil, M. et al. (2015). Is phytoremediation without biomass valorization sustainable? — Comparative LCA of landfilling vs. anaerobic co-digestion. *Science Of The Total Environment*, v. 505, p.844-850.
- Vocciante, M. et al. (2016). Enhancements in ElectroKinetic Remediation Technology: Environmental assessment in comparison with other configurations and consolidated solutions. *Chemical Engineering Journal*, v. 289, p.123-134.
- Xue, X. Y., Cheng, R., Shi, L., Ma, Z., & Zheng, X. (2017). Nanomaterials for water pollution monitoring and remediation. *Environmental Chemistry Letters*, v. 15, p. 23-27.
- Web of Science. (2014). Guia Rápida de Referência. Disponível em: <<http://www.ip-science.thomsonreuter.com>> Acesso em 23 de setembro de 2017.
- Yadav, K. K. et al. (2016). A Review of Nanobioremediation Technologies for Environmental Cleanup: A Novel Biological Approach. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, v.8, n. 2, p. 740-757.
- Zhao, X. et al. (2016). An overview of preparation and applications of stabilized zero-valent iron nanoparticles for soil and groundwater remediation. *Water Research*, v. 100, p.245-266.