

Remoção de metais pesados de efluentes utilizando líquidos iônicos: uma revisão

Removal of heavy metals from effluents using ionic liquids: a review

DOI:10.34117/bjdv7n5-426

Recebimento dos originais: 19/04/2021

Aceitação para publicação: 19/05/2021

Natália Ambrósio

Acadêmica do Curso de Engenharia Química (URI)

E-mail: nati_ambrosio07@outlook.com

Júlia Lisboa Bernardi

Mestranda em Engenharia de Alimentos (URI)

E-mail: julialisboabernardi@yahoo.com

Rogério Dallago

Prof. Dr. do Curso de Engenharia Química (URI)

E-mail: dallago@uricer.edu.br

Marcelo Luis Mignoni

Prof. Dr. do Curso de Engenharia Química (URI)

E-mail: mignoni@uricer.edu.br

RESUMO

Ao observar os processos industriais em geral, vê-se que, ambientalmente falando, muitos são falhos. Porém, sabe-se no entanto, que para que se tenha eficiência e elevada produtividade, na maioria dos casos é necessário que se faça os tratamentos industriais ambientalmente tóxicos na confecção dos produtos, sendo necessário, portanto, métodos de tratamento de resíduos que sejam eficazes, para que os materiais tóxicos presentes em efluentes e resíduos não contaminem nem prejudiquem a vida e o planeta. A legislação brasileira possui políticas de tratamento e destinação de resíduos e efluentes que, propõem métodos de tratamentos e locais de descarte adequados, mas, ainda existem muitas melhorias a serem feitas nesse sentido. Desenvolver novos métodos de tratamento e remoção de poluentes que sejam eficientes e ambientalmente amigáveis é de fundamental importância, principalmente quando se considera resíduos contaminados com metais pesados, uma classe de poluentes altamente contaminante e tóxica aos seres humanos e meio ambiente em geral. Muitos estudos sugerem que os líquidos iônicos, classe de solventes caracterizados como verdes, possuem elevado potencial adsorvente, mostrando que, quando aplicado sozinho ou em pré-tratamento em materiais de adsorção, são eficientes na remoção de metais pesados de meios residuais.

Palavras-chave: Líquido Iônico, Remoção, Metais Pesados, Efluentes, Resíduos

ABSTRACT

When observing the industrial processes in general, it is seen that, environmentally speaking, many are flawed. But it is known however that to have efficiency and high productivity, in most cases it is necessary, therefore, waste treatment methods that are effective for the toxic materials present in effluents and waste do not contaminate or harm life and the planet.

Brazilian legislation have policies for the treatment and disposal of waste and effluents that propose suitable treatment methods and disposal sites, but there are still many improvements to be made in relation to that matter. Developing new methods of treatment and removal of pollutants that are efficient and environmentally friendly is of fundamental importance, especially when considering heavy metals contaminated wastes, a class of pollutants highly contaminating and toxic to humans and the environment in general. Many studies suggest that ionic liquids, a class of solvents characterized as green, have a high adsorbent potential, showing that, when applied alone or in pre-treatment in adsorption materials, they are efficient in removing heavy metals from waste.

keywords: Ionic Liquids, Removal, Heavy Metal, Effluent, Residue

1 INTRODUÇÃO

Aspectos poluidores e a química ambiental são assuntos comuns na química e engenharia atualmente. As indústrias e os pesquisadores buscam a melhoria dos processos a fim de reduzir a geração de resíduos e materiais contaminantes ao longo dos processos de fabricação.

Entende-se que por geração de resíduos fala-se automaticamente de materiais gerados ao longo de determinados procedimentos que possuem características ambientalmente não amigáveis, e, desta forma, é necessária aplicação de tratamentos para eliminação ou recuperação de determinados componentes tóxicos presentes no meio em questão, e, sabe-se que esses métodos de recuperação e tratamento de efluentes e resíduos, principalmente quando os mesmos possuem elevados níveis de toxicidade são caros. Existem empresas que são focadas exclusivamente ao tratamento de resíduos, e elas cobram justamente em função da composição dos mesmos, uma vez que quanto mais carregado o efluente está, mais difícil de recuperá-lo a níveis que comportem as exigências de despejo estabelecidas pela legislação.

Estudos e melhorias dos métodos de tratamento de resíduos e efluentes são, portanto, necessários, pois assim pode-se estabelecer métodos de tratamentos mais eficazes e menos custosos, e o desenvolvimento do uso de novos materiais classificados como “verdes” é um caminho interessante a se seguir. Um exemplo disso são os líquidos iônicos, classe de materiais classificados como ambientalmente amigáveis e com características de adsorção amplas devido às suas características moleculares.

Assim, estudos relacionados a produção e caracterização de líquidos iônicos são temas atraentes e atuais para estudos e pesquisas acerca de diversos usos na química, inclusive o tratamento de efluentes, principalmente ao fato de existir uma elevada gama de combinações

catiônicas e aniônicas possíveis gerando inúmeros líquidos iônicos com diferentes características e centenas de aplicações possíveis nessa área.

Busca-se, portanto, efetuar uma revisão bibliográfica a fim de buscar a utilização dos líquidos iônicos e o uso dos mesmos na aplicação de tratamento de efluentes e resíduos, bem como as pesquisas atuais que estão sendo desenvolvidas a respeito, avaliando a capacidade do líquido iônico de tratar materiais contaminados.

2 OS RESÍDUOS

Os fatores ambientais e poluidores se apresentam como assuntos de suma importância na formação de novos engenheiros químicos, uma vez que estes devem estar preparados para lidar com processos que visam melhorias justamente na diminuição dos impactos ambientais e geração de resíduos por parte das indústrias e reaproveitamento de subprodutos. Além disso, existe uma crescente preocupação humanitária com essas questões ambientais, visto que as mudanças ambientais e a piora na qualidade de recursos naturais essenciais são cada dia mais perceptíveis, atingindo a população geral de maneira negativa, afetando a saúde e bem estar das pessoas, aumentando gastos com tratamento dos solos para plantios e, principalmente, o tratamento de água para o consumo (ELIODÓRIO, 2018; FERREIRA, SILVINO, SILVA, 2021).

Ao longo de muitos períodos foram usados métodos de produção industrial que geravam grande número de resíduos contaminantes, principalmente nas épocas das revoluções industriais a partir do século XX, que cresceram seus processos produtivos sem necessariamente se preocupar com os danos que estes, juntamente com seus resíduos e efluentes gerados causariam ao meio ambiente e população instalada aos redores das fábricas, hoje, essas práticas vêm sendo melhoradas com os estudos de processos e novos métodos reacionais verdes que podem ser aplicados a uma série de segmentos (ELIODÓRIO, 2018).

Atualmente, segundo a legislação, existe uma ordem a ser seguida quanto a prática industrial para a gestão de resíduos que inicia com a prioridade da não geração dos mesmos, sabe-se que de maneira geral um processo industrial que não acarreta a geração de resíduos é muito raro, desta forma a legislação sugere que caso a não geração não seja possível se busque reduzir ao máximo a geração de resíduos, seguindo pela sua reutilização, a reciclagem, tratamento dos resíduos e destinação final desde que esteja de acordo com as demais normativas existentes e sem causar danos ao meio ambiente (BRASIL, 2010; LACERDA et al., 2020).

Segundo a Resolução do CONAMA nº 358 de 29 de abril de 2005, a definição de resíduos é qualquer material que apresenta risco ou características perigosas que quando não tratados podem causar danos à saúde e meio ambiente possuindo características de corrosividade, toxicidade, inflamabilidade e reatividade.

A NBR 10.004:2004 define resíduos como sendo uma classe de materiais que se apresentam no estado sólido ou semissólido resultantes de processos industriais ou atividades domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas ou outros serviços (ABNT, 2004).

De maneira geral, processos industriais efetuam tratamentos em seus procedimentos que geram resíduos e é comum que estes se apresentem como uma classe de materiais com elevado risco de poluição ambiental, elevada toxicidade e danos à saúde dos seres vivos de maneira geral. A Tabela 1 apresenta informações sobre classificação e descarte de resíduos conforme sua composição.

Tabela 1. Classificação e descarte de resíduos.

Classe	Substância	Descarte
Orgânicos não-tóxicos	Açúcares, amido, aminoácidos, ácido cítrico, ácido láctico.	Pia ou lixo comum *
Soluções ácidas de ânions não tóxicos	HCl, H ₂ SO ₄ , HNO ₃ , H ₃ PO ₄ , H ₂ CO ₃ , CH ₃ COOH, H ₃ BO ₃ , HI	Devem ser neutralizadas com soluções alcalinas de cátions não tóxicos e descartadas na pia *
Soluções alcalinas de cátions não tóxicos	NaOH, KOH, Ca(OH) ₂ , Mg(OH) ₂ , NH ₄ OH	Não devem ser armazenadas em frascos de vidro e devem ser neutralizadas com soluções ácidas de ânions não tóxicos e descartadas na pia *
Soluções neutras de íons inorgânicos não tóxicos	Ânions: Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , SO ₃ ²⁻ , PO ₄ ³⁻ , CH ₃ COO ⁻ , HCO ₃ ⁻ , BO ₃ ³⁻ , I ⁻ , OH ⁻ . Cátions: Na ⁺ , NH ₄ ⁺ , K ⁺ , Mg ₂ ⁺ , Ca ₂ ⁺ .	Podem ser descartadas na pia *
Soluções de cátions tóxicos	As ³⁺ , As ⁵⁺ , Ba ²⁺ , Cd ²⁺ , Cu ²⁺ , Pb ²⁺ , Mn ²⁺ , Mn ⁴⁺ , Mn ⁷⁺ , Hg ⁺ , Hg ²⁺ , Mo ⁶⁺ , Se ⁴⁺ , Se ⁶⁺ , Ag ⁺ , Zn ²⁺ , Al ³⁺ ,	Devem ser tratadas com solução alcalina concentrada. Os hidróxidos precipitados devem ser removidos da solução por filtração.
Soluções de ânions tóxicos.	S ²⁻ , CN ⁻	Devem ser tratados com agentes oxidantes. Ex: hipoclorito.
Solventes orgânicos.	Álcoois, cetonas, éteres, ésteres, hexano, benzeno, tolueno, etc.	Devem ser armazenados em recipientes de vidro e submetidos a destilação.
Solventes orgânicos halogenados.	Clorofórmio, diclorometano, dibromometano, tetracloreto de carbono, etc.	Devem ser armazenados em recipientes de vidro e submetidos a destilação.

Fonte: Marcondes, Zablonsky e Ike (2020).

Como pode-se perceber pela Tabela 1, cátions de metais pesados, elementos químicos bioacumulativos, alvos de muita preocupação com relação aos danos que podem causar na natureza, necessitam de tratamentos específicos antes do seu descarte (LONGO, et al., 2020).

Segundo a NBR 10004, a definição de resíduos sólidos é qualquer resíduo que está no estado sólido ou semissólido advindo de atividades industriais, hospitalares, domésticas, comerciais, agrícolas, de serviços gerais e varrições (ABNT, 2004).

O grau de periculosidade pode ser classificado segundo a capacidade de um resíduo de causar danos ou a saúde pública ou aos danos ao meio ambiente, a toxicidade segundo o grau de interação da substância com os organismos, o agente tóxico segundo o tipo de efeito adverso que causa (ABNT, 2004).

Quanto à classe são divididos em:

- Classe I: Perigosos;
- Classe II: Não-perigosos;
- Classe II A: Não inertes;
- Classe II B: Inertes;

Os resíduos englobados na classe I podem ser inflamáveis, corrosivos, reativos, tóxicos ou patogênico; os resíduos da Classe II A são biodegradáveis, solúveis em água e combustíveis; os resíduos da Classe II B são não solúveis em água em nenhum de seus constituintes de modo que a concentração não exceda os limites de potabilidade da água (ABNT, 2004).

Ainda segundo a NBR 10004, existe uma classificação específica para cada tipo de resíduo e essa classificação corresponde ao tipo de procedimento que foi aplicado para a geração deste resíduo (ABNT, 2004).

Destarte, seguindo o que a legislação diz sobre classificação de resíduos, cada tipo de indústria que produz materiais contaminados deve estar ciente de tais informações, identificar e encaminhar adequadamente os resíduos contaminados aos destinos corretos.

Os métodos de tratamentos mais aplicados aos resíduos industriais e laboratoriais contaminados são classificados em processos biológicos, físicos, físico-químicos e químicos.

3 PROCESSOS BIOLÓGICOS

Podem ser divididos em compostagem e Landfarming (STRS). A compostagem é um método definido por lei (Lei nº 12.305 de 2010 regulamentada pelo Decreto nº 7.404) como o mais adequado para o tratamento de resíduos compostos por matéria orgânica passível de decomposição (BRASIL, 2010; TIENEN et al., 2020).

A compostagem funciona por meio microbiológico, onde os mesmos atuam frente a matéria orgânica decompondo-a em meio exotérmico e em modo aeróbico, obtendo carbono

e energia – dióxido de carbono e água, produtos que, ambientalmente falando não são prejudiciais nem tóxicos (TIENEN et al., 2020).

A principal desvantagem quando se fala em compostagem é, necessariamente o tempo que as bactérias e microrganismos decompositores levam para decompor os resíduos orgânicos em adubo inerte (TIENEN et al., 2020).

O método de landfarming se baseia nas propriedades físico-químicas do solo com a finalidade de diminuir a poluição orgânica e melhorar as atividades dos microrganismos, aumentando a fixação de constituintes presentes nos resíduos no solo, como por exemplo os minerais aproveitáveis por leguminosas, também promove a estabilização da matéria orgânica e redução dos contaminantes em virtude das ativações que promove nos ciclos biológicos (MACCI et al., 2021).

4 PROCESSOS FÍSICOS

São elencados em secagem e desidratação, adsorção e osmose reversa. A secagem e desidratação promove, como o nome sugere a remoção de líquidos de modo a reduzir o volume do montante de resíduos gerados, são processos altamente consumidores de energia em virtude dos equipamentos necessários para efetuar o processo como centrífugas, filtros a vácuo ou prensa (LIMA, 2020; LOUREIRO et al., 2020). Os procedimentos de secagem e desidratação de resíduos possuem vantagens ao serem realizados como a diminuição dos custos de transporte dos mesmos até os aterros de deposição, aumento da facilidade de manuseio, melhora das características para a prática da incineração, por exemplo, uma vez que a umidade será baixa, nos aterros geram menos odores e menos lixiviados, o que diminui também os riscos de contaminações de solo e lençóis freáticos (LIMA, 2020).

A adsorção é um método realizado com filtração ou extração utilizando matérias como carvão ativado ou zeólitas, onde os poluentes presentes no resíduo como íons ou moléculas ficam retidas nesses materiais adsorventes, é considerado um método com custo elevado, e, apesar de elevada eficiência não é utilizado em larga escala quando não existem concentrações extremamente elevadas de poluentes no resíduo (MACENA, 2021). A osmose reversa é classificada quase que como da mesma maneira, utiliza filtração em membranas para a remoção e separação de poluentes dos resíduos, porém, como o carvão ativado e as zeólitas utilizadas nos métodos de adsorção, não são utilizados na maioria dos procedimentos de remoção de poluentes em virtude dos elevados custos das membranas (MACENA, 2021).

4.1 PROCESSOS FÍSICO-QUÍMICOS

Os processos físico-químicos de tratamento de resíduos ocorrem por meio da solidificação ou estabilização dos mesmos. Consistem na transformação, por meio de reações químicas, de resíduos altamente poluentes e contaminados em formas não tão tóxicas, por vezes até mesmo inertes, melhorando assim as características de manuseio e impedindo que ocorra lixiviação desses componentes tóxicos para o meio ambiente (BARRETO, 2020).

5 PROCESSOS QUÍMICOS

São subdivididos em incineração, coprocessamento, precipitação e troca iônica. A incineração de resíduos é uma prática muito utilizada e consolidada em vários países (CARDOZO, MANNARINO, FERREIRA, 2019). É efetuada de maneira controlada a fim de evitar a geração de poluentes secundários, os fornos também são construídos de maneira específica, equipados com filtros e os produtos da queima, as cinzas, se apresentam em uma redução de volume de 70 a 90% e podem ser destinadas a aterros ou encaminhadas a um tratamento físico-químico de solidificação para formação de tijolos (CARDOZO, MANNARINO, FERREIRA, 2019).

Coprocessamento é amplamente presente nos EUA, é um método que queima os resíduos contaminados no calor gerado na produção do cimento, que é elevado (aproximadamente 2000°C), e, as cinzas geradas podem ser adicionadas ao cimento produzido em proporção que não altere a qualidade do produto, assim, não é recomendado que não se faça coprocessamento de resíduos hospitalares, materiais radioativos, pilhas, baterias, vidros, etc., pois, podem restar componentes tóxicos que não podem ser aplicados no cimento (DOS SANTOS et al., 2020).

A precipitação química é um modo de tratamento que utiliza reagente com o objetivo de provocar reações que formem partículas sólidas insolúveis no meio em questão, e, dessa forma, conseguem ser removidas e destinadas a outros meios de descarte, as reações são seletivas e ocorrem de maneira específica de acordo com o tipo de reagente e de íon que se tem no resíduo (MOLKE et al., 2020).

Os processos de troca iônica consistem em métodos de tratamento que separa íons e sais em solução utilizando zeólitas, por exemplo (DE OLIVEIRA, 2020). É uma reação química reversível que utiliza a essa fase estacionária, como por exemplo as zeólitas, em contato com uma fase móvel, que no caso de um tratamento de resíduos pode ser uma fase aquosa contaminada (DE OLIVEIRA, 2020).

5.1 PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS (POA)

É um processo que faz com que ocorra processos de oxidação de maneira que, todas as substâncias orgânicas disponíveis serão oxidadas, sendo elas biodegradáveis ou não (SCHOENELL, 2020). Acontecem de acordo com o potencial redutor das substâncias e envolvem a produção de radicais hidroxila (OH^-), isso promove a decomposição de diversos poluentes como poluentes orgânicos, compostos recalcitrantes, muito aplicados em resíduos aquosos pela intensa reação promovida em meios aquosos (SCHOENELL, 2020).

Desta forma, entende-se que existem diversos métodos de tratamento de resíduos contaminados, sendo que alguns tipos de contaminantes exigem uma atenção especial na hora do tratamento, por representarem perigos ao meio ambiente e aos seres vivos, uma classe desses materiais tóxicos que precisam de tratamentos, bem como destino adequado devido aos prejuízos ambientais e sanitários que podem causar são os metais pesados.

Uma classe de materiais tóxicos que precisam de tratamentos, bem como destino adequado devido aos prejuízos ambientais e sanitários que podem causar são os metais pesados.

6 OS METAIS PESADOS

São elementos químicos definidos pela capacidade reativa, sua bioacumulação se dá pela incapacidade que possuem de serem modificados ou destruídos, utilizados em vários segmentos industriais como as indústrias navais, baterias e pilhas, siderúrgica, metalúrgica (GOMES e MELO, 2006; MACENA, 2021).

Sua ocorrência é majoritariamente em rochas, mas nunca na forma pura, sempre associados a algum outro tipo de elemento, porém também podem ocorrer na precipitação atmosférica, calcário, cinzas, adubos e fertilizantes e sua classificação é feita por meio das suas densidades relativas (LONGO et al., 2020). Alguns exemplos mais comuns de metais pesados estão situados entre o Cobre (Cu) e Chumbo (Pb) na tabela periódica (FOONG, WIRZAL, BUSTAM, 2020; LONGO et al., 2020).

Podem se apresentar em diferentes estados de oxidação e elevada toxicidade na sua forma livre e quando em excesso sendo assim, de difícil remoção quando presentes na forma de contaminantes em algum meio e vistos como ameaças a biodiversidade e manutenção ecológica dos ecossistemas (CALLE et al., 2020; LONGO et al., 2020).

Consumir alimentos que estejam contaminados com algum tipo de metal pesado na configuração tóxica pode causar intoxicação crônica uma vez que quando consumidos afetam vários órgãos agindo especificamente nos seus sítios ativos (TAVARES et al., 2020).

Podem ser associados a degeneração do sistema nervoso central por não serem metabolizados pelo organismo, podem causar câncer, atingindo principalmente rins e pulmões, causando asma, danificam o sistema digestor, neurológico e reprodutor, causam lesões no cérebro e nos rins, entre outros sintomas, assim, a legislação exige que resíduos que possuem metais pesados em sua composição não sejam descartados na natureza sem que haja um tratamento adequado de remoção dos metais da sua composição (GOMES e MELO, 2006; MARCONDES, ZABLONSKY e IKE, 2020; DE AGUIAR, NOVAES e GUARINO, 2002).

Os riscos relacionados aos metais pesados geralmente estão vinculados ao descarte inadequado de pilhas e baterias e de resíduos industriais, lixo urbano, etc., quando o meio está poluído, conseqüentemente os seres que ali habitam também são contaminados, e, por conseguinte, também os seres vivos que dependem destes (DE AGUIAR, NOVAES e GUARINO, 2002).

Outra problemática está vinculada a utilização excessiva de fertilizantes e agrotóxicos, como já citado, existe a ocorrência de metais pesados nesse tipo de produto, e, quando utilizados exageradamente podem contaminar o solo das plantações e até mesmo os alimentos que eles tratam (FOONG, WIRZAL e BUSTAM, 2020; DE AGUIAR, NOVAES e GUARINO, 2002).

Focando especificamente em resíduos industriais, e nos tratamentos que precisam ser feitos para a remoção destes metais pesados dos efluentes que esta classe gera, observa-se a necessidade de estudos e aperfeiçoamentos de materiais cuja estrutura comporte a capacidade de remoção dos íons metálicos contaminantes dos meios efluentes (FOONG, WIRZAL e BUSTAM, 2020).

Existem métodos de remoção usuais como a troca iônica, oxidação ou redução química, osmose reversa e ultrafiltração, mas além de problemas de eficiência podem gerar contaminantes secundários (FOONG, WIRZAL e BUSTAM, 2020).

Uma classe de materiais que vem se adequando as diretrizes de remoção de metais pesados são os líquidos iônicos (FOONG, WIRZAL e BUSTAM, 2020).

7 OS LÍQUIDOS IÔNICOS

Líquidos Iônicos (LIs) são definidos como ânions inorgânicos que reagem com cátions orgânicos de forma assimétrica; são líquidos em sua imensa maioria e em um grande intervalo de temperatura, geralmente são incolores, mas por vezes dependendo o tipo de componente de síntese podem apresentar coloração amarelada, são polares e na imensa maioria de natureza hidrofílica, baixa viscosidade e possuem valores de pressão de vapor desprezíveis em

temperatura ambiente, logo são não-voláteis, não inflamáveis; representam uma gama de produtos que vem despertando muitos interesses em estudos uma vez que suas propriedades (estabilidade química e estabilidade térmica, elevada condutividade iônica, organização estrutural interessante, elevada densidade, entre outros) são atrativas a um leque diversificado de aplicações já que podem ser alteradas de acordo com o tipo da composição catiônica e aniônica do líquido iônico (FOONG, WIRZAL e BUSTAM, 2020; PEDOTT, BORDIN e MIGNONI, 2020; PERALTA, 2019; SINGH e SAVOY, 2020; TRINDADE, 2019).

Os ânions e cátions de sua composição podem ser orgânicos ou inorgânicos, porém, o que altera as interações coulômbicas são os tamanhos desses íons, assim, obtém-se um ponto de fusão mais baixo (o que os torna líquidos a temperatura ambiente), devido ao enfraquecimento dessas ligações que dão suporte ao íon (PICCOLI, 2020).

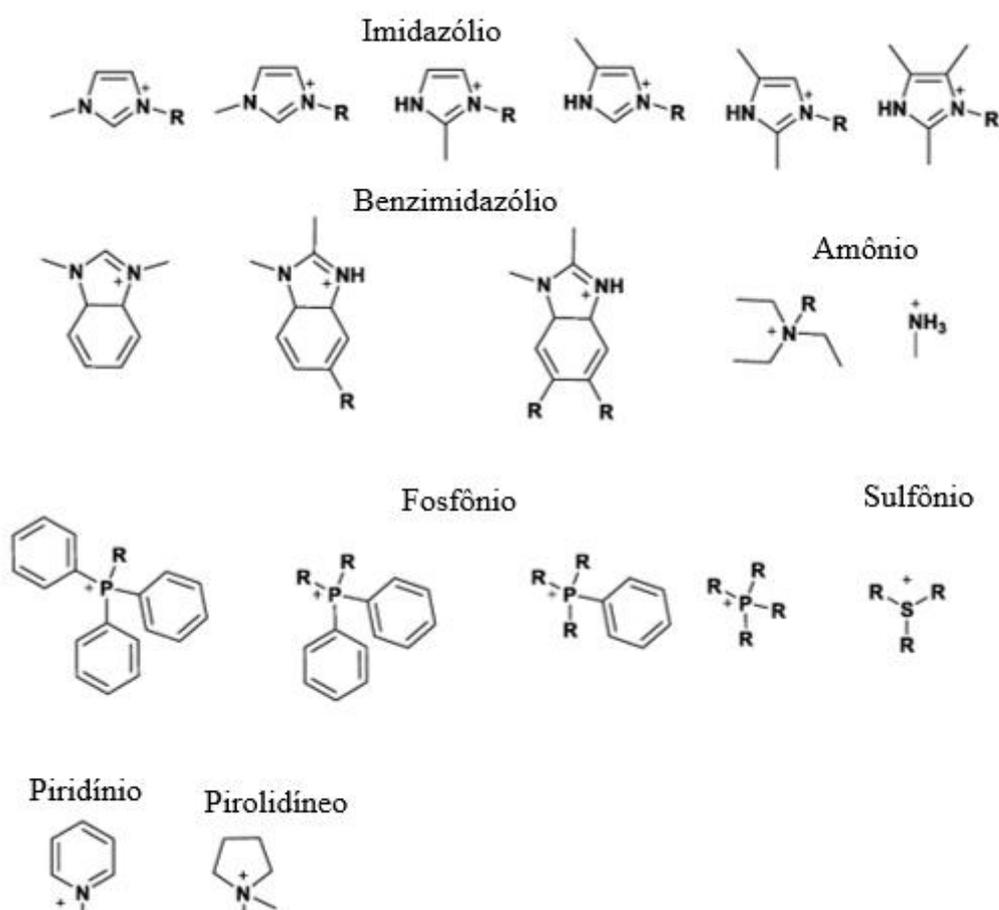
Essa possibilidade de variabilidade de composição catiônica e aniônica fornece a eles elevada solubilidade em biopolímeros (SINGH e SAVOY, 2020).

Suas propriedades precisam ser avaliadas de maneira generalizada justamente por existirem elevado número de líquidos iônicos, de maneira geral pode-se avaliar da seguinte forma:

- Viscosidade: relativamente alta, experimentos determinam um intervalo aproximado de 66 a 1100 cP entre 20 e 25°C, apesar de ser valores que podem afetar de maneira negativa a efetividade do manuseio do líquido iônico, não é recomendado que se faça procedimentos que visem a redução da mesma uma vez que isso interferiria na aplicação catalítica prática (FOONG, WIRZAL e BUSTAM, 2020);
- Pressão de vapor: como supracitado, líquidos iônicos possuem pressões de vapores desprezíveis, porém, o valor que apresentam, apesar de desconsiderável, não foi intimamente estudado a fim de se determinar de maneira precisa como a estrutura da fase gasosa se um líquido iônico se comporta (FOONG, WIRZAL e BUSTAM, 2020);
- Propriedades eletroquímicas: possuem boa estabilidade eletroquímica e elevada condutividade iônica fazendo com que sua utilização em baterias, células combustíveis e solares e super capacitores seja possível. Em aplicações reais pode ser exposto a maioria dos potenciais positivos e negativos sem que ocorra oxidação ou redução do ânion e do cátion, respectivamente (FOONG, WIRZAL e BUSTAM, 2020);
- Tensão superficial: não existem estudos que a definam de maneira precisa, porém podem ser classificadas como moderadas (FOONG, WIRZAL e BUSTAM, 2020);
- Propriedades não inflamáveis: possuem essa propriedade devido a não volatilidade e baixa pressão de vapor, no entanto, cuidados acerca de sua utilização devem ser tomados uma vez que produtos gerados a partir de reação com determinados líquidos iônicos podem apresentar inflamabilidade (FOONG, WIRZAL e BUSTAM, 2020);
- Biocompatibilidade: é a questão mais intimamente ligada a química verde, pois, além de se preocupar com a forma de como os líquidos iônicos reagem é necessário avaliar o impacto ambiental relacionado a exposição de cada tipo de líquido iônico no meio ambiente, assim uma baixa toxicidade não significa que o material é biocompatível (FOONG, WIRZAL e BUSTAM, 2020);

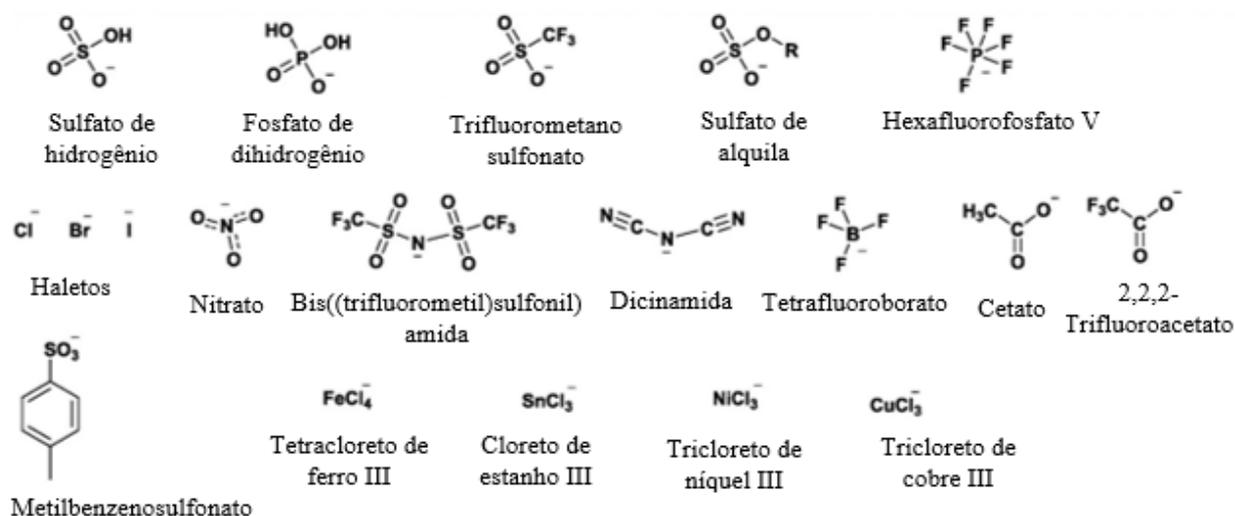
O primeiro líquido iônico foi fabricado em 1914 a temperatura ambiente utilizando ácido nítrico concentrado e etilamina, obtendo nitrato de etilamônio, hoje são utilizados outros componentes, mas de maneira geral as etapas iniciais se baseiam em protonação ou quaternização de uma fosfina ou amina para a formação de um cátion seguindo pela não formação do ânion na etapa anterior, ou, pela formação instável do mesmo pela reação de um haleto de cátion orgânico com um ácido de Lewis, também pode ocorrer com a troca de dois ânions (PERALTA, 2019). Os principais cátions e ânions utilizados para a síntese de líquidos estão representados nas Figuras 1 e 2, respectivamente.

Figura 1. Principais cátions utilizados para a síntese de líquidos iônicos



Fonte: Adaptado de Singh e Savoy (2020).

Figura 2. Principais ânions utilizados na síntese dos líquidos iônicos



Fonte: Adaptado de Singh e Savoy (2020).

Os líquidos iônicos são alvos de elevada gama de estudos pela diversidade de suas propriedades, uma vez que existem milhares de combinações entre cátions e ânions que geram os líquidos iônicos (LIs), o que permite aplicações em diversos segmentos, tornando-os mais efetivos e menos poluentes (ELIODÓRIO, 2018; PERALTA, 2019).

Suas aplicações até décadas atrás eram restritas a uma área de pesquisas, principalmente em polimerizações, hidrólises ácidas, carbonizações, esterificações, despolimerizações e pré-extrações (SINGH e SAVOY, 2020).

Os líquidos iônicos são considerados solventes verdes cujas propriedades vem sendo amplamente estudadas em diversas aplicações biológicas e termoquímicas alterando qualidade de produtos, rendimento e estabilidade dos mesmos, e, conseqüentemente o custo final dos produtos em que eles estão sendo aplicados (DASTYAR et al., 2019). Quanto ao tratamento e recuperação de efluentes e resíduos, observa-se alta capacidade em fracionamento da biomassa para recuperação dos recursos passíveis de reutilização, conversão dela em biocombustíveis ou outros materiais com valor agregado, efetuar tratamentos prévios objetivando a redução de lignina e hemicelulose, conversão catalítica e remoção de metais pesados juntamente de outros contaminantes de meios aquosos, incluindo neste caso efluentes líquidos (DASTYAR et al., 2019).

Um solvente é considerado verde quando os produtos oriundos de sua utilização produzem o mínimo possível de impactos ambientais ao longo de seu período de utilização ou

ciclo de vida, a classificação “verde” de um líquido iônico se dá por uma série de fatores dentre eles o fator ambiental e atômico (SINGH e SAVOY, 2020).

Além da extensa aplicabilidade química de suas propriedades, os líquidos iônicos podem ser aplicados também enquanto suas características físicas, uma vez que determinados líquidos iônicos possuem características viscosas, e, de acordo com suas características voláteis, permitem sua utilização até sob ação de vácuo, o que representa um problema para óleos lubrificantes convencionais, (SINGH e SAVOY, 2020; WELTON, 2018).

Aspectos relacionados a biodegradabilidade, toxicidade e reciclabilidade dos líquidos iônicos vêm sendo avaliadas concomitantemente às novas aplicações, pois, tais fatores influenciam diretamente no caráter verde atribuído aos mesmos (SINGH e SAVOY, 2020).

A capacidade extratora de íons de metais pesados vem sendo avaliada por diversos estudos e pesquisadores como a literatura nos conta, Foong, Wirzal e Bustam (2020) avaliaram a utilização de líquidos iônicos eletrofiados e biológicos para a remoção de metais pesados através de filtração por membranas, concluem que algumas propriedades específicas dos líquidos iônicos devem ser observadas a fim de se garantir a efetividade do tratamento e, nesse caso, as propriedades eletroquímicas são os fatores mais influenciáveis na garantia de uma boa extração (FOONG, WIRZAL e BUSTAM, 2020).

Thasneema et al. (2021), avaliaram a remoção de compostos fenólicos, corantes têxteis e metais pesados tóxicos de água residuais com líquidos iônicos a base de fosfônio; os pesquisadores trabalharam com 3 líquidos iônicos diferentes, todos a base de fosfônio, variando sua composição aniônica. Os metais pesados presentes no meio efluente eram Arsênio, Cromo, Cádmio, Cobre, Zinco, Chumbo, e Mercúrio, e, através de extrações líquido-líquido foram observados perfis de remoção de até 100% dos metais presentes no meio seguindo as metodologias aplicadas, outro aspecto importante avaliado foi o risco de toxicidade dos três líquido iônicos aplicados no experimento onde os mesmos puderam ser considerados atóxicos (THASNEEMA et al., 2021).

Malas et al. (2020), empregaram membranas de polietileno com líquido iônico para remoção de cátions metálicos de soluções aquosas. O líquido iônico 1-butil-3-metilimidazólio dicianamida foi incorporado a membrana de polietileno hidrofóbico (PE), essa impregnação modificou algumas propriedades da membrana como a sua porosidade, essa modificação permitiu que a membrana tratada com líquido iônico formasse complexos estáveis com os íons metálicos presentes na água por meio de reações de troca iônica formando hidróxidos, dependendo do íon com que a reação acontece (MALAS et al., 2020). A remoção de Cd^{+2} , Ni^{+2} e Zn^{+2} aumentaram de 35,73; 39,4; 52,89% quando aplicada em membranas de polietileno

sem tratamento para 52,87; 51,47; 68,05% quando aplicada membranas de polietileno tratadas com 1-butil-3-metilimidazólio dicianamida, logo apresentaram resultados satisfatórios para aplicação em tratamento de águas residuais contendo íons metálicos em suspensão (MALAS, et al., 2020).

Já para os estudos de Wieszczycka et al. (2021) sílicas mesoporosas foram sintetizadas com copolímeros e nelas foram incorporadas em 3 diferentes líquidos iônicos a fim de se obter níveis de remoção de íons de Pb (II), Cd (II) e Zn (II) e compará-los a remoção quando utilizando sílicas sem a presença dos líquidos iônicos. As condições de pH, temperatura, concentração dos íons metálicos e tempo de extração foram avaliadas a fim de determinar as melhores condições, assim, a faixa ideal de pH para a adsorção mais efetiva foi a de 4 a 6 por um tempo de 15 a 45 minutos; a concentração dos íons metálicos no meio variaram de 50 a 200 mg/L obtendo-se uma capacidade de adsorção de até 202,3; 148,6 e 133 mg/g para Pb (II), Cd (II) e Zn (II), respectivamente (WIESZCZYCKA et al., 2021).

Sadjadi (2020) estuda o potencial atrativo de líquidos iônicos como catalisadores uma vez que a maleabilidade de suas propriedades permite uma projeção eficiente em catálise química na forma livre ou imobilizada, como a separação do catalizador e sua reutilização ainda representa um problema para reações catalíticas, os autores sintetizaram líquidos iônicos magnéticos, sendo dessa forma facilmente removíveis do meio reacional e passíveis de reutilização bem como reciclabilidade, características importantes para a química verde. Phan et al. (2021) sintetizaram um líquido iônico com capacidade catalítica que pode ser reutilizado 3 vezes sem sofrer qualquer alteração da eficiência de sua função no meio reacional.

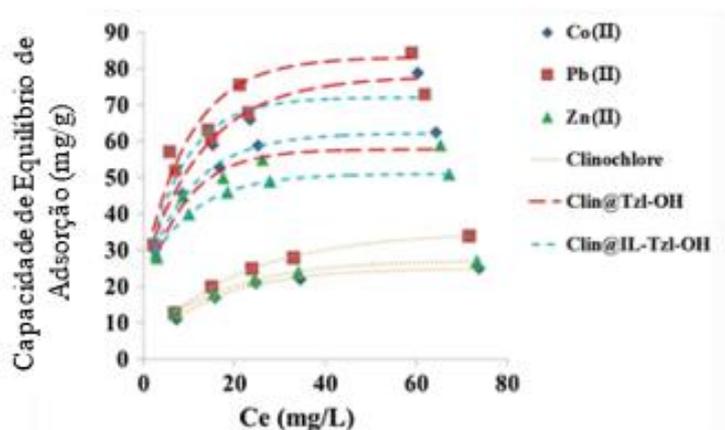
Chen, Feng e Yao (2020) também trabalharam em estudos que observaram a capacidade do líquido iônico quanto a captura de metais pesados; em sua pesquisa construíram nanotubos de carbono com paredes múltiplas compostas de líquido iônico e as aplicaram em adsorção de tetraciclinas e íons de metais pesados dispersos em meio aquoso, atingindo níveis de remoção de cromo hexavalente de até 94,1%, sendo possível a reciclagem do comprimido e recuperação de até 90% do adsorbato.

Segundo a publicação de Yu et al. (2021) os líquidos iônicos podem ser aplicados para a remoção de compostos poluentes de efluentes gasosos. O modo de aplicação foi incorporar os líquidos iônicos em materiais porosos, [Bmin]₂[Co(NCS)₄] em sílica gel, [Bmin][ClCuCl₂] em sílica gel e 1-metil-3-(trietoxissililpropil)imidazólio tetrazolato em FDU-12 mesoporoso, que quando aplicados a efluentes, no caso deste artigo, gasosos, conseguem remover poluentes como NH₃, H₂S e SO₂, respectivamente (YU et al., 2021). São procedimentos eficientes devido ao baixo consumo energético, favoráveis ao meio ambiente e efetivos na remoção dos

poluentes, também foram encontradas limitações a respeito da capacidade de remoção de vários componentes ao mesmo tempo, assim são necessários mais estudos verificando a capacidade seletiva e modo de adsorção deste materiais porosos incorporados com os líquidos iônicos (YU et al., 2021).

Kakaei et al. (2020) criaram uma argila modificada com líquidos iônicos e investigaram a atividade catalítica e capacidade de remoção de metais pesados de meios aquosos advindos de resíduos industriais. Os íons avaliados foram Pb (II), Co (II) e Zn (II) removidos através da argila modificada com 3 diferentes tipos de triazóis; a Figura 4 mostra a capacidade de adsorção dos 3 íons metálicos para cada um dos líquidos iônicos aplicados à pesquisa e a Figura 5 (a), (b) e (c) demonstra a análise feita em *Scanning Electron Microscope* (SEM) a fim de se observar a presença dos íons capturados na estrutura da argila (KAKAEI et al., 2020).

Figura 4. Gráfico Capacidade de adsorção em função da concentração de equilíbrio.



Fonte: Adaptado de Kakaei et al. (2020).

A Figura 4 demonstra a adsorção de metais pesados quando o meio efluente foi tratado com 5mg do material adsorvente por 3 horas (após esse tempo é observada uma estabilização das curvas) a temperatura ambiente (KAKAEI et al., 2020). Observando os resultados apresentados em relação as diferentes adsorções, os pesquisadores concluíram que a argila tratada com líquidos iônicos que possui nitrogênio em sua composição possui melhor capacidade de adsorção.

Figura 5. SEM da Adsorção de (a) Zn, (b) Co e (c) Pb.

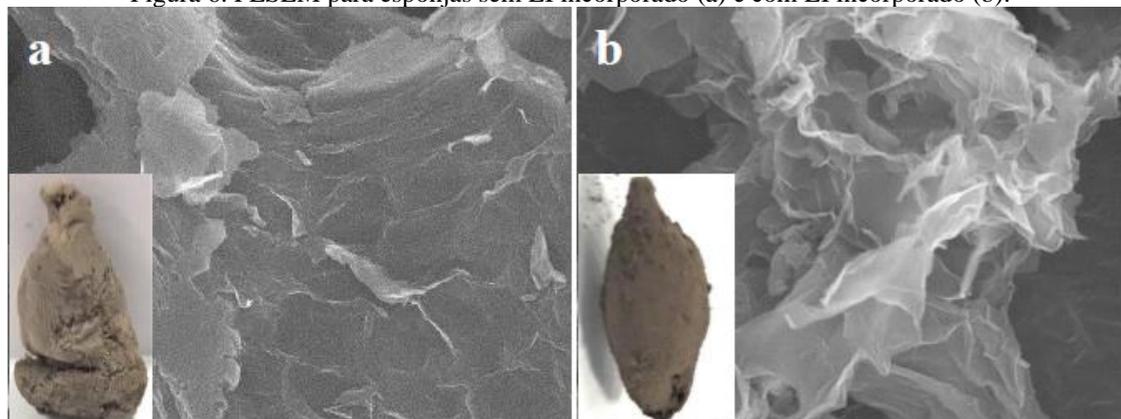


Fonte: Kakatei et al. (2020).

Observando a Figura 5 vê-se claramente em verde, os íons metálicos incorporados na estrutura da argila tratada com líquido iônico.

Zambare e Nemade (2021) desenvolveram esponjas de óxido de grafeno com líquido iônico para a remoção de Cr^{+6} da água. Os pesquisadores incorporaram ao óxido de grafeno o líquido iônico brometo de 1-amonipropil-3-metilimidazólio e liofilizaram a mistura a fim de obter esponjas funcionalizadas, estas foram incorporadas em meios aquosos com concentração de cromo hexavalente e, avaliado seu potencial extrator do metal pesado do meio (ZAMBARE e NEMADE, 2021). A esponja mostrou capacidade de remoção através de interações eletrostáticas que reduziu o Cr^{+6} em Cr^{+3} , uma forma menos tóxica, através de um mecanismo que contou com a participação de elétrons π deslocados do anel aromático da esponja (ZAMBARE e NEMADE, 2021). Os ensaios foram efetuados segundo um estudo cinético de pseudo-segunda ordem que levaram aos resultados de adsorção superficial com as interações químicas mostrando que a capacidade de adsorção foi de 208,3mg/g a temperatura de 23°C quando em pH ácido o equivalente a 99,3% da concentração de Cr^{+6} presente no meio em 360 minutos de extração (ZAMBARE e NEMADE, 2021). A Figura 6 mostra a *Field Emission Scanning Electron Microscopy* (FESEM) feita para (a) uma esponja sem a incorporação do líquido iônico e para (b) uma esponja com a incorporação do líquido iônico.

Figura 6. FESEM para esponjas sem LI incorporado (a) e com LI incorporado (b).



Fonte: Zambare e Namade (2021).

Observando a Figura 6, pode-se perceber claramente a diferença da estrutura da esponja sem a incorporação do LI (a) frente a esponja com a incorporação do LI (b), isso confirma as conclusões dos autores acerca da efetividade do tratamento com LI para a remoção dos íons metálicos em solução.

Segundo os estudos realizados por Dastyar et al. (2019) observa-se uma capacidade interessante de remoção de metais pesados contaminantes do solo também, quando efetuado o pré-tratamento em plantas Salgueiro. Segundo as pesquisas, após efetuar o tratamento em mudas de salgueiro com hidrogenossulfato de trietilamônio e efetuar o plantio das mesmas em área de solo contaminado, observa-se um potencial de remoção dos metais pesados ali presentes em percentuais interessantes e relativos a investimentos em novas pesquisas a respeito (DASTYAR et al., 2019).

A utilização do hidrogenossulfato de trietilamônio entra como sendo um líquido iônico inovador de baixo custo de produção e apresentando efetividade na remoção dos metais pesados (DASTYAR et al., 2019).

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observado a crescente demanda que a pesquisa e a indústria possuem acerca de tratamentos adequados dos inúmeros resíduos que são produzidos em seus processos, uma vez que a produção cresce mais a cada dia e conseqüentemente, na mesma proporção, a geração de resíduos, logo, alternativas nas metodologias de tratamentos de resíduos são necessárias para que se obtenha melhores resultados nas remoções de contaminantes e conseqüentemente a diminuição dos danos ao meio ambiente ao se efetuar o lançamento destes resíduos pós tratamento.

Vê-se que a contaminação por metais pesados oriunda das etapas dos mais diversos tipos de procedimentos aplicados na indústria representa uma grande preocupação, bem como elevados custos para tratamento até se obter concentrações de componentes que atendam os limites estabelecidos pela legislação.

Destarte, encontrar maneiras efetivas e economicamente viáveis para tal procedimento de separação de componentes tóxicos dos resíduos se apresenta como área de pesquisa inovadora e atrativa. A utilização de líquidos iônicos como agente extrator representa uma alternativa atrativa e coerente uma vez que existem uma demanda de estudos que os incluem como agentes removedores de metais pesados e outros componentes de efluentes o que corrobora com a ideia de que o material possua capacidade extratora.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

BARRETO, L. S. S. **Minimização do consumo de cimento em processos de solidificação e estabilização aplicados a resíduos galvânicos e de rochas ornamentais**. 2020. 105f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

BRASIL. Lei nº 12305 de 2 de agosto de 2010. **Dispõe sobre a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, agosto de 2010.

CALE, D.; CONCHA, S.; CASTILLO, J.; ROSERO, D. Metais pesados e identificação de bactérias cultiváveis no antigo aterro sanitário de Navarro, Santiago De Calli, Valle del Cauca, Colombia. **Revista Multidisciplinar de Educação e Meio Ambiente**, v. 1, n. 1, set. 2020. ISSN: 2675-813X. Acesso em: 17 abr. 2021.

CARDOZO, B. C.; MANNARINO, C. F.; FERREIRA, J. A. Análise do monitoramento ambiental da incineração de resíduos sólidos urbanos na Europa e a necessidade de alterações na legislação brasileira. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 25, n. 1, p. 123-131, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220190040>. Acesso em: 25 abr. 2021.

CHEN, C.; FENG, X.; YAO, S. Ionic liquid-multi walled carbon nanotubes composite tablet for continuous adsorption of tetracyclines and heavy metals. **Journal of Cleaner Production**, v. 286, n. 124937, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124937>. Acesso em 18 abr. 2021.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357 de 2005. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 17 mar. 2005.

DASTYAR, W.; ZHAO, M.; YUAN, W.; LI, H.; TING, Z. J.; GHAEDI, H.; YUAN, H., LI, X.; WANG, W. Effective pretreatment of heavy metal-contaminated biomass using a low-cost ionic liquid (Triethylammonium Hydrogen Sulfate): optimization by response surface methodology – box Behnken design. **American Chemical Society: Sustainable Chemistry e Engineering**, v. 7, n. 13, p. 11571 – 11581, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b01457>. Acesso em: 11 mar. 2021.

DE AGUIAR, M. R. M. P.; NOVAES, A. C.; GUARINO, A. W. S. Remoção de metais pesados de efluentes industriais por aluminossilicatos. **Revista Química Nova**, v. 25, n. 6B, p. 1145-1154, 2002. ISSN: 1678-7064. Acesso em: 18 abr. 2021.

DE OVIVEIRA, G. A. C. **Purificação do carbonato de lítio utilizando a técnica de troca iônica**. 2020. 96f. Dissertação (Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2020.

DOS SANTOS, E. L.; BRANCO, J. C.; GONÇALVES, J. M. F.; DA SILVA, R. R.; NYCZ, Z. Parecer sobre a proposta de resolução Conama nº 499 de 2020 que dispõe sobre o licenciamento da atividade de coprocessamento de resíduos em fornos rotativos de produção de clínquer. **Conferência sobre Princípio da Precaução**, 2020. Disponível em:

https://acpo.org.br/wp-content/uploads/2020/11/parecer_resolucao_499_2020.pdf. Acesso em 25 abr. 2021.

ELIODÓRIO, K. P. **Avaliação da adsorção de cromo em quitosana submetida a tratamento com líquidos iônicos**. 2018. 178f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro Universitário da Fundação Educacional Inaciana, São Bernardo do Campo, 2018.

FERREIRA, L. A.; SILVINO, M. D.; SILVA, A. P. Gerenciamento de resíduos sólidos de serviços de saúde: realidade do município de Assu/RN. **Revista Brazilian Journal of Development**, v. 7, n.3, p. 21816 – 21828, 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n3-069.

FOONG, C. Y.; WIRZAL, M. D. H.; BUSTAM, M. A. A review on nanofibers membrane with amino-based ionic liquid for heavy metal removal. **Journal of Molecular Liquids**, v. 297, n. 111793, jan. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111793>. Acesso em: 17 abr. 2021.

GOMES, A. C. L.; DE MELO, S. R. Pilhas e efeitos nocivos. **Arquivos do Mundi**, v. 10, n. 3, 2006. ISSN: 1980-959X. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ArqMudi/article/view/19981>. Acesso em 18 abr. 2021.

KAKAEI, S.; KHAMENEH E. S.; HOSSEINI, M. H.; MOHARRERI, M. M. A modified ionic liquid clay to remove heavy metals from water: investigating its catalytic activity. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 17, p. 2043-2058, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02527-9>. Acesso em 18 abr. 2021.

LACERDA, K. A. P.; MORAES, J. V. Q.; SILVA, Y. G.; DE OLIVEIRA, S. L. Compostagem: alternativa de aproveitamento dos resíduos sólidos utilizando diferentes modelos de composteiras. **Revista Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 6, p. 40753 – 40763, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n6-567

LIMA, A. A. J. **Modelação da desidratação de lamas de etar por meio de leitos de secagem**. 2020. 100f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Bragança, 2020.

LONGO, R. M.; FERREIRA, D. H. L.; DA SILVA, A. L.; PENEREIRO, J. C.; MENDES, D. R. Atributos químicos e metais pesados em solos de remanescentes florestais urbanos. **Revista Cerrados**, v. 18, n. 02, p. 183-207, 2020. DOI: <https://doi.org/10.46551/rc24482692202014>. ISSN: 2448-2692. Acesso em: 18 abr. 2021.

LOUREIRO, D.; MIRANDA, M.; MARTINS, A.; VIEGAS, S.; RODRIGUES, H.; LOBO, G.; PRIETO, E. G.; GALAN, S. P.; DIAS, I.; MENDEZ, J. O.; PEREZ, M. B. A.; MANTILLA, V. Potencial de integração de energia solar térmica de concentração em processos de secagem de resíduos. In: XVII CONGRESO IBÉRICO Y XIII CONGRESO IBEROAMERICANO DE ENERGÍA SOLAR, 2020, Lisboa. Anais CIES. Lisboa: LnEG, 2020. p. 553-561.

MACCI, C.; PERUZZI, E.; DONI, S.; VANNUCCHI, F.; MASCIANDARO, G. Landfarming as a sustainable management strategy for fresh and phytoremediated sediment. **Environ Sci**

Pollut Res, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13134-y>. Acesso em 25 abr. 2021.

MACENA, M. W. **Análise do potencial de adsorção de íons metálicos em solução aquosa por resíduos lenhocelulósicos**. 2021. 71f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – Instituto Politécnico de Viseu, Portugal, 2021.

MALAS, R.; IBRAHIM, Y.; ALNASHEF, I.; BANAT, F.; HASAN, S. W. Impregnation of polyethylene membranes with 1-butyl-3-methylimidazolium dicyanamide ionic liquid for enhanced removal of Cd^{2+} , Ni^{2+} , and Zn^{2+} from aqueous solutions. **Journal of Molecular Liquids**, v. 318, n. 113981, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113981>. Acesso em 18 abr. 2021.

MARCONDES, N. DA S.; ZABLONSKY, J. R.; IKE, P. Tratamento de resíduos químicos no laboratório do IFPR – Campus Paranaguá. **Revista Ciência é a Minha Praia**, v. 8, n. 1, p. 25-35, 2020. ISSN: 2525-5843. Acesso em 17 abr. 2021.

MOLKE, A. S.; DOS SANTOS, A. Z.; BENATTI, C. T.; TAVARES, C. R. G.; LIMA, O. C. M.; DE SYLLOS, R. S. Remoção de sulfato a partir de efluente industrial, utilizando precipitação com sais de bário e cálcio. **Revista Engenharia do Século XXI**, v.14, p. 48-55, 2020. DOI: 10.36229/978-65-86127-45-4. Acesso em 25 abr. 2021.

PEDOTT, V. A.; BORDIN, I.; MIGNONI, M. L. Utilização de cinzas de cascas de arroz como fonte de sílica na síntese do material Nb-MCM-48. **Expressões Acadêmicas: engenharia de alimentos e engenharia química**, v. 1, p. 35 – 54, 2020. DOI: 10.46550/978-65-88362-38-9

PERALTA, A. K. N. **Líquidos iônicos como solventes para incrustações em tubulações industriais**. 2019. 34f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2019.

PHAN, H. B.; NGUYEN, Q. B. T.; LUONG, C. M.; TRAN, K. N.; TRAN, P. H. A green and highly efficient synthesis of 5-hydroxymethylfurfural from monosaccharides using a novel binary ionic liquid mixture. **Molecular Catalysis**, v. 506, n. 111428, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2021.111428>. Acesso em 18 abr. 2021.

PICCOLI, V. **Estudo da solvatação de proteínas por líquidos iônicos usando funções de distribuição de mínima-distância**. 2020. 97f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2020.

SADJADI, S. Magnetic (poly) ionic liquids: A promising platform for green chemistry. **Journal of Molecular Liquids**, v. 323, n. 114994, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114994>. Acesso em: 18 abr. 2021.

SCHOENELL, E. K. **Aplicação de osmose reversa e processos oxidativos avançados para tratamento terciário de esgoto**, 2020. 145f. Tese (Doutorado em Qualidade Ambiental) – Universidade Feevale, Novo Hamburgo, 2020.

SINGH, S. K.; SAVOY, A. W.; Ionic liquids synthesis and applications: An overview. **Journal of Molecular Liquids**, v. 297, n. 112038, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.112038>. Acesso em: 14 mar. 2020.

TAVARES, J. M.; DE FREITAS, J. T.; DE SOUZA, P. M. A.; DA SILVA JÚNIOR, W. Identificação e quantificação de metais pesados nas panelas de barro vitrificadas de fabricação artesanal. **Brazilian Journal of Health Review**, v. 3, n. 2, p. 2406-2414, 2020. ISSN: 2595-6825. Acesso em: 18 abr. 2021.

THASNEEMA, K. K.; DIPIN, T.; THAYYIL, M. S.; SAHU, P. K.; MESSALI, M.; ROSALIN, T.; ELYAS, K. K.; SAHARUBA, P. M.; ANJITHA, T.; HADDA, T. B. Removal of toxic heavy metals, phenolic compounds and textile dyes from industrial waste water using phosphonium based ionic liquids. **Journal of Molecular Liquids**, v. 232, n. 114645, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114645>. Acesso em 18 abr. 2021.

TIENEN, Y. M. S. V.; VICAKAS, O. M.; BARCIA, M. K.; FONSECA, S.; VEIGA, T. B. Avaliação da compostagem e vermicompostagem para a biodegradação da matéria orgânica. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 46833-48639, 2020. ISSN: 2525-8761. DOI: 10.34117/bjdv6n7-353. Acesso em 2 abr. 2021.

TRINDADE, F. C. S. **Estudo Multivariado da esterificação de óleo de fritura, utilizando líquido iônico como catalizador, visando a produção de biodiesel**. 2019. 64f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

WELTON, T. Ionic Liquids: a brief history. **Biophysical Reviews**, v. 10, p. 691- 706, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12551-018-0419-2>. Acesso em: 14 mar. 2021.

WIESZCZYCKA, K.; FILIPOWIAK, K.; WOJCIECHOWSKA, I.; BUCHWALD, T.; CIESIELCZYK, K. S.; STRZEMIECKA, B.; JESIONOWSKI, T.; VOELKEL, A. Novel highly efficient ionic liquid-functionalized silica for toxic metals removal. **Separation and Purification Technology**, v. 265, n. 118483, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118483>. Acesso em 18 abr. 2021.

YU, M.; ZENG, S.; NIE, Y.; ZHANG, X.; ZHANG, S. Ionic liquid-based adsorbents in indoor pollutants removal. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 27, n. 100405, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.100405>. Acesso em: 18 abr. 2021.

ZAMBARE, R. S.; NEMADE, P. R. Ionic liquid-modified graphene oxide sponge for hexavalent chromium removal from water. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 609, n. 125657, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125657>. Acesso em 17 abr. 2021.