

Coleção Química no Cotidiano

Sustentabilidade e Soberania
Volume 18



Fábio Junior Moreira Novaes
Maria Eliana Lopes Ribeiro de Queiroz
Liany Divina Lima Miranda
Vitor Manuel Libardi
Diana Cardoso Silva
Daliane Cláudia de Faria
Samantha Kettler Costa Xavier

**Química para
o desenvolvimento
sustentável na
gestão de resíduos
industriais e agroindustriais**

Coleção Química no Cotidiano

Volume 18

Química para o desenvolvimento sustentável na gestão de resíduos industriais e agroindustriais

Fábio Junior Moreira Novaes

Maria Eliana Lopes Ribeiro de Queiroz

Liany Divina Lima Miranda

Vitor Manuel Libardi

Diana Cardoso Silva

Daliane Cláudia de Faria

Samantha Kettler Costa Xavier



MOVIMENTO
QUÍMICA
PÓS 2022
Sustentabilidade e Soberania

 Sociedade
Brasileira
de Química



CERSusChem
Centro de Excelência para
Pesquisa em Química Sustentável

1^a Edição

São Paulo | Sociedade Brasileira de Química | 2022

© Sociedade Brasileira de Química

Coleção Química no Cotidiano - Química para o desenvolvimento sustentável na gestão de resíduos industriais e agroindustriais

Volume 18

Coordenadoras do projeto

Claudia Moraes de Rezende e Rossimiriam Pereira de Freitas

Editora-chefe

Claudia Moraes de Rezende

Revisores

Claudia Moraes de Rezende e Rossimiriam Pereira de Freitas

Arte gráfica e editoração

Cabeça de Papel Projetos e Design LTDA (www.cabecadeerpapel.com)

Ficha Catalográfica

Wanda Coelho e Silva (CRB/7 46)

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

N43q Novaes, Fábio J. M.

Química para o desenvolvimento sustentável na gestão de resíduos industriais e agroindustriais / Fábio Junior Moreira Novaes, Maria Eliana Lopes Ribeiro de Queiroz, Liany Divina Lima Miranda, Vitor Manuel Libardi, Diana Cardoso Silva, Daliane Cláudia de Faria, Samantha Kettler Costa Xavier – São Paulo: Sociedade Brasileira de Química, 2022.

p.56 - (Coleção Química no Cotidiano, v. 18)

ISBN 978-85-64099-34-0

1. Química. 2. Sustentabilidade. I. Novaes, Fábio J. M.. II. Título. III. Série.

CDD 547.7

CDU 547.9

Todos os direitos reservados – É proibida a reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por outro meio. A violação dos direitos de autor (Lei nº 5.988/73) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Índice

1. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL?	5
1.1 Acontecimentos importantes que nos levaram ao conceito sobre sustentabilidade	7
1.2 Dos erros das indústrias para os acertos das leis ambientais	9
1.3 Sustentabilidade também se faz com pesquisa e inovação: a mão amiga das Instituições de Ensino Superior.....	11
2. NOSSOS OBJETIVOS SÃO: REEDUCAR, REDUZIR, REUSAR E RECICLAR.....	13
2.1 Os quatro Rs	13
2.2 A química para o desenvolvimento sustentável	16
2.3 Química verde.....	16
2.4 Exemplos de sustentabilidade em laboratório de química	18
2.5 Um caça palavras sustentável	22
3. O BRASIL É AGRO E O NOSSO CAFÉ TAMBÉM	24
3.1 A química do café	26
3.2 Tudo isso só para produzir um cafezinho?	29
3.3 Destinos inteligentes para os resíduos gerados pela cadeia produtiva do café	32
3.3.1. Cascas ou epicarpo	32
3.3.2. Polpa ou mesocarpo.....	33
3.3.3. Mucilagem	34

3.3.4. Pergaminho ou endocarpo	34
3.3.5. Película prateada ou espermoderma.....	34
3.3.6. Borra de café	35
3.3.7. Outros subprodutos	36
3.4 Aumentando a produtividade pelo princípio de Le Châtelier	37
4. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL PARA AS INDÚSTRIAS DE MINERAÇÃO E SIDERURGIA	42
4.1 Um pouco de química para ilustrar a formação de rochas, minerais e minérios	42
4.2 Processos de mineração e seus impactos ambientais	45
4.3 Soluções sustentáveis para os rejeitos de minério de ferro	47
4.4 O Processo de produção de Aço	48
4.4.1 Soluções para os rejeitos da produção de aço	52
4.4.2 Biorremediação como tratamento alternativo aos rejeitos da indústria siderúrgica.....	55
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
6. REFERÊNCIAS	58

1. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL?

Com o constante avanço científico e tecnológico impulsionado pelas necessidades de mercado, o conceito de “desenvolvimento” está sempre em discussão. A palavra está associada a avanços, melhorias de maneira geral. A partir da primeira revolução industrial até a atual quarta revolução, houve um aumento considerável da população mundial seguido de mudanças radicais de estilo de vida da população consumidora. Contudo, problemas ambientais como o efeito estufa, produção exorbitante e acúmulo de lixo, poluição de lagos, rios e mares, além da perda de fauna e flora em diversos lugares são cada dia mais frequentes. Tudo isso começou a tomar a nossa atenção e a palavra “desenvolvimento” passou a ser questionada quando tal avanço se tornou insustentável.

Pela natureza, há uma renovação contínua de tudo o que essa possui e produz, e as etapas desse processo podem ser compreendidas quando vistas mais de perto. Como exemplo, pode-se citar o ciclo hidrológico, comumente chamado de ciclo da água (H_2O). O calor do sol evapora a água presente na superfície das geleiras, dos oceanos, rios e lagos, das folhagens das plantas e também dos corpos dos animais. A água evaporada gera um ar úmido, menos denso que o ar seco, que se eleva a grandes altitudes, onde alcança regiões mais frias e condensa, ou seja, as moléculas de água se aglutinam a outras moléculas de água para formarem gotas e estas se agrupam e geram as nuvens. A condensação cumulativa dessas gotas de água promove sua precipitação, ocorrendo então a chuva, a neve ou o granizo (a depender das condições climáticas locais). Sobre um solo permeável, parte dessa água rega a terra, sendo absorvida pelas raízes das plantas, alimenta o lençol freático que deságua em córregos e rios, até alcançarem o mar, onde o

ciclo se encerra e outro igual equivalente se inicia. Desse modo, 100% da água produzida é utilizada e reutilizada, nada se perde, tudo se transforma!

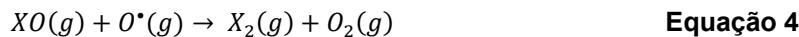
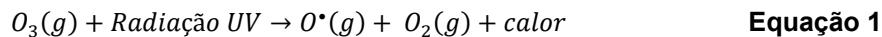
Assim como a natureza, a humanidade também tem suas atividades desenvolvidas em ciclos, entretanto, alguns ocorrem de forma incompleta e geram subprodutos indesejáveis, aos quais chamamos de resíduos. Portanto, esses ciclos não são sustentáveis, pois podem exceder a capacidade do planeta de transformá-los em algo bom e útil para a natureza, nossa principal fonte de recursos. Para melhor compreensão, imagine um pequeno produtor de bananas que consegue uma produção para o consumo familiar, além de uma renda nas feiras de quarta e domingo na praça e no abastecimento de um pequeno mercado da cidade. O lixo produzido, inicialmente composto por cascas e bananas amassadas, são destinados à alimentação animal e à compostagem, que nada mais é que a decomposição de matéria orgânica por um processo natural para a produção de adubo, por ser rico em nutrientes e minerais, posteriormente aplicado aos pés das bananeiras para a contínua produção de bananas. Com o crescimento demográfico, a demanda do pequeno produtor aumentou, mas também a quantidade de resíduos gerados, os quais eram muitos para os animais da fazenda comerem e também para a compostagem, sendo acumulados em um canto da propriedade. Com o tempo, todo aquele resíduo passou a cheirar mal, bem como a atrair insetos e roedores; a consequência foi que o acúmulo de resíduos e a adubação incorreta do solo fez com que as bananeiras já não mais crescessem e frutificassem, e a produção desacelerou até ser encerrada. Em outras palavras, a pequena propriedade teve sua capacidade de renovação esgotada, de forma que o ciclo sustentável que fazia foi saturado e tornou-se insustentável. Como esse exemplo, todas as atividades humanas têm influência crescente no meio ambiente e podem ter consequências não somente locais, mas também regional, estadual, nacional e até mesmo global.

Muitas das ameaças ambientais da atualidade são consequências das atividades antropogênicas, ou seja, aquelas realizadas pelo homem ao longo dos anos. Com o crescimento demográfico houve a intensificação no cultivo dos alimentos e também na criação de animais, acelerado pelo advento da industrialização a partir da segunda metade do século XVIII, que trouxe um salto na produção de bens de consumo. O nosso resíduo, que era predominantemente de matéria orgânica, restos de comida e dejetos de animais, passou também a incluir plásticos, vidros, pilhas e baterias, além de latas, guimbas de cigarro, fraldas plásticas e absorventes, entre muitos outros. Além disso, a produção industrial de todos esses bens de consumo também gera seus próprios resíduos, chamados de resíduos industriais, o qual iremos melhor descrever mais adiante. De todo resíduo urbano e industrial, a natureza nos cobra uma “dívida com juros” pelo tempo gasto para os “deteriorar”, pelo seu acúmulo no meio ambiente e pelo esgotamento dos recursos naturais (água, solo, ar, bananeiras, bananas, etc.).

1.1 Acontecimentos importantes que nos levaram ao conceito sobre sustentabilidade

Em 1983, a Organização das Nações Unidas, junto à Comissão Mundial sobre Ambiente e Desenvolvimento, elaboraram um plano de desenvolvimento sustentável a longo prazo. Este foi acelerado quando Farman e colaboradores (1985) publicaram um artigo na revista *Nature* sobre o aparecimento de um buraco na camada de ozônio, um gás presente na estratosfera cuja fórmula química é O_3 . O surgimento desse buraco que a cada ano aumenta alertou o planeta sobre um perigo próximo, visto que a camada de ozônio é responsável por filtrar os raios solares ultravioleta (UV) (Tabela 1), que em excesso podem levar a diversos problemas, incluindo o desenvolvimento de danos acumulativos e irreversíveis sobre a visão dos seres vivos, como a formação de catarata e seu avanço até

cegueira, a produção de radicais livres que enfraquecem a elasticidade da pele, acelerando seu envelhecimento e facilitando a formação de hematomas e até mesmo surgimento de um câncer de pele. A radiação UV que chega à superfície terrestre é controlada graças ao ozônio, que utiliza da energia desta radiação para ser degradado, como mostrado na **Equação 1**. O ozônio pode ser regenerado a partir da reação do oxigênio molecular (O_2) com o oxigênio radical (O^\bullet) como representado na **Equação 2**. Tal fenômeno ocorre naturalmente na atmosfera. Porém, com a presença de catalisadores (X) como, por exemplo, os clorofluorcarbonetos (CFCs) ou radicais livres (NO^\bullet , OH^\bullet , Cl^\bullet , Br^\bullet , ClO^\bullet e BrO^\bullet), ocorre apenas a reação de degradação do ozônio, o que impede sua posterior regeneração, como é representado nas **Equações 3 e 4**. Uma menor regeneração do ozônio leva a uma menor concentração deste na atmosfera, resultando literalmente em um buraco na camada de ozônio.



A partir da comprovação científica sobre a existência do buraco na camada de ozônio, em 1987, a Comissão Mundial sobre Ambiente e Desenvolvimento publicou o relatório “Nosso Futuro Comum” o qual definia o termo “Sustentabilidade (ou Desenvolvimento Sustentável)” como “ação que satisfaz as necessidades da geração humana presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades”. O relatório informava que a implementação do Desenvolvimento Sustentável deveria integrar mudanças políticas, sociais e econômicas para com o meio ambiente, para satisfazer as necessidades das gerações atuais e futuras, eliminando a pobreza e a exploração,

além de distribuir de forma igualitária seus recursos naturais e conscientizar toda a sua população sobre o seu papel social para com o meio ambiente.

Já em 1992, no Rio de Janeiro, ocorreu a Eco-92, ou Rio-92, também chamada de Agenda 21. O evento alertou sobre a responsabilidade conjunta de países, estados e seus municípios quanto aos temas discutidos, como mudanças climáticas, poluição da água, qualidade do ar, desertificação e perda do solo, desmatamento e o gerenciamento de seus resíduos potencialmente tóxicos, entre outros assuntos. Posterior à Eco-92 passaram a ocorrer eventos periódicos com a finalidade de relembrar o compromisso assumido pelos países e também monitorar os progressos em busca da tão sonhada sustentabilidade.

Esses eventos foram essenciais para a conscientização da sociedade acerca dos perigos eminentes à saúde das pessoas e do planeta. Para um maior controle, leis restritivas foram e até hoje têm sido criadas em todo o mundo e aplicadas para a valorização do meio ambiente e assegurar a redução de fontes poluidoras. De mãos dadas para esse compromisso, pesquisas científicas e tecnológicas na área da química e de outras ciências estão fazendo a diferença para a construção de uma sociedade mais sustentável. Falaremos um pouco agora sobre como a legislação ambiental brasileira foi fundamental para o início do desenvolvimento sustentável no país e depois sobre exemplos de aplicação da química para a sustentabilidade.

1.2 Dos erros das indústrias para os acertos das leis ambientais

No Brasil, a partir dos anos 1970, houve uma intensificação dos agravos à saúde pública oriundos de atividades industriais. No ano de 1972, uma fábrica de

celulose em Porto Alegre que emitia fortes odores que causavam mal-estar, enjoos e desmaios na população em seu entorno. Essa por sua vez realizou uma intensa pressão sobre as autoridades locais até que a fábrica fechou, sendo reaberta poucos anos depois após a instalação de filtros que capturavam os vapores poluentes emitidos. Até esse episódio, o Brasil não possuía leis que dispusessem sobre o controle da poluição do meio ambiente provocada por atividades industriais. Não demorou muito até que foi publicado o Decreto-Lei nº 1.413, de 31 de julho de 1975, em resposta às doenças respiratórias e dermatológicas causadas à população de Contagem, Minas Gerais, pela Companhia Cimento Portland Itaú que emitia diariamente e, por mais de 30 anos, elevados níveis de minúsculas partículas no ar que cobriam as casas no seu entorno, oferecendo riscos à saúde humana.

O nosso direito como cidadão ao meio ambiente saudável tornou-se um direito constitucional fundamental defendido na Constituição Federal de 1998, que aponta em seu artigo 225: *"Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações"*. Mesmo assim, algumas empresas desconsideram o uso racional dos recursos naturais e intensificam a exploração do meio ambiente e também de pessoas, e justamente para estas se faz valer a existência da proteção legal.

Com a formulação e aplicação das leis, os solos, as águas, o ar, as plantas e os animais passaram a ser legalmente protegidos, já que o seu não cumprimento pode ser considerado como crime ambiental. Cabe ao poder público aplicar as leis e trazer a educação ambiental, sem a qual não se conseguirá conscientizar adequadamente as gerações atuais e futuras. Uma vez que, para alcançar o desenvolvimento sustentável das atividades agrícolas e industriais, não precisamos prejudicar o meio ambiente.

Mas será que há outros mecanismos para um desenvolvimento sustentável? Há sim e esse vem da ciência, da pesquisa aplicada à preservação ambiental e também da otimização de processos industriais e agroindustriais destinados para a redução, reuso e reciclagem máximas dos resíduos gerados. Os responsáveis por sua geração também devem ser encarregados de fornecer o devido destino aos resíduos gerados até sua eliminação no meio ambiente.

1.3 Sustentabilidade também se faz com pesquisa e inovação: a mão amiga das Instituições de Ensino Superior

As Instituições de Ensino Superior (IESs) tem um papel fundamental na geração de conhecimento para a sustentabilidade, com propostas para a resolução dos problemas e também com informação fundamentada para a sociedade. Como exemplo, temos cientistas da Universidade Federal da Bahia (UFBA) que investigaram o derramamento de óleo na costa brasileira em 2019 e a partir de análises de sua composição química, buscaram marcadores moleculares que seriam suas impressões digitais, capazes de rastrear o poço do qual o óleo foi extraído, indicando que se tratava de um petróleo venezuelano. A composição química e sua correta interpretação são fundamentais para elucidar este e outros impactantes problemas ambientais.

Uma alternativa sustentável para a produção de energia tem sido aplicada pela Universidade Federal do Rio do Janeiro (UFRJ). Esta possui o projeto Fundo Verde, que instalou sistemas fotovoltaicos nas coberturas de diversos prédios e também de um estacionamento, com geração de energia limpa. O projeto também conta com carros 100% elétricos e dezenas de bicicletas que podem ser gratuitamente utilizadas por toda a comunidade acadêmica. As bicicletas ficam

disponíveis em estações de compartilhamento, distribuídas em pontos estratégicos como os centros de aula, os restaurantes universitários e o alojamento, facilitando os deslocamentos internos no campus.

Mais recentemente as IES brasileiras auxiliaram seus municípios, estados e o país na luta contra o SARS-CoV-2, o novo coronavírus gerador da doença infecciosa COVID-19. Entre muitas contribuições, realizadas por dezenas de universidades em todo o país, está a da Universidade Federal de Viçosa (UFV), que abriu suas instalações e mobilizou seus funcionários, professores e alunos da área da saúde para serviços à população local, como assistência médica, vacinação e orientações sobre o vírus. Na área de pesquisa, a UFV trabalhou no desenvolvimento de três candidatos vacinais e dois testes de diagnóstico rápido e de baixo custo para auxílio no controle da doença.

É apropriado dizer que a maioria das IES brasileiras estão de mãos dadas com os municípios e as indústrias circunvizinhas por meio de projetos diversos que buscam encontrar soluções para um desenvolvimento mútuo e sustentável. Saúde, segurança, qualidade de vida, aumento da produção agrícola e industrial, são alguns exemplos dos resultados esperados. Geralmente, o primeiro passo para o desenvolvimento sustentável passa por um período para se refletir sobre os caminhos trilhados, seguido por uma ação centrada na reeducação sobre a forma de produção e consumo, como também de atitudes que resultam na redução, reuso e reciclagem de resíduos agrícolas, industriais e urbanos. A seguir temos quatro passos simples que podem nos inspirar a possuir responsabilidade social para com o meio ambiente e a sobrevivência das gerações atuais e vindouras. Trabalhar juntos como membros de um único corpo é a melhor solução para o Desenvolvimento Sustentável de nossas atividades.

2. NOSSOS OBJETIVOS SÃO: REEDUCAR, REDUZIR, REUSAR E RECICLAR

2.1 Os quatro Rs

Os quatro Rs da sustentabilidade são as quatro atitudes que nos inspiram a nos autoexaminar como agentes protetores legais do meio ambiente. O primeiro termo é sobre **REPENSAR** as nossas atividades diárias e como elas afetam os ambientes que estamos inseridos (casa, vizinhança, bairro, escola, etc.). Podemos listar o que realizamos de bom e de errado e, por fim, planejar ações futuras para nos desenvolvermos também de forma sustentável. Experimente colocar no papel o quanto de energia elétrica, água e gás você e sua família consome, em seguida pesquise e pense em maneiras criativas para o melhor uso e economia desses materiais.

Com uma proposta similar ao repensar, o termo **REDUZIR** nos motiva a diminuir o nosso consumo daquilo que não é necessário para a nossa sobrevivência. Um exemplo simples é o de fechar a torneira enquanto estamos escovando os dentes ou nos ensaboando debaixo do chuveiro. Torneiras, chuveiros e sanitários inteligentes nos educam ao controlarem por si só o fluxo de água utilizada, a depender da necessidade requerida... Além do consumo de água, somos desafiados a também reduzir todos os resíduos que produzimos, o que é uma atitude positiva para o meio ambiente e também para o nosso bolso, não é mesmo?

REUTILIZAR é o terceiro R que desejamos destacar. Muito do que produzimos pode ser reutilizado, ou seja, usado novamente ao invés de ser descartado. Um exemplo são as sacolas plásticas adquiridas no supermercado, as quais podem ser reaproveitadas para recolhimento do lixo doméstico, evitando assim a compra de sacolas para esta finalidade.

Por fim, o quarto R de **RECICLAR**. A ideia é reaproveitar um material que já esgotou as possibilidades de ser reusado e utilizá-lo como matéria-prima para outros de igual natureza química. Para isso é importante separar os materiais recicláveis (plásticos, vidros, metais e papéis) dos não-recicláveis (matéria orgânica). Dessa maneira, reduzimos a necessidade de extrair matéria-prima da natureza e oferecemos um destino ideal para esses resíduos, que geralmente são as empresas de reciclagem, as quais limpam e melhor condicionam esses materiais para serem vendidos a outras empresas.

Quadro 1. Você saberia distinguir os termos lixo, rejeito, resíduo e subproduto?

Lixo	Material que não possui valor comercial, não tem mais utilidade e não pode ser reutilizado. O destino do lixo é a incineração, que seria uma adequada e devida decomposição por aquecimento visando diminuir o volume e a toxicidade do material para, então, ser depositado em aterro sanitário. Vale ressaltar que esses aterros são instalações planejadas para se depositar os resíduos sólidos da atividade humana, com o controle dos gases e líquidos gerados pela sua decomposição. O envio à incineração e aterros possui um custo elevado para os municípios e as empresas em geral. Logo, todos devem priorizar o reuso e a recuperação desses materiais para evitar o envio desnecessário a tais destinos.
Resíduo	Sobra(s) de um material, por isso tem menor valor comercial que o produto principal. Porém, possui potencial de ser utilizado, passando ou não por algum tratamento industrial. Um exemplo simples é o verso de folhas de papel proveniente de impressões, abundantemente descartadas em

	copiadoras. Em nossos lares podemos reutilizá-los, mas em algumas empresas não, os quais são geralmente destinados à reciclagem e podem se tornar novas folhas ou embalagens, produzidas a partir de matéria-prima reciclada.
Rejeito	É uma classe de resíduo que já foi reaproveitado diversas vezes e não há mais possibilidades de reuso ou reciclagem. Seu destino é ser tratado e encaminhado a um aterro sanitário ou à incineração. Um exemplo de rejeito na atualidade é o gerado pela mineração, uma mistura composta principalmente por ferro, sílica e água, depositada em barragens como a que se rompeu e devastou a cidade de Brumadinho em Minas Gerais no ano de 2019.
Subproduto	Produto secundário gerado durante a fabricação de um produto principal. O subproduto tem valor agregado, porém, seu valor é menor que o produto principal. A maioria dos subprodutos requer um beneficiamento antes de ser comercializado. Um exemplo de subproduto é a casca e o cilindro central do abacaxi que, em geral, são descartadas, já que o produto principal neste caso é a polpa do fruto. Por serem constituídos de proteína, lipídios e fibra alimentar estes subprodutos podem ser aproveitados para compor a fabricação de barras de cereais, com ou sem o sabor de abacaxi. Fibra alimentar ou dietética é a parte de alimentos à base de plantas que não é digerida ou absorvida por nosso organismo, e normalmente é um carboidrato complexo comumente encontrado em vegetais, frutas, grãos e leguminosas. A fibra dietética é constituída por fibras solúveis e insolúveis. A primeira se dissolve facilmente na água e em fluidos gastrointestinais quando entra no estômago e no intestino, diferente da segunda que permanece parcialmente inalterada à medida que se move através do trato digestivo.

2.2 A química para o desenvolvimento sustentável

A ciência química passou a considerar fortemente a preservação do meio ambiente quando se deu conta que muitas substâncias resultantes de processos de produção poderiam ser nocivas para a vida na Terra. Foi aí que um novo conceito surgiu sendo denominado como Química Verde, criada com o intuito de afetar o mínimo possível os ciclos existentes na natureza, como o da água, por exemplo. Para isso, ela busca eliminar ou pelo menos reduzir ao máximo o uso de substâncias que possam causar danos ao planeta e a saúde humana, optando por caminhos que gerem a menor quantidade de resíduos e poluentes.

2.3 Química verde

A química verde busca utilizar fontes de energia renováveis, por exemplo, a hídrica, advinda das águas de rios; a solar, utilizando a energia do sol; a eólica, que emprega a força dos ventos; o biogás, como o metano (CH_4) produzido a partir da decomposição de matéria orgânica; e a biomassa, que pode recorrer ao uso do bagaço da cana e outras matérias-primas vegetais para a queima e geração de eletricidade. Estas são consideradas fontes de energia limpa, por emitirem menos gases de efeito estufa quando comparada à advinda dos combustíveis fósseis como o carvão mineral, o gás natural e o petróleo. Tais fontes não são renováveis, por serem consumidas a uma velocidade muito maior do que a velocidade de sua produção, que levaram milhões de anos para serem formados a partir de depósitos de matéria orgânica (plantas e animais mortos) mantidos a temperatura e pressão específicas para sua formação.

A química verde possui como objetivo nos influenciar a utilizar conceitos e princípios que possibilitem tornar os procedimentos laboratoriais e industriais mais

sustentáveis. Para isto ela está relacionada ao tratamento de resíduos, e preocupada com o lixo e agrotóxicos despejados no ambiente.

Os 12 princípios da química verde em um laboratório são:

- 1 — Prevenir a formação de resíduos, se forem gerados, buscar seu devido tratamento;
- 2 — Utilizar reagentes que realizem a função desejada e com baixa ou nenhuma toxicidade;
- 3 — Projetar síntese (etapas com reações químicas) que gere produtos menos perigosos;
- 4 — Usar matéria-prima renovável, como os resíduos, em vez de usar fontes não renováveis;
- 5 — Utilizar catalisadores ao invés de mais reagentes, que possam ser seletivos, reutilizáveis em diversas reações e empregados em quantidades mínimas;
- 6 — Evitar o uso de derivados e modificações temporárias nas sínteses, já que para isso é necessário usar reagentes específicos e podem gerar mais resíduos;
- 7 — Planejar sínteses que maximizem a incorporação de todos os átomos contidos nos reagentes;
- 8 — Evitar uso de solventes e outros agentes de separação;
- 9 — Aumentar a eficiência energética, realizando reações, sempre que possível em condições ambiente;
- 10 — Formular produtos que realizem a função desejada ao mesmo tempo que sejam degradáveis e que não geram acúmulo no ambiente;
- 11 — Monitorar e controlar os processos evitando a produção de substâncias nocivas e a poluição;
- 12 — Escolher substâncias que minimizem a ocorrência de acidentes químicos, explosões, incêndios e derramamentos no meio ambiente.

Conforme os princípios da química verde, devemos evitar a produção de substâncias tóxicas, a geração de resíduos e utilizar fontes renováveis de matéria-prima e de energia.

Para que a química verde se estabeleça, os profissionais da química são essenciais na implantação de processos mais eficientes, no desenvolvimento de novos materiais inorgânicos, orgânicos e poliméricos, no uso racional dos recursos não-renováveis, assim como na produção de derivados de fontes renováveis.

2.4 Exemplos de sustentabilidade em laboratório de química

A seguir, é demonstrado como os quatro Rs podem ser aplicados em uma única atividade dentro de um laboratório de química. Existem reações e processos de separação que necessitam ser refrigerados e para isso os químicos utilizam uma vidraria de laboratório chamada de condensador, o qual é um tubo de vidro oco por onde um fluido, que precisa ser condensado, é revestido por um sistema que circula água fria ou refrigerada (**Figura 1**). Foi estimado que para cada 1 hora de uso de um condensador, gaste-se 90 litros de água, a qual é direcionada para o ralo da pia (**Figura 1A**). Repensando sobre este consumo, os professores da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Angelo Pinto e Bárbara Silva, decidiram reduzir este valor de forma simples e econômica. Eles reaproveitaram uma bomba de aquário para recircular a água de um balde para dentro do condensador que a devolve para o balde a fim de ser reaproveitada continuamente (**Figura 1B**). Dessa forma, foi evitado um grande desperdício, visto que 20 sistemas iguais foram montados para as aulas práticas de laboratório de química, as quais podem durar algumas horas. A condensação é mais eficiente se água resfriada com gelo for usada, uma vez que a redução da temperatura aumenta a recuperação do solvente evaporado (**Figura**

1B). O sistema pode ser ainda utilizado em outros condensadores como o de um rotaevaporador (**Figura 1C**), útil para concentração da amostra/extrato/analito pela vaporização do solvente e recuperação do mesmo em outro recipiente.

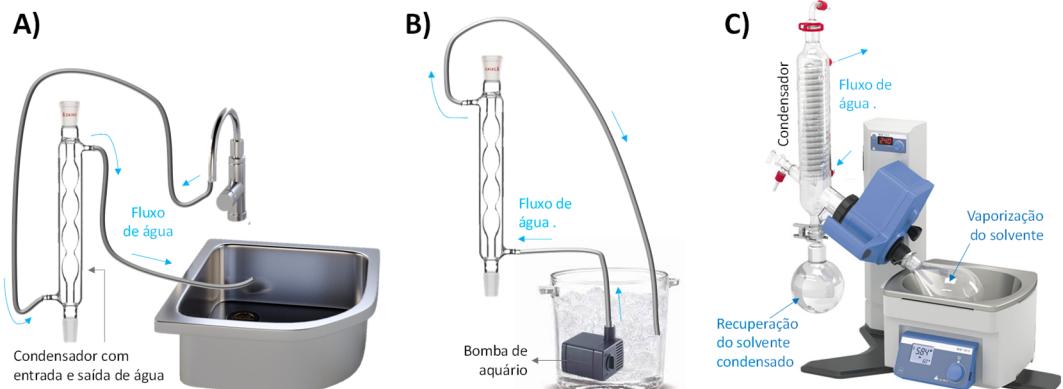


Figura 1. (A) Montagem “normal” para um condensador, alimentado por uma torneira com descarte da água pia abaixo, (B) montagem inteligente que utiliza uma bomba de circulação de água usada em aquários, também aplicável a outros equipamentos como um (C) rotaevaporador.

Outro exemplo de aplicação do conceito de sustentabilidade em um laboratório de química seria na realização de aulas experimentais do ensino médio que, mesmo em pequena escala, podem gerar produtos perigosos com potencial para ser uma atividade poluidora. As atitudes tomadas no laboratório podem se basear nos 12 princípios da química verde e nos 4 Rs, que se inserem em uma proposta de se trabalhar a educação ambiental e o tratamento de resíduos em aulas de química. Vejamos as sugestões a seguir:

- Redobre os cuidados com a segurança dos indivíduos que manuseiam os resíduos e reagentes perigosos, usando equipamentos de proteção individual e coletiva para que possibilite a realização segura da prática;

- Opte por trabalhar em dupla ou em um trio ao invés de realizar os experimentos sozinho. Duas ou três cabeças pensam melhor do que uma! Além disso, ao contar com mais integrantes é possível reduzir o consumo geral de reagentes e propiciar maior interação e socialização entre os participantes dos grupos, fortalecendo a colaboração entre a equipe;
- Reduza o volume e/ou a concentração dos reagentes químicos. Estas reduções não afetarão a compreensão que a realização destes experimentos trazem e, conseguiremos assim, reduzir não somente as fontes geradoras de poluição, mas também o tempo de reação, os riscos e a gravidade de acidentes, o volume e a concentração de resíduos gerados após a prática, além de reduzir os custos dos experimentos;
- Prefira adquirir produtos químicos em pequenas quantidades para evitar o risco de acidentes químicos, já que o acúmulo de materiais aumenta o risco de derramamentos e de incêndios;
- Armazene frascos de reagentes e de rejeitos de forma adequada, mantendo os rótulos dos frascos em bom estado de conservação, principalmente quanto à descrição do conteúdo, dos riscos e sobre os cuidados necessários para manuseá-lo. Lembre-se, os rótulos devem indicar de forma clara o nome da substância, sua fórmula química, sua concentração e idealmente os riscos físicos e para a saúde de quem o manipula;
- Procure utilizar reagentes que causem menor impacto ambiental e na saúde. Em reações de oxidação, por exemplo, sempre que possível prefira hipoclorito de sódio (NaClO), em vez do dicromato de sódio ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$); usar ácido acético (vinagre, CH_3COOH) e amônia (NH_3) em substituição aos ácidos e bases mais agressivos comumente utilizados; quando possível troque sulfetos (S^{2-} : H_2S , Na_2S e/ou $(\text{NH}_4)_2\text{S}$) por hidróxido de sódio (NaOH) para precipitar metais, visto que é menos tóxico, inodoro, de baixo custo, fácil aquisição e propicia uma boa eficácia de remoção; substitua o termômetro de mercúrio pelo de álcool;

- Armazene resíduos e rejeitos em frascos limpos e secos, específicos para cada finalidade, em bom estado de conservação e com tampas apropriadas aos frascos. Lembre-se que não devemos preenche-los acima de 2/3 de sua capacidade a fim de evitar que a produção de gases não danifique a embalagem e cause derramamento do material. Não se deve adicionar em um mesmo recipiente resíduos que sejam incompatíveis, e não misturar materiais perigosos com não perigosos, já que terão tratamentos diferentes;
- Com relação ao descarte de resíduos em lixo comum e na rede de esgoto, deve-se primeiramente se atentar aos limites estabelecidos pela legislação ambiental. Materiais sólidos que tenham pouco ou nenhum impacto podem ser descartados no lixo, enquanto as soluções com essas mesmas características podem ser descartadas na rede de esgoto em pequenas quantidades e em baixas concentrações. Quando essas soluções forem compostas por substâncias com caráter ácido ou base, deverá, de forma adequada, ajustar o pH da solução para se tornar neutro ($\text{pH} = 7,0$) ou entre $\text{pH} 6,0$ a $8,0$. Se tais soluções não tiverem a presença de metais tóxicos, devem ser neutralizadas e podem ser descartadas na pia em água corrente. Álcoois, cetonas, aminas, éteres, nitrilas, ésteres, ácidos, bases, sulfetos, cianetos, devem ser separados em frascos apropriados e submetido a reciclagem ou tratamento específico. Açúcares como a frutose, glicose, sacarose e amido podem ser descartadas diretamente na pia ou lixo comum;
- Solventes inflamáveis, solventes halogenados e substâncias tóxicas não podem ser descartadas na rede de esgoto, bem como soluções contendo metais pesados como mercúrio, cromo (VI), chumbo e cádmio, por exemplo. Essas devem ser armazenadas em frasco apropriado e devidamente rotulado para que possam ser encaminhados a órgãos responsáveis pelo seu devido fim;
- Por fim, dê preferência por experimentos em que os resíduos possam ser reaproveitados em outras atividades. Para aqueles que não houver possibilidade de reuso este deve ser tratado de forma adequada e posteriormente armazenado em embalagens próprias para finalmente serem

descartados por empresas qualificadas, respeitando os padrões e as exigências da legislação ambiental.

Com medidas como estas é possível desenvolver responsabilidade socioambiental, consciência ética e uma mudança para postura mais sustentável, propiciando uma experimentação mais limpa, que se opõe a prática de descartar na pia ou no lixo qualquer tipo de resíduo ou rejeito gerado em aulas experimentais e permitindo levar este conhecimento para dentro de casa e desenvolver atitudes de cuidados com o descarte correto até mesmo do óleo de cozinha muitas vezes descartado incorretamente.

2.5 Um caça palavras sustentável

Utilize as dicas a seguir para encontrar a palavra secreta indicada pela estrela. A palavra secreta se refere a atitude que devemos possuir para manter a saúde do planeta e de todos os seres vivos que moram nele.

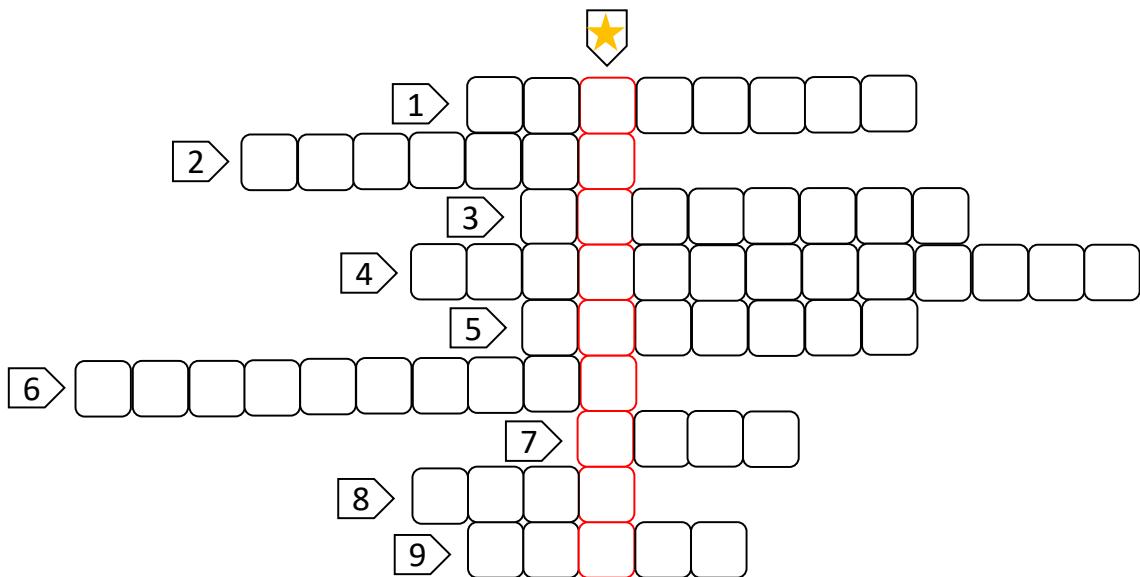


Figura 2. Cruzadinha sobre o tema Resíduo industrial.

Dicas:

- 1- Ato que visa reavaliar nossas práticas em relação ao meio ambiente, sendo este uma das bases da sustentabilidade.
- 2- Fundamento da sustentabilidade que visa diminuir o consumo e a produção de lixo.
- 3- Retorno da matéria-prima ao ciclo de produção.
- 4- Ato de compreender que a sobrevivência do ecossistema depende de nossas ações, e entender o que certos atos podem causar ao meio ambiente como um todo.
- 5- Partes que sobram de processos derivados das atividades humanas.
- 6- Ato de dar outra finalidade a algo.
- 7- Caracteriza organismos que evoluem e que executam funcionalidades incluindo metabolismo, crescimento e reprodução.
- 8- Ocupa a maior parte da superfície terrestre.
- 9- Planeta do sistema solar, o terceiro mais próximo de sua estrela central, onde há ambiente propício para a manutenção da vida.

Gabarito: 1) Reutilizar; 2) Repensar; 3) Reduzir; 4) Reciclar; 5) Conservar; 6) Residuo; 6) Preservar; 7) Vida; 8) Água; 9) Terra; Palavra secreta: Preservar.

3. O BRASIL É AGRO E O NOSSO CAFÉ TAMBÉM

O Brasil é o quinto maior país do mundo, rico em biodiversidade e recursos naturais, o que lhe confere ser a terceira maior potência global na produção de alimentos, onde o agronegócio representa 21,4% do produto interno bruto (PIB) brasileiro, cerca de R\$1,55 trilhões ao ano. Rumo a este patamar, tivemos que nos adaptar para o cultivo de alimentos originalmente importados de outros países, a exemplo do açúcar, café e da soja, aumentando a nossa produção a ponto de exportá-los para o mundo. Somos o país líder mundial na produção e exportação destes alimentos. Ao longo desse percurso, utilizamos cerca de 30% do território nacional para agricultura e pecuária, enquanto preservamos 66% da nossa vegetação. Temos solo, clima, tecnologia e brasileiros empenhados no mundo agro.

O café é um produto agro de grande importância para o nosso país, pois além de nos ajudar a acordar todas as manhãs, movimenta 30 bilhões de reais a cada ano. Somos sim o maior exportador mundial, como também o segundo maior consumidor da bebida. O setor não para de crescer devido à crescente procura pelos países importadores e a entrada no mercado asiático, que segue substituindo os chás por café!

A primeira referência histórica sobre o café vem de 575 d.C., onde um pastor de cabras chamado Kaldi na Etiópia, país localizado no nordeste da África, observou o comportamento de suas cabras ao comer os frutos do cafeeiro. Após ingestão, os animais se tornavam mais ágeis e resistentes aos percursos que faziam. Ao experimentar os frutos, o pastor pode confirmar o efeito estimulante, e então a notícia se espalhou por toda a região, iniciando o consumo do fruto na forma

macerada. A lenda é considerada apropriada até os dias de hoje, sendo apontada como marco inicial da descoberta do café como fruto comestível de teor estimulante. No Brasil, o café chegou em 1727 na cidade de Belém, estado do Pará, pelo Sargento Mor Francisco de Mello Palheta que o trouxe da Guiana Francesa. Naquela época o café já havia se tornado um fenômeno, consumido como uma bebida produzida via infusão dos grãos torrados e moídos, possuindo grande apreço social e valor comercial. Devido à boa adaptação ao solo brasileiro, condições climáticas favoráveis, relativa facilidade de plantio e, principalmente, a percepção das vantagens na economia diante a efetiva demanda internacional, rapidamente o cultivo se espalhou para outras regiões do país e ganhou escala comercial. Em pouco tempo, o café passou a ser o produto base da economia brasileira.

O fruto em seu estágio de maturação ideal para colheita e processamento para o preparo da bebida é conhecido como a “cereja do café”, a qual é composta pelo pedúnculo, casca, polpa, mucilagem, pergaminho, película prateada e duas sementes (**Figura 3**). Considerando que na produção do café em pó (o grão torrado e moído), a única parte utilizada são as sementes após processo de secagem, os demais componentes são todos descartados e esse excesso de matéria orgânica descartada indiscriminadamente pode contaminar o meio ambiente.

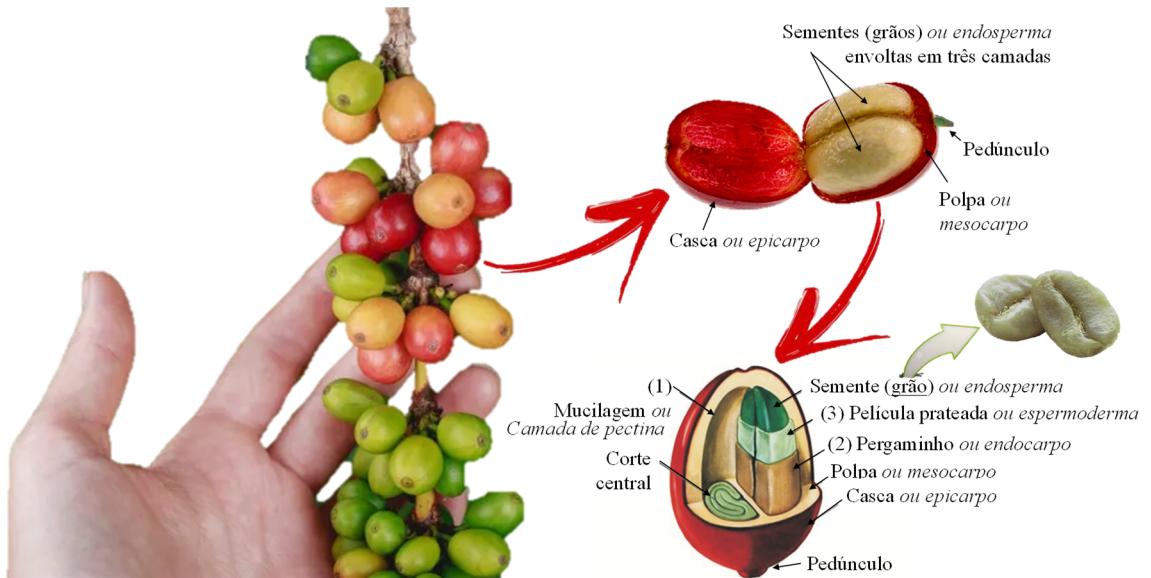


Figura 3. Ramos com frutos de café e a estrutura da cereja do café, fruto de coloração vermelha em estágio de amadurecimento ideal para colheita

Vamos conferir os detalhes de sua composição química?!

3.1 A química do café

Muitas são as substâncias químicas presentes no café! Estima-se que ultrapassam 2 mil compostos diferentes somente no grão cru (Figura 3) e outros mil sejam formados e liberados ao longo do processo de torra, caracterizando o aroma de café torrado. Perceba o quanto complexa é esta matriz.

A **Figura 4** apresenta as principais classes de substâncias químicas que compõem o grão de café verde, nome pelo qual o grão cru é comercialmente conhecido. Reparem que 45% da massa do grão é composta por polissacarídeos

na forma de carboidratos estruturais, os quais armazenam os lipídeos (a gordura do café; 16% *m/m*) em suas cavidades, as quais também alocam as proteínas (11%), sacarose (8%), ácidos clorogênicos (7%), lignina (3%), pectina (2%), aminoácidos (1%), trigonelina (1%), cafeína (1%), entre outros.

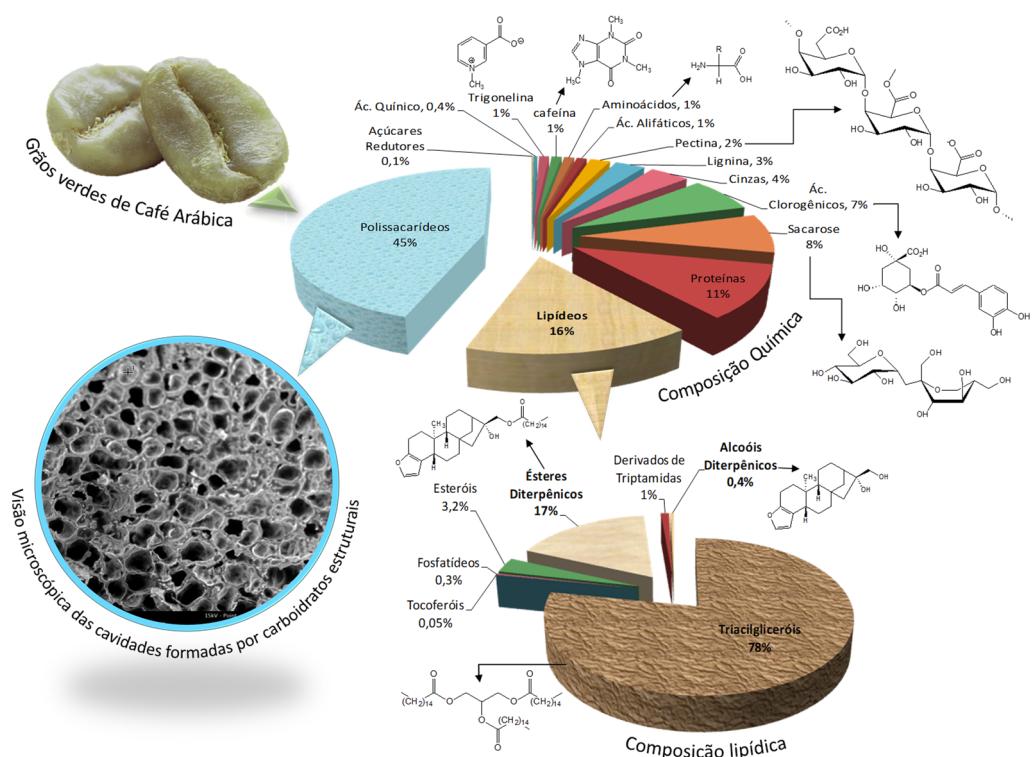


Figura 4. Composição química percentual do grão de café verde e algumas de suas estruturas moleculares.

A cafeína (**Figura 4**) é sem sombra de dúvida a substância química mais famosa do café. Este título é devido ao seu efeito estimulante, propriedade que fez as cabras do pastor Kaldi baterem seus próprios recordes de caminhada! Atualmente a utilizamos para compor produtos alimentícios, cosméticos e

medicamentos, facilmente reconhecida nas bebidas energéticas e naqueles comprimidos para gripe. A cafeína também está presente em outras plantas, como o chá-preto, a erva-mate e o fruto do guaraná. Quimicamente é um alcaloide, substância de caráter básico biossintetizada por plantas, possui estabilidade térmica e alta solubilidade em água e, por isso, é preservada durante a torra e facilmente extraída para as bebidas como o café, chás e refrigerantes.

Os ácidos clorogênicos (**Figura 4**) estão sendo recentemente explorados devido à sua ação antioxidante, indicada pelo seu poder sequestrante de radicais livres, sua capacidade de reduzir a peroxidação lipídica e de aumentar a atividade de algumas de nossas enzimas que trabalham a favor da degradação de substâncias nocivas ao nosso corpo. Quimicamente, eles são derivados da reação de esterificação entre uma das hidroxilas do ácido quínico com um ácido *trans*-cinâmico (estrutura na Figura 4). Existem no café diversos derivados com a estrutura química similar a do ácido cinâmico, os mais conhecidos são os ácidos cafeoilquínicos, os dicafeoilquínicos e os feruloilquínicos. Essas substâncias são instáveis no processo de torra e, portanto, não são comumente encontradas nas bebidas de café.

Quanto à fração lipídica do café (**Figura 4**), diversas pesquisas em modelos não humanos já apontaram uma atividade anticancerígena do óleo de café, principalmente de seus álcoois e ésteres diterpênicos presentes no grão, substâncias encontradas quase exclusivamente nos tecidos do cafeeiro. Os diterpenos correspondem a 1% da massa do grão de café verde, podem ser mantidos intactos se a torra do grão for muito suave e extraídos para as bebidas, cujo teor irá depender do tipo de cafeteira utilizada (filtrado, moka, prensa francesa, espresso, etc.), pois são substâncias lipofílicas, ou seja, não gostam muito de água. Contudo, sua extração para as bebidas de café vai depender da temperatura, pressão, proporção entre água e pó de café, bem como se há a etapa de filtração

durante o preparo. Muitas são as variáveis e distintos os aromas e sabores oriundos de cada modo de preparo das bebidas, bem como da condição de torra (tempo vs. temperatura) empregada sobre os grãos crus e dos procedimentos de pós-colheita dos grãos. Vamos ver isso agora?

3.2 Tudo isso só para produzir um cafezinho?

O processamento pós-colheita do café é iniciado a partir do momento em que este é colhido e termina na obtenção dos grãos verdes comercializáveis (não torrados). Todo processamento gera diferentes resíduos, a depender da via a ser escolhida. Vejamos três destas vias, apresentadas resumidamente na **Figura 5**.

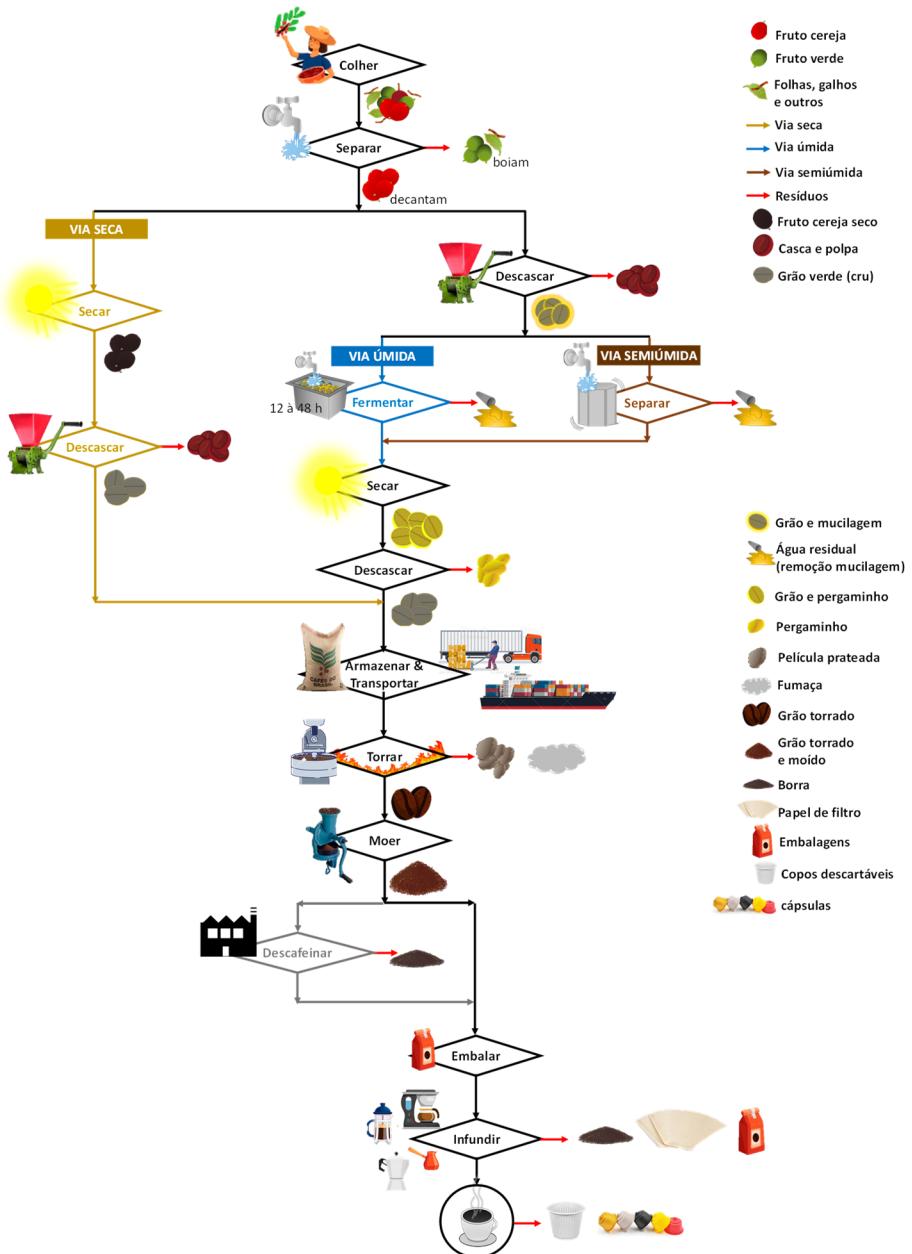


Figura 5. Esquema ilustrativo da cadeia produtiva do café, processamentos e seus subprodutos.

O processamento pós-colheita por via seca corresponde a 90% da produção brasileira, sendo este o modo mais antigo e simples adotado, particularmente adequado para um país de clima tropical. Neste, produz-se o fruto cereja seco, do qual se faz a remoção da casca, polpa e pergaminho. O grão verde é comercialmente conhecido como *café natural* (**Figura 5**). No processamento via úmida, além dos resíduos sólidos, são gerados resíduos líquidos proveniente da fermentação para eliminação da mucilagem e da lavagem dos grãos, denominados de *café despolpado*. Por fim, na via semiúmida remove-se a casca e promove-se uma fermentação natural para obter o *café descascado*.

Os grãos de café verde são armazenados em sacos de juta de 60 kg (**Figura 5**) para serem transportados pelo Brasil e exportados para países da América do Norte, Europa, Ásia e Oceania. O seu destino são as torrefadoras e o processo expele a película prateada como subproduto sólido e uma fumaça aromática de café torrado composta principalmente por substâncias voláteis, mas que pode conter materiais particulados (MP) de dimensão de 20 a 0,05 µm, o que pode ser prejudicial à saúde dos profissionais desprotegidos de EPIs e expostos a torradores que processam grandes quantidades de café e não possuem uma captura efetiva desse material, visto que MP menores que 10 µm são por nós inalados, <2,5 µm alcançam a laringe e os <1,0 µm se depositam nos alvéolos pulmonares.

O grão torrado e moído pode ter dois destinos, ser industrialmente descafeinado (remoção química da cafeína) ou ir direto para o seu destino final, o consumidor (eu, possivelmente você e mais 80% da população adulta mundial). Por este público, borra de café, filtro de papel, embalagens plásticas ou de papel, copinhos descartáveis e cápsulas de cafeteiras domésticas são os principais resíduos gerados.

3.3 Destinos inteligentes para os resíduos gerados pela cadeia produtiva do café

3.3.1. Cascas ou epicarpo

As cascas de café (**Figuras 3 e 5**) compreendem quase 45% da massa do fruto cereja. No processamento por via seca o fruto é desidratado ao sol, gerando cerca de 180 kg de casca para cada 1 tonelada do fruto cereja seco (**Figura 5**). Este subproduto é composto pela própria casca associada a polpa e ao pergaminho da cereja do café que juntos apresentam alto teor de carboidratos (35–85%), fibras solúveis (30%), minerais (3–11%) e proteínas (5–11%). A casca de café também é rica em fibra alimentar insolúvel (13%), contendo celulose (15%) e hemiceluloses (45%) que são responsáveis pela resistência das plantas. As cascas são fontes de fitoquímicos (substâncias que conferem cor a planta ou que auxiliam na prevenção e combate a doenças e pragas), como taninos (5-9%) e antocianidinas (20%), substâncias capazes de diminuir a nossa taxa de colesterol ruim e retardar o envelhecimento celular. Especialmente as antocianidinas estão relacionadas à redução de danos oxidativos às células, à formação de tumores e modificações gênicas.

Uma das primeiras aplicações da casca de café na indústria de alimentos foi para a extração de ácido cítrico, um aditivo que tem a função de conservante e acidulante amplamente utilizado em sucos, balas e molhos. Estima-se que a partir de 5 toneladas de casca de café poderiam se produzir 750 kg de ácido cítrico por dia. Considere isso sabendo que o valor comercial do ácido cítrico é de R\$ 50,00 o quilo, o que faz da casca de café um substrato financeiramente atraente.

3.3.2. Polpa ou mesocarpo

A polpa do café (**Figuras 3 e 5**) é um subproduto gerado a partir do processamento do café em via úmida e representa em torno de 29% do peso seco do fruto cereja. Composta principalmente de carboidratos (32%), lignina (17,5%), proteínas (15%), também contém quantidades apreciáveis de ácidos clorogênicos (2,4%), cafeína (1,5%) e taninos (3 %).

Diversas aplicações têm sido propostas para a polpa de café, relatando um grande potencial como substrato para fungos produtores de aromas de frutas por fermentação em estado sólido. A polpa do café também é uma fonte de antocianinas, pigmentos vegetais utilizados como corantes naturais de alimentos industrializados.

Outra aplicação advém de sua secagem e moagem para a produção da farinha da polpa de café, a qual possui alto teor de fibras e minerais e baixo teor de gorduras, proposta para uso em diferentes formulações de alimentos, como pães, biscoitos, massas e molhos. A polpa possui cinco vezes mais fibras do que a farinha de trigo integral e 84% menos gordura. Uma curiosidade é que a farinha da polpa de café é obtida por aquecimento, mas não apresenta sabor e nem odor de café torrado, mas expressa sabor e aroma floral, cítrico e com notas de frutas tostadas. A polpa de café também pode ser pirolisada (decomposição sob altas temperaturas) para a produção de carvão ativado e biossorventes, sendo relatada que a pirólise com ácido fosfórico produz materiais com alta capacidade de adsorção, capazes de capturar e reter moléculas pequenas como gases inorgânicos e compostos orgânicos voláteis. Talvez se torne uma solução para captura de dióxido de carbono (CO_2) emitido por fontes naturais e antropogênicas.

3.3.3. Mucilagem

A mucilagem (**Figura 3**) representa 5% do peso seco das cerejas de café. Ela permanece aderida ao grão após a despolpa em processamento via úmida (**Figura 5**), sendo eliminada por processo de fermentação *in natura*, ou seja, a microbiota do grão e do ambiente de processamento degradam a mucilagem. Quando se fermenta além do ideal, há a produção de odores desagradáveis, reduzindo o preço e valor de mercado do grão.

A composição centesimal da mucilagem é 84% de água, 13% de açúcar totais, 2% de proteína e 1% de cinzas. Devido ao alto teor de açúcares, majoritariamente frutose e glicose, a mucilagem do café foi proposta para uso semelhante ao mel na alimentação humana, obtido por meio de uma etapa de desidratação a vácuo a uma temperatura abaixo de 65 °C, pois obtém um produto com mínima perda nutricional pelo calor, de alta qualidade e sabor.

3.3.4. Pergaminho ou endocarpo

O pergaminho representa cerca de 6% do peso seco das cerejas de café (**Figura 3**) e são formados por (α-)celulose (40-49%), hemicelulose (25-32%), lignina (33–35%) e cinzas (0,5–1%). No processamento por via úmida, o pergaminho é removido após secagem e descascamento do fruto desidratado e pode ser usado como aditivo na produção de cerâmica e tijolos, apresentando desempenho físico e mecânico aceitável e baixa condutividade térmica, aplicação essa também destinada a borra de café (**Figura 5**).

3.3.5. Película prateada ou espermoderma

A película prateada possui em sua composição alto teor de fibra alimentar (60-70%), das quais 85% são fibras dietéticas insolúveis e os 15% restante de fibra

dietética solúvel. Os polissacarídeos também são componentes abundantes (30-40%), os açúcares são polimerizados em estruturas de celulose e hemicelulose que contêm glicose, xilose, galactose, manose e arabinose em que a composição dos açúcares depende do processo usado para extrair carboidratos. A película de prata também contém proteína, gordura e cinzas, porém a níveis de traços, ou seja, em quantidades quase insignificantes. Temperaturas e tempos de exposição variados ao longo da torra dão origem à formação de diferentes tipos e quantidades de melanoidinas, compostos poliméricos formados pelas reações de Maillard, aquelas responsáveis por conferir a cor amarronzada aos grãos torrados e o aroma de alimentos tostados, como o café torrado, o malte das cervejas e de pão assado.

A película prateada de café também tem sido empregada como fibra dietética para a formulação de produtos de panificação. Pesquisas mostraram que é viável utilizá-la como ingrediente alimentar para reduzir a densidade calórica e aumentar o teor de fibra alimentar do pão. Na formulação de novos biscoitos, esta foi empregada como corante natural e fonte de fibra alimentar, favorecendo algumas propriedades desejáveis como umidade, textura, espessura e cor, além de melhorar seu valor nutricional.

3.3.6. Borra de café

A borra é o resíduo sólido do pó de café torrado e moído, gerado após o preparo da bebida, seja pelo método doméstico por infusão ou industrial, usado na preparação de cafés solúveis (ou instantâneo), inclusive descafeinado (**Figura 5**). Polissacarídeos compõem os principais resíduos da produção de café instantâneo (75%), sendo hemicelulose (39%) e celulose (12%) os mais abundantes. A borra de café doméstica contém, em média, 47% em massa de carboidratos, 30% de lipídios, 17% de proteínas e 6% de cinzas. Com relação aos minerais, o potássio é o principal componente, seguido por magnésio e fósforo. A quantidade de melanoidinas

(material de cor escura, polimérico, que se forma na torra do grão) é em torno de 23%; após o preparo da bebida, permanecem na borra de 3 a 8% do valor original. O efeito antimicrobiano relatado para a borra de café foi de 2 a 5 vezes maior quando comparado às melanoidinas isoladas, o que parece estar associado a um efeito sinérgico, que é quando duas ou mais substâncias químicas atuam juntas, potencializando o efeito biológico.

A borra de café pode ser aproveitada para a produção de biodiesel, bioetanol e biogás. Sobre a produção de biodiesel, os lipídios (**Figura 4**) são extraídos e sofrem uma reação química de transesterificação, que é resumidamente a transformação dos triacilgliceróis e ésteres diterpênicos em ésteres metílicos de cadeia longa, glicerol e álcoois diterpenos.

Outra aplicação sustentável da borra de café é em materiais biodegradáveis como xícaras, óculos de sol, tênis e tecidos, que incorporam a borra de café em sua composição. A empresa O'right produziu o primeiro bioplástico feito com óleos extraídos da borra para seus frascos de xampu. Legal, né?

3.3.7. Outros subprodutos

Conforme apresentado na **Figura 5**, existem outros subprodutos gerados na cadeia produtiva do café, como galhos e folhas que retornam à lavoura como adubo natural, bem como as cascas e polpa do fruto, de modo que não alterem os aspectos nutricionais do solo. Os frutos verdes podem ser processados pela via fermentativa e incorporados aos grãos maduros. A água residual, seja para eliminação de materiais flutuantes como galhos, folhas e grãos boia, bem como para descascar e/ou despolpar o fruto cereja, deve ser tratada antes de direcionada aos rios e lagos, e muitas vezes é empregada na fertirrigação de culturas de café, arroz e feijão. O tecido de juta usado na sacaria é 100% biodegradável, uma vez que é

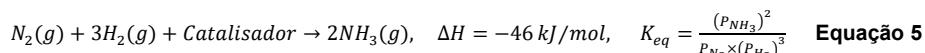
produzido de uma fibra vegetal que regula a umidade do grão com o ambiente externo, preservando o aroma e o sabor original do grão. Além disso, os sacos de juta utilizados no armazenamento e transporte dos cafés brasileiros são também produzidos por comunidades ribeirinhas na Amazônia, ação esta que traz desenvolvimento sustentável para a população local. Além disso, a sacaria de juta é considerada a medida global, ou seja, a medida internacional no mercado cafeeiro mundial, pois ao invés de usar a unidade de medidas em quilograma utiliza-se a quantidade de sacas de 60 quilos. Podemos falar também das embalagens, aquelas que encontramos nas prateleiras dos supermercados, bem como os filtros de papel ou de pano, as cápsulas de plástico e alumínio das cafeteiras domésticas modernas, dos copinhos de plásticos fornecidos pelas padarias e restaurantes para o cafezinho matinal ou após uma refeição. Todos esses materiais também são exemplos de resíduos da agroindústria do café. Não é nossa intenção esgotar o assunto, mas apenas trazer uma reflexão da quantidade de resíduos que geramos para produzir coisas que são relativamente simples eressaltar como a química pode ser útil para dar um destino inteligente a esses resíduos e, também, para aumentar a produtividade no campo, especialmente nas lavouras de café. Vamos ver isso na próxima seção.

3.4 Aumentando a produtividade pelo princípio de Le Châtelier

O Brasil é o maior produtor de café do mundo e tem conseguido manter esta posição elevando sua produtividade no campo sem aumentar suas lavouras. É isso mesmo, sem estender-se territorialmente. Mas como fizemos isso? Com pesquisa aplicada no campo, com melhoramento genético das mudas que são plantadas e com a fertilização correta do cafeeiro.

O nitrogênio é um elemento químico que está presente em quase todas as reações no metabolismo da planta, tanto no metabolismo primário para o crescimento, como a síntese de ácidos nucleicos, enzimas, clorofila, quanto no metabolismo secundário na produção de taninos, flavonoides e compostos de resposta às condições do meio onde vivem. A cultura do cafeeiro é comumente implantada em solos com baixa fertilidade natural, o que exige ajuste de pH e aumento da disponibilidade de nutrientes no solo para a planta. Uma boa absorção de nitrogênio pelo cafeeiro está diretamente relacionada com o aumento no número de flores e, consequentemente, de frutos cereja.

No mundo, o fertilizante nitrogenado mais utilizado é a ureia, fórmula química $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$, que contém um alto percentual de nitrogênio e valor comercial acessível aos produtores. Não somente a ureia, mas todos os fertilizantes nitrogenados (nitrato de amônio, sulfato de amônio, ácido nítrico, monoamoniofosfato (MAP) e diamoniofosfato (DAP)) derivam da amônia (NH_3) que possui a famosa equação de Fritz Haber para sua formação (**Equação 5**):



Para a maior produtividade do cafeeiro precisamos de mais fertilizantes, os quais necessitam de mais amônia. Mas como podemos aumentar a produção de amônia de forma sustentável? Uma ferramenta é usar o princípio de Le Châtelier, que diz que “*se uma reação química em equilíbrio sofrer uma perturbação como aumento de temperatura, pressão ou variação das concentrações dos produtos ou reagentes, o sistema irá se readjustar para contornar essa perturbação e retornar ao equilíbrio*”.

Nesse sentido, Fritz Haber e seus colaboradores realizaram a reação da Equação 5 em diferentes concentrações e temperaturas, onde determinaram as

pressões parciais no equilíbrio dos respectivos reagentes e produto a fim de conhcerem a constante de equilíbrio (K_{eq}) da reação (**Equação 5**), com a qual souberam que era possível desenvolver a síntese da amônia de forma satisfatória. Com o objetivo de aumentar a conversão da reação, Harber buscou os fatores reacionais que poderiam ser variados e a correlação entre esses. O resultado foi que a síntese é favorecida quando a temperatura é reduzida (**Figura 6A**), o que é facilmente comprehensível pelo fato da reação ser exotérmica (**Equação 5**, $\Delta H < 0$), bem como pelo aumento da pressão (**Figura 6A**), onde a reação buscou o lado dos produtos por ter o menor número de moléculas (**Equação 5**).

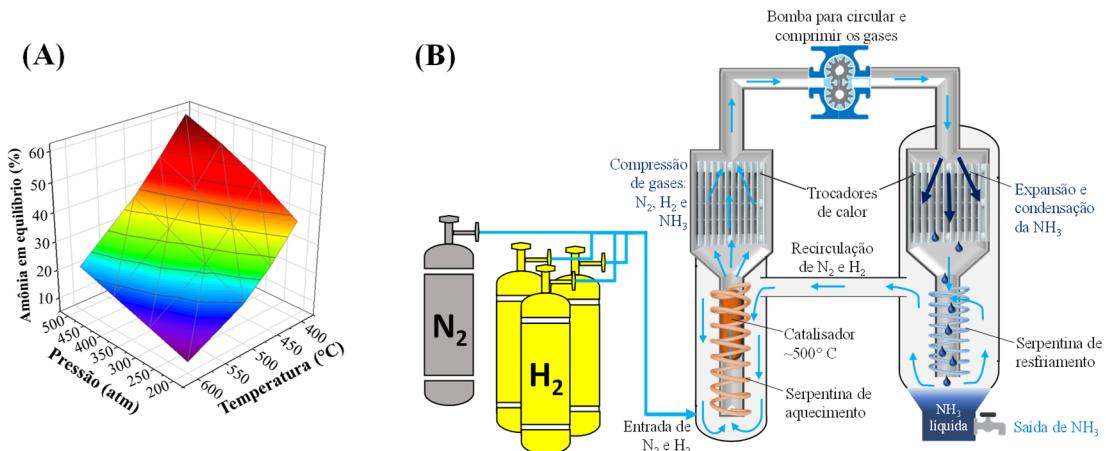


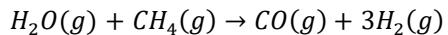
Figura 6. (A) Influência da temperatura e da pressão na resposta em porcentagem de amônia no equilíbrio químico e (B) diagrama de uma planta industrial para a síntese de amônia.

Harber também favoreceu a reação no sentido de formação do produto ao aumentar a concentração dos reagentes nitrogênio (N_2) e hidrogênio (H_2) no meio, mantendo a proporção molar de 1:3, como vemos na Equação 5. Além disso, a remoção de amônia é outra maneira de deslocar a reação para o sentido direto, de formação do produto.

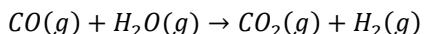
A “cereja do bolo” veio quando Harber finalmente encontrou no ferro misturado com óxidos metálicos um catalisador que diminuía o tempo da reação e mantinha a taxa de conversão da reação alta, o qual reduzia os custos de produção da amônia. Este fato ocorreu após inúmeros tentativas com outros materiais, cujo sucesso de todo o trabalho lhe rendeu o Prêmio Nobel de Química em 1918.

Uma planta industrial que resume a ideia de Harber para a síntese da amônia é apresentada na Figura 6B, a qual possui a adição contínua dos gases reagentes (N_2 e H_2) que são aquecidos a 500 °C por uma serpentina antes do contato com o catalisador, onde a síntese da amônia ocorre, porém não com 100% de conversão. Posteriormente, a mistura reacional (N_2 , H_2 e NH_3) gasosa é transportada e comprimida por bombas, sendo resfriada e liquefeita por expansão. Por fim, uma serpentina de resfriamento condensa a amônia (ponto de ebulição (P.E.) igual a -33 °C), permitindo seu armazenamento e remoção do processo, mas não os gases reagentes N_2 (P.E. -196 °C) e H_2 (P.E. -253 °C) que não reagiram, os quais são recirculados em direção ao início do processo (**Figura 6B**).

Fontes renováveis dos gases reagentes podem vir do ar atmosférico, uma vez que este possui cerca de 78% v/v (porcentagem em volume) de N_2 em sua composição. Já o H_2 pode ser obtido pela reação de eletrólise da água, uma reação de oxirredução não espontânea alimentada por uma corrente elétrica. Com o intuito de reduzir os custos com a eletrólise da água, uma adaptação do processo de Fritz Haber utiliza metano (CH_4) e água convertidos em H_2 e monóxido de carbono (CO) (**Equação 6**), sendo este último levado a dióxido de carbono (CO_2) e mais H_2 (**Equação 7**). O processo é conhecido como Haber-Bosch pela inclusão do engenheiro e químico Carl Bosch. O CH_4 pode ser obtido de aterros sanitários convertidos em refinarias de biogás a partir da degradação da matéria orgânica.



Equação 6



Equação 7

Essa foi uma aplicação da química para um desenvolvimento sustentável na produção de fertilizantes, necessários a cultura do café. A sustentabilidade tem sido fonte de pesquisas diversas em que se reutilizam materiais renováveis, contribuindo para a redução de fontes poluidoras que afetem negativamente o meio ambiente. Imagine se projetos com o mesmo objetivo fossem aplicados em cada cultura, plantio e outras matrizes alimentícias pelo Brasil e pelo mundo? Poderíamos reutilizar materiais que seriam normalmente descartados, contribuindo para a redução de fontes poluidoras, valorizando o nosso planeta. Essa evolução se faz com pesquisas científicas por químicos e outros profissionais com conhecimento na área, oriundos das Instituições de Ensino Superior (IES), centros de pesquisa e indústrias. Iremos ver agora sobre os resíduos gerados pelas indústrias de mineração e siderurgia. Ficou curioso?

4. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL PARA AS INDÚSTRIAS DE MINERAÇÃO E SIDERURGIA

Você sabia que as indústrias de mineração e siderurgia são chamadas de indústrias de “base” para um país? Este título se deve ao fato de que todo o processo realizado para extrair o minério do subsolo (mineração) até a produção do ferro e do aço (siderurgia) tem como produtos finais barras ou chapas metálicas. Estes são usados posteriormente como matéria-prima para outras indústrias, as quais fabricam uma infinidade de produtos que fazem parte do nosso dia a dia, tais como talheres e outros objetos domésticos, carros, motos e eletroeletrônicos como computadores e celulares. Além dos diversos benefícios agregados às indústrias de mineração e siderúrgicas, temos os problemas da geração de resíduos sólidos e efluentes líquidos e gasosos. “Bora” escavar mais a fundo esses temas?

4.1 Um pouco de química para ilustrar a formação de rochas, minerais e minérios

A formação das rochas, minerais e minérios está relacionada com as transformações geológicas do planeta. Estes processos são constantes e nunca param, mesmo que ocorram de forma lenta.

As rochas são formadas pela agregação de um ou mais minerais (**Figura 7A**). Por exemplo, o granito, que é uma rocha magmática formada pelo resfriamento

da lava vulcânica (magma), é composto pelos minerais quartzo, mica e feldspato. Definição similar é dada para um minério (**Figura 7B**), contudo, este possui uma quantidade maior de minerais formados por elementos químicos de valor comercial rentável e de extração (mineração) tecnologicamente viável. Os minerais são sólidos homogêneos que possuem estrutura cristalina interna bem ordenada de seus átomos, íons ou moléculas (**Figura 7C-E**). Estes constituem as unidades de repetição ou blocos de construção de um mineral que varia em intervalo conhecido, sendo denominados de células unitárias, isto é, a unidade fundamental (a menor parte química representativa) de um mineral (**Figura 7D**). Desta forma, um cristal é uma estrutura formada por um número mensurável de pequenas células unitárias que podem variar em comprimento (a , b e c) e ângulos (α , β e γ) de ligações químicas (**Figura 7E**). Fazendo uma analogia aos blocos de plástico LEGO®, onde diferentes objetos (cristais/minérios) são criados pelo encaixe de pequenos blocos (as células unitárias) até formar o bloco maior (uma estrutura cristalina), porém em dimensão microscópica, ou seja, do tamanho molecular (**Figura 7**). Os blocos e os átomos dentro de cada bloco maior são repetidos em padrões conhecidos, definidos por operações geométricas de simetria.

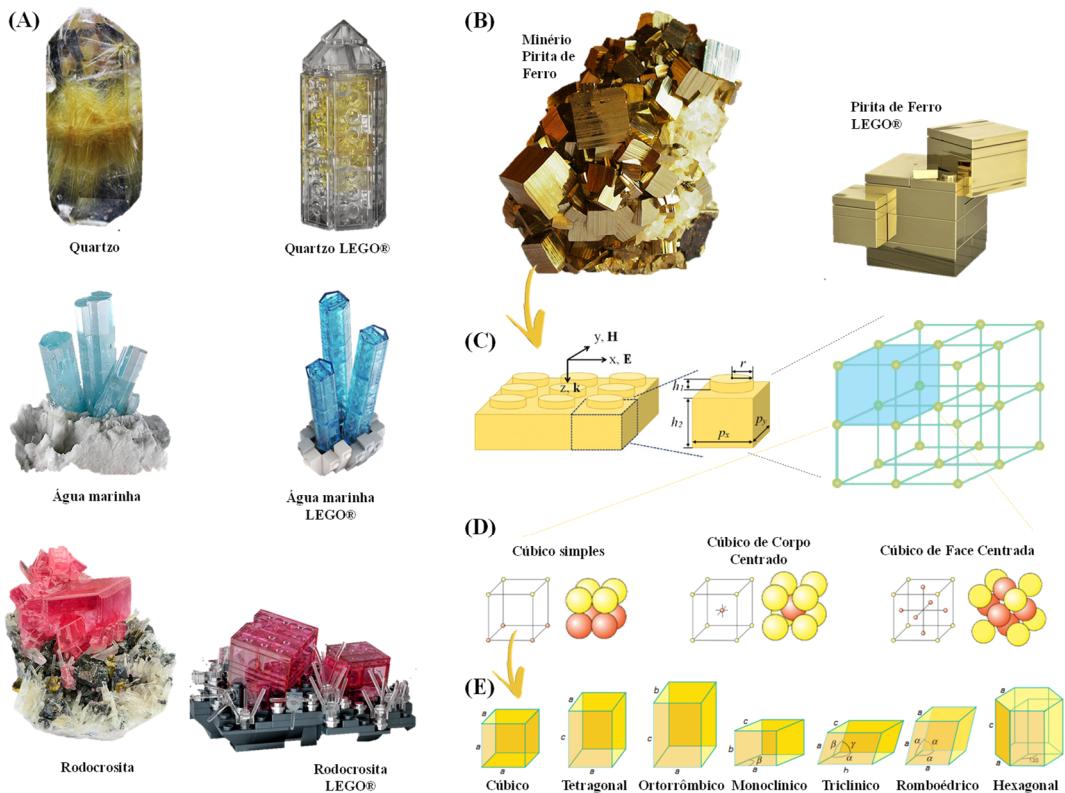


Figura 7. (A) Exemplos de minerais e sua representação em bloco plástico LEGO® com (B) destaque para a pirita de ferro, sua (C) estrutura cristalina formada por diversas (D) células unitárias distinguíveis quanto a natureza e número de átomos, íons ou moléculas, interligados por diferentes (E) comprimentos e ângulos das ligações.

Por exemplo, o mineral pirita de ferro, que é formado pelos elementos químicos ferro (Fe) e enxofre (S), ocorre em proporção definida com fórmula química FeS_2 , denominada dissulfeto de ferro, cuja unidade se repete (como os blocos plástico LEGO®) (**Figura 7B**). A pirita de ferro é formada por cristais isométricos que aparecem geralmente na forma cúbica simples (**Figura 7D-E**), mas também

podem aparecer como octaedros ou piritodredos (formas não apresentadas na **Figura 7**).

Os minerais são classificados de acordo com a sua composição química e estrutura cristalina (orientação tridimensional das células unitárias) (**Figura 7D**). As principais classes de minerais são: elementos nativos (enxofre e grafita), sulfetos (galena e pirita), haloides (fluorita e halita), óxidos/hidróxidos (hematita e magnetita), fosfatos (apatita e monazita), sulfatos (barita e gipsita), carbonatos (calcita e magnesita) e silicatos (biotita e quartzo).

4.2 Processos de mineração e seus impactos ambientais

De acordo com a ONU, a mineração consiste dos processos de extração e beneficiamento de minerais sólidos (como os apresentados na seção anterior), líquidos (sendo o petróleo bruto o principal exemplo) ou gasosos (exploração do gás natural, por exemplo). Na mineração de sólidos, a Agência Nacional de Mineração (ANM, 2021) descreve o processo em várias etapas até chegar ao produto final.

A prospecção é a primeira etapa e refere-se à fase de estudos e reconhecimento geológico preliminares realizada por um geólogo, profissional que avalia o potencial da região com relação a ocorrência de minerais que tenham valor econômico. Uma vez estabelecida a área de escavação, inicia-se a segunda fase que é a de extração, também conhecida como “lavra”. O objetivo desta etapa é o aproveitamento industrial da jazida, desde a extração de substâncias minerais úteis até o seu beneficiamento. Há vários métodos de lavra, os dois principais são lavra a céu aberto ou de superfície e lavra subterrânea. Na primeira, os depósitos de rochas ou minerais estão relativamente próximos à superfície, enquanto na

subterrânea há a necessidade de perfuração de túneis. A escolha dos métodos de lavra leva em conta as características da área a ser explorada, como profundidade, e as características geológicas, considerando também os aspectos sociais, econômicos e ambientais do local da mina, inclusive as fases finais de desativação e fechamento. Uma vez obtido os minerais estes passam para a etapa de beneficiamento.

O beneficiamento é um conjunto de operações (amostragem, moagem, classificação, caracterização e concentração) que transformam a rocha extraída na mineração em matéria-prima adequada à sua utilização futura, agregando valor e gerando produtos compatíveis com as demandas do mercado. Um exemplo é o beneficiamento do minério de ferro, que leva à produção do ferro gusa e do aço, o que explicaremos melhor mais adiante.

Nas etapas do beneficiamento se utilizam grandes quantidades de água para retirada de impurezas, denominadas “ganga” no vocabulário da mineração. As gangas constituem os rejeitos de minérios (resíduos sólidos e água de lavagem) que são depositados em barragens ou diques de contenção. No Brasil, aproximadamente 95% dos rejeitos gerados na mineração de ferro são destinados a 672 barragens de rejeitos, sendo 340 localizadas no Estado de Minas Gerais (dados do ano de 2019). De acordo com a base de dados *World Mine Tailings Failures*, entre 1915 a 2019, houve um total de 356 registros de rompimento de barragens no mundo, causando impactos ambientais significativos e o que é pior, perda de vidas.

Recentemente, vimos dois grandes desastres ambientais associados ao rompimento de barragens mineiras. O primeiro na cidade de Mariana no ano de 2015 e o segundo em Brumadinho, em 2019. Nessas duas cidades, barragens de rejeitos foram rompidas, deixando as cidades parcialmente cobertas por uma lama

desses rejeitos, provocando centenas de mortes e afetando toda a biodiversidade da região. Acidentes, como os ocorridos em Mariana e Brumadinho, têm levantado questionamentos acerca da disposição legal desses rejeitos e da necessidade de mudanças no processo industrial extractivo da mineração.

Na gestão dos rejeitos de minérios, a reciclagem e o reuso são estratégias consideradas mais adequadas do que a simples disposição dos rejeitos feita em diques ou barragens.

No intuito de minimizar os rejeitos da mineração, paralelo à possibilidade de criação e desenvolvimento de novos produtos, a reciclagem apresenta-se como uma das formas para atender tanto às questões de proteção ambiental quanto ao lucro das empresas, pois pode gerar valor econômico ao solucionar problemas de gerenciamento de resíduos.

4.3 Soluções sustentáveis para os rejeitos de minério de ferro

Uma alternativa para minimizar os impactos associados à disposição dos rejeitos de minério de ferro em barragens é o seu reaproveitamento em obras de infraestrutura rodoviária ou da construção civil, como na produção de tijolos, concreto, argamassa, cerâmicas e pigmentos.

Os rejeitos de mineração de ferro são compostos principalmente por sílica, alumínio e ferro, sendo classificado como resíduo classe II A, a qual os classifica como não perigosos e não inertes, conforme os parâmetros de avaliação contidos na ABNT NBR 10004/2004. Assim, podem ser reaproveitados na fabricação de tijolos após análises químicas preliminares. Essas análises permitem avaliar a

percentagem dos resíduos que podem ser incorporados à argila na fabricação de tijolos. Desta forma é possível obter um material com características físicas até melhores que as verificadas em tijolos tradicionais usados na construção civil.

Alguns exemplos interessantes do uso de rejeitos de minério de ferro na construção civil e de materiais são os modelos de casas construídas pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e pelas empresas mineradoras Samarco e Gerdau, que produzem tijolos e lajotas provenientes de rejeitos de mineração. O reaproveitamento desses resíduos tende a reduzir a demanda por recursos naturais, além de contribuir para o aprimoramento tecnológico do setor construtivo de maneira sustentável.

Existem diversos estudos relacionados ao aproveitamento de rejeitos de minério de ferro e a maioria está ligada ao reprocessamento do material, com o objetivo de recuperar o óxido de ferro ainda presente nos rejeitos. As demais aplicações também estão relacionadas à construção civil para uso como agregados artificiais, areia, argamassa e blocos, e ainda aplicações tecnológicas como catalisadores, nanofibras, aglomerantes, polímeros, produção de carbeto de silício, silicato de sódio, cloreto férrico, dentre outras.

4.4 O processo de produção de aço

O Brasil tem hoje o maior parque industrial de aço da América do Sul e é o maior produtor da América Latina. O aço é uma liga metálica composta majoritariamente por ferro ($\geq 98\% \text{ m/m}$) e carbono (0,002-2,0% m/m). Outros elementos como silício, enxofre e fósforo também podem estar presentes em quantidades ínfimas, as quais chamamos de “níveis de traços”. A produção de aço em toneladas é um forte indicador do estágio de desenvolvimento econômico de um

país. Seu consumo cresce proporcionalmente à construção de edifícios, execução de obras de infraestrutura, instalação de meios de comunicação e produção de equipamentos.

As principais matérias-primas usadas para a produção de aço são minério de ferro, carvão e cal, sendo o processo siderúrgico um conjunto de etapas utilizadas para tal transformação, iniciada na extração do minério de ferro e finalizada na obtenção das ligas de aço. Todo o processo se divide em 4 etapas principais: preparação da matéria-prima, redução do ferro, refino e laminação. Um resumo do processo é apresentado na **Figura 8**.

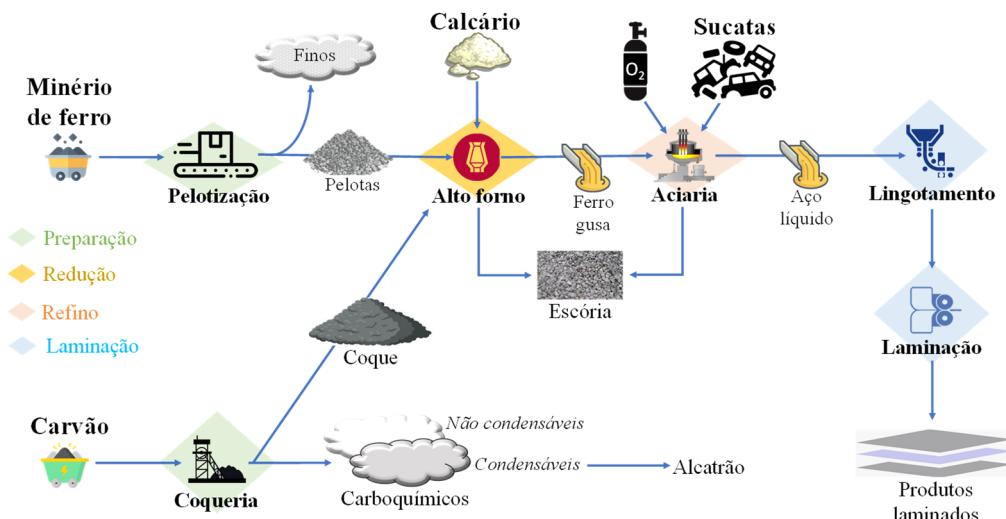


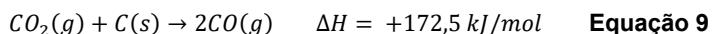
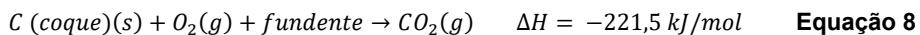
Figura 8. Fluxograma representando as etapas envolvidas no processo de produção do aço.

Inicialmente, o minério de ferro é pelotizado (**Figura 8**), ou seja, transformado em pelotas (pellets). Um controle granulométrico permite a passagem daqueles de tamanho desejado, enquanto os maiores retornam para nova pelotização. Simultaneamente, o carvão (vegetal ou mineral) é destilado para a

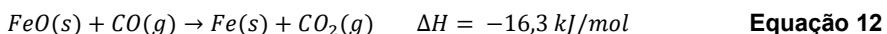
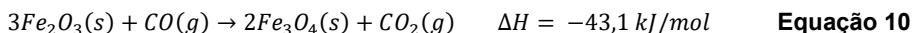
obtenção do coque (**Figura 8**), um material sólido rico em carbono com baixo teor de enxofre e cinzas. A destilação ocorre em uma câmara de combustão aquecida a cerca de 1.300 °C, chamada de coqueria, a qual trabalha na ausência de ar atmosférico por um tempo pré-estabelecido. O produto final é o coque, além de gases condensáveis e não condensáveis, conhecidos como carboquímicos, a saber H₂ (52 – 63%), metano (CH₄, 24 – 29%), monóxido de carbono (CO, 6 – 7,8%), dióxido de carbono (CO₂, 1,3 – 5,6%), oxigênio (O₂, 0,1 – 0,5%), nitrogênio (N₂, 2 – 4,5%), hidrocarbonetos leves (2,2 – 3,8%) e gás sulfídrico (H₂S, 0,009%).

Os gases não condensáveis apresentam poder calorífico médio e são queimados para aquecimento de fornos e geração de energia elétrica. Isso contribui para o aumento da eficiência energética das operações. Já os gases condensáveis são convertidos em alcatrão (**Figura 8**), uma mistura de substâncias betuminosas, espessas, escura e de forte odor amoniacal.

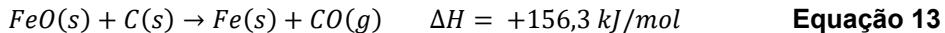
Após pelotização, o material obtido formado por pequenas partículas de minério de ferro (as pelotas) é misturado ao fundente (substância que auxilia a fusão do minério de ferro) e ao coque (combustível) e, então, levado ao alto forno aquecido a 1.500 °C, onde ocorre a redução do ferro e produção do ferro gusa em estado líquido. Mas o que acontece no alto forno? No alto forno, o carbono das partículas de coque é oxidado pelo gás oxigênio (O₂), proveniente da injeção de ar atmosférico no sistema. A reação produz dióxido de carbono (CO₂) e grande quantidade de energia ($\Delta H = -221,5 \text{ kJ/mol}$) (**Equação 8**). Sob as altas temperaturas do forno, o CO₂ é convertido a monóxido de carbono (CO) na presença de carbono em excesso (**Equação 9**).



Iniciam-se então as reações de redução dos óxidos de ferro pela reação com o CO, onde a hematita (Fe_2O_3) é primeiramente reduzida a magnetita (Fe_3O_4) (**Equação 10**), que por sua vez é oxidada a óxido ferroso (FeO) (**Equação 11**), sendo posteriormente reduzido a ferro metálico (Fe) (**Equação 12**). Um dos produtos é o dióxido de carbono, que no meio é rapidamente reconvertido a monóxido de carbono conforme a **Equação 7**.



Combinando-se as reações de redução do óxido ferroso (**Equação 12**) e do dióxido de carbono (**Equação 9**), tem-se a reação de obtenção do ferro metálico (**Equação 13**), conhecido na siderurgia como ferro gusa, uma liga líquida com teor de ferro na ordem de 95% e cerca de 4,5 % de carbono, 0,3 a 0,7% de silício, 0,01 a 0,04% de enxofre, 0,1% de fósforo e cerca de 0,1% de manganês.



Paralelamente à produção de ferro gusa, há a produção de escórias e gases no alto forno (**Figura 8**). A escória é um resíduo sólido composta por cerca de 30 a 40% de sílica (SiO_2), 5 a 15% de alumina (Al_2O_3), 35 a 45% de óxido de cálcio (CaO), 5 a 15% de óxido de magnésio (MgO) e 1 a 2% de enxofre (S), sendo geralmente comercializada para a fabricação de cimentos e outros materiais cerâmicos.

O ferro gusa segue para a etapa de refino na aciaria (**Figura 8**), onde é transformado em aço líquido por meio da injeção de gás oxigênio puro. As reações elevam a temperatura para 1700 °C, o que facilita a remoção de impurezas. O aço

produzido é uma liga metálica constituída de aproximadamente 98,5% de ferro, 0,5 a 1,7% de carbono e traços de silício, enxofre, fósforo.

Ainda na acaria (**Figura 8**), sucatas de aço também podem ser reaproveitadas. Estima-se que para cada 1 t de sucata de aço reciclado se economize 1,14 t de minério de ferro extraído, evitando ainda a emissão de 1,5 t de CO₂ na atmosfera, sem falar na economia de água e energia exigidas em todo o processo de mineração e siderurgia que, consequentemente, reduz os impactos ambientais causados por estes segmentos.

Por fim, o aço líquido é solidificado na etapa de lingotamento (**Figura 8**) a fim de produzir semiacabados, lingotes e blocos de aço. Esses produtos são processados em laminadores (etapa de laminação na **Figura 8**) e então moldados para formar lâminas ou outros produtos siderúrgicos, cuja nomenclatura depende de sua forma e/ou composição química. Sobras de aço proveniente da laminação são reaproveitadas, onde este resíduo volta ao processo de refino junto com sucatas de aço (**Figura 8**).

O aço pode ser usado na fabricação de outros tipos de ligas metálicas com diferentes propriedades físicas, que podem ser utilizados de acordo com a necessidade. Um exemplo é a produção do aço inoxidável, que não se oxida e não sofre corrosão facilmente. Este aço é composto de 74% de aço comum e mais 18% de crômio e 8% de níquel.

4.4.1 Soluções para os rejeitos da produção de aço

Todos as etapas de produção do aço geram subprodutos indesejáveis e, portanto, são encarados como rejeitos, mas que poderiam ser vistos como matérias-primas para outras indústrias. Os finos de minério de ferro (**Figura 8**) são o primeiro exemplo, partículas de baixa granulometria, geralmente dispersas na poeira gerada

no processo, com alto teor de sílica. Se atingidas as dimensões entre 0,0105 a 6,3 mm, é possível desagregá-los do rejeito por uma corrente de ar e reaproveitá-los, principalmente na construção civil para fabricação de blocos para a construção de calçadas, postes de luz ou para cercamento e pisos intertravados para trânsito.

O município de Belo Horizonte, MG, determinou a utilização dos finos oriundos do minério de ferro como um dos constituintes do asfalto da cidade, permitindo maior permeabilidade da água de chuva que abastecem o lençol freático, minimizando efeitos de enchentes e processos erosivos das estradas e ruas dos bairros.

Na produção do coque, para cada uma tonelada de carvão utilizado é gerado cerca de 37 kg de alcatrão, o qual ao ser destilado dá origem ao piche (8 a 20% *m/m*), um resíduo poluente. Uma solução proposta para esse rejeito foi empregá-lo na impermeabilização de telhados, lajes, paredes, pisos, etc. Atualmente, o piche vem sendo utilizado também na fabricação de tintas, vernizes, resinas e outros produtos, os quais eram obtidos a partir de derivados de petróleo.

O alcatrão possui frações mais leves que completam os outros 80% de sua composição, as quais são compostas por vários hidrocarbonetos que podem incluir heteroátomos como oxigênio, nitrogênio e enxofre em sua estrutura química. As frações são distribuídas entre óleos leves, como benzeno e tolueno, óleos médios como fenóis, cresóis e naftaleno, e óleos pesados com mais de 15 átomos de carbonos.

A classificação dos óleos leves, médios e pesados é feita com base na sua densidade, de acordo com uma escala própria para derivados de petróleo chamado grau API, sigla inglesa que significa Instituto Americano de Petróleo (*American Petroleum Institute*). Estes são destilados em uma coluna de fracionamento,

processo idêntico ao realizado para separar as frações do petróleo. Os óleos pesados possuem grau API menor que 22º, o que significa que eluem em temperaturas mais altas durante a destilação, chegando a cerca de 400 ºC. Já os óleos leves estão acima de 30º API e correspondem a uma mistura de mais de 100 substâncias que são separadas e recuperadas na coluna de fracionamento. Por exemplo, abaixo de 80 ºC obtém-se o ciclopentadieno e dissulfeto (2% v/v do óleo leve), a 80 ºC benzeno (60% v/v) e a 110 ºC o tolueno (18%), todos usados como solventes pela indústria química, também aplicáveis na produção de borracha, tintas, vernizes, entre outros. Os óleos médios possuem entre 22 e 30º API. O naftaleno é um dos componentes e é recuperado da coluna de destilação entre 120 e 125 ºC.

A amônia mencionada na seção 3.4 deste livro também é um resíduo gerado na indústria siderúrgica, podendo ser obtida em solução aquosa após o resfriamento do gás de coqueria. Geralmente são obtidos de 5 a 6 kg de amônia por tonelada de carvão. Parece pouco, mas se pensarmos que se consome cerca de 9 milhões de toneladas de carvão por ano, veremos que é bastante significativo. A amônia possui diversas utilidades além da produção de fertilizantes, sendo útil como matéria-prima na produção de *nylon* e do ácido nítrico, o qual está presente nas reações de nitração de compostos orgânicos, na fabricação de explosivos como TNT (trinitrotolueno) e pólvora.

Nos últimos anos, a indústria do aço tem buscado promover o uso racional de recursos naturais e energéticos, investindo em ações ambientais direcionadas ao aprimoramento dos processos técnicos e programas voltados à sustentabilidade e à redução da emissão de CO₂. E as ações vêm dando resultado. Segundo o Instituto Aço Brasil, em 2020, mais de 50% do consumo da energia elétrica, utilizada na produção do aço no Brasil, foram supridos por meio da autogeração. A geração própria de energia é feita pelo reaproveitamento dos gases de coqueria, altos-fornos

e refino nas centrais termelétricas, ou por meio de usinas hidrelétricas próprias. No mesmo ano, as empresas reutilizaram quase sua totalidade da água doce necessária ao processo de produção do aço, com percentual de reaproveitamento de 97%. Além do que, mais de 90% dos coprodutos e resíduos gerados no processo de produção do aço são reaproveitados. O agregado siderúrgico vem sendo utilizado na pavimentação de vias, como revestimento primário, bases e sub-bases, substituindo a brita e outros materiais na construção civil. Pode ser aplicado também na agricultura, como corretivo de acidez de solo em substituição ao calcário. Já a escória proveniente do alto-forno é utilizada na produção de cimento.

4.4.2 Biorremediação como tratamento alternativo aos rejeitos da indústria siderúrgica

Estima-se que para cada 1 tonelada de aço produzido, 700 kg de rejeitos são gerados. Em um estudo feito na década de 1980 foi relatado que ações antrópicas, ou seja, feitas pelo homem, sejam responsáveis pela dispersão de 1,16 milhões de toneladas por ano de metais pesados no meio ambiente como: Chumbo (Pb), Cobre (Cu), Mercúrio (Hg), Alumínio (Al), entre outros, os quais sofrem acúmulo no meio ambiente, sendo absorvidos por plantas e organismos menores, podendo entrar na cadeia alimentar e causando graves problemas à saúde humana. Temos aí uma relação insustentável sobre o ponto de vista da sustentabilidade, não é mesmo? Resíduos esses que requerem um novo olhar sobre suas produções e uma pitada de criatividade no seu manejo para com o meio ambiente, e aí entra a biorremediação. Mas afinal de contas, o que é biorremediação?

A biorremediação é definida como um conjunto de processos bioquímicos realizados por seres vivos como plantas, microrganismos, fungos e bactérias com o fim de transformar contaminantes, que foram despejados no solo ou na água, em

nutrientes para esses seres ou ainda em substâncias que sejam menos nocivas ao meio ambiente.

Neste cenário, a biorremediação pode ser vista como uma forma de diminuir consideravelmente a concentração dos compostos presentes nos rejeitos industriais antes de serem dispostos no meio ambiente. Cita-se como exemplo a bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans*, que utiliza como fonte de energia substâncias inorgânicas, como íons ferrosos. A partir da oxidação dessas substâncias, este microrganismo retira energia para fixar CO₂, que é sua fonte de carbono. Além disso, é um microrganismo mesófilico, ou seja, cresce em torno de 30 °C e suporta altas concentrações de metais diversos. Estas características indicam a alta eficiência desta bactéria para remediação de ambientes contaminados por rejeitos ricos em ferro.

Outros microrganismos que merecem destaque quando se fala de habilidades bioassortivas são os fungos filamentosos e as leveduras. A capacidade de bioassorção é a habilidade de um microorganismo interiorizar certos metais que podem ser úteis para o seu metabolismo, retirando-os do meio ambiente. Os fungos filamentosos e as leveduras são especiais porque possuem alta velocidade de reprodução e produzem considerável biomassa e, no geral, possuem maior resistência que as células bacterianas aos meios mais hostis. *Aspergillus niger*, *A. versicolor*, *Penicillium corylophilum*, *P. chrysogenum* e *Saccharomyces cerevisiae* são cinco espécies de fungos que podem ser citados na bioassorção de metais como cobre, zinco e manganês.

Portanto, pudemos perceber ao longo desta seção que existem várias alternativas criativas e inteligentes para os resíduos gerados pela prática siderúrgica e, com o auxílio da biorremediação, uma nova perspectiva sobre o lixo e o meio ambiente.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A química é mais que uma mera disciplina obrigatória em nossa formação escolar, literalmente ela pode ser o acender e o apagar das luzes do planeta. Portanto, SIM, a química é uma das melhores ferramentas que nós temos para o desenvolvimento sustentável na gestão de resíduos industriais e agroindustriais! Vimos neste livro a química sendo usada para explicar ciclos totalmente sustentáveis realizados pela natureza e também as justificativas para o aquecimento global, a composição molecular de diversos resíduos e como esses danificam o meio ambiente e prejudicam a nossa saúde. A união das nações e o pedido de socorro pela sustentabilidade de suas atividades, a criação de leis ambientais que esclarecem os nossos direitos e deveres, a luta das instituições de ensino superior brasileiras para trazer soluções ambientalmente amigáveis e definitivamente seguras para a sociedade aparecem, deste modo, por atrás da complexidade de uma simples xícara de café e de uma lâmina de aço.

Outros destinos inteligentes para a gestão dos resíduos formados pelo agronegócio do café, extração do minério de ferro e produção de aço foram apresentados, mas ainda precisam ser explorados, todos com o objetivo de transformar as moléculas nocivas que os compõem naquelas que são participantes dos ciclos sustentáveis da natureza.

Seja você também um agente desta transformação molecular que a química vem fazendo no e para o planeta. Se disponha a pesquisar soluções inteligentes para o destino dos resíduos gerados na cadeia produtiva dos alimentos e pelas indústrias da sua cidade. Veja o que as instituições de ensino superior próximas a você estão fazendo e, se quiser, ingresse nelas. Quem sabe não te vejo em um laboratório de química 😊.

6. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Ministério de Minas e Energia.

Exploração mineral. Brasília, DF: ANM, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/exploracao-mineral>>. Acesso em: 30 out. 2021.

ARAÚJO, L. A. **Manual de siderurgia. Transformação.** 2. ed. São Paulo: Editora Arte & Ciência, 2008. 2 v.

BAIRD, C.; CANN, M. **Química ambiental.** 4. ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 2011.

BORGES, L. A. C.; REZENDE, J. L. P.; PEREIRA, J. A. A. Evolução da legislação ambiental brasileira. **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, v. 2, n. 3, p. 447-466, 2009.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 05 out. 1988. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm>. Acesso em: 28 out. 2021.

BROWN, T. L., LEMAY JR., H. E., BURSTEN, B. E. & BURDGE, J. R. **Química, a ciência central.** São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

BRUNDTLAND, G. **Our common future: The World Commission on Environment and Development.** London: Oxford University Press, 1987.

CARMIGNANO, O. R. D. R. **Inovação no setor de mineração de ferro em Minas Gerais com foco na destinação de rejeitos.** 2021. Tese (Doutorado em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica) – Departamento de Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2021.

DE FREITAS, S. M. A. C.; SOUSA, L. N.; DINIZ, P. MARTINS, M. E.; ASSIS, P. S. Steel slag and iron ore tailings to produce solid brick. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 20, n. 5, p. 1087-1095, 2018.

DE MELO, M. M. R.; SILVESTRE, A. J. D.; PORTUGAL, I.; SILVA, C. M. Emerging technologies for the recovery of valuable compounds from coffee processing by-products. In: GALANAKIS, C. M. **Handbook of coffee processing by-products**. San Diego, CA: Academic Press, 2017. 5 cap., 141–169 p.

DURÁN, C. A. A.; TSUKUI, A.; SANTO, F. K. F; MARTINEZ, S. T.; BIZZO, H. R.; REZENDE, C. M. Café: aspectos gerais e seu aproveitamento para além da bebida. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 1, p. 107-134, 2019.

FARAH, A. **Coffee production, quality and chemistry**. 1st ed. London, UK: The Royal Society of Chemistry, 2019.

FARIAS, Y. M. M. **Biosorção de metais pesados pelo fungo *Penicillium corylophilum***. 2014. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2014.

FARMAN, J.; GARDINER, B.; SHANKLIN, J. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction. **Nature**, v. 315, p. 207–210, 1985.

FERNANDES, R. S.; DE SOUSA, L. R. C.; DOS SANTOS, T. L. Análise, investigação e avaliação da gestão da qualidade no processo de mineração: um estudo de caso sobre as divergências nos desvios de estoque de minério de ferro. **Revista Produção Online**, v. 21, n. 3, p. 770-793, 2021.

GOMES, A. C. F. **Estudo de aproveitamento de rejeito de mineração**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2017.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Relatório de sustentabilidade 2020. Rio de Janeiro, RJ: IAB, 2020a. Disponível em: <<https://www.acobrasil.org.br/relatoriodesustentabilidade/>>. Acesso em: 26 out. 2021.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Anuário estatístico 2020. Rio de Janeiro, RJ: IAB, 2020b. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2020/06/Anuario_Completo_2020.pdf>. Acesso em: 26 out. 2021.

MAURY, M. B.; BLUMENSCHEN, R. N. Produção de cimento: impactos à saúde e ao meio ambiente. **Sustentabilidade em Debate**, v. 3, n. 1, p. 75-96, 2012.

NAÇÕES UNIDAS. Conferences. New York, NY: ONU. Disponível em: <<https://sustainabledevelopment.un.org/conferences>>. Acesso em: 27 out. 2021.

NAVEED, M.; HEJAZI, V.; ABBAS, M.; KAMBOH, A.A.; KHAN, G.J.; SHUMZAID, M.; AHMAD, F.; BABAZADEH, D.; FANG, X.F.; GHAZANI, F.M.; HUA, L.W.; HUI, Z.X. Chlorogenic acid (CGA): A pharmacological review and call for further research. **Biomedicine & Pharmacotherapy**, v. 97, p. 67-74, 2018.

NEVES, O. R.; CAMISASCA, M. M. Aço Brasil: uma viagem pela indústria do aço. Belo Horizonte: Escritório de Histórias, 2013. 192 p.

NOVAES, F. J. M. Ésteres diterpênicos do café arábica: obtenção e análise por cromatografia gasosa unidimensional e bidimensional abrangente. 2017. Tese (Doutorado em Ciência de Alimentos) – Instituto de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2017.

PINHEIRO, F. A. Caracterização molecular de comunidades bacterianas de rejeitos siderúrgicos com diferentes concentrações de zinco. 2010. Dissertação (Mestrado em Biologia Geral) – Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2010.

PINTO, A. C.; SILVA, B. V. **A química perto de você: experimentos de química orgânica.** São Paulo: Sociedade Brasileira de Química, 2012. 128 p.

SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais.** São Paulo: Editora Blucher, 2010. 664 p.

SILVA, R. C. Equilíbrio, ação e oração: A luta dos moradores de Contagem (MG) contra a poluição da fábrica Itaú nos anos 1970. **Temporalidades – Revista de História**, v. 12, n. 1, p. 223-254, 2020.

SILVEIRA, M. D. **Utilização de resíduos da mineração na construção civil.** 2015. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2015.

WORLD MINE TAILINGS FAILURES. **World mine tailings failures from 1915-2019.** Blue Hill, ME: WMTF. Disponível em: <<https://worldminetailingsfailures.org/>>. Acessado em: 14 mar. 2022.



Sociedade Brasileira de Química

Uma produção SBQ - Sociedade Brasileira de Química

www.sjq.org.br