



**COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO
ESCOLA SUPERIOR CETESB**



**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO “CONFORMIDADE
AMBIENTAL COM REQUISITOS TÉCNICOS E LEGAIS”**

Karoline Santos de Santana

INDÚSTRIAS DE PAPEL E CELULOSE:

Referencial teórico de processos, geração de resíduos e regulamentação internacional voltada à emissão de dioxinas e furanos no ambiente

**São Paulo
2024**



Karoline Santos de Santana

INDÚSTRIAS DE PAPEL E CELULOSE:

Referencial teórico de processos, geração de resíduos e regulamentação internacional voltada à emissão de dioxinas e furanos no ambiente

Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção de Formação de Pós-graduação em Conformidade Ambiental - Requisitos Técnicos e Legais pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo CETESB.

Orientadora: Profa. Ma. Mara Magalhães Gaeta Lemos.

**São Paulo
2024**

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

(CETESB – Biblioteca, SP, Brasil)

S223i	<p>Santana, Karoline Santos de Indústrias de papel e celulose [recursos eletrônico] : referencial teórico de processos, geração de resíduos e regulamentação internacional voltada à emissão de dioxinas e furanos no ambiente / Karoline Santos de Santana. – São Paulo, 2024. 1 arquivo (70 p.) : il., PDF ; 2 MB.</p> <p>Orientador (a): Prof. Ma. Mara Magalhães Gaeta Lemos. Trabalho de conclusão de curso (Especialização em Conformidade Ambiental) – Pós-Graduação Lato Sensu Conformidade Ambiental com Requisitos Técnicos e Legais, Escola Superior da CETESB, São Paulo, 2024. Disponível também em: <http://cetesb.sp.gov.br/escolasuperior/producao-tecnico-cientifica/>.</p> <p>1. Dioxinas 2. Furanos 3. Legislação ambiental 4. Papel – celulose – indústria 5. Poluição ambiental – indústria – papel – celulose 6. Poluentes orgânicos persistentes (POP) 7. Resíduos sólidos industriais – usos 8. Solo agrícola I. Lemos, Mara Magalhães Gaeta, Orient. II. Escola Superior da CETESB (ESC). III. Título.</p>
CDD (21. ed. Esp.)	676 028 6 363.731 028 6
CDU (2. ed. Port.)	504.5:676

Catálogo na fonte: Margot Terada – CR8. 4422

Direitos reservados de distribuição e comercialização.
Permitida a reprodução desde que citada a fonte.

© CETESB 2024.

Av. Prof. Frederico Hermann Jr., 345

Pinheiros – SP – Brasil – CEP 05459900

Site: <<http://cetesb.sp.gov.br/escolasuperior/producao-tecnico-cientifica/>>



CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO
CONFORMIDADE AMBIENTAL COM REQUISITOS TÉCNICOS E LEGAIS



AVALIAÇÃO DOS TRABALHOS DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aluno(a):	Karoline Santos de Santana	
Título do trabalho:	INDÚSTRIAS DE PAPEL E CELULOSE: Referencial teórico de processos, geração de resíduos e regulamentação internacional voltada à emissão de dioxinas e furanos no ambiente	Turma: 2021

Avaliadores		Nota	Assinatura
Avaliador 1 Nome:	Gisela Vianna Menezes	9,5	Gisela V. Menezes
Avaliador 2 Nome:	Paulo Fernando Rodrigues	9,5	Paulo F. R.
Orientadora Nome:	Mara Magalhães Gaeta Lentos	9,5	Mara Magalhães Gaeta Lentos
Nota final		9,5	
Aprovado em	São Paulo, 28 de Agosto de 2024		

Ciência do aluno(a) nome:	Assinatura
Karoline Santos de Santana	Mara Magalhães Gaeta Lentos

A aprovação do Trabalho de Conclusão de Curso não significa aprovação, endosso ou recomendação, por parte da CETESB, de produtos, serviços, processos, metodologias, técnicas, tecnologias, empresas, profissionais, ideias ou conceitos mencionados no trabalho.

DEDICATÓRIA

Ao meu esposo, que sempre me impulsionou a correr atrás dos meus objetivos e seguir meus sonhos, renunciando suas próprias conquistas em prol de minha busca por maior conhecimento

A Deus, que sempre tem ouvido minhas preces e me levado a caminhos que nunca passaram por minha mente ou desceram ao coração.

À minha orientadora, que com paciência sobre o meu pouco conhecimento me inspirou a uma monografia que eu jamais elaboraria sozinha.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente à equipe e coordenação da Escola Superior da CETESB pela oportunidade de cursar a Pós-Graduação em um local com tamanha riqueza de conhecimentos técnicos, práticos e teóricos, por professores e profissionais que compõem essa Companhia.

Agradeço a minha orientadora Mara Magalhães, que durante a elaboração deste trabalho, com grande paciência sobre minha falta de conhecimento, têm me orientado à elaboração dessa monografia rica em informações.

E agradeço a meus colegas de curso, que nesses dois anos foram incríveis companheiros e profissionais, compartilhando seus muitos conhecimentos nas diversas áreas ambientais e contribuindo com meu desenvolvimento profissional.

A todos, os meus sinceros agradecimentos.

“...e, assim, essa natureza monta esse sistema todo, maravilhoso e intricado, de controles e de fatores de equilíbrio, que protege a floresta contra danos indevidos”.

RESUMO

Este estudo contempla um referencial teórico sobre a indústria de papel e celulose, seus processos, geração de resíduos e potencial de emissão de dioxinas e furanos, destacando a regulamentação internacional voltada ao estabelecido pela convenção de Estocolmo e a atuação do Brasil como país signatário na aplicação de planos de ação que visam a redução da liberação destes poluentes. É abordada a importância da continuidade no desenvolvimento de estudos para avaliação do potencial de emissão e averiguação das fontes passíveis de liberação dos compostos, em conjunto com a determinação do potencial de aplicação no solo agrícola para não provocar a contaminação ou o acúmulo das substâncias no ambiente.

Palavras-Chave: Celulose e Papel; Dioxinas; Furanos; Kraft; Regulamentação.

ABSTRACT

This study includes a theoretical framework on the paper and cellulose industry, its processes, waste generation and potential for emission of dioxins and furans, highlighting international regulations based on those established by the Stockholm convention and Brazil's role as a signatory country in the application of action plans aimed at reducing the release of these pollutants. The importance of continuing to develop studies to evaluate the potential emission and investigate the sources likely to release the compounds is addressed, together with the determination of the potential for application on agricultural soil so as not to promote contamination or accumulation of substances in the environment.

Keywords: Dioxins; Kraft; Pulp and Paper; Sludge Furans; Regulation.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Fluxograma do processo produtivo e geração de resíduos pela indústria de celulose e papel.377**
- Figura 2 – Adaptação de esquema de decisão usado na reavaliação da OMS em 2005 dos valores de TEF da OMS de 1998 atribuídos a congêneres individuais de PCDD, PCDF e PCBs422**

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Adaptação da Tabela 4 da Lei de Fertilizantes com exemplos de concentrações aceitáveis de dioxina/furano para produtos em diferentes taxas de aplicação	50
Quadro 2 –	Padrões de dioxinas e furanos	50
Quadro 3 –	Adaptação da Tabela A – Valores limite e concentrações que caracterizam lodo de alta qualidade e adequado para utilização na agricultura (em substituição à Tabela A do Anexo 1 do Decreto Legislativo 7076/2017)	52
Quadro 4 –	Adaptação da Tabela B – Protocolo de caracterização e admissibilidade (substituindo a Tabela B do Anexo 1 do decreto legislativo 7076/2017).	52
Quadro 5 –	Adaptação da Tabela C – Análise de Lodos (em substituição à Tabela C do Anexo 1 do decreto legislativo 7.076/2017)	53
Quadro 6 –	Adaptação da Tabela 12 – Classificação geral das liberações totais, segundo inventário em 2008.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos valores de TEF da OMS de 1998 e OMS de 2005.....	430
Tabela 2 – Adaptação do Anexo VI – Disposições técnicas relacionadas com as instalações de incineração e co-incineração de resíduos: Parte 2 – Fatores de equivalência para dibenzo-p-dioxinas e dibenzofuranos.	45
Tabela 3 – Limites de emissão de poluentes de acordo com a regra 10 CSR 10-6.191.....	46
Tabela 4 – Adaptação do Apêndice B – Cálculo de Exposição CDD/CDF (combinando exposição a ar, ambiente e alimentação).....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

I-TEF	Fator de Equivalência Tóxica
OMS	Organização Mundial de Saúde
PCB	Bifenilas policloradas
PCDD	Dibenzodioxinas policloradas
PCDF	Dibenzofuranos policlorados
POPs	Poluentes Orgânicos Persistentes
REP	Potência de Efeito Relativo
TCDD	Tetraclorodibenzo-p-dioxina
TEQ	Quociente de Equivalência Tóxica

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	25
1. A INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE E SEU PAPEL NA ECONOMIA DO PAÍS	27
2. PROCESSO PRODUTIVO E RESÍDUOS GERADOS	28
3. UTILIDADES.....	34
3.1. TRATAMENTO DE EFLUENTES	34
3.2. CALDEIRAS DE FORÇA	35
3.3. POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS EM ÁREAS FLORESTAIS.....	35
4. DIOXINAS E FURANOS	38
5. ORIGEM E EFEITOS	39
6. FATOR DE EQUIVALÊNCIA DE TOXICIDADE	40
7. REGULAMENTAÇÃO INTERNACIONAL	44
7.1. O IMPORTANTE PAPEL DA CONVENÇÃO DE ESTOCOLMO	44
8. REGULAMENTAÇÕES DAS EMISSÕES DE DIOXINAS E FURANOS	46
8.1. UNIÃO EUROPEIA	46
8.2. ESTADOS UNIDOS	48
9. REGULAMENTAÇÕES PARA APLICAÇÃO NO SOLO DE DIOXINAS E FURANOS.....	49
9.1. CANADÁ	49
9.2. ITÁLIA	51
9.3. ALEMANHA	54
10. REGULAMENTAÇÃO BRASILEIRA	56
11. CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
<u>REFERÊNCIAS.....</u>	64

INTRODUÇÃO

Segundo o relatório conjunto da EPE (Empresa de Pesquisa Energética), da IEA (International Energy Agency), a IBA (Indústria Brasileira de Árvores) e a FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nation) (2021 p.11), o setor florestal no Brasil sempre foi destaque econômico, não somente pela diversidade de nutrientes presentes no solo de seus ecossistemas, mas também pela ampliação financeira elevada e cada dia mais difusa deste mercado. O crescimento das indústrias de celulose e papel que envolvem esse setor e sua importância desenvolvida têm revelado um embate vinculado às condições de produção de resíduos provenientes de suas atividades. Ainda assim, tais resíduos, quando passam por tratamento adequado baseado na aplicação de melhores tecnologias disponíveis, possuem um potencial de reaproveitamento na recuperação do solo em áreas florestais degradadas e na utilização de parte de seus resíduos como fertilizante ou corretivo de propriedades ao solo (ASSENHEIMER, 2009).

As dioxinas e furanos (PCDD e PCDF) fazem parte de um grupo de 210 congêneres químicos classificados como Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs), listados pela Convenção de Estocolmo, realizada no ano de 2001 e vigorada no ano de 2004, com o objetivo de diminuir e/ou eliminar a produção destes compostos no ambiente, dado o seu potencial de nocividade à vida humana e animal, sob as matrizes bióticas e abióticas (ASSUNÇÃO; PESQUERO, 1999 p.3).

A formação de dioxinas e furanos ocorre de forma não intencional, a partir de processos de combustão e processos químicos (como o processo de queima da madeira quimicamente tratada e os processos de branqueamento) desenvolvidos pela indústria de celulose e papel, o que eleva a preocupação com a aplicabilidade de seus resíduos, dada a poluição difusa apresentada pela presença de compostos como dioxinas e furanos em alguns de seus resíduos (ASSUNÇÃO; PESQUERO, 1999).

Os princípios estabelecidos pela Convenção de Estocolmo foram exercidos no Brasil através da elaboração do Plano Nacional de Implementação da Convenção e desenvolvimento de Planos de Ação que objetivam a diminuição e/ ou eliminação da

emissão não intencional de compostos tóxicos, como dioxinas e furanos, no ambiente (MMA, 2013).

Os resíduos das indústrias de celulose e papel possuem um elevado potencial de reaproveitamento em processos de compostagem em áreas florestais e agrícolas (MAEDA *et al.*, 2010). Este enfoque exemplifica a importância do desenvolvimento de regulamentações que promovam o estabelecimento de níveis limite aceitáveis da presença de compostos como dioxinas e furanos em resíduos da indústria de celulose e papel para aplicação no solo, desde que atendendo as determinações do órgão regulamentador.

Isso posto, o presente estudo visa a apresentação do setor, seu processo produtivo com a conseqüente geração de resíduos e as emissões de dioxinas e furanos de forma não intencional proveniente de seus processos. O que se dará abordando a regulamentação internacional de países acerca dos limites de emissão de dioxinas e furanos em aplicação ao solo e a regulamentação brasileira voltada à emissão dos poluentes, os níveis estabelecidos e a aplicação de melhores tecnologias disponíveis e melhores práticas ambientais, visando uma nova possibilidade de reaproveitamento dos resíduos, diminuição e eliminação da emissão dos compostos no ambiente.

1. A INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE E SEU PAPEL NA ECONOMIA DO PAÍS

Segundo o relatório conjunto dos EPE, IEA, IBA, FAO (2021 p.10), o Brasil é o segundo maior produtor de celulose no mundo, com uma produtividade média de 36,8 m³/ha de eucalipto e 30,4 m³/ha de pinus, ficando atrás somente dos Estados Unidos. Já no setor de papel, comparado aos demais países, o Brasil ocupa a 8ª posição entre os maiores produtores mundiais.

A produção deste setor origina-se no Brasil com a utilização de madeira de reflorestamento, sendo seu maior volume correspondente a 98% de eucalipto (*Eucalyptus*) e 2% de pinus. Situação possível graças às condições climáticas do país serem favoráveis ao crescimento e ao desenvolvimento do plantio realizado pelo setor florestal.

Assim, a produção e o volume de vendas que atingiram maiores resultados envolvem o ramo mobiliário (como exemplos tem-se os painéis de madeira) e pisos laminados, respectivamente. O papel deste setor na economia no mundo foi destacado em 2020, mesmo em período de pandemia, com uma considerável resiliência econômica, sendo computado em 2021 um aumento de quase 30% no mercado doméstico no ano de 2020 (EPE; IEA; IBA; FAO, 2021 p.9),

Segundo a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), em 2020, o potencial de exportação do Brasil foi de mais de 15,7 milhões de toneladas de celulose, com mais de 70% destinado ao mercado exterior, tornando-se o maior fornecedor de celulose mundial, seguido pelo Canadá, com uma exportação de 9 milhões de toneladas de celulose, e Estados Unidos, com uma exportação de 7,8 milhões de toneladas. Considerando o recebimento dos insumos, a exportação de celulose reflete o direcionamento principalmente à China (43% de recebimento de celulose) e aos Estados Unidos (17% de recebimento de celulose), representando a exportação de 59% da celulose. Em relação ao setor de papel, os principais recebimentos computados envolvem países da América Latina, com 41% de exportação (IBA, 2022).

2. PROCESSO PRODUTIVO E RESÍDUOS GERADOS

O processo produtivo pertinente às atividades exercidas pela indústria de celulose e papel percorre uma extensa gama de procedimentos interligados envolvendo dois importantes produtos: madeira (matéria prima base da indústria para produção), sua conversão em celulose (subproduto partido da utilização da matéria e transformação em uma massa celulósica rica em lignina); e a celulose convertida em papel (produto final), que é encaminhado para exportação e comercialização (BAJPAI, 2018).

Vale ressaltar que os processos utilizados pela indústria utilizam a celulose de fibra longa, proveniente de madeira de pinus, com comprimento entre 2 e 5 mm, para a produção de tipos de papéis mais espessos como embalagens. Já a celulose de fibra curta, proveniente da madeira de eucalipto, com comprimento de 0,5 a 0,2 mm, tem maior utilização na produção de papéis de escrita e sanitários, com menor espessura (VERGARA, 2014).

Atualmente, na indústria, existem três tipos de processos utilizados: o Processo Mecânico, que envolve a utilização de maquinário, sem a utilização de produtos químicos (BAJPAI, 2018); o Processo Físico, que consiste na separação por tratamentos térmicos promovendo a hidrólise para cozimento da madeira e extração da celulose; e o Processo Químico, que consiste na conversão do cavaco em massa celulósica, que será branqueada e processada para comercialização. Este terceiro processo envolve a recuperação química dos produtos e possui um elevado potencial energético, que o torna o processo mais utilizado pelas indústrias de celulose e papel (SIMÃO *et al.*, 2018).

Este estudo abordará somente a aplicação do Processo Químico, tendo em vista a atual aplicação realizada pelas indústrias, o potencial de reaproveitamento que este processo apresenta e os compostos emitidos a partir dos resíduos gerados.

Os diversos procedimentos das indústrias de celulose e papel que realizam a aplicação do Processo Químico se refletem na geração de alguns resíduos como: dregs, grits, lama de cal, cinzas de caldeira e lodo de ETE. Os dregs são formados no

processo de clarificação do Licor Verde; os Grits são formados no processo de caustificação; a lama de cal é formada no processo de recuperação da cal; o lodo é formado no processo de tratamento de águas residuais; e as cinzas são os resíduos gerados nos processos de queima de cavacos e cascas (MAEDA, *et al.*, 2010).

Recepção da madeira: segundo o relatório conjunto do EPE, IEA, IBA, FAO (2021 p.10), utiliza-se a madeira de reflorestamento (eucalipto, que possui um crescimento mais curto, envolvendo aproximadamente 5 a 7 anos, e pinus, envolvendo um crescimento mais longo, de 15 a 20 anos) como matéria-prima principal do processo. Cada tipo de madeira possui características distintas, impactando no subproduto do processo. Sendo assim, as indústrias obtêm a madeira de áreas próprias e áreas arrendadas apenas para o fim de recepção da madeira para utilização em seus processos.

Preparação da madeira: a madeira recebida é encaminhada a um processo de preparação que envolve, inicialmente, a retirada da casca, que será selecionada e separada entre utilizáveis (limpas) e inutilizáveis. As cascas utilizáveis possuem grande potencial de geração de energia, e por isso são encaminhadas para queima na Caldeira de Biomassa (BAJPAI, 2018), que possui como objetivo a geração de vapor e energia, enquanto as cascas inutilizáveis são reservadas para descarte ou possibilidade de utilização nos processos de compostagem (GOMES, 2023).

A madeira é, então, encaminhada para o processo de picagem, cujo objetivo é a formação de cavacos de madeira, que serão encaminhados para a peneira de separação. Os cavacos selecionados são encaminhados à estocagem, enquanto os cavacos rejeitados serão também encaminhados para a caldeira de biomassa, para geração de vapor e energia para utilização pela própria indústria (VERGARA, 2014).

O processo que envolve a preparação da madeira é essencial para que a granulometria dos cavacos seja uniforme e homogênea, afetando a qualidade e a eficiência do processo seguinte, que envolve o cozimento no digestor (GOMES, 2023). O resíduo gerado neste processo, além das cascas inutilizáveis, são as **Cinzas de Caldeira**, resíduo produzido a partir do processo de combustão da madeira nas

caldeiras auxiliares de energia (caldeiras de biomassa). Sua composição envolve altos teores de matéria orgânica, fósforo e relação carbono/nitrogênio (MAEDA *et al.*, 2010).

Fabricação de celulose: as fábricas de celulose e papel utilizam técnicas voltadas ao processo de recuperação química, em que o mais utilizado é o processo “kraft”, tendo em vista sua efetividade com relação à recuperação química e ao aproveitamento energético pela indústria (ALVES *et al.*, 2015).

O processo de fabricação de celulose é formado a partir do encaminhamento dos cavacos homogêneos estocados a um Digestor Contínuo, no qual é inserido o Licor Branco Clarificado (conjunto químico formado por hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na₂S), extremamente necessário para a eficácia do processo de cozimento na separação da lignina das fibras da madeira). Posteriormente, a mistura é submetida a condições de temperatura e pressão elevadas. O intuito desse processo é a separação da fibra de celulose de componentes como lignina e extrativos a partir do cozimento dentro do digestor, o resultado é a formação de uma massa marrom de celulose e Licor Preto (ALVES *et al.*, 2015).

O Licor Preto remanescente do digestor é encaminhado para um processo de recuperação química, enquanto a massa marrom de celulose é encaminhada para a lavagem na prensa e lavador, com a função de limpeza e lavagem para retirada máxima do Licor Preto Fraco ainda remanescente (GOMES, 2023).

A massa marrom de celulose lavada é encaminhada para uma deslignificação seletiva, que consiste na adição de um reagente oxidante (oxigênio) e novamente Licor Branco, com o intuito de oxidar (destruir) a lignina ainda presente. A massa marrom de celulose é muito rica em componentes inorgânicos e por isso ela é novamente encaminhada a um processo de lavagem semelhante ao realizado na prensa e no lavador, com o objetivo de aumentar o rendimento de remoção da lignina, preservando as fibras de celulose. O produto resultante do processo é a Massa Deslignificada Lavada, que seguirá ao processo de **Branqueamento**. O resíduo deste processo gera o Licor Preto Fraco, que também será utilizado no processo de recuperação química (COLODETTE; GOMES, 2015).

Branqueamento: A massa deslignificada lavada é encaminhada ao processo de branqueamento, que envolve a utilização de reagentes químicos com o objetivo de remover a lignina residual e outras propriedades com sujidades indesejáveis ao processo, visando a máxima alvura possível com menor impacto ao produto. Atualmente, o branqueamento da massa é realizado em uma sequência de estágios intercalados por uma etapa de lavagem entre cada estágio (COLODETTE; GOMES, 2015).

Esta consiste na etapa de maior custo para a indústria, pela aplicação de maior quantidade de reagentes químicos e utilidades (água, vapor, energia) para o branqueamento, além da geração de grande quantidade de efluente líquido (BAJPAI, 2018 p. 1313).

O resultado deste processo é a Celulose Branqueada, que será encaminhada para confecção (estocagem, depuração, prensagem, secagem e corte) e comercialização de celulose seca, ou encaminhada diretamente para a fabricação de papel, que envolve a prensagem a seco para formação de folhas de papel. Sua espessura dependerá do processo escolhido pela indústria e requisitos aplicáveis de mercado, seguida da expedição, em que ocorre a finalização da cadeia do processo produtivo e a expedição do produto final e sua posterior comercialização (BAJPAI, 2018).

Recuperação química: atualmente o processo de recuperação química mais utilizado é o Processo Kraft. Este, consiste no reaproveitamento dos componentes presentes no Licor Preto e sua transformação em Licor Branco, que novamente será utilizado no processo (ALVES *et al.*, 2015).

O Licor Preto (resíduo do digestor) e o Licor Preto Fraco (resíduo da lavagem da massa marrom de celulose) são misturados e encaminhados aos evaporadores para a retirada da água e o aumento do teor de sólidos. O resultado é a formação do **Licor Preto Forte**, que será encaminhado para queima na Caldeira de Recuperação. Na caldeira de recuperação, a porção orgânica presente no Licor Preto Forte será queimada (produzindo vapor e energia), enquanto a porção inorgânica do Licor Preto Forte, que consiste em um fundido formado no fundo da caldeira, será recuperada com a diluição em uma solução de Licor Branco Fraco (proveniente do processo de

lavagem da lama de cal), essa diluição dará origem ao **Licor Verde Bruto** (GOMES, 2023).

O Licor Verde Bruto será encaminhado, então, a uma clarificação, na qual ocorre a remoção e a separação da porção sólida indesejada, denominada como **Dregs**, da porção líquida desejada do Licor Verde, que será encaminhada à etapa de **Caustificação** com o objetivo de **recuperação de NaOH** (GOMES, 2023).

Dregs: conceitualmente, dá sentido à escória, ou sedimento (WOLFF, 2008). São os resíduos alcalinos do Licor Verde Bruto.

A parte líquida do Licor Verde é encaminhada para **caustificação**, que consiste na utilização da cal recuperada (CaO) junto a uma molécula de água para reação química, resultando na formação de hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), também conhecida como “cal hidratada”. As impurezas desse processo de hidratação da cal passam por uma decantação, formando um resíduo sólido denominado grits (MAEDA *et al.*, 2010).

Grits: conceitualmente grânulos (WOLFF, 2008), são resíduos alcalinos com aspecto arenoso resultantes do processo de caustificação do Licor Verde.

A parte líquida do Licor Verde, junto com a cal, passa por diversas reações químicas que partem da transformação do hidróxido de cálcio até o hidróxido de sódio, resultando na formação de **Licor Branco Bruto**, que possui uma mistura dissolvida com carbonato de cálcio (CaCO₃), denominada **Lama de Cal** (MAEDA *et al.*, 2010).

O Licor Branco Bruto é encaminhado novamente a um processo de **Clarificação** para remoção da Lama de Cal, resultando no Licor Branco clarificado, pronto para ser utilizado novamente no processo de cozimento no digestor contínuo de cavacos para a formação da celulose, enquanto a Lama de Cal será lavada e encaminhada para queima no forno de cal (WOLFF, 2008).

O processo de queima no forno de cal resulta na liberação de CO₂ e reação de calcinação do carbonato de cálcio (descarbonação da molécula de lama de cal), ocasionando a recuperação do óxido de cálcio (CaO), que será novamente utilizado no processo de caustificação e na transformação do Licor Verde novamente em Licor Branco (WOLFF, 2008).

Ocorre que essa Lama de Cal é gerada constantemente e, quando o forno de cal não está em funcionamento, ocorre um acúmulo do material que não será reaproveitado no processo, tornando-se um resíduo gerado passível de outra destinação.

3. UTILIDADES

3.1. TRATAMENTO DE EFLUENTES

O processo de recuperação química é extremamente efetivo na diminuição de agentes degradantes aos corpos hídricos, tendo em vista o reaproveitamento de compostos para utilização novamente ao início do processo (GOMES, 2023).

Os processos que envolvem o consumo de água e a geração de efluentes vão desde o recebimento da madeira, até a lavagem de toras vinculada à retirada da casca. Esta consiste em todos os processos de lavagem que envolvem o branqueamento, a deslignificação e a secagem até a fabricação de papel (BAJPAI, 2018 p. 1313).

Visando a diminuição de impactos e devido à obrigatoriedade imposta pelo órgão licenciador, a indústria realiza o tratamento de efluentes, que ocorre em duas etapas: Tratamento Primário e Tratamento Secundário. O Tratamento Primário consiste na separação e retirada de sólidos não decantados, contendo o produto bruto resultante da linha de fibras, rico em matéria orgânica e extrativos da madeira de todos os processos de separação da lignina das fibras de celulose. O sólido proveniente da separação deste tratamento é denominado de Lodo Primário, que é encaminhado para desidratação e máxima secagem possível para destinação. A porção líquida do lodo, proveniente do tratamento primário, é encaminhada para o tratamento secundário, em que há o abatimento da matéria orgânica a partir da aplicação de microorganismos aeróbicos que a consomem. O remanescente de lodo deste processo também passa por um processo de máxima secagem possível para destinação (FOELKEL, 2010).

O efluente líquido destes processos é encaminhado para tratamento, em que haverá a correção de parâmetros como pH para prosseguir com sua destinação (SIMÃO *et al.*, 2018). O lodo das indústrias de celulose e papel, proveniente das estações de tratamento de efluentes, diferentemente de outras estações de efluentes sanitários de indústrias em geral, não possui níveis elevados de patógenos, sendo considerado um lodo extremamente rico em matéria orgânica como nitrogênio, fósforo e O₂. Entretanto, é um produto que, a depender dos processos e temperaturas utilizados por cada

indústria, pode conter níveis organoclorados gerados em diferentes frentes, como dioxinas e furanos (FOELKEL, 2010).

3.2. CALDEIRAS DE FORÇA

As Caldeiras de Força, também denominadas Caldeiras de Biomassa, das indústrias de celulose e papel, geram vapor e energia. Elas são a principal fonte energética das indústrias, não havendo a necessidade do uso de energia de fontes externas e utilizando uma energia limpa, produzida pela própria indústria (VERGARA, 2014).

As caldeiras de força estão localizadas na etapa inicial no processo de preparação de madeira pela indústria em que, recebendo as cascas retiradas, o resíduo do processo de picagem de cavacos e os cavacos rejeitados do processo de separação, estes produtos são encaminhados para as caldeiras de biomassa, nas quais ocorre a produção de vapor, alimentação das turbinas e geração de energia (FOELKEL, 2010).

As caldeiras de força são essenciais para a produção de energia a ser utilizada pela indústria, entretanto, o resíduo proveniente deste uso é a produção de cinzas da caldeira, com elevado teor de matéria orgânica, fósforo, cálcio e C/N (carbono/nitrogênio), possuindo viabilidade de utilização como corretivo de solo (MAEDA *et al.*, 2010). Entretanto, as cinzas provenientes das caldeiras de biomassa contêm compostos tóxicos como dioxinas e furanos, provenientes do processo de queima (FOELKEL, 2010).

3.3. POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS EM ÁREAS FLORESTAIS

Os resíduos gerados a partir dos processos da indústria de celulose e papel possuem potencial de recuperação dos aspectos químicos e biológicos do solo. Considera-se neste estudo aqueles atribuídos a solos com plantios florestais, considerando os componentes presentes nos resíduos da indústria.

Por um lado, as cinzas das caldeiras de biomassa possuem em sua composição altos teores de matéria orgânica, fósforo e relação carbono nitrogênio (MAEDA *et al.*, 2010),

podendo contribuir como corretivos de acidez do solo. Entretanto, as cinzas de caldeira são consideradas resíduos Classe 1 – Perigosos, segundo os critérios da norma técnica ABNT NBR 10.004: 2004 (ABNT, 2004), especificamente quanto ao critério estabelecido no subitem 4.2.1.4, alínea b da norma, conforme definido na Decisão de Diretoria da CETESB nº 126/2021/P de 16 de dezembro de 2021, em suas considerações. Essa classificação se deve pela presença de dioxinas e furanos.

Por outro lado, a Lama de Cal, excedente do processo de recuperação química, também pode ser utilizada como corretivo de acidez do solo, dados seus elevados níveis de carbonato de cálcio (SIMÃO *et al.*, 2018).

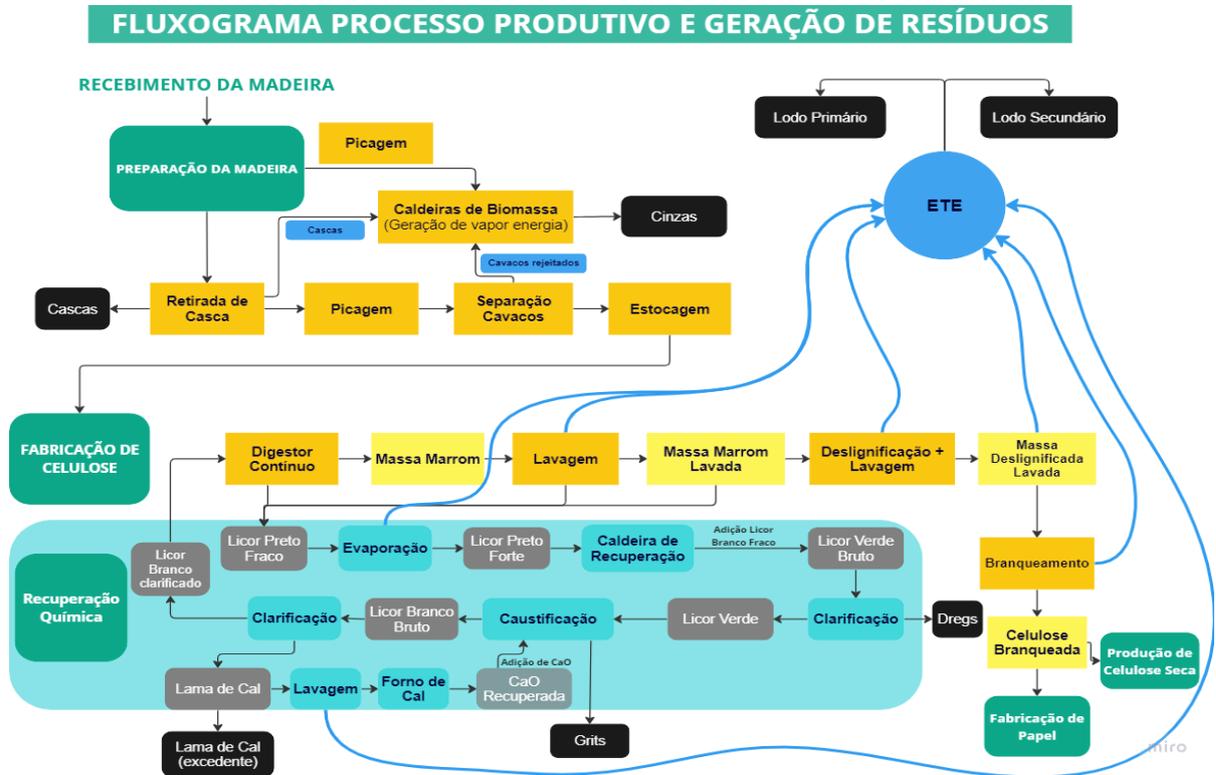
Por sua vez, os Dregs são ricos em sódio e contêm quantidades elevadas de K, Na, Mn, Mg, Zn e Ca, assim como teor de umidade e de pH elevados (Simão *et al.*, 2018). Entretanto, os altos teores de sódio podem levar à sodificação do solo. (GHEYI *et al.*, 2016).

Já os Grits são formados por areia, cascalho, calcário e impurezas residuais contendo CaO, Ca(OH)₂ e Na₂CO₃, é um resíduo rico em nitrogênio e cálcio. Vale ressaltar que os teores destes componentes nesse resíduo dependem do processo, variando em cada indústria (SIMÃO *et al.*, 2018).

O lodo primário, proveniente do tratamento primário realizado pela estação de tratamento de efluentes da indústria de celulose e papel, detém uma carga nutricional elevada, com altos teores de matéria orgânica, nitrogênio, fósforo, cálcio, magnésio, potássio e micronutrientes. Segundo Simão (2018), este lodo primário, após o tratamento, é encaminhado para destinação (em aterros sanitários), entretanto, sua composição pode contribuir na estrutura da fertilidade do solo (ASSENHEIMER, 2009).

A Figura 1 apresenta o fluxograma do processo e geração de resíduos e efluentes.

Figura 1 - Fluxograma do processo produtivo e geração de resíduos pela indústria de celulose e papel.



Fonte: Elaborado pela autora.

4. DIOXINAS E FURANOS

As dibenzo-p-dioxinas policloradas – PCDD (Dioxinas) – e os dibenzofuranos policlorados – PCDF (Furanos) – são compostos que permanecem adsorvidos fortemente às partículas do ar, solo e resíduos. Esses compostos são considerados altamente tóxicos, persistentes no ambiente (sua duração pode perdurar por anos ou décadas), voláteis em percorrer longas distâncias pela atmosfera e por recursos hídricos e com elevado potencial de bioacumulação nos organismos humano e animal (CANIZARES; ZINI, 2009).

Segundo o Anexo C do Decreto 5472, de 20 de junho de 2005 (BRASIL, 2005), em promulgação da Convenção de Estocolmo sobre Poluentes Orgânicos Persistentes, quanto à definição do termo dos compostos, as dioxinas e furanos são compostos aromáticos tricíclicos formados por dois anéis de benzeno ligados por dois átomos de oxigênio nas dioxinas e por um átomo de oxigênio e uma ligação de carbono-carbono nos furanos, cujos átomos de hidrogênio possam ser substituídos por até oito átomos de cloro.

Tais substâncias são formadas naturalmente no meio ambiente através de ocorrências como incêndios florestais e erupções vulcânicas. Já nos processos industriais, por ação humana, elas são formadas por processos de queima da indústria que envolvem matéria orgânica e cloro, ou por reações químicas, sendo destacada sua produção principalmente nos processos de branqueamento ou a partir da queima de cavacos nas caldeiras de biomassa, ficando depositadas nos resíduos provenientes dessa queima, como, nas cinzas de caldeiras animais (CANIZARES; ZINI, 2009).

Alguns estudos apontam também que o lodo das estações de tratamento dessas indústrias possui níveis de dioxinas e furanos, não sendo possível precisar sua exata emissão, tendo em vista que todos os processos da indústria realizam a utilização de água, que é encaminhada para a estação de tratamento (GOMES, 2023).

5. ORIGEM E EFEITOS

Dioxinas e furanos são compostos por átomos de cloro ligados a anéis benzênicos, que compõem um conjunto de 210 poluentes químicos congêneres, sendo 75 dioxinas e 135 furanos que possuem elevado grau de toxicidade, sendo os congêneres considerados mais tóxicos os de posição 2, 3, 7 e 8. A principal fonte de emissão destes compostos envolve a composição da madeira atrelada a processos de queima ou combustão em temperaturas elevadas. Estes acontecem na natureza através de queimadas em áreas florestais e por ação antrópica a partir de processos industriais como da indústria de celulose e papel, sendo que a emissão de organoclorados está atrelada à queima da matéria que contém átomos de cloro em sua composição (ASSUNÇÃO; PESQUERO, 1999 p. 4).

Sabe-se que as propriedades que envolvem esses compostos estão vinculadas à volatilidade em percorrer longas distâncias pela atmosfera, dificultando a identificação de sua geração, ao seu potencial de bioacumulação e biomagnificação, de forma direta ou indireta, sendo que as dioxinas e os furanos são resistentes à degradação e sua presença pode perdurar por anos, e mesmo décadas, até o estágio de degradação de sua composição se iniciar. Sua toxicidade está voltada aos efeitos provocados na biota e na cadeia alimentar e a tendência de acumulação em organismos (CANIZARES; ZINI, 2009).

A exposição e o acesso a estes componentes podem ocorrer por contato direto com solos e águas contaminadas ou a partir da contaminação indireta de solos (através da ingestão de alimentos de solos contaminados), recursos hídricos (através do consumo de peixes contaminados por acúmulo de dioxinas e furanos em sua gordura) e por emissões atmosféricas (pela aspiração de ar contaminado). Fatores como tempo de exposição e dose recebida devem ser destacados, tendo em vista que, quanto maior o tempo de exposição e/ou maior a dose recebida de componentes tóxicos, maior será o fator de ampliação de seus efeitos (US EPA, 2003).

Os efeitos da exposição a dioxinas e furanos sobre o risco à saúde humana envolve a toxicidade dérmica por acumulação nos tecidos, danos neurológicos, efeitos

carcinogênicos, supressão da imunidade e interferência nas funções metabólicas, reprodutivas e hormonais (CANIZARES; ZINI, 2009).

6. FATOR DE EQUIVALÊNCIA DE TOXICIDADE

Segundo Van Den Berg *et al.* (1998), para a avaliação de risco à saúde humana e biota, foi desenvolvido um sistema em que fosse possível estabelecer fatores de toxicidade com base em um dos congêneres de dioxinas e furanos considerado mais tóxicos (2,3,7,8 – TCDD). Em 1988, o Comitê de Desafios da Sociedade Moderna da Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN/CCMS) estabeleceu fatores de equivalência internacionais (I-TEF) com o objetivo de eliminar diferenças entre os valores empregados por diversos países, desenvolvendo um esquema de quantificação dos compostos e avaliação da toxicidade dessas substâncias para humanos/mamíferos e vida silvestre.

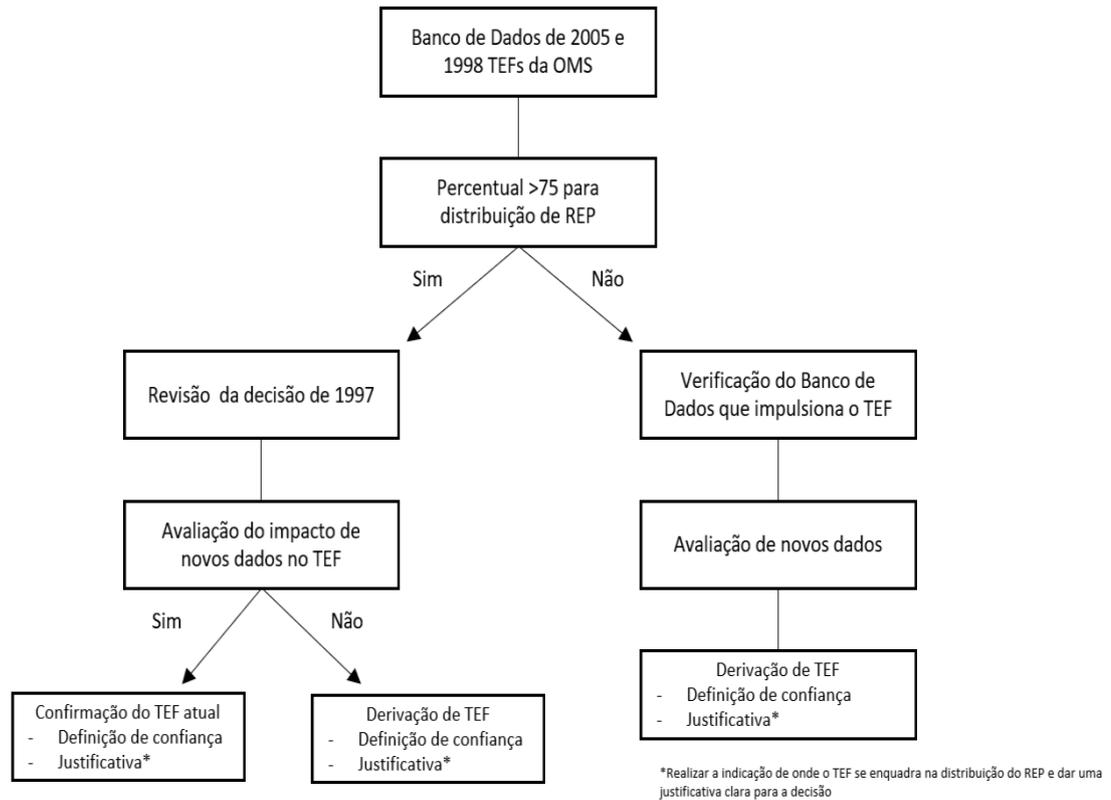
No ano de 1997 foi realizada uma reunião com especialistas em Estocolmo, com objetivo de aprovar fatores de equivalência de toxicidade para dioxinas (PCDD), furanos (PCDF) e Poluentes Orgânicos Persistentes (PCBs), para humanos, peixes e a vida selvagem. Esse sistema foi adotado pela Organização Mundial da Saúde (WHO), no qual foram estabelecidos os valores de TEF para 6 congêneres de dioxinas e 10 de furanos (I-TEFs) para humanos, peixes e aves (VAN DEN BERG *et al.*, 1998). Os estudos relacionam a utilização de um composto que demonstre uma relação estrutural com dioxinas e furanos quando ligadas ao AhR (Hidrocarboneto Arílico), provocando respostas bioquímicas e tóxicas. A partir deste processo também foi possível determinar o potencial de acumulação na cadeia alimentar. Em combinação com dados de resíduos químicos, foi possível calcular a TEQ (Toxicidade Equivalente), que utiliza a potência de efeito relativo (REP), que avalia os efeitos tóxicos individuais de dioxinas, furanos e policlorados, com intuito de referenciar a produção de efeitos tóxicos em geral em relação a um composto. Sendo assim, o TEQ é a somatória das concentrações tóxicas dos compostos, multiplicada pela TEF (VAN DEN BERG *et al.*, 1998).

Algumas incertezas foram levantadas, como a capacidade de resposta de algumas espécies e a harmonização de TEFs para mamíferos e TEFs para vida silvestre devido à ordem de magnitude de táxons em alguns compostos, não sendo possível comparar seus efeitos, já que o comparativo de TEF para mamíferos é realizado com base na dose recebida por ingestão, enquanto os TEFs para a vida silvestre são medidos a partir da concentração de resíduos nos tecidos e estudos em ovos (VAN DEN BERG *et al.*, 1998).

Ainda, no ano de 2005, durante uma reunião de especialistas realizada em Genebra e organizada pela Organização Mundial da Saúde, houve uma reavaliação do banco de dados de TEF, essa reavaliação foi atualizada ainda mantendo o modelo de TEF utilizado anteriormente, com incrementação de ordem de grandeza e identificação de novos compostos com risco de exposição avaliado futuramente (Figura 2). Houve destaque quanto à preocupação com a aplicação de TEF sobre o solo, ar, sedimentos e outros, tendo em vista que os estudos voltados ao esquema de TEF e metodologia TEQ envolvem a exposição humana por ingestão alimentar. Sendo assim, houve a determinação de que o cálculo de TEQ para matrizes como solo, ar, água e outras matrizes abióticas devem ser utilizados com equações específicas para cada congêneres, em vez da atual utilização sobre o TEQ total (VAN DEN BERG *et al.*, 2006).

O conceito de TEF ainda foi considerado como a melhor forma de avaliação de hidrocarbonetos aromáticos halogenados com propriedades semelhantes às dioxinas, sendo que, a partir do modelo TEF utilizado, é possível prever adequadamente a toxicidade de conjunto de congêneres por um equivalente tóxico (TEQ) dos compostos (VAN DEN BERG *et al.*, 2006).

Figura 2 – Adaptação de esquema de decisão usado na reavaliação da OMS em 2005 dos valores de TEF da OMS de 1998 atribuídos a congêneres individuais de PCDD, PCDF e PCBs



Fonte: Van Den Berg *et. al*, 2006.

A Tabela 1 apresenta um resumo dos valores de TEF definidos pela OMS nas reuniões ocorridas entre 1998 e 2005, apresentado por Van Den Berg *et al.* no ano de 2006.

Tabela 1 - Resumo dos valores de TEF da OMS de 1998 e OMS de 2005

Composto	OMS 1998 TEF	OMS 2005 TEF
dibenzodioxinas cloradas		
2,3,7,8-TCDD	1	1
1,2,3,7,8-PeCDD	1	1
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.1	0.1
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.1	0.1
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.1	0.1
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.01	0.01
OCDD	0.0001	0.0003
dibenzofuranos clorados		
2,3,7,8-TCDF	0.1	0.1
1,2,3,7,8-PeCDF	0.05	0.03
2,3,4,7,8-PeCDF	0.5	0.3
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.1	0.1
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.1	0.1
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.1	0.1
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.1	0.1
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.01	0.01
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.01	0.01
OCDF	0.0001	0.0003
PCBs não orto-substituídos		
3,3',4,4'-tetraCB (PCB 77)	0.0001	0.0001
3,4,4'5-tetraCB (PCB 81)	0.0001	0.0003
3,3',4,4',5-pentaCB (BCP 126)	0.1	0.1
3,3'4,4',5,5'-hexaCB (PCB 169)	0.01	0.03
PCBs mono-orto-substituídos		
2,3,3',4,4'-pentaCB (PCB 105)	0.0001	0.00003
2,3,4,4',5-pentaCB (PCB 114)	0.0005	0.00003
2,3',4,4',5-pentaCB (PCB 118)	0.0001	0.00003
2',3,4,4',5-pentaCB (PCB 123)	0.0001	0.00003
2,3,3',4,4',5-hexaCB (PCB 156)	0.0005	0.00003
2,3,3',4,4',5'-hexaCB (PCB 157)	0.0005	0.00003
2,3',4,4',5,5'-hexaCB (PCB 167)	0.00001	0.00003
2,3,3',4,4,5,5'-heptaCB (PCB 189)	0.0001	0.00003

Fonte: Adaptado de Van Den Berg *et al.*, 2006 p.12.

7. REGULAMENTAÇÃO INTERNACIONAL

7.1. O IMPORTANTE PAPEL DA CONVENÇÃO DE ESTOCOLMO

A preocupação internacional com o risco de exposição humana a componentes tóxicos, como dioxinas e furanos, possui um longo histórico envolvendo erros e acertos, em que o desenvolvimento econômico partidário ao desenvolvimento industrial não provocava preocupações vinculadas à perspectiva ambiental das atividades geradoras de impacto e poluição nas diferentes matrizes ambientais como solo, ar e água.

As primeiras informações sobre o uso de substâncias químicas policloradas surgiram no ano de 1886, e seu desenvolvimento e uso perduraram até a década de 1930, quando os efeitos de algumas substâncias já haviam sido detectados e banidos. Ainda assim, na década de 1940, produtos derivados de hexaclorociclohexano (HCH) e hexaclorobenzeno (HCB), compostos organoclorados e diversos outros compostos como DDT, Heptacloro, Clordecona, Endrin, como inseticidas, até Bifenilas Policloradas (PCBs), foram produzidos e utilizados na indústria e na agricultura. Essa produção e uso perdurou até a década de 1970, quando o uso das substâncias começou a ser efetivamente proibido devido ao reconhecimento de seus efeitos relacionados à saúde humana e biota, além de sua persistência no ambiente e seu potencial de biomagnificação. Na década de 1990 a proibição do uso e produção de substâncias químicas tóxicas, como DDT e outros compostos era ativa, desta vez por meio de regulamentações aplicadas em cada país (CETESB, s/d-a).

Em Estocolmo, na Suécia, no ano de 2001, ocorreu a Convenção de Estocolmo, formada por 183 países signatários, com o objetivo de restringir a utilização de tais substâncias, desencadeando uma atividade intensa internacionalmente, que culminou em 2004, na tomada de decisão sobre aspectos legais e técnicos. Todos em prol da extinção e/ou restrição relacionada à emissão desses compostos orgânicos persistentes (POPs) no ambiente, com reconhecimento ao risco de sua exposição.

É interessante destacar o artigo 5º da convenção, sobre a necessidade de redução e eliminação da produção não intencional de POPs, estabelecendo medidas e critérios

de eliminação das fontes de produção geradoras de dibenzo-p-dioxinas policloradas e dibenzofuranos policlorados (PCDD/PCDF), hexaclorobenzeno-(HCB) e bifenilas policloradas (PCB).

As dioxinas e furanos fazem parte do grupo de compostos descritos no Anexo C da Convenção de Estocolmo como compostos com produção não intencional por atividade antrópica, que necessitam de redução de liberação até sua completa eliminação.

Os compostos produzidos não intencionalmente, descritos no Anexo C da Convenção, são as dibenzo-p-dioxinas policloradas e dibenzofuranos (PCDF/PCDF), o hexaclorobenzeno (HCB), as bifenilas policloradas (PCBs) e o cloro nos processos de branqueamento. Estão listados na parte II entre as categorias das fontes de emissão que possuem um potencial de formação de substâncias.

8. REGULAMENTAÇÕES DAS EMISSÕES DE DIOXINAS E FURANOS

8.1. UNIÃO EUROPEIA

De acordo com o Regulamento n° 850/2004 sobre poluentes orgânicos persistentes, de 29 de Abril de 2004 (EC, 2004), em seu artigo n° 12, adotado pela União Europeia a fim de estipular o que foi estabelecido na Convenção de Estocolmo sobre o Protocolo POP (Poluentes Orgânicos persistentes) e a diminuição de emissões, foi estipulada a apresentação, pelos Estados Membros, de relatórios anuais envolvendo dados estatísticos de produção e comercialização de substâncias descritas em seu escopo que possuam níveis significativos de POPs. Foi estipulada também a apresentação a cada três anos de informações dos níveis de dioxinas e furanos lançadas no meio ambiente.

De acordo com a Diretiva° 2010/75/UE do Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia, de 24 de novembro de 2010, sobre emissões industriais (EU, 2010), estipularam-se valores de equivalência tóxica, com vistas a determinar concentrações totais permitidas para dioxinas e furanos em instalações de incineração e co-incineração de resíduos (Tabela 2).

No Anexo, na parte 3 item 1.4, estabelece-se o valor-limite de emissão média de 0,1 ng/Nm³ para as dioxinas e furanos, durante um período de amostragem mínimo de 6 horas e máximo de 8 horas. O valor limite de emissão refere-se à concentração total de dioxinas e furanos calculada de acordo com a parte 2.

Tabela 2 - Adaptação do Anexo VI – Disposições técnicas relacionadas com as instalações de incineração e co-incineração de resíduos: Parte 2 – Fatores de equivalência para dibenzo-p-dioxinas e dibenzofuranos.

	Fator de Equivalência Tóxica
2,3,7,8 - Tetraclorodibenzodioxina (TCDD)	1
1,2,3,7,8 - Pentaclorodibenzodioxina (PeCDD)	0,5
1,2,3,4,7,8 - Hexaclorodibenzodioxin (HxCDD)	0,1
1,2,3,6,7,8 - Hexaclorodibenzodioxina (HxCDD)	0,1
1,2,3,7,8,9 - Heptaclorodibenzodioxina (HxCDD)	0,1
1,2,3,4,6,7,8, - Heptaclorodibenzodioxina (HpCDD)	0,01
Octaclorodibenzodioxina (OCDD)	0,001
2,3,7,8 - Tetraclorodibenzofurano (TCDF)	0,1
2,3,4,7,8 - Pentaclorodibenzofurano (PeCDF)	0,5
1,2,3,7,8 - Pentaclorodibenzofurano (PeCDF)	0,05
1,2,3,4,7,8 - Hexaclorodibenzofurano (HxCDF)	0,1
1,2,3,6,7,8 - Hexaclorodibenzofurano (HxCDF)	0,1
1,2,3,7,8,9 - Hexaclorodibenzofurano (HxCDF)	0,1
2,3,4,6,7,8 - Hexaclorodibenzofurano (HxCDF)	0,1
1,2,3,4,6,7,8 - Heptaclorodibenzodioxina (HpCDF)	0,01
1,2,3,4,7,8,9 - Heptaclorodibenzodioxina (HpCDF)	0,01
Octaclorodibenzofurano (OCDF)	0,001

Fonte: Regulamento nº 850/2004 sobre poluentes orgânicos persistentes (EC, 2004).

Em 2019, o Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia, por meio do Regulamento 2019/1009 de 05 de junho de 2019 (EU, 2019), estabeleceu uma harmonização quanto à abertura ao mercado interno de fertilizantes provenientes de matérias inorgânicas e a necessidade de utilização de matérias recicladas ou orgânicas como fertilizantes. Tal iniciativa tem por intuito, além do desenvolvimento da economia circular, estabelecida pela Diretiva Europeia 2018/851 (EU, 2018), padronizando a utilização dos nutrientes e estimulando a União a fim de obter maior independência de produtos de outros países e também conter limites para metais e indicadores microbiológicos por categoria de fertilizante, além de limite de HPAs (somatória de 16) para composto.

8.2. ESTADOS UNIDOS

O Departamento de Recursos Naturais publicou no ano de 2013, por meio da Comissão de Conservação do Ar, um regulamento e plano de qualidade do ar, com Diretrizes de Emissão para Incineradores de lodo de esgoto existentes, estabelecendo limites de emissão para poluentes, incluindo a emissão de dioxinas e furanos (EPA [Environmental Protection Agency], 2013).

Os limites de emissão estão descritos na subseção (3) (C) da regra 10 CSR 10-6.191 e estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Limites de emissão de poluentes de acordo com a regra 10 CSR 10-6.191

Poluente	Unidade	Limite de Emissão para Incineradores MH (Peso Molecular)	Limites de Emissão para Incineradores FB (Leito Fluidizado)
Cd.....	mg/dscm @ 7% O ₂	0,095	0,0016
Co.....	ppmvd @ 7% O ₂	3,800	64
HCl.....	ppmvd @ 7% O ₂	1,2	0,51
Hg.....	mg/dscm@ 7% O ₂	0,28	0,037
Nox.....	ppmvd @ 7% O ₂	220	150
Pb.....	mg/dscm@ 7% O ₂	0,30	0,0074
PCDF/ PCDF, TEQ.....	ng/dscm@ 7% O ₂	0,32	0,1
PCDD/ PCDF, TMB.....	ng/dscm@ 7% O ₂	5,0	1,2
PM.....	mg/dscm@ 7% O ₂	80	18
SO ₂	ppmvd @ 7% O ₂	26	15

Fonte: Seção 111(D)/129 – Plano de Qualidade do ar para incineradores de lodo de esgoto no Missouri (EPA [Environmental Protection Agency], 2013).

O documento Dioxin Listing Rule foi promulgado em 14 de janeiro de 1985, e apresenta a listagem de resíduos que contêm níveis significativos de dioxinas e furanos, além de considerar os resíduos de qualquer instalação que utilize meios de combustão em temperaturas elevadas. Os resíduos listados necessitam fornecer um plano de gerenciamento de resíduos aceitável, conforme definido em 40 CFR 63.1201. Desse modo, para a unidade que realize a queima de alguns dos resíduos listados há a exigência de eficiência tecnológica de destruição e remoção do combustor de 99,9999% (EPA, 1985).

9. REGULAMENTAÇÕES PARA APLICAÇÃO NO SOLO DE DIOXINAS E FURANOS

9.1. CANADÁ

A Agência de Inspeção de Alimentos Canadenses - CFIA (Canadian Food Inspection Agency) é a responsável por regulamentar a segurança e a qualidade dos alimentos e da saúde animal e pública do Canadá.

O guia para apresentação de pedidos de registro segundo a Lei de Fertilizantes do Canadá (Guide to Submitting Applications for Registration under the Fertilizers Act), datado de junho de 2018 (CANADÁ, 2018), determina os padrões e diretrizes relacionados a compostos potencialmente contaminantes. Além disso, também indica as taxas de segurança associadas aos seus usos e a classificação para rotulagem dos produtos químicos de acordo a regulamentação.

Assim, os limites de utilização para produtos que possuam dioxinas e furanos envolvem a taxa de aplicação e adição cumulativa máxima desses compostos no solo, a depender da atividade envolvida. Os valores máximos aceitáveis de dioxinas e furanos no produto são calculados por uma equação que considera como máximo uma adição acumulativa 5,355 mg TEQ/ha, na camada de 0-20 cm para aplicações anuais considerando 45 anos de aplicação. Essa abordagem visa a contabilização da permanência dos compostos no ambiente ao longo dos anos e tem como base um valor máximo no solo de 2 ng TEQ/kg.

O Quadro 1 é uma adaptação da Tabela 3 de acordo com a Lei de Fertilizantes (CANADÁ, 2023), com a demonstração das concentrações máximas aceitáveis em diferentes taxas de aplicação.

Quadro 1 – Adaptação da Tabela 4 da Lei de Fertilizantes com exemplos de concentrações aceitáveis de dioxina/furano para produtos em diferentes taxas de aplicação

	Adições cumulativas máximas aceitáveis de PCDD/Fs ao solo ao longo de 45 anos (mg TEQ/ha)	Exemplos de concentração máxima aceitável de PCDD/Fs com base em taxas de aplicação anuais (ng TEQ/kg de produto) 4.400 kg/ha – ano	Exemplos de concentração máxima aceitável de PCDD/Fs com base em taxas de aplicação anuais (ng TEQ/kg de produto) 2.000 kg/ha – ano
PCDD/F	5.355	27	59,5

Fonte: Adaptado de T-4-93 – Normas de segurança para fertilizantes e suplementos – CFIA (2023).

Em 26 de outubro de 2020, entrou em vigor a alteração dos regulamentos de fertilizantes canadenses com a especificação de que as partes a serem regulamentadas (venda, importação ou exportação de fertilizantes e suplementos regulamentados pela lei) podem realizar o cumprimento tanto do regulamento anterior da Lei de Fertilizantes, quando do regulamento atual durante um período de três anos.

Quanto aos limites máximos permitidos para dioxinas e furanos neste novo regulamento (CANADÁ, 2005), foi mantido o cálculo da concentração máxima aceitável no produto, mas com a adição de uma nova concentração máxima aceitável de dioxinas e furanos no produto de 2,6775 ng TEQ/kg (Quadro 2).

Quadro 2 - Padrões de dioxinas e furanos

	Concentração máxima aceitável de PCDD/Fs em meio de cultivo sem instruções de uso (ng TEQ/kg de meio de cultivo)
PCDD/F	2,6775

Fonte: Adaptado de T-4-93 – Normas de segurança para fertilizantes e suplementos – CFIA (2023).

9.2. ITÁLIA

O Decreto n° 6665, de 14 maio de 2019 (ITÁLIA, 2019a), da região da Lombardia, Itália, é a atualização do artigo 41 do decreto legislativo n° 109, de 28 de setembro de 2019 (alterado pela lei de conversão n° 130, de 16 de novembro de 2018), e diz respeito às características que os lodos de estação de tratamento necessitam para utilização na agricultura na região. Esse decreto dispõe sobre os parâmetros, limites e métodos a serem utilizados para a análise dos lodos, e descreve as disposições relativas aos protocolos de caracterização e admissibilidade.

O decreto descreve os limites para dibenzodioxinas policloradas (PCDD), dibenzofuranos policlorados (PCDF), bifenilas policloradas (PCBs) e metais, destacando a necessidade de controle analítico anual e os limites descritos para PCDD e PCDF:

PCDD/PCDF + dl-PCB \leq 25 (ng WHO-TEQ/kg SS peso seco)

Em que PCDD representa as dibenzodioxinas policlorada, PCDF representa dibenzofuranos policlorados, dl-PCB representa bifenilas policloradas, menores ou iguais a 25 nanogramas, para toxicidade equivalente por quilo do teor de substância seca.

O Anexo I, Tabela A do decreto supracitado descreve os valores para os limites de concentração de lodos (lamas de alta qualidade e lamas adequadas) para utilização na agricultura (Quadro 3), enquanto a Tabela B, envolve a descrição pertinente ao protocolo de caracterização e admissibilidade dos compostos (Quadro 4).

Quadro 3 - Adaptação da Tabela A – Valores limite e concentrações que caracterizam lodo de alta qualidade e adequado para utilização na agricultura (em substituição à Tabela A do Anexo 1 do Decreto Legislativo 7076/2017).

Parâmetro	u. d. m.	Valor Limite	
		Lodo de alta qualidade	Lodo adequado
PCDD/PCDF + dl-PCB	ng WHO-TEQ/kg ss	≤ 25	
PCB (sete indicadores)	mg/kg ss	< 0,8	

Fonte: Decreto n° 6665, 14 de maio de 2019, Lombardia, Itália (ITÁLIA, 2019a).

Quadro 3 - Adaptação da Tabela B – Protocolo de caracterização e admissibilidade (substituindo a Tabela B do Anexo 1 do decreto legislativo 7076/2017).

FASE	FREQUENZA	PROVE	ALTRI DATI	RESPONSABILE	RISULTATO
CARATTERIZZAZIONE	Vedi Tabella A2.1 preliminarmente al ritiro presso l'impianto del rifiuto. In caso intervengano variazioni sostanziali nel processo di produzione del rifiuto (es. aumento degli A.E., modifiche impiantistiche).	Tabella 5.2 (PCDD/F + PCB Dioxine Like in almeno 2 campioni medi per impianti di depurazione con potenzialità ≥ di 100 000 AE)	Scheda di omologa contenente CER, ciclo produttivo, materie impiegate e produzioni attese	Produttore Responsabile commerciale	Stipula del Contratto o rinuncia
			Compatibilità con l'autorizzazione, compatibilità con i trattamenti applicati in impianto	Direttore Tecnico e/o Responsabile d'Impianto	
AMMISSIBILITÀ	Ad ogni conferimento		Controllo documentale (es. carico programmato, automezzo autorizzato, CER idoneo, compilazione FIR, ecc) controllo visivo		Conforme: scarico Non conforme: si respinge avvisando la Provincia e ARPA entro 24 ore
	Annualmente (depuratori ≤ 5.000 A.E.)	pH; carbonio organico; azoto totale; fosforo totale; potassio totale; metalli: Cu, Cr ^{tot} , Cr ^{VI} , Cd, Hg, Ni, Pb, Zn, As, Se, Be; idrocarburi (C10-C40) su s.s. ¹ ; Idrocarburi (C10-C40) sul t.q; residuo secco a 105°C e 600°C.		Direttore Tecnico e/o Responsabile d'Impianto	Conforme: prosecuzione conferimenti. Non conforme: riesame del contratto o sospensione dei conferimenti e/o respingimento del carico avvisando la Provincia e ARPA entro 24 ore
	Semestralmente (depuratori > 5.000 e < 100.000 A.E., altri rifiuti)	Oltre a quanto sopra: IPA; PCB; Toluene; AOX;			
	Trimestralmente (depuratori ≥ 100.000 A.E.)	DEHP; Nonilfenoli ² ;			
	Annualmente (depuratori ≥ 100.000 A.E.)	PCDD/F + PCB Dioxine Like			

Fonte: Decreto n° 6665, 14 de maio de 2019, Lombardia, Itália (ITÁLIA, 2019a).

No mesmo anexo a Tabela C contém os métodos sugeridos para a análise de lodos (Quadro 5. Esses métodos foram desenvolvidos e apresentados por organizações

como a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) e o Organismo Italiano de Normalizações.

Quadro 4 - Adaptação da Tabela C – Análise de Lodos (em substituição à Tabela C do Anexo 1 do decreto legislativo 7.076/2017)

Parâmetro	Método sugerido
Poluentes Orgânicos	
PCDD/F + dl-PCB	EPA 1613B / EPA 1668 C / UNI 11199 / UNI EN 16167***

*** é permitida a utilização apenas do triplo quadrupolo; o uso de detectores de DCE deve ser excluído.

Fonte: Decreto nº 6665, 14 de maio de 2019, Lombardia, Itália (ITÁLIA, 2019a).

EPA 1613B - Método 1613: desenvolvido pelo Escritório de Ciência e Tecnologia da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos para determinação específica de isômeros de dioxinas e furanos (US EPA, 1994).

EPA 1668 C – Método 1668: determina congêneres de bifenilas policloradas em amostras ambientais por diluição de isótopos e cromatografia gasosa de alta resolução (US EPA, 2010). Os métodos desenvolvidos pela USEPA envolvem o uso em águas residuais, águas superficiais, solo, sedimentos, biossólidos e matrizes de tecidos.

UNI 11199:2007: desenvolvido pela organização italiana de normatização, em que a referida norma realiza a descrição do método de determinação qualitativa e quantitativa de PCDD e PCDF em amostras de resíduos sólidos por espectrometria de massa de baixa resolução (ITÁLIA, 2007).

UNI EN 16167: determina níveis de bifenilas policloradas (PCBs) por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS) e cromatografia gasosa com detector de captura de elétrons (ITÁLIA, 2019b).

A periodicidade envolvendo as investigações e análises dos compostos é descrita no Apêndice 5 do mesmo decreto, com a determinação de avaliação analítica para os parâmetros de PCDF, PCDF + PCB com dioxina a cada seis meses.

9.3. ALEMANHA

A Portaria de 05 de dezembro de 2012 n° 2482, alterada pela Portaria de 2 de outubro de 2019 n° 1414 (ALEMANHA, 2019), é o regulamento que dispõe sobre a circulação de fertilizantes, aditivos de solo, meios de cultivo e aditivos para plantas no mercado.

Na Tabela 6 da Portaria são descritos os produtos provenientes de processos produtivos utilizados para determinados fertilizantes com as especificações de aplicação. O item 6.4.9. da referida portaria diz respeito às substâncias da indústria de produção de papel, como a cal proveniente da Linha de Fibras, para este resíduo, as especificações envolvem a informação de imobilização do nitrogênio, a não adição de precipitantes e biocidas, exceto a cal, já contemplada na composição.

A Tabela 7 da Portaria contempla as matérias primas permitidas como principal componente de aditivos de solos, fertilizantes ou substrato de cultivo. O item 7.3.19 desta descreve a produção de papel quanto às fibras provenientes do processamento de madeira e a lama de papel (lodo) do processo como materiais iniciais permitidos, com a especificação de utilização como aditivo de solo e meio de cultivo e com a informação de não adição de precipitantes e resíduos de papel, exceto a cal, e que nas instruções de uso adequado do produto a imobilização de nitrogênio deve ser destacada.

O Apêndice 2, Tabela 1, apresenta limites quanto aos poluentes no item 1.4.10. Para dioxinas e furanos + dl-PCB foi estabelecido o valor limite de 30 ngTEQ/kg, quando aplicado em áreas de pastagem e áreas de forragem com lavoura sem revolvimento após a aplicação para evitar a dispersão dos poluentes. Para áreas onde há cultivo de milho, o valor limite aplicável foi de 8 ngTEQ/kg (ALEMANHA, 2013).

Albuquerque (2019) reporta os estudos em solos florestais e áreas agrícolas que apontam níveis de dioxinas e furanos diferenciados dependendo do uso e das propriedades do solo. Em solos aráveis encontraram mediana de PCDD/F entre 0,5 e 1,1 ngTEQ WHO-05/kg e de dl-PCB entre 0,1 e 0,23 ngTEQ WHO-05/kg; e em solos campestres entre 0,6 e 3,6 ngTEQ WHO-05/kg para PCDD/F e 0,17 e 0,74 ng TEQ WHO -05/kg (para dl-PCB). Neste estudo, é identificado que os níveis de dioxinas e

furanos são mais elevados em solo arável quando comparado com solos de pastagem, esses teores podem variar devido ao revolvimento do solo e dispersão dos poluentes (ALBUQUERQUE, 2019 p.51).

O estudo em questão também identificou que, apesar de a Alemanha declarar em seu NIP (Número de Identificação Fiscal Alemã – Steuernummer) que não havia mais a produção de resíduos contendo PCBs, houve a identificação, por fontes desconhecidas, de níveis de dioxinas e furanos até o ano de 2013. Entretanto, com reconhecimento proveniente de peças de equipamentos eletrônicos como transformadores da década de 1980 em instalações de armazenamento subterrâneo, que foram entre os anos de 2004 a 2010 tratados e recuperados. Outros foram encaminhados para incineração, com destaque para a necessidade de maiores investigações para garantir a coerência de dados (ALEMANHA, 2013).

10. REGULAMENTAÇÃO BRASILEIRA

O Brasil é um dos países signatários da Convenção de Estocolmo, ratificada por meio do Decreto Legislativo nº 204, de maio de 2004 (BRASIL, 2004), e promulgada através do Decreto nº 5472, de junho de 2005 (BRASIL, 2005), reconhecendo os efeitos relativos à toxicidade de substâncias inseridas na listagem de POPs (Poluentes Orgânicos Persistentes) e a necessidade de medidas de controle, visando a total eliminação da geração ou a limitação total de seu uso ou produção. Esse decreto segue o Princípio da Precaução empregado pela Declaração do Rio sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento.

O Brasil possui um longo histórico de reconhecimento da necessidade de proteção ambiental, seguindo os princípios estabelecidos na Constituição de 1988 (BRASIL, 1988), em seu artigo 225, no que diz respeito ao direito de todos a um meio ambiente ecologicamente equilibrado. Seguindo também o que rege a Política Nacional de Resíduos Sólidos, sob a Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010), sobre a destinação final ambientalmente adequada, o que inclui todas as formas de reaproveitamento. Considerando seu artigo 17, inciso XI, item b, sobre a utilização de resíduos sólidos ou rejeitos como objeto de recuperação ambiental, e seu artigo 19, sobre o tratamento dos resíduos sólidos, os estados são os responsáveis pela regulamentação.

No estado de São Paulo, a CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) é a responsável pelo licenciamento das indústrias de celulose e papel, assim como sua regulamentação e constatação das conformidades e desconformidades ambientais previstas. Os resíduos sólidos gerados diretamente dos processos de fabricação de celulose e papel são geralmente classificados como de Classe IIA ou IIB, de acordo com a norma NBR 10.004/2004, da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, exceto as cinzas, que são resíduos Classe 1 – Perigosos (ABNT, 2004).

A resolução do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) nº 316, de 29 de outubro de 2002 (BRASIL, 2002), dispõe sobre procedimentos e critérios para o

funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos, que apresenta os critérios para o licenciamento e controle de emissão de poluentes, incluindo um limite máximo de emissão atmosférica para dioxinas e furanos, expresso em TEQ em 0,50 ng/Nm³. Os Fatores de Equivalência de Toxicidade (FTEQ) são apresentados no Anexo 1 e são os mesmos da Diretiva Europeia 2010/75/UE. Quanto aos efluentes gasosos, a máxima moderada é igual ao padrão de emissão especificado na Resolução SMA 79/2009 (BRASIL, 2009), que estabelece 0,1 ng TEQ/Nm³ (TEQ) corrigido para uma concentração de 11% de O₂.

A Decisão de Diretoria da CETESB n° 034/2015/I, de 10 de fevereiro de 2015 (CETESB, 2015), dispõe sobre as exigências técnicas pertinentes no processo de Avaliação de Risco à Saúde Humana na exposição a emissões atmosféricas de dioxinas e furanos (não intencionalmente) de Unidades de Recuperação de Energia (UREs). Essa Avaliação de Risco é premissa condicionada para a emissão de Licença Ambiental Prévia destes empreendimentos, considerando o risco de emissão e exposição dos compostos no ambiente de forma não intencional. Na Avaliação de Risco devem ser considerados fatores como a natureza e extensão da contaminação, a demografia, as rotas de exposição humana futura e os efeitos causados à saúde. A concentração máxima nos efluentes gasosos é a mesma especificada na Resolução SMA 79/2009 (BRASIL, 2009), ou seja, 0,1 ng TEQ/Nm³, corrigido para uma concentração de 11% de O₂.

A referida decisão esclarece ainda que, no Brasil, as estimativas das doses de entrada comparadas as doses toleráveis na atmosfera e em alimentos ainda não foi estabelecida, sendo assim, o país utiliza a maior média anual determinada nos Estados Unidos, que corresponde a $1,14 \times 10^{-8}$ µg TEQ/m³ (micrograma do fator de equivalência tóxica por metro cúbico). Também é recomendada a utilização dos dados da United States Food and Drug Administration (FDA) na ausência de dados de fundo da concentração de dioxinas e furanos nos alimentos ingeridos, correspondendo a 9,9 pg TEQ/kg/mês.

A concentração do pior caso de exposição é calculada pela soma do maior nível basal com a maior concentração modelada, considerando o receptor de risco mais sensível (12 a 14 anos), assim, é possível calcular a dose diária pela multiplicação do resultado

da somatória pelo volume de ar inalado que corresponde a 14m³/dia, dividido pelo peso do receptor (aproximadamente 50kg, valor este que pode variar). Para determinação da dose mensal inalada, deve-se multiplicar tal equação por 30. A dose mensal estabelecida pela OMS, de acordo a Decisão, é de 70pg TEQ/kg/mês.

A seguir é descrito o critério de determinação dos resultados da dose de exposição na atmosfera e na alimentação:

Os resultados da dose de exposição combinada do ar ambiente e da alimentação devem ser então comparados com a Dose Mensal Tolerável (TMI) do Comitê Conjunto de Especialistas (FAO/OMS) em Aditivos Alimentares (JECFA/FAO/WHO) de 70,0 pg TEQ/kg/mês expresso como 2,3,7,8 TCDD TEQ (Quociente de Toxicidade Equivalente). Esse valor garante proteção para efeitos carcinogênicos e não carcinogênicos. O Apêndice A mostra os valores das doses diárias toleráveis adotadas por diferentes instituições e países. Pode-se observar que embora esses valores variem entre 1 e 5 pg TEQ/kg/dia todos são da mesma ordem de grandeza e o valor sugerido pelo JECFA é plenamente satisfatório (2,3 pg TEQ/kg/dia ou 70 pg TEQ/kg/mês).

A Tabela 4 apresenta os dados de entrada para o cálculo da exposição, contidos no Apêndice B da mesma Decisão (CETESB, 2015).

**Tabela 4 – Adaptação do Apêndice B – Cálculo de Exposição CDD/CDF
(combinando exposição a ar, ambiente e alimentação)**

a) Concentração de máximo impacto(modelagem)	xxxxxpg/m ³
b) Concentração no ar (maior nível de fundo anual) (USNDAMN)	1,14 x10 ⁻² pg/m ³ (EUA)
c) Concentração total no ar (a+b)	xxxxxxpg/m ³
d) Taxa de inalação (adolescentes 12 a 14 anos)	14 m ³ /dia
e) Peso corpóreo	50 kg
f) Dose média diária (ar) (c*d/e)	xxpg/kg/dia
g) Dose média mensal(ar) (f*30)	xxpg/kg/mês
h) Dose mensal ingestão (alimentação USFDA)	9,9 pg/kg/mês
i) Dose mensal média total (inalação + ingestão) (g+h)	xxxpg/kg/mês
j) Dose Tolerável Mensal (OMS)	70pg/kg/mês

Observação

Se $i < \text{ou} = a, j$, os riscos adicionais são considerados aceitáveis.

Se $i > \text{que } j$, os riscos adicionais são inaceitáveis.

Fonte: Decisão de Diretoria CETESB nº 034/2015/I (CETESB, 2015).

Com base nos valores orientadores da Resolução CONAMA n° 420, de 28 de dezembro de 2009, e nos critérios estabelecidos pela CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo), por meio da Decisão de Diretoria n° 125/2021/E, para solo e águas subterrâneas (CETESB, 2021a), o valor de prevenção para solos no estado de São Paulo para dioxinas (PCDDs) e furanos (PCDFs) é de 2mg TEQ WHO₀₅ kg⁻¹. Quanto aos valores de intervenção, foram estabelecidos 7,5 ng TEQ WHO₀₅ kg⁻¹ para solos agrícolas, 37 ng TEQ WHO₀₅ kg⁻¹ para áreas residenciais e 140 ng TEQ WHO₀₅ kg⁻¹ para solos industriais.

A Decisão Diretoria da CETESB n° 126/2021/P, de 16 de dezembro de 2021 (CETESB, 2021b), estipulou os requisitos para aplicação de resíduos sólidos contendo dioxinas e furanos na agricultura. O método de determinação e cálculo de dioxinas e furanos em amostras de solo, estão descritos a seguir:

1. A análise deve ser efetuada em laboratório acreditado na Rede Brasileira de Laboratório de Ensaio (RBLE) e que apresente condições de ter Limites de Quantificação (LQ) compatíveis com os parâmetros de interesse.
2. As amostras devem ser analisadas por cromatografia gasosa acoplada a espectrômetro de massas de alta resolução (HRGC/HRMS) ou outra técnica analítica equivalente, que pratiquem LQ de no máximo 2 ng TEQ WHO₀₅/kg peso seco, calculado pela soma dos LQ de cada um dos 17 congêneres de dioxinas e furanos convertidos em toxicidade equivalente (TEQ) a partir dos fatores de equivalência de toxicidade (TEFs-WHO 2005). Nos casos em que o efeito de matriz causar interferência impossibilitando atingir o LQ máximo estabelecido, o laboratório deverá evidenciar esta ocorrência e justificá-la tecnicamente.
3. Deverá ser reportado para cada amostra individual, o LQ de cada congênere de dioxinas e furanos.
4. Cada substância possui um grau de toxicidade que por meio do Fator de Toxicidade Equivalente permite calcular a toxicidade total.
Dessa forma, os resultados das concentrações de dioxinas e furanos nas amostras de solo, resíduos individuais e mistura de resíduos deverão ser expressos, em ng TEQ WHO₀₅/kg, pela somatória dos resultados, em base seca, de cada um dos 17 congêneres de dioxinas e furanos multiplicados pelos respectivos fatores de toxicidade equivalente da Organização Mundial da Saúde (TEFs - WHO 2005), observando que:
 - a. Caso os resultados obtidos indiquem algum valor de concentração do congênere abaixo do LQ do método, deverão ser utilizados dois critérios para o cálculo do somatório equivalente total: 1º critério - deverá ser considerado o valor zero como a concentração do congênere abaixo do LQ; e 2º critério - deverá ser considerado o valor de LQ/2 como a concentração do congênere abaixo do LQ. As duas somatórias deverão ser apresentadas para a CETESB, bem como os resultados de todos os congêneres;
 - b. Caso o somatório equivalente total obtido em qualquer uma das amostras de solo ou mistura, empregando-se o 2º critério de cálculo (resultado do congênere = LQ/2), for superior ao respectivo limite máximo estabelecido neste Procedimento Técnico, e o valor obtido por meio do 1º critério (resultado do congênere = 0) for inferior a este, deverá ser realizada nova caracterização do solo e/ou mistura, sendo avaliados eventuais interferentes

nas análises. Nesta nova caracterização deverá ser utilizado somente o 2º critério para o cálculo do somatório total equivalente.

- C. Caso os resultados dos somatórios sejam superiores aos limites máximos estabelecidos neste procedimento para o solo e para os resíduos, a aplicação destes no solo não será permitida.

Fonte: Decisão de Diretoria 126/2021/P (CETESB, 2021 p.10).

O artigo 7º da Convenção de Estocolmo estabelece a responsabilidade de elaboração de Planos Nacionais de Implementação da Convenção, com a identificação de prazos, estratégias de cumprimento das obrigações pelos países signatários.

O Brasil, como signatário e cumpridor, elaborou o Plano Nacional de Implementação (NIP) da Convenção. Dentro dele foram elaborados diversos planos de ação, sendo um deles o plano de ação para a redução progressiva das liberações de Poluentes Orgânicos Persistentes de formação não intencional, abordado neste estudo. Nesse plano o objetivo é a redução progressiva das liberações não intencionais desses poluentes a partir do desenvolvimento de melhores tecnologias e práticas ambientais, avaliadas por meio dos inventários de fontes de emissão e da eficácia das legislações e políticas no gerenciamento dessas fontes. O plano visa a elaboração e implementação do plano de ação e sua revisão a cada 5 anos para apresentação à COP (MMA, 2015a).

O Quadro 6 apresenta adaptação do inventário de fontes realizado no ano de 2008 dentro do Plano de Ação sendo que, quanto às liberações totais de dioxinas e furanos, as indústrias de celulose e papel ocupam a décima posição, com 63,8 g-TEQ (MMA, 2015a, p.114).

Quadro 5 - Adaptação da Tabela 12 – Classificação geral das liberações totais, segundo inventário de 2008.

Posição	Grupo segundo Toolkit 2012	Fonte	Total g-TEQ	%	% Acumulada
5	6	Incêndios e queima de resíduos, acidentais ou não	172,5	7,72	60,69
6	2	Produção de Alumínio	151,8	6,79	67,48
7	9	Esgoto e tratamento de esgoto	104,5	4,68	72,15
8	1	Incineração de resíduos de serviços de saúde	76,3	3,41	75,56
9	9	Chorume de aterros	65,7	2,94	78,5
10	7	Produção de celulose e papel	63,8	2,85	81,35
11	9	Compostagem	53,1	2,38	83,73
12	7	Indústria têxtil	52,1	2,33	86,06

Fonte: Plano de Ação para Redução Progressiva das Liberações de Poluentes Orgânicos Persistentes de formação não intencional. MMA (2015a).

Quanto às emissões de dioxinas e furanos na atmosfera, as indústrias de celulose e papel ocupam a vigésima posição, com 2,4 g-TEQ/ano, a partir das caldeiras de biomassa. Com relação às emissões de resíduos, a indústria ocupa a oitava posição, com 14,4 g-TEQ/ano em lodos e biomassa ou casca. Sobre a emissão dos compostos no produto, esta ocupa a quarta posição, com 36,9 g-TEQ/ano, proveniente do processo Kraft. Já em relação à emissão nas águas, a indústria de papel e celulose ocupa a primeira posição, 10,1 g-TEQ/ano, sendo a maior fonte de dioxinas e furanos em recursos hídricos, tendo em vista que as maiores indústrias emissoras são as utilizadoras de cloro nos processos de branqueamento. Substância que, a partir da aplicação de melhores tecnologias disponíveis e melhores práticas ambientais para o setor de celulose e papel em seus processos, começou a ser extinta, no ano de 2008. Atualmente as indústrias optam pela substituição do uso do cloro pelo hidróxido de cloro, com menor possibilidade de emissão dos compostos (MMA, 2015a).

11. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando a economia circular, estabelecida pela Diretiva Europeia 2018/851 em alteração da Diretiva 2008/98, envolvendo seus objetivos de proteção à saúde humana e de utilização racional de recursos naturais, em uma de suas diversas medidas aplicadas a uma nova utilização aos resíduos e na transformação e classificação, caso comprovada a eficiência, em um subproduto a ser comercializado. É necessário compartilhar as tratativas regulamentares de outros países, sua conduta e implementação, objetivando a avaliação de potencial de aplicação de medidas no Brasil, sob seus aspectos ecossistêmicos, visando a busca pela melhoria contínua, o desenvolvimento da regulamentação nacional baseado na emissão das substâncias na atualidade e aplicação sob o desenvolvimento de melhores tecnologias de uso sustentável disponíveis.

A indústria de celulose e papel exerce um importante papel na economia do país, com um elevado desenvolvimento no setor florestal, tendo em vista que o Brasil é o maior fornecedor mundial de celulose em que muitos de seus resíduos gerados são reutilizados na própria matriz de seus processos, destacando principalmente sua aplicação à recuperação energética a partir de componentes químicos dos processos da linha de fibras. Apesar de suas intensas contribuições, é necessário destacar seu potencial poluidor, pela necessária utilização de recursos hídricos em seus processos e a presença de compostos tóxicos considerados persistentes em seus resíduos, como dioxinas e furanos.

As dioxinas e furanos, são poluentes orgânicos persistentes, por esta razão foram estabelecidas regras (internacionais e nacionais) visando sua diminuição. Tendo em vista serem prejudiciais à saúde humana e à biota, e seus efeitos de bioacumulação e biomagnificação no ecossistema. Devido às suas características de transporte global, via atmosfera, há ocorrência de poluição difusa.

A aplicação dos estudos de determinação do fator de toxicidade equivalente dos compostos, desenvolvidos e apresentados por Van Den Berg *et al.* (2006), e seu estabelecimento sobre a Convenção de Estocolmo, possibilitou exercer a

obrigatoriedade de controle internacional de fontes emissoras de dioxinas e furanos, bem como a aplicação de Planos Nacionais de Implementação de medidas de diminuição, até a eliminação de poluentes orgânicos persistentes no ambiente. O Brasil, como país signatário da convenção, realizou a implementação e aplicação dessas medidas em sua regulamentação (em que os níveis limite são baseados na lei de fertilizantes canadense) e na elaboração de planos de ação para a redução progressiva de emissão dos poluentes no ambiente.

É importante destacar a necessidade, no Brasil, de estudos voltados à avaliação das melhores dosagens para utilização de resíduos em solo, a fim de evitar contaminação ou acúmulo das substâncias de forma prejudicial. Além de melhorias para redução da emissão de compostos tóxicos e sua possibilidade de substituição por substância menos tóxicas, assim como o desenvolvimento de tecnologias limpas com intuito de aplicação de novos usos aos resíduos gerados pelas indústrias de papel e celulose.

REFERÊNCIAS

ABNT [Associação Brasileira de Normas Técnicas]. **ABNT NBR 10.004**: Resíduos Sólidos - Classificação. São Paulo: Normas, 2004. 71 p. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/170/nbr10004-residuos-solidos-classificacao>. Acesso em: 03 jun. 2023.

ALBUQUERQUE, Giovanni Garcia Saboia de. **Diagnóstico Ambiental Relativo a Dioxinas e Furanos em Resíduos Sólidos e Efluentes de Estações de Tratamento de Efluentes de Fábricas de Celulose e Papel no Brasil**. 2019. 126 f. Tese (Doutorado) - Curso de Química, Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/212961/001114250.pdf?sequence=1>. Acesso em 16 ago. 2023

ALEMANHA. **Düngemittelverordnung vom 5. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2482), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 2. Oktober 2019 (BGBl. I S. 1414) geändert worden ist**. 2012. Disponível em: https://www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/BJNR248200012.html. Acesso em: 16 ago. 2023.

ALEMANHA. **Typische Gehalte von Dioxinen und dl-PCB in Böden**. Umweltbundesamt 2013. Disponível em: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/dokumente/uterman_n_-_dioxine_-_dl-pcb_in_boeden_2013-10-28_-_final.pdf. Acesso em: 16 ago. 2023.

ALVES, Érica Daré *et al.* Estudo do processo de obtenção celulose Kraft com ênfase no forno de cal. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 16, n. 26, 12 jun. 2015, p. 101-220. Disponível em: <http://191.232.52.91/index.php/revista/article/view/368/244>. Acesso em: 01 ago. 2023.

ASSENHEIMER, Adriane. Benefícios do uso de bioresíduos como substratos na produção de mudas de espécies florestais. **Ambiência: Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais**, Guarapuava, v. 5, n. 2, 06 ago. 2009, p. 321-330. Disponível em: <https://revistas.unicentro.br/index.php/ambiencia/article/viewFile/345/pdf>. Acesso em: 03 jun. 2022.

ASSUNÇÃO, João V de; PESQUERO, Célia R. Dioxinas e furanos: origens e riscos. **Revista de Saúde Pública**, [S.L.], v. 33, n. 5, out. 1999, p. 523-530. Fap UNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0034-89101999000500014>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rsp/a/FXYCDpBbW7PPfZ7DGz9V77K/>. Acesso em: 20 ago. 2023.

BAJPAI, Pratima. **Biotechnology for Pulp and Paper Processing**. 2. ed. Índia: Springer Singapura, 2018. 588 p. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-10-7853-8>. Acesso em: 20 ago. 2023.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**, 1988. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/ConstituicaoCompilado.htm. Acesso em: 03 jun. 2023.

BRASIL. **Resolução Conama nº 316, de 29 de outubro de 2002**. Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. Brasília, 20 nov. 2002. Disponível em: <http://conama.mma.gov.br>. Acesso em: 03 jun. 2023.

BRASIL. **Decreto Legislativo nº 204, de 07 de maio de 2004**. Aprova o texto da Convenção de Estocolmo sobre Poluentes Orgânicos Persistentes, adotada, naquela cidade, em 22 de maio de 2001. Brasília, DF, 08 mai 2004 Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decleg/2004/decretolegislativo-204-7-maio-2004-532161-convencao-14138-pl.html>. Acesso em: 03 jun. 2023.

BRASIL. **Decreto nº 5472, de 20 de junho de 2005**. Promulga o texto da Convenção de Estocolmo sobre Poluentes Orgânicos Persistentes, adotada, naquela cidade, em 22 de maio de 2001. Brasília, 21 jun. 2005. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/estruturas/smcq_seguranca/_arquivos/conveno_de_estocolmo_pops.pdf. Acesso em: 03 jun. 2023.

BRASIL. **Resolução SMA nº 079, de 04 de novembro de 2009**. Estabelece diretrizes e condições para a operação e o licenciamento da atividade de tratamento térmico de resíduos sólidos em Usinas de Recuperação de Energia – URE. São Paulo, 2009. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/proclima/wp-content/uploads/sites/36/2014/08/2009_res_est_sma_79.pdf. Acesso em: 03 jun. 2023.

BRASIL. **Resolução Conama nº 420, de 28 de dezembro de 2009**. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Brasília, 30 dez. 2009. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2017/09/resolucao-conama-420-2009-gerenciamento-de-acr.pdf>. Acesso em: 03 jun. 2023.

BRASIL. **Lei nº 12305, de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, 03 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 03 jun. 2023.

CANADÁ. **Dioxins And Furans**. Government of Canada, 2005. Disponível em: https://www.canada.ca/content/dam/hc-sc/migration/hc-sc/hl-vs/alt_formats/pacrb-dgapcr/pdf/iyh-vsv/viron/dioxin-eng.pdf. Acesso em: 16 ago. 2023.

CANADÁ. **New Regulations: Guide to Submitting Applications for Registration under the Fertilizers Act**. Government of Canada. Junho de 2018. Disponível em: <https://inspection.canada.ca/plant-health/fertilizers/fertilizer-or-supplement->

registration/new-regulations-guide/eng/1601391948941/1601392244498_ Acesso em: 16 ago. 2023.

CANADÁ. **Safety standards for fertilizers and supplements T-4-93**. Government of Canada. 2023. Disponível em: <https://inspection.canada.ca/plant-health/fertilizers/trade-memoranda/t-4-93/eng/1305611387327/1305611547479>. Acesso em: 16 ago. 2023.

CANIZARES, Ewelín M.P.N.; ZINI, Cláudia Alcaraz. A Convenção de Estocolmo e a indústria da celulose e papel – Parte I. **Revista O Papel**, [s. l.], v. 51, n. 70, abr. 2009, p. 51-63. Disponível em: http://revistaopapel.org.br/noticia-anexos/1358960186_e2b2e6d660628fc7cecdca885f31887a_2068749376.pdf. Acesso em: 08 jul. 2023.

CETESB [Companhia Ambiental do Estado de São Paulo]. **Implementação da Convenção de Estocolmo no Brasil**, s/d-a. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/centroregional/a-convencao/implementacao-da-convencao-de-estocolmo-no-brasil/>. Acesso em: 06 mar. 2023.

CETESB [Companhia Ambiental do Estado de São Paulo]. **Convenção de Estocolmo – A Convenção**, s/d-b. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/centroregional/a-convencao/>. Acesso em: 06 mar. 2023.

CETESB [Companhia Ambiental do Estado de São Paulo]. **Decisão de Diretoria CETESB nº 256, de 22 de novembro de 2006**. Dispõe sobre a aprovação dos “Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo – 2016” e dá outras providências. São Paulo, 2006. Disponível em: <https://www.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2014/12/DD-256-2016-E-Valores-Orientadores-Dioxinas-e-Furanos-2016-Intranet.pdf>. Acesso em: 03 jun. 2023.

CETESB [Companhia Ambiental do Estado de São Paulo]. **Decisão de Diretoria CETESB nº 125, de 09 de dezembro de 2021**. Dispõe sobre a Aprovação da Atualização da Lista de Valores Orientadores para Solo e Água Subterrânea. São Paulo, 2021a. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2021/12/DD-125-2021-E-Atualizacao-dos-Valores-Orientadores-paa-solo-e-aguas-subterraneas.pdf>. Acesso em: 03 jun. 2023.

CETESB [Companhia Ambiental do Estado de São Paulo]. **Decisão de Diretoria CETESB nº 126, de 16 de dezembro de 2021**. Estabelece o Procedimento Técnico para a aplicação de resíduos gerados nas usinas de produção de etanol e açúcar e para o licenciamento de pátios de mistura de resíduos. São Paulo, 2021b. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2021/12/DD-126-2021-P-Procedimento-Tecnico-para-aplicacao-reiduos-gerados-usinas-deetanol.pdf>. Acesso em: 03 jun. 2023.

CETESB [Companhia Ambiental do Estado de São Paulo]. **Decisão de Diretoria CETESB nº 034, de 10 de fevereiro de 2015**. Dispõe sobre exigência técnica para Avaliação de Risco à Saúde Humana por exposição a emissões atmosféricas não intencionais de Dioxinas e Furanos que condiciona a emissão de Licença Ambiental Prévia de Unidades de Recuperação de Energia (UREs). São Paulo, 2015.

Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2014/12/DD-034-2015.pdf>. Acesso em: 03 jun. 2023.

CETESB [Companhia Ambiental do Estado de São Paulo]. **Ficha de Informação Toxicológica: Dioxinas e Furanos**. São Paulo: Divisão de Toxicologia Humana e Saúde Ambiental, 2022. 3 p. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2022/02/Dioxinas-e-furanos.pdf>. Acesso em: 03 jun. 2022.

COLODETTE, Jorge Luiz; GOMES, Fernando José Borges. **Branqueamento de Polpa Celulósica: da produção da polpa marrom ao produto acabado**. Viçosa: Ufv, 2015. 816 p.

DIRETORIA DE NORMAS E PADRÕES AMBIENTAIS. **NT 18**: Nota Técnica sobre Tecnologia de Controle Fabricação de Celulose (Kraft) e Papel. São Paulo: CETESB, 1990. 50 p. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/wp-content/uploads/sites/33/2019/02/G1-Nota-t%C3%A9cnica-Papel-Celulose.pdf>. Acesso em: 03 jun. 2023.

EC [European Commission]. **Regulation (EC) nº 850, de 2004**. Report From The Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brussels, 2004. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52022SC0291>. Acesso em: 16 ago. 2023.

EPA [Environmental Protection Agency], **Section 111(D)/129 State Plan for sewage sludge incinerations in Missouri, 2013**. Disponível em: <https://www.regulations.gov/document/EPA-R07-OAR-2015-0543-0003>. Acesso em: 16 ago. 2023.

EPA [Environmental Protection Agency], **Regulation 50 FR. Dioxin Listing Rule**. January, 1985. Disponível em: <https://semspub.epa.gov/work/11/174546.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2023.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]; IEA [International Energy Agency]; IBA [Indústria Brasileira de Árvores]; FAO [Food and Agriculture Organization of the United Nation]. **A indústria de papel e celulose no Brasil e no mundo: panorama geral**. Brasil: Ministério de Minas e Energia, 2021. 23 slides, color. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-650/Pulp%20and%20paper_EPE+IEA_Português_2022_01_25_IBA.pdf. Acesso em: 01 jun. 2022.

EU [European Union] **Directiva nº 2010/75/UE, de 2010**. Of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions. 17 dez. 2010. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0075&from=EN>. Acesso em: 16 ago. 2023.

EU [European Union] **Directive (EU) 2018/851 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018** amending Directive 2008/98/EC on waste (Text with

EEA relevance). Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0851&from=EN>. Acesso em: 16 ago. 2023.

EU [European Union] **Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019** laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products and amending Regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009 and repealing Regulation (EC) No 2003/2003 (Text with EEA relevance). Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32019R1009>. Acesso em: 16 ago. 2023.

FOELKEL, Celso. Parte 03: Lodos & Lodos. **Resíduos Sólidos Industriais do Processo de Fabricação de Celulose e Papel de Eucalipto**. Brasil: Eucalyptus Online Book, 2010. p. 1-191. Disponível em: https://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT20_LODOS.pdf. Acesso em: 01 jun. 2022.

GHEYI, Hans Raj; DIAS, Nildo da Silva; LACERDA, Claudivan Feitosa de; GOMES FILHO, Enéas. **Manejo da salinidade na agricultura: estudo básico e aplicados**. 2. ed. Fortaleza: Byte Systems - Soluções Digitais, 2016. 530 p. Disponível em: <https://ppgea.ufc.br/wp-content/uploads/2018/04/manejo-da-salinidade-na-agricultura.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2023.

GOMES, Fernando J. B. **Apostila do Curso de Tecnologia da Produção de Celulose**. ABCTC - Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. São Paulo, 2023.

IBA [Instituto Brasileiro de Árvores]. **Relatório Anual 2022 IBA**. Café Art, 2022. 96 p. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2022.

ITÁLIA. **11199. Caratterizzazione dei rifiuti - Determinazione di policlorodibenzo-p- diossine (PCDD) e policlorodibenzofurani (PCDF) in rifiuti solidi**. UNI, 2007. Disponível em: <https://store.uni.com/uni-11199-2007>. Acesso em: 16 ago. 2023.

ITÁLIA. **Decreto n° 6665, 14 de maio de 2019**. Ricognizione dei limiti di concentrazione caratterizzanti i fanghi di depurazione idonei per l' utilizzo in agricoltura, a seguito delle nuove disposizioni normative nazionali di cui alla legge 16 novembre 2018, n. 130 "conversione in legge, con modificazioni, del decreto- legge 28 settembre 2018, n. 109, recante disposizioni urgenti per la città' di genova, la sicurezza della rete nazionale delle infrastrutture e dei trasporti, gli eventi sismici del 2016 e 2017, il lavoro e le altre emergenze". Lombardia, 2019a. Disponível em: https://www.regione.lombardia.it/wps/wcm/connect/19df87f4-0ac9-4fac-b171-084e37a5bc51/D.d.u.o.+6665_2019.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=19df87f4-0ac9-4fac-b171-084e37a5bc51. Acesso em: 16 ago. 2023.

ITÁLIA. **16167. Fanghi, rifiuti organici trattati e suolo - Determinazione di policlorobifenili (PCB) mediante gascromatografia accoppiata a spettrometria di massa (GC-MS) e gascromatografia con rivelatore a cattura di elettroni (GC-**

ECD). UNI, 2019b. Disponível em: <https://store.uni.com/uni-en-16167-2019>. Acesso em: 16 ago. 2023.

MAEDA, Shizuo *et al.* **Uso de resíduos da fabricação de celulose e papel e da reciclagem de papel**. Colombo: Embrapa Florestas, 2010. 50 p. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/5599>. Acesso em: 03 jun. 2023.

MMA [Ministério do Meio Ambiente]. **Convenção de Estocolmo sobre Poluentes Orgânicos Persistentes**. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/seguranca-quimica/convencao-de-estocolmo.html>. Acesso em: 03 jun. 2023.

MMA [Ministério do Meio Ambiente]. **Inventário Nacional de fontes e estimativa de emissões de dioxinas e furanos: Brasil POPs: Plano Nacional de Implementação Convenção de Estocolmo**. Brasília: MMA, 2013. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/seguranca-quimica/convencao-de-estocolmo/plano-nacional-de-implementa%C3%A7%C3%A3o.html>. Acesso em: 09/07/2023.

MMA [Ministério do Meio Ambiente]. **Plano Nacional de Implementação - Convenção de Estocolmo**. Brasília, 2015a. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/seguranca-quimica/convencao-de-estocolmo/plano-nacional-de-implementa%C3%A7%C3%A3o.html>. Acesso em: 03 jun. 2023.

MMA [Ministério do Meio Ambiente]. **Plano de Ação para a redução progressiva das liberações de Poluentes Orgânicos Persistentes de formação não intencional (u-POPs)**. Brasília, 2015b. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/images/arquivo/80037/Convencao%20de%20Estocolmo/Plano%20de%20Acao/Plano_ao%20intencional_prof%20assuncao_impressao_6_8_2015%20-%20finalissimos.pdf. Acesso em: 03 jun. 2023.

SIMÃO, L.; HOTZA, D.; RAUPP-PEREIRA, F.; LABRINCHA, J. A.; MONTEDO, O. R. K. Wastes from pulp and paper mills - a review of generation and recycling alternatives. *Cerâmica*, [S.L.], v. 64, n. 371, set. 2018, p. 443-453. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132018643712414>.

US EPA [United States Environmental Protection Agency] **METHOD 1613, REVISION B: Tetra- through Octa-Chlorinated Dioxins and Furans by Isotope Dilution HRGC/HRMS**. Washington: EPA, 1994. Disponível em: https://well-labs.com/docs/epa_method_1613b_1994.pdf. Acesso em: 16 ago. 2023.

US EPA [United States Environmental Protection Agency] (NC). **Exposure Analysis for Dioxins, Dibenzofurans, and Coplanar Polychlorinated Biphenyls in Sewage Sludge**. Washington: Center For Environmental Analysis, 2003. 549 p. Disponível em: <https://www.epa.gov/biosolids/exposure-analysis-dioxins-dibenzofurans-and-coplanar-polychlorinated-biphenyls-sewage>. Acesso em: 03 jun. 2023.

US EPA [United States Environmental Protection Agency]. **METHOD 1668C, Chlorinated Biphenyl Congeners in Water, Soil, Sediment, Biosolids, and Tissue by HRGC/HRMS**. Washington: EPA, 2010. Disponível em:

https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/method_1668c_2010.pdf. Acesso em: 16 ago. 2023.

VAN DEN BERG, Martin, *et al.* Toxic equivalency factors (TEFs) for PCBs, PCDDs, PCDFs for humans and wildlife. **Environmental Health Perspectives**, [S.L.], v. 106, n. 12, dez. 1998, p. 775-792. Environmental Health Perspectives. <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.98106775>. Disponível em: <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/epdf/10.1289/ehp.98106775>. Acesso em: 23 jul. 2023.

VAN DEN BERG, Martin, *et al.* The 2005 World Health Organization Reevaluation of Human and Mammalian Toxic Equivalency Factors for Dioxins and Dioxin-Like Compounds. **Toxicological Sciences**, [S.L.], v. 93, n. 2, 7 jul. 2006, p. 223-241. Oxford University Press (OUP). <http://dx.doi.org/10.1093/toxsci/kfl055>. Disponível em: <https://academic.oup.com/toxsci/article/93/2/223/1707690?login=false>. Acesso em: 23 jul. 2023.

VERGARA, Gabriel Pena. **Caracterização e Avaliação do Potencial Energéticos dos Resíduos Florestais da Indústria de Papel e Celulose**. 2014. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Área Térmica e Fluidos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014. Cap. 2. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/296874446.pdf>. Acesso em: 03 jul. 2023.

WOLFF, Eliane. **O uso do lodo de estação de tratamento de água e resíduos da indústria de celulose (dregs, grits e lama de cal) na produção de cerâmica vermelha**. 2008. 188 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/ENGD-7LTQ6D>. Acesso em: 03 jun. 2022.

XIA, Kexue *et al.* Mechanistic aspects of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans (PCDD/Fs) formation from chlorine bleaching of non-wood pulp. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], v. 386, p. 121652, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121652>.

ZINI, Claudia Alcaraz. **LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO DE DIRETIVAS AMBIENTAIS PARA DIOXINAS E FURANOS EM RESÍDUOS SÓLIDOS DE FÁBRICAS DE CELULOSE E PAPEL**: relatório resumo do projeto de pesquisa. 2020. 20 f. Tese (Doutorado) - Curso de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020. Acesso em: 03 jun. 2022.