

11 Métodos de valorização de resíduos de podas e aparas

Tallita Eduarda da Veiga Reis
Ednilson Viana
Antonio Oswaldo Storel Júnior
Wanda Maria Risso Günther

INTRODUÇÃO

Os resíduos de podas e aparas de vegetação arbórea são originários de atividades públicas e privadas, institucionais, domésticas, comerciais, industriais, agrícolas e, principalmente, urbanas. São classificados como resíduos orgânicos por apresentarem biodegradabilidade espontânea e por reciclarem seus nutrientes em processos naturais de decomposição. Por ser abundante nos centros urbanos, ter pouca contaminação com outros tipos de resíduos e apresentar relação carbono/nitrogênio elevada, esse tipo de resíduo pode ser transformado em ampla gama de produtos e matérias-primas úteis, possuindo elevado potencial de valorização por meio de diversas tecnologias.

Valorizar esses resíduos desviando-os dos aterros pode ser fundamental para a reciclagem biológica de nutrientes e de matéria orgânica nos entornos das cidades com vistas a regenerar a fertilidade natural, ampliar a retenção de água pelo solo, produzir alimentos e sequestrar carbono atmosférico. A valorização da biomassa e a recuperação energética podem

mitigar emissões, em especial de metano, enquanto esta última ainda contribui para substituir fontes de energia não renováveis. No entanto, na atualidade, as podas e as aparas possuem baixo índice de aproveitamento e têm como principal destino os aterros sanitários ou aterros de inertes, quando o município dispõe dessas estruturas. Em muitos casos são dispostos em aterros controlados ou mesmo em disposição a céu aberto (lixões), quando não são simplesmente acumulados em deposições irregulares para lenta degradação, causando impactos ambientais, econômicos e à saúde da população exposta.

Assim, torna-se relevante conhecer e desenvolver métodos de valorização apropriados aos grandes volumes gerados e às diversas fontes de geração no meio urbano. Neste capítulo, a valorização dos resíduos de podas e aparas é entendida como um processo que implica em algum pré-processamento do resíduo, como, por exemplo, segregação de outros tipos de resíduos na própria origem, segregação por diâmetro ou características morfológicas e trituração. Por esse motivo o resíduo também receberá o nome de *biomassa residual*, ou apenas *biomassa*, que, do ponto de vista energético, pode ser definida como “qualquer recurso renovável oriundo de matéria orgânica, de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizado para produção de energia” (GBIO, 2022).

O resíduo de podas e aparas é composto por uma mistura heterogênea de espécies arbóreas, arbustivas e gramíneas com diversos estados fitossanitários. Na origem varia tanto em composição química como em volume, umidade e densidade aparente, contendo desde aparas de gramíneas, folhagens verdes e secas, flores e sementes, gravetos, cascas de árvores, galhos finos e grossos, troncos e raízes. No caso de remoções de árvores, troncos e raízes podem ter vários metros de diâmetro, dificultando essa operação. Sua geração está associada a serviços públicos municipais e privados de manutenção da vegetação arbórea e arbustiva, tanto no viário urbano, praças e logradouros, como em parques, bosques, áreas verdes e jardins. Além disso, companhias distribuidoras de energia elétrica, empresas de jardinagem e limpeza de terrenos, instituições públicas e privadas que possuem grandes áreas verdes ou ajardinadas e centrais de abastecimento de alimentos que geram grandes quantidades de aparas de gramíneas utilizadas para acomodar frutas no transporte, também representam fontes relevantes de geração desse tipo de resíduo (CORTEZ, 2011).

A geração apresenta sazonalidade, grande heterogeneidade na composição, dispersão geográfica e picos de geração, devido a períodos de ocorrência de ventos fortes com solos saturados após vários dias de chuva.

Ventos fortes nessas ocasiões podem abalar a sustentação de indivíduos arbóreos e gerar quedas de árvores, troncos e galhos grossos, causando até o desenraizamento. No ambiente urbano, as equipes de frentes de poda e remoção de árvores podem ter que operar rapidamente em algumas situações críticas. Pode haver vítimas, edifícios e veículos danificados e interferências com o tráfego, rede elétrica, de comunicação ou de abastecimento de água e coleta de esgotos. Nessas situações, os resíduos de podas e aparas podem se misturar com outros resíduos como terra, resíduos de construção civil, resíduos de desastres e outros, dificultando ou impedindo seu pré-processamento por trituração e seu posterior aproveitamento.

O gerenciamento desses resíduos envolve, geralmente, o trabalho de equipes treinadas e tecnicamente supervisionadas, dotadas de equipamento para elevação (escadas e guindastes com cestos, guindastes com garras), motosserras e caminhões com ou sem trituradores de galhos acoplados. A logística envolve a coleta, o transporte e a destinação a aterros sanitários, onde são dispostos juntamente com os resíduos sólidos urbanos da coleta indiferenciada, ou a aterros específicos, como os aterros de inertes, sendo que pequena fração é utilizada como matéria seca estruturante em projetos municipais de pátios de compostagem (BRASIL, 2019a; SÃO PAULO, 2014).

Quando deixados em locais de acumulação, mesmo que transitariamente, esses resíduos propiciam abrigo e funcionam como criadouros para fauna sinantrópica nociva, vetores de doenças à população exposta e outros animais. Porém, quando dispostos em aterros, devido principalmente à composição, produzem gás metano e gás carbônico, que ao serem lançados na atmosfera representam grande quantidade de gases do efeito estufa (GEE), além de aumentar os riscos de combustão e acidentes (MEIRA, 2010). Em grande volume, ou em peças únicas de maior tamanho como troncos e raízes de árvores, podem ainda criar espaços vazios nas células dos aterros sanitários ao final de seu lento processo de degradação e, associados à má drenagem de líquidos e gases, contribuir para rupturas e deslizamentos da massa de resíduos (ABPL, 2019).

No município de São Paulo, os resíduos dispostos em aterros sanitários são responsáveis pela emissão de 4% de todos os GEE do município (CENEVIVA; PEDÓ, 2020). Esse resíduo ocupa grande volume e possui degradação mais lenta, quando comparada aos demais resíduos orgânicos, o que diminui a vida útil dos aterros, aumentando os custos de manutenção, os impactos no solo e os riscos associados às interações químicas e biológicas com outros resíduos perigosos preexistentes no local (CORTEZ et al., 2008).

Por outro lado, a Lei Federal 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), ao estabelecer que somente os rejeitos sejam encaminhados à disposição final em aterros sanitários, ao mesmo tempo em que define *rejeito* como resíduos que somente “depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada”, proibiu o envio de resíduos recicláveis e compostáveis aos aterros sanitários. Entre esses últimos estão os resíduos de podas e aparas, pois como mostrado nesse capítulo, há variados processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis para esse tipo de resíduo (BRASIL, 2010).

Os resíduos de podas e aparas são compostos principalmente de celulose, hemicelulose e lignina em estruturas com aproximadamente 44% de oxigênio, 50% de carbono, 6% de hidrogênio e até 1% de nitrogênio (LOPES; MARTINS; MIRANDA, 2019; NEVES, 2018). Essa alta relação carbono/nitrogênio, relacionada aos elevados índices de lignina, torna este tipo de resíduo ideal para uso em processo de compostagem aeróbia-termodifícica como estruturante em mistura com resíduos putrescíveis como restos de comida e lodos de esgotos (GALVÃO, 2019) e em potencial fonte energética em processos termoquímicos, apresentando aproximadamente 19 MJ/Kg de poder calorífico inferior, além de possuir baixa temperatura de ignição, baixa energia de ativação e elevada taxa de combustão (NEVES, 2018; SILVA, 2016).

Apesar das propriedades destacadas, esse tipo de resíduo não é explorado por nenhuma atividade industrial e está desarticulado de cadeias econômicas relevantes, frustrando as expectativas de realização dos princípios da Economia Circular (ELLEN MCCARTHUR FOUNDATION, 2020; MORI et al., 2016) e dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS). As podas e as aparas de arborização urbana poderiam ser reaproveitadas consideravelmente em pelo menos cinco diferentes setores econômicos (SOUZA, GUIMARÃES; VELASCO, 2020), como apresentados a seguir:

Construção civil: fabricação de produtos de madeira como cabos de ferramentas e painéis, uso do pó de serra como agregado para confecção de blocos de concreto e como compósitos celulósicos na fabricação de materiais de construção.

Agricultura, paisagismo e recuperação ambiental: no processo de compostagem e uso como fertilizante orgânico composto, como remediador de áreas contaminadas, como serragem em cama de aves, cobertura

morta para proteção de solos ou biocarvão (biochar) para condicionamento de solos.

Energia: produção de biocombustíveis sólidos para energia térmica e elétrica, bioetanol por meio de hidrólise ácida e fermentação de açúcares e por meio da gaseificação da madeira.

Decoração e design: a partir da confecção de artigos esportivos, pedagógicos, brinquedos, artigos domésticos (pequenos objetos de madeira), obras de arte e mobiliário.

Indústria química: produção de resinas plásticas, colas e essências a partir da extração de óleos e resinas da serragem.

De um modo geral, mesmo o aproveitamento a partir de processos físicos simples, como a trituração na origem, já proporciona benefícios tanto ambientais quanto econômicos, e abre possibilidades maiores de valorização por processos de relevância ambiental e econômica (SOUZA et al., 2020; SOUZA; GUIMARÃES; VELASCO, 2020).

Neste capítulo, o foco é apresentar as políticas e instrumentos de gestão municipal dos resíduos de podas e aparas, assim como o potencial de diversas tecnologias de valorização. Está dirigido para aqueles setores e métodos que podem ter maior relevância econômica e ambiental diante das enormes escalas demandadas para valorização desse tipo de resíduo.

INSTRUMENTOS DE GESTÃO MUNICIPAL

Neste manuscrito, a apresentação da legislação vigente, assim como a apresentação dos programas e metas relacionados aos resíduos de podas e aparas, que discorrem sobre mecanismos de gestão, destinação e aproveitamento dos mesmos, terá como recorte o município de São Paulo.

No entanto, em prelúdio, é importante destacar que há grande carência de dados e informações inerentes. Em âmbito estadual, por exemplo, esses resíduos sequer são incluídos nas estimativas de geração como parte do Plano Estadual de Resíduos Sólidos, estando os dados sempre agregados (SÃO PAULO, 2020d). No âmbito do município de São Paulo, as ações estão espalhadas por diversos órgãos e secretarias que administram diferentes contratos de serviços relacionados aos resíduos de podas e aparas sem que existam instrumentos de coordenação e articulação, sendo difícil o levantamento de informações e dados sobre o tema.

Estrutura Organizacional da Gestão Municipal de Resíduos de Podas e Aparas

A responsabilidade pela gestão dos resíduos de podas e aparas no município de São Paulo está dividida por diferentes órgãos e secretarias, o que configura uma estrutura organizacional complexa e não contribui para prover ações integradas. Até 2021 a Autoridade Municipal de Limpeza Urbana (AMLURB) geria tanto os contratos de Concessão de Limpeza Pública (resíduos domésticos, chamados “divisíveis”) como os contratos de Varrição (resíduos públicos, chamados “indivisíveis”). A SPRegula é uma agência reguladora que, em 2021, sucedeu a AMLURB como órgão regulamentador responsável pela gestão dos resíduos sólidos e pela limpeza urbana da cidade de São Paulo. O órgão garante a gestão dos resíduos sólidos urbanos por meio da coleta regular municipal, na qual são recolhidos resíduos domiciliares, comuns e recicláveis, assim como de pequenos geradores comerciais. Apesar de suceder a AMLURB, a SPRegula gere apenas os contratos de Concessão. Nos contratos de Concessão estão previstos a implantação de Usinas de Compostagem de grande porte (300 t/dia de capacidade) para resíduos sólidos orgânicos domésticos (ROD) (incluindo podas e aparas de pequenos geradores), os quais deverão ser coletados seletivamente com segregação desde a origem. A compostagem dos ROD úmidos putrescíveis necessitará de grandes volumes de resíduos estruturantes ricos em carbono, tais como, os resíduos de podas e aparas.

Com a extinção da AMLURB em 2021, a Secretaria Municipal de Subprefeituras (SMS) passou a ser a gestora dos resíduos públicos da limpeza urbana (contratos de Varrição) por meio da Secretaria Executiva de Limpeza Urbana (SELIMP), responsável pela limpeza de vias e logradouros públicos que contempla os serviços de varrição, coleta, lavagem e retirada de entulhos e objetos volumosos abandonados, assim como os programas de ecopontos e de pátios de compostagem. Na mesma SMS, mas por meio de outro departamento, a Assessoria Técnica de Obras e Serviços (ATOS), são geridos os contratos de serviços de poda e jardinagem de resíduos públicos. Dessa forma, é a primeira vez (a partir de 2021) que os contratos de serviços de podas e jardinagem e os de resíduos de feiras-livres (incluídos como de Varrição) são geridos pela mesma secretaria, apesar de serem departamentos diferentes.

Por outro lado, cabe à Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente (SVMA), por meio do Departamento de Parques e Áreas Verdes (DEPAVE), a administração dos contratos de plantio de mudas de árvores

e serviços de poda e jardinagem em Parques, Áreas Verdes e Unidades de Conservação no município (SÃO PAULO, 2021a).

Enquanto instrumentos de gestão, uma série de planos setoriais, tais como, o Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, o Plano Municipal de Conservação e Recuperação da Mata Atlântica, o Plano Municipal de Arborização Urbana e o Plano de Ação Climática foram congregados pelo Plano Diretor Estratégico do município de São Paulo, aprovado em 2014, que também incorporou outros planos setoriais já existentes. Nos planos e programas apresentados a seguir estão previstas diretrizes e/ou metas relacionadas à gestão dos resíduos de podas e aparas.

Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PGIRS-2014)

O Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PGIRS) é o principal instrumento de planejamento e gestão, no âmbito municipal, da aplicação das prerrogativas da PNRS, cujas diretrizes estão fundamentadas na hierarquia de resíduos, a qual envolve a seguinte ordem de prioridade de ações: i) não geração; ii) redução; iii) reutilização; iv) reciclagem; v) tratamento dos resíduos sólidos; e vi) disposição em aterros sanitários apenas dos rejeitos (BRASIL, 2010). O plano de cada município visa atender também ao Novo Marco Regulatório do Saneamento Básico, à Política Nacional sobre Mudanças Climáticas e à Política Nacional de Educação Ambiental, no que couber.

O Plano do município de São Paulo de 2014 previa que a organização da gestão integrada dos resíduos sólidos, no âmbito do município, estivesse sob a responsabilidade da Autoridade Municipal de Limpeza Urbana (AMLURB) que, no entanto, foi extinta em 2021 e sucedida pela SPRegula. Essa organização é estabelecida por meio de uma pluralidade de novas rotas tecnológicas de manejo, novas instalações de destinação e fomentos a iniciativas privadas para empreendimentos alinhados às diretrizes e metas estabelecidas no PGIRS (SÃO PAULO, 2014).

Como parte das novas rotas estudadas, a segregação dos resíduos de podas e aparas nas fontes geradoras e o incentivo à valorização por meio de processos biológicos, prioritariamente descentralizados e aeróbios (como a compostagem *in situ*), podem servir de métodos de retenção do resíduo no local de origem e a consequente minimização dos impactos do transporte. Essas soluções serão complementadas por Centrais de Processamento Aeróbio, Centrais de Biodigestão (anaeróbia) e Ecoparques de Tratamento Mecânico-biológico para a parte recalcitrante da coleta indiferenciada. Além disso, o estabelecimento de revisões do plano, de forma participativa

e a cada cinco anos, e de indicadores de desempenho para esses serviços públicos, permitem o conhecimento e o acompanhamento das características de geração e de manejo desses resíduos (SÃO PAULO, 2014).

Programa de Aproveitamento de Madeira de Poda de Árvores (PAMPA-2008)

Instituído pela Lei Municipal N° 14.723 de maio de 2008, o Programa de Aproveitamento de Madeira de Poda de Árvores (PAMPA) tem por objetivo gerar benefícios econômicos e ambientais e contribuir para o aumento da vida útil dos aterros sanitários, ou seja, desviar resíduos da disposição no solo e inseri-los na Economia Circular. Logo, essa lei proíbe a destinação de resíduos de podas e aparas para aterros sanitários e prevê a implementação de condutas de aproveitamento e valorização por meio de: i) utilização da madeira como combustível em fornos e olarias; ii) recuperação como matéria-prima para a confecção de utensílios em geral; e iii) utilização de folhas e galhos na produção de composto orgânico, em processos de compostagem (SÃO PAULO, 2008a).

Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil e Resíduos Volumosos (2008)

Instituído pela Lei Municipal N° 14.803 de junho de 2008, o Plano Integrado de Gerenciamento dos Resíduos da Construção Civil e Resíduos Volumosos tem por objetivo assegurar que a gestão desses resíduos atenda às diretrizes da Resolução CONAMA n° 307 de julho de 2002 (SÃO PAULO, 2008b), que disciplina práticas e ações dos geradores e transportadores e o fluxo dos agentes envolvidos na gestão destes resíduos, no âmbito do Sistema de Limpeza Urbana do Município de São Paulo (Lei Municipal N° 13.478 de dezembro de 2002).

Plano Municipal de Conservação e Recuperação da Mata Atlântica (PMMA-2017)

O Plano Municipal da Mata Atlântica (PMMA) do Município de São Paulo, instituído pelo artigo 38 da Lei da Mata Atlântica (Lei Federal 11.428/2006) e incorporado ao novo Plano Diretor Estratégico (PDE) do Município de São Paulo, Lei 16.050, de 31 de julho de 2014, em seu Art. 287, visa à recuperação da vegetação nativa e da biodiversidade da Mata Atlântica (SÃO PAULO, 2017).

Plano Municipal de Arborização Urbana (PMAU-2020)

O Plano Municipal de Arborização Urbana (PMAU-2020) é um instrumento para definir o planejamento, a implantação e o manejo da arborização urbana no Município e propõe a universalização, amparada por critérios técnicos da arborização para todas as áreas e pessoas do município (SÃO PAULO, 2020b). O PMAU-2020 também atualizou o Manual de Arborização Urbana e o Manual Técnico de Poda de Árvores do município de São Paulo.

Lei da Poda

A Lei Municipal 17.267/2020 (SÃO PAULO, 2020a) denominada de *Lei da Poda*, resultante de propostas surgidas durante a elaboração do PMAU-2020, veio permitir que os cidadãos contratassem empresas para realização de podas ou remoção de árvores que estão em suas residências. Antes, somente técnicos da Prefeitura podiam realizar esse serviço, mediante solicitação prévia do interessado, com prazos longos desde o pedido até a efetivação do serviço. A partir dessa flexibilização, mediante apresentação de Laudo Agrônomico e Autorização da Subprefeitura, a operação pode ser realizada por empresas contratadas que assumem a responsabilidade pela destinação adequada dos resíduos gerados, retirando da municipalidade esse encargo.

Programa de Metas da Gestão Municipal - 2021-2024 (2021)

No Programa de Metas da Gestão Municipal para o período vigente, de 2021 a 2024, a *Meta 69* prevê reduzir em 600 mil toneladas a quantidade de resíduos sólidos enviados aos aterros no mesmo período, prevendo ações que venham a contribuir com essa meta, como: implantar 40 novos Ecopontos e 3.000 novos PEVs; implantar 3 novos pátios de compostagem para atingir 600 feiras-livres; ampliar os projetos de compostagem doméstica e buscar novas tecnologias para destinação adequada dos resíduos sólidos urbanos (SÃO PAULO, 2021b).

PlanClimaSP 2020-2050 (2021)

O Plano de Ação Climática do Município de São Paulo (SÃO PAULO, 2021a) para o período de 2020-2050 traz metas direcionadas aos resíduos em tela, para serem alcançadas até 2030, como: diminuir em 50% a destinação de resíduos sólidos recicláveis aos aterros sanitários; universalizar os processos de compostagem de resíduos orgânicos de feiras e poda municipal no Município de São Paulo; e aumentar a capacidade total do conjunto dos pátios de compostagem para 100 mil toneladas por ano.

PRÁTICAS E AÇÕES DE GESTÃO MUNICIPAL

Apesar do envio dos resíduos de podas e aparas a aterros estar proibido desde 2008 pela Lei Municipal do PAMPA e, desde 2010, pela Lei Federal da PNRS, diante dos enormes volumes gerados no município de São Paulo as práticas e ações de desvio desses resíduos e de encaminhamento dos mesmos para algum processo de valorização tem avançado lentamente.

O município de São Paulo conta com 32 Subprefeituras que administram os 96 distritos municipais. Há grande disparidade na geração de resíduos de podas e aparas entre as subprefeituras, como reflexo das condições de urbanização, tipologia de construções e arborização urbana, assim como da idade e condições sanitárias dos indivíduos arbóreos ou da existência de elementos verdes no paisagismo. Em 2016, por exemplo, o município gerou um total de 18.400 t de resíduos de podas e aparas que foram quase que integralmente destinados a aterros. A Subprefeitura de Santo Amaro gerou a menor quantidade desses resíduos (35,87 t), enquanto Pinheiros (766,03 t) produziu o maior contingente (SÃO PAULO, 2020b). A Figura 1 mostra a estimativa dos resíduos de podas e aparas encaminhados a aterros sanitários no município de São Paulo no período recente, cujo montante anual ultrapassa as 23.000 toneladas.

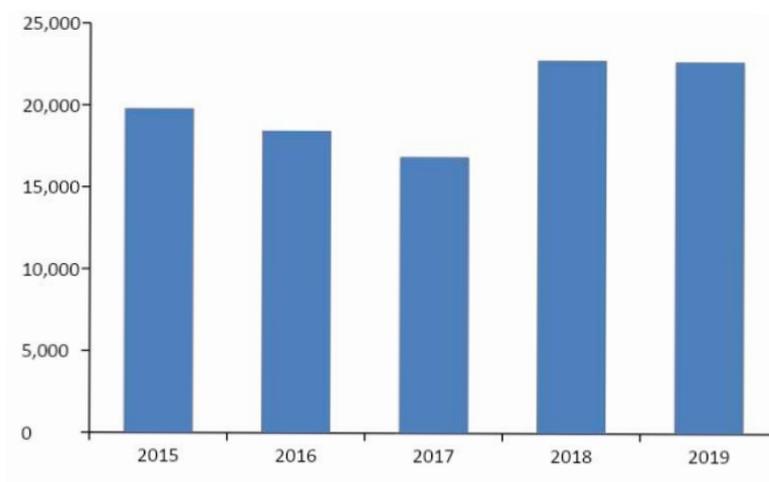


Figura 1 - Estimativa dos resíduos de manejo arbóreo encaminhados a aterros sanitários, no município de São Paulo, 2015 a 2019

Fonte: São Paulo (2020b)

Nota-se que durante os anos de 2015 a 2017 houve leve tendência de queda e elevação nos anos de 2018 e 2019. Os dados do Sistema de Controle de Resíduos Sólidos Urbanos (SISCOR), apurados pela AMLURB, registram as pesagens dos caminhões identificados com serviços de poda e jardinagem contratados pela municipalidade e enviados para o aterro de inertes CDR-Pedreira. Esses dados, portanto, excluem outras fontes de geração desse tipo de resíduos como as podas e aparas de pequenos geradores encaminhados para a coleta regular que também são encaminhados para aterros sanitários ou, quando acima de 200 L/dia e até 1m³, para Ecopontos, cujo destino são os aterros de inertes. Entre junho de 2015 e junho de 2018, estima-se que o Pátio de Compostagem da Subprefeitura da Lapa processou 2.642 t de resíduos orgânicos de feiras-livres e de podas e aparas e que tenha desviado 660,5 t de podas e aparas para a compostagem (GALVÃO, 2019).

Considerando-se que *Ecopontos* são locais específicos de descarte gratuito de resíduos sólidos, implantados pelo município, com a finalidade de fornecer um local para ampliar o alcance da segregação na fonte e coleta seletiva, assim como para evitar o descarte inadequado de resíduos no território municipal, esses estão adaptados para receber os resíduos de podas e aparas, assim como da construção civil e outros resíduos volumosos e recicláveis. Os *Ecopontos* municipais dispõem de caçambas específicas para receber resíduos de podas e aparas de grama de munícipes com um volume de até 1m³/dia, sem custo algum ao usuário. Em 2013, existiam apenas 51 *Ecopontos*, em 2016, já eram 109. Em 2019 os 121 *Ecopontos* existentes receberam 447.700 toneladas de resíduos sólidos. Os *Ecopontos* são serviços incluídos nos contratos de varrição.

Em 2014, visando estimular a prática da segregação de resíduos orgânicos no domicílio e a compostagem caseira, foi implementado o Projeto Composta São Paulo, com distribuição gratuita de 2.006 vermicomposteiras, com uma média de fornecimento de uma vermicomposteira para cada 2 mil domicílios. A distribuição teve por base um extenso questionário com os participantes que constituíram amostra significativa das diversas regiões e estratos sociais da população do município. O projeto, além de incentivar essa prática e dar uma alternativa factível para o próprio gerador, fortaleceu o engajamento autônomo do cidadão com relação à compostagem domiciliar e condominial. Como exemplo, nota-se que a comunidade do Composta São Paulo no Facebook tem 14.000 membros.

Explorando a complementaridade técnica para a compostagem entre os resíduos de podas e aparas (ricos em carbono) e os resíduos orgânicos originários de feiras livres municipais (ricos em nitrogênio), o Projeto Feiras & Jardins Sustentáveis implantou cinco pátios de compostagem distribuí-

dos pela cidade. Ao todo, esses pátios têm capacidade de recebimento de até 15,6 mil t/ano, com processamento de até 4.700 t/ano de resíduos de podas e aparas. O composto produzido ao final do processo, em torno de 15 t/dia, é utilizado como adubo orgânico em jardins e praças públicas e doado a agricultores cadastrados, como também à população (SÃO PAULO, 2021b).

Os resíduos de podas e aparas em parques e áreas verdes geridos pela SVMA-DEPAVE são encaminhados quase na totalidade aos aterros de resíduos. Os novos contratos de manejo de árvores adotados em 2018 excluíram a obrigatoriedade do triturador pelas empresas contratadas, estimulando que encaminhem o material diretamente aos aterros sanitários. Em 34 dos 108 parques existentes há alguma forma de compostagem, mas apenas em caráter educativo, sem impacto efetivo no desvio de resíduos dos aterros.

Por outro lado, a geração de informações sobre os resíduos de podas e aparas ainda é precária. Algumas bases de dados poderiam ser criadas e integradas às já existentes, no sentido de suprir esta lacuna. Por exemplo, apenas 16% dos indivíduos arbóreos identificados em mapeamento, presentes no viário urbano (sem contar indivíduos internos a parques e áreas verdes), foram cadastrados no sistema de gestão da arborização urbana (SISGAU) e, por problemas técnicos entre plataformas, apenas 4% desses dados foram inseridos na plataforma aberta Geosampa. Em abril de 2019, a Prefeitura criou o sistema informatizado de cadastro eletrônico de coleta e transporte para destinação final de resíduos de grandes geradores (CRT-E RGG) do município, com três categorias: i) Grandes geradores de RGG; ii) Transportadoras de RGG; e iii) Destino final e ATT (Área de Transbordo e Triagem) de RGG. Essas ações, quando completadas, permitirão maior controle da informação de destinação de resíduos de grandes geradores, mas ainda não há registro dos resíduos de podas e aparas encaminhados diretamente aos aterros por grandes geradores, o que dificulta o diagnóstico, a avaliação da situação e o planejamento de ações futuras.

MÉTODOS DE VALORIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE PODAS E APARAS

A busca bibliográfica por “resíduos de poda”, “pruning waste” e “resíduos de podas e aparas” nas bases de dados Google Acadêmico, PubMed, ScienceDirect e Agência USP de Gestão da Informação Acadêmica apresenta artigos específicos desde a década de 1960. No entanto, é possí-

vel observar aumento considerável de publicações a partir de 2015, com a temática voltada à valorização desses resíduos. Sendo assim, o recorte temporal do levantamento efetuado para esse capítulo considera artigos publicados no período de 2008 a 2022, com exceção do trabalho de Brito (1990).

Como resultado, foi encontrado que os principais métodos utilizados para valorização de resíduos de podas e aparas podem ser classificados em processos físicos, bioquímicos e termoquímicos (SANTOS et al., 2016), conforme descritos a seguir.

Valorização por processos físicos

Os processos físicos de valorização de resíduos correspondem aos métodos de adensamento da biomassa por meio de trituração, peletização e briquetagem (CORTEZ, 2011). Mesmo em grandes volumes, as podas e aparas apresentam baixa densidade e alto teor de umidade. Essas condições dificultam sua utilização em processos de valorização nas escalas necessárias. A trituração realizada nas frentes de serviço de podas e jardinagem e demais locais de geração, acoplada a caminhões basculantes, pode resultar em grande vantagem logística: a capacidade de transporte do material triturado equivale a 27 vezes o número de viagens necessárias, quando utilizado veículos convencionais e sem trituração (ENEL, 2022). Por outro lado, constitui processo essencial preparatório, tanto para a briquetagem e peletização como para os processos bioquímicos ou termoquímicos. A heterogeneidade da biomassa de variadas espécies vegetais com diferentes condições fitossanitárias e já parcialmente degradadas não constitui nenhum empecilho à valorização pela compostagem, que nada mais é que uma degradação natural controlada.

No entanto, para conversão da biomassa termoquimicamente, justifica-se a realização de algum processo físico, justamente devido à heterogeneidade e características físicas das podas e aparas que podem reduzir sua eficiência de conversão (PRADHAN; MAHAJANI; ARORA, 2018). A briquetagem e peletização são usadas como método de elevação da densidade, diminuição da umidade e aumento do teor energético de resíduos de podas e aparas para posterior conversão por processos termoquímicos. Tais práticas aumentam a eficiência energética em cerca de 75%, assim como reduzem a emissão de partículas e gases poluentes como o monóxido de carbono (SILVA, 2016).

Os trituradores de galhos, usados em resíduos de podas e aparas urbanas, podem ser acoplados aos caminhões de coleta para trituração no local de origem, em geral com bitolas de até 20 cm de diâmetro, como tam-

bém permanecer em instalações fixas em pontos de unidades de transbordo distribuídas estrategicamente pelo município, caso em que podem ter bitolas maiores e garras capazes de triturar galhos grossos e troncos. Os trituradores de galhos para podas urbanas produzem cavacos de tamanho reduzido (aproximadamente 10 mm) usando sistema de facas (lascas) ou sistema *schredder* (estilhaçamento), sendo este último ideal para acelerar a degradação da lignina no processo de compostagem (GALVÃO, 2019).

A produção de *pellets* começa com a geração da matéria-prima e após seleção das partes mais adequadas à valorização energética e trituração, passa por um processo de uniformização em moinho industrial para padronização das partículas. Os *pellets* formados devem possuir baixo teor de umidade para que tenham alto poder calorífico, fato que implica em um processo de secagem uniforme em secadores rotativos logo após a uniformização das partículas (CORTEZ, 2011; SILVA, 2016).

Após secagem ocorre o processo de compactação, ou peletização, por meio da extrusão da matéria-prima por matriz perfurada, normalmente de aço, em alta pressão e temperatura. Ao final, o produto sai com alta temperatura e maciez, fazendo-se necessário o resfriamento e estabilização do elemento ligante, reforçando as estruturas internas dos *pellets* (BOSMANS; HELSEN, 2010; GARCIA, 2010). Em escalas maiores a variação de aspectos morfológicos da biomassa usada como matéria-prima deve ser controlada, pois pode, muitas vezes, não resultar em um *pellet* de qualidade (GARCIA, 2010).

O uso em larga escala de *pellets* a partir de biomassa data do final da década de 1970, no hemisfério norte, como alternativa à crise do petróleo vivenciada na época. Os altos preços forçaram a busca por combustíveis alternativos para uso no setor energético primário, como aquecimento industrial e comercial. No entanto, produzidos apenas a partir de resíduos da indústria madeireira, o mercado de *pellets* só atingiu um ponto considerável no setor energético nos anos 2000 com a entrada de novos produtores e aumento da demanda, chegando a 594 indústrias no final de 2010 (GARCIA, 2010).

De acordo com Cortez (2011), estima-se que o consumo mundial de *pellets* em 2018 foi de cerca de 24 milhões de toneladas, tendo como principais consumidores a Europa e a América do Norte. Outros países possuem estudos de casos bem-sucedidos sobre geração descentralizada de energia a partir de biomassa, como, por exemplo, a Índia, cuja biomassa principal é encontrada no resíduo da industrialização de arroz (PRADHAN; MAHAJANI; ARORA, 2018). O Brasil não tem regulamentação do mercado de *pellets* para energia e produz atualmente apenas cerca de 4 milhões de to-

neladas de *pellets* de madeira, apesar de ter potencial para decuplicar essa produção (ESCOBAR, 2016).

O processo de briquetagem difere do processo de peletização em relação à temperatura em que a biomassa é submetida (acima de 200°C), em relação ao uso de aglomerantes e em relação ao tamanho usual do produto produzido ser maior quando comparado ao *pellet* (SILVA, 2016). Os briquetes feitos somente a partir de resíduos de podas e aparas não tem boa estabilidade estrutural, sendo necessária a adição de outros resíduos urbanos com bom desempenho como aglomerantes, o que traz desafios para o dimensionamento e operação de grandes volumes (SILVA, 2016). A baixa estabilidade estrutural dos briquetes de podas pode ser resolvida diminuindo-se para 1,5mm o tamanho das partículas na trituração (SILVA et al., 2021).

Valorização por processos bioquímicos

Os processos bioquímicos de valorização dos resíduos de podas e aparas envolvem a degradação biológica a partir da ação metabólica de bactérias e fungos, tanto na presença de oxigênio (processo de compostagem realizado por microrganismos aeróbios), quanto na ausência dele (processo de biodigestão realizado por bactérias anaeróbias). Ambos os processos atingem a degradação completa dos resíduos orgânicos e produzem, ao final do processo, produto estabilizado, representado por fertilizante orgânico rico em nutrientes (CORTEZ, 2011; SILVA, 2016).

Compostagem pode ser definida com base na Resolução CONAMA Nº 481/2017, que após estabelecer que o objetivo da compostagem é restabelecer o ciclo natural da matéria orgânica e seu papel natural de fertilizar os solos, como: “processo de decomposição biológica controlada dos resíduos orgânicos efetuado por uma população diversificada de organismos em condições aeróbias e termofílicas, resultando em material estabilizado com propriedades e características completamente diferentes daqueles que lhe deram origem” (BRASIL, 2017).

No município de São Paulo, a partir do método de Leiras Estáticas de Aeração Passiva, desenvolvido pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), a AMLURB desenvolveu o método de Leiras de Arquitetura Projetada para a Aeração (LAPA), aperfeiçoando o controle dos riscos ambientais, requisito para a operação segura no ambiente urbano, ideal para Pátios de Compostagem de até 30 t/dia de capacidade de processamento (CCAC; ISWA, 2016; GALVÃO, 2019).

Para Unidades com capacidades maiores já se encontra operando no Brasil, em Içara, Santa Catarina, a tecnologia importada das leiras estáti-

cas de aeração forçada cobertas com mantas semipermeáveis com camadas internas de teflon expandido, que têm melhor desempenho em capacidade por unidade de área (COMPOSUL, 2019). Os cinco pátios em atividade desde 2015 (Lapa) e 2018 (Sé, Mooca, São Mateus e Ermelino Matarazzo) atingem com facilidade as temperaturas de sanitização dos resíduos, até o momento não registram reclamação por incômodo de vizinhança e produzem 15 t/dia de composto orgânico de alta qualidade agronômica atestado por análise do Instituto Agronômico de Campinas, que é utilizado pela própria prefeitura, doado a agricultores e à população.

Outro método bioquímico é a biossecagem que, diferentemente da compostagem, não busca a degradação biológica completa do resíduo e sua estabilização, mas visa promover a secagem de resíduos úmidos como lodo de esgotos ou resíduo sólido urbano indiferenciado por meio da oxigenação forçada, contribuindo para acelerar a degradação microbiana, quando as temperaturas podem chegar a mais de 70°C. O objetivo da biossecagem é aproveitar resíduos que seriam destinados a aterros para a produção de combustível derivado de resíduos (CDR). No entanto, sem a adição de uma fonte importante de resíduos estruturantes e ricos em lignina é muito difícil que o CDR resultante apenas da biossecagem atinja os requisitos técnicos mínimos de poder calorífico. Dessa forma, resíduos de podas e aparas configuram-se como matéria-prima importante no equilíbrio da produção deste tipo de CDR, ao mesmo tempo que contribuem com as estratégias de desvio de lodos de esgotos e resíduos sólidos urbanos dos aterros sanitários (FERREIRA, 2021; VOGEL, 2014).

No processo de biodigestão, ao se estabilizar o resíduo orgânico, além do composto orgânico, é produzido também biogás composto por metano (de 50 a 80%), dióxido de carbono (de 20 a 40%) e sulfeto de hidrogênio (de 1 a 5%) (KARLSSON et al., 2014). Trata-se de processo que ocorre em fase inicial, onde os compostos orgânicos são convertidos em compostos mais simples, como ácidos voláteis e halogênios, seguido da metabolização destes compostos em gases que irão compor o biogás. Esse processo é diferenciado da compostagem também por parâmetros operacionais relacionados à temperatura, teor de umidade, tipo de substrato residual utilizado e seu nível de complexidade. Quanto ao biogás pode ser explorado como fonte de energia para diferentes usos a partir do processo de purificação, no qual o dióxido de carbono e demais gases são eliminados para uso como biometano similar ao gás natural (AL-ALAWI et al., 2019; SILVA, 2016).

A partir de uma parceria com a Climate and Clean Air Coalition (CCAC), International Solid Waste Association (ISWA), Instituto de Energia e Ambiente da USP e as Concessionárias da Limpeza Pública, a AMLURB

elaborou projetos de Ecoparques de grande escala junto aos atuais aterros sanitários para o Tratamento Mecânico-Biológico da coleta indiferenciada recalcitrante, em que foi prevista a biodigestão da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos após separação mecânica (BRASIL, 2019c).

Valorização por processos termoquímicos

Os processos de conversão termoquímica são possíveis para resíduos de podas e aparas devido à presença de energia química disponível que pode ser liberada e canalizada para diversas finalidades, como, por exemplo, cocção de alimentos, aquecimento de água ou ambientes, assim como geração de vapor d'água e energia elétrica. Para isso, a biomassa é processada a partir de calor e suprimento controlado de oxigênio, e a energia é liberada a partir dos seguintes processos: combustão direta, pirólise e gaseificação (BRASIL, 2019b; CORTEZ, 2011; SILVA, 2016).

Considera-se o poder calorífico gerado, correspondendo à energia liberada na forma de calor pelo material durante a combustão, como a principal variável a ser considerada no planejamento operacional de valorização termoquímica a partir de resíduos, em pequena ou larga escala. Essa energia pode ser expressa de duas formas: i) poder calorífico superior (PCS) e ii) poder calorífico inferior (PCI). O PCS consiste na quantidade de calor liberada na combustão quando os gases de descarga são arrefecidos de modo que a água resultante da combustão esteja na fase líquida, enquanto o PCI consiste na quantidade de calor liberada da combustão em que a água já se encontra na fase gasosa. No PCI é evidenciado o potencial energético real contido no produto da combustão, pois desconta a energia gasta para a evaporação da água formada na combustão (PRADHAN; MAHAJANI; ARORA, 2018). Logo, esse último parâmetro é mais apropriado para avaliar o potencial energético de determinada categoria de resíduos submetida a processos termoquímicos.

As variações no poder calorífico, resultantes de cada tipo de biomassa residual, ocorrem devido às diferenças químicas e físico-químicas de sua composição, devido ao teor de cinzas, que representa a fração inorgânica da biomassa e não contribui no processo de combustão, assim como ao teor de umidade, que aumenta o consumo de energia para evaporação, fato que afeta negativamente o potencial energético (SANTOS; TAMBANI, 2019).

No estado de São Paulo, a Resolução N° 47/2020 (SÃO PAULO, 2020c) estabelece diretrizes e condições para o licenciamento e operação da atividade de recuperação de energia proveniente do uso de CDR em fornos industriais e incineradores, em cumprimento às diretrizes da Reso-

lução Conama N° 316/2002, que, por sua vez, dispõe sobre procedimentos e critérios para esse tipo de valorização por tratamento térmico em âmbito nacional. Essa resolução estadual preconiza PCI mínimo de 2300 kcal/Kg ou 9,63 MJ/Kg para resíduos com potencial para serem utilizados como CDR (BRASIL, 2002).

O estudo de Santos e Tambani (2019) indicou que a biomassa de podas de árvore apresentou PCS de 20,7 MJ/Kg e PCI de 19,4 MJ/Kg, números bastante satisfatórios, com baixos teores de cinzas em comparação a outras biomassas, considerando em base seca. Corrigindo o PCI com umidade a 40%, por exemplo, esse resultaria ao redor de 10 MJ/Kg.

Combustão direta trata-se da tecnologia de conversão termoquímica mais antiga e mais difundida atualmente. Apresenta vantagem de ser tecnologia simples e de baixo custo operacional, podendo ser utilizada em fogões, fornos e caldeiras para geração de energia elétrica em usinas termoelétricas. No entanto, por não permitir o controle da umidade e dos gases residuais produzidos pela queima é muito ineficiente e produz poluentes, como o monóxido de carbono e fuligem (CORTEZ et al., 2008; GONÇALVES et al., 2019).

A conversão de calor em energia mecânica é, normalmente, realizada por ciclos termodinâmicos de vapor pelo uso de caldeiras, turbinas a vapor, condensador e bomba de alimentação da caldeira. Os gases da combustão estão submetidos à temperatura entre 800°C e 900°C e durante o processo trocam calor com as paredes do incinerador e trocadores de calor, gerando vapor que será utilizado para geração energética ou para aquecimento (SANTOS; TAMBANI, 2019).

A pirólise lenta de biomassa sólida de podas e aparas ocorre a partir da decomposição térmica da biomassa residual na ausência parcial ou total de oxigênio e temperatura controlada entre 300°C e 500°C. Essa técnica possibilita a conversão da matéria orgânica em subprodutos de maior qualidade e maior densidade energética, como, por exemplo, o carvão vegetal, a partir da perda de compostos voláteis de oxigênio e hidrogênio e concentração de carbono, bem como pela perda de volume e densidade (CORTEZ et al., 2008). Além do combustível gasoso, a pirólise também produz ácido pirolenhoso e resíduo sólido de alcatrão (BRITO, 1990; PEDROZA et al., 2017). O carvão vegetal pode ser usado como meio de multiplicar populações diversificadas de microorganismos para posterior uso como biofertilizante e condicionador de solo como bio-carvão ou biochar (CARDOSO JÚNIOR et al., 2022).

Há outros métodos de pirólise de biomassa residual, considerados mais avançados quando comparados ao processo de produção de carvão ve-

getal, cujo produto final é bio-óleo com maior valor agregado. Tais métodos, chamados de pirólise rápida, necessitam de intervalos maiores de temperatura, entre 600°C e 1200°C, assim como de um pré-processo mais controlado que transforma os resíduos em partículas inferiores a 2 mm com umidade em torno de 10%. Logo, apesar do potencial de valorização energética de resíduos de podas e aparas por meio da pirólise rápida há ainda grandes gargalos na implementação desse método devido a incertezas, especialmente em relação ao mercado do bio-óleo (GÓMEZ, 2022; PEDROZA et al., 2017).

O processo de valorização térmica a partir de gaseificação envolve a conversão de qualquer espécie de hidrocarboneto sólido em um produto gasoso, considerado gás de síntese, com um poder calorífico na ordem de 5 MJ/Kg por meio da oxidação parcial do O₂, gerando H₂ e CO. O processo pode ocorrer em condições de leito fixo ou leito fluidizado em fluxo contínuo ou em batelada. Além da valorização energética dos resíduos em processo de gaseificação, o método produz também combustíveis líquidos com potencial de introdução na cadeia energética renovável por meio de processos de síntese química catalítica, como o diesel, gasolina, metanol, dentre outros, e etanol a partir da fermentação do gás de síntese (SANTOS; TAMBANI, 2019; SILVA, 2016).

Apesar do processo de gaseificação apresentar diversas vantagens no aspecto produtivo em relação à queima direta da biomassa, em relação ao manuseio e custo de instalação e manutenção é um processo tecnicamente mais complicado de se realizar. A manutenção é estritamente necessária para que haja regularidade na limpeza dos gases para evitar a emissão atmosférica de material particulado e alcatrão (ARDILA, 2015).

Para diminuição dos impactos negativos ao ambiente, tanto para os processos de gaseificação quanto aos demais processos termoquímicos, é necessário que haja algum pré-tratamento para retirada da umidade, pela secagem em estufa, e para diminuição de tamanho, ou mesmo adensamento da biomassa residual antes da gaseificação. Esses métodos de pré-tratamento, ou pré-processamento, apesar de apresentarem maior consumo energético durante o processo geral, aumentam significativamente sua eficiência (ARDILA, 2015; CORTEZ, 2011).

DISCUSSÃO

No município de São Paulo, os instrumentos de gestão direcionados aos resíduos de podas e aparas têm buscado se enquadrar ao conceito de hierarquia de ações estabelecido pela PNRS, porém a grande maioria des-

ses resíduos ainda é direcionada para disposição no solo com os impactos inerentes. As metas de desvio de resíduos sólidos, já compromissadas pelo poder público (universalizar os processos de compostagem de resíduos orgânicos de feiras e podas, e aumentar a capacidade total do conjunto dos pátios de compostagem para 100 mil toneladas por ano até 2030), apontam para a necessidade de ampliar rapidamente o volume de biomassa encaminhado a diferentes rotas de valorização de resíduos de podas e aparas, desviando-os dos aterros de resíduos, cuja disposição já está proibida no município pela legislação desde 2008 (Lei Municipal do PAMPA), proibição reforçada na Lei Federal da PNRS em 2010.

Apesar do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PGIRS-2014) não mencionar em suas metas alguns processos tecnológicos disponíveis, tais como os processos termoquímicos para recuperação energética, é importante considerar a pluralidade de soluções e a busca de sua complementaridade, priorizando aquelas que exigem menos recursos e apresentam menores riscos de implantação. Após esgotar essas possibilidades, é importante avançar para processos de maior risco e complexidade, no mesmo espírito da hierarquia de ações de gestão de resíduos da PNRS.

O Plano Municipal de Arborização Urbana prevê a universalização dos serviços ecossistêmicos das árvores da floresta urbana para todas as pessoas e regiões do município, o que resultará, além da melhoria das condições ambientais e da qualidade de vida da população, no aumento da geração de resíduos de podas e aparas. Tal acréscimo ao longo do tempo tem que ser considerado e incorporado nas políticas públicas do setor.

A necessidade de enfrentamento dos efeitos da mudança global do clima pode vir a gerar maior volume de quedas de árvores e elementos verdes da paisagem, em decorrência de eventos extremos mais frequentes. Por outro lado, pode ainda demandar soluções com base em processos bioquímicos, como forma de levar nutrientes e matéria orgânica para os solos do entorno da cidade, garantindo estrategicamente a retenção hídrica da água no solo por mais tempo para o enfrentamento das secas mais severas e para o sequestro de carbono. Tal demanda pode vir a valorizar economicamente o composto produzido a partir de resíduos orgânicos urbanos, incluindo aqui os resíduos de podas e aparas, e criar um circuito econômico circular virtuoso. Ao mesmo tempo, a emergência climática também pode tornar viável economicamente os métodos de recuperação energética por meio de processos tecnológicos termoquímicos, capazes de substituir com vantagens fontes não renováveis e altamente emissoras de Gases de Efeito Estufa.

No Estado de São Paulo, a maior parte dos municípios não possui políticas específicas que contemplem os resíduos de podas e aparas ou pla-

nos e ações de destinação adequada e reaproveitamento desses resíduos. A falta de dados concisos, individualizados e atualizados a respeito da geração e gestão desses resíduos é também condição que dificulta a aplicação de recursos públicos a planos e ações e desestimula investimentos privados de valorização das podas e aparas (CORTEZ, 2011; MEIRA, 2010). Nesse sentido, é importante a geração e o registro de dados sobre essa categoria de resíduos sólidos, tanto os advindos da manutenção e limpeza urbana, como dos condomínios e domicílios, empresas e instituições, que possam embasar futuros planos, programas e projetos.

CONCLUSÃO

O enorme volume de resíduos de podas e aparas gerado no município de São Paulo, em torno de 23.000 t/ano, e continuamente encaminhado aos aterros de resíduos, sugere que há espaços para a experimentação, em escalas operacionais, e para o desenvolvimento de um mosaico de soluções tecnológicas que precisam de priorização, tanto do poder público, das universidades e institutos de pesquisa, como também da iniciativa privada para o encaminhamento da solução a esta questão. Desde as alternativas mais viáveis até aquelas mais complexas devem ser consideradas, estudadas e aplicadas, para que cada método e processo tecnológico encontre nichos de aplicação e valorização cujo resultado considere o desempenho econômico, sanitário e ambiental, exigido pelas condições e requisitos da vida urbana em uma megacidade como São Paulo.

Portanto, para cumprir a legislação e as metas já compromissadas pelo poder público frente às demandas ampliadas e aceleradas pela mudança global do clima será necessária a priorização da valorização dos resíduos de podas e aparas e a aplicação de variados métodos e processos tecnológicos, explorando o leque de alternativas dos métodos físicos, bioquímicos e termoquímicos.

REFERÊNCIAS

ABPL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS SÓLIDOS E LIMPEZA PÚBLICA. Aprender com os erros. *Revista Limpeza Pública*, n. 101, p. 4-19, 2019.

ARDILA, Y. C. *Gaseificação da biomassa para produção de gás de síntese e posterior fermentação para bioetanol: modelagem e simulação do processo*. Dis-

sertação (Doutorado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

AL-ALAWI, M.; SZEGI, T.; EL FELS, L.; HAFDI, M.; SIMON, B.; GULYA, M. Green waste composting under GORE(R) cover membrane at industrial scale: physico-chemical properties and spectroscopic assessment. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 8 (Suppl 1): S385–S397, 2019.

BOSMANS, A.; HELSEN, L. *Energy from waste: review of thermochemical technologies for refuse derived fuel (RDF) treatment*. Third International Symposium on Energy from Biomass and Waste Venice. Environmental Sanitary Engineering Centre, Italy. 8-11 November, 2010.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA N° 316, de 29 de Outubro de 2002. *Diário Oficial da União*, n° 224, de 20 de Novembro de 2002, seção 1. Pág. 92/95.

BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Lei n°12.305 de 2 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. *Diário Oficial da União*, Brasília, 03 de agosto de 2010.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA N° 481, de 03 de Outubro de 2017. *Diário Oficial da União*, n° 194 de 09 de outubro de 2017, seção 1. p. 93.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. *Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: 17° Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2018*. Brasília: SNS; MDR, 2019a. 247 p.: il.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. *Recuperação Energética de Resíduos Sólidos Urbanos*. Caderno Temático N° 3 do Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB. 2019b. 51p. Disponível em: https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/Arquivos_PDF/plansab/3-CadernotematicoRecuperacaoEnergeticadeRSU.pdf Acesso em 26 abr. 2022.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. *Valorização de Resíduos Orgânicos*. Caderno Temático N° 4 do Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB. 2019c. 43p. https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/Arquivos_PDF/plansab/4-CadernotematicoValorizacao-deResiduosOrganicos.pdf. Acesso em: 02 abr. 2022.

BRITO, J. O. *Princípios de produção e utilização de carvão vegetal de madeira*. Do-

- cumentos Florestais: n.9; 1-19, maio de 1990. Piracicaba: USP; ESALQ, 1990.
- CARDOSO JÚNIOR, C. D.; PIMENTA, A. S.; DE SOUZA, E. C.; PEREIRA, A. K. S.; DIAS JÚNIOR, A. F. Uso agrícola e florestal do biochar: estado da arte e futuras pesquisas. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 2, e55711225999, 2022. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i2.25999>.
- CCAC - CLIMATE AND CLEAN AIR COALITION; ISWA - INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION. *Evaluation and Recommendation Report of the Pilot Composting Plant in the Lapa District of the City of São Paulo*. CCAC; ISWA, Report, 2016. 28p. Disponível em: https://www.ccacoalition.org/sites/default/files/resources/assessment_lapa_composting_plant_sao_paulo.pdf Acesso em: 02 abr. 2022.
- CENEVIVA, L. L. V.; PEDÓ, F. *Retificação do Inventário das Emissões de Gases de Efeito Estufa do Município de São Paulo 2010-2017*. Ata da 78ª Reunião Ordinária do Comitê Municipal de Mudança do Clima e Ecoeconomia. 2020. Disponível em: <https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/Apres%20Retificacao%20do%20Inventario%20GEE%202010-2017.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2022.
- COMPOSUL. Composul Compostagem. *O sistema GORE®COVER: uma tecnologia líder em compostagem/biossecagem para tratamento de resíduos orgânicos*. Içara: COMPOSUL, 2019. 16p.
- CORTEZ, C. L.; COELHO, S. T.; GRISOLI, R.; GAVIOLI, F. *Compostagem de resíduos de poda urbana*. Centro Nacional de Referência em Biomassa (CEN-BIO). Instituto de Eletrotécnica e Energia. Universidade de São Paulo, Nota Técnica IX, 2008. 17p.
- CORTEZ, C. L. *Estudo do potencial de utilização da biomassa resultante da poda de árvores urbanas para a geração de energia: estudo de caso AES Eletropaulo*. 2011. Tese (Doutorado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- ELLEN MCCARTHUR FOUNDATION. *Circular Example - Regenerative agriculture around São Paulo: Connect the Dots*. 2020. Disponível em: <https://ellenmacarthurfoundation.org/circular-examples/connect-the-dots>. Acesso em: 25 mar. 2022.
- ENEL. *Manejo e Poda de Árvores*. Disponível em: <https://www.enel.com.br/pt-saopaulo/quemsomos/meio-ambiente/manejo-e-poda-de-arvores.html>. Acesso em: 25 mar. 2022.
- ESCOBAR, J. F. *A produção sustentável de biomassa para energia no Brasil: O*

caso dos pellets de madeira. 2016. Tese (Doutorado em Energia) - Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

FERREIRA, R. G. A. *Tratamento de lodo de esgoto em conjunto com resíduos de poda e capina através da biossecagem visando a produção de combustível derivado de resíduo CDR*. 2021. Dissertação. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

GALVÃO, R. G. *Compostagem em áreas urbanas: lições aprendidas no Projeto Feiras e Jardins Sustentáveis da Lapa, São Paulo-SP, Brasil*. 2019. Dissertação. Universidade Nove de Julho, São Paulo, 2019.

GARCIA, D. P. *Caracterização química, física e térmica de pellets e madeira produzidos no Brasil*. 2010. Dissertação. Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Guaratinguetá, 2010.

GBIO - GRUPO DE PESQUISA EM BIOENERGIA. *Conceituando Biomassa*. Grupo de Pesquisa em Bioenergia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://gbio.webhostusp.sti.usp.br/?q=pt-br/livro/conceituando-biomassa> Acesso em: 2 abr. 2022.

GÓMEZ, E. O. *A tecnologia de pirólise no contexto da produção moderna de biocombustíveis: uma visão perspectiva*. Ambiente Brasil. Disponível em: https://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/artigos_energia/a_tecnologia_de_pirólise_no_contexto_da_producao_moderna_de_biocombustivies_uma_visao_perspectiva.html. Acesso em: 25 mar. 2022.

GONÇALVES, F. et al. Avaliação do potencial energético dos resíduos lignocelulósicos gerados no campus da Unifor. In: *Anais do CIBIO - Congresso Internacional de Biomassa*, Pinhais: Grupo FRG, 4. ed., p. 207-212. 2019.

KARLSSON, T. et al. *Manual Básico de Biogás*. 1º ed. Lajeado: Editora Univates, 2014.

LOPES, K.; MARTINS, E. M.; MIRANDA, R. L. A potencialidade energética da biomassa no Brasil. *Revista Desenvolvimento Socioeconômico em Debate*, Criciúma, v. 5 n. 1, p. 94-106. 2019.

MEIRA, A. M. de. *Gestão de resíduos da arborização urbana*. 2010. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

MORI, A. K.; STOREL JÚNIOR, A. O.; FRANCO, F. M.; SMDU ABREU, G. K. M.; CUERBAS, L. C.; DE ASSIS, L. H. B. *Connect the Dots*. São Paulo: Applied Research and Advisory Body, Municipal Secretariat of Urban

Development. 2016. Disponível em: <https://www.iabr.nl/en/project/connect-the-dots>. Acesso em: 25 mar. 2022.

NEVES, V. F. *Caracterização de resíduos de poda, amostragem de poluentes advindos de sua queima e eficiência de combustão*. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Itapeva, 2018.

PEDROZA, M. M. et al. Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos em processo de pirólise. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, Cascavel, v. 6, n. 2, p. 184-207, 2017.

PRADHAN, P.; MAHAJANI, S.; ARORA, A. Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. *Fuel Processing Technology*, v. 181, p. 215-232, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.09.021>.

SANTOS, J. L. D.; TAMBANI, P. C. Potencial energético de diferentes biomassas disponíveis no Brasil. In: *Anais do CIBIO - Congresso Internacional de Biomassa*, Pinhais: Grupo FRG, 4. ed., p. 616-621, 2019.

SANTOS, M. R.; TEIXEIRA, C. E.; KNISS, C. T.; BARBIERI, J. C. O uso da avaliação do ciclo de vida e da ecoeficiência para avaliar alternativas de valorização de resíduos: um estudo em empresa termelétrica. *Revista de Administração da UFSM*, Santa Maria, v. 9, Ed. Especial ENGEMA, p. 82-99, 2016.

SÃO PAULO. Câmara Municipal. Lei N° 13.478, de 30 de Dezembro de 2002. *Diário Oficial* da cidade de São Paulo, 31 de dezembro de 2002.

SÃO PAULO. Câmara Municipal. Lei N° 14.723, de 15 de Maio de 2008a. *Diário Oficial* da cidade de São Paulo, 16 de maio de 2008, seção 1. p. 1. 2008a.

SÃO PAULO. Câmara Municipal. Lei N° 14.803, de 26 de Junho de 2008b. *Diário Oficial* da cidade de São Paulo, 27 de junho de 2008. 2008b.

SÃO PAULO. Prefeitura Municipal de São Paulo. *Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PGIRS_2014)*. 2014. Disponível em: <https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/servicos/arquivos/PGIRS-2014.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2022.

SÃO PAULO. Secretaria do Verde e do Meio Ambiente. *Plano Municipal de Conservação e Recuperação da Mata Atlântica (PMMA-2017)*. 2017. Disponível em: https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/PMMA_final_8_jan%20ok.pdf. Acesso em: 25 mar. 2022.

SÃO PAULO. Câmara Municipal. Lei N° 17.267, de 13 de Janeiro de 2020. *Diário Oficial* da cidade de São Paulo, 14 de janeiro de 2020. 2020a.

- SÃO PAULO. Prefeitura Municipal de São Paulo. *Plano Municipal de Arborização Urbana (PMAU-2020)*. 2020b. Disponível em: https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/meio_ambiente/arquivos/pmau/PMAU_texto_final.pdf. Acesso em: 25 mar. 2022.
- SÃO PAULO. Secretaria de Estado da Infraestrutura e do Meio Ambiente. Resolução SIMA N° 047, de 06 de agosto de 2020. *Diário Oficial* do estado de São Paulo, 29 de agosto de 2020, seção I, pp. 32/34. 2020c.
- SÃO PAULO. Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente. Plano de resíduos sólidos do estado de São Paulo. 2020d. 277 p. Disponível em: <http://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br>. Acesso em: 25 mar. 2022.
- SÃO PAULO. Prefeitura Municipal de São Paulo. *Plano de Ação Climática do Município de São Paulo (PlanClimaSP 2020-2050)*. 2021a. Disponível em: https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/meio_ambiente/arquivos/PlanClimaSP_BaixaResolucao.pdf. Acesso em: 25 mar. 2022.
- SÃO PAULO. Prefeitura Municipal de São Paulo. *Programa de Metas da Gestão 2021-2024 do Município de São Paulo*. 2021b. Disponível em: https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/governo/planejamento/programa_de_metas_20212024/ Acesso em: 25 mar. 2022.
- SILVA, D. P. *Avaliação do processo de adensamento de resíduos de poda de árvore visando ao aproveitamento energético: o caso do campus da USP na capital*. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.
- SILVA, D. P.; CONTRI, M. A.; FARIA, S. C. de; MORAES, S. L. Biomassa e tecnologias de adensamento para aplicação energética. *Revista IPT Tecnologia e Inovação*, São Paulo, v.5, n.16, abr., 2021. p 6-37.
- SOUZA, M. M.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; BARBOSA, A. C. Produção e avaliação de pellets compostos por diferentes proporções de resíduos sólidos urbanos. *Nature and Conservation*, v.13, n. 3, p. 80-92, 2020. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2318-2881.2020.003.0008>.
- SOUZA, C.; GUIMARÃES, C. C.; VELASCO, G. D. N. Reaproveitamento de resíduos de poda e sua colaboração para atingir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. *13º Seminário Internacional NUTAU*, 2020. Dezembro de 2020. <http://pdf.blucher.com.br.s3-sa-east-1.amazonaws.com/designproceedings/nutau2020/40.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2022.
- VOGEL, F. *Composting and Biodrying of MSW and SOW with the Gore Co-*

ver System. Jundiaí-SP: UTV-AG. 2014. Disponível em: https://jundiai.sp.gov.br/servicos-publicos/wp-content/uploads/sites/18/2014/11/10-FRANZ_VOGEL.pdf. Acesso em: 02 abr. 2022.