

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

USO DE MATRIZ PEDIGREE MODIFICADA NA ESCOLHA DE DADOS DE COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

* Gabriele Lohmann¹
Gino Roberto Gehling¹
Luiz Fernando de Abreu Cybis¹

APPLICATION OF A MODIFIED PEDIGREE MATRIX FOR CHOOSING ELEMENTARY COMPOSITION DATA OF MUNICIPAL SOLID WASTE

Recibido el 17 de agosto de 2019; Aceptado el 7 de mayo de 2020

Abstract

The Municipal Solid Waste (MSW) elemental composition is important to determine its empirical chemical formula and so predict landfill gas generation. However, the determination of composition involves much work and high costs. This is a problem when resources are limited, as in the case of developing countries. In addition, data generation at later times makes direct analysis impossible because of the lack of a sample. Due to these difficulties, it is necessary to use secondary data which are carefully chosen to ensure greater robustness. This work aimed to propose a methodology for the choice of elementary composition data of MSW. The methodology originates from a tool used in life cycle assessment, the Pedigree Matrix. The Pedigree Matrix is used to evaluate data quality under the aspects of reliability, completeness and the temporal, geographic and technological correlations. Some modifications in the original Matrix were proposed in order to choose more robust secondary data of the elemental composition for MSW generated in Porto Alegre, RS. Temporal, geographic and technological correlations were removed from the original matrix. The qualitative correlation was added, while reliability and completeness were maintained. The modification of the Pedigree Matrix made it possible to choose more appropriate data. Using the composition of carbon, hydrogen, oxygen, and nitrogen the empirical chemical formulas were determined for the wastes generated in 1997 and 2010. The formula determined for organic matter in 2010, $C_{28.27}H_{43.44}O_{15.93}N$, was similar to that obtained analytically $C_{33.3}H_{57.6}O_{17}N$ demonstrating the viability of the proposed methodology.

Keywords: chemical composition of waste, chemical formula of waste, municipal solid waste; pedigree matrix, qualitative correlation.

¹ Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

* Autor correspondiente: Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Av. Bento Gonçalves, n. 9500. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 91501-970. Brasil. Email: gabi.lohmann@gmail.com

Resumo

A composição elementar de resíduos sólidos urbanos (RSU) permite determinar a sua fórmula química empírica e, assim, prever a geração de gases em aterros sanitários. Porém, essa determinação é trabalhosa, envolve custos elevados representando uma dificuldade quando existe limitação de recursos, como é o caso de países em desenvolvimento. Além disso, a geração de dados em épocas posteriores tornam impossível uma análise direta devido a inexistência da amostra. Diante destas dificuldades, faz-se necessária a utilização de dados secundários cuja escolha criteriosa garante maior robustez. Este trabalho teve por objetivo propor uma metodologia para a escolha de dados da composição elementar de RSU. A metodologia tem origem em uma ferramenta utilizada em avaliação de ciclo de vida, a matriz pedigree que é usada para avaliar a qualidade de dados sob os aspectos confiabilidade, completeza e correlações temporal, geográfica e tecnológica. Algumas alterações na matriz original foram propostas com o intuito de escolher com maior robustez dados secundários da composição elementar para RSU gerados em Porto Alegre, RS. Da matriz original retiraram-se as correlações temporal, geográfica e tecnológica. Acrescentou-se a correlação qualitativa, mantendo a confiabilidade e completeza dos dados. As alterações propostas permitiram a escolha de dados adequados. Com a composição de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio determinaram-se as fórmulas químicas empíricas para os resíduos gerados em 1997 e 2010. A fórmula determinada para a matéria orgânica em 2010, $C_{28.27}H_{43.44}O_{15.93}N$, assemelhou-se aquela obtida analiticamente $C_{33.3}H_{57.6}O_{17}N$ demonstrando a viabilidade da metodologia proposta.

Palavras chave: composição química de resíduos, correlação qualitativa, fórmula química de resíduos, matriz pedigree, resíduos sólidos urbanos.

Introdução

Resíduos sólidos urbanos (RSU) são definidos pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) como resíduos domiciliares, originários das atividades domésticas em residências urbanas, e resíduos de limpeza urbana, que tem sua origem na varrição e limpeza de lougradouros e vias públicas e em outros serviços de limpeza urbana (Brasil, 2010).

A caracterização dos resíduos é feita a partir de propriedades físicas, químicas e de testes de performance (Lagerkvist *et al.*; 2011). A caracterização química elementar é importante, pois permite quantificar a contribuição dos resíduos domésticos para o fluxo total de substâncias em uma sociedade, verificar a qualidade dos resíduos domésticos recolhidos, identificar a origem de substâncias ambientalmente importantes e, por fim, modelar as emissões em unidades de tratamento ou disposição final de resíduos (Riber *et al.*, 2009). Com os dados da composição química elementar, determina-se a fórmula química empírica dos RSU e a partir desta, é possível estimar a geração de gases em aterros sanitários.

Em países em desenvolvimento, como o Brasil, é difícil encontrar dados da composição química de resíduos obtidos através de análises de laboratório. O preparo e análise de amostras é trabalhoso e requer conhecimento técnico e laboratórios com instalações sofisticadas (Yang *et al.*, 2018). Para estudos estimativos ou com resíduos que não são mais possíveis de serem

amostrados estas dificuldades podem resultar na necessidade de se utilizar informações obtidas de outras publicações. Quando os dados utilizados em um estudo são provenientes de outro autor diz-se que estes são dados secundários.

O trabalho com dados secundários é comum na Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e requer uma avaliação da qualidade dos dados utilizados. Para isso, utiliza-se a Matriz Pedigree, a qual indica a robustez aos dados coletados (Weidema e Wesnaes, 1996).

A Matriz de Pedigree tradicional permite avaliar os dados a partir de cinco indicadores: confiabilidade, completeza, correlações temporal, geográfica e tecnológica. A cada indicador é atribuído um valor de 1 a 5. A atribuição do valor “1” significa uma melhor qualidade do dado para o indicador avaliado, enquanto um valor “5” significa baixa qualidade.

Os resultados aplicados com a matriz pedigree são apresentados por números separados por vírgula e entre parênteses. Cada número, na respectiva ordem, representa a classificação das categorias avaliadas (Weidema, 1998).

A interpretação da matriz dependerá do objetivo para o qual os dados serão utilizados. Além disso, os valores atribuídos a cada indicador não devem ser comparados entre si, pois cada indicador apresenta uma importância dentro do objetivo do estudo (Weidema, 1998). A matriz pedigree da forma como proposta por (Weidema e Wesnaes, 1996) não é aplicável para dados da composição química elementar de resíduos, pois a composição dos resíduos varia conforme dados socioeconômicos (Philippe e Culot, 2009) e a referida matriz não faz referência a este indicador ou algum indicador que permita avaliar a variabilidade na composição de resíduos.

Devido às dificuldades para obtenção de dados primários da composição química de RSU e às limitações para aplicação da Matriz Pedigree de Weidema este trabalho teve por objetivo propor uma modificação na matriz pedigree para obter, com maior robustez, dados da composição química elementar e a fórmula química empírica para os RSU de Porto Alegre considerando a sua composição qualitativa (ou composição gravimétrica) nos anos de 1997 e 2010.

Metodologia

Os dados da composição qualitativa dos RSU de Porto Alegre nos anos de 1997 e 2010 foram obtidos, respectivamente, de (Reis *et al.*, 2003) e (Fleck e Reis, 2011). A primeira modificação proposta na Matriz Pedigree de Weidema foi a eliminação das correlações temporal, geográfica e tecnológica.

Considerando que os dados de Porto Alegre utilizados no presente trabalho são de 1997 e 2010 e que dados mais robustos sobre a composição de RSU são obtidos na literatura em períodos mais recentes, optou-se por retirar a correlação temporal da Matriz Pedigree proposta.

Todos os trabalhos avaliados utilizaram a mesma metodologia de determinação da composição elementar, portanto, eliminou-se a correlação tecnológica da matriz proposta.

A correlação geográfica foi desconsiderada, pois conforme (SOUZA et al., 2014) diferentes cidades em um mesmo país podem ter diferentes taxas e composição de resíduos. Estes autores resumiram valores de geração e composição dos principais RSU em diversos países. Observaram que economias mais avançadas, no geral, geram resíduos com menor parcela de matéria orgânica e que os resíduos das cidades Tulsipur e Catmandu, no Nepal, continham respectivamente, 46% e 71% de matéria orgânica.

Estas diferenças na composição dos resíduos entre cidades de uma mesma região e o fato de não existirem muitos dados da composição química elementar das diferentes frações qualitativas dos RSU e os disponíveis são de diferentes regiões do mundo levaram a segunda alteração na matriz pedigree, em que se propôs a inclusão do indicador correlação qualitativa (ou correlação gravimétrica). O indicador permite comparar as composições dos RSU de diferentes locais e identificar aqueles cuja composição qualitativa é mais similar. Para isso, a composição dos RSU dos artigos foram comparados aos dados de Porto Alegre para os anos de 1997 (Reis *et al.*, 2003) e 2010 (Fleck e Reis, 2011). A comparação se deu a partir da soma das frações papel, papelão e matéria orgânica que representam os materiais rapidamente degradáveis (RD) (Russo, 2005). Quanto mais semelhante a quantidade da fração RD no artigo analisado com os resíduos de Porto Alegre, maior a correlação qualitativa.

Da matriz pedigree original foram mantidas a confiabilidade e a completeza. A confiabilidade avaliou a qualidade do dado considerando que dados primários receberam melhor pontuação do que dados secundários. Dados obtidos de amostras de RSU analisadas foram considerados primários e tem, portanto, maior confiabilidade. Se a amostra analisada correspondeu a materiais que compõem os resíduos, ou seja, um material nobre que virá a se tornar RSU algum dia, estes dados tiveram menor confiabilidade que uma amostra de RSU realmente gerado. Na completeza avaliou-se a utilização ou não de uma metodologia de amostragem e se esta permitiu obter uma amostra representativa.

A nova matriz, apresentada na Tabela 1, foi aplicada para diferentes trabalhos que continham os teores de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O) e nitrogênio (N) para diferentes frações qualitativas (ou frações gravimétricas) de RSU. Os artigos selecionados para representar a

composição de cada fração qualitativa, foram aqueles com melhor classificação na matriz. Desta seleção foram obtidos dados da composição química elementar para os resíduos de Porto Alegre.

Tabela 1. Proposta de modificação da matriz pedigree de Weidema para aplicação em RSU.

Pontuação	Confiabilidade	Indicador	
		Correlação qualitativa	Completeza
1	Composição elementar de RSU obtidos de medições primárias	0 a 15% de diferença da fração RD com relação a fração RD de Porto Alegre	Metodologia de coleta torna a amostra representativa
2	Composição elementar de materiais que compõem os RSU obtidos de medições primárias	16 a 30% de diferença da fração RD com relação a fração RD de Porto Alegre	Metodologia de coleta torna a amostra pouco representativa
3	Composição elementar de RSU obtidos de outras fontes	31 a 45% de diferença da fração RD com relação a fração RD de Porto Alegre	Não indica o método de coleta
4	Composição elementar de materiais que compõem os RSU obtidos de outras fontes	mais de 45% de diferença da fração RD com relação a fração RD de Porto Alegre	Amostra não refere-se a RSU destinado para coleta
5	Origem dos dados desconhecida ou não informada	Composição qualitativa incompleta ou inexistente	Sem informação da origem da amostra

Fonte: autoria própria

Ressalta-se que os indicadores foram avaliados na ordem apresentada na Tabela 1: confiabilidade, correlação qualitativa e completeza. Esta ordem de avaliação foi adotada para garantir a melhor análise dos dados, considerando que dados obtidos por análises de amostra de RSU são mais representativos e a correlação qualitativa permite identificar as composições mais próximas dos RSU de Porto Alegre.

Algumas frações qualitativas correspondem a mistura de diferentes materiais ou a junção de duas frações. Nestes casos a composição química elementar e a umidade destas frações foram calculadas com as Equações (1) e (2), respectivamente.

$$PE_{j,m} = \frac{\sum_i [PE_{j,i} * (1-U_i) * D_{i,m}]}{\sum_i [(1-U_i) * D_{i,m}]}$$

Equação (1)

Onde:

PE_{j,m}: porcentagem do elemento j na fração misturada (% em massa seca);

PE_{j,i}: porcentagem do elemento j na fração i (% em massa seca);

U_i: umidade da fração i (% em peso úmido);

D_{i,m}: distribuição da fração i na mistura das frações (%) (0,5 para cada fração quando duas frações distintas dão origem a fração misturada).

$$U_m = \sum_i (U_i \cdot D_{i,m})$$

Equação (2)

Onde:

U_m: Umidade da fração resultante da mistura das frações i (% em massa úmida);

U_i: umidade da fração i (% em massa úmida);

D_{i,m}: distribuição da fração i na mistura das frações (%).

Em cada trabalho avaliado identificou-se para quais frações qualitativas havia a composição química elementar. Elencou-se, então, quais trabalhos contemplavam cada uma das frações qualitativas consideradas nos RSU de Porto Alegre. A escolha do trabalho que forneceu a composição química elementar da fração qualitativa se deu a partir da matriz pedigree modificada. Aquele com melhor classificação na matriz foi a fonte para o dado da composição elementar da fração qualitativa.

Com a composição química elementar determinaram-se a massa dos elementos e a fórmula química empírica do resíduo de Porto Alegre nos anos de 1997 e 2010.

Para cada fração qualitativa, as massas foram obtidas a partir da Equação (3).

$$ME_{j,i} = MR \cdot PF_i \cdot (1 - U_i) \cdot PE_{j,i}$$

Equação (3)

Onde:

ME_{j,i}: massa do elemento j na fração i (kg);

MR: massa total de resíduo aterrado (kg);

PF_i: porcentagem da fração qualitativa i no resíduo aterrado (% em massa úmida);

U_i: umidade da fração qualitativa i (% em massa úmida);

PE_{j,i}: porcentagem do elemento j na fração qualitativa i (% em massa seca).

A massa total de cada elemento, no resíduo, foi obtida do somatório de suas massas em cada uma das frações qualitativas de acordo com a Equação (4).

$$ME_j = \sum_i ME_{j,i}$$

Equação (4)

Onde:

ME_j: massa total do elemento j no resíduo aterrado (kg);

ME_{j,i}: massa do elemento j na fração qualitativa i (kg).

A massa total de cada elemento no resíduo (em kg) foi dividida pela sua massa molar (em kg.mol⁻¹) resultando no número de mols. Desconsiderando o enxofre (S), que segundo Russo (2005) é insignificante na constituição dos principais componentes dos RSU, a fórmula química empírica foi obtida dividindo-se o número de mols de cada elemento pelo menor número de mols obtido de acordo com a Equação (5).

$$I_E = \frac{n_E}{n_{\text{menor}}}$$

Equação (5)

Onde:

I_E : índice do elemento químico na fórmula química empírica(-);

n_E : o número de mols deste mesmo elemento (mol);

n_{menor} : menor número de mol obtido (mol).

De forma análoga, foram determinadas as fórmulas químicas empíricas das frações rápida e lentamente degradáveis considerando que papel, papelão e matéria orgânica são rapidamente degradáveis, e que embalagens multicamadas, madeira, têxteis, couros e borracha são lentamente degradáveis. Também, foi determinada, separadamente, a fórmula química da fração matéria orgânica.

Resultados e discussão

As composições qualitativas dos resíduos de Porto Alegre, em 1997 e 2010, e cuja destinação foi aterros sanitários são apresentadas na Figura 1.

Tanto em 1997 quanto em 2010 a fração com maior composição foi a matéria orgânica com 52.10 e 57.57%, respectivamente. Plásticos, papel e rejeitos com uma variação de 8 a 12% representaram as frações com maiores composições depois da matéria orgânica. A fração rapidamente degradável, composta por papel, papelão e matéria orgânica, correspondeu a 67% da composição qualitativa total.

O resultado da aplicação da matriz pedigree de Weidema (1998) modificada nas referências contendo a composição elementar de diferentes frações de resíduos sólidos é apresentado na Tabela 2. Para justificar as categorias que constam na tabela serão detalhadas as referências 1 e 7.

Na Tabela 2, a matriz pedigree para o primeiro artigo apresentado na referida tabela foi (1,1,3). Os dados de composição elementar apresentados por Ansah *et al.* (2016) são primários e referem-se a RSU e, portanto, justificam a atribuição 1 para a categoria confiabilidade. Na próxima categoria, correlação qualitativa, compararam-se as frações rapidamente degradáveis do

trabalho avaliado e dos resíduos de Porto Alegre em 1997 (REIS *et al.*, 2003) e 2010 (Fleck e Reis, 2011). A diferença entre ambas foi menor que 15%, portanto foi atribuído o valor 1 para a correlação qualitativa. Por fim, à categoria completeza o valor conferido foi 3, pois não há indicação do método de coleta de amostra, não sendo possível garantir a representatividade da amostra analisada.

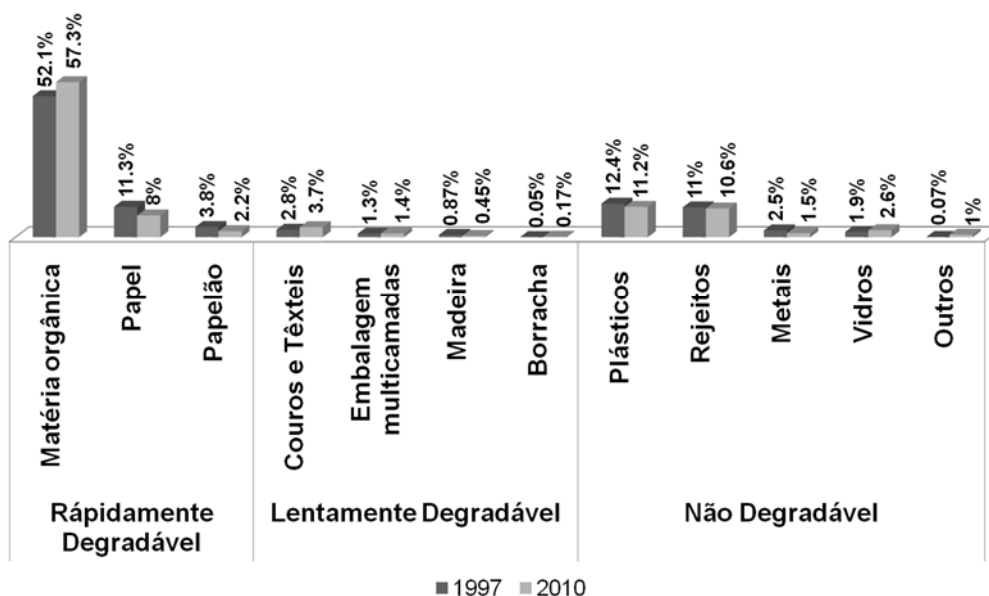


Figura 1. Composição qualitativa dos RSU de Porto Alegre destinados a aterros sanitários nos anos de 1997 e 2010
Fonte: Reis *et al.* (2006); Fleck e Reis (2011).

A referência 7 da Tabela 2, Tchobanoglous *et al.* (1993), obteve (5,2,5) na matriz pedigree modificada. Por apresentar dados de composição elementar secundários recebeu o primeiro “5”. A diferença com relação à fração rapidamente degradável de Porto Alegre foi cerca de 26%, resultando em um valor 2 para a correlação qualitativa. À completeza atribuiu-se um valor 5, pois não há informações da origem e do método de coleta das amostras. Da mesma forma como descrito para os trabalhos 1 e 7 da Tabela 2, os demais foram avaliados e classificados de acordo com a matriz pedigree modificada.

Apesar da melhor classificação na matriz, os artigos 12 e 15 não foram utilizados, pois não apresentaram a informação do teor de oxigênio. Da verificação das frações qualitativas contempladas nas referências bibliográficas avaliadas na Tabela 2, elaborou-se a Tabela 3. É necessário destacar da Tabela 3 que para a fração couros, apenas em Tchobanoglous *et al.* (1993)

foi possível obter a composição química exclusivamente de couros. As demais referências, quando trazem a informação, consideram a fração couros misturada com têxteis e borracha como apresentado, por exemplo, por Hla e Roberts (2015) e Themelis *et al.* (2002).

Tabela 2. Aplicação da matriz pedigree modificada em referências contendo a composição química elementar para diferentes frações de RSU.

Ordem	Referências	Indicadores da matriz pedigree modificada		
		Confiabilidade	Correlação Qualitativa	Completeza
1	Ansah <i>et al.</i> (2016)	1	1	3
2	SØrum <i>et al.</i> (2001)	2	5	4
3	Komilis <i>et al.</i> (2012)	2	5	4
4	Shi <i>et al.</i> (2016)	1	3	2
5	Hla e Roberts (2015)	1	3	2
6	Baawain <i>et al.</i> (2017)	1	4	1
7	Tchobanoglous <i>et al.</i> (1993)	5	2	5
8	Igoni <i>et al.</i> (2007)	1	3	2
9	SØrum <i>et al.</i> (2001)	2	5	4
10	Themelis <i>et al.</i> (2002)	3	2	5
11	Zhou <i>et al.</i> (2014)	5	1	5
12	Gidakos <i>et al.</i> (2006)	1	1	1
13	Wang e Nie (2001)	5	5	5
14	Arafat <i>et al.</i> (2015)	5	5	5
15	Koufodimos e Samaras (2002)	1	1	1
16	Lin <i>et al.</i> (2017)	2	5	4

Fonte: autoria própria

A fração rejeito foi considerada como papeis de uso sanitário devido a disponibilidade de dados para estes materiais. Para as frações embalagem multicamadas, rejeitos, isopor e inertes apenas uma referência disponibilizou a informação de composição química elementar conforme Tabela 3.

As referências 1 a 8 da Tabela 2 foram utilizadas para determinar a composição química elementar dos RSU de Porto Alegre e a umidade deles. Considerando que para cada fração qualitativa apenas o trabalho mais bem avaliado na matriz pedigree modificada foi utilizado como fonte do dado conforme apresentado nas Tabelas 4 e 5. O trabalho número 5 não apresentou dados referente a umidade das frações papelão, metais, têxteis e vidros. Neste caso, a referência 7 forneceu a umidade das frações tendo em vista que Baawain *et al.* (2017) determinaram a umidade total dos RSU analisados e encontraram valores dentro da faixa proposta por Tchobanoglous *et al.* (1993).

Tabela 3. Disponibilidade de dados da composição química elementar por fração qualitativa.

Fração Qualitativa	Referências (ordenadas de acordo com a Tabela 2)
Papel	1, 6, 7, 8, 10, 11, 13, 14 e 16
Papelão	6, 7 e 10
Embalagem Multicamadas	3
Metais	6, 7 e 10
Plásticos	7, 8, 10, 11 e 14
PVC	2, 9 e 11
Madeira	1, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 13, 14 e 16
Têxteis	6, 7, 10, 11, 13 e 14
Couros	7
Borracha	4, 7, 11 e 16
Vidros	6, 7 e 10
Isopor	4
Rejeito	3
Matéria Orgânica	5, 6, 7, 8, 11, 13, 14 e 16
Inertes	7

Fonte: autoria própria

As composições químicas elementares determinadas, para os anos de 1997 e 2010, são apresentadas nas Tabelas 4 e 5. Nestas tabelas a composição da fração matéria orgânica resulta da mistura de restos de alimentos e de jardim considerando-se 50% de cada material. O mesmo ocorre para as frações têxteis e couros da Tabela 4 que foram unidas em uma fração única a qual considerou-se contendo 50% de cada fração.

A partir dos dados da Tabela 4, a fórmula química empírica determinada para os resíduos de Porto Alegre, no ano de 1997, foi $C_{50.43}H_{80.45}O_{30.79}N$, enquanto as fórmulas empíricas para as frações rápida e lentamente degradáveis foram, respectivamente $C_{35.31}H_{59.36}O_{24.06}N$ e $C_{17.18}H_{28.65}O_{8.38}N$.

Quando determinada com a composição qualitativa de 2010 (Tabela 5) a fórmula química empírica do resíduo total obtida foi $C_{54.98}H_{86.33}O_{32.92}N$, para a fração rapidamente degradável foi $C_{33.10}H_{54.30}O_{21.50}N$ e para a lentamente degradável $C_{48.09}H_{75.43}O_{30.35}N$.

A composição química elementar da fração matéria orgânica dos resíduos gerados em Porto Alegre foi determinada analiticamente pelo Departamento Municipal de Limpeza Urbana (DMLU) do município no ano de 2010 e resultou na fórmula química empírica $C_{33.3}H_{57.6}O_{17}N$ (Porto Alegre, 2013; Fleck *et al.*, 2015). Com os dados da Tabela 5 a fórmula química empírica determinada, em

2010, para a fração matéria orgânica foi $C_{28,27}H_{43,44}O_{15,93}N$. Comparando a fórmula obtida analiticamente para a fração matéria orgânica ($C_{33,3}H_{57,6}O_{17}N$) com aquela determinada neste trabalho a partir de dados secundários ($C_{28,27}H_{43,44}O_{15,93}N$), observa-se que as fórmulas químicas são muito semelhantes. . As massas molares para a fração matéria orgânica considerando as fórmulas químicas $C_{28,27}H_{43,44}O_{15,93}N$ e $C_{33,3}H_{57,6}O_{17}N$ são, respectivamente 652,21 e 744,02 g/mol. A massa molar resultante da determinação analítica da fração matéria orgânica têm aproximadamente 92 g/mol, ou 12,3%, a mais que a obtida a partir dos dados da matriz pedigree modificada.

Tabela 4. Composição química elementar dos RSU enviados a aterro sanitário no ano de 1997.

Fração Qualitativa	Umidade (%)	Composição elementar (% em peso - base seca)					Referência (1)
		Carbono	Hidrogênio	Oxigênio	Nitrogênio	Enxofre	
Papel	5.95	41.43	6.87	49.83	1.01	0.86	1
Papelão	5.2	38.36	5.66	38.79	0.43	0.57	6
Embalagem multicamadas	8	43.1	6.8	34.7	0.13	0	3
Metais	3	4.25	0.27	0	0.44	0	6
Plásticos	0.3	56	6	26	0	0	8
Madeira	9.31	45.69	7.57	56.16	1.89	1.01	1
Têxteis e Couro	10	53.16	6.7	25.78	5.34	0.48	6, 7
Borracha	9.3	43.94	5.13	49.64	0.18	0.01	4
Vidro	2	0.4	0.1	0	0.13	0	6
Rejeito	5	41.8	6.31	47.8	0.083	0	3
Matéria orgânica	65.25	48	6.12	35.64	1.96	0.21	5
Inertes	8	26.3	3	2	0.5	0.2	7

(1) Os números indicativos das referências correspondem à ordem de sua apresentação na Tabela 2.

Fonte: Ansah et al. (2016); Baawain et al. (2017); Hla e Roberts (2015); Igoni et al. (2007); Komilis et al. (2012); Shi et al. (2016); Tchobanoglous et al. (1993).

A correlação qualitativa foi decisiva para a escolha da melhor referência a ser usada. Com a inclusão deste indicador foi possível coletar dados mais condizentes com a realidade de Porto Alegre.

Os resultados indicam que a utilização de dados da literatura para determinar a composição elementar de RSU é uma alternativa viável para estudos com resíduos gerados em períodos anteriores o que torna impossível a amostragem destes.

A diferença nas fórmulas químicas empíricas para os dois anos avaliados deve-se à diferença na composição qualitativa. É possível observar o efeito da composição qualitativa na fórmula química empírica em outros trabalhos como, por exemplo, em Baawain *et al.* (2017), que obtiveram para os resíduos de Muscat, a fórmula $C_{125}H_{230}O_{70}N$. A composição elementar média utilizada por estes autores não difere muito daquela obtida para Porto Alegre, porém as fórmulas químicas apresentam diferenças, provavelmente devido às diferenças na composição qualitativa dos resíduos. Em Porto Alegre, no ano de 2010, aproximadamente 57% dos resíduos eram representados pela fração matéria orgânica, enquanto que em Muscat, no ano de 2015 esta fração representava, apenas cerca de 14%. Ao olharmos para os plásticos, Porto Alegre apresentava 11.23% desta fração e Muscat 29%. Os plásticos representam uma das frações qualitativas com o maior teor de carbono (Komilis *et al.*, 2012). Este fato aliado com a sua maior proporção na composição qualitativa podem resultar em uma fórmula química com um maior número de átomos do elemento.

Tabela 5. Composição química elementar dos RSU enviados a aterro sanitário no ano de 2010.

Fração Qualitativa	Umidade (%)	Composição elementar (% em peso-base seca)					Referência (1)
		Carbono	Hidrogênio	Oxigênio	Nitrogênio	Enxofre	
Papel	5.95	41.43	6.87	49.83	1.01	0.86	1
Papelão	5.2	38.36	5.66	38.79	0.43	0.57	6
Embalagem multicamadas	8	43.1	6.8	34.7	0.13	0	3
Metais	3	4.25	0.27	0	0.44	0	6
Plásticos	0.3	56	6	26	0	0	8
PVC	0	41.4	5.3	5.83	0.04	0.03	2
Madeira	9.31	45.69	7.57	56.16	1.89	1.01	1
Têxteis	10	46.32	5.45	39.97	0.69	0.57	6
Couros	10	60	8	11.6	10	0.4	7
Borracha	9.3	43.94	5.13	49.64	0.18	0.01	4
Vidro	2	0.4	0.1	0	0.13	0	6
Rejeito	5	41.8	6.31	47.8	0.083	0	3
Isopor	0.45	85.4	9.67	0.58	3.02	0.4	4
Matéria orgânica	65.25	48	6.12	35.64	1.96	0.21	5
Inertes	8	26.3	3	2	0.5	0.2	7

(1) Os números indicativos das referências correspondem à ordem de sua apresentação na Tabela 2.

Fonte: Anshah *et al.* (2016); Baawain *et al.* (2017); Hla e Roberts (2015); Igoni *et al.* (2007); Komilis *et al.* (2012); Shi *et al.* (2016); Sørnum *et al.* (2001); Tchobanoglous *et al.* (1993).

A fórmula química do resíduo permitirá estimar as emissões atmosféricas em aterros sanitários e sistemas de degradação anaeróbia e o requerimento de oxigênio em processos de compostagem. Para estas estimativas Tchobanoglous *et al.* (1993) apresentam metodologias baseadas na fórmula química de RSU.

Russo (2005) utilizou a metodologia de Tchobanoglous *et al.* (1993) para estimar a geração de CH₄ e CO₂ em um aterro sanitário em Matosinhos, Portugal. Na cidade paulista de Rio Claro, Braz e Silva (2001) também aplicaram este modelo de geração de gases aos resíduos depositados no aterro sanitário da cidade.

Arafat e Jijakli (2013) avaliaram, a partir da fórmula química dos resíduos, o potencial da gaseificação para produção de energia e tratamento de RSU.

É necessário destacar que para cálculos mais confiáveis de geração de gases em aterros sanitários ou mesmo para avaliação de processos de tratamento de resíduos seria indispensável uma análise dos RSU gerados em Porto Alegre. Apenas, assim, pode-se garantir que os dados refletem a realidade e trazem resultados coerentes.

Conclusões

A utilização de dados secundários mostrou-se viável para estudos com resíduos gerados em períodos anteriores e cuja amostragem não é mais possível.

A matriz pedigree modificada mostrou-se uma metodologia adequada para a escolha de dados secundários de composição química de RSU. A substituição das correlações temporal, geográfica e tecnológica pela correlação qualitativa foi essencial para obtenção de dados mais adequados.

A aplicação dos dados de composição química elementar secundários, resultou na fórmula química da fração matéria orgânica C_{28,27}H_{43,44}O_{15,93}N, condizente com aquela determinada analiticamente C_{33,3}H_{57,6}O₁₇N. As massas molares para estas duas situações apresentaram 92 g/mol de diferença. Isto indica que a proposta de modificação na matriz pedigree possibilitou a escolha de dados que resultou em uma composição elementar coerente.

As fórmulas químicas dos RSU são afetadas pelas composições qualitativa e química elementar dos mesmos. A semelhança das composições qualitativas e elementares resultam em fórmulas químicas similares para diferentes resíduos. A predominância de frações qualitativas ricas em determinado elemento resulta em uma fórmula química do resíduo com elevado teor deste elemento.

As fórmulas químicas dos resíduos têm aplicação na estimativa da emissão de gases em aterros sanitários e sistemas de digestão anaeróbia, no cálculo do requerimento de oxigênio em processo de compostagem e, ainda, na determinação do potencial de produção de energia a partir da gaseificação de RSU.

Para cálculos mais confiáveis de geração de gases em aterros sanitários, ou mesmo para avaliação de processos de tratamento de resíduos, seria indispensável uma análise dos RSU gerados em Porto Alegre de maneira a garantir que os dados refletem a realidade e são coerentes.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Referências bibliográficas

- Ansah, E., Wang, L., Shahbazi, A. (2016) Thermogravimetric and calorimetric characteristics during co-pyrolysis of municipal solid waste components. *Waste Management*, **56**(2016), 196-206. Acesso em 02 de agosto de 2017, disponível em <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27324928>
- Arafat, H. A., Jijakli, K. (2013) Modeling and comparative assessment of municipal solid waste gasification for energy production. *Waste Management*, **33**(2013), 1704-1713. Acesso em 23 de agosto de 2017, disponível em <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23726119>
- Arafat, H. A., Jijakli, K., Ahsan, A. (2015) Environmental performance and energy recovery potential of five processes for municipal solid waste treatment. *Journal of Cleaner Production*, **105** (2015), 233-240. Acesso em 12 de setembro de 2016, disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652613008470?via%3Dihub>
- Baawain, M., Al-Mamun, A., Omidvarborna, H., Al-Amri, W. (2017) Ultimate composition analysis of municipal solid waste in Muscat. *Journal of Cleaner Production*, **148**(2017), 355-362. Acesso em 14 de julho de 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617302172?via%3Dihub>
- Brasil, Presidência da República, Casas Civil (2010) *Lei nº 12.305, 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.* Publicação Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília-DF, 02 de agosto de 2010. Acesso em 01 de novembro de 2016. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/12305.htm
- Braz, J. A., da Silva, C. L.(2001) Avaliação Do Potencial Energético Do Biogás De Aterro Sanitário Gerado Pelos Resíduos Sólidos Domésticos Do Município De Rio Claro. *21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. João Pessoa, 2001.
- Fleck, E., Reichert, G. A., Rodrigues, A. B.Fernandes, I. D.(2015) Estimativa Da Composição Elementar Do Resíduo Sólido Domiciliar De Porto Alegre , RS. *28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Rio de Janeiro: 2015.
- Fleck, E., Reis, M. F. P. (2011) Caracterização Gravimétrica Dos Resíduos Sólidos Domiciliares de Porto Alegre. *26º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Porto Alegre-RS, 2011.

- Gidakakos, E., Havas, G., Ntzamilis, P. (2006) Municipal solid waste composition determination supporting the integrated solid waste management system in the island of Crete. *Waste Management*, **26**(2006), 668-679. Acesso em 26 de julho de 2017, disponível em :
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X05002011?via%3Dihub>
- Hla, S. S., Roberts, D. Characterisation of chemical composition and energy content of green waste and municipal solid waste from Greater Brisbane, Australia.(2015) *Waste Management*, **41**(2015), 12-19. Acesso em 14 de fevereiro de 2017, disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X15002330?via%3Dihub>
- Igoni, A. H. Ayotamuno, M. J., Ogaji, S. O. T., Probert, S. D. (2007) . Municipal solid-waste in Port Harcourt, Nigeria. *Applied Energy*, **84**(2007), 664-670. Acesso em 17 de julho de 2017. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261906001644>
- Komilis, D.Evangelou, A., Giannakis, G., Lymperis, C. (2012) Revisiting the elemental composition and the calorific value of the organic fraction of municipal solid wastes. *Waste Management*, **32**(2002), 372-381. Acesso em 26 de julho de 2017, disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X11004983?via%3Dihub>
- Koufodimos, G., Samaras, Z. (2002) Waste management options in southern Europe using field and experimental data. *Waste Management*, **22**(2002), 47-59. Acesso em 03 de agosto de 2017, disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X01000319>
- Lagerkvist, A., Ecke, H., Christensen, T. H. (2011) Waste Characterization: Approaches and Methods. In: CHRISTENSEN, T. H. (Ed.) *Solid Waste Technology and Management - V.I.* [s.l.] John Wiley and Sons Ltd, 63-84.
- Lin, Y. Ma, X., Peng, X., Yu, Z. (2017) Hydrothermal carbonization of typical components of municipal solid waste for deriving hydrochars and their combustion behavior. *Bioresource Technology*, **243** (2017), 539-547, 2017. Acesso em 02 de agosto de 2017, disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852417310210?via%3Dihub>
- Philippe, F., Culot, M. (2009) Household solid waste generation and characteristics in Cape Haitian city, Republic of Haiti. *Resources, Conservation and Recycling*, **54** (2), 73-78. Acesso em 02 de agosto de 2017, disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344909001359>
- Porto Alegre. Prefeitura Municipal de Porto Alegre. *Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos*. 2013, 393 p.
- Reis, M. F. P., Ellwanger, R. M., Gonçalves Junior, N. E., Onofrio, E. T. (2003) Caracterização dos resíduos sólidos domiciliares do município de Porto Alegre/RS - ano 2002. Em: *I Congresso Brasileiro de Agroecologia*. Porto Alegre-RS: EMATER/RS, 2003
- Riber, C., Petersen, C., Christensen, T. H. (2009) Chemical composition of material fractions in Danish household waste. *Waste Management*, **29**(4), 1251-1257. Acesso em 02 de agosto de 2017, disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X08003322?via%3Dihub>
- Russo, M. A. T. (2005) *Avaliação dos processos de transformação de resíduos sólidos urbanos em aterro sanitário*. Doutorado em Engenharia Civil. Escola de Engenharia. Universidade do Minho, Minho, 298 pp.
- Shi, H. Mahinpey, N., Aqsha, A., Silbermann, R. (2016) Characterization, thermochemical conversion studies, and heating value modeling of municipal solid waste. *Waste Management*, **48**(2016), 34-47. Acesso em 26 de julho de 2017, disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X15301458?via%3Dihub>
- Sørum, L. Skreiberg, Ø., Glarborg, P., Jensen, A., Dam-Johansen. (2001) Formation of NO From Combustion of Volatiles From Municipal Solid Wastes. *Combustion and flame*, **123**(2001), 195-212. Acesso em 03 de agosto de 2017, disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001021800001942>

- Sørum, L., Grønli, M. G., Hustad, J. E. (2001) Pyrolysis characteristics and kinetics of municipal solid wastes. *Fuel*, **80**(2001), 1217-1227. Acesso em 26 de julho de 2017, disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236100002180>
- Souza, R. C. C. de, Baettker, E. C., Nagalli, A., Izzo, R. L. dos S. (2014) . Métodos estimativos da geração e composição de resíduos sólidos urbanos: uma revisão. *Revista Engenharia e Construção Civil*, **1**(2), 24-39. Acesso em 26 de outubro de 2016, disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/b265/4231b06bd9e8cd91ee85e20b2a3da594d0ed.pdf>
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., Samuel, V. (1993) Physical, Chemical, And Biological Properties of Municipal Solid Waste. In: *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues*. McGraw Hill, Boston, 1993.
- Themelis, N. J., Kim, Y. H., Brady, M. H.(2002) Energy recovery from New York City municipal solid wastes. *Waste Management & Research*, **20**(2002), 223-233. Acesso em 02 de agosto de 2017, disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/0734242X0202000303>
- Wang, H., Nie, Y. (2001) Municipal Solid Waste Characteristics and Management in China. *Journal of the Air & Waste Management Association*, **51**, 250-263. Acesso em 31 de julho de 2017, disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11256500>
- Weidema, B. P.(1998) Multi-User Test of the Data Quality Matrix for Product Life Cycle Inventory Data. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, **3**(5), 259-265. Acesso em 09 de maio de 2018, disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02979832>
- Weidema, B. P., Wesnaes, M. S. (1996) Data quality management for life cycle inventories-an example of using data quality indicators*. *Journal of Cleaner Production*, **4**(3-4), 167-174. Acesso em 09 de maio de 2018, disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652696000431>
- Wilson, D. C., Rodic, L., Scheinberg, A., Velis, C. A., Alabaster, G. (2012) . Comparative analysis of solid waste management in 20 cities. *Waste Management & Research*, **30**(3), 237-254. Acesso em 31 de julho de 2017, disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X12437569>
- Zhou, H., Meng, A., Long, Y., Li, Q., Zhang, Y. (2014) An overview of characteristics of municipal solid waste fuel in China: Physical, chemical composition and heating value. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **36**(2014), 107-122. Acesso em 14 de fevereiro de 2017, disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114002512>