

Modelos de localização de facilidades para uma central de biodigestão compartilhada

Facilities location models for a shared biodigestion plant

Alex Sander Lyra¹, Paulo André de Oliveira², Ricardo Ghantous Cervi³, Helenice de Oliveira Florentino Silva⁴, Sergio Augusto Rodrigues⁵

RESUMO: A logística cada vez mais se mostra como essencial para o agronegócio, dado que os produtores rurais se preocupam com a minimização dos custos relacionados aos diversos processos nas propriedades. Os processos logísticos envolvem custos econômicos e ambientais, devido ao alto consumo de combustível. Este artigo visa a investigação da melhor localização para implantação de uma central de biodigestão compartilhada, de forma a minimizar as distâncias a serem percorridas pelos veículos que buscarão os resíduos orgânicos em diferentes localidades, visando o abastecimento dos biodigestores para produção de biogás. A metodologia proposta para esta abordagem consiste na aplicação de dois métodos, o método de centro de gravidades e o de localização de facilidade (*p*-medianas). Foram utilizados dados de coordenadas geográficas (Latitude e Longitude) e de distâncias entre os produtores rurais considerados. Tal metodologia possibilitou identificar opções de locais para instalação de uma central de biodigestão compartilhada entre produtores rurais de suinocultura na região de Toledo-PR, de forma a otimizar as distâncias e os volumes de dejetos coletados e enviados para esta central. Os resultados evidenciaram que esta metodologia facilita o processo de coleta e destinação de dejetos gerados nas propriedades, fazendo com que os produtores minimizem os custos de transporte e a distância total percorrida, ao mesmo tempo atendendo toda a demanda.

Palavras-chave: Centro de gravidade, *p*-medianas. Dejetos rurais. Modelagem. Otimização

ABSTRACT: Logistics is increasingly shown to be essential for agribusiness, given that rural producers are concerned with minimizing costs related to the various processes on the properties. Logistic processes involve economic and environmental costs due to high fuel consumption. This article aims to investigate the best location for the implementation of a shared biodigestion center, in order to minimize the distances to be covered by vehicles that will collect organic waste in different locations, aiming at supplying biodigesters for biogas production. The methodology proposed for this approach consists of applying two methods, the center of gravity method and the facility location method (*p*-medians). Data from geographic coordinates (Latitude and Longitude) and distances between the considered rural producers were used. This methodology made it possible to identify local options for the installation of a shared biodigestion center among rural swine producers in the region of Toledo-PR, in order to optimize the distances and volumes of waste collected and sent to this center. The results showed that this methodology facilitates the process of collecting and disposing of waste generated on the properties, causing producers to minimize transport costs and the total distance covered, while meeting all demand.

Keywords: Center of gravity, *p*-median. Rural waste. Modeling. Optimization.

Autor correspondente: Sergio Augusto Rodrigues

E-mail: sergio.rodriques@unesp.br

Recebido em: 09/02/2023

Aceito em: 25/07/2023

¹ Mestre, Programa de Energia na Agricultura, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, Botucatu (SP), Brasil.

² Doutor, Economista, Agronegócio/Faculdade de Tecnologia de Botucatu (SP), Brasil.

³ Doutor, Administrador, Departamento de Engenharia/ Instituto de Ciências e Engenharia – Campus de Itapeva, Itapeva (SP), Brasil.

⁴ Professora Associada junto ao Departamento de Biodiversidade e Bioestatística do Instituto de Biociências da UNESP, Botucatu (SP), Brasil.

⁵ Professor Doutor, Estatística e Probabilidade, curso de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia, Departamento de Bioprocessos e Biotecnologia/ Faculdade de Ciências Agrônomicas – Campus de Botucatu, Botucatu (SP), Brasil.



INTRODUÇÃO

No que tange ao desenvolvimento sustentável, no setor de produção animal busca-se aumentar a eficiência de produção e redução de perdas e riscos por meio de tecnologias limpas, como tratamento microbiológico de resíduos orgânicos, podendo ser utilizado, neste sentido, biodigestores com cogeração de biogás. O uso de biodigestores na promoção da sustentabilidade possui papéis de recuperação e preservação ambientais, o que acarreta melhorias na qualidade de vida das comunidades (populações humana, animal, vegetal e microbiota) que habitam o entorno de fazendas produtoras de resíduos. (Camargo *et al.*, 2018; Teixeira *et al.*, 2019; Park, Szmerekovsky; Dybing, 2019).

Em fazendas colombianas de pequena escala, Pérez *et al.* (2014) observaram que a implementação de digestores reduziu em até 80% os impactos ambientais potenciais associados ao manuseio de esterco, combustível e uso de fertilizantes, devido principalmente à redução do uso de GLP e fertilizantes sintéticos, que foram substituídos por biogás e digerido.

Em um sistema de gestão de resíduos sólidos municipais, Yadav *et al.* (2017) destacaram que os tomadores de decisão devem desenvolver uma visão dos processos, ou seja, métodos de geração, coleta, transporte, processamento e descarte de resíduos. Do mesmo modo, é necessário promover a interação entre produtor rural e unidades biodigestoras e, para isto, torna-se importante estudos de modelos de localização de facilidades e sistemas de roteirização de veículos transportadores de resíduos suínolas.

Uma utilização sustentável dos dejetos orgânicos consiste na sua transformação em biogás e biofertilizantes, produtos que podem ser consumidos *in loco* ou investimento que pode ser comercializado na forma de gás ou energia elétrica. Mas, a coleta destes resíduos para serem utilizados em biodigestores é um processo caro economicamente e ambientalmente, devido ao consumo de combustíveis dos caminhões de transporte. Uma forma de diminuir estes custos, é construir unidades centrais de biodigestão com a menor distância possível dos pontos de coleta, fazendo com que a distância percorrida pelos caminhões seja mínima (Pereira *et al.*, 2012; Chukwuma, 2019)

Dentro das características de localização de instalações é importante a adoção de ferramentas ou métodos que auxiliam as decisões a serem tomadas quanto ao espaço geográfico, o método centro de gravidade é definido pelas coordenadas geográficas de um local central entre diferentes pontos/localizações, considerando a minimização do custo de transporte para

sua instalação, observando as ofertas e demandas de cada localização que irá utilizar esse centro (Martins; Laugeni, 2015; Oi *et al.*, 2017).

Outro método que é utilizado para encontrar a melhor posição geográfica dentro de uma região refere-se ao método de localização de instalações ou facilidades *p-mediana*. É importante, na execução deste método, entender as possíveis restrições que possam apresentar tais como: tempo de percurso do veículo, distância entre os pontos de coleta ou entrega, capacidade veicular, entre outros (Bojesen, Birkin; Clarke, 2014; Hakimi, 1964).

Arenales *et al.* (2011) destacaram que a localização de facilidades é um aspecto crítico do planejamento estratégico de empresas privadas e públicas. De acordo com Oliveira *et al.* (2015), os problemas de localização de facilidades analisam as decisões, sobre onde devem ser localizadas facilidades, considerando os clientes que podem ser atendidos de forma otimizada adotando alguns critérios como por exemplo a distância entre a facilidade e o cliente.

A modelagem matemática para localização de facilidades pode ser aplicada em diversas situações. Oliveira, Sá e Martins (2020) estudaram pontos estratégicos para facilitar o deslocamento de veículos para o atendimento médico em um espaço geográfico. Fardin *et al.* (2018) observaram que o modelo de localização *p-mediana* foi eficiente para determinar a melhor localização de aeródromos para adubação em plantações de eucalipto, reduzindo os custos logísticos de aplicação. Em outro enfoque ocorre para redução de custos e aumentar a competitividade para produtores de tabaco, como demonstrou Winarso *et al.* (2019), ao encontrar a melhor localização dos armazéns de tabaco em Bokabo na Indonésia, na comparação de três métodos de instalação de localização: *p-mediana*, *p-centro*, e a cobertura máxima. Já Jesus *et al.* (2021a) apresentaram uma revisão sistemática da literatura para levantar a existência de áreas a serem exploradas em relação a modelagem para identificação de locais ótimos para instalação de biodigestores, porém, considerando não somente aspectos técnicos visando a minimização de custos e/ou distâncias, mas também os aspectos econômico-ambientais-sociais.

O objetivo deste trabalho foi investigar técnicas matemáticas e computacionais para determinação da melhor localização para instalação de uma central de biodigestão compartilhada e aplicar esta metodologia a uma área rural de suinocultura na região de Toledo-PR. Para atender este objetivo propôs-se uma metodologia baseada nos métodos de centro de gravidade e de localização de facilidades *p-medianas*.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados dados de posicionamento geográfico (latitude e longitude) de uma amostra com 79 produtores de suínos, sorteados aleatoriamente do levantamento realizado por Pereira (2009) com 380 produtores da região de Toledo (PR). A produção total de resíduos (dejetos) desta amostra de produtores foi de aproximadamente 24.456 toneladas ao mês.

Para localização da melhor posição de uma central de biodigestão compartilhada entre estes produtores de suínos para receber os dejetos coletados, foram utilizados os seguintes modelos de otimização: o método centro de gravidade, localização de ponto central pelo centro de gravidade, e o método de localização de facilidades de *p*-medianas (Hakmi, 1964 e 1965; Christofides, 1975), com diferentes cenários de ponderação para minimização. No método centro de gravidade e localização de ponto central pelo centro de gravidade, a obtenção da matriz de distâncias foi baseada nas coordenadas geográficas, a partir das quais calculou-se as distâncias euclidianas. Já para o método de facilidades utilizou-se das distâncias de *haversine* (Sinnott, 1984), a qual resulta em distâncias entre pontos geográficos baseados na latitude e longitude. Tanto o cálculo das distâncias euclidianas, usado no método de centro de gravidade, quanto das distâncias de *haversine*, são opções para situações em que não há informações das distâncias reais entre os pontos (Maria *et al.*, 2020).

Na aplicação do método centro de gravidade, adotou-se somente as coordenadas geográficas x_i e y_i (latitude e longitude), o volume transportado e custo de transporte por unidade de volume adaptados de Pereira (2009), o qual adotou o veículo T24 com custo por quilômetro de 1,53 R\$. km^{-1} e um custo por tonelada e km de 0,151 R\$/ (km x tonelada).

2.1 CENTRO DE GRAVIDADE

O modelo de centro de gravidade foi utilizado para identificação da localização de uma central de biodigestão compartilhada para n produtores rurais, buscando minimizar o custo de transporte para sua instalação, observando a disponibilidade de resíduos e capacidades dos caminhões de coleta. Este modelo estima as coordenadas \bar{x} (longitude) e \bar{y} (latitude) do local de menor custo de transporte para a instalação da localização central, conforme as Equações (1) e (2) (Martins; Laugeni, 2015).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i C_i x_i}{\sum_{i=1}^n V_i C_i} \quad (1)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i C_i y_i}{\sum_{i=1}^n V_i C_i} \quad (2)$$

sendo V_i sendo o volume de dejetos disponível no local i (resíduo disponível para coleta na localidade i); C_i o custo associado à unidade de volume transportado do local i ; x_i e y_i as coordenadas de longitude e latitude do local i respectivamente, $i=1, \dots, n$.

2.2 LOCALIZAÇÃO DE PONTO CENTRAL PELO CENTRO DE GRAVIDADE

O modelo de localização de ponto central usando o centro de gravidade, para a localização de uma central de biodigestão compartilhada, é uma adaptação do método de centro de gravidade, onde a localização final escolhida é um dos pontos ou propriedades existente no estudo (Ballou, 2006; Oliveira *et al.*, 2015; Aquino *et al.*, 2021), ou seja, utiliza-se as m localizações das propriedades dos produtores que compartilharão a central de biodigestão no processo de minimizar das distâncias (n pontos de coleta de resíduo). O objetivo é a minimização (*min*) do custo total de transporte (TC), o qual é dado pela soma dos produtos entre o volume de carga transportada, o custo unitário de transporte e a distância euclidiana percorrida entre o ponto de coleta de resíduo i e biodigestor, conforme Equação (3).

$$\min TC = \sum_{i=1}^n V_i C_i d_i \quad (3)$$

sendo TC o custo total de transporte que se deseja minimizar (*min*); V_i o volume de resíduo gerado no ponto i ; C_i o custo unitário de transporte de um quilograma de dejetos do ponto i e d_i a distância do ponto i até o local de instalação do biodigestor.

Para identificação do local de instalação do biodigestor, utilizou-se as Equações (4), (5) e (6).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i C_i x_i / d_i}{\sum_{i=1}^n V_i C_i / d_i} \quad (4)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i C_i y_i / d_i}{\sum_{i=1}^n V_i C_i / d_i} \quad (5)$$

$$d_i = \sqrt{(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2}, i = 1, \dots, n \quad (6)$$

sendo d_i as distâncias euclidianas entre cada propriedade rural (localizada nas coordenadas x_i e y_i) e o centro de gravidade (localizado nas coordenadas \bar{x} e \bar{y}), com $i = 1, \dots, n$, sendo n representando o total de propriedades do estudo.

Ballou (2006) destacou que a solução de problemas de localização única do centro de gravidade, considerando a posição de uma das localidades existentes, é baseada nas seguintes etapas:

1. A partir das coordenadas (latitude e longitude), x_i e y_i , dos volumes e os custos de transporte, obtém-se as coordenadas central inicial (\bar{x} , \bar{y}), a partir da fórmula do centro de gravidade usando as Equações (1) e (2).

2. Usar os valores encontrados das coordenadas iniciais (\bar{x} e \bar{y}) para calcular a distância d_i , usando a Equação (6).

3. Substituir d_i nas Equação (4) e (5) para encontrar as coordenadas revisadas \bar{x} e \bar{y} .

4. Recalcular d_i a partir das coordenadas revisadas da etapa 3.

5. Repetir as etapas 2 e 3 até que as coordenadas \bar{x} e \bar{y} não mudem por sucessivas iterações.

6. Por fim, calcular o custo total de transporte utilizando a Equação (3).

O centro de gravidade busca o equilíbrio da distribuição dos pontos, ponderado pelo volume e custo. Já o modelo de localização de ponto central pelo centro de gravidade busca, dentre os diversos pontos avaliados, um ponto da rede de propriedades que representa o centro de gravidade ponderado pelo volume e custo unitário por quilograma de dejetos, mas que minimiza o custo total de transporte, ou seja, ponderando também pelo inverso da distância euclidiana entre a propriedade e o centro de gravidade.

2.3 LOCALIZAÇÃO DE FACILIDADES *P-MEDIANAS*

Modelos de otimização discreta podem ser utilizados para resolver problemas de localização de facilidades (Arenales *et al.*, 2011). De acordo com Gwalani, Tiwari e Mikler (2021), o problema de localização de facilidades consiste em posicionar uma facilidade em uma região, de modo a minimizar a soma de todas as distâncias entre a mesma e os pontos de demanda. Para um pequeno número de facilidades, determinar a solução ótima do problema exige pouco custo computacional. Quando o número de facilidades e localidades aumentam, a

complexidade computacional também aumenta, demandando recursos computacionais mais avançados.

Os problemas de localização de facilidades são também conhecidos como problemas de localização-alocação e estão relacionados com a determinação da localização de uma facilidade que deverá servir a outros pontos que possuirão localizações fixas, de forma a otimizar um dado critério (Arakaki, 2006; Chukwuma, 2019; Gwalani; Tiwari; Mikler, 2021).

Entre estes modelos, destaca-se o procedimento de *p*-medianas (Hakmi, 1964, 1965; Christofides, 1975), no qual um número pré-especificado de facilidades precisa ser localizado de forma a minimizar a distância total ponderada (D) entre os pontos de uma área, como por exemplo, o propósito desse artigo onde tem-se as distâncias entre produtores rurais e o custo de transporte até uma facilidade, definida aqui como uma central de biodigestão a ser compartilhada pelos produtores.

O problema de *p*-medianas para localização de facilidades é descrito pelo modelo matemático expresso pelas Equações (7) a (11).

$$\min D = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} w_i d_{ij} x_{ij} \quad (7)$$

Sujeito a

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = 1 \quad (8)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = p \quad (9)$$

$$x_{ij} \leq x_{jj}; i, j \in N \quad (10)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}; i, j \in N \quad (11)$$

sendo que $N = \{1, \dots, n\}$: conjunto de pontos de coleta de resíduo; $i \in N$ representa uma determinada propriedade ou vértice; $j \in N$ uma instalação em potencial ou mediana; p é o número de instalações de serviço ou medianas a serem localizadas; w_i é o peso ou importância da propriedade i ; $[d_{ij}]_{n \times n}$ é uma matriz simétrica de distâncias.

Neste trabalho optou-se por utilizar as distâncias de *haversine* (Sinnott, 1984) de cada propriedade i à instalação j , com $d_{ii} = 0$; $[x_{ij}]_{n \times n}$ uma matriz de alocação de cada propriedade

i ; $x_{ij} = 1$: se a propriedade i é alocada na instalação j ; $x_{ij} = 0$ em caso contrário; $x_{jj} = 1$: indica que j é uma mediana; $x_{jj} = 0$ em caso contrário.

A Equação (7) é a função objetivo, a qual busca minimizar as distâncias ponderadas entre produtores e as facilidades e está sujeita às restrições. A restrição (8) indica que cada cliente é alocado a uma única instalação, já a restrição (9) é necessária para garantir que somente as facilidades oferecem o serviço proposto. As restrições (10) indicam que um cliente somente é atendido em uma facilidade; e, as restrições (11) definem as variáveis de decisão como binárias.

A aplicação do método *p-medianas* para a localização otimizada de construção de uma central de biodigestão compartilhada foi realizada em dois cenários, os quais estão descritos a seguir.

Cenário 1: Minimizar as distâncias, sem considerar a demanda e custo de transporte

Neste caso, a função objetivo descrita pela Equação (12).

$$\min D = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} w_i d_{ij} x_{ij} \quad (12)$$

com $w_i = 1$, portanto tem-se que os pontos/produtores tem o mesmo peso no processo de minimização. d_{ij} são as distâncias de *haversine* entre o produtor i e o produto j e $x_{ij} \in \{0, 1\}$; $i, j \in N$, uma variável binária indicando que a propriedade i poderá ($x_{ij} = 1$) ou não ($x_{ij} = 0$) enviar dejetos a central de biodigestão localizado na propriedade j .

Cenário 2: Minimizar as distâncias percorridas ponderado por suas respectivas demandas

Neste caso, a função objetivo é descrita pela Equação (13).

$$\min D = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} w_i d_{ij} x_{ij} \quad (13)$$

com w_i representando as demandas de cada propriedade rural ($i = 1, \dots, n$), d_{ij} as distâncias de *haversine* e x_{ij} uma variável indicando a propriedade i poderá ($x_{ij} = 1$) ou não ($x_{ij} = 0$) enviar dejetos a central de biodigestão localizado na propriedade j .

Para resolução deste problema, considerando os dois cenários, foi utilizado a heurística Tbart, algoritmo para resolução do problema *p-mediana* proposto por Teitz e Bart (1968), o qual, a partir de conjunto de pontos, visa encontrar um subconjunto de tamanho *p*, de forma que as distâncias somadas de qualquer ponto no conjunto até o ponto mais próximo em *p* sejam minimizadas. O algoritmo Tbart é umas das principais heurísticas clássicas utilizado para resolução do problema de *p-medianas* (Teitz; Bart, 1968; Um; Tong, 2020).), o qual pode ser classificado com um problema NP-difícil, sendo um desafio sua resolução (Kariv; Hakimi, 1979)

O algoritmo parte de uma solução inicial viável e considera que todos os vértices, neste caso produtores, são candidatos aptos a ser um ponto *p* (central). Desta forma o algoritmo determina se a nova configuração é melhor que a anterior, e conseqüentemente a usará para como solução inicial na iteração seguinte. No caso desse estudo, será considerado apenas um problema de alocação em um ponto central para diversos pontos de demanda, para operacionalização desse algoritmo foi utilizado o pacote “*tbart*” (Brunsdon, 2015).

Em todas as situações foram utilizados métodos computacionais interligando o ambiente computacional R *Development Core Team* (R Core Team, 2020) e planilhas eletrônicas, juntamente com ferramentas do *Google Maps*.

3 RESULTADO E DISCUSSÃO

Na Figura 1 podem ser observadas as posições geográficas, dadas pelo *Google Maps*, das 79 propriedades produtoras de suínos utilizados neste estudo.

neste estudo, por considerar a curvatura da Terra, diferentemente da distância euclidiana. Segundo Silva (2020) as distâncias baseadas na fórmula de *haversine* são bastante utilizadas em navegação marítima, fornecendo distâncias entre dois pontos de uma esfera a partir de suas latitudes e longitudes, tendo como embasamento matemático a Lei dos Cossenos, considerando no modelo a curvatura da Terra. É um caso especial de uma fórmula mais geral de trigonometria esférica, a lei dos *haversine*.

Franco e Steiner (2022) também utilizaram a distância de *haversine* entre os centroides de municípios na modelagem matemática visando otimizar o transporte de resíduos urbanos do estado do Paraná, minimizando o custo para construção de aterros. No entanto, visando encontrar grupos contíguos, a distância de *haversine* foi utilizada como uma variável de custo no problema *p-mediana*, e as distâncias rodoviárias obtidas pelo Google para construção da matriz de distâncias.

Para o modelo de localização de facilidades *p-medianas* foram utilizados dois cenários distintos. No Cenário 1, o qual considerou-se apenas as distâncias de *haversine*, ou seja, nenhum ponderador foi utilizado, foi encontrado como melhor posição o ponto, ou propriedade 60, com latitude igual a 24°67'88.8889"S e longitude igual a 53°86'94.4444"W. Já o Cenário 2 foi adotado a distância de *haversine* ponderada pelas demandas de cada produtor, obtendo-se como a localização ótima para a central de biodigestão na coordenada do ponto ou propriedade 74, com a posição geográfica de latitude igual a 24°70'80.5556"S e longitude 53°84'41.6667"W. Neste caso o ponto se aproximou da região com maior concentração de demanda.

Existem na literatura diversas abordagens para geração e uso de biogás, mas a localização de biodigestores em áreas rurais é uma preocupação mais específica e que vem crescendo atualmente, destacando a importância de proporcionar a produtores próximos o envio coletivo de seus resíduos agrícolas ou biomassa para uma central produtora de biogás, tornando o negócio mais circular (Bojesen; Birkin; Clarke, 2014; Hengeveld *et al.*, 2016; Hyman; Bailis, 2018; Jesus *et al.*, 2021b; Yazan *et al.*, 2018).

Neste sentido, Jesus *et al.* (2021b), utilizou análise de cluster aglomerativa hierárquica com análise multicritério com base nas coordenadas geográficas e o volume de resíduos produzidos pelas propriedades rurais localizadas no sul do Brasil para identificar grupos de produtores e locais para instalação de biodigestores compartilhados. Os autores observaram a necessidade de criação de dois clusters, sugerindo a instalação de um biodigestor próxima a uma propriedade de maior potencial para geração de biogás em um dos clusters, como apontado

nesta pesquisa, enquanto no outro cluster foi sugerido a construção do biodigestor próximo a uma propriedade com fácil acesso as rodovias, além de alta produção de resíduos.

Neste estudo, observa-se pela Figura 2, o posicionamento dos dois possíveis pontos para instalação de uma central de biodigestão, com as coordenadas obtidas pelos modelos de centro de gravidade (ponto 1) e centro de gravidade em um ponto único (ponto ou propriedade 12), bem como o posicionamento de todos os pontos obtidos por cada cenário proposto para o modelo de localização de facilidades *p*-medianas (pontos ou propriedades 60 e 74).

Desta maneira, entendendo a característica de cada ponto, cabe ao gestor definir qual característica é melhor para sua situação. Com o objetivo determinar locais mais adequados para instalação de usinas de biogás no sul da Finlândia para receber fontes de biomassa agrícola de forma otimizada por meio da minimização da distância de transporte usando uma rede rodoviária, Höhn *et al.* (2014) também utilizaram o modelo de localização de facilidades para um problema *p*-mediana de modo fosse minimizada a soma total das distâncias ponderadas das fontes de biomassa alocadas para uma instalação. No entanto, os autores utilizaram as distâncias ponderadas pela quantidade de cargas necessárias para transportar a quantidade anual de biomassa para a usina.

Na Tabela 1 pode-se observar, para cada ponto identificado como possível local de instalação da central de biodigestão (pontos ou propriedades 12, 60 e 74) aplicando o modelo de localização de facilidades *p*-medianas, os produtores classificados no primeiro quartil da distância em relação aos respectivos pontos de instalação do biodigestor, ou seja, os 25% dos produtores mais próximos.

Tabela 1. Comparativo de 25% da somatória de demandas e menor distância dos produtores

Prop.	d_i (para ponto 12)	V_i	Prop.	d_i (para ponto 60)	V_i	Prop.	d_i (para ponto 74)	V_i
12	0	320	60	0	360	74	0	310
75	928,68	175	5	336,01	297	4	362,27	275
86	1242,69	195	25	770,92	190	6	500,01	310
246	1306,11	255	4	1256,36	275	54	522,17	319
202	1571,39	310	17	1256,79	380	31	672,11	220
268	2109,92	360	35	1279,08	280	25	1008,76	190
49	2174,39	335	6	1300,94	310	17	1188,27	380
45	2284,01	360	74	1471,61	310	22	1503,44	230
64	2354,45	320	22	1500,22	230	71	1512,36	360
50	2361,25	190	28	1501,19	310	5	1527,05	297
25	2549,47	190	72	1688,45	360	60	1708,96	360
57	2582,75	270	31	1693,00	220	33	2021,10	270
31	2618,48	220	54	1695,00	319	35	2575,15	280
256	2625,96	340	68	1884,88	273	28	2593,33	310
4	2653,99	275	27	1988,87	330	75	2779,31	175

82	2788,94	365	23	2084,26	345	23	2852,87	345
6	2884,43	310	50	2096,64	190	86	2889,90	195
19	2991,87	225	55	2117,12	310	50	2988,05	190
55	3024,18	310	86	2213,41	195	260	3059,42	260
61	3093,36	360	24	2250,75	320	68	3171,33	273
5	3115,27	297	75	2347,45	175	72	3263,09	360
Total	47261,59	5982	Total	32732,95	5979	Total	38698,94	5909

Fonte: Elaborado pelos autores a partir de dados da pesquisa

Nota: Prop. é a identificação da propriedade; di representa a distância entre ponto identificado como possível local de instalação da central de biodigestão e as propriedades e Vi é o volume de resíduos gerado na propriedade.

Considerando a somatória das distâncias observadas, destaca-se a propriedade do ponto 60 apresentando a menor distância total dos produtores em relação ao biodigestor, ou seja, 32.732,95 metros, cabe ressaltar que o ponto 1, nesta tabela não é apresentado, pois refere-se ao método aplicado do centro de gravidade (Tabela 1).

Segundo Sahoo *et al.* (2018), a identificação de locais ideais para instalação de plantas de biogás gerado a partir da biomassa coletada de uma grande área geográfica é importante para investidores e gestores de políticas públicas que visam o desenvolvimento de indústrias sustentáveis de bioenergia. Assim, de forma similar ao procedimento de localização de facilidades utilizado neste estudo, os autores também usaram o modelo de localização de facilidade p-mediano, por meio da heurística *Tbart*, para otimizar a quantidade e a localização das plantas de biogás, observando que em torno de 4 a 13 teragramas (Tg) de resíduos secos de colheita de milho e trigo do estado de Ohio (EUA) poderiam estar disponíveis de forma sustentável para abastecer de 1 a 25 usinas regionais de biogás, considerando um raio máximo de 50 km.

No entanto, ao considerar os produtores mais próximos (primeiro quartil) de cada ponto localizado e observando o volume de demanda total destes produtores, o ponto central na propriedade 12 destacou-se com maior demanda, totalizando uma demanda atendida para coleta de 5.982 kg. Vale destacar que os métodos aplicados podem dar suporte a decisão, podendo ser considerada a menor distância dos pontos ou ainda onde os produtores mais próximos apresentam o maior volume de dejetos.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A grande preocupação e o desafio das diversas organizações, principalmente a do ramo agrícola, estão ligados a busca de alternativas que possam promover a redução de custos e as inovações tecnológicas que respeitem a preservação do meio ambiente. Buscou-se nesse

trabalho, investigar processos de otimização na área de logística, utilizando procedimentos e modelos que possibilitam resultados significativos para as organizações, contribuindo para a tomada de decisão e, contudo, a redução dos custos nas operações de transportes de materiais, mais precisamente, transporte de dejetos para produção de biogás.

Neste trabalho se aplicou técnicas matemáticas e computacionais que determinaram opções para a melhor localização de uma central de biodigestão compartilhada em uma região de suinocultura na região de Toledo (PR).

A metodologia baseada nos métodos de centro de gravidade e de localização de facilidades, proposta nesta pesquisa, propiciou opções para instalação de uma central compartilhada que apresentaram otimização de distâncias e de volumes transportados que minimizam o custo da operação logística das organizações rurais.

Um fator limitante do método de centro de gravidade é a possibilidade deste encontrar pontos geográficos que não possam ser utilizados, como exemplo uma propriedade particular que não faz parte do interesse do negócio, ou ainda pontos como rios, rodovias, áreas de preservação, entre outros. O que torna a adaptação desta técnica, para resolução do presente problema, um objeto para futuras pesquisas.

Os cenários avaliados evidenciaram que os modelos estudados são excelentes ferramentas de análise para auxiliar os gestores de organizações ou produtores nas tomadas de decisões de acordo com a realidade destes. A adoção da metodologia proposta facilita a implementação de projetos de localização, podendo também ser adotada na solução de diversos problemas, tais como: o posicionamento de clientes por regiões, localização de fornecedores, fábricas, entre outros.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro dos órgãos de fomento: CAPES(código 001), FAPESP (2013/07375-0), CNPq (306518/2022-8), UNESP-PROPE, FUNDUNESP e ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola/FCA/UNESP.

REFERÊNCIAS

AQUINO, Í. R. B., SILVA JUNIOR, J. F., GUARNIERI, P., CAMARA E SILVA, L. The Proposition of a Mathematical Model for the Location of Electrical and Electronic Waste Collection Points. *Sustainability*, v.13, n.1, 2021, 224. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13010224>

ARAKAKI, R. G. I.; LORENA, L. A. N. Uma heurística de localização-alocação (HLA) para problemas de localização de facilidades. **Production**. v.16, n.2, p.319-328. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-65132006000200011>.

ARENALES, M. et al. **Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro: Elsevier-BEPRO, 2011.

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos - Planejamento, Organização e Logística Empresarial**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

BOJESSEN, M.; BIRKIN, M.; CLARKE, G. Spatial competition for biogas production using insights from retail location models. **Energy**, [s. l.], v. 68, p. 617–628, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.12.039>

BRUNSDON, C. **Tbart: Teitz and Bart's p--Median Algorithm**. R packages version 1.0. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=tbart>. 2015. Acesso em: 10 nov. 2020.

CAMARGO, T.F. *et al.* Sustainability indicators in the swine industry of the Brazilian State of Santa Catarina. **Environment, Development and Sustainability**, v.20 (Supl. 1), 2018, p. 65–81 DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0147-6>

CHRISTOFIDES, N. **Graph theory: an algorithmic approach**. New York: Academic Press Inc. 1975.

CHUKWUMA, E. C. Facility location allocation modelling for bio-energy system in Anambra State of Nigeria: Integration of GIS and location model. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 141, p. 460–467, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.022>

FARDIN, L. P.; LEITE, H. G.; BINOTI, D. E. B.; RIBEIRO, C. A. A. S.; SOARES, V. P.; FERRAZ, A. S.; BERNARDI, M.; VIANA, A. B. T. Using the p-median location model to set up aerodromes for coverage fertilization of eucalyptus plantations. **African Journal of Agricultural Research**, v. 13, n. 8, p. 353–359, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJAR2017.12884>

GARG, K.; KANNAN, D.; DIABAT, A.; JHA, P. A multi-criteria optimization approach to manage environmental issues in closed loop supply chain network design. **Journal of Cleaner Production**, v. 100, pp. 297–314, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.075>

GWALANI, H., TIWARI, C., MIKLER, A.R. Evaluation of heuristics for the p-median problem: scale and spatial demand distribution. **Comput Environ Urban Syst.**, v.88, 101656, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2021.101656>

HAKIMI, S. L. Optimum Locations of Switching Centers and the Absolute Centers and Medians of a Graph. **Operations Research**, v.12, n.3, p.450-459, 1964. DOI: <https://www.jstor.org/stable/168125>

HAKIMI, S. L. Optimum distribution of switching centers in a communication network and some related graph theoretic problems. **Operations Research**, v.13, n.3, p.462-475, 1965. DOI: <https://doi.org/10.1287/opre.13.3.462>

HENGEVELD, E. J.; BEKKERING, J.; VAN GEMERT, W. J. T.; BROEKHUIS, A. A. Biogas infrastructures from farm to regional scale, prospects of biogas transport grids. **Biomass and Bioenergy**, v. 86, p. 43–52, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.01.005>

HYMAN, J.; BAILIS, R. Assessment of the Cambodian National Biodigester Program. **Energy for Sustainable Development**, v. 46, p. 11–22, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.06.008>

HÖHN, J.; LEHTONEN, E.; RASI, S.; RINTALA, J. A Geographical Information System (GIS) based methodology for determination of potential biomasses and sites for biogas plants in southern Finland. **Applied Energy**, v. 113, p. 1–10, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.005>

JESUS, R. H. G. de; SOUZA, J. T. de; PUGLIERI, F. N.; PIEKARSKI, C. M.; FRANCISCO, A. C. de. Biodigester location problems, its economic–environmental–social aspects and techniques: Areas yet to be explored. **Energy Reports**, v. 7, p. 3998–4008, 2021a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.06.090>

JESUS, R. H. G. de; BARROS, M. V.; SALVADOR, R.; SOUZA, J. T. de; PIEKARSKI, C. M.; FRANCISCO, A. C. de. Forming clusters based on strategic partnerships and circular economy for biogas production: A GIS analysis for optimal location. **Biomass and Bioenergy**, v. 150, p. 106097, 2021b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106097>

KARIV O., HAKIMI S, L. An algorithmic approach to network location problems. II: The p-medians. **SIAM Journal on Applied Mathematics**, v.37, n.3.1979, p. 539–560.

MARIA, E.; BUDIMAN, E.; HAVILUDDIN; TARUK, M. Measure distance locating nearest public facilities using Haversine and Euclidean Methods. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1450, n. 1, p. 012080, 2020. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1450/1/012080>

MARTINS, P. G.; LAUGENI, F. P. **Administração da Produção**. 3. ed. São Paulo: Saraiva, 2015.

MU, W., TONG, D. On solving large p-median problems. **Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science**, v.47, n.6, 2020, p.981-996. DOI: <https://doi.org/10.1177/2399808319892598>

OI, R. K.; et al. Aplicação do método de centro de gravidade para localização de CD de uma empresa de distribuição de medicamentos e materiais hospitalares. In: XXXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. 2017. Joinville. **Anais [...]** Joinville: ABEPRO, 2017 p. 1-15. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_STO_238_379_32716.pdf.

- OLIVEIRA, C. P.; SÁ, E. M.; MARTINS, V. C. A multi-period and bi-objective approach for locating ambulances: a case study in Belo Horizonte, Brazil. **arXiv preprint arXiv:2012.06655**, 2020.
- OLIVEIRA, B. F.; et al. Uso do centro de gravidade para localizar a base operacional da TPG do Brasil. In: XII SEGET Simpósio de excelência em gestão de tecnologia. 2015. Resende-RJ. **Anais** [...] Resende: AEDB, 2015 p. 1-15. Disponível em: <https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos15/24722311.pdf>.
- PARK, Y. S.; SZMEREKOVSKY, J.; DYBING, A. Optimal Location of Biogas Plants in Supply Chains under Carbon Effects: Insight from a Case Study on Animal Manure in North Dakota. **Journal of Advanced Transportation**, v. 2019, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/5978753>
- PEREIRA, S. M. **Estudo dos custos operacionais e da viabilidade de implantação de um sistema de coleta de dejetos suínos para a geração de Bioenergia, no município de Toledo – PR**. 2009. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Desenvolvimento Regional e Agronegócio, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo-Pr, 2009. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/bitstream/tede/2246/1/Sandra%20Mara%20Pereira.pdf> . Acesso em: 30 out. 2020.
- PEREIRA, S. M.; LOBO, D. S.; OLIVEIRA, H. F.; ROCHA JÚNIOR, W. F. Bioenergia e resíduos na cadeia de suínos: uma análise de custos e investimentos para transporte de dejetos suínos com posterior geração de bioenergia no município de Toledo/ PR. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 8, n. 14, 2012. DOI: [10.3895/rts.v8n14.2586](https://doi.org/10.3895/rts.v8n14.2586)
- PÉREZ, I.; et al. Technical, economic and environmental assessment of household biogas digesters for rural communities. **Renewable Energy**, v.62, p. 313-318. Fev. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.07.017>
- R CORE TEAM. R: (2020) **A language and environment for statistical computing**. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 30 Out. 2020.
- SINNOTT, R. W. Virtues of the Haversine. **Sky and Telescope**, v.68, n.2, 1984, 159 p.
- SAHOO, K.; MANI, S.; DAS, L.; BETTINGER, P. GIS-based assessment of sustainable crop residues for optimal siting of biogas plants. **Biomass and Bioenergy**, v. 110, p. 63–74, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.01.006>
- TEITZ, M. B.; BART, P. Heuristics methods for estimating the generalized vertex median of a weighted graph. **Operations Research**, v.16, n.5, p.955-961. 1968. DOI: <https://doi.org/10.1287/opre.16.5.955>
- TEIXEIRA, T. B. B *et al.* (2019) Projeto e implantação de um sistema biodigestor para fornecimento alternativo de gás e energia nas comunidades da região Amazônica-AM. **Revista Engenho**, v.11, n.1, Dez. 2019.

WINARSO, K.; ROHIM, M. I. A. Comparison of P-Median, P-Center, and Maximal Coverage on Facility Location Problem of Bokabo Tobacco Supply Chain, Sumenep District. In: Proceedings of the 1st International Conference on Life, Innovation, Change and Knowledge (ICLICK 2018). v.203, 2019. **Anais [...]**Atlantis Press. p. 183-190. DOI: <https://doi.org/10.2991/iclick-18.2019.37>

YADAV, V., BHURJEE, A.K., KARMAKAR, S., DIKSHIT, A.K. A facility location model for municipal solid waste management system under uncertain environment. **Science of the Total Environment**, v.603-604, p. 760-771. Dez. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.207>

YAZAN, D. M.; FRACCASCIA, L.; MES, M.; ZIJM, H. Cooperation in manure-based biogas production networks: An agent-based modeling approach. **Applied Energy**, [s. l.], v. 212, p. 820–833, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.074>