MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do curso de Engenharia de Produção

Avaliação da suficiência do abastecimento alimentar por programação linear

Guilherme Knupp Muniz

João Monlevade, MG
2026

Guilherme Knupp Muniz

Avaliação da suficiência do abastecimento alimentar por programação linear

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia de Produção do Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção.

Orientador: Profª. Drª. Luciana Paula Reis

João Monlevade, MG

2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M966a Muniz, Guilherme Knupp.
Avaliação da suficiência do abastecimento alimentar por programação linear. [manuscrito] / Guilherme Knupp Muniz. - 2026.
64 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Luciana Paula Reis.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia de Produção .

1. Logística - Abastecimento de alimentos. 2. Otimização matemática. 3. Pesquisa operacional. 4. Programação linear. 5. Simplex (Matemática). I. Reis, Luciana Paula. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 519.85

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6/2431

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
INSTITUTO DE CIENCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUCAO - ICEA

FOLHA DE APROVAÇÃO

Guilherme Knupp Muniz

Avaliação da suficiência do abastecimento alimentar por programação linear

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção

Aprovada em 19 de novembro de 2026

Membros da banca

Dra. Luciana Paula Reis - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dra. Priscila Mara Cota (Universidade Federal de Ouro Preto)
Me. Bráulio Frances Barcelos (Universidade Federal de Ouro Preto)

Luciana Paula Reis, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 23/11/2026

Documento assinado eletronicamente por **Luciana Paula Reis**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 23/11/2026, às 10:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 , informando o código verificador **1236437** e o código CRC **5A44971B**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.014861/2026-18 SEI nº 1236437

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: - www.ufop.br

Dedico este trabalho à minha avó, Nerilda do Carmo Knupp (in memoriam).

Nascida no interior de Minas Gerais, enfrentou inúmeras adversidades ao longo da vida, mas nunca deixou de acreditar no poder transformador da educação. Com esforço e determinação, ajudou a proporcionar a formação de seus filhos e, já na maturidade, retornou à sala de aula para concluir seus próprios estudos, tendo como professora uma de suas filhas (minha mãe).

Como cantineira da escola de sua comunidade, acompanhou de perto o impacto que a educação pode ter na vida das pessoas e sempre acreditou que ela era o caminho mais promissor para a transformação da sociedade.

Se hoje sou o primeiro membro da família a ingressar em uma universidade pública, é porque colho os frutos das sementes que ela plantou. Esta conquista também é sua.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, à minha família e aos meus amigos, que estiveram ao meu lado durante toda essa jornada, oferecendo apoio, incentivo e força nos momentos mais desafiadores. Agradeço também à República Alcatraz, que se tornou minha família em João Monlevade e fez dessa cidade um verdadeiro lar ao longo da graduação.

Agradeço especialmente à minha orientadora, Dra. Luciana Paula Reis, pela confiança, paciência e dedicação, não apenas na condução deste trabalho, mas também em outros projetos que marcaram minha trajetória acadêmica. Seus ensinamentos, orientações e exemplo profissional foram fundamentais para minha formação. Estendo minha gratidão a todos os professores que contribuíram para minha caminhada, compartilhando conhecimentos e experiências que levarei para a vida.

Registro ainda meu agradecimento à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela oportunidade de realizar estudos no Institut Supérieur d'Informatique, de Modélisation et de leurs Applications (ISIMA), por meio do programa BRAFITEC. Agradeço aos professores Dr. Alexandre Xavier Martins e Dr. Thiago Augusto de Oliveira Silva, coordenadores do programa na UFOP, pelo apoio e dedicação à iniciativa.

Agradeço também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte concedido durante meu projeto de iniciação científica, bem como aos professores Dra. Luciana Paula Reis, Dr. June Fernandes e Dr. Sérgio Evangelista, pela orientação e pelos conhecimentos compartilhados nesse período.

Por fim, agradeço à Diretoria de Relações Internacionais da UFOP, onde tive a oportunidade de atuar como bolsista e adquirir experiências que contribuíram significativamente para minha formação pessoal e profissional. Em especial, agradeço ao diretor Anderson Antônio Gamarano pelo apoio, confiança e incentivo ao longo dessa etapa.

"The test of our progress is not whether we add more to the abundance of those who have much; it is whether we provide enough for those who have too little."

— Franklin D. Roosevelt, Discurso de Posse, 20 jan. 1937.

Resumo

Em 2007, o Ministério da Defesa de Israel implementou um bloqueio à entrada de alimentos na Faixa de Gaza e concluiu que 77 caminhões de alimentos por dia útil seriam necessários e suficientes para prevenir a fome generalizada entre 1,5 milhão de pessoas. Este trabalho investiga se tal estimativa poderia plausivelmente ter sido obtida por meio de técnicas de programação linear. Para explorar essa hipótese, formulamos e resolvemos uma versão do clássico problema da dieta utilizando otimização linear, com o objetivo de minimizar o número de caminhões necessários para atender às necessidades nutricionais básicas da população. Dados nutricionais e logísticos relevantes são coletados e incorporados em um ou mais modelos de programação linear, resolvidos por meio do algoritmo Simplex. Os resultados obtidos são então comparados aos dados públicos divulgados pelas autoridades israelenses. O modelo de otimização livre, formulado a partir de restrições nutricionais e logísticas inferidas das regularidades identificadas nos dados oficiais, aponta uma necessidade de 83,12 caminhões, valor superior aos 77 declarados; quando as porções diárias do próprio documento são impostas como restrições rígidas, a necessidade logística calculada sobe para 95,12 caminhões, evidenciando que a composição oficial não corresponde a um mínimo logístico obtido por otimização pura. Esses resultados sugerem que a composição divulgada no documento Red Lines dificilmente seria reproduzida por um processo de otimização linear estritamente baseado em critérios nutricionais e logísticos, contribuindo assim para sustentar a hipótese de que outros fatores, não documentados, tenham influenciado a definição dos valores finais.

Palavras-chaves: Programação Linear; Problema da Dieta; Método Simplex; Bloqueio na Faixa de Gaza; Logística Humanitária.

Abstract

In 2007, the Israeli Ministry of Defense implemented a blockade on food entering the Gaza Strip and concluded that 77 truckloads of food per working day would be necessary and sufficient to prevent widespread starvation among 1.5 million people. This project investigates whether such a figure could plausibly have been derived through linear programming techniques. To explore this hypothesis, we formulate and solve a version of the classical diet problem using linear optimization, aiming to minimize the number of trucks required to meet the basic nutritional needs of the population. Relevant nutritional and logistical data are gathered and incorporated into one or more linear programming models, solved using the simplex algorithm. The results are then compared to the public data released by Israeli authorities. The free optimization model, formulated from nutritional and logistical constraints inferred from regularities identified in the official data, indicates a need for 83.12 trucks, higher than the declared 77; when the document's own daily portions are imposed as rigid constraints, the computed logistical need rises to 95.12 trucks, showing that the official composition does not correspond to a logistical minimum obtained through pure optimization. These results suggest that the composition disclosed in the Red Lines document would hardly be reproduced by a linear optimization process based strictly on nutritional and logistical criteria, thereby supporting the hypothesis that other, undocumented factors influenced the definition of the final values.

Keywords: Linear Optimization, Diet Problem, Simplex Algorithm, Gaza Blockade, Humanitarian Logistics.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplo esquemático de região viável em um problema de programação linear com duas variáveis de decisão. A área sombreada representa as combinações de x_1 e x_2 que satisfazem simultaneamente as restrições do modelo; o vértice destacado corresponde à solução ótima. 4
Figura 2 – Distribuição da população pelos grupos de modelagem nutricional. 25
Figura 3 – Entrada de caminhões na Faixa de Gaza (exceto pelo ponto de passagem de Karni). A linha vermelha representa o limiar de 106 caminhões/dia da política Red Lines. Fonte: Red Lines, tradução não oficial pela Gisha; OCHA; UNSCO. 41

Lista de tabelas

Tabela 1 – Síntese comparativa dos trabalhos revisados e posicionamento do presente estudo 10
Tabela 2 – Produção local – comparação entre valores publicados e recalculados 19
Tabela 3 – Valores nutricionais por 1 g de alimento 22
Tabela 4 – Necessidades calóricas diárias por grupo etário e de gênero 23
Tabela 5 – Ingestão diária recomendada de cálcio, fósforo e magnésio (mg/dia) 23
Tabela 6 – Quantidades recomendadas por grupo alimentar (em gramas por dia) 24
Tabela 7 – Regime resultante da função objetivo que visa minimizar o número de caminhões – Distribuição por idade e gênero 30
Tabela 8 – Comparação do número de caminhões necessários para o leite segundo duas hipóteses 31
Tabela 9 – Necessidades de caminhões antes e depois da consideração da produção local 31
Tabela 10 – Resultado do modelo com escolha livre entre leite fresco e leite em pó . . . 32
Tabela 11 – Comparação entre o plano israelense e os resultados do modelo 35
Tabela 12 – Energia (calorias) e porção alimentar diária (em gramas) na Faixa de Gaza segundo o índice do Ministério da Saúde – Discriminado por idade e sexo . 37
Tabela 13 – Resultados do modelo com restrições fixadas nos valores da tabela *Red Lines* 37

Sumário

1 INTRODUÇÃO 1
1.1 Contextualização 1
1.2 Objetivo geral 1
1.2.1 Objetivos específicos 2
1.3 Contribuições 2
1.4 Organização do Trabalho 2

2 REVISÃO DA LITERATURA 3
2.1 Fundamentos de programação linear e otimização 3
2.2 Da diversidade de aplicações da programação linear à segurança alimentar 5
2.2.1 O problema da dieta: origens e desenvolvimento cronológico 5
2.3 Análise de documentos oficiais no contexto da logística alimentar 7
2.4 Síntese comparativa da literatura 9

3 METODOLOGIA 11
3.1 Classificação da Pesquisa 11
3.2 Procedimento de Análise Documental 12
3.3 Organização da Base de Dados Nutricionais 12
3.4 Técnicas de Pesquisa Operacional Utilizadas 13

4 ANÁLISE DE DADOS 15
4.1 Documentos Analisados e Amostra 15
4.2 Evidências de Modelagem Matemática nos Documentos 15
4.3 Elementos Logísticos Extraídos dos Documentos 16
4.4 A Estimativa de 77 Caminhões de Alimentos por Dia 17
4.5 Produção Local de Alimentos 18
4.6 Inconsistências nos Dados Oficiais 18

5 DESENVOLVIMENTO DO MODELO 20
5.1 Preparação dos Dados 20
5.1.1 Base de Dados Nutricional Coletada 20
5.1.2 Parâmetros Nutricionais de Referência 23
5.1.3 Estrutura Demográfica Utilizada no Modelo 24
5.2 Construção do Modelo de Programação Linear 25
5.2.1 Formulação Matemática 27
5.3 Implementação Computacional 27

5.4 Adaptações e Melhorias do Modelo 28
5.4.1 Incorporação da Produção Local 28
5.4.2 Ajuste das Restrições de Leite 29
5.4.3 Integração da Logística na Função Objetivo 29
5.4.4 Cenários de Simulação 29

6 RESULTADOS 30
6.1 Saídas iniciais do modelo 30
6.2 Impacto das hipóteses de consumo de leite 31
6.3 Efeito da produção local 31
6.4 Substituibilidade entre leite fresco e leite em pó 32
6.5 Ausência do grupo de cereais 34
6.6 Comparação global com o plano israelense 34
6.7 Experimento com restrições relaxadas 35
6.8 Reprodução do cenário oficial do documento Red Lines 36

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS 39

REFERÊNCIAS 44

APÊNDICES 46

APÊNDICE A – EXEMPLO DE SAÍDA DO MODELO – GRUPO HOMENS 15–18 ANOS 47

APÊNDICE B – ELEMENTOS CENTRAIS DO MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR 49

1 Introdução

1.1 Contextualização

Em junho de 2007, após a tomada da Faixa de Gaza pelo Hamas, o Estado de Israel impôs um bloqueio rigoroso ao território, incluindo severas restrições à importação de bens essenciais, particularmente alimentos. Oficialmente justificada por preocupações de segurança nacional, essa política foi amplamente criticada por organizações humanitárias e de direitos humanos, que a consideram uma forma de punição coletiva com impactos significativos nas condições de vida da população civil.

Nesse contexto, a organização israelense *Gisha – Legal Center for Freedom of Movement* conduziu uma ação judicial com o objetivo de obter informações sobre os critérios utilizados na definição das restrições alimentares. Como resultado, o Ministério da Defesa de Israel divulgou um documento interno intitulado *Food Consumption in the Gaza Strip – Red Lines*, no qual são apresentados cálculos voltados à determinação da quantidade mínima de alimentos necessária para evitar a desnutrição da população.

De acordo com esse documento, a quantidade estimada para atender às necessidades de aproximadamente 1,5 milhão de habitantes corresponderia à entrada de 106 caminhões de produtos básicos por dia útil, dos quais 77 destinados especificamente a alimentos. No entanto, dados empíricos indicam que, no período analisado, a quantidade efetivamente permitida foi significativamente inferior a esse valor.

Diante disso, surge a seguinte questão: tais estimativas poderiam ter sido obtidas por meio de ferramentas formais de otimização matemática, como a programação linear? A programação linear é amplamente utilizada na alocação eficiente de recursos sob restrições, sendo o *problema da dieta* um exemplo clássico desse tipo de modelagem.

Este trabalho insere-se nesse contexto, propondo a construção e análise de um modelo matemático capaz de estimar a quantidade mínima de recursos necessários para atender às necessidades nutricionais de uma população sob restrições logísticas.

1.2 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar, por meio de técnicas de programação linear, a suficiência das estimativas de abastecimento alimentar apresentadas em documentos oficiais, avaliando sua coerência com modelos matemáticos de otimização.

1.2.1 Objetivos específicos

Para cumprimento do objetivo geral, são definidos os seguintes objetivos específicos:

- Compreender o contexto logístico e humanitário relacionado às restrições de abastecimento alimentar;
- Revisar os fundamentos teóricos da programação linear e do problema da dieta;
- Construir um modelo de otimização baseado em dados nutricionais confiáveis;
- Estimar a quantidade mínima de caminhões necessária para atender às necessidades nutricionais da população analisada;
- Comparar os resultados obtidos com os dados apresentados em documentos oficiais, avaliando sua consistência.

1.3 Contribuições

Este trabalho contribui para a literatura ao aplicar técnicas de programação linear em um contexto de logística humanitária de alta relevância, integrando dados nutricionais e restrições logísticas em um modelo matemático estruturado. Além disso, propõe uma abordagem quantitativa para a análise crítica de decisões relacionadas ao abastecimento alimentar, evidenciando o potencial da modelagem matemática como ferramenta de avaliação em contextos complexos e sensíveis.

1.4 Organização do Trabalho

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma:

O Capítulo 1 apresenta a contextualização do problema, os objetivos e as contribuições do estudo. O Capítulo 2 aborda os fundamentos teóricos relacionados à programação linear e ao problema da dieta, bem como aplicações relevantes na área de logística humanitária.

O Capítulo 3 apresenta a classificação metodológica da pesquisa, o procedimento de análise documental adotado e as técnicas de pesquisa operacional empregadas na construção do modelo. O Capítulo 4 apresenta os documentos oficiais analisados, os dados nutricionais e logísticos neles identificados e as inconsistências observadas. O Capítulo 5 descreve o desenvolvimento do modelo de programação linear propriamente dito, incluindo a preparação dos dados, a construção formal do modelo e sua implementação computacional.

O Capítulo 6 apresenta os resultados obtidos a partir do modelo proposto, bem como sua análise e comparação com dados oficiais. Por fim, o Capítulo 7 discute as conclusões do trabalho, suas limitações e possíveis direções para pesquisas futuras.

2 Revisão da Literatura

2.1 Fundamentos de programação linear e otimização

Antes de discutir o problema da dieta especificamente, é importante situar o leitor não familiarizado com pesquisa operacional (PO) a respeito dos conceitos básicos que fundamentam este trabalho.

A *otimização* é o ramo da matemática aplicada dedicado a encontrar, entre um conjunto de alternativas possíveis, aquela que produz o melhor resultado segundo um critério pré-definido, por exemplo, o menor custo, o menor tempo ou o menor número de recursos utilizados. A *programação linear* (PL) é o caso particular de otimização em que tanto o critério a ser melhorado quanto as condições que devem ser respeitadas podem ser expressos por meio de equações e inequações lineares, isto é, sem termos elevados a potências, produtos entre variáveis ou funções não lineares (Hillier; Lieberman, 2013; Taha, 2011).

Um modelo de programação linear é composto por três elementos fundamentais:

- **Variáveis de decisão**: representam as quantidades que podem ser controladas e que se deseja determinar (por exemplo, a quantidade de cada alimento a ser transportada);
- **Função objetivo**: expressão matemática linear que se deseja minimizar ou maximizar (por exemplo, o custo total, o volume de transporte ou o número de caminhões necessários);
- **Restrições**: conjunto de inequações ou equações lineares que delimitam os valores possíveis das variáveis de decisão, refletindo limitações reais do problema (por exemplo, necessidades nutricionais mínimas, capacidade de armazenamento ou disponibilidade orçamentária).

O conjunto de todas as combinações de valores das variáveis de decisão que satisfazem simultaneamente todas as restrições é chamado de *região viável*. Quando o problema envolve apenas duas variáveis, essa região pode ser representada graficamente como uma área delimitada por retas no plano cartesiano, conforme ilustrado na Figura 1. A *solução ótima*, quando existe, localiza-se sempre em um dos vértices dessa região, propriedade que fundamenta o funcionamento do algoritmo Simplex, detalhado mais adiante nesta seção.

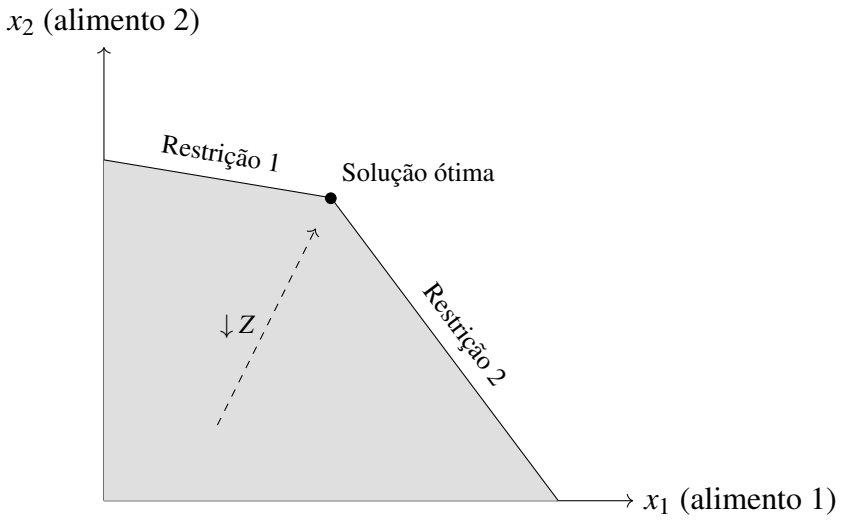


Figura 1 – Exemplo esquemático de região viável em um problema de programação linear com duas variáveis de decisão. A área sombreada representa as combinações de x_1 e x_2 que satisfazem simultaneamente as restrições do modelo; o vértice destacado corresponde à solução ótima.

Elaborado pelo autor.

Quando o número de variáveis excede duas ou três, a representação gráfica torna-se inviável, e a solução passa a ser obtida por métodos algébricos. O principal deles é o *método Simplex*, desenvolvido por George Dantzig em 1947, que percorre sistematicamente os vértices da região viável, sem precisar enumerá-los todos, até identificar aquele que otimiza a função objetivo (Dantzig, 1990; Dantzig, 1985). É esse algoritmo que, décadas mais tarde, permitiria resolver de forma exata problemas que, à época de sua formulação original, só podiam ser abordados por métodos heurísticos, como foi o caso do problema da dieta, discutido na Seção 2.2.

Softwares e bibliotecas de código aberto atuais, como a biblioteca `PuLP` em Python utilizada neste trabalho, implementam o Simplex (ou variantes mais eficientes, como o método de pontos interiores) de forma transparente ao usuário, que precisa apenas formular corretamente as variáveis, a função objetivo e as restrições do problema (Mitchell; O'Sullivan; Dunning, 2011).

2.2 Da diversidade de aplicações da programação linear à segurança alimentar

A programação linear é utilizada, desde a década de 1940, em uma ampla variedade de contextos que pouco têm em comum além da estrutura matemática subjacente. Na indústria, é aplicada ao planejamento da produção e à alocação de recursos entre linhas de fabricação; na logística e no transporte, à definição de rotas e à distribuição de cargas entre origens e destinos; nas finanças, à composição de carteiras de investimento sujeitas a restrições de risco; e na agricultura, ao planejamento de safras diante de limitações de área, insumos e mão de obra (Hillier; Lieberman, 2013; Dantzig, 1963). Essa versatilidade decorre precisamente da generalidade da estrutura "variáveis de decisão + função objetivo + restrições lineares"apresentada na Seção 2.1, que permite adaptar o mesmo arcabouço matemático a problemas de natureza muito distinta.

Um dos primeiros, e certamente um dos mais duradouros, desses problemas clássicos é o *problema da dieta*, subárea da programação linear voltada especificamente à composição de conjuntos de alimentos, e que constitui o ponto de partida teórico do presente trabalho.

2.2.1 O problema da dieta: origens e desenvolvimento cronológico

O problema da dieta foi formulado originalmente em 1945 pelo economista George Stigler (posteriormente laureado com o Prêmio Nobel de Ciências Econômicas em 1982), que buscava determinar a combinação de alimentos de menor custo capaz de atender às necessidades nutricionais mínimas de um indivíduo (Stigler, 1945). À época, a ausência de métodos computacionais adequados impediu que Stigler obtivesse uma solução exata, levando-o a recorrer a procedimentos heurísticos. A solução ótima só seria alcançada poucos anos depois, quando George Dantzig aplicou ao problema o método Simplex apresentado na Seção 2.1 (Dantzig, 1990; Dantzig, 1985), episódio frequentemente citado na literatura de PO como o primeiro grande caso de aplicação prática do Simplex a um problema real. Em sua formulação canônica, o problema da dieta busca minimizar uma função objetivo (tipicamente o custo monetário da alimentação) sujeita a um conjunto de restrições lineares que representam exigências nutricionais mínimas, como ingestão de calorias, proteínas, cálcio e vitaminas.

Durante as décadas seguintes, as aplicações da programação linear em nutrição permaneceram restritas a contextos institucionais e clínicos, como o planejamento de dietas hospitalares e a formulação de rações animais (Darmon; Ferguson; Briend, 2002). A transição para contextos de segurança alimentar em países de baixa renda ocorreu sistematicamente a partir do início dos anos 2000, impulsionada pelos trabalhos do grupo formado por Nicole Darmon, Elaine Ferguson e André Briend. Em estudo seminal realizado com crianças em idade pré-escolar no Malawi rural, Darmon, Ferguson e Briend (2002) demonstraram que a programação linear pode ser utilizada para identificar combinações de alimentos localmente disponíveis que satisfaçam recomendações nutricionais enquanto minimizam o conteúdo energético total da dieta, uma contribuição metodológica relevante por deslocar a função objetivo do custo monetário para outras dimensões de interesse. Na mesma linha, Briend *et al.* (2003) sistematizaram os princípios do método e suas aplicações práticas para a formulação de recomendações alimentares em contextos de vulnerabilidade nutricional, consolidando a programação linear como ferramenta acessível a profissionais de saúde pública e nutrição em campo.

A aplicação da programação linear especificamente ao auxílio alimentar institucional foi explorada, alguns anos depois, por Rambeloson, Darmon e Ferguson (2008), que utilizaram o método para avaliar a qualidade nutricional de doações distribuídas por bancos de alimentos na França e identificar, de forma matematicamente rigorosa, as modificações mínimas necessárias para adequá-las às recomendações dietéticas vigentes. Esse trabalho é representativo de uma tendência mais ampla de incorporação da otimização linear ao planejamento operacional de programas de distribuição alimentar, em que a função objetivo deixa de ser exclusivamente o custo e passa a incorporar critérios de aderência a padrões nutricionais estabelecidos. Tal tendência se insere em um campo mais amplo de pesquisa em logística humanitária, no qual a pesquisa operacional tem sido progressivamente reconhecida como instrumento essencial para a gestão eficiente de cadeias de suprimentos em contextos de crise (Wassenhove, 2006).

Uma síntese abrangente dessa trajetória, quase uma década depois, foi realizada por Dooren (2018), cuja revisão sistemática analisou 52 estudos de otimização dietética com restrições nutricionais publicados até então. O autor documenta a expansão progressiva das aplicações da programação linear (de dietas de baixo custo para indivíduos até programas nacionais de alimentação e auxílio humanitário) e aponta que, após as restrições nutricionais e de custo, as restrições de aceitabilidade e de ordem ecológica passaram a ser gradualmente incorporadas aos modelos. Essa evolução evidencia que a estrutura matemática do problema da dieta é suficientemente flexível para acomodar diferentes tipos de restrições e funções objetivo, conforme os interesses de cada aplicação.

A fronteira mais recente dessa literatura avança em direção à integração explícita entre otimização nutricional e planejamento logístico em um único modelo formal. Peters *et al.* (2021) descrevem um modelo de programação linear inteira mista desenvolvido pela própria Unidade de Planejamento de Cadeia de Suprimentos do Programa Mundial de Alimentos das Nações Unidas (PMA), capaz de otimizar simultaneamente a composição da cesta alimentar, o plano de abastecimento, o plano de entrega e a modalidade de transferência de operações humanitárias de longo prazo. Os autores destacam que o núcleo do modelo é construído sobre a combinação de dois problemas clássicos da pesquisa operacional: um modelo de fluxo em rede e o problema da dieta. Aplicado a operações reais no Iraque e no Iêmen, o modelo demonstrou ser possível reduzir custos operacionais sem comprometer as metas nutricionais estabelecidas. Esse trabalho evidencia que a integração entre critérios nutricionais e restrições logísticas de transporte constitui uma direção consolidada na prática institucional das grandes organizações humanitárias, ainda que sua exploração sistemática na literatura acadêmica permaneça incipiente.

No presente trabalho, essa estrutura é adaptada para incorporar uma dimensão logística ainda pouco explorada na literatura: em vez de minimizar o custo monetário da alimentação ou desvios em relação a padrões nutricionais, busca-se minimizar o número de caminhões necessários para transportar os alimentos requeridos pelo abastecimento diário de uma população estimada em 1,5 milhão de pessoas. Para isso, são considerados o valor nutricional e o volume de transporte de um conjunto de alimentos básicos, cuja seleção ótima é determinada por meio do algoritmo Simplex, implementado com o auxílio da biblioteca `PuLP` em Python. Os resultados obtidos são posteriormente comparados com estimativas presentes em documentos oficiais, com o objetivo de avaliar a plausibilidade de que tais valores tenham sido derivados por meio de técnicas formais de otimização.

2.3 Análise de documentos oficiais no contexto da logística alimentar

A literatura sobre logística humanitária reconhece que decisões de abastecimento em contextos de restrição severa de recursos frequentemente envolvem critérios técnicos e quantitativos (Wassenhove, 2006). Nesse sentido, documentos institucionais podem fornecer evidências relevantes sobre os mecanismos subjacentes à determinação de quantidades mínimas de bens essenciais e, em particular, sobre a eventual utilização de modelos formais de otimização nesse processo. O caso da Faixa de Gaza oferece um conjunto excepcionalmente documentado para essa investigação, em virtude de uma série de documentos internos do Ministério da Defesa de Israel obtidos por meio de petição baseada na Lei de Acesso à Informação (Gisha – Legal Center for Freedom of Movement, 2010).

O conjunto documental em questão compreende três instrumentos distintos: o *Procedimento para Monitoramento e Avaliação de Estoques na Faixa de Gaza* (Ordem nº 605, abril de 2009), o *Procedimento para Aprovação de Transferência de Mercadorias para a Faixa de Gaza* (Ordem nº 606, julho de 2009) e a apresentação intitulada *Food Consumption in the Gaza Strip – Red Lines* (janeiro de 2008). Em conjunto, esses documentos descrevem uma estrutura sistemática de controle do fluxo de alimentos para a população local, organizada em torno de limiares quantitativos, denominados "linhas de aviso", calculados a partir de dados per capita do Bureau Central de Estatísticas palestino e de um modelo nutricional elaborado pelo Ministério da Saúde de Israel.

O documento *Red Lines*, em particular, apresenta tabelas detalhadas de consumo alimentar segmentadas por faixa etária e gênero, calcula a demanda diária total da população em toneladas por grupo alimentar e converte esses valores em número de caminhões necessários para o transporte incorporando, explicitamente, o peso médio de cada produto por veículo. O documento conclui que seriam necessários 106 caminhões (77 destinados ao transporte de alimentos) diários para suprir o que denomina "porção humanitária diária"da população de aproximadamente 1,5 milhão de habitantes. A estrutura desse cálculo é notavelmente próxima à de um modelo de programação linear: dado um conjunto de alimentos com valores nutricionais e volumes de transporte conhecidos, determina-se a quantidade necessária de cada item para atender a restrições nutricionais estabelecidas, expressando o resultado em unidades logísticas de transporte.

Contudo, é precisamente nesse ponto que emerge a principal tensão interpretativa relevante para o presente trabalho. O governo israelense, por meio do porta-voz do COGAT, sustentou que o documento tratava-se de um rascunho e que jamais foi utilizado como base para a implementação de política civil em relação à Faixa de Gaza (Gisha – Legal Center for Freedom of Movement, 2012a). A Gisha, organização israelense de direitos humanos que conduziu a batalha judicial pela divulgação, contestou essa caracterização, argumentando que as cotas efetivamente praticadas correspondiam de forma precisa às quantidades calculadas no documento (Gisha – Legal Center for Freedom of Movement, 2012b). Essa divergência não é apenas política: ela é metodologicamente relevante para este trabalho, pois diz respeito à própria questão de investigação, a saber, se os valores observados podem ter sido derivados por meio de técnicas formais de otimização.

Do ponto de vista da modelagem matemática, o documento apresenta características estruturais consistentes com um procedimento de otimização linear. A conversão sistemática de requerimentos nutricionais populacionais em quantidades físicas de alimentos, seguida da sua tradução em unidades de transporte com base em pesos médios por veículo, reproduz a lógica operacional do problema da dieta tal como descrita por Dooren (2018) e Briend *et al.* (2003): uma função objetivo expressa em termos logísticos (número de caminhões), sujeita a restrições nutricionais lineares. A segmentação por faixa etária e gênero, por sua vez, é consistente com abordagens de otimização dietética aplicadas a populações heterogêneas, como as descritas por Darmon, Ferguson e Briend (2002) para populações de países de baixa renda.

No entanto, a literatura sobre otimização dietética também aponta limitações relevantes que tornam a interpretação mais cautelosa. Dooren (2018) observa que modelos de programação linear tendem a produzir soluções nutricionalmente adequadas, porém culturalmente problemáticas quando restrições de aceitabilidade não são incorporadas explicitamente, o que parece ser o caso dos cálculos do *Red Lines*, baseados em padrões médios de consumo israelense e apenas parcialmente ajustados ao contexto local. Essa limitação é reconhecida no próprio documento, que ressalva que os valores utilizados "correspondem ao consumo médio segundo padrões israelenses e não são porções mínimas de subsistência", e que o Ministério da Saúde havia sido solicitado a calcular uma cesta mínima adaptada ao setor árabe de Israel. Em outras palavras, o modelo parece ter operado com uma cesta de consumo de referência, e não de otimização mínima, o que sugere que o resultado obtido (106 caminhões) pode representar um teto de referência derivado de necessidades médias, e não um ótimo obtido por minimização formal.

Essa ambiguidade estrutural é o que motiva a abordagem proposta no presente trabalho. Cabe destacar, contudo, que o presente estudo não abrange a totalidade dos 106 caminhões estimados, mas tão somente os 77 destinados ao transporte de alimentos, parcela que constitui o foco da análise aqui desenvolvida. Ao aplicar o algoritmo Simplex a um conjunto de alimentos básicos com restrições nutricionais definidas e função objetivo voltada à minimização do volume logístico de transporte, busca-se verificar se o valor de 77 caminhões, ou algo próximo a ele, emerge como solução ótima de um problema formal de otimização. A comparação entre o resultado computado e as estimativas documentais permite avaliar, de forma empiricamente fundamentada, a plausibilidade de que tais valores tenham sido produzidos por meio de técnicas análogas às da programação linear, independentemente de sua designação institucional.

2.4 Síntese comparativa da literatura

A Tabela 1 sistematiza os trabalhos discutidos ao longo deste capítulo, ordenados cronologicamente, e posiciona a contribuição do presente trabalho em relação a eles. O objetivo é evidenciar, de forma direta, quais elementos de cada estudo são retomados aqui e o que este trabalho acrescenta que ainda não havia sido explorado de forma conjunta na literatura revisada.

Tabela 1 – Síntese comparativa dos trabalhos revisados e posicionamento do presente estudo

Autor / Ano	**Objetivo**	**Contexto**	**Restrição**	**Relação com este trabalho**
Stigler (1945)	Minimizar o custo monetário da dieta	Dieta individual, resolvida de forma heurística	Nutricionais (calorias, vitaminas)	Origem conceitual do problema da dieta retomado neste trabalho
Dantzig (1947/1990)	— (contribuição algorítmica)	Método Simplex aplicado ao problema de Stigler	—	Algoritmo de solução utilizado aqui (via biblioteca `PuLP`)
Darmon, Ferguson e Briend (2002)	Minimizar a energia total da dieta	Dieta infantil, Malawi rural	Nutricionais, com alimentos localmente disponíveis	Desloca a função objetivo do custo para outra dimensão; base para o foco em volume logístico deste trabalho
Briend et al. (2003)	— (sistematização do método)	Recomendações alimentares em saúde pública	Nutricionais	Consolida a PL como ferramenta acessível a não especialistas em PO
Rambeloson et al. (2008)	Minimizar as modificações necessárias	Bancos de alimentos, França	Nutricionais e de adequação a doações	Aproxima a PL do planejamento operacional de distribuição alimentar
Dooren (2018)	Diversas (revisão sistemática de 52 estudos)	Panorama geral da otimização dietética	Nutricionais, de custo e de aceitabilidade	Fornece o panorama teórico e as limitações discutidas na análise dos documentos oficiais
Peters et al. (2021)	Minimizar o custo operacional	Cesta alimentar e logística, PMA (Iraque e Iêmen)	Nutricionais e logísticas (fluxo em rede)	Precedente mais próximo: une problema da dieta e planejamento logístico
Este trabalho	**Minimizar o número de caminhões necessários**	**Abastecimento alimentar, Faixa de Gaza**	**Nutricionais, voltadas a unidades logísticas de transporte**	**Testa se um valor institucional (77 caminhões) é replicável por otimização formal**

Elaborado pelo autor.

Como se observa na Tabela 1, a literatura evolui de formulações centradas no custo monetário individual (Stigler) para formulações que incorporam múltiplos critérios (energéticos, de aceitabilidade, logísticos) aplicados a populações inteiras. O presente trabalho posiciona-se na interseção dessas duas tendências: retoma a estrutura clássica do problema da dieta, mas desloca a função objetivo para uma métrica logística (número de caminhões) ainda pouco explorada na literatura de forma conjunta com dados documentais reais e verificáveis, o que constitui a principal contribuição original deste trabalho.

3 Metodologia

Este capítulo descreve como a pesquisa foi conduzida: sua classificação metodológica, o procedimento de análise documental adotado, as fontes que compõem a base de dados nutricional utilizada e as técnicas de pesquisa operacional empregadas na construção do modelo. O detalhamento dos documentos analisados e as evidências neles identificadas são apresentados no Capítulo 4 (Análise de Dados); a preparação efetiva dos dados coletados e a construção do modelo de programação linear propriamente dito são apresentadas no Capítulo 5 (Desenvolvimento do Modelo).

3.1 Classificação da Pesquisa

Quanto à natureza, esta pesquisa classifica-se como aplicada, uma vez que busca gerar conhecimento com aplicação prática direta a um problema real de abastecimento alimentar, sem pretensão de generalização teórica autônoma (Gil, 2002). Quanto aos objetivos, trata-se de uma pesquisa exploratória e descritiva: exploratória porque investiga uma hipótese ainda não testada na literatura (a de que limiares logísticos institucionais possam ter sido derivados por técnicas formais de otimização) e descritiva porque caracteriza detalhadamente os dados nutricionais e logísticos envolvidos (Gil, 2002; Prodanov; Freitas, 2013).

Quanto à abordagem, a pesquisa é predominantemente **quantitativa**, uma vez que se apoia na modelagem matemática, na formulação de um problema de otimização linear e na comparação numérica entre resultados computados e valores documentais. Quanto aos procedimentos técnicos, combinam-se duas estratégias complementares:

- **Pesquisa documental**, aplicada à análise dos documentos oficiais israelenses obtidos por meio de petição baseada na Lei de Acesso à Informação, e à consulta de bases de dados nutricionais e diretrizes de saúde pública reconhecidas internacionalmente. Diferentemente da pesquisa bibliográfica (que se debruça sobre material já tratado analiticamente, como livros e artigos) a pesquisa documental parte de materiais primários que ainda não haviam recebido tratamento analítico sistemático (Gil, 2002), o que é precisamente o caso dos documentos internos do Ministério da Defesa de Israel utilizados neste trabalho;
- **Modelagem matemática e simulação computacional**, por meio da qual o problema identificado na etapa documental é formalizado como um modelo de programação linear e resolvido computacionalmente, permitindo a comparação entre a solução ótima obtida e os valores institucionais reportados.

O detalhamento da amostra documental (quais documentos, de que período e sob qual critério de seleção) é apresentado na Seção 4.1 do Capítulo 4.

3.2 Procedimento de Análise Documental

O procedimento de análise documental seguiu três etapas sistemáticas: (i) leitura integral dos documentos para identificação dos dados quantitativos divulgados (número de caminhões autorizados, estimativas nutricionais, percentuais de produção local e fatores de conversão logística); (ii) organização desses dados em tabelas comparáveis entre si e com fontes nutricionais externas; e (iii) formulação de hipóteses sobre a estrutura matemática subjacente aos valores encontrados, a partir da identificação de padrões e regularidades numéricas. Os resultados dessa análise são apresentados no Capítulo 4 e fundamentam diretamente as escolhas de modelagem descritas no Capítulo 5.

3.3 Organização da Base de Dados Nutricionais

Um banco de dados nutricional foi compilado a partir do cruzamento de diversas fontes reconhecidas: o banco de dados FAOSTAT (2024) da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO); as tabelas SR11 a SR28 do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) (United States Department of Agriculture, 2024); as *Dietary Guidelines for Americans 2020–2025* (DGA) (U.S. Department of Agriculture; U.S. Department of Health and Human Services, 2020); as Recomendações Nutricionais para a Bélgica – 2016 do Conselho Superior de Saúde (CSS) (Conseil Supérieur de la Santé, 2016); as fichas técnicas do Escritório de Suplementos Dietéticos dos Institutos Nacionais de Saúde dos EUA (NIH-ODS) (National Institutes of Health, 2025); e os Manuais MSD (Merck Sharp & Dohme) (MSD Manuals, 2025).

Para cada alimento, foram coletadas informações de valor energético (kcal), macronutrientes (proteínas, fibras, carboidratos) e micronutrientes (cálcio, magnésio, fósforo, tiamina/B1, riboflavina/B2, niacina/B3, ácido fólico, folato, vitamina B6, vitamina A, ferro e zinco). A seleção desses nutrientes como restrições do modelo decorreu tanto das recomendações consolidadas na literatura (U.S. Department of Agriculture; U.S. Department of Health and Human Services, 2020; Conseil Supérieur de la Santé, 2016) quanto de sua menção explícita no documento *Red Lines*, em particular na tabela de aditivos nutricionais do trigo enriquecido (vitaminas do complexo B, ferro e zinco).

Por padronização, todos os dados foram expressos em gramas; quantidades originalmente fornecidas em unidades do sistema imperial (xícaras, onças) foram convertidas para o sistema métrico com base nas equivalências de densidade do USDA FoodData Central (United States Department of Agriculture, 2025). Os produtos incluídos na modelagem foram selecionados a partir de duas fontes: o documento *Red Lines*, que discrimina os alimentos que necessitam de importação frente aos produzidos localmente, e as tabelas SR11 a SR28 do USDA. A lista completa dos alimentos efetivamente selecionados, organizados por categoria, e seus respectivos valores nutricionais, é apresentada na Seção 5.1.1 do Capítulo 5, como parte da preparação dos dados do modelo.

3.4 Técnicas de Pesquisa Operacional Utilizadas

Com base nos fundamentos teóricos apresentados na Seção 2.1 do Capítulo 2, este trabalho adota a programação linear como técnica central de pesquisa operacional, especificamente por meio de uma adaptação do clássico *problema da dieta*. A escolha dessa técnica se justifica por três razões principais.

Em primeiro lugar, o problema da dieta oferece uma estrutura matemática já validada na literatura para representar a composição de cestas alimentares sob restrições nutricionais, conforme discutido na Seção 2.2 do Capítulo 2. Em segundo lugar, sua formulação linear é computacionalmente tratável mesmo para o número de variáveis de decisão e restrições envolvidas neste trabalho, permitindo a resolução exata via algoritmo Simplex, sem a necessidade de métodos heurísticos ou aproximados. Em terceiro lugar, a flexibilidade da função objetivo no problema da dieta clássico, que pode ser adaptada para minimizar diferentes critérios (custo, energia, volume), permite a principal contribuição metodológica deste trabalho: o deslocamento da função objetivo do custo monetário, tradicional na literatura, para uma métrica puramente logística (número de caminhões), conforme apresentado na Seção 2.2 do Capítulo 2.

Operacionalmente, o modelo é formulado segundo a estrutura padrão de um problema de programação linear: um conjunto de variáveis de decisão (quantidade de cada alimento), uma função objetivo linear (número total de caminhões) e um conjunto de restrições lineares (nutricionais, de diversidade alimentar e logísticas). A resolução é realizada por meio do algoritmo Simplex, implementado de forma transparente pela biblioteca `PuLP` em linguagem Python (Mitchell; O'Sullivan; Dunning, 2011).

A construção e a avaliação desse modelo seguiram um fluxo de trabalho estruturado em seis etapas sucessivas, cada uma delas detalhada no Capítulo 5:

1. **Preparação da base de dados nutricional:** consolidação dos valores energéticos, de macronutrientes e de micronutrientes de cada alimento selecionado, a partir das fontes descritas na Seção 3.3, organizados em um arquivo estruturado que alimenta o modelo de forma automatizada (ver Seção 5.1.1 do Capítulo 5).

2. **Definição dos parâmetros de referência:** estabelecimento dos limiares nutricionais mínimos (calorias, proteínas, cálcio, ferro, entre outros) e das metas de diversidade alimentar por grupo etário e de gênero, com base em diretrizes nutricionais internacionalmente reconhecidas (ver Seção 5.1.2 do Capítulo 5).

3. **Reestruturação da base demográfica:** desagregação e reagrupamento da população da Faixa de Gaza nas onze categorias etárias e de gênero utilizadas pelo modelo, de modo a compatibilizar os dados populacionais oficiais com as tabelas nutricionais de referência (ver Seção 5.1.3 do Capítulo 5).

4. **Construção formal do modelo de programação linear:** definição das variáveis de decisão, da função objetivo e do conjunto completo de restrições nutricionais, de diversidade alimentar e logísticas, incluindo aquelas derivadas diretamente dos padrões identificados na análise documental (Capítulo 4), como a proporcionalidade farinha–arroz e o fator de conversão entre leite fresco e leite em pó (ver Seção 5.2 do Capítulo 5).

5. **Implementação computacional e resolução:** tradução do modelo matemático em código Python, com resolução via algoritmo Simplex por meio da biblioteca `PuLP`, e organização do código em módulos independentes para otimização dietética e simulação logística (ver Seção 5.3 do Capítulo 5).

6. **Simulação de cenários e comparação com os dados oficiais:** execução do modelo sob diferentes hipóteses (com e sem produção local, minimizando peso ou número de caminhões) e confronto sistemático dos resultados obtidos com os valores publicados no documento Red Lines, de modo a avaliar a plausibilidade de que estes tenham sido derivados por meio de técnicas formais de otimização (resultados apresentados no capítulo de Resultados).

A formulação matemática completa do modelo, incluindo a definição formal das variáveis, da função objetivo e das restrições, é apresentada na Seção 5.2 do Capítulo 5.

4 Análise de Dados

Este capítulo apresenta os dados levantados por meio da análise documental descrita no Capítulo 3, bem como as discussões e interpretações derivadas diretamente desses dados. Enquanto o capítulo anterior descreveu como a pesquisa foi conduzida, este capítulo apresenta o que foi encontrado ao aplicar essa metodologia: os documentos analisados, as evidências neles identificadas, os dados nutricionais coletados e as inconsistências observadas.

4.1 Documentos Analisados e Amostra

A amostra documental deste trabalho é composta por três instrumentos obtidos por meio de petição baseada na Lei de Acesso à Informação israelense:

- o *Procedimento para Monitoramento e Avaliação de Estoques na Faixa de Gaza* (Gisha – Legal Center for Freedom of Movement, 2010) (Ordem nº 605, abril de 2009);
- o *Procedimento para Aprovação de Transferência de Mercadorias para a Faixa de Gaza* (Gisha – Legal Center for Freedom of Movement, 2012b) (Ordem nº 606, julho de 2009);
- a apresentação *Food Consumption in the Gaza Strip – Red Lines* (Gisha – Legal Center for Freedom of Movement, 2012a), elaborada em janeiro de 2008 em duas versões (1º e 27 de janeiro).

Esses documentos foram selecionados por constituírem o conjunto mais detalhado e diretamente relacionado ao cálculo de limiares de abastecimento alimentar disponível publicamente sobre o caso. Sua análise teve como objetivo identificar os dados quantitativos divulgados pelas autoridades israelenses (número de caminhões autorizados, estimativas de necessidades nutricionais, percentuais de produção local e fatores de conversão logística) e sustentar a hipótese central deste trabalho: a de que os limiares estabelecidos possam ter sido derivados por meio de técnicas formais de otimização linear.

4.2 Evidências de Modelagem Matemática nos Documentos

A análise das tabelas alimentares presentes nos documentos oficiais revela uma estrutura interna que dificilmente pode ser atribuída a decisões puramente empíricas. Diversos padrões recorrentes sugerem o uso implícito de raciocínio matemático na definição das quantidades distribuídas:

- **Proporção constante entre arroz e farinha:** em todos os grupos etários, a quantidade de arroz corresponde a exatamente um terço da quantidade de farinha. Essa proporção estável pode indicar a presença de uma restrição linear no modelo subjacente, visando equilibrar as fontes de carboidratos.

- **Exclusão sistemática de alimentos para crianças de 2–3 anos:** óleo e açúcar estão completamente ausentes nesse grupo etário. Essa exclusão segue uma regra explícita e é compatível com a aplicação de restrições de limite zero em um modelo de otimização.

- **Arredondamento em valores regulares:** as quantidades nas tabelas oficiais frequentemente apresentam valores arredondados (por exemplo, 200 g, 417 g, 626 g), característicos de resultados gerados por modelos formais e posteriormente harmonizados para apresentação.

- **Limiares fixos para o leite:** os valores de leite aparecem sistematicamente sob formas discretas (417 g ou 626 g), correspondendo aproximadamente a dois ou três copos padrão, o que sugere a existência de pisos e tetos típicos de sistemas com restrições explícitas.

- **Diversidade alimentar sistemática:** a inclusão deliberada de itens de múltiplos grupos alimentares (hortaliças, frutas, leguminosas etc.) em todos os grupos etários pode refletir restrições de variedade ou de nutrientes específicos, comuns nas formulações clássicas do problema da dieta.

- **Ingestão calórica calibrada por faixa etária:** as tabelas visam claramente atingir limiares energéticos específicos para cada grupo, com precisão compatível com restrições de otimização destinadas a atender à ingestão calórica mínima com o menor volume logístico possível.

Embora os documentos não mencionem explicitamente o uso de programação linear, as regularidades observadas sustentam essa hipótese e orientaram a construção do modelo desenvolvido neste trabalho (Capítulo 5).

4.3 Elementos Logísticos Extraídos dos Documentos

Certos detalhes logísticos presentes nos documentos reforçam adicionalmente a plausibilidade de um modelo formal:

- **Ajuste temporal (fator 7/5):** como as entregas ocorriam cinco dias por semana, as quantidades diárias foram multiplicadas por $7/5$ para representar a carga real por dia de entrega. Esse procedimento corresponde a uma transformação clássica em modelos logísticos.

- **Acréscimo para crianças menores de 2 anos:** uma compensação de 34 toneladas/dia foi adicionada para esse grupo populacional, indicando um ajuste exógeno ao cálculo total, típico de modelos de otimização realistas.
- **Conversão entre leite em pó e leite fresco:** o documento especifica que 3 caminhões de leite em pó (equivalentes a 40 toneladas) correspondem a 40 caminhões de leite fresco, implicando um fator de conversão logística de aproximadamente 1:13,33. Esse tipo de equivalência é comum em modelos baseados em densidade energética ou peso específico, e é o valor efetivamente utilizado na restrição de conversão do leite apresentada no Capítulo 5.
- **Exclusões explícitas:** alguns produtos (leite em pó para bebês, sal) são excluídos do modelo principal e tratados com alocações fixas predefinidas, o que sugere uma abordagem modular consistente com práticas de otimização segmentada.

4.4 A Estimativa de 77 Caminhões de Alimentos por Dia

O total de **106 caminhões diários** (dos quais **77 destinados a produtos alimentares básicos**) foi estabelecido a partir de diretivas emitidas pelo governo israelense em 19 de setembro de 2007, após Gaza ser declarada "entidade hostil". Segundo os documentos internos, esse volume baseia-se em cálculos nutricionais de necessidades calóricas mínimas e em estimativas logísticas de peso e volume por caminhão.

A cesta de 77 caminhões de alimentos compreende as seguintes categorias: farinha e fermento (10), arroz (5), frutas, hortaliças e insumos agrícolas (18), leite em pó e fórmula infantil (3), laticínios (10), carnes/aves/peixes (10), leguminosas (2), óleo (5), açúcar (10) e sal (4). Existe, contudo, incerteza sobre se um modelo matemático formal, como um programa linear, foi efetivamente utilizado para determinar esses limiares. As evidências disponíveis sugerem uma abordagem tecnocrática enquadrada por objetivos políticos, sem que o processo de otimização seja documentado de forma transparente nos materiais disponíveis.

Essa decomposição serve, no presente trabalho, como referência para a avaliação dos resultados do modelo de programação linear desenvolvido no Capítulo 5. Em vez de utilizar esse número como restrição rígida, o modelo primeiramente computa a composição ótima da cesta alimentar por meio da minimização do volume logístico de transporte, e o resultado obtido é então comparado com o limiar politicamente definido de 77 caminhões.

4.5 Produção Local de Alimentos

Uma parcela significativa das necessidades alimentares da população era suprida pela **produção interna da Faixa de Gaza**, embora as autoridades israelenses tenham ressaltado sua instabilidade. Os documentos oficiais indicam as seguintes taxas de cobertura, extraídas da versão de 27 de janeiro de 2008, adotada como referência principal por ser a versão apresentada ao Supremo Tribunal israelense:

- **Hortaliças:** 80% das necessidades diárias cobertas localmente.
- **Frutas:** 50%, embora com tendência de declínio segundo projeções agrícolas do próprio documento.
- **Carnes:** 47%, principalmente de avicultura.
- **Leite:** apenas 8%, produzido por aproximadamente 4.000 vacas com produção média de 15 litros por dia.

Cabe registrar que a versão de 1º de janeiro de 2008 adota um percentual de produção local de frutas de apenas 10%, refletindo uma metodologia distinta. A discrepância entre as duas versões (10% versus 50%) decorre de hipóteses diferentes sobre a substituição nutricional entre frutas e hortaliças cultivadas localmente. A versão de 27 de janeiro reconhece explicitamente essa incerteza e adota a estimativa mais conservadora (50%) como aproximação de trabalho. São esses percentuais: 80%, 50%, 47% e 8% que alimentam a restrição de importação líquida $x_i \geq D_i - P_i$ apresentada no Capítulo 5.

4.6 Inconsistências nos Dados Oficiais

Uma discrepância particularmente relevante diz respeito à farinha/trigo. De acordo com o documento *Red Lines*, a ração diária é de 207 g por pessoa, o que corresponde a aproximadamente 310 toneladas por dia para 1,5 milhão de habitantes. Considerando uma capacidade média de 35 toneladas por caminhão, isso resulta em cerca de 9 caminhões por dia (ou 12 caminhões ajustados pelo fator 7/5). Mesmo acrescendo 5% para embalagens (conforme indicado nos próprios documentos), o valor permanece consideravelmente abaixo dos 15,6 caminhões citados na fonte, sugerindo a existência de um erro de cálculo no documento original.

Para examinar essa questão em maior detalhe, foi realizado um recálculo a partir dos próprios dados publicados, aplicando diretamente os percentuais de produção local às demandas diárias totais (em toneladas) e convertendo esses volumes em caminhões com base na capacidade padrão declarada. A Tabela 2 compara os valores oficiais com os recalculados a partir dos mesmos dados:

Tabela 2 – Produção local – comparação entre valores publicados e recalculados

Produto	**% Produção Local**	**Oficial**	**Recalculado**	**Diferença**
Hortaliças	80%	21,60	20,93	−0,67
Frutas	50%	23,20	22,51	−0,69
Leite	8%	5,60	5,12	−0,48
Carnes	47%	18,20	15,86	−2,34
Total	–	**68,60**	**64,42**	**−4,18**

Como demonstrado, mesmo utilizando exclusivamente as hipóteses oficiais, a conversão em caminhões não reproduz os valores publicados. A discrepância total atinge aproximadamente **4 caminhões** apenas para a produção local, e esse desvio se propaga para o cálculo da quantidade de caminhões de importação necessários. Essas inconsistências podem refletir arredondamentos excessivos ou o uso de fatores de conversão não documentados na fonte oficial. A falta de transparência metodológica impossibilita a replicação precisa dos resultados mesmo quando se utilizam os dados brutos publicados, o que reforça a importância de adotar um modelo transparente e reprodutível, como o desenvolvido neste trabalho.

5 Desenvolvimento do Modelo

Este capítulo apresenta a construção efetiva do modelo de programação linear proposto neste trabalho, a partir dos procedimentos metodológicos descritos no Capítulo 3 e das evidências documentais discutidas no Capítulo 4. O capítulo está organizado em três partes: a preparação dos dados que alimentam o modelo (Seção 5.1), a construção formal do modelo de programação linear (Seção 5.2) e sua implementação computacional (Seção 5.3).

5.1 Preparação dos Dados

5.1.1 Base de Dados Nutricional Coletada

A partir do procedimento descrito na Seção 3.3 do Capítulo 3, os seguintes grupos de alimentos foram efetivamente selecionados para compor o modelo:

- **Cereais, farinhas e derivados:** farinha, fermento, semolina, arroz, macarrão. Constituem fontes calóricas centrais com elevado rendimento energético (aproximadamente 3,4–3,7 kcal/g), sendo fundamentais na estratégia de manutenção dos níveis calóricos mínimos com reduzido volume logístico.
- **Óleos vegetais:** azeite de oliva e óleo de cártamo, com altíssima densidade energética (8,84 kcal/g), que permite compensar déficits calóricos com baixo volume de transporte.
- **Leite e laticínios:** o leite em pó, explicitamente mencionado nos documentos, é preferível ao leite líquido por razões logísticas. Seu alto teor de cálcio (9,12 mg/g) e valor proteico justificam sua inclusão.
- **Frutas:** laranjas, maçãs, tâmaras, bananas, mangas, entre outras. Os documentos mencionam uma seleção de frutas locais e importadas; embora de baixo valor calórico, são fontes importantes de fibras, açúcares naturais e certos minerais (por exemplo, magnésio).
- **Hortaliças:** tomates, pepinos, cenouras, alho, coentro, entre outros. Amplamente disponíveis localmente, são incluídas para garantir a ingestão de fibras e micronutrientes. Destaca-se o coentro, com alta concentração de cálcio (12,46 mg/g).
- **Leguminosas:** feijão, grão-de-bico, lentilhas. Fortemente recomendadas por seu alto teor de proteína vegetal (até 0,25 g/g) e capacidade de complementar a ingestão proteica animal.
- **Carnes, peixes e ovos:** produtos de origem animal incluídos para suplementar a ingestão de proteína completa, ferro e fósforo. O peixe, em particular, é um recurso localmente disponível e frequentemente mencionado nas listas de produtos autorizados.

- **Açúcar:** explicitamente mencionado na cesta (10 caminhões), com densidade calórica máxima (3,87 kcal/g) e teor de açúcar de 99,98%.
- **Sal:** uma exceção foi feita para o sal, que não foi incluído no banco de dados nutricional nem no modelo de otimização. Essa decisão baseia-se no fato de os documentos oficiais atribuírem ao sal uma alocação fixa de 4 caminhões, sem discriminação nutricional ou justificativa adicional. Optou-se, portanto, por excluí-lo do processo de modelagem dinâmica e adicioná-lo manualmente ao resultado final, após a geração da solução otimizada.

Os valores nutricionais de cada alimento selecionado, expressos por 1 g de produto, estão organizados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores nutricionais por 1 g de alimento

Alimento	**kcal**	**Proteínas**	**Carboidratos**	**Fibras**	**Açúcares**
Farinha (geral)	3,61	0,1198	0,7253	0,024	0,0031
Farinha de semolina	3,60	0,1268	0,7283	0,039	0,0000
Farinha de trigo	3,42	0,1131	0,7590	0,122	0,0041
Fermento	1,85	0,2388	0,2042	0,065	0,0160
Arroz	3,65	0,0713	0,7995	0,013	0,0012
Açúcar	3,87	0,0000	0,9998	0,000	0,9980
Macarrão	3,71	0,1304	0,7467	0,032	0,0267
Azeite de oliva	8,84	0,0000	0,0000	0,000	0,0000
Óleo de cártamo	8,84	0,0000	0,0000	0,000	0,0000
Leite fresco	0,61	0,0315	0,0480	0,000	0,0505
Leite em pó	4,96	0,2632	0,3842	0,000	0,3842
Laranja	0,49	0,0091	0,1254	0,022	0,0850
Maçã	0,52	0,0026	0,1381	0,024	0,1039
Melancia	0,30	0,0061	0,0755	0,004	0,0620
Grapefruit	0,32	0,0063	0,0808	0,011	0,0698
Banana	0,89	0,0109	0,2284	0,026	0,1223
Pera	0,57	0,0036	0,1523	0,031	0,0975
Nêspera	0,47	0,0043	0,1214	0,017	0,0000
Tâmara	2,77	0,0181	0,7497	0,067	0,6647
Abacate	1,60	0,0200	0,0853	0,067	0,0066
Damasco	0,48	0,0140	0,1112	0,020	0,0924
Ameixa	0,46	0,0070	0,1142	0,014	0,0992
Manga	0,60	0,0082	0,1498	0,016	0,1366
Tomate	0,18	0,0088	0,0389	0,012	0,0263
Pepino	0,15	0,0065	0,0363	0,005	0,0167
Pimentão	0,31	0,0099	0,0603	0,021	0,0420
Feijão	3,29	0,1987	0,6290	0,127	0,0000
Fava	0,72	0,0560	0,1170	0,042	0,0000
Cenoura	0,41	0,0093	0,0958	0,028	0,0474
Grão-de-bico	3,78	0,2047	0,6295	0,122	0,1070
Lentilha	3,52	0,2463	0,6335	0,107	0,0203
Alho	1,49	0,0636	0,3306	0,021	0,0100
Abóbora	0,26	0,0100	0,0650	0,005	0,0276
Cebola	0,40	0,0110	0,0934	0,017	0,0424
Coentro	2,79	0,2193	0,5210	0,104	0,0727
Salsa	0,36	0,0297	0,0633	0,033	0,0085
Peixe	1,10	0,2123	0,0000	0,000	0,0000
Frango	2,13	0,1833	0,0013	0,000	0,0000
Peru	1,43	0,2164	0,0013	0,000	0,0007
Carne bovina	1,17	0,2307	0,0000	0,000	0,0000
Ovo	1,43	0,1256	0,0072	0,000	0,0037
Cevada	3,52	0,0991	0,7772	0,156	0,0080
Milho	0,86	0,0327	0,1870	0,020	0,0626
Aveia	3,34	0,1264	0,7262	0,119	0,0246
Sorgo	3,29	0,1062	0,7209	0,067	0,0253

Além dos nutrientes apresentados na Tabela 3, foram também coletados dados de cálcio, magnésio e fósforo para cada alimento, posteriormente integrados ao modelo de programação linear.

5.1.2 Parâmetros Nutricionais de Referência

Em consonância com a abordagem adotada no documento *Red Lines*, o modelo distingue grupos etários e de gênero para calibrar com maior precisão as necessidades energéticas e nutricionais. Os valores de referência de energia diária, apresentados na Tabela 4, foram obtidos das *Dietary Guidelines for Americans 2020–2025* (DGA).

Tabela 4 – Necessidades calóricas diárias por grupo etário e de gênero

Grupo	**Cr. 2–3**	**Cr. 4–6**	**Cr. 7–10**	**Fem. 11–24**	**Fem. 25–50**	**Fem. 51+**	**Mas. 11–14**	**Mas. 15–18**	**Mas. 19–24**	**Mas. 25–50**	**Mas. 51+**
Calorias	1400	1800	2000	2200	2200	1800	2600	3000	3000	2800	2400

Cabe registrar que as recomendações aqui adotadas são ligeiramente superiores àquelas utilizadas no documento *Red Lines* (2.000–2.500 kcal para adultos e 1.550 kcal para crianças, baseadas em padrões médios de consumo israelense). A escolha das DGA como referência primária neste trabalho visa assegurar aderência a diretrizes internacionalmente reconhecidas e auditáveis, ainda que essa diferença de patamar deva ser considerada na interpretação dos resultados apresentados nos capítulos seguintes.

A Tabela 5 apresenta a ingestão diária recomendada de cálcio, fósforo e magnésio por faixa etária, com base nas recomendações do Conselho Superior de Saúde da Bélgica (2016).

Tabela 5 – Ingestão diária recomendada de cálcio, fósforo e magnésio (mg/dia)

Faixa etária	**Sexo**	**Ca (mg)**	**P (mg)**	**Mg (mg)**
0–5 meses	M/F	400	120	50
6–11 meses	M/F	600	275	80
1–3 anos	M/F	450	360	170
4–6 anos	M/F	800	450	230
7–10 anos	M/F	800	700	250
11–14 anos	M	1150	900	300
	F	1150	900	250
15–18 anos	M	1150	800	350
	F	1150	800	300
Adultos	M	950	800	350
	F	950	800	300
Acima de 60 anos	M	950	800	350
	F	950	800	300
Gestantes	F	950	800	300
Lactantes	F	950	800	300

Para impor equilíbrio mínimo entre grupos alimentares, foi elaborada a Tabela 6, distinguindo metas de ingestão (frutas, hortaliças, laticínios, proteínas animais) e limites máximos recomendados (óleos e açúcares), com base nas DGA.

Tabela 6 – Quantidades recomendadas por grupo alimentar (em gramas por dia)

Grupo	**Carnes**	**Hortaliças**	**Frutas**	**Laticínios**	**Açúcar**	**Óleo**
Crianças 2–3	112	192	192	617,5	14	17
Crianças 4–6	140	320	192	617,5	18	22
Crianças 7–10	154	320	256	617,5	20	24
Mulheres 11–24	168	384	256	741	22	29
Mulheres 25–50	168	384	256	741	22	29
Mulheres 51+	140	320	192	741	18	24
Homens 11–14	182	448	256	741	26	34
Homens 15–18	196	512	320	741	30	44
Homens 19–24	196	512	320	741	30	44
Homens 25–50	196	448	320	741	28	36
Homens 51+	182	384	256	741	24	31

Quanto ao açúcar adicionado, as diretrizes nutricionais estipulam que ele não deve representar mais de 10% da ingestão energética total diária. Para converter esse limite em gramas, aplicou-se o fator de conversão baseado no valor energético do açúcar (3,87 kcal/g) e em seu teor de açúcar (99,8%):

$$\text{Máximo de açúcar (g)} = x \times \frac{0{,}998}{3{,}87} \times 0{,}1$$

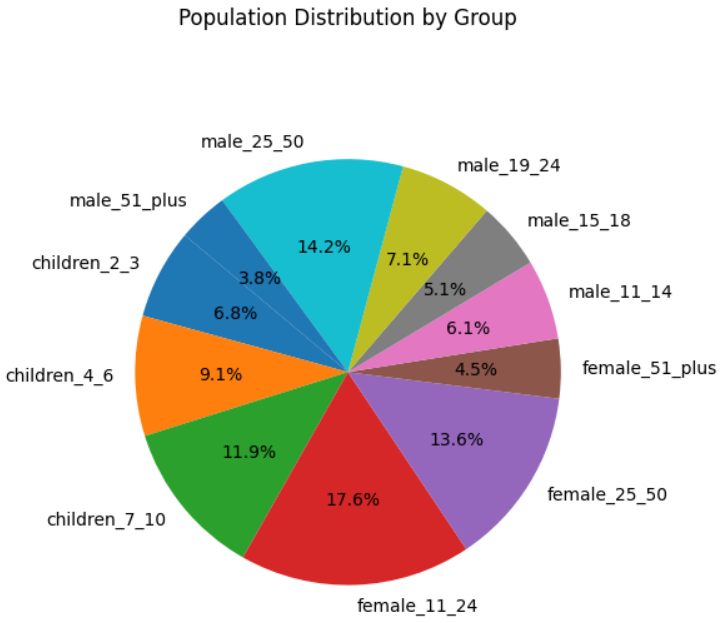
onde x representa a ingestão energética total (em kcal) do grupo.

5.1.3 Estrutura Demográfica Utilizada no Modelo

Para garantir a compatibilidade entre o modelo nutricional e a estrutura demográfica dos documentos oficiais, foi desenvolvido um script Python para reorganizar os dados populacionais. O documento *Red Lines* apresenta dados em faixas etárias amplas que não correspondem diretamente às categorias usadas nas tabelas de consumo alimentar, exigindo a reestruturação dos dados demográficos antes da aplicação das recomendações nutricionais.

O script desagregou cada faixa etária em anos individuais, redistribuiu as populações masculina e feminina proporcionalmente e as reagregou em grupos específicos de modelagem (por exemplo, "crianças de 2–3 anos"ou "homens de 15–18 anos"). Essa transformação assegurou correspondência granular e consistente entre perfis demográficos e suas respectivas necessidades nutricionais, melhorando a acurácia logística do modelo. A distribuição populacional resultante por grupo é apresentada na Figura 2.

Figura 2 – Distribuição da população pelos grupos de modelagem nutricional.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.2 Construção do Modelo de Programação Linear

Com base nos dados organizados na Seção 5.1 e nas técnicas de pesquisa operacional apresentadas na Seção 3.4 do Capítulo 3, foi formulado um modelo de programação linear do tipo *problema da dieta*. O objetivo principal do modelo é minimizar o número total de caminhões necessários para atender às necessidades nutricionais de uma população de 1,5 milhão de pessoas durante um dia, sob restrições nutricionais mínimas. O modelo foi implementado em Python com o auxílio da biblioteca `PuLP`, que permite a formulação e a resolução de problemas lineares com diferentes solvers (por exemplo, CBC, GLPK).

O modelo integra um conjunto de restrições nutricionais, estruturais e logísticas, com o objetivo de assegurar tanto a cobertura dietética essencial quanto um nível mínimo de diversidade alimentar.

- **Restrições nutricionais básicas:** o modelo impõe limiares mínimos de ingestão para energia total (kcal) e para um conjunto selecionado de macro e micronutrientes (proteínas, carboidratos, fibras, cálcio, magnésio, fósforo, vitaminas B1, B2 e B6, zinco e ferro), conforme as tabelas de referência apresentadas na Seção 5.1.2.

- **Restrições de diversidade alimentar:** para evitar soluções excessivamente concentradas em poucos alimentos de alta densidade calórica, o modelo inclui requisitos mínimos de quantidade para os principais grupos alimentares: frutas, hortaliças, leguminosas, carnes e produtos de origem animal, laticínios, farinhas e cereais.

- **Restrições opcionais de quantidade máxima:** um dicionário de valores permite impor limites superiores sobre a quantidade de determinados alimentos específicos, refletindo restrições nutricionais (por exemplo, produtos ricos em açúcar ou gordura) ou limitações logísticas.

- **Restrição de proporcionalidade farinha–arroz:** exige que a quantidade de farinha seja exatamente três vezes superior à quantidade de arroz, reproduzindo a proporção empírica identificada nos documentos de referência (ver Seção 4.2 do Capítulo 4) e mantendo a consistência interna entre categorias alimentares correlatas.

- **Limitação combinada de óleos vegetais:** a soma das quantidades de azeite de oliva e óleo de cártamo não pode ultrapassar um limiar máximo definido, assegurando o controle da ingestão de gorduras.

- **Restrição de importação líquida de produção local:** sejam D_i a demanda diária total do produto i e P_i sua produção local estimada. A quantidade mínima a ser importada, x_i, é dada por

  $$x_i \geq D_i - P_i,$$

  restrição que ajusta dinamicamente as quantidades de cada grupo alimentar com base na taxa de produção local, considerando apenas a parcela ainda a ser coberta por importações. Os percentuais de produção local efetivamente utilizados como entrada dessa restrição foram apresentados na Seção 4.5 do Capítulo 4.

- **Restrição de conversão logística do leite:** o modelo incorpora um fator de conversão entre leite em pó e leite fresco (cujo valor, extraído dos documentos oficiais, foi detalhado na Seção 4.3 do Capítulo 4), da seguinte forma:

  ```
  prob += (x['leite_po'] * FATOR_CONVERSAO
  + x['leite']) >= min_leite_combinado
  prob += (x['leite_po'] * FATOR_CONVERSAO
  + x['leite']) <= max_leite_combinado
  ```

  Ao relaxar as restrições específicas por tipo de leite e enfatizar quantidade e forma, o modelo ganha flexibilidade enquanto preserva a adequação nutricional.

5.2.1 Formulação Matemática

Formalmente, sejam x_i as variáveis de decisão representando a quantidade (em gramas) do alimento i a ser fornecida por pessoa por dia. Seja w_i a capacidade de carga média por caminhão do alimento i (em gramas), e N o tamanho da população. A função objetivo que minimiza o número total de caminhões é:

$$\min \quad \sum_i \frac{x_i \cdot N}{w_i}$$

sujeita às restrições:

$$\sum_i n_{ij} \cdot x_i \geq r_j \quad \forall j \quad \text{(restrições nutricionais mínimas)}$$

$$x_i \geq 0 \quad \forall i \quad \text{(não negatividade)}$$

onde n_{ij} representa o teor do nutriente j no alimento i (por grama), e r_j é a necessidade diária mínima do nutriente j por pessoa, conforme definido nas tabelas de referência da Seção 5.1.2.

5.3 Implementação Computacional

A arquitetura do código foi concebida de forma modular, dividida em três scripts Python independentes, para melhorar a legibilidade, a manutenibilidade e a reutilizabilidade. Todo o processo é automatizado: os dados nutricionais dos alimentos são extraídos dinamicamente de um arquivo `.csv` estruturado, evitando entradas manuais e assegurando a rastreabilidade dos dados. As bibliotecas Python utilizadas incluem `pandas`, `PuLP` e `os`.

`main.py` – **Script principal:** serve como ponto de entrada do programa. Define os parâmetros globais do projeto e coordena a execução dos módulos nutricional e logístico. Define a distribuição demográfica da população e as necessidades nutricionais de cada grupo etário e de gênero, chama a função `solve_diet` para cada grupo e executa a função `calculate_trucks` para estimar as necessidades logísticas semanais com base nas dietas otimizadas.

`diet.py` – **Otimização dietética:** implementa a função `solve_diet`, que modela o problema da dieta como um programa linear clássico. O objetivo é minimizar a quantidade total de alimentos consumidos (em gramas), atendendo a um conjunto de restrições nutricionais por grupo populacional: ingestão mínima de calorias, proteínas, cálcio, fósforo e magnésio, além de quantidades mínimas e máximas para certas categorias (frutas, hortaliças, carnes, açúcares, óleos etc.). O problema é resolvido com a biblioteca `PuLP`. Uma vez obtida a solução, os resultados são salvos em arquivo de texto para cada grupo, contendo uma tabela-resumo dos alimentos selecionados, suas quantidades ótimas e a ingestão resultante de nutrientes.

`logistic.py` – **Simulação logística:** dedicado à análise logística da solução dietética. Lê os arquivos `.txt` gerados pelo `diet.py` para cada grupo, agrega as quantidades totais de alimentos por categorias principais (cereais, arroz, hortaliças, frutas, laticínios, leguminosas, carnes, óleos, açúcares etc.) e estima o número de caminhões necessários para abastecer a população de referência de aproximadamente 1,38 milhão de pessoas.[1]

5.4 Adaptações e Melhorias do Modelo

Após a estruturação do código e a geração de um conjunto inicial de recomendações dietéticas otimizadas para cada grupo demográfico, com base nas DGA, uma série de modificações foi introduzida para explorar cenários alternativos e avaliar a sensibilidade do modelo.

5.4.1 Incorporação da Produção Local

A primeira adaptação consistiu na incorporação das taxas de produção local de alimentos (detalhadas na Seção 4.5 do Capítulo 4). As quantidades de alimentos a importar foram reduzidas proporcionalmente à parcela de produção local estimada, por meio da seguinte lógica:

```
if taxas_producao_local:
for grupo in total_grupo:
taxa_local = taxas_producao_local.get(grupo, 0.0)
taxa_importacao = 1.0 - taxa_local
total_grupo[grupo] *= taxa_importacao
```

[1] O valor de 1,38 milhão corresponde à população modelada após a exclusão das crianças menores de 2 anos do modelo principal, tratadas separadamente por meio do acréscimo fixo de 34 toneladas/dia, conforme indicado nos documentos oficiais (Seção 4.3 do Capítulo 4). A população total de referência adotada é de 1.476.294 habitantes, conforme dados demográficos do documento *Red Lines*.

5.4.2 Ajuste das Restrições de Leite

A segunda modificação envolveu o refinamento das restrições relativas ao consumo de leite. Inicialmente definida como limite superior, a restrição foi redefinida como limite inferior para garantir uma ingestão mínima de laticínios, mantendo ao mesmo tempo a liberdade do modelo para escolher entre as formas disponíveis de leite com base na eficiência nutricional e logística.

5.4.3 Integração da Logística na Função Objetivo

Uma adaptação metodológica adicional consistiu na integração direta da logística de transporte na função objetivo. Foram estruturadas duas formulações distintas de otimização: a primeira minimiza o peso total dos alimentos importados, com a conversão em caminhões realizada em etapa de pós-processamento; a segunda incorpora o transporte diretamente na função objetivo, minimizando o número total de caminhões necessários e levando em conta os limites de carga específicos por produto.

5.4.4 Cenários de Simulação

Para comparar as duas formulações sob diferentes condições de abastecimento, foram definidos quatro cenários de simulação:

(i) sem produção local, minimizando o peso total de alimentos;

(ii) com produção local, minimizando o peso total de alimentos;

(iii) sem produção local, minimizando o número de caminhões;

(iv) com produção local, minimizando o número de caminhões.

Essa estrutura de duplo objetivo aumenta a flexibilidade do modelo, permitindo capturar tanto a suficiência nutricional quanto a viabilidade logística de transporte. Além disso, a aplicação de duas estratégias de otimização independentes funciona como mecanismo de validação cruzada: ao comparar as soluções produzidas por cada abordagem, inconsistências ou resultados inesperados podem ser identificados e investigados, melhorando a robustez e a credibilidade dos resultados finais.

Para a análise final e a comparação com a proposta israelense de abastecimento alimentar, foi selecionado o cenário **(iv): com produção local, minimizando o número de caminhões**. Essa configuração foi escolhida por oferecer uma linha de base realista e operacionalmente relevante, refletindo condições em que a produção agrícola local está parcialmente disponível e o objetivo é minimizar o encargo logístico das importações alimentares. A comparação entre os resultados desse cenário e os valores oficiais é apresentada no capítulo de resultados.

6 Resultados

6.1 Saídas iniciais do modelo

Para cada grupo demográfico, o modelo gera um arquivo `.txt` detalhando a composição alimentar otimizada em função das restrições nutricionais e logísticas definidas. Essas saídas especificam a distribuição dos alimentos, as quantidades alocadas e os aportes correspondentes de macro e micronutrientes. O Apêndice A ilustra um exemplo para o grupo *Homens 15–18 anos*.

A partir do conjunto de saídas individuais, foi consolidada uma tabela com o regime alimentar resultante para cada grupo demográfico, especificando a quantidade diária (em gramas) alocada a cada categoria de alimento, bem como o total de gramas e de calorias correspondente. Essas quantidades constituem a base a partir da qual as necessidades logísticas são posteriormente calculadas: convertendo a massa diária de cada categoria alimentar, multiplicada pela população de cada grupo, em número de caminhões necessários por categoria. Essa conversão, e a respectiva comparação com as hipóteses operacionais do documento oficial Red Lines, são apresentados posteriormente.

Tabela 7 – Regime resultante da função objetivo que visa minimizar o número de caminhões – Distribuição por idade e gênero

	Crianças			**Mulheres**			**Homens**				
Alimento	**2–3**	**4–6**	**7–10**	**11–24**	**24–50**	**51+**	**11–14**	**15–18**	**19–24**	**24–50**	**51+**
Farinha	95	166	185	213	213	175	235	261	261	261	216
Arroz	31,7	55,3	61,7	71	71	58,3	78,3	87	87	87	72
Hortaliças	192	320	320	384	384	320	448	512	512	448	384
Frutas	192	192	256	256	256	192	256	320	320	320	256
Leite	418	418	418	626	418	418	626	626	626	418	418
Carne	112	140	154	168	168	140	182	196	196	196	182
Leguminosas	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
Óleo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Açúcar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total (g)	**1160,7**	**1411,3**	**1514,7**	**1838**	**1630**	**1423,3**	**1945,3**	**2122**	**2122**	**1850**	**1648**
Total de calorias por dia	**1400**	**1800**	**2000**	**2200**	**2200**	**1800**	**2600**	**3000**	**3000**	**2800**	**2400**

Fonte: Saída do modelo.

6.2 Impacto das hipóteses de consumo de leite

A primeira série de simulações foi realizada aplicando a quantidade de leite recomendada pelas *Dietary Guidelines for Americans* (DGA), o que resultou em uma necessidade estimada de **83,86 caminhões** para essa categoria.

Para permitir uma comparação mais direta com o plano *Red Lines*, uma segunda série foi conduzida substituindo esse valor pelo constante nos dados israelenses. O número de caminhões necessários passou então para **63,55**, uma redução de **20,31 caminhões** (-24,2%). Esse recalibramento visou limitar a influência das diferenças de hipóteses nutricionais e isolar melhor os demais fatores que explicam as divergências observadas.

Apesar desse alinhamento em um parâmetro-chave, o modelo continua a produzir um total superior aos valores publicados, o que sugere a existência de arredondamentos, perdas não documentadas, capacidades reais distintas ou ainda ajustes voluntários nos dados oficiais.

Tabela 8 – Comparação do número de caminhões necessários para o leite segundo duas hipóteses

Cenário	**Caminhões**	**Diferença**	**Variação %**
Valor *Red Lines*	63,55	–	–
Recomendação DGA	83,86	+20,31	+24,2%

Esses resultados ilustram o impacto determinante das hipóteses nutricionais sobre as necessidades logísticas.

6.3 Efeito da produção local

A consideração da produção local (hortaliças, frutas, leite e carne) reduz as necessidades de importação em cerca de **57,46 caminhões por dia** (-33%), com quedas particularmente acentuadas para as hortaliças (-80%) e as frutas (-50%). Os cereais e as leguminosas não se beneficiam de nenhuma redução, por falta de produção significativa.

Tabela 9 – Necessidades de caminhões antes e depois da consideração da produção local

Grupo	**Antes**	**Depois**	**Redução %**
Frutas	25,14	12,57	-50,00%
Carne	21,60	11,45	-47,00%
Leite	63,55	58,47	-8,00%
Hortaliças	37,07	7,41	-80,00%
Total	**147,36**	**89,90**	

O documento oficial apresenta uma redução de 68,6 caminhões, cerca de 11 a mais do que o cálculo do modelo. Essa divergência pode decorrer de conversões peso–caminhão distintas, de arredondamentos ou de métodos de agregação não documentados.

6.4 Substituibilidade entre leite fresco e leite em pó

Uma segunda dimensão da hipótese nutricional relativa ao leite diz respeito não à *quantidade* recomendada, mas à *forma* sob a qual essa quantidade pode ser atendida: leite fresco ou leite em pó. Como o documento *Red Lines* declara explicitamente um fator de conversão logística entre as duas formas (3 caminhões de leite em pó equivalem a 40 caminhões de leite fresco, ou aproximadamente 1:13,33), essa razão foi incorporada ao modelo como um parâmetro de equivalência.

Quando o modelo tem liberdade total para escolher entre leite fresco e leite em pó, sujeito apenas às restrições nutricionais e ao fator de conversão logística, a solução converge quase inteiramente para o leite em pó, reduzindo a necessidade logística desse grupo a apenas **4,77 caminhões** (4,39 caminhões considerando somente a parcela de importação), contra os 58,47 caminhões observados quando apenas o leite fresco é permitido. A Tabela 10 detalha essa saída, ao lado dos demais grupos alimentares na mesma execução.

Tabela 10 – Resultado do modelo com escolha livre entre leite fresco e leite em pó

Grupo	**Caminhões (total)**	**Caminhões (somente importação)**
Farinhas	11,60	11,60
Frutas	45,13	22,56
Leguminosas	2,53	2,53
Carne	33,53	17,77
Leite	**4,77**	**4,39**
Óleo	0,98	0,98
Arroz	5,41	5,41
Açúcar	3,54	3,54
Hortaliças	26,35	5,27
Total	**133,82**	**74,04**

A convergência quase total para o leite em pó é um comportamento matematicamente esperado, não se tratando de um artefato de implementação. Isso ocorre porque o fator de conversão de 1:13,33 é aplicado exclusivamente à exigência nutricional combinada de leite. Consequentemente, ao não penalizar de forma equivalente o peso transportado, o modelo prioriza a variável de menor impacto logístico. Logo, o leite em pó torna-se estritamente mais eficiente do ponto de vista logístico do que o leite fresco em qualquer solução que minimize o número de caminhões. O resultado ilustra, de forma direta, a limitação apontada por Dooren (2018): modelos de programação linear tendem a produzir soluções nutricionalmente adequadas, porém operacional e culturalmente problemáticas, quando restrições de aceitabilidade não são impostas explicitamente. Nenhuma população real substituiria quase integralmente o leite fresco por leite em pó apenas por eficiência de transporte, o que evidencia a necessidade de restrições adicionais de aceitabilidade, não contempladas nesta versão do modelo, para que a solução seja operacionalmente realista.

Por esse motivo, para fins de comparação direta com os dados publicados no documento *Red Lines* (Tabela 11), optou-se por restringir o modelo ao uso exclusivo de leite fresco durante a etapa de otimização, chegando a um resultado agregado de 58,47 caminhões. Sobre esse valor, aplicou-se manualmente, em etapa de pós-processamento, o fator de conversão declarado no próprio documento oficial: segundo o *Red Lines*, 3 caminhões de leite em pó equivalem, em termos nutricionais, a aproximadamente 40 caminhões de leite fresco (razão de 1:13,33). Assumiu-se, portanto, que uma fração do resultado agregado de 58,47 caminhões, equivalente a aproximadamente 39,99 caminhões de leite fresco, seria, na prática, coberta por leite em pó. Essa fração foi subtraída do total e substituída pelos 3 caminhões que ela efetivamente ocuparia caso fosse transportada na forma de pó, conforme a proporção declarada no documento:

$$58{,}47 - \underbrace{39{,}99}_{\substack{\text{equivalente em leite fresco} \\ \text{do leite em pó assumido}}} + \underbrace{3}_{\substack{\text{caminhões reais de} \\ \text{leite em pó}}} \approx \mathbf{21{,}48\ \textbf{caminhões}}$$

É importante deixar explícito que esse valor de 21,48 caminhões **não constitui uma saída direta do modelo de otimização**: trata-se de uma extrapolação manual, construída a partir de uma premissa emprestada do próprio documento oficial (a de que exatamente 3 caminhões seriam destinados ao leite em pó) e aplicada ao resultado agregado de um modelo que, em sua formulação original, nunca considerou o leite em pó como alternativa disponível para otimização. A finalidade desse ajuste é exclusivamente comparativa, permitindo posicionar o resultado do modelo na mesma base de referência utilizada pelo documento oficial, e não deve ser interpretada como um resultado de otimização.

Essa opção metodológica, embora introduza uma etapa manual no processo, é justificada pelo objetivo central deste trabalho: testar se a composição divulgada no documento *Red Lines* poderia ter sido obtida por meio de programação linear. Nesse sentido, o próprio fato de ser necessário impor manualmente essa restrição, e de o modelo, quando deixado livre, convergir para uma solução tão distante da composição real (quase 100% leite em pó, contra a combinação de leite fresco e em pó relatada no documento), reforça o argumento central da tese: se as autoridades israelenses tivessem de fato empregado um processo de otimização linear análogo ao aqui desenvolvido, seria esperado que a solução resultante também convergisse para extremos semelhantes na ausência de restrições de aceitabilidade explícitas. A distância entre esse comportamento esperado e a distribuição efetivamente publicada sugere, portanto, que a composição do documento oficial dificilmente decorre de um processo formal de otimização sem intervenção humana adicional, sustentando a hipótese de que fatores não puramente matemáticos (práticos, políticos ou de aceitabilidade) desempenharam papel relevante na definição dos valores finais.

6.5 Ausência do grupo de cereais

Em todas as simulações, a categoria **cereais** nunca foi selecionada pelo modelo como componente ótimo da dieta, independentemente da variação das restrições. Essa ausência explica-se provavelmente por uma eficiência nutricional limitada em relação ao seu peso, em comparação com outros alimentos mais ricos em nutrientes.

Essa constatação converge com os dados oficiais, nos quais os cereais não aparecem nem na tabela "Aporte energético e porções diárias", nem na "Hipótese de trabalho – porção humanitária diária". Essa convergência levou a considerar esse grupo como não essencial no modelo final, o que possivelmente reflete uma decisão semelhante tomada pelas autoridades israelenses.

6.6 Comparação global com o plano israelense

O plano oficial, publicado em números inteiros, prevê um total de 77 caminhões distribuídos entre diferentes categorias. Para efeito de comparação, os resultados do modelo são expressos em valores decimais, de modo a representar a proporção exata de carregamento atribuída a cada grupo alimentar. Embora essa representação não seja diretamente operacional, ela permite refletir melhor as necessidades reais, mantendo-se coerente com o estilo das fontes oficiais.

Tabela 11 – Comparação entre o plano israelense e os resultados do modelo

Grupo	**Plano israelense**	**Modelo**	**Comentário**
Farinha e fermento	10	11,59	Semelhante
Arroz	5	5,41	Praticamente idêntico
Frutas + hortaliças	18	19,91	Ligeiramente mais elevado
Leite + fórmula infantil	13	21,48	Significativamente mais elevado
Carne	10	11,45	Comparável
Leguminosas	2	9,28	Nitidamente mais elevado
Óleo	5	0	Não selecionado
Açúcar	10	0	Não selecionado
Sal	4	4	Adicionado após a solução
Total	**77**	**83,12**	Mais elevado

Fonte: Red Lines, tradução não oficial pela Gisha, Slide 3.

A diferença observada não decorre de um erro de modelagem, mas traduz o fato de que uma distribuição fundamentada em critérios nutricionais resulta em uma composição diferente e provavelmente mais adequada da ajuda alimentar. O modelo respeita o conjunto das recomendações internacionais de macro e micronutrientes, o que não é explicitamente o caso do plano israelense.

6.7 Experimento com restrições relaxadas

Para analisar as preferências logísticas intrínsecas do modelo, foi testado um cenário simplificado: todas as categorias alimentares recebiam um limiar mínimo uniforme de 20 g/pessoa/dia. O objetivo era observar quais alimentos seriam espontaneamente privilegiados caso o único critério fosse a minimização do número total de caminhões.

Essa escolha corresponde a um afrouxamento das *restrições de diversidade alimentar* aplicadas nos cenários completos. Concretamente, os limiares mínimos específicos de cada grupo alimentar, habitualmente definidos segundo as recomendações do USDA, da DGA, do NIH e das diretrizes belgas, foram substituídos por um limiar idêntico e mínimo para todos os grupos, sem tetos de consumo, exceto para o óleo e o açúcar. Em contrapartida, as restrições nutricionais fundamentais (aportes calóricos, proteínas, cálcio, ferro etc.) foram mantidas. Ao relaxar essas restrições, garantindo ao mesmo tempo uma diversidade alimentar mínima, obtém-se o seguinte perfil:

- **Trigo/farinhas:** 18,92 caminhões
- **Arroz:** 8,83 caminhões
- **Leite:** 2,37 caminhões

- **Óleo:** 1,93 caminhões
- **Leguminosas:** 1,55 caminhões
- **Carne:** 1,37 caminhões
- **Hortaliças:** 1,25 caminhões
- **Frutas:** 0,97 caminhões

O total necessário é então de **37,19 caminhões**, bem inferior aos cenários completos, que frequentemente ultrapassam 83 caminhões. O modelo privilegia claramente os alimentos de alta densidade calórica e baixo custo logístico, como trigo/farinhas e arroz, que juntos representam mais de 70% do volume total.

Em contrapartida, frutas, hortaliças e carnes estão presentes apenas no mínimo exigido, sugerindo sua baixa eficiência logística na ausência de exigências nutricionais rígidas, provavelmente em razão de sua baixa densidade energética e de seu volume elevado.

Esse experimento demonstra que, sem restrições nutricionais detalhadas, a solução ótima se concentra na eficiência logística pura, em detrimento do equilíbrio alimentar. Ele confirma, assim, a necessidade de impor restrições nutricionais e de diversidade alimentar para garantir uma solução ao mesmo tempo viável e adequada do ponto de vista nutricional.

6.8 Reprodução do cenário oficial do documento Red Lines

Por fim, a fim de testar a robustez das diferenças observadas, foi realizada uma simulação final impondo estritamente os valores de porções diárias apresentados na tabela oficial do documento Red Lines (Tabela 12). Para cada grupo de idade e sexo, as quantidades indicadas para cada categoria alimentar (farinha, arroz, hortaliças, frutas, leite, carne, leguminosas, óleo, açúcar e sal) foram diretamente incorporadas ao modelo como restrições rígidas de variedade e volume. Essa configuração visou reproduzir fielmente a estrutura nutricional fixada pelo Ministério da Saúde de Israel, mantendo ao mesmo tempo os parâmetros logísticos e as hipóteses de capacidade de transporte aplicados nos demais cenários.

Tabela 12 – Energia (calorias) e porção alimentar diária (em gramas) na Faixa de Gaza segundo o índice do Ministério da Saúde – Discriminado por idade e sexo

	Crianças			**Mulheres**			**Homens**				
Alimento	**2–3**	**4–6**	**7–10**	**11–24**	**24–50**	**51+**	**11–14**	**15–18**	**19–24**	**24–50**	**51+**
Farinha	95	166	185	213	213	175	235	261	261	261	216
Arroz	32	55	62	71	71	58	78	87	87	87	72
Hortaliças	133	220	247	267	267	234	300	334	334	334	280
Frutas	201	350	411	456	456	380	533	609	609	609	487
Leite	418	418	418	626	418	418	626	626	626	418	418
Carne	143	228	249	260	260	238	282	303	303	303	271
Leguminosas	18	28	31	33	33	30	35	38	38	38	34
Óleo	0	7	11	0	18	9	10	30	25	40	20
Açúcar	46	0	34	22	28	32	35	70	55	65	35
Total (g)	**1085**	**1472**	**1647**	**1949**	**1764**	**1574**	**2134**	**2357**	**2337**	**2154**	**1832**
Total de calorias por dia	**1300**	**1800**	**2000**	**2200**	**2200**	**1900**	**2500**	**3000**	**2900**	**2900**	**2300**

Fonte: Red Lines, tradução não oficial pela Gisha, Slide 4.

Mesmo respeitando à risca a distribuição alimentar oficial, o modelo calcula uma necessidade logística de 95,12 caminhões por dia, como indicado na Tabela 13. Esses resultados sugerem que a política das Red Lines pode não ter sido elaborada a partir de um processo completo de otimização matemática, ou pelo menos não com os mesmos parâmetros e restrições utilizados em nosso modelo. As diferenças observadas poderiam decorrer de hipóteses nutricionais distintas, de escolhas logísticas específicas ou ainda de considerações políticas e operacionais não documentadas. Sem acesso à metodologia interna exata, permanece difícil determinar em que medida um arcabouço formal de modelagem foi de fato aplicado.

Tabela 13 – Resultados do modelo com restrições fixadas nos valores da tabela *Red Lines*

Grupo alimentar	**Caminhões**
Farinhas e fermento	11,60
Frutas	22,56
Leguminosas	2,53
Carne	17,77
Laticínios + fórmula infantil	21,48
Óleo	0,98
Arroz	5,41
Açúcar	3,54
Hortaliças	5,27
Sal	4,00
Total (somente importações)	**95,12**

Essa constatação sugere que o número de 77 caminhões indicado no documento Red Lines não decorre diretamente de uma conversão fiel das porções diárias em unidades de transporte, mas que provavelmente foi ajustado, de forma voluntária ou por simplificação, para atender a restrições ou objetivos externos à estrita adequação entre necessidades alimentares e capacidade logística. Em outras palavras, mesmo quando o modelo reproduz exatamente as hipóteses nutricionais oficiais, o cálculo rigoroso revela que os recursos logísticos necessários seriam superiores às estimativas governamentais.

7 Considerações Finais

Este estudo teve como objetivo avaliar se a política logística adotada pelo governo israelense apresentada nos documentos Red Lines, em matéria de alocação alimentar para a Faixa de Gaza, poderia ter sido elaborada a partir de um arcabouço formal de otimização matemática. Para isso, procedemos a uma verificação cruzada de todos os dados relevantes presentes no documento, incluindo as quantidades por item e as alocações de caminhões, com os resultados de um modelo de otimização independente fundamentado na adequação nutricional e na eficiência logística.

A presente análise revelou incoerências relevantes entre os dois conjuntos de dados. A composição alimentar prevista pela política do documento difere sensivelmente daquela proposta pelo nosso modelo otimizado, mesmo quando se adotam restrições relaxadas, como limites mínimos muito baixos para os grupos de alimentos e ausência de limite máximo, exceto para o óleo e o açúcar. Nessas condições, o modelo despriorizou sistematicamente produtos como carne fresca, laticínios e frutas, que, no entanto, aparecem em quantidades proporcionalmente maiores nos dados de referência do documento Red Lines. Esse contraste sugere, sem constituir prova definitiva, que a composição oficial não decorre exclusivamente de critérios de eficiência logística e nutricional pura.

As análises detalhadas evidenciaram diversas discrepâncias quantitativas. Mesmo quando as hipóteses do modelo foram alinhadas a determinados parâmetros-chave dos dados israelenses, como a quantidade de referência do consumo de leite, as necessidades de caminhões calculadas permaneceram superiores aos valores publicados. Essa defasagem indica que a seleção dos alimentos no documento oficial não parece ter se apoiado exclusivamente na suficiência nutricional mínima, podendo ter sido influenciada por outros fatores não documentados, de natureza política, operacional ou logística. Cabe notar que o documento não menciona o uso de modelos de programação linear, de otimização em números inteiros mistos, nem de arcabouços formais de tomada de decisão. A ausência de elementos padrão de modelagem, como funções objetivo explícitas ou restrições fundamentadas em dados nutricionais consistentes e auditáveis, é compatível com a hipótese de que a política não foi elaborada a partir de uma abordagem de otimização formal, ainda que essa ausência, por si só, não permita descartar por completo tal possibilidade.

Um desafio metodológico adicional, identificado ao longo da análise, diz respeito à obtenção de um método claro e consistente para comparar determinados alimentos entre o modelo proposto e os dados publicados. O caso do leite ilustra bem essa dificuldade: quando o modelo tem liberdade total para substituir leite fresco por leite em pó, a solução converge inteiramente para o leite em pó, uma vez que o fator de conversão logística declarado no próprio documento (aproximadamente 1 caminhão de leite em pó para 13,33 caminhões de leite fresco) torna essa opção substancialmente mais eficiente do ponto de vista do transporte. Para tornar a comparação com os dados oficiais mais direta, foi necessário restringir o modelo ao uso exclusivo de leite fresco durante a etapa de otimização e aplicar o fator de conversão apenas posteriormente, como ajuste de pós-processamento. Esse procedimento, embora justificado pelo objetivo comparativo do trabalho, introduz uma etapa de decisão manual que não decorre diretamente da otimização, e deve ser considerado como uma limitação metodológica a ser levada em conta na interpretação dos resultados relativos a esse grupo alimentar específico. Ao mesmo tempo, esse comportamento reforça, de forma indireta, o argumento central do trabalho: se as autoridades israelenses tivessem de fato empregado um processo de otimização linear análogo ao aqui desenvolvido, seria esperado que a solução resultante também convergisse para composições extremas na ausência de restrições explícitas de aceitabilidade, o que não corresponde à distribuição relativamente equilibrada observada nos dados publicados.

Em termos práticos, esses resultados sugerem que o plano oficial de distribuição, embora potencialmente viável do ponto de vista logístico, pode não ter assegurado um uso eficiente dos recursos de transporte disponíveis, tampouco um aporte nutricional otimizado para a população, de acordo com os critérios adotados neste trabalho. A diferença entre o modelo de otimização e a política real de entrega chama atenção para os riscos de fundamentar a logística humanitária em limiares definidos sem transparência metodológica explícita, ainda que não seja possível, a partir apenas destes dados, atribuir essa diferença a uma causa única.

Além disso, relatórios oficiais e análises de terceiros indicam que, entre junho de 2007 e junho de 2010, as entregas reais de alimentos para Gaza ficaram frequentemente abaixo dos limiares mínimos definidos pelas próprias autoridades israelenses. Segundo (Gisha – Legal Center for Freedom of Movement, 2010):

> "[...] o abastecimento de produtos básicos como farinha, arroz, óleo e laticínios se esgotou. Os comerciantes atribuíram isso às restrições à importação. [...] Gaza enfrentou escassez de produtos como fórmula infantil, azeite de oliva, carne fresca, chocolate, nozes, especiarias e refrigerantes."

Essa escassez foi particularmente aguda durante os fechamentos prolongados dos pontos de passagem fronteiriços e teve consequências diretas sobre a segurança alimentar e a saúde pública. Ademais, mesmo quando os alimentos eram teoricamente autorizados no âmbito da política Red Lines, sua entrega efetiva mostrou-se inconstante. Como demonstra a Figura 3, o número de caminhões que entravam em Gaza (representado pela linha azul) foi, com frequência, inferior ao limiar fixado de 106 por dia (representado pela linha vermelha), nível que, segundo os próprios critérios do documento, já era considerado insuficiente para garantir uma alimentação adequada.

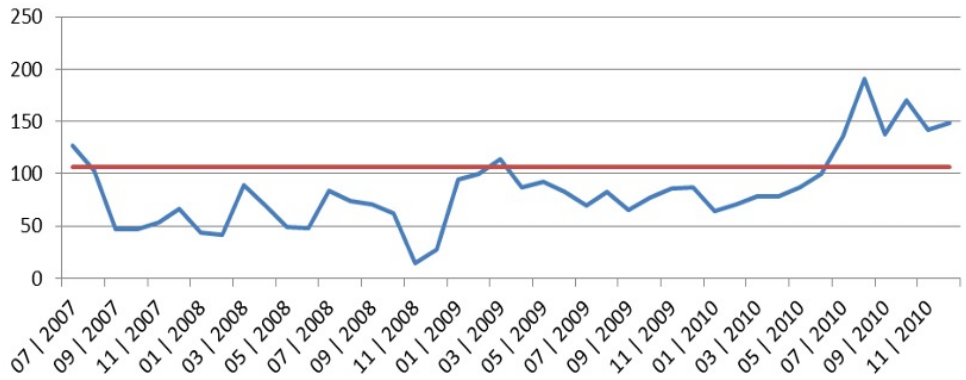


Figura 3 – Entrada de caminhões na Faixa de Gaza (exceto pelo ponto de passagem de Karni). A linha vermelha representa o limiar de 106 caminhões/dia da política Red Lines. Fonte: Red Lines, tradução não oficial pela Gisha; OCHA; UNSCO.

Esses resultados reforçam o interesse em aplicar modelos de otimização à logística humanitária. O modelo proposto neste trabalho produz uma dieta ao mesmo tempo adequada do ponto de vista nutricional e eficiente do ponto de vista do transporte, obtendo, sob os critérios aqui adotados, resultados comparativamente melhores do que a implementação descrita no documento Red Lines, com uso mais eficiente de recursos. O contraste entre as recomendações do modelo e as entregas reais ilustra o potencial do planejamento fundamentado em evidências para contribuir tanto para melhores resultados sanitários quanto para maior eficiência logística.

Não obstante, este estudo apresenta limitações importantes que devem ser consideradas na interpretação de seus resultados. Um dos principais desafios enfrentados foi a falta de transparência e de informações detalhadas por parte das autoridades israelenses, o que impediu compreender plenamente a lógica subjacente à política Red Lines. Os documentos tornados públicos são relativamente vagos e não apresentam de forma explícita a metodologia nem as hipóteses utilizadas para determinar as categorias e quantidades de alimentos. Essa falta de clareza tornou difícil qualquer tentativa de engenharia reversa do processo decisório original ou sua reprodução exata no arcabouço de otimização proposto. Além disso, como discutido, a comparação entre modelo e dados oficiais exigiu, em pelo menos um caso (o do leite), a adoção de um procedimento de ajuste manual para viabilizar uma comparação minimamente justa, o que introduz um grau de subjetividade que deve ser reconhecido. O modelo também pressupõe uma homogeneidade das necessidades da população e simplifica a disponibilidade de alimentos, não levando em conta restrições políticas, de segurança ou econômicas que podem influenciar as cadeias de suprimento reais. A análise apoia-se, ainda, em dados secundários, que podem estar incompletos ou ter sido divulgados de forma seletiva.

Diante dessas limitações, os resultados deste trabalho devem ser interpretados com a devida cautela. Embora seja possível que fatores não documentados, de natureza política, operacional ou de segurança, expliquem parte das diferenças observadas entre o modelo e os dados oficiais, os resultados obtidos indicam que a composição divulgada no documento Red Lines dificilmente seria reproduzida por um processo de otimização linear estritamente baseado em critérios nutricionais e logísticos, nos moldes propostos neste trabalho. Essa constatação não permite concluir, de forma definitiva, que tal processo não tenha sido utilizado, mas sustenta a hipótese de que, caso tenha sido, outros critérios adicionais, não explicitados no material disponível, também teriam desempenhado papel relevante na definição dos valores finais. Ao evidenciar essa distância entre a política pública e a modelagem matemática, este estudo busca contribuir para o debate mais amplo sobre transparência, ética e eficiência no planejamento humanitário.

Para trabalhos futuros, sugere-se, em primeiro lugar, a incorporação de restrições explícitas de aceitabilidade cultural e operacional ao modelo, de modo a evitar soluções matematicamente ótimas, mas pouco plausíveis na prática, como a observada na substituição quase total do leite fresco por leite em pó. Sugere-se também o desenvolvimento de uma análise de sensibilidade sistemática sobre os principais parâmetros nutricionais e logísticos do modelo, a fim de avaliar a robustez dos resultados frente a diferentes hipóteses de referência. Outra direção promissora é a incorporação de variáveis de decisão inteiras para o número de caminhões, uma vez que, na prática, esse valor não pode assumir valores fracionários, o que poderia revelar diferenças adicionais em relação à formulação contínua aqui adotada. Adicionalmente, seria valioso ampliar o modelo com elementos de otimização em números inteiros mistos ou estocástica, de modo a simular restrições reais de disponibilidade e variabilidade na produção local, bem como estender a análise para cronogramas de entrega multiperíodo, capazes de capturar efeitos de sazonalidade e de estoque ao longo do tempo. Por fim, recomenda-se a aplicação do mesmo arcabouço metodológico a outros contextos de logística humanitária documentados, o que permitiria avaliar em que medida os padrões aqui observados se generalizam para além do caso específico analisado neste trabalho.

Em síntese, embora o plano Red Lines possa ter buscado estabelecer um patamar calórico mínimo, os resultados deste trabalho sugerem que ele não incorporou de forma consistente considerações nutricionais e operacionais mais amplas, ao menos não de um modo compatível com um processo formal de otimização linear. Esta análise demonstra o papel que a modelagem matemática pode desempenhar na avaliação de políticas públicas de segurança alimentar, oferecendo subsídios para a formulação de intervenções humanitárias mais transparentes, equitativas e fundamentadas em evidências.

Referências

BRIEND, A.; DARMON, N.; FERGUSON, E.; ERHARDT, J. G. Linear programming: A mathematical tool for analyzing and optimizing children's diets during the complementary feeding period. **Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition**, Lippincott Williams & Wilkins, v. 36, n. 1, p. 12–22, 01 2003. ISSN 0277-2116. Disponível em: <https://doi.org/10.1097/00005176-200301000-00006>. Acesso em: 20 abr. 2026.

Conseil Supérieur de la Santé. **Recommandations nutritionnelles pour la Belgique**. 2016. Rapport n° 9285. Disponível em: <https://www.health.belgium.be/fr/news/recommandations-nutritionnelles-pour-la-belgique-2016-nouveaux-reperes-pour-les-nutriments-et>.

DANTZIG, G. B. **Linear Programming and Extensions**. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1963. ISBN 978-0691080000.

DANTZIG, G. B. **Impact of Linear Programming on Computer Development**. [S.l.], 1985. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA157659>.

DANTZIG, G. B. The diet problem. **Interfaces**, v. 20, n. 4, p. 43–47, 1990.

DARMON, N.; FERGUSON, E.; BRIEND, A. Linear and nonlinear programming to optimize the nutrient density of a population's diet: an example based on diets of preschool children in rural Malawi. **The American Journal of Clinical Nutrition**, Oxford University Press, v. 75, n. 2, p. 245–253, 02 2002. ISSN 0002-9165. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/ajcn/75.2.245>. Acesso em: 20 abr. 2026.

DOOREN, C. van. A review of the use of linear programming to optimize diets, nutritiously, economically and environmentally. **Frontiers in Nutrition**, Frontiers Media, v. 5, p. 48, 05 2018. ISSN 2296-861X. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fnut.2018.00048>. Acesso em: 20 abr. 2026.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

Gisha – Legal Center for Freedom of Movement. **Procedure for Monitoring and Assessing Inventories in the Gaza Strip; Procedure for Approving Transfer of Goods into the Gaza Strip; List of Humanitarian Products Permitted as of May 30, 2010**. Tel Aviv, 2010. Documentos obtidos por meio de petição de acesso à informação (AP 2744/09 Gisha v. Ministério da Defesa). Tradução não oficial por Gisha. Disponível em: <https://www.gisha.org>. Acesso em: 20 abr. 2026.

Gisha – Legal Center for Freedom of Movement. **Food Consumption in the Gaza Strip – Red Lines**. Tel Aviv, 2012. Apresentação originalmente elaborada em janeiro de 2008 (versões de 1 e 27 de janeiro de 2008). Divulgada após julgamento do Supremo Tribunal de Israel em 5 de setembro de 2012 (AAA 3300/11). Tradução não oficial por Gisha. Disponível em: <https://www.gisha.org/UserFiles/File/publications/redlines/red-lines-presentation-eng.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2026.

Gisha – Legal Center for Freedom of Movement. **Reader: "Food Consumption in the Gaza Strip – Red Lines"**. Tel Aviv, 2012. Disponível em: <https://www.gisha.org/UserFiles/File/publications/redlines/redlines-position-paper-eng.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2026.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introduction to Operations Research**. 9. ed. New York: McGraw-Hill, 2013. ISBN 978-0071333467.

MITCHELL, S.; O'SULLIVAN, M.; DUNNING, I. **PuLP: A Linear Programming Toolkit for Python**. [S.l.], 2011. Disponível em: <https://optimization-online.org/2011/09/3178/>. Acesso em: 08 ago. 2026.

MSD Manuals. **Recommended Dietary Intakes of Vitamins**. 2025. Acesso em: jun. 2026. Disponível em: <https://www.msdmanuals.com/professional/multimedia/table/recommended-dietary-intakes-of-vitamins>.

National Institutes of Health. **Dietary Supplement Fact Sheets**. 2025. Acesso em: jun. 2026. Disponível em: <https://ods.od.nih.gov/factsheets/list-all/>.

PETERS, K.; SILVA, S.; GONçALVES, R.; KAVELJ, M.; FLEUREN, H.; HERTOG, D. den; ERGUN, O.; FREEMAN, M. The nutritious supply chain: Optimizing humanitarian food assistance. **INFORMS Journal on Optimization**, Institute for Operations Research and the Management Sciences, v. 3, n. 2, p. 200–226, 04 2021. ISSN 2575-1484. Disponível em: <https://doi.org/10.1287/ijoo.2019.0047>. Acesso em: 20 abr. 2026.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. d. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013. ISBN 978-85-7717-158-3.

RAMBELOSON, Z. J.; DARMON, N.; FERGUSON, E. L. Linear programming can help identify practical solutions to improve the nutritional quality of food aid. **Public Health Nutrition**, Cambridge University Press, v. 11, n. 4, p. 395–404, 04 2008. ISSN 1368-9800. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/S1368980007000511>. Acesso em: 20 abr. 2026.

STIGLER, G. J. The cost of subsistence. **Journal of Farm Economics**, v. 27, n. 2, p. 303–314, 1945. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/1231810>.

TAHA, H. A. **Operations Research: An Introduction**. 9. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2011. ISBN 978-0132555937.

United States Department of Agriculture. **USDA FoodData Central – SR11 to SR28**. 2024. Disponível em: <https://www.ars.usda.gov/northeast-area/beltsville-md-bhnrc/beltsville-human-nutrition-research-center/methods-and-application-of-food-composition-laboratory/mafcl-site-pages/sr11-sr28/>. Acesso em: 2026.

United States Department of Agriculture. **FoodData Central**. 2025. Acesso em: 22 jul. 2026. Disponível em: <https://fdc.nal.usda.gov/>.

U.S. Department of Agriculture; U.S. Department of Health and Human Services. **Dietary Guidelines for Americans 2020–2025**. 2020. Disponível em: <https://www.dietaryguidelines.gov>. Acesso em: 2026.

WASSENHOVE, L. N. V. Humanitarian aid logistics: supply chain management in high gear. **Journal of the Operational Research Society**, Palgrave Macmillan, v. 57, n. 5, p. 475–489, 05 2006. ISSN 0160-5682. Disponível em: <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602125>. Acesso em: 20 abr. 2026.

Apêndices

APÊNDICE A – Exemplo de saída do modelo – Grupo Homens 15–18 anos

A listagem a seguir apresenta a saída completa gerada pelo modelo para o grupo demográfico de homens entre 15 e 18 anos, referente ao cenário que incorpora produção local de alimentos e tem como objetivo minimizar o número total de caminhões. Para cada alimento do banco de dados, são exibidos a quantidade diária alocada (em gramas por pessoa), as calorias resultantes, o teor de proteínas, carboidratos e açúcares. Alimentos com quantidade igual a zero foram mantidos na listagem para evidenciar que o modelo os avaliou e optou por não selecioná-los.

Listing A.1 – Saída completa do modelo – Homens 15–18 anos

Results - Men 15-18 years:

Food	Quantity (g)	Calories	Protein	Carbs	Sugar
Flours	3.6	13.1	0.4	2.6	0.0
Flours_semolina	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Flours_wheat	257.4	880.2	29.1	195.3	1.1
Flours_yeast	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rice	87.0	317.6	6.2	69.6	0.1
Sugar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Pasta	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Oil_olive	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Oil_safflower	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Milk	626.0	381.9	19.7	30.0	31.6
Fruit_orange	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fruit_apples	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fruit_watermelon	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fruit_grapefruit	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fruit_banana	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fruit_pears	219.5	125.1	0.8	33.4	21.4
Fruit_loquats	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fruit_dates	100.5	278.4	1.8	75.3	66.8
Fruit_avocados	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fruit_apricots	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fruit_plums	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fruit_mangos	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Legume_beans	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Legume_broadbeans	24.3	17.5	1.4	2.8	0.0
Legume_chickpeas	95.7	361.6	19.6	60.2	10.2
Legume_lentils	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Vegetable_tomato	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Vegetable_cucumber	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Vegetable_peppers	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Vegetable_carrots	512.0	209.9	4.8	49.0	24.3
Vegetable_garlic	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Vegetable_pumpkin	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Vegetable_onions	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Vegetable_coriander	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Vegetable_parsley	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

```
Meat_fish            1.9   |      2.1 |     0.4 |   0.0 |   0.0 |
Meat_chicken       194.1   |    413.3 |    35.6 |   0.3 |   0.0 |
Meat_turkey          0.0   |      0.0 |     0.0 |   0.0 |   0.0 |
Meat_beef            0.0   |      0.0 |     0.0 |   0.0 |   0.0 |
Meat_egg             0.0   |      0.0 |     0.0 |   0.0 |   0.0 |
Grains_barley        0.0   |      0.0 |     0.0 |   0.0 |   0.0 |
Grains_corn          0.0   |      0.0 |     0.0 |   0.0 |   0.0 |
Grains_oatmeal       0.0   |      0.0 |     0.0 |   0.0 |   0.0 |
Grains_sorghum       0.0   |      0.0 |     0.0 |   0.0 |   0.0 |
-------------------------------------------------------------------------
Total per day: 2122.0 g | 3000.0 kcal | 119.7 prot | 518.8 carb
Required:      3000.0 kcal
```

APÊNDICE B – Elementos centrais do modelo de programação linear

Este apêndice apresenta os elementos centrais do modelo implementado, incluindo: o exemplo de chamada da função de otimização para um grupo demográfico; a redistribuição da população em subgrupos de modelagem; as capacidades de carga e taxas de produção local; a função objetivo; as restrições nutricionais e de diversidade alimentar; e o cálculo das importações líquidas.

Exemplo de chamada da função de otimização

O trecho a seguir exemplifica os parâmetros de entrada da função `solve_diet` para o grupo Crianças 7–10 anos, representativo da estrutura utilizada para todos os onze grupos demográficos modelados.

```
trucks_7_10 = solve_diet(
group="Child 7-10 years",
population_size=population_by_group["Child_7-10_years"],
calories=2000,
prot=26,
ca=800,
p=700,
mg=230,
b1=0.9,
b2=0.9,
b6=1,
iron=8,
zn=8,
nia=12,
maximums={'sugar': 20},
max_oil_combined=24,
min_fruit_combined=256,
min_legume_combined=120,
min_vegetable_combined=320,
min_meat_combined=154,
min_milk_combined=418,
min_flour_combined=185,
capacities=capacities,
objective=objective_mode
)
```

Redistribuição da população em grupos de modelagem

Como os dados demográficos disponíveis nos documentos oficiais utilizam faixas etárias que não correspondem diretamente às categorias das tabelas nutricionais de referência, foi desenvolvido um script de redistribuição proporcional. O código desagrega cada faixa em anos individuais, distribui proporcionalmente as populações masculina e feminina e as reagrega nos grupos utilizados no modelo.

```
age_groups = {
 "0-1":   (48132, 45906),
 "2-3":   (48332, 46244),
 "4-7":   (86568, 81480),
 "8-15":  (167811, 160414),
 "16-24": (147965, 142848),
 "25-50": (196660, 188253),
 "51+":   (52994, 62687)
}

def age_range_from_group(group):
if "+" in group:
start = int(group.replace("+", ""))
return list(range(start, 100))
else:
start, end = map(int, group.split("-"))
return list(range(start, end + 1))

pop_by_age_gender = {"male": {}, "female": {}}

for group, (male_count, female_count) in age_groups.items():
years = age_range_from_group(group)
n = len(years)
for age in years:
pop_by_age_gender["male"][age] = (
pop_by_age_gender["male"].get(age, 0) + male_count / n)
pop_by_age_gender["female"][age] = (
pop_by_age_gender["female"].get(age, 0) + female_count / n)
```

O resultado desta redistribuição é a população utilizada em cada grupo demográfico do modelo:

```
population_by_group = {
 "Child_2-3_years":    94576,
 "Child_4-6_years":   126036,
 "Child_7-10_years":  165096,
 "Women_11-24_years": 243107,
```

```
 "Women_25-50_years": 188253,
 "Women_51+_years":    62687,
 "Men_11-14_years":    83906,
 "Men_15-18_years":    70298,
 "Men_19-24_years":    98643,
 "Men_25-50_years":   196660,
 "Men_51+_years":      52994,
}
```

Capacidades de carga e taxas de produção local

As capacidades de carga por caminhão (em gramas) e as taxas de produção local utilizadas como parâmetros do modelo foram definidas com base nos documentos oficiais e nas premissas descritas no Capítulo 4.

```
capacities = {
 'flours':    35_000_000,   # 35 toneladas/caminhao
 'rice':      25_000_000,
 'vegetable': 20_000_000,
 'fruit':     20_000_000,
 'milk':      15_000_000,
 'meat':      15_000_000,
 'legume':    25_000_000,
 'oil':       30_000_000,
 'sugar':     20_000_000,
 'pasta':     20_000_000,
 'grains':    20_000_000,
}

local_production_rates = {
 'vegetable': 0.80,   # 80% local, 20% importado
 'fruit':     0.50,   # 50% local, 50% importado
 'milk':      0.08,   #  8% local, 92% importado
 'meat':      0.47,   # 47% local, 53% importado
 'flours':    0.0,
 'legume':    0.0,
 'oil':       0.0,
 'sugar':     0.0,
 'rice':      0.0,
 'pasta':     0.0,
 'grains':    0.0,
}
```

Função objetivo e restrição de capacidade logística

A função objetivo minimiza o número total de caminhões somando as variáveis de decisão logísticas t_g para cada grupo alimentar g. A restrição de capacidade vincula as quantidades de alimentos às variáveis de caminhões, considerando o ciclo semanal de 7 dias de consumo e 5 dias de entrega.

```
trucks_by_group = pulp.LpVariable.dicts("t", capacities.keys(), lowBound=0)

for f_group in food_groups:
total_group_needed = pulp.lpSum(
[x[food] * population_size * 7 for food in food_groups[f_group]])
total_capacity = capacities[f_group] * trucks_by_group[f_group] * 5
prob += total_group_needed <= total_capacity

# Funcao objetivo: minimizar caminhoes
prob += pulp.lpSum([trucks_by_group[g] for g in capacities.keys()])
```

Restrições nutricionais

```
prob += pulp.lpSum([kcal[i]       * x[i] for i in foods]) >= calories
prob += pulp.lpSum([protein[i]    * x[i] for i in foods]) >= prot
prob += pulp.lpSum([calcium[i]    * x[i] for i in foods]) >= ca
prob += pulp.lpSum([magnesium[i]  * x[i] for i in foods]) >= mg
prob += pulp.lpSum([phosphorus[i] * x[i] for i in foods]) >= p
prob += pulp.lpSum([thiamin[i]    * x[i] for i in foods]) >= b1
prob += pulp.lpSum([riboflavin[i] * x[i] for i in foods]) >= b2
prob += pulp.lpSum([vit_b6[i]     * x[i] for i in foods]) >= b6
prob += pulp.lpSum([fe[i]         * x[i] for i in foods]) >= iron
prob += pulp.lpSum([zinc[i]       * x[i] for i in foods]) >= zn
prob += pulp.lpSum([niacin[i]     * x[i] for i in foods]) >= nia
```

Restrições de diversidade alimentar e logística

```
# Quantidades minimas por grupo alimentar
prob += pulp.lpSum([x[i] for i in food_groups['fruit']])     >= min_fruit_combined
prob += pulp.lpSum([x[i] for i in food_groups['legume']])    >= min_legume_combined
prob += pulp.lpSum([x[i] for i in food_groups['vegetable']]) >= min_vegetable_combined
prob += pulp.lpSum([x[i] for i in food_groups['meat']])      >= min_meat_combined
prob += pulp.lpSum([x[i] for i in food_groups['flours']])    >= min_flour_combined
prob += pulp.lpSum([x[i] for i in food_groups['milk']])      >= min_milk_combined
```

```
# Limite maximo de oleo combinado (azeite + cartamo)
if max_oil_combined is not None:
prob += x['oil_olive'] + x['oil_safflower'] <= max_oil_combined

# Limites maximos opcionais por alimento (ex.: acucar)
for food, val in maximums.items():
prob += x[food] <= val

# Proporcionalidade farinha-arroz (razao 3:1 observada no documento Red Lines)
prob += (x['flours'] + x['flours_semolina']
+ x['flours_wheat'] + x['flours_yeast']) == 3 * x['rice']
```

Subtração da produção local e cálculo de importações

Após a resolução do modelo, as quantidades totais de caminhões por grupo são ajustadas pela taxa de produção local, obtendo-se a estimativa de importação líquida necessária.

```
total_by_group_import_only = {}

for food_group, total_trucks in total_trucks_by_group.items():
local_rate = local_production_rates.get(food_group, 0.0)
import_needed_rate = 1.0 - local_rate
trucks_import_only = total_trucks * import_needed_rate
total_by_group_import_only[food_group] = trucks_import_only

grand_total_import = 0
for group in sorted(total_by_group_import_only.keys()):
trucks = total_by_group_import_only[group]
if trucks > 0:
print(f"{group}: {trucks:.6f} trucks")
grand_total_import += trucks

print(f"\nGRAND TOTAL (import only): {grand_total_import:.6f} trucks")
```