LVI SBPO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
DE 04 ATÉ 07 NOVEMBRO 2024
FORTALEZA | CEARÁ

Heurística construtiva para a distribuição periódica e equitativa de ajuda humanitária após enchentes

Pamela Michele Candida Cortez
Universidade Estadual de Feira de Santana
Av. Transnordestina, s/n - Novo Horizonte, Feira de Santana - BA
pamela@uefs.br

Alysson Machado Costa
The University of Melbourne
813 Swanston St, Parkville VIC 3052, Australia
alysson.costa@unimelb.edu.au

RESUMO

Com o aumento da intensidade e frequência dos desastres naturais devido ao aquecimento global, cresce o número de famílias afetadas pelas enchentes. As mais vulneráveis precisam de ajuda humanitária durante semanas ou até meses após retornarem às suas casas; por isso, é necessário pensar a distribuição de kits emergenciais não apenas imediatamente após o desastre, mas de forma periódica. Neste artigo, propomos heurísticas simples e eficientes que contribuem com insights sobre a alocação de veículos para a entrega de ajuda humanitária de um depósito central até depósitos locais (nas cidades e/ou comunidades afetadas), considerando equidade e periodicidade nas entregas. Os resultados sugerem que entre seis diferentes formas de alocação de veículos, uma é definitivamente superior. Os resultados também demonstram que sem considerar equidade, cidades mais populosas são privilegiadas em relação às menores e mais afastadas do centro de coleta de doações mais próximo.

PALAVRAS CHAVE. Logística humanitária, problema de roteamento de veículos, heurísticas construtivas.

Logística e Transportes, Otimização combinatória.

ABSTRACT

Due to climate change, the number of families affected by floods has been rising. The most vulnerable families require humanitarian aid for weeks or even months in the aftermath of the disaster. Therefore, it is essential to consider the distribution of emergency kits on a periodic basis. In this paper, we propose simple yet efficient heuristics that offer valuable insights into the allocation of vehicles for delivering humanitarian aid from a depot to local distribution points (located within affected cities and communities). Our heuristics incorporate equity and periodicity in deliveries. The results indicate that among six different vehicle allocation strategies, one stands out as definitively superior. Additionally, the findings demonstrate that without considering equity, more populous locations are favored over smaller and more remote communities relative to the nearest depot.

KEYWORDS. Humanitarian logistics. Vehicle routing problem. Constructive heuristics.

Logistics and Transport. Combinatorial Optimization.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193446
https://proceedings.science/p/193446?lang=pt-br

1. Introdução

Devido às mudanças climáticas, o número de desastres naturais cresceu cinco vezes nos últimos 50 anos, sendo enchentes e deslizamentos de terra os mais comuns [Guha-Sapir, 2019]. Nos últimos 10 anos, 410 mil pessoas morreram e 1,7 bilhões foram afetadas por desastres naturais [IFRC, 2020]. Felizmente, nos últimos 20 anos, o problema tem recebido maior atenção da área de Pesquisa Operacional. Porém, a revisão de Galindo e Batta [2013] evidencia que muitos estudos são construídos sobre suposições irreais; por exemplo, dados importantes são tratados como parâmetros determinísticos e estáticos, quando na realidade, são incertos e variam no tempo. A revisão de Sentia et al. [2023] indica que trabalhos recentes têm abordado a incerteza na demanda, mas o comum emprego de modelos estocásticos com uma abordagem baseada em cenários também é irrealista, dado a dificuldade de estimar a probabilidade de centenas de cenários [Caunhye et al., 2015], que raramente conseguem compreender todas as possibilidades. Desta forma, pesquisas que incorporem dinamicidade nos parâmetros permanecem necessárias.

Neste trabalho, nosso objetivo é preencher essa lacuna propondo uma heurística construtiva que facilmente incorpora atualizações na demanda, oferta de suprimentos e de veículos, e na infraestrutura das estradas. Além disso, como grandes desastres naturais podem ter efeitos duradouros, consideramos ainda a distribuição periódica de itens de ajuda às populações afetadas. Buscamos também fornecer insights práticos sobre a alocação de veículos e construção de rotas, incorporando características importantes como equidade na distribuição, dado que a distribuição não equitativa entre as regiões afetadas aumenta a tensão para as partes interessadas. Desta forma, as organizações devem distribuir itens de ajuda proporcionalmente entre os beneficiários, o que é uma característica única da logística humanitária [Gralla e Goentzel, 2018].

O restante deste artigo está dividido da seguinte maneira: na Seção 2 iremos definir o problema considerado. Na Seção 3, detalhamos a heurística construtiva proposta e os resultados são apresentados na Seção 4. Finalmente, apresentamos as conclusões e possíveis trabalhos futuros na Seção 5.

2. Definição do problema

Estamos interessados na distribuição de kits de ajuda humanitária para as famílias afetadas por desastres de início súbito, como enchentes, após a fase crítica inicial, visto que as populações mais economicamente vulneráveis continuam necessitando de doações por semanas ou até meses após o evento catastrófico. Como itens de ajuda distintos têm diferentes prioridades e atrasos aceitáveis, consideramos vários itens agrupados em três categorias: cestas básicas (incluindo medicamentos), kits de limpeza (incluindo produtos de higiene pessoal) e colchões. A entrega de itens não prioritários, como colchões, pode ser adiada sem consequências críticas, enquanto isso claramente não é verdade para a entrega de ativos vitais como cestas básicas.

Em nossa consideração da periodicidade, reconhecemos o contexto brasileiro, onde a população afetada, muitas vezes enfrentando perdas significativas durante as enchentes, requer assistência humanitária não apenas enquanto estão desabrigadas. Outra razão para considerar periodicidade é o fato de que a demanda no momento presente fornece uma boa estimativa de demandas em períodos futuros do horizonte de planejamento. Observações que realizamos atuando voluntariamente em um depósito durante as enchentes no sul da Bahia reforçam ainda mais essa natureza periódica da distribuição: as entregas a cada comunidade afetada eram estrategicamente limitadas para garantir uma cobertura equitativa entre as regiões, necessitando de suporte adicional periódico à medida que novas doações chegavam.

As demandas periódicas devem ser modeladas de forma não acumulativa, uma vez que não é possível consumir em excesso para compensar os períodos de privação anteriores. Portanto, o atraso aceitável para demandas periódicas (como cestas básicas e kits de limpeza) deve ser menor

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193446
https://proceedings.science/p/193446?lang=pt-br

ou igual à *frequência* com que essas demandas ocorrem. Quando as entregas não podem ser cumpridas dentro do ciclo periódico, deve-se contabilizar uma penalidade, conhecida na literatura como *custos de privação* ou *custos humanitários*. Junto com os custos de transporte, eles constituem os chamados *custos sociais*: a soma ponderada dos custos de privação e logísticos, onde os custos de privação devem prevalecer.

Ao contrário da logística comercial, reduzir os custos de transporte não é o objetivo principal, nem deve ser negligenciado, pois pode representar 80% dos custos totais [Van Wassenhove, 2006]. Holguín-Veras et al. [2013] sugerem usar os custos sociais como a função objetivo preferida para modelos de logística humanitária pós-desastre. Embora os custos de privação cresçam de forma não linear, usamos aqui o termo designando aproximações lineares comumente encontradas na literatura. Nosso objetivo principal é a minimização dos custos de privação, que são definidos como demandas não satisfeitas ponderadas pela urgência (prioridade) dos itens. Ao mesmo tempo, também consideramos os custos de transporte, embora com um peso muito menor. Outro objetivo fundamental é alcançar um nível de serviço equitativo entre todos os pontos de distribuição. Considerar equidade evita situações onde recursos limitados são usados para atender apenas os pontos de distribuição mais próximos ou mais populosos.

A disponibilidade imediata de informações (demanda, condições das estradas) e recursos (suprimento, frota de veículos), parâmetros determinísticos e tempos de viagem pré-desastre são suposições comuns, porém irreais [Galindo e Batta, 2013]. Após enchentes, certas estradas podem ficar temporariamente bloqueadas devido ao aumento dos níveis de água, deslizamentos de terra ou obstruções causadas por árvores caídas. Como resultado, atrasos são esperados a curto prazo. Por outro lado, os esforços do governo são frequentemente dedicados a restaurar a capacidade de fluxo dessas estradas. Portanto, a infraestrutura fixa da rede de distribuição e os tempos de viagem pré-calculados podem facilmente se tornar suposições irreais [Galindo e Batta, 2013]. Por isso, assumimos que a demanda pode ser prevista com base em avaliações da Defesa Civil e também considerando a periodicidade, e deve ser atualizada à medida que novas informações se tornem disponíveis. Parâmetros associados a doações e tempos de viagem também são modelados como dependentes do tempo para levar em conta possíveis atrasos no recebimento e permitir atualizações de informações.

Para simplificar a gestão de dados e planejamento nos depósitos, cada ponto de distribuição (ou ponto de demanda, PD) é servido por apenas um depósito. Logo, o problema pode ser decomposto, pois é independente para diferentes regiões (cada região é definida como um depósito e os PDs por ele atendidos). Como a quantidade de suprimentos a serem transportados do depósito para os PDs geralmente excede a capacidade dos veículos, um único PD pode necessitar de múltiplas visitas até que sua demanda seja atendida. Por outro lado, como o depósito é estrategicamente localizado próximo aos PDs, os veículos podem realizar mais de uma viagem por dia.

Em resumo, o problema consiste em atender periodicamente, a partir de um depósito (possivelmente temporário), um conjunto de pontos de distribuição com o objetivo de minimizar os custos sociais devido à privação de itens essenciais. O problema também considera prioridades entre diferentes suprimentos, capacidade dos veículos, tamanho limitados das rotas (em horas) e as seguintes características adicionais identificadas como lacunas na literatura por Galindo e Batta [2013] (os sobrescritos identificam o número da suposição no artigo original): expiração da demanda não atendida[12], parâmetros dinâmicos em um cenário multiperíodo[1,4,10] e possíveis mudanças na infraestrutura das estradas e nos tempos de viagem[5,14].

3. Heurísticas construtivas

A ideia central da heurística proposta é decompor o problema de roteamento multi-período por período e por veículo, criando, a cada iteração, uma única rota. A decomposição, no entanto, im-

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193446
https://proceedings.science/p/193446?lang=pt-br

pede o cálculo de iniquidade conforme geralmente é realizado na literatura: definido como a maior diferença entre os níveis de satisfação de dois PD quaisquer. O nível de satisfação pode ser definido como um valor no intervalo [0,1] dado pela razão entre a demanda não atendida e a demanda acumulada no ciclo periódico. Como devido à decomposição por tempo e veículo não podemos avaliar os níveis de satisfação durante um ciclo periódico, propomos como medida corretiva um índice de prioridade dinâmico, que visa priorizar áreas que receberam o menor percentual de suas demandas até o momento do cálculo. A cada iteração, a heurística construtiva atualiza o índice de prioridade para ajustar dinamicamente o plano de distribuição, favorecendo os PDs com os piores níveis de serviço. O índice de prioridade relacionado ao PD j para suprimentos da categoria c no período t é definido como a prioridade do suprimento c (P_c) ponderado pelo nível de satisfação do PD j durante a janela de tempo especificada por δ_c e t, conforme detalhado na Equação (1):

$$P_{cj}^{t} = P_c \left(1 - \frac{\sum_{\tau=\left\lfloor \frac{t-1}{\delta_c} \right\rfloor \delta_c+1}^{\min\left\{ \left\lfloor \frac{t+\delta_c}{\delta_c} \right\rfloor \delta_c, |T| \right\}} \Delta Q_{cj\tau}}{\sum_{\tau=\left\lfloor \frac{t-1}{\delta_c} \right\rfloor \delta_c+1}^{\min\left\{ \left\lfloor \frac{t+\delta_c}{\delta_c} \right\rfloor \delta_c, |T| \right\}} d_{cj\tau}} \right) \tag{1}$$

onde $\left\lfloor \frac{t-1}{\delta_c} \right\rfloor \delta_c + 1$ é o primeiro dia do ciclo periódico e $\min\left\{ \left\lfloor \frac{t+\delta_c}{\delta_c} \right\rfloor \delta_c, |T| \right\}$ é o último dia do ciclo periódico para um período $t \in T$ e suprimento da categoria $c \in C$, conforme notação definida na Tabela 1.

Uma vez que contornamos a impossibilidade de promover equidade pela penalização da iniquidade, temos na verdade a vantagem da decomposição por período permitir que atualizações nos valores esperados de demanda, suprimentos, disponibilidade de veículos e tempo de viagem sejam facilmente incorporados, uma vez que a heurística construtiva pode ser executada a cada momento que novas informações são obtidas apenas calculando-se as demandas e suprimentos residuais, além de reduzir o tempo disponível para novas rotas a serem designadas ao veículo k de acordo com as rotas já realizadas.

O Algoritmo 1 detalha a função principal da heurística construtiva quando chamada para criar rotas a partir de um período t' qualquer. Os Algoritmos auxiliares 2 e 3 detalham a criação de rotas comuns e de carga completa, respectivamente. A heurística construtiva proposta decompõe o problema em $|T| \cdot |K|$ subproblemas. A decomposição temporal permite que os parâmetros sejam atualizados facilmente para acomodar mudanças na demanda, oferta, disponibilidade de veículos e tempos de viagem (Algoritmo 1, linhas 1 e 2). As rotas já realizadas são fixadas e as variáveis ΔQ_{cjt} são usadas para calcular a oferta, demanda e tempo residuais (Algoritmo 1, linha 3). Esses valores substituem os parâmetros originais de oferta u_{ct}, demanda d_{cjt} e tempo disponível $\bar{t}$. O Algoritmo 1 em sua linha 4 executa o Algoritmo 3 para criar rotas de único destino e carga completa.

As linhas 5-25 do Algoritmo 1 são responsáveis por alocar a oferta residual nas rotas. Uma rota é criada para cada período (Algoritmo 1, linha 13) e a melhor encontrada é escolhida (Algoritmo 1, linhas 20 e 21). Para garantir a factibilidade da solução, a rota é criada com base em um veículo disponível, e selecionamos inicialmente o veículo com maior capacidade, com tempo disponível $\bar{t}_{kt}$ suficiente para visitar pelo menos o primeiro nó (Algoritmo 1, linha 11). Após definir a rota, tentamos acomodar sua carga em um veículo menor (Algoritmo 1, linha 15), preferencialmente um que já esteja em uso (linha 16) e com o mínimo de tempo disponível no período t (linha 17). O índice de prioridade dinâmico P_{cj}^{t} beneficia soluções que entregam ajuda humanitária para DPs com os piores níveis de satisfação até o momento (Algoritmo 1, linha 18).

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193446
https://proceedings.science/p/193446?lang=pt-br

Tabela 1: Notação para o problema de distribuição

	Conjuntos:
C	categorias de itens (exemplo: cestas básicas, produtos de limpeza, colchões)
K	veículos
DP	pontos de distribuição
N	nós ($N = \{o\} \cup DP$, onde o representa o depósito)
A	arcos, representando estradas que conectam dois nós
T	períodos (em dias úteis) considerados no horizonte de planejamento
T'_c	períodos em que a demanda pelo item c é expirada, i.e., último dia de um ciclo periódico
	Para um dado $c \in C$:
ΔQ_{cjt}	variável que indica a quantidade de itens da categoria c recebida pelo PD j no período t
δ_c	número de períodos de um ciclo periódico para o item categoria c
P_c	prioridade da categoria c
ω_c	peso em kg de um item da categoria c
u_{ct}	quantidade de suprimentos da categoria c disponíveis no período $t \in T$
s_c^t	quantidade residual de suprimentos da categoria c restantes no período $t \in T$
	$s_c^t = \sum_{\tau=1}^{t} u_{c\tau} - \sum_{\tau=1}^{t} \sum_{j \in DP} \Delta Q_{cj\tau} \quad \forall c \in C, \forall t \in T$
d_{cjt}	demanda do PD $j \in DP$ por itens da categoria c no período $t \in T$
d_{cj}^t	demanda residual do PD $j \in DP$ por itens da categoria c no período $t \in T$
	$d_{cj}^t = \sum_{\tau=1}^{t} d_{cj\tau} - \sum_{\tau=1}^{t} \Delta Q_{cj\tau} \quad \forall c \in C, \forall t \in T$
	Para um dado veículo $k \in K$:
φ_k	tempo médio de carregamento para o veículo k
ϕ_k	capacidade do veículo k
ξ_k	custo fixo do frete para o veículo k (por período)
γ_k	consumo médio do veículo k por km rodado (em reais)
$\bar{v}_{kt}$	1 se o veículo k está disponível no período $t \in T$, 0 caso contrário
$\bar{t}_{kt}$	tempo residual disponível para viagens através do veículo k, no dia t
	Demais parâmetros:
ν	tempo médio de espera pelo descarregamento
$\tilde{t}_{ijt}$	tempo de viagem entre $(i, j) \in A$ no período $t \in T$
$\tilde{d}_{ijt}$	distância entre $(i, j) \in A$ no período $t \in T$
	$\tilde{t}_{ijt} \to \infty$ e $\tilde{d}_{ijt} \to \infty$ representa que a estrada (i, j) está bloqueada

A medida de qualidade da solução ignora os custos de aluguel se o veículo já estiver em uso para o período atual (Algoritmo 1, linha 19). Similarmente ao Algoritmo 3, a oferta e demanda residuais são recalculadas (Algoritmo 1, linha 23) para a carga da melhor rota, assim como o tempo disponível, e os custos de combustível e frete são atualizados (linha 24).

Na criação de novas rotas, o primeiro nó a ser selecionado é o menos satisfatoriamente atendido até o momento, contanto que a estrada que o conecta ao depósito não esteja bloqueada ($\tilde{t}_{ojt} < \infty$), caso em que o segundo menos atendido seria selecionado (Algoritmo 2, linhas 1 e 12). Os nós seguintes são selecionados pela distância: o PD j mais próximo a u que ainda não foi visitado pela rota atual (Algoritmo 2, linha 12). Nas linhas 4–11, o Algoritmo 2 verifica a possibilidade de adicionar cada candidato $j \in DP$ na rota. Um nó j só é realmente adicionado se a estrada entre o nó anterior u e j não estiver bloqueada e houver tempo suficiente dentro do expediente para visitar o nó

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193446
https://proceedings.science/p/193446?lang=pt-br

Algoritmo 1 Função principal da heurística construtiva CH

if novas informações estão disponíveis **then**
    atualize u_{ct}, d_{cjt}, $\bar{v}_{kt}$ e $\tilde{t}_{ijt}$
fixar as rotas já realizadas e calcular os valores residuais s_c^t, d_{cj}^t e $\bar{t}_{kt}$
crie viagens de carga completa através do Algoritmo 3 e atualize os valores residuais, incluindo $rent_{kt}$
repeat
    $\ddot{fo} \leftarrow \infty$ *inicializa melhor valor da função objetivo como um valor muito grande*
    for $t \in [t', t'+1, \cdots, |T|]$ **do**
        if $\sum_{c\in C}\sum_{\tau=1}^{\tau=t} s_c^\tau > 0$ and $\sum_{c\in C}\sum_{\tau=\lfloor \frac{t'-1}{\delta_c}\rfloor \delta_c+1}^{\tau=t} d_{cj}^\tau > 0$ **then**
            recalcule P_{cj}^t através da Equação (1)
            $j \leftarrow \arg\max_{j'} P_{cj'}^t \mid \tilde{t}_{ojt} < \infty$
            $k \leftarrow \arg\max_{k'} \phi_{k'} \mid \bar{v}_{kt} = 1,\ \bar{t}_{kt} \geq \varphi_k + \nu + \tilde{t}_{ojt} + \tilde{t}_{jot}$
            if $k \in K$ **then** *se há veículo disponível*
                $r \leftarrow$ Algoritmo 2
                if $r \neq \emptyset$ **then** *se nova rota criada*
                    $K' \leftarrow k \mid \bar{v}_{kt} = 1;\ \phi_k \geq weight_r; \bar{t}_{kt} \geq routetime_r$
                    $K' \leftarrow k \in K' \mid rent_{kt} > 0$ if $\exists k \in K' \mid rent_{kt} > 0$
                    $k \leftarrow \arg\min_{k'} \bar{t}_{k't}$
                    $fo \leftarrow \sum_{(i,j)\in r} \gamma_k \tilde{d}_{ijt} - \sum_{c\in C}\sum_{j\in r} P_{cj}^t \Delta Q_{cjkt}$
                    if $rent_{kt} = 0$ **then** $fo \leftarrow fo + \xi_k$
                    if $\ddot{fo} > fo$ **then**
                        $\ddot{fo} \leftarrow fo; \ddot{k} \leftarrow k; \ddot{t} \leftarrow t; \ddot{r} \leftarrow r$
    if $\ddot{r} \neq \emptyset$ **then**
        recalcular os valores residuais s_c^t, d_{cj}^t e $\bar{t}_{kt}$ for $t = \ddot{t}$
        atualize $rent$, $fuel$ e $lastTrip_{kt}$ analogamente ao Algoritmo 3, linhas 24–26
until $\ddot{r} = \emptyset$ *nenhuma nova rota pôde ser criada*

Algorithm 2 Criação de nova rota

$u \leftarrow o$; $j \leftarrow \arg\max_{j'} P_{cj'}^t \mid \tilde{t}_{oj't} < \infty$
$visited \leftarrow \emptyset; route \leftarrow \{o\};\ routetime \leftarrow \varphi_k;\ weight \leftarrow 0$
while $|visited| < |DP|$ and $weight < \phi_k$ **do**
    $visited \leftarrow visited \cup \{j\}$
    if $\tilde{t}_{ujt} < \infty$ and $routetime + \tilde{d}_{ujt} + \nu + \tilde{d}_{jot} \leq \bar{t}_{kt}$ **then**
        $weight_j \leftarrow \sum_{c\in C} \omega_c \min\{s_c^t, d_{cj}^t\}$
        if $weight_j \ mod\ \phi_k \leq \phi_k - weight$ **then**
            $\Delta Q \leftarrow \min\{\sum_{\tau=1}^{\tau=t} s_c^\tau, \sum_{\tau=\lfloor \frac{t-1}{\delta_c}\rfloor \delta_c+1}^{\tau=t} d_{cj}^\tau, \frac{\phi_k - weight}{\omega_c}\},\ \forall c \in C$
            $weight \leftarrow weight + \sum_{c\in C} \omega_c \Delta Q_{cjt}$
            $routetime \leftarrow routetime + \tilde{t}_{ujt} + \nu$
            $route \leftarrow route \cup \{j\};\ u \leftarrow j$
    $j \leftarrow \arg\max_{j'} P_{cj'}^t \mid \tilde{t}_{uj't} < \infty; j' \notin visited$ **if** $u = o$ **else** $\arg\min_{j'} \tilde{d}_{jj't} \mid \tilde{t}_{uj't} < \infty; j' \notin visited$
$routetime \leftarrow routetime + \tilde{t}_{uot}$ **if** $u \neq o$ **else** 0
$route \leftarrow route \cup \{o\}$ **if** $u \neq o$ **else** $\emptyset$

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193446
https://proceedings.science/p/193446?lang=pt-br

j e retornar ao depósito (Algoritmo 2, linha 5). Na linha 7, o Algoritmo 2 tenta minimizar o número de entregas divididas, visitando um nó j apenas se houver capacidade residual ($\phi_k - weight$) para carregar toda a demanda do nó j que excede a capacidade total do veículo ϕ_k ($weight_j \ mod \ \phi_k$). O carregamento ΔQ é definido como o menor valor entre o suprimento disponível, a demanda requerida não expirada (i.e., a demanda residual acumulada dentro do ciclo periódico contendo t) e a capacidade residual do veículo (linha 8), e as capacidades residuais do veículo em carga e tempo são atualizadas nas linhas 9 e 10. Finalmente, se não houve candidatos para compor a rota, retorna-se uma rota vazia, caso contrário, retorna-se a rota criada, iniciando e terminando no depósito (linhas 13 e 14).

Algoritmo 3 Criação de rota de carga completa e as diferentes estratégias de alocação de veículos

1: **switch** $strategy$ **do**
2: **case** $notrip$ $K' \leftarrow \emptyset$
3: **case** $1:nK$ $K' \leftarrow K$
4: **case** $nK:1$ $K' \leftarrow \{k_{|K|}, k_{|K|-1}, \cdots, k_1\}$
5: **case** $onlybig$ $K' \leftarrow \{k_1, k_2, \cdots, k_{\lceil |K|/2 \rceil}\}$
6: **case** $onlysmall$ $K' \leftarrow \{k_{|K|}, k_{|K|-1}, \cdots, k_{\lceil |K|/2 \rceil + 1}\}$
7: **case** $both$ $K' \leftarrow \{k_{\lceil |K|/4 \rceil + 1}, k_{\lceil |K|/4 \rceil + 2}, \cdots, k_{\lfloor 3|K|/4 \rfloor}\}$
8: $lastTrip_{kt} \leftarrow 0 \quad \forall k \in K, \forall t \in T$
9: **for** $k \in K'$ **do**
10: **repeat**
11: **for** $j \in DP$ **do**
12: $\ddot{t} \leftarrow \ddot{fo} \leftarrow \infty$
13: **for** $t \in [t', t', \cdots, |T|]$ **do**
14: **if** $\bar{v}_{kt} = 1$ and $\tilde{t}_{ojt} < \infty$ and $\tilde{t}_{jot} < \infty$ **then**
15: $triptime \leftarrow \varphi_k + \nu + \tilde{t}_{ojt} + \tilde{t}_{jot}$
16: $weight_j \leftarrow \sum_{c \in C} \omega_c \min \left\{ \sum_{\tau=1}^{\tau=t} s_c^\tau, \sum_{\tau=\lfloor \frac{t-1}{\delta_c} \rfloor \delta_c + 1}^{\tau=t} d_{cj}^\tau \right\}$
17: **if** $\bar{t}_{kt} \geq triptime$ and $weight_j \geq \phi_k$ **then**
18: $\Delta Q \leftarrow$ carregamento máximo respeitando a demanda residual d_{cj}^t e prioridade P_c
19: $fo \leftarrow \gamma_k(\tilde{d}_{ojt} + \tilde{d}_{jot}) - \sum_{c \in C} P_c \cdot \Delta Q_c$
20: **if** $\ddot{fo} > fo$ **then** $\ddot{fo} \leftarrow fo; \ddot{t} \leftarrow t$
21: **if** $\ddot{t} \leq |T|$ **then**
22: calcular os valores residuais s_c^t, d_{cj}^t
23: $\bar{t}_{k\ddot{t}} \leftarrow \bar{t}_{k\ddot{t}} - (\varphi_k + \nu + \tilde{t}_{oj\ddot{t}} + \tilde{t}_{j o\ddot{t}})$
24: $fuel_{\ddot{t}} \leftarrow fuel_{\ddot{t}} + \gamma_k(\tilde{d}_{oj\ddot{t}} + \tilde{d}_{jo\ddot{t}})$
25: **if** $lastTrip_{kt} = 0$ **then** $rent_{kt} \leftarrow \xi_k$
26: $lastTrip_{kt} \leftarrow lastTrip_{kt} + 1$
27: **until** $\ddot{t} > |T|$ *nenhuma nova rota com carga completa e único destino pôde ser criada*

Para melhorar o uso dos veículos, a heurística construtiva primeiro tenta criar rotas de único destino e carga completa para distribuir suprimentos para localidades onde a demanda excede a capacidade dos veículos. Propomos seis diferentes estratégias de alocação de veículos, conforme mostrado no Algoritmo 3, linhas 1–7. Na estratégia *notrip*, os veículos não são explicitamente alocados para viagens de carga completa, embora essas viagens ainda possam ser geradas ao criar rotas comuns e o primeiro nó selecionado demandar a capacidade total do veículo. A estratégia *1:nK* tenta criar essas viagens com todos os veículos disponíveis, começando pelos veículos com

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193446
https://proceedings.science/p/193446?lang=pt-br

maior capacidade, enquanto a estratégia *nK:1* começa alocando primeiro os veículos com menor capacidade. As estratégias *onlybig* e *onlysmall* criam rotas de carga completa e único destino apenas com os maiores ou menores veículos, respectivamente, enquanto a estratégia *both* cria viagens com metade dos veículos disponíveis, usando tanto veículos grandes quanto pequenos. Em todas as estratégias, o conjunto original de veículos disponíveis (K) é ordenado em ordem decrescente pela capacidade do veículo.

Para cada ponto de demanda j, o Algoritmo 3, nas linhas 13–20, investiga o melhor período para entregar uma carga completa a j. A viagem só é viável se o veículo estiver disponível no tempo t, a estrada entre o depósito e o nó j não estiver bloqueada, as viagens realizadas pelo veículo k não excederem o tempo disponível, o nó j tiver demanda residual suficiente e também houver oferta residual suficiente no depósito para carregar completamente o veículo k (Algoritmo 3, linhas 14–17). A carga máxima é definida pelo mínimo entre a oferta residual disponível e a demanda residual, ainda não expirada, no tempo t (Algoritmo 3, linhas 16). A carga é criada preenchendo o veículo k com os itens mais essenciais primeiro, ou seja, itens de baixa prioridade só serão adicionados à carga se houver capacidade ociosa no veículo (Algoritmo 3, linha 18). A qualidade da solução é definida como os custos de combustível menos a carga ponderada pela prioridade de entrega para a mercadoria c (P_c), pois queremos minimizar os custos de combustível enquanto maximizamos a entrega de itens essenciais (Algoritmo 3, linha 19). Para a melhor solução encontrada, a oferta e demanda residuais são recalculadas (Algoritmo 3, linha 22), assim como o tempo disponível (linha 23), e os custos de combustível (linha 24). Os custos fixos de frete são pagos apenas quando o veículo é usado pela primeira vez em um determinado período (Algoritmo 3, linhas 25 e 26 – a variável $lastTrip_{kt}$ mantém o número de viagens realizadas). O processo é repetido para cada veículo k até que nenhuma nova rota com carga completa e único destino possa ser criada (Algoritmo 3, linha 27).

4. Resultados

Os resultados sugerem que a estratégia *onlybig* consistentemente supera todas as outras. Testes experimentais também indicam que priorizar pontos de distribuição sub-atendidos (nós com baixos níveis de serviço) melhora a equidade sem comprometer os custos sociais e de transporte. Antes de discutir esses resultados, detalhamos as instâncias utilizadas.

4.1. Instâncias

As instâncias foram geradas randomicamente inspiradas em dados reais de São Paulo e estão disponíveis em `https://github.com/pamicortez/phd`. A Defesa Civil do Estado de São Paulo possui sete depósitos operacionais, nas cidades de Apiaí, Bauru, Presidente Prudente, São Paulo, Registro, Ribeirão Preto e Taubaté, onde itens essenciais são pré-posicionados ao longo do ano. Como os depósitos são independentes e não compartilham PDs, consideramos apenas o depósito mais central, Bauru, bem como o depósito principal, localizado na cidade de São Paulo, junto com seus pontos de distribuição (cidades dentro de um raio de 350 km do depósito). As cidades dentro do alcance de ambos os depósitos são atendidas apenas pelo mais próximo. A distância entre as cidades ($\bar{d}_{ij}$) foi obtida via Google Distance Matrix API. As distâncias foram ponderados por um fator dinâmico π_{ijt} que pode assumir o valor zero, significando que a estrada entre as cidades i e j está bloqueada, ou 1.2 ou 1.5, para aumentar o tempo médio de viagem em 20% ou 50%, respectivamente. O valor do parâmetro π_{ijt} foi gerado aleatoriamente com probabilidades de 5%, 30%, 40% e 25% de assumir os valores esperados de 0, 1, 1.5 e 1.2, respectivamente. A probabilidade de restauração da estrada soma 1 após 6, 10 ou 15 períodos para os valores esperados de 0, 1.2 e 1.5, respectivamente. Finalmente, os tempos de viagem para cada período são obtidos através do algoritmo de Floyd-Warshall. As características das instâncias são detalhadas na Tabela 2, representadas como uma média de cinco instâncias com o mesmo número de PDs

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193446
https://proceedings.science/p/193446?lang=pt-br

($|DP|$). As colunas "$|K|$" e "pessoas afetadas" mostram, respectivamente, o número médio de veículos disponíveis e de pessoas afetadas. Por fim, a coluna "nome" apresenta como nos referimos às instâncias ao longo desta seção.

Tabela 2: Características das instâncias

depósito: São Paulo				depósito: Bauru			
nome	$\|DP\|$	$\|K\|$	pessoas afetadas	nome	$\|DP\|$	$\|K\|$	pessoas afetadas
SP3.[1-5]	3	1,0	7023	B8.[1-5]	8	1,0	15104
SP5.[1-5]	5	1,0	2199	B10.[1-5]	10	1,2	17981
SP8.[1-5]	8	2,2	28448	B15.[1-5]	15	1,8	25576
SP10.[1-5]	10	2,6	32084	B20.[1-5]	20	2,4	33967
SP15.[1-5]	15	3,0	37209	B25.[1-5]	25	4,0	57593
SP20.[1-5]	20	3,6	50385	B30.[1-5]	30	4,8	65976
SP25.[1-5]	25	4,4	66310	B35.[1-5]	35	5,3	71733

Foram considerados três categorias de itens: cestas básicas, produtos de limpeza e colchões. As características dos itens estão detalhadas na Tabela 3. Por simplicidade, consideramos que o suprimento é suficiente para satisfazer toda a demanda e é conhecido no primeiro dia, variando apenas a interrupção na infraestrutura de rede, a menos que indicado de outra forma. Consideramos um horizonte de planejamento de 15 dias úteis e 12 h diárias. O número de veículos foi estimado como a razão do peso total dos suprimentos pela soma da capacidade dos modelos disponíveis ao longo do horizonte de planejamento. A primeira metade da frota de veículos é composta pelo modelo Volkswagen Delivery e a segunda metade pelo modelo Mercedes-Benz Sprinter, com capacidades de 8150 kg e 2040 kg, respectivamente. Os tempos de carregamento (em horas), valor fixo do frete (em R$/período) e consumo (em R$/Km) são: 0.60 e 0.25, 300 e 200, 7/5 e 7/6, respectivamente para os modelos Volkswagen Delivery e Mercedes-Benz Sprinter.

Tabela 3: Detalhes sobre os itens distribuídos

	Prioridade (P_c)	Peso (kg)	ciclo δ_c $(períodos)$	Demanda $(unidades)$
cestas básicas	15	5	5	1 por pessoa, semanalmente
produtos de limpeza	2	1	10	1 por família (4 pessoas)
colchões	3	3	15	1 por pessoa, não periódico

4.2. Estratégias de alocação de veículos para rotas de destino único e carga completa

Nesta seção, comparamos seis estratégias diferentes para rotas de carga completa. O objetivo é analisar a possibilidade de reduzir os custos de transporte sem incorrer em consideráveis penalidades por iniquidade. A Tabela 4 exibe o valor total da iniquidade (coluna eq), que pode assumir um valor entre [0,6], onde 0 indica uma distribuição perfeitamente justa e 6 representa uma distribuição injusta para todos os 3 itens e 3 períodos. Também é fornecido o aumento percentual entre a função objetivo (o.f.) ou custos de transporte ($) de cada estratégia em relação ao valor mínimo encontrado entre todas as estratégias de alocação em cada instância (os valores nessas duas colunas estão em %). Os valores numéricos são uma média de cinco instâncias com o mesmo número de PDs. Por fim, os melhores resultados para cada grupo são apresentados em negrito.

Os resultados na Tabela 4 confirmam o *senso comum*: a melhor estratégia é atribuir apenas os veículos com maior capacidade para viagens de carga completa (estratégia *onlybig*). Essa estratégia não apenas produz os melhores custos sociais–apenas um aumento de 3,4% na função objetivo, em média, em relação ao valor mínimo para cada instância–, mas também uma distribuição equitativa: valor médio de 2,08 enquanto a estratégia sem criação explícita de tais rotas apresenta

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193446
https://proceedings.science/p/193446?lang=pt-br

quase o mesmo valor para iniquidade (2,06). Note que *onlybig* é capaz de reduzir as penalidades de demanda insatisfeita (custos sociais), apresentando os menores desvios para a função objetivo em 12 de 14 grupos de instâncias testadas, ao mesmo tempo que apresenta a melhor performance em termos de custo de transporte: apenas 0,4% de aumento, em média, em comparação com o menor custo (melhor estratégia em cada instância testada).

Enquanto *notrip* e *both* também resultaram em baixos custos de transporte (2,3% e 2.4% acima do mínimo, em média, respectivamente) e baixas penalidades de iniquidade (2,06 e 2,08, em média, respectivamente), elas causaram um aumento na função objetivo geral de mais de 20%, indicando sua incapacidade de entregar o maior número possível de suprimentos. As estratégias *1:nK* e *nK:1* tiveram o pior desempenho em termos de equidade (3,14 e 3,67, em média, respectivamente). Além disso, *nK:1* e *onlysmall* foram as piores estratégias em relação aos custos sociais: 32,7% e 27,7% acima do mínimo, em média, respectivamente. Elas têm em comum a alocação de veículos começando pelos de menor capacidade primeiro. Portanto, abordagens construtivas não devem atribuir rotas de destino único a todos os veículos disponíveis devido a requisitos de equidade, nem veículos menores devem ser alocados primeiro, pois compromete o uso eficiente da frota, consequentemente aumentando os custos sociais.

Tabela 4: Comparando diferentes estratégias de alocação de veículos às rotas de destino único e carga completa

grupo	notrip			1:nK			nK:1			onlybig			onlysmall			both		
	eq	o.f.	$	eq	o.f.	$	eq	o.f.	$	eq	o.f.	$	eq	o.f.	$	eq	o.f.	$
SP3	**0,00**	**1,2**	1,4	0,02	3,9	**0,1**	0,02	3,9	**0,1**	0,02	3,9	**0,1**	**0,00**	**1,2**	1,4	**0,00**	**1,2**	1,4
SP5	**0,02**	**0,5**	**0,5**	**0,02**	**0,5**	**0,5**	**0,02**	**0,5**	**0,5**	**0,02**	**0,5**	**0,5**	**0,02**	**0,5**	**0,5**	**0,02**	**0,5**	**0,5**
SP8	1,38	37,2	4,7	0,97	20,9	1,3	3,40	53,7	3,7	**0,73**	**12,0**	**0,1**	1,35	46,6	4,5	1,33	31,2	4,8
SP10	1,22	26,4	1,5	2,78	6,8	**0,9**	3,70	38,3	**0,9**	0,94	**0,1**	1,4	1,42	20,2	1,8	**0,88**	21,1	1,5
SP15	0,82	18,6	4,1	1,82	8,3	0,5	2,74	51,0	7,7	1,04	**4,6**	**0,4**	0,97	14,4	6,0	**0,62**	5,7	4,9
SP20	1,09	14,4	3,7	2,77	4,9	**0,6**	3,19	53,8	5,1	**1,08**	**2,1**	**0,6**	1,38	36,3	4,8	1,25	17,7	3,6
SP25	**2,14**	35,1	2,1	4,35	8,6	0,8	4,61	58,7	1,7	2,19	**0,1**	**0,7**	3,07	45,5	2,1	2,37	26,1	2,0
B8	**3,24**	**1,6**	2,2	4,09	8,2	2,4	4,11	13,8	6,6	4,09	6,0	**0,2**	**3,24**	6,5	7,1	**3,24**	**1,6**	2,2
B10	**4,02**	3,8	4,0	4,54	5,0	1,4	4,54	10,5	7,0	4,54	**3,6**	**0,0**	**4,02**	7,9	8,1	**4,02**	3,8	4,0
B15	**3,63**	12,6	2,8	4,74	9,1	1,6	4,85	10,5	1,6	3,78	**0,7**	**0,2**	3,89	10,2	2,1	3,89	18,7	2,6
B20	3,07	67,2	1,2	3,85	12,4	1,6	4,40	59,1	1,9	**2,02**	**0,9**	**0,5**	3,51	74,1	2,2	2,89	55,7	1,7
B25	2,82	35,9	1,8	3,89	11,4	0,9	5,06	54,1	2,1	**2,68**	**3,4**	**0,2**	3,02	46,1	2,1	2,97	35,6	2,0
B30	**2,40**	58,6	1,1	5,51	6,0	**0,7**	5,21	24,4	1,4	2,78	**4,0**	0,8	2,76	38,8	1,8	2,70	47,1	0,8
B35	3,01	45,9	1,8	4,67	6,6	0,6	5,50	25,9	1,1	3,21	**6,1**	**0,3**	3,13	39,2	2,0	**2,87**	58,5	1,2
média	**2,06**	25,6	2,3	3,14	8,0	1,0	3,67	32,7	3,0	2,08	**3,4**	**0,4**	2,27	27,7	3,3	2,08	23,2	2,4
máx.	**4,02**	67,2	4,7	5,51	20,9	2,4	5,50	59,1	7,7	4,54	**12,0**	**1,4**	**4,02**	74,1	8,1	**4,02**	58,5	4,9

4.3. Impacto do índice de prioridade na equidade e nos custos de transporte

Consideramos três cenários diferentes:

cenário 1: suprimentos e veículos são suficientes para atender quase toda a demanda;

cenário 2: variação do cenário 1 em que a oferta pode atender apenas 80% da demanda;

cenário 3: variação do cenário 1 com número de veículos reduzido em pelo menos uma unidade.

A Tabela 5 apresenta o gap relativo (valores em %) obtido com índice de prioridade dinâmico P^t_{cj} na função objetivo (colunas o.f.) e nos custos de transporte (coluna $) em relação à uma variação da construtiva onde cada rota inicia visitando o nó com o maior valor absoluto de demanda residual. As colunas eq_{prio} e $eq_{d'}$ mostram a penalidade de desigualdade para cada estratégia. Como algumas instâncias dos grupos SP3, SP5, B8 e B10 têm originalmente apenas um

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193446
https://proceedings.science/p/193446?lang=pt-br

Tabela 5: Comparando a heurística construtiva com ($prio$) e sem (d') o emprego de P^t_{cj}

	cenário 1				cenário 2				cenário 3			
	o.f.	$	eq_{prio}	$eq_{d'}$	o.f.	$	eq_{prio}	$eq_{d'}$	o.f.	$	eq_{prio}	$eq_{d'}$
SP3	0,0	0,0	0,02	0,02	-0,3	-1,8	3,87	3,61				
SP5	0,6	-0,5	0,02	0,01	0,9	3,2	4,37	4,88				
SP8	-12,0	4,7	0,11	1,21	-0,1	-0,5	5,08	5,47	-6,4	-0,5	3,61	5,69
SP10	-3,6	0,1	0,14	1,71	0,0	0,1	5,67	5,91	-2,6	-0,4	3,27	5,08
SP15	-1,7	-0,3	0,08	0,96	0,0	-0,1	5,71	5,81	3,3	-0,4	3,05	4,97
SP20	-4,6	0,1	0,24	2,61	0,1	0,8	5,83	6,00	10,8	0,9	4,41	6,00
SP25	-6,3	-0,4	0,16	2,13	0,0	0,5	5,72	6,00	1,6	0,4	3,95	6,00
média	-3,9	0,5	0,11	1,24	0,1	0,3	5,18	5,38	1,3	0,0	3,66	5,55
B8	-6,3	-6,3	0,00	0,00	0,0	0,0	5,62	5,87				
B10	-7,6	-7,6	0,00	0,00	0,0	0,1	5,50	5,86				
B15	-16,4	-12,8	0,20	0,74	-0,1	-0,9	5,74	5,88	0,7	0,2	5,70	5,98
B20	-0,2	0,7	0,12	0,64	0,2	1,9	5,82	5,91	12,7	0,2	3,02	4,63
B25	0,7	0,0	0,11	0,62	0,1	1,0	5,96	6,00	2,8	0,3	1,87	3,28
B30	5,9	-0,1	0,14	0,42	0,1	0,8	6,00	6,00	10,1	-0,2	3,32	5,35
B35	-1,4	-2,5	0,09	0,40	0,0	-0,1	6,00	6,00	13,4	0,0	4,06	5,87
média	-3,6	-4,1	0,10	0,40	0,0	0,4	5,81	5,93	9,7	0,1	3,07	4,78
média geral	**-3,8**	**-1,8**	**0,10**	**0,82**	**0,1**	**0,4**	**5,49**	**5,66**	**5,5**	**0,1**	**3,36**	**5,17**

veículo, excluímos esses grupos ao testar o cenário 3 devido à impossibilidade de reduzir ainda mais o número de veículos.

O índice de prioridade proposto melhorou a equidade em todos os três cenários. Quando os recursos não são escassos, priorizar pontos de distribuição menos atendidos não apenas reduziu as penalidades de desigualdade em 87,5% (de 0,82 para 0,10), mas também reduziu a função objetivo e os custos de transporte em 3,8% e 1,8%, em média, respectivamente, em comparação com a priorização de pontos de distribuição com quantidades maiores de demanda não satisfeita. No cenário 2, o uso de P^t_{cj} resultou em redução da iniquidade de 5,66 para 5,49 (melhoria de 2,9%, em média), com um aumento nos custos de transporte de apenas 0,4%. Considerando a importância de uma distribuição justa, é justificável um aumento nos custos de transporte para apoiar comunidades menores e/ou mais distantes do depósito.

No cenário 3, nossa proposta teve um desempenho pior em termos de demanda não satisfeita (aumento médio de 5,5% na função objetivo). Os custos de transporte aumentaram apenas 0,1%, em média, enquanto a desigualdade foi reduzida em 34,9% (de 5,17 para 3,36). Analisando as soluções, pudemos observar que a variação sem P^t_{cj} utilizou a frota para entregar suprimentos a grandes cidades, desconsiderando as necessidades de localidades menores e mais distantes do depósito. Consideremos a instância SP20.3 como exemplo, para a qual a heurística proposta apresentou o maior aumento em termos de custos sociais e de transporte para o grupo SP (20,5%). Porém, o emprego de P^t_{cj} permitiu a entrega de uma quantidade maior de cestas básicas, atendendo todos os pontos de distribuição – daí a maior redução em termos de iniquidade – enquanto a construtiva sem o índice de prioridade dinâmico privilegiou a cidade mais populosa (Jundiaí), deixando cinco pontos de distribuição sem atendimento. Desta forma, podemos concluir que o emprego de uma medida que busca garantir equidade entre as localidades atendidas é fundamental.

5. Conclusões

Propomos uma heurística construtiva para distribuição de ajuda humanitária após desastres naturais, respeitando a característica de não sobreposição da entrega de demandas periódicas (expiração da demanda ao final de cada ciclo). Testando seis diferentes estratégias de alocação de

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193446
https://proceedings.science/p/193446?lang=pt-br

veículos, concluímos que rotas de destino único e carga completa empregando os veículos de maior capacidade devem preceder a criação das demais rotas. Esta estratégia proporciona uma melhor utilização dos veículos sem comprometer a equidade.

Também demonstramos que soluções construídas sem incorporar equidade tendem a privilegiar regiões mais populosas e mais próximas do depósito, em detrimento das populações em áreas mais afastadas, pois isso aumenta a quantidade total de suprimentos distribuídos quando há escassez de suprimentos ou veículos, enquanto minimiza os custos de transporte. O índice de prioridade dinâmico proposto mostrou-se efetivo em corrigir a heurística construtiva na direção de distribuir os itens mais essenciais à toda população afetada.

Em trabalhos futuros, iremos propor heurísticas de melhoria, comparando os resultados obtidos com um *solver* comercial. Também apresentaremos os resultados comparativos entre uma abordagem dinâmica de fato, onde as heurísticas são executadas sempre que novas informações são conhecidas, com a abordagem que aqui utlizamos por simplicidade, onde mudanças nos parâmetros são consideradas informações passíveis de serem perfeitamente estimadas desde o primeito dia do horizonte de planejamento.

Referências

Biernath, A. (2024). O que causou a enchente de 1941 em Porto Alegre–e por que ela não é argumento para negar mudanças climáticas. `https://www.bbc.com/portuguese/articles/cv27272zd79o`. Acessado: 2024-06-01.

Caunhye, A. M., Zhang, Y., Li, M., e Nie, X. (2015). A location-routing model for prepositioning and distributing emergency supplies. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 90:161–176. ISSN 1366-5545.

Galindo, G. e Batta, R. (2013). Review of recent developments in OR/MS research in disaster operations management. *European Journal of Operational Research*, 230(2):201–211. ISSN 0377-2217.

Gralla, E. e Goentzel, J. (2018). Humanitarian transportation planning: Evaluation of practice-based heuristics and recommendations for improvement. *European Journal of Operational Research*, 269(2):436–450. ISSN 03772217.

Guha-Sapir, D. (2019). EM-DAT: The Emergency Events Database. *Université Catholique de Louvain, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (UCL - CRED), Brussels, Belgium*, (23-04-2020).

Holguín-Veras, J., Pérez-Rodríguez, N., Jaller, M., Van Wassenhove, L. N., e Aros-Vera, F. (2013). On the appropriate objective function for post-disaster humanitarian logistics models. *Journal of Operations Management*, 31(5):262–280. ISSN 0272-6963.

International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies (IFRC) (2020). Tackling the humanitarian impacts of the climate crisis together. Technical report, Geneva, Switzerland.

Sentia, P. D., Abdul Shukor, S., Wahab, A. N. A., e Mukhtar, M. (2023). Logistic distribution in humanitarian supply chain management: a thematic literature review and future research. *Annals of Operations Research*, 323(1):175–201. ISSN 1572-9338.

Van Wassenhove, L. N. (2006). Humanitarian aid logistics: supply chain management in high gear. *Journal of the Operational Research Society*, 57(5):475–489. ISSN 0160-5682.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193446
https://proceedings.science/p/193446?lang=pt-br