COORDENAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO, DISTRIBUIÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE FROTA EM SITUAÇÕES DE DESASTRE

Alfredo Moreno, Douglas Alem, Deisemara Ferreira
Departamento de Engenharia de Produção da UFSCar - Sorocaba
Rodovia João Leme dos Santos, Km 110, SP-264, Itinga Sorocaba, 18052-780
alfredmor09@hotmail.com, douglas@ufscar.br,
deisemaraferreira@gmail.com

RESUMO

Os últimos desastres naturais ocorridos ao redor do mundo têm evidenciado a complexidade dos problemas envolvidos nessas situações e a dificuldade do planejamento de operações de preparação e resposta. Dentre as diversas decisões que precisam ser tomadas em situações de desastre, têm-se a localização de centros de auxílio e a distribuição de suprimentos para a comunidade afetada. Embora muitos trabalhos da literatura tenham desenvolvidos modelos matemáticos para auxiliar em alguma dessas decisões, poucos autores se preocuparam em integrá-las ao dimensionamento de frotas na tentativa de gerar soluções mais eficientes. Nesse trabalho, é desenvolvido de um modelo de programação estocástica inteira-mista para coordenar tais decisões em um ambiente dinâmico sob incertezas. O modelo integrado é comparado com uma abordagem que considera o problema de forma não integrada. Resultados preliminares indicam que a abordagem integrada ajuda a coordenar melhor as diferentes decisões, gerando soluções mais úteis do ponto de vista prático.

PALAVRAS CHAVE. Logística humanitária, Localização-distribuição, Programação estocástica inteira-mista.

Área Principal: Logística e Transportes.

ABSTRACT

The recent natural disasters around the world have shown the complexity of the problems in these situations and the difficulty of planning pre- and post disaster operations. Among the diverse decisions in disaster situations, we have the location of relief centers and the distribution of essential supplies for the affected community. Although many studies in the literature have developed mathematical models to support these decisions, only a few authors have proposed to combine location-distribution with the fleet sizing in an attempt to generate more efficient solutions. In this paper, it is developed a two-stage mixed-integer stochastic programming model for coordinating those decisions in a dynamic context under uncertainty. The integrated model is further compared with an alternate approach that considers a decoupled problem. Preliminary results indicate that the integrated approach helps to coordinate better the decisions, and provide more useful solutions from a practical point of view.

KEYWORDS. Humanitarian logistics, Location-distribution, Mixed-integer stochastic programming.

Main area: Logistics and transportation.

1. Introdução

O ciclo de vida das operações de desastre esta ligado à temporalidade desse tipo de evento. Existem operações realizadas antes da ocorrência do desastre (pré-desastre) e operações realizadas após o início do desastre (pós-desastre). As decisões em operações pré-desastre incluem, principalmente, localização de facilidades, pré-posicionamento de estoque, dimensionamento da frota, desenho e socialização de planos de emergência, proteção da infraestrutura necessária para os serviços de emergência, entre outras. As decisões em operações pós-desastre incluem localização de facilidades provisórias, dimensionamento de frota, definição de níveis de estoques, transporte/distribuição de suprimentos, implementação de planos de emergência, resgate e evacuação de afetados, entre outras.

Dentre essas decisões, a coordenação das decisões de localização e distribuição/transporte compõe uma importante área de estudo em logística humanitária, que tem atraído a atenção de acadêmicos e praticantes, pois não existe um *tradeoff* claro entre localização e transporte em termos do custo total da rede. Além disso, poucos pesquisadores têm se preocupado em integrar o dimensionamento de frota às decisões de localização e distribuição. Por um lado, superestimar o número e os tipos de veículos necessários para realizar o transporte incorre em custos excessivos e, consequentemente, à escassez de recursos que poderiam ser empregados em outras atividades de pré- e/ou pós-desastre. Por outro lado, subestimar a frota de veículos em termos de quantidade e/ou tipo, pode causar uma distribuição ineficiente dos suprimentos, como o desbalanceamento da distribuição entre as diversas áreas afetadas, dificultando atingir regiões isoladas ou mais colapsadas, o que deteriora os níveis de serviço.

A imprevisibilidade do desastre e do seu impacto dificulta ainda mais as decisões de localização, distribuição e frota. Com recursos limitados, os órgãos que fazem a gestão de desastres devem responder da melhor maneira possível a qualquer que seja a consequência desses eventos. Isso sugere que o desenvolvimento de ferramentas de apoio às decisões em desastres considere as incertezas que são inerentes a essas situações. A programação estocástica de dois estágios surge como uma maneira "natural" para modelar e resolver problemas em logística humanitária, sob a motivação de que os estágios podem ser relacionados ao ciclo de vida dos desastres (Mete e Zabinsky, 2010). O primeiro estágio pode ser visto como a fase de preparação, em que potenciais centros de auxílio, depósitos e veículos são selecionados, independentemente da realização das variáveis aleatórias. No segundo estágio, são determinadas as decisões de resposta ao desastre, i.e, as rotas que serão percorridas, quantos veículos serão, de fato, necessários e a efetiva distribuição de produtos.

A maioria dos modelos de programação estocástica apresentados na literatura acadêmica apoiam as decisões de localização e pré-posicionamento de estoque no primeiro estágio e distribuição de suprimentos no segundo estágio, mas sem considerar o dimensionamento da frota. Seguindo essa linha, tem-se Chang et al. (2007); Rawls e Turnquist (2010); Bozorgi-Amiri et al. (2011); Li et al. (2011); Döyen et al. (2011); Noyan (2012); Rawls e Turnquist (2012); Bozorgi-Amiri et al. (2013). Modelos matemáticos de programação estocástica que combinam decisões de localização, distribuição e dimensionamento da frota foram investigados em Mete e Zabinsky (2010); Salmerón e Apte (2010), porém, apenas num contexto estático. Nesse trabalho, é proposto um modelo dinâmico para coordenar decisões de localização, distribuição e dimensionamento de lotes sob incertezas. Adicionalmente, são considerados os custos fixos de contratação dos veículos na tentativa de reduzir os custos totais das operações humanitárias. As incertezas associadas à demanda, à proporção de estoque utilizável, aos suprimentos e à disponibilidade das rotas foram modeladas via um conjunto discreto de cenários, seguindo a abordagem clássica da programação estocástica de dois estágios. Os modelos são analisados com base em instâncias geradas a partir de dados reais do megadesastre da Região Serrana do Rio de Janeiro em 2011 − inundações e movimentos de massa − desastres recorrentes no Brasil e no mundo. Esse tipo de desastre também é tema de investigação nos trabalhos de Corradini e Alem (2014) e Alem e Clark (2014). Para ilustrar como a falta de coordenação entre as diversas decisões pode afetar a efetividade das operações humanitárias, investiga-se uma abordagem alternativa em que os problemas de localização e distribuição são resolvidos na primeira fase, e o problema de dimensionamento de frotas é resolvido na segunda fase a partir das soluções (sub) ótimas da primeira fase.

Esse artigo está organizado da seguinte maneira. A Seção 2 apresenta a descrição do problema. A Seção 3 apresenta a formulação matemática que considera o problema integrado. A Seção 4 apresenta os modelos matemáticos para a abordagem não integrada do problema. A Seção 5 descreve as instâncias e os resultados computacionais. Finalmente, a Seção 6 apresenta as considerações finais.

2. Descrição do problema e formulação matemática

Basicamente, o modelo matemático desenvolvido nesse artigo combina os problemas de localização de centros de auxílio, transporte de produtos, dimensionamento da frota e alocação da demanda aos centros de auxílio. O problema de localização de centros de auxílio determina em qual das possíveis localidades operar os centros de auxílio, que possuem uma capacidade de armazenamento total e por produto que deve ser respeitada. A localização dos depósitos é conhecida. Assume-se que a capacidade dos depósitos está limitada pela disponibilidade de suprimentos. Podem existir estoques de produtos nos depósitos e nos centros de auxílio, sendo que nem toda a quantidade de produtos estocados nos centros de auxílio permanece em condições de ser utilizada de um período para o outro devido ao impacto do desastre. Assume-se também que os centros de auxílio abertos devem permanecer em funcionamento até o final das operações humanitárias. O problema de transporte de produtos consiste em determinar a quantidade de cada tipo de produto que deve ser transportada dos depósitos até os centros de auxílio, que armazenam temporariamente os produtos demandados pelas áreas afetadas. Além disso, deve-se determinar em que veículos (respeitando a suas capacidades em volume e peso) deve ser realizado o transporte desses produtos, considerando que há um conjunto de rotas que, como resultado do impacto do desastre, não estão disponíveis para alguns tipos de veículos. O problema de dimensionamento da frota envolve a decisão de determinar a quantidade e os tipos de veículos que devem ser contratados em cada depósito para distribuir os produtos aos centros de auxílio. Os veículos são contratados por período, e a sua contratação não implica que sejam de fato utilizados no transporte de produtos na fase de pós-desastre. Finalmente, o problema de alocação da demanda consiste em designar uma fração da demanda de cada área afetada aos centros de auxílio, onde as vítimas podem se abastecer com os itens que necessitam. Assumiu-se um custo pelo atendimento da demanda que é proporcional à distância entre os centros de auxílio e as áreas afetadas.

Dado que não é possível conhecer com antecipação as consequências do impacto do desastre, foram assumidas as seguintes variáveis aleatórias: o suprimento de produtos (q^{ξ}_{wit}) nos depósitos, que é resultado de doações ou apoio econômico do governo; a proporção de estoque utilizável (ρ^{ξ}_{wj}) nos centros de auxílio, que é relativa às condições dos produtos transportados e às condições de armazenamento e ao impacto do desastre; a demanda de produtos (d^{ξ}_{wkt}) nas áreas afetadas, que depende do impacto do desastre sobre a população; e a disponibilidade das rotas (u^{ξ}_{ijlt}), que depende das consequências do desastre sobre a rede de transporte. As variáveis aleatórias são assumidas serem bem aproximadas por um conjunto discreto e finito de realizações ou cenários $\xi \in \Xi$, com probabilidades de ocorrência $\pi(\xi)$ que designam a chance de tal cenário materializar-se. O objetivo do modelo é realizar o atendimento das vítimas do desastre minimizando o custo total esperado. A notação matemática é apresentada a seguir.

Conjuntos

$\mathcal{W}$	Produtos.
$\mathcal{I}$	Depósitos.
$\mathcal{J}$	Centros de auxílio.
$\mathcal{K}$	Áreas afetadas.
$\mathcal{L}$	Tipos de veículos.
$\mathcal{T}$	Períodos de tempo.
Ξ	Cenários.

Parâmetros Determinísticos

α^{new}_j	Custo fixo por abertura do centro de auxílio j (infra-estrutura básica requerida para começar as operações).
α^{oper}_j	Custo fixo por operação do centro de auxílio j (energia elétrica, água, equipes de ajuda humanitária).
β_l	Custo fixo por veículo tipo l (compra, contratação ou manutenção).
γ_{ijl}	Custo de transporte do veículo l na rota $i \to j$.
ϕ^+_w	Custo de estoque do produto w.
ϕ^-_w	Penalidade por demanda insatisfeita do produto w.
δ_{kj}	Custo do centro de auxílio j atender demanda da área afetada k.
$b_w(b'_w)$	Volume (peso) do produto w.
$k^v_l(k'^v_l)$	Capacidade em volume (peso) do veículo l.
k^c_j	Capacidade total do centro de auxílio j (volume).
k^{cp}_{wj}	Capacidade de armazenamento do produto w no centro de auxílio j (quantidade de produtos).
k^{arc}_{ijl}	Número máximo de veículos l que podem atravessar a rota $i \to j$.
k^n_l	Número máximo de veículos l disponíveis para as operações humanitárias.

Parâmetros estocásticos

$q_{wit}(\xi)$	Suprimento do produto w no depósito i no período t no cenário ξ.
$\rho_{wjt}(\xi)$	Proporção do produto w no centro de auxílio j no cenário ξ que permanece utilizável entre dois períodos $t-1$ e t.
$d_{wkt}(\xi)$	Demanda do produto w na área afetada k no período t no cenário ξ.
$u_{ijlt}(\xi)$	$= 1$ se a rota $i \to j$ está disponível para o veículo l no período t no cenário ξ $= 0$, caso contrario.
$\pi(\xi)$	Probabilidade de ocorrência do cenário ξ.

Variáveis de decisão de primeiro estágio

N_{ilt}	Número de veículos l designados ao depósito i no período t.
Y_{jt}^{new}	$= 1$, se o centro de auxílio j abre no período t $= 0$, caso contrario.
Y_{jt}^{oper}	$= 1$, se o centro de auxílio j está em operação no período t $= 0$, caso contrario.

Variáveis de decisão de segundo estágio

$P_{wijlt}(\xi)$	Quantidade do produto w transportado na rota $i \to j$ pelo veículo l no período t no cenário ξ.
$V_{ijlt}(\xi)$	Número de veículos l usados na rota $i \to j$ no período t no cenário ξ.
$Z_{wjkt}(\xi)$	Quantidade do produto w no centro de auxílio j para atender demanda da área afetada k no período t no cenário ξ.
$I_{wit}^{d}(\xi)$	Estoque do produto w no depósito i no período t no cenário ξ.
$I_{wjt}^{rc}(\xi)$	Estoque do produto w no centro de auxílio j no período t no cenário ξ.
$U_{wkt}(\xi)$	Demanda insatisfeita do produto w na área afetada k no período t no cenário ξ.

Seja Λ o conjunto de todas as variáveis de decisão. O modelo de programação estocástica inteira-mista de dois estágios para o problema de localização-distribuição de suprimentos com decisões de dimensionamento é formulado da seguinte forma:

$$\min_{\Lambda} \quad \text{YC}^{new} + \text{YC}^{oper} + \text{NC} + \text{VC} + \text{ZC} + \text{IC} + \text{UC} \tag{1}$$

em que

$\text{YC}^{new} = \sum_{j\in\mathcal{J}} \sum_{t\in T} \alpha_j^{new} \cdot Y_{jt}^{new}$ é o custo total de abertura dos centros de auxílio;

$\text{YC}^{oper} = \sum_{j\in\mathcal{J}} \sum_{t\in T} \alpha_j^{oper} \cdot Y_{jt}^{oper}$ é o custo total de operação dos centros de auxílio;

$\text{NC} = \sum_{l\in\mathcal{L}} \sum_{i\in\mathcal{I}} \sum_{t\in\mathcal{T}} \beta_l \cdot N_{ilt}$ é o custo total pela designação (contratação) dos veículos;

$\text{VC} = \sum_{i\in\mathcal{I}} \sum_{j\in\mathcal{J}} \sum_{l\in\mathcal{L}} \sum_{t\in\mathcal{T}} \sum_{\xi\in\Xi} \pi(\xi) \cdot \gamma_{ijl} \cdot V_{ijlt}(\xi)$ é o custo total de transporte;

$\text{ZC} = \sum_{w\in\mathcal{W}}\sum_{k\in\mathcal{K}}\sum_{j\in\mathcal{J}}\sum_{t\in\mathcal{T}}\sum_{\xi\in\Xi}\pi(\xi)\cdot\delta_{kj}\cdot Z_{wkjt}(\xi)$ é o custo total pelo atendimento da demanda;

$\text{IC} = \sum_{w\in\mathcal{W}}\sum_{j\in\mathcal{J}}\sum_{t\in\mathcal{T}}\sum_{\xi\in\Xi}\pi(\xi)\cdot\phi_w^{+}\cdot I^{rc}_{wjt}(\xi)$ é o custo total de estoque nos centros de auxílio;

$\text{UC} = \sum_{w\in\mathcal{W}}\sum_{j\in\mathcal{J}}\sum_{t\in\mathcal{T}}\sum_{\xi\in\Xi}\pi(\xi)\cdot\phi_w^{-}\cdot U_{wjt}(\xi)$ é a penalidade total por demanda insatisfeita.

sujeito às seguintes restrições:

$$\sum_{i\in\mathcal{I}}\sum_{l\in\mathcal{L}}P_{wijlt}(\xi)+\rho_{wjt}(\xi)\cdot I^{rc}_{wj(t-1)}(\xi)=\sum_{k\in\mathcal{K}}Z_{wkjt}(\xi)+I^{rc}_{wjt}(\xi),\ \forall w\in\mathcal{W},\ j\in\mathcal{J},\ t\in\mathcal{T},\ \xi\in\Xi. \tag{2}$$

$$q_{wit}(\xi)+I^{d}_{wi(t-1)}(\xi)=\sum_{j\in\mathcal{J}}\sum_{l\in\mathcal{L}}P_{wijlt}(\xi)+I^{d}_{wit}(\xi),\ \forall w\in\mathcal{W},\ i\in\mathcal{I},\ t\in\mathcal{T},\ \xi\in\Xi. \tag{3}$$

$$U_{wkt}(\xi)=d_{wkt}(\xi)-\sum_{j\in\mathcal{J}}Z_{wkjt}(\xi)+U_{wk(t-1)},\ \forall w\in\mathcal{W},\ k\in\mathcal{K},\ t\in\mathcal{T},\ \xi\in\Xi. \tag{4}$$

$$\sum_{w\in\mathcal{W}}\sum_{i\in\mathcal{I}}\sum_{l\in\mathcal{L}}b_w\cdot P_{wijlt}(\xi)+\sum_{w\in\mathcal{W}}b_w\cdot I^{rc}_{wj(t-1)}\le k^{c}_{j}\cdot Y^{oper}_{jt},\ \forall j\in\mathcal{J},\ t\in\mathcal{T},\ \xi\in\Xi. \tag{5}$$

$$\sum_{i\in\mathcal{I}}\sum_{l\in\mathcal{L}}P_{wijlt}(\xi)+I^{rc}_{wj(t-1)}(\xi)\le k^{cp}_{wj}\cdot Y^{oper}_{jt},\ \forall w\in\mathcal{W},\ j\in\mathcal{J},\ t\in\mathcal{T},\ \xi\in\Xi. \tag{6}$$

$$V_{ijlt}(\xi)\ge\frac{\sum_{w\in\mathcal{W}}b_w\cdot P_{wijlt}(\xi)}{k^{v}_{l}},\ \forall i\in\mathcal{I},\ j\in\mathcal{J},\ l\in\mathcal{L},\ t\in\mathcal{T},\ \xi\in\Xi. \tag{7}$$

$$V_{ijlt}(\xi)\ge\frac{\sum_{w\in\mathcal{W}}b'_w\cdot P_{wijlt}(\xi)}{k'^{v}_{l}},\ \forall i\in\mathcal{I},\ j\in\mathcal{J},\ l\in\mathcal{L},\ t\in\mathcal{T},\ \xi\in\Xi. \tag{8}$$

$$V_{ijlt}(\xi)\le k^{arc}_{ijl}\cdot u_{ijlt}(\xi),\ \forall i\in\mathcal{I},\ j\in\mathcal{J},\ l\in\mathcal{L},\ t\in\mathcal{T},\ \xi\in\Xi. \tag{9}$$

$$\sum_{i\in\mathcal{I}}N_{ilt}\le k^{n}_{l},\ \forall l\in\mathcal{L},\ t\in\mathcal{T}. \tag{10}$$

$$\sum_{j\in J}V_{ijlt}(\xi)\le N_{ilt},\ \forall i\in\mathcal{I},\ l\in\mathcal{L},\ t\in\mathcal{T},\ \xi\in\Xi. \tag{11}$$

$$Y^{oper}_{jt}\ge Y^{oper}_{j(t-1)},\ \forall j\in\mathcal{J},\ t\in\mathcal{T}. \tag{12}$$

$$Y^{new}_{jt}\ge Y^{oper}_{jt}-Y^{oper}_{j(t-1)},\ \forall j\in\mathcal{J},\ t\in\mathcal{T}. \tag{13}$$

$$\mathbf{Y}^{oper}\in\mathbb{B}^{|\mathcal{J}|\times|\mathcal{T}|}. \tag{14}$$

$$\mathbf{Y}^{new}\ge\mathbf{0}. \tag{15}$$

$$\mathbf{N}\ge\mathbf{0}. \tag{16}$$

$$\mathbf{V}(\xi)\ge\mathbf{0}\text{ e integer},\ \forall\xi\in\Xi. \tag{17}$$

$$\mathbf{P}(\xi),\ \mathbf{Z}(\xi),\ \mathbf{I}^{rc}(\xi),\ \mathbf{U}(\xi),\ \mathbf{I}^{d}(\xi)\ge\mathbf{0},\ \forall\xi\in\Xi. \tag{18}$$

A função objetivo (1) minimiza o custo total esperado, composto pelos custos de primeiro estágio (abertura e operação dos centros de auxílio e designação de veículos) e pelos custos de segundo estágio (transporte, estoque, atraso e atendimento da demanda). As restrições (2) e (3) garantem a conservação do fluxo de produtos nos centros de auxílio e nos depósitos, respectivamente. Na restrição (2), o estoque que pode ser utilizado de um período para o seguinte é reduzido pela proporção de estoque utilizável $\rho_{wjt}(\xi)$. A restrição (4) determina a demanda insatisfeita das áreas afetadas. Sem perda de generalidade, assume-se que os estoques e atrasos iniciais são nulos. As restrições (5) e (6) garantem que só pode existir transporte numa rota $i \to j$ se o centro de auxílio j está em operação. Além disso, se o centro de auxílio j está em operação, essas duas restrições limitam o fluxo de produtos de acordo com a sua capacidade total e por produto. As restrições (7) e (8) determinam o número mínimo de veículos necessários para realizar o transporte de produtos dos depósitos aos centros de auxílio no segundo estágio, respeitando as capacidades (peso e volume) dos veículos. A restrição (9) garante que o veículo l só pode percorrer a rota $i \to j$ no período t no cenário ξ se a rota estiver disponível, i.e., $u^{\xi}_{ijlt} = 1$. Está restrição também limita o número de veículos que podem ser utilizados à capacidade de transporte na rota k^{arc}_{ijl}. A restrição (10) limita o número de veículos de cada tipo que podem ser contratados por período no primeiro estágio. A restrição (11) assegura que somente os veículos contratados no primeiro estágio podem fazer o transporte no segundo estágio. A restrição (12) garante que os centros de auxílio abertos devem permanecer em operação até o final das operações humanitárias. A restrição (13) associa as variáveis de decisão de abertura àquelas referentes à operação dos mesmos. As restrições (14), (15), (16) (17) e (18) representam o domínio das variáveis de decisão.

3. Abordagem não integrada para o problema proposto

Na abordagem não integrada proposta, são considerados dois problemas desacoplados, que são resolvidos de forma sequencial em duas fases. Na primeira fase, é resolvido o problema de localização-distribuição, que gera o planejamento da localização dos centros de auxílio e a distribuição dos produtos, sem considerar a frota de veículos necessária para realizar a distribuição. Na segunda fase, a partir da solução (sub) ótima associada à localização e distribuição, determina-se a frota de veículos adequada. A formulação matemática dos problemas considerados em cada uma das fases é apresentada a seguir.

Variáveis de decisão de segundo estágio

$P'_{wijt}(\xi)$ Quantidade do produto w transportado na rota $i \to j$ no período t no cenário ξ.

Parâmetros determinísticos

M Número suficientemente grande.

A função objetivo (19) minimiza o custo total de abertura e operação dos centros de auxílio, o custo total pelo atendimento da demanda, o custo total de estoque e a penalidade total por demanda insatisfeita, como mostrado a seguir.

$$\min_{\Lambda} \quad \mathrm{YC}^{new} + \mathrm{YC}^{oper} + \mathrm{ZC} + \mathrm{IC} + \mathrm{UC} \tag{19}$$

São consideradas as restrições (4), (12), (13), (14), (15) e (18) como no modelo integrado apresentado na seção anterior. Adicionalmente, são consideradas as seguintes restrições:

$$\sum_{i\in\mathcal{I}} P'_{wijt}(\xi) + \rho_{wjt}(\xi)\cdot I^{rc}_{wj(t-1)}(\xi) = \sum_{k\in\mathcal{K}} Z_{wkjt}(\xi) + I^{rc}_{wjt}(\xi),\ \forall w\in\mathcal{W},\ j\in\mathcal{J},\ t\in\mathcal{T},\ \xi\in\Xi. \quad (20)$$

$$q_{wit}(\xi) + I^{d}_{wi(t-1)}(\xi) = \sum_{j\in\mathcal{J}} P'_{wijt}(\xi) + I^{d}_{wit}(\xi),\ \forall w\in\mathcal{W},\ i\in\mathcal{I},\ t\in\mathcal{T},\ \xi\in\Xi. \quad (21)$$

$$\sum_{w\in\mathcal{W}}\sum_{i\in\mathcal{I}} b_w\cdot P'_{wijt}(\xi) + \sum_{w\in\mathcal{W}} b_w\cdot I^{rc}_{wj(t-1)} \le k^c_j\cdot Y^{oper}_{jt},\ \forall j\in\mathcal{J},\ t\in\mathcal{T},\ \xi\in\Xi. \quad (22)$$

$$\sum_{i\in\mathcal{I}} P'_{wijt}(\xi) + I^{rc}_{wj(t-1)}(\xi) \le k^{cp}_{wj}\cdot Y^{oper}_{jt},\ \forall w\in\mathcal{W},\ j\in\mathcal{J},\ t\in\mathcal{T},\ \xi\in\Xi. \quad (23)$$

$$P'_{wijt}(\xi) \le M\cdot\sum_{l\in\mathcal{L}} u^{\xi}_{ijlt},\ \forall w\in\mathcal{W},\ j\in\mathcal{J},\ i\in\mathcal{I},\ t\in\mathcal{T},\ \xi\in\Xi. \quad (24)$$

$$\mathbf{P}' \ge \mathbf{0}. \quad (25)$$

As restrições (20) e (21) garantem a conservação do fluxo de produtos nos centros de auxílio e nos depósitos, respectivamente. As restrições (22) e (23) limitam o fluxo de produtos de acordo com a capacidade total e por produto dos centros de auxílio. A restrição (24) evita que sejam enviados produtos numa rota $i \to j$ que não está disponível para nenhum dos tipos de veículos. A restrição (25) representa o domínio das variáveis de decisão.

O modelo de dimensionamento da frotas usa a solução $P'_{wijt}(\xi)$ do modelo de localização-distribuição. A nova função objetivo (26) minimiza apenas o custo total pela designação (contratação) dos veículos e o custo total de transporte, i.e.:

$$\min_{\Lambda} \quad \mathrm{NC} + \mathrm{VC} \quad (26)$$

São consideradas as restrições (7), (8), (9), (10), (11), (16), (17) e (18) como no modelo integrado. Além disso, considera-se uma restrição adicional (27) para garantir que a soma dos produtos transportados por todos os veículos numa rota $i \to j$ seja igual à quantidade de produtos que devem ser distribuídos nessa rota ($P'_{ijt}(\xi)$). Tal restrição vincula o modelo de dimensionamento de frotas (fase 2) ao modelo de localização-distribuição (fase 1).

$$P'{}_{ijt}(\xi) = \sum_{l\in\mathcal{L}} P_{wijlt}(\xi),\ \forall i\in\mathcal{I},\ j\in\mathcal{J},\ t\in\mathcal{T},\ \xi\in\Xi. \quad (27)$$

O procedimento de otimização da abordagem não integrada do problema de localização-distribuição com dimensionamento da frotas é o mostrado a seguir:

1. Fase 1: Resolva o problema de localização-distribuição.
2. Fixe as variáveis $P'_{wijt}(\xi)$, Y^{new}_{jt}, Y^{oper}_{jt}, $Z_{wjkt}(\xi)$, $I^{d}_{wit}(\xi)$, $I^{rc}_{wjt}(\xi)$ e $U_{wkt}(\xi)$.
3. Fase 2: Resolva o problema de dimensionamento de frotas.

4. Experimentos computacionais

O objetivo dessa seção é analisar o impacto da coordenação das decisões na efetividade das operações humanitárias de localização, distribuição e dimensionamento de frotas Os modelos foram codificados em linguagem GAMS 24.1.3 e resolvidos pelo *solver* CPLEX 12.5.1 num computador com 16 GB de memória RAM, processador Intel Core i7 e sistema operacional Windows 7. Foi estabelecido como critério de parada um limite de tempo de 3.600 segundos ou um gap de otimalidade menor do que 1%.

4.1. Características das instâncias

Inicialmente, foi gerada uma instância (M1) a partir de dados estimados com base no megadestre da região Serrana do Rio de Janeiro em 2011 (Dourado et al., 2012; Rio De Janeiro, 2011). A instância M1 considera 3 depósitos, 20 centros de auxílio, 5 cidades afetadas, 5 tipos de produtos (água, alimentos, produtos médicos, produtos de higiene doméstica, produtos de higiene pessoal), 3 tipos de veículos (caminhões, barcos e helicópteros), 5 cenários (emergência, crise, menor, moderado, maior) e 10 períodos. A partir da instância M1, foram construídas 7 novas instâncias com modificações em alguns parâmetros com o objetivo de analisar o comportamento do modelo ante diversas situações. Foram exploradas situações em que o suprimento é alto (M2), a disponibilidades dos veículos é limitada (M3), um dos tipos de veículos não está disponível (M4), a capacidade dos centros de auxílio é reduzida (M5), a capacidade dos veículos é reduzida (M6), o custo de abertura dos centros de auxílio aumenta (M7) e o suprimento e a demanda diminuem (M9). Foi assumido um número de veículos grande o suficiente para garantir a distribuição dos produtos na instância M1. O conjunto de cenários foi gerado como em Moreno et al. (2015) com base em dados históricos de desastres ocorridos no estado do Rio de Janeiro num período de 47 anos (1966-2013). As características dos produtos e dos veículos foram estabelecidas de acordo com a literatura (IBGE, 2009; The Sphere Project, 2011; ICRC, 2009; Alem e Clark, 2014).

4.2. Resultados e discussão

Para melhorar a eficiência do *solver*, foram testadas configurações alternativas à opção *default* do CPLEX. Nos testes, o método de planos de corte foi desligado, a frequência de utilização da heurística RINS (*Relaxation Induced Neighborhood Search*) foi alterada para cada 10 e 100 nós, o pré-solver foi desligado e foram testados os algoritmos primal, dual e network simplex e o algoritmo de pontos interiores (*Barrier*) para resolver as relaxações lineares do nó raiz e também para resolver os subproblemas de cada nó da árvore. A melhor configuração encontrada foi utilizar o algoritmo dual simplex no nó raiz e nos nós da árvore, desligar os planos de corte e alterar a frequência da heurística RINS para cada 100 nós. A Tabela 1 apresenta o resultado dessa melhor estratégia aplicada ao problema integrado e não integrado. Os *gaps* obtidos na resolução dos modelos foram todos menores a 1%.

Em todas as instâncias, o modelo integrado gerou custo totais menores, devido a uma utilização mais eficiente dos veículos. Isto se deve ao fato de que no modelo não integrado não são considerados os custos ou a disponibilidade dos veículos no momento de realizar o planejamento da localização-distribuição. O custo médio no modelo integrado foi 16.466.020, enquanto que no problema não integrado foi de 66.823.743, i.e, 305,9% maior. O tempo computacional, no entanto, foi menor para a maioria das instâncias no modelo não integrado, o que era de se esperar. O tempo médio no problema integrado foi 32,5 e no problema integrado foi 24,89, i.e., 23,41% menor.

A maior diferença entre o custo total dos modelos foi devido à instância M2, na qual o fluxo de produtos distribuídos foi maior e, portanto, foram necessários mais veículos para realizar a distribuição desses produtos. Alem disso, a instância em que a disponibilidade

Table 1. Função objetivo e tempo computacional da abordagem integrada e não integrada.

Instâncias	Problema integrado		Problema não integrado			
	Função objetivo	Tempo (Seg.)	Função objetivo	Tempo (Seg.)	$\frac{(FON-FOI)}{FOI}$ (%) [1]	$\frac{(TCN-TCI)}{TCI}$ (%) [2]
M1	17.264,200	28,88	70.705.436	25,80	309,5	$-10,65$
M2	2.833.673	73,45	52.519.886	14,51	1.753	$-80,25$
M3	754.141.193	57,80	Infactível	Infactível	*	*
M4	17.330.486	24,20	73.598.187	18,13	324,7	$-25,08$
M5	17.247.671	23,70	76.120.883	36,16	341,3	$52,60$
M6	35.592.052	16,16	94.504.993	12,03	165,5	$-25,55$
M7	17.290.040	19,56	70.741.436	49,50	309,1	$153,0$
M9	7.704.019	41,54	29.575.383	18,13	283,9	$-56,37$
Média[3]	16.466.020	32,50	66.823.743	24,89	498,2	1,104

[1] FON=Função objetivo do problema não integrado; FOI=Função objetivo do problema integrado.
[2] TCN= Tempo computacional do problema não integrado; TCI= Tempo computacional do problema integrado.
[3] Média sem considerar a instância M3.

de veículos é reduzida (M3) foi infactível quando resolvida com o modelo não integrado, pois, como dito anteriormente, no modelo não integrado, o planejamento da distribuição é realizado sem considerar a disponibilidade da frota, o que leva a um desbalanço entre a quantidade de produtos que precisam ser transportados e a real frota. Assim, os resultados sugerem que a coordenação entre as decisões pode, de fato, ser essencial para fornecer soluções efetivas na logística emergencial.

5. Conclusões e trabalhos futuros

Nesse artigo, foram desenvolvidas duas abordagens de programação estocástica inteira-mista para o problema de localização de centros de auxílio, distribuição de suprimentos e dimensionamento de frota em operações de resposta a desastres. Na primeira abordagem, é proposto um modelo que integra as decisões de localização, distribuição e dimensionamento da frota. Na segunda abordagem, são propostos dois modelos que otimizam o problema de forma sequencial em duas fases. Além disso, os modelos consideram as incertezas inerentes às situações de desastres via um conjunto discreto de cenários. Os resultados indicam que a abordagem integrada oferece soluções de menor custo total, principalmente por uma utilização mais eficiente dos veículos disponíveis. Porém, a abordagem integrada foi, para a maioria das instâncias testadas, mais difícil de ser resolvida. Também foi evidenciado que a abordagem não integrada pode, em alguns casos, proporcionar soluções que são inviáveis do ponto de vista prático, principalmente quando os veículos disponíveis para realizar a distribuição são escassos. Pesquisas futuras estão orientadas ao desenvolvimento de modelos que considerem o tempo de transporte e a reutilização de veículos dentro de um mesmo período, o que é essencial em se tratando de situações de desastre com recursos escassos e horizontes de planejamento curtos.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece à bolsa CAPES/DS. O segundo autor é grato às bolsas de pesquisa FAPESP (processo 2013/08303-2) e CNPq (processos 470154/2013-6 e 306237/2014-8) pelo apoio financeiro. O terceiro autor agradece à bolsa de pesquisa CNPq (processo 312569/2013-0).

References

Alem, D. e Clark, A. (2014). Stochastic network models for preparedness and response in disaster relief. *Submetido para revisão*.

Bozorgi-Amiri, A., Jabalameli, M. S., Alinaghian, M., e Heydari, M. (2011). A modified particle swarm optimization for disaster relief logistics under uncertain environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60(1-4):357–371.

Bozorgi-Amiri, A., Jabalameli, M. S., e Mirzapour AL-e-HASHEM, S. M. (2013). A multi-objective robust stochastic programming model for disaster relief logistics under uncertainty. *OR Spectrum*, 35(4):905–933.

Chang, M.-S., Tseng, Y.-L., e Chen, J.-W. (2007). A scenario planning approach for the flood emergency logistics preparation problem under uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43(6):737 – 754.

Corradini, L. M. e Alem, D. (2014). O Problema de localização-distribuição no megadesastre da região Serrana no Rio de Janeiro. *Gestão & Produção*, 21(4):865–881.

Dourado, F., Arraes, T. C., e Silva, M. F. e. (2012). O megadesastre da região Serrana do Rio de Janeiro – as causas do evento, os mecanismos dos movimentos de massa e a distribuição espacial dos investimentos de reconstrução no pós-desastre. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, 35:43 – 54.

Döyen, A., Aras, N., e Barbarosoğlu, G. (2011). A two-echelon stochastic facility location model for humanitarian relief logistics. *Optimization Letters*, 6(6):1123–1145.

IBGE (2009). Pesquisa nacional por amostra de domicílios síntese de indicadores.

ICRC (2009). Emergency items catalogue. Accessed on 26/11/2014.

Li, L., Jin, M., e Zhang, L. (2011). Sheltering network planning and management with a case in the Gulf Coast region. *International Journal of Production Economics*, 131(2):431–440.

Mete, H. O. e Zabinsky, Z. B. (2010). Stochastic optimization of medical supply location and distribution in disaster management. *International Journal of Production Economics*, 126(1):76–84.

Moreno, A., Alem, D., e Ferreira, D. (2015). Facility routing models by MIP heuristics in emergency logistics. *Submetido para revisão*.

Noyan, N. (2012). Risk-averse two-stage stochastic programming with an application to disaster management. *Computers & Operations Research*, 39(3):541–559.

Rawls, C. G. e Turnquist, M. a. (2010). Pre-positioning of emergency supplies for disaster response. *Transportation Research Part B: Methodological*, 44(4):521–534.

Rawls, C. G. e Turnquist, M. a. (2012). Pre-positioning and dynamic delivery planning for short-term response following a natural disaster. *Socio-Economic Planning Sciences*, 46(1):46–54.

Rio De Janeiro (2011). Resolução Nº 09/2011 da Assembléia Legislativa.

Salmerón, J. e Apte, A. (2010). Stochastic optimization for natural disaster asset prepositioning. *Production and Operations Management*, 19(5):561–574.

The Sphere Project (2011). *Humanitarian charter and minimum standards in humanitarian response*. Belmont Press Ltd, Northampton.