

MODELO DE DINÂMICA DE SISTEMAS PARA EMISSÃO DE ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS - UM ESTUDO DE CASO

Glaysse Ferreira Perroni Silva¹
Mischel Carmen Neyra Belderrain²
João Pedro Pinheiro Malere³

RESUMO: Dentre as medidas de preparação que possibilitem à população responder rapidamente e de forma eficaz a situações de desastres, está a implementação de sistemas de emissão de alertas. Assim, este trabalho tem por objetivo representar a complexidade do processo de emissão de alertas de desastres naturais e verificar se e de que forma fatores comportamentais e subjacentes à tomada de decisão podem impactar a eficácia do alerta. Para apoiar este estudo, será desenvolvido um modelo de Dinâmica de Sistemas para um sistema real de emissão de alertas, a partir de um estudo de caso aplicado ao Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), no Brasil. Como resultado, espera-se demonstrar aos decisores e gestores, por meio de uma visão sistêmica do processo, como as relações de causa e efeito entre elementos importantes da tomada de decisão podem afetar o desempenho dos alertas ao longo do tempo, bem como subsidiar a adoção de ações estratégicas que visem corrigir eventuais falhas no sistema, reduzindo, desta forma, a ocorrência de falsos alertas, eventos não alertados e alertas emitidos com atrasos. Além disto, o modelo desenvolvido poderá resultar num mecanismo de aprendizagem organizacional e de ensaio para o planejamento estratégico.

Palavras chave: Dinâmica de Sistemas. Sistemas de Emissão de Alertas. Desastres Naturais.

¹ Analista em Ciência e Tecnologia no Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, ITA, Brasil. E-mail: glaysse19@yahoo.com.br

² Professora na Divisão de Engenharia Mecânica-Aeronáutica, Departamento de Organização. ITA, Brasil. E-mail: carmen@ita.br

³ Engenheiro de desenvolvimento da EMBRAER, Brasil. E-mail: jpmalere@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

O ambiente em que o homem vive está permanentemente exposto a uma diversidade de situações de risco, geradas por eventos extremos de ordem natural, tais como inundações, terremotos, furacões, secas e deslizamentos. Perigos naturais, como tempestades, erupções vulcânicas ou abalos sísmicos, não necessariamente significam um desastre. Este ocorre somente se uma comunidade está exposta ao perigo natural e não pode lidar com seus efeitos.

Assim, desastre é um evento repentino e calamitoso que rompe seriamente o funcionamento de uma comunidade e que causa perdas humanas, materiais, econômicas ou ambientais que excedem a capacidade desta comunidade para lidar com os seus efeitos usando os seus próprios recursos (IFRC, 2012). Quando o evento intenso é de ordem natural, e causa danos materiais e humanos, têm-se os chamados desastres naturais (KOBYAMA et al., 2006).

O Escritório das Nações Unidas para a Redução do Risco de Desastres (*United Nations Office for Disaster Risk Reduction - UNISDR*) divulgou, em 2016, relatório em que aponta os fenômenos naturais como a principal causa de deslocamento interno global. Em 2015, 19,2 milhões de pessoas se viram obrigadas a abandonar seus lares por conta de desastres naturais⁴.

Soler et al. (2013) afirmam que, no Brasil, os desastres naturais estão relacionados principalmente a condições hidro meteorológicas extremas, as quais, combinadas com a vulnerabilidade da ocupação humana em áreas urbanas, resultam em adversidades. De fato, no período de 2000 a 2015, foram registradas no Brasil 72 ocorrências de tempestades, enchentes e deslizamentos de encostas, em que aproximadamente 7,5 milhões de pessoas foram afetadas, sendo que destas 2.642 morreram e outras 1.816 ficaram feridas, segundo o Banco de Dados Internacional de Desastres (EM-DAT, *The International Disaster Database*)⁵.

Dada a relevância do assunto nos planos político e social, em março de 2015, durante uma conferência mundial realizada em Sendai, no Japão, foi firmado entre os Estados-

⁴Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/phenomenos-naturais-deslocaram-192-milhoes-de-pessoas-em-2015-alerta-escritorio-da-onu/>>

⁵<<http://www.emdat.be/>>. Consulta realizada em 04 de jun. 2016.

Membros das Nações Unidas o Marco de Sendai para a Redução do Risco de Desastres 2015-2030 (UNISDR, 2015). O acordo busca construir resiliência para as comunidades afetadas por eventos climáticos extremos e para isto estabelece metas para a redução da mortalidade relacionada a desastres. Este documento afirma que a fim de reduzir o risco de desastre, existe uma necessidade de se preparar para os desafios futuros, concentrando esforços em monitoramento de risco e melhorando sistemas de alerta precoce centrados nas pessoas.

No plano acadêmico, existe um interesse crescente em desenvolver pesquisas relacionadas a desastres, haja vista o grande número de publicações na área, sobretudo publicações que se baseiam nas técnicas de Pesquisa Operacional (PO) para resolver problemas em gestão de desastres (ALTAY & GREEN, 2006; GALINDO & BATA, 2013; GUPTA et al., 2016; HOYOS et al., 2015; LETTIERI et al., 2009). Isto porque, segundo Altay e Green (2006), problemas relacionados a desastres são de natureza complexa, tornando-se, pois, adequados para a aplicação dos métodos de Pesquisa Operacional.

Altay e Green (2006) e Galindo e Batta (2013), após concluírem uma ampla revisão bibliográfica sobre a aplicação de diferentes métodos e abordagens de PO a desastres, por meio da análise de um total de 264 artigos, publicados no período de 1980 a 2010, apontaram a Dinâmica de Sistemas, uma abordagem de modelagem e simulação que permite entender o comportamento dinâmico de sistemas complexos ao longo do tempo, como uma metodologia apropriada para o estudo de desastres, apesar de sua baixa participação nos artigos analisados. Outras abordagens de simulação que também são aplicadas a situações de desastres são as orientadas por eventos discretos, como o trabalho de Lima et al. (2016), e as baseadas em multi-agentes, como o trabalho de Manzoor et al. (2014).

A Tabela 1 exemplifica alguns trabalhos acadêmicos na área de desastres, no Brasil e no exterior, baseados na modelagem por Dinâmica de Sistemas:

Tabela 1 - Aplicações de Dinâmica de Sistemas em desastres

NO BRASIL	
Autor	Descrição
Costa et al. (2016)	O objetivo do artigo é investigar o papel da coordenação nas atividades logísticas em operações humanitárias, no que diz respeito ao uso dos recursos, empregando a Dinâmica de Sistemas como ferramenta de simulação e análise das interações dinâmicas que ocorrem entre os atores na fase de resposta a um desastre natural.

Buzogany (2017)	O objetivo do trabalho é compreender, apoiando-se em Dinâmica de Sistemas, o fenômeno da convergência de materiais numa situação de desastre e como isto impacta os processos de logística humanitária, no que diz respeito ao transporte, processamento e distribuição de itens no auxílio às vítimas. O modelo tem como cenário base o caso das inundações em São Luiz do Paraitinga/SP/Brasil em 2010.
-----------------	---

NO EXTERIOR

Autor	Descrição
Gonçalves (2008)	O objetivo do artigo é demonstrar como a Dinâmica de Sistemas pode ser usada para modelar diferentes fenômenos no campo da ajuda humanitária e ajudar os gestores a definirem intervenções políticas para melhorar o desempenho destas organizações.
Besiou et al. (2011)	O objetivo do artigo é estudar e simular um subsistema bem definido de gestão de frota de veículos em Organizações Humanitárias Internacionais, a fim de apoiar a tomada de decisão no campo da ajuda humanitária, bem como demonstrar a capacidade da Dinâmica de Sistemas para capturar a complexidade dinâmica de sistemas desta natureza.
Gonçalves (2011)	O objetivo do artigo é desenvolver um modelo de simulação que quantifique o <i>tradeoff</i> que existe entre alocar recursos para fornecer assistência a vítimas de um desastre e construir capacidade em organizações humanitárias (alocação de esforços, medido em homem/hora de trabalho <i>versus</i> aumento de capacidade própria – <i>capacity building</i>).
Cuervo et al. (2010)	O objetivo do artigo é investigar, por meio do uso da Dinâmica de Sistemas, o comportamento da cadeia de suprimentos humanitária com relação aos diferentes atores e à mobilização de recursos para fornecer assistência alimentar (comida e água) à população afetada por um desastre, considerando o caso da Cruz Vermelha Colombiana.
Peng et al. (2014)	O objetivo do artigo é apresentar um modelo baseado em dinâmica de sistemas para simular o comportamento da cadeia de suprimentos de alívio de desastres numa situação após abalo sísmico, considerando as incertezas causadas pela perda de capacidade do sistema de rodovias e pelo atraso na chegada de informações no centro de gerenciamento de desastres.
Diedrichs et al. (2016)	O objetivo do artigo é estudar os papéis da comunicação e da coordenação logística entre atores em uma operação de emergência pós desastre, e medir seu impacto monetário e no número de vidas salvas, numa tentativa original de quantificá-los. O modelo matemático de Dinâmica de Sistemas criado mede o desempenho da resposta a desastres, num cenário sujeito a restrições variáveis nas redes físicas (geográficas e de transportes) e de comunicação.
Voyer et al. (2015)	O objetivo do artigo é compreender a dinâmica dos processos sistêmicos que se aplicam à logística da cadeia de suprimentos de ajuda humanitária, por meio de um modelo em Dinâmica de Sistemas que simule as várias políticas que podem ser adotadas para lidar com as questões problemáticas que podem surgir durante a resposta a um desastre (infraestruturas deficientes, recursos limitados, doações não solicitadas, dentre outros).

Fonte: Elaborado pelos autores.

Embora a revisão bibliográfica levantada não seja exaustiva, pode-se inferir a partir da Tabela 1 que ainda é reduzido o número de publicações no Brasil de trabalhos em gestão de

desastres que se apóiem na metodologia de Dinâmica de Sistemas. E que, tanto no Brasil, como no exterior, há uma predominância de trabalhos acadêmicos nas áreas de logística e/ou ajuda humanitárias, sendo que até o momento, não foi verificado nenhum trabalho com esta abordagem para a emissão de alertas de desastres.

Diante do exposto, este artigo tem por objetivo representar a complexidade do processo de emissão de alertas de desastres naturais por meio de modelagem e verificar se e de que forma fatores comportamentais e subjacentes à tomada de decisão podem impactar a eficácia do alerta. Com isto, espera-se demonstrar aos decisores e gestores, por meio de uma visão sistêmica do processo, como as relações de causa e efeito entre elementos importantes da tomada de decisão podem afetar o desempenho dos alertas ao longo do tempo, bem como subsidiar a adoção de ações estratégicas que visem corrigir eventuais falhas no sistema, reduzindo, desta forma, a ocorrência de falsos alertas, eventos não alertados e alertas emitidos com atrasos. Além disto, o modelo desenvolvido poderá resultar num mecanismo de aprendizagem organizacional e de ensaio para o planejamento estratégico.

Para apoiar este estudo, será desenvolvido um modelo de Dinâmica de Sistemas para um sistema real de emissão de alertas de desastres naturais, a partir de um estudo de caso aplicado a um órgão do poder público federal brasileiro, a saber, o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN). As motivações para a escolha do CEMADEN como objeto de pesquisa são o seu papel no Plano Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais do Governo Federal e sua atuação em nível nacional.

A contribuição do estudo proposto se justifica pelo forte impacto social do tema, em virtude da magnitude e natureza das implicações dos desastres sobre uma comunidade, e, portanto, um sistema de emissão de alertas de desastres naturais mais eficaz significa mais vidas salvas. Outra contribuição é o seu caráter aparentemente inédito, ao reunir num mesmo trabalho dois assuntos de pesquisa ainda não explorados em conjunto: a emissão de alertas de desastres e a Dinâmica de Sistemas.

Na seqüência, parte-se para a organização geral do trabalho, o qual é composto por introdução, fundamentos teóricos relacionados à Gestão de Operações de Desastres e Sistemas de Emissão de Alertas, e à Dinâmica de Sistemas, apresentação do estudo de caso e descrição, simulação e análise do modelo. Por fim, têm-se as considerações finais e referências bibliográficas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica aborda aspectos importantes para o entendimento do processo de emissão de alertas, dentro da área de conhecimento denominada Gestão de Operações de Desastres, e da construção do modelo de Dinâmica de Sistemas que será apresentado.

2.1 Gestão de Operações de Desastres e Sistemas de Emissão de Alertas

Desastre é um evento não rotineiro que excede a capacidade da área afetada para responder a ele de forma a salvar vidas, preservar propriedades e manter a estabilidade social, ecológica, econômica e política da região afetada (PEARCE, 2000). Pode ser resultado de um fenômeno ou evento adverso, de ordem natural (furacão, tornado ou terremoto), causado pelo homem (ataque terrorista ou acidente industrial), ou decorrente da relação entre ambos, sobre uma comunidade vulnerável.

Freqüentemente, o conceito de desastre surge associado ao de catástrofe. Holguín-Veras et al. (2012) definem catástrofe como um evento adverso que gera efeitos generalizados e impactantes, em que a capacidade da sociedade afetada para responder é severamente comprometida.

Apesar da semelhança, as catástrofes possuem importantes características que as diferenciam dos desastres: numa situação de catástrofe, grande parte ou toda a estrutura construída da comunidade é fortemente impactada, inclusive, instalações e bases operacionais da maioria das organizações de emergência; funções cotidianas são interrompidas, resultando em paralisações ou escassez extensiva de serviços de luz, água e telefone, meios de comunicação e de transporte; e, por terem um caráter regional, comunidades próximas, além de não poderem fornecer ajuda, ainda se tornam fontes competidoras de bens, suprimentos, pessoal e comunicação (QUARANTELLI, 2006).

Por outro lado, numa situação de desastre, apesar de perdas significativas e impacto direto de algumas instalações, a população e as autoridades locais podem lidar com as conseqüências, sem a necessidade, num primeiro momento, de ajuda externa, uma vez que alguns recursos permanecem. Pessoas afetadas conseguem buscar abrigo junto a parentes e amigos próximos e muitas atividades sociais mantêm o seu funcionamento normal.

Considerando que o objeto de análise do artigo é um órgão que realiza o monitoramento e a emissão de alertas de desastres naturais, atuando na fase de preparação anterior à ocorrência do evento perigoso, catástrofes não serão tratadas neste trabalho. Isto porque, embora o conhecimento do impacto e das características do evento alertado seja importante para o processo decisório de emissão de alertas, os autores acreditam que a diferença entre desastre e catástrofe ainda é mais relevante para as fases de resposta e de recuperação.

Neste contexto, a Gestão de Operações de Desastres destaca-se como o conjunto de atividades que são desenvolvidas antes, durante e depois de um desastre com o objetivo de prevenir mortes, reduzir seu impacto na economia e possibilitar que a comunidade afetada retorne ao seu estado de normalidade (ALTAY E GREEN, 2006). Lettieri et al. (2009) ampliam este conceito ao definir a gestão de desastres como o corpo de decisões políticas e administrativas, atividades operacionais, atores e tecnologias que pertencem aos vários estágios de um desastre em todos os níveis.

O processo de gestão de desastres é dividido em quatro fases interconectadas, mutuamente inclusivas e multidimensionais (NEAL, 1997), com ações que se sobrepõem (NETO, 2000). São elas: mitigação e preparação, atreladas à gestão do risco, e resposta e recuperação, ligadas à gestão da crise. Mitigação é a aplicação de medidas que objetivam minimizar o grau de risco ao perigo. Preparação envolve atividades de planejamento para melhorar a capacidade de resposta operacional durante a ocorrência de um desastre. Resposta é o emprego de procedimentos de emergência para gerir e controlar os vários efeitos de um desastre em progresso. Por fim, recuperação envolve as ações emergenciais tomadas no curto ou longo prazo depois do impacto imediato do desastre, objetivando trazer a área afetada de volta à sua condição normal.

Dentre as medidas de preparação que possibilitem a organizações, comunidades e indivíduos responderem rapidamente e de forma eficaz a situações de desastres, está a implementação de sistemas de emissão de alertas (CARTER, 2008; KHAN et al., 2008). Estes podem ser definidos como um sistema integrado de monitoramento, previsão e avaliação de riscos de desastres, abrangendo também atividades e processos de comunicação e prevenção, que permite que aqueles expostos a eventos adversos tomem medidas em tempo suficiente e de forma antecipada para reduzir os riscos de desastres (UNISDR, 2017). Esta definição, adotada internacionalmente, está bem alinhada com o modelo de quatro elementos

das Nações Unidas para sistemas de alertas eficazes (UNISDR, 2006) (Figura 1) e com a abordagem preventiva centrada nas pessoas defendida pelo Marco de Sendai (UNISDR, 2015).



Figura 1 - O modelo de quatro elementos para sistemas de emissão de alertas eficazes
Fonte: Adaptado de Alhmoudi e Aziz (2016).

Um sistema de emissão de alerta eficaz, centrado nas pessoas, compreende quatro elementos-chave inter-relacionados, conforme ilustrado na Figura 1: (1) conhecimento do risco; (2) detecção, monitoramento, análise e previsão dos perigos e suas possíveis conseqüências; (3) disseminação e comunicação, por uma fonte oficial, de alertas autorizados, oportunos, precisos e acionáveis, e informações associadas sobre a probabilidade e impacto do desastre; e (4) preparação em todos os níveis para resposta aos alertas recebidos (UNISDR, 2006). O alinhamento eficaz destes quatro elementos pode mitigar significativamente o impacto dos desastres naturais (ALHMOUDI E AZIZ, 2016), uma vez que busca capacitar indivíduos e comunidades sob a ameaça de um perigo a agirem tempestivamente e de maneira apropriada a fim de reduzir a possibilidade de prejuízos pessoais, perdas de vida e danos às propriedades e ao meio ambiente (WILTSHIRE, 2006).

Sistemas de emissão de alertas são, portanto, uma ferramenta importante para preparar a população para um possível desastre, sobretudo a que vive em áreas de risco, uma vez que podem aumentar a sua capacidade de resposta (SOLER et al., 2013). São meios essenciais para a atuação das Defesas Civas e são comumente reconhecidos como ferramentas vitais para a prevenção do risco (ALFIERI et al., 2012).

2.2 Dinâmica de Sistemas

A Dinâmica de Sistemas é uma abordagem que permite entender como partes de um sistema complexo (negócio, indústria ou sociedade) se comportam e interagem entre si para criar a dinâmica ao longo do tempo. Foi criada em meados de 1950 pelo professor pesquisador Jay Wright Forrester da *Sloan School* no MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) e tem como marco inicial a publicação em 1961 do livro *Industrial Dynamics*, a primeira obra de autoria de Forrester. No início, a Dinâmica de Sistemas era aplicada quase que exclusivamente a problemas gerenciais, mas logo o seu uso começou a ser disseminado para outras áreas do conhecimento, tais como estudos sociais, biologia, ecologia, educação etc.

De acordo com Sterman (2000), a dinâmica de sistemas é um método para aprimorar o aprendizado no que se refere a sistemas complexos, sendo interdisciplinar e fundamentada nas teorias de dinâmica não linear e controle desenvolvidas na matemática, física e engenharia. Devido ao fato deste método ser aplicável ao comportamento humano assim como aos sistemas técnicos, a dinâmica de sistemas pode ser utilizada em economia e outras ciências sociais. Seu foco está em entender como os processos físicos, os fluxos de informação e as políticas gerenciais interagem de forma a criar a dinâmica das variáveis de interesse, definindo, assim, a estrutura do sistema (VLACHOS et al., 2007).

De forma sucinta, o processo de modelagem por meio de dinâmica de sistemas segue três etapas (RODRIGUEZ-ULLOA & PAUCAR-CACERES, 2005):

- i. Entendimento da situação problemática: nesta etapa é realizada uma intervenção, em que um problema e o comportamento de um sistema são analisados;
- ii. Construção de um modelo: neste estágio a primeira definição é a do nível de resolução que se deseja adotar na situação problemática. A construção dos modelos se utiliza de conceitos da dinâmica de sistemas e podem ser implementados em uma das muitas ferramentas computacionais disponíveis e;
- iii. Simulação e utilização dos resultados: uma vez com o modelo construído, diferentes cenários podem ser analisados e decisões podem se basear nos resultados obtidos.

Gonçalves (2008), ao analisar o potencial da dinâmica de sistemas para a ajuda humanitária em situações de desastres, reforça a necessidade de entendermos a diferença

entre complexidade de detalhes e complexidade dinâmica (SENGE, 1990; STERMAN, 2000). A complexidade de detalhes surge quando, antes de uma tomada de decisão, um grande número de componentes ou possíveis combinações em um sistema deve ser considerado. Já a complexidade dinâmica surge a partir de interações de causa e efeito entre agentes de um sistema ao longo do tempo.

Em situações dinamicamente complexas, as interações entre os elementos do sistema não estão proximamente conectadas em suas relações de causa e tempo. E, uma vez que os tomadores de decisão tendem a tomar decisões com base em modelos mentais estáticos e reducionistas, baseados em experiência e intuição, ao invés de modelos dinâmicos e abrangentes, o que se percebe é uma inaptidão para entender quais fatores são importantes e como eles interagem de forma a gerar o comportamento não antecipado e ambíguo (STERMAN, 2000; GONÇALVES, 2008). No entanto, estes modelos simples não são suficientes para capturar todo o sistema. Além disto, intuição e experiência humanas podem ser facilmente afetadas por fatores irracionais tais como emoções e pressões de tempo (BESIOU et al., 2011).

Gonçalves (2008) afirma que a maioria das pessoas tem a tendência em manter uma perspectiva do mundo orientada ao evento: ao se observar um evento (reação), tende-se a buscar por sua causa (ação) imediata. Esta busca é freqüentemente orientada pelas experiências das pessoas com sistemas simples, em que causa e sintomas de um problema estão próximos no tempo e no espaço. Além disto, a causa geralmente é tida como exógena ao sistema, ou seja, está fora do controle das pessoas impactadas pelo efeito do problema.

Para capturar a complexidade dinâmica de sistemas, duas convenções robustas são comumente usadas: os diagramas de *loop* causal, os quais capturam a estrutura do sistema, com os seus ciclos de realimentação, e os diagramas de estoque e fluxo, os quais podem ser facilmente traduzidos para um sistema de equações diferenciais e, então, resolvidos por meio de simulação (VLACHOS et al., 2007).

Diagramas de *loop* causal são modelos qualitativos que utilizam variáveis conectadas por setas, denotando as influências causais entre elas, a fim de servirem como rascunhos preliminares de hipóteses causais e permitirem a simplificação da representação de um modelo (VLACHOS et al., 2007). São relativamente fáceis de entender, uma vez que detalhes operacionais não são incluídos (GILLESPIE et al., 2004). No início eram utilizados no modo

expositivo, como um meio para resumir e explicar o comportamento de modelos de simulação já completos. Anos depois, passaram a ser usados no início do estudo, previamente à análise de simulação, como uma ferramenta de conceitualização do problema (LANE, 2008).

Neste tipo de diagrama, importantes *loops* de *feedback* ou ciclos de realimentação são identificados: os chamados *loops* de reforço ou ciclos positivos (geralmente representados pela letra R) e os *loops* de balanceamento ou ciclos negativos (geralmente representados pela letra B). O *loop* de reforço tende a reforçar ou amplificar qualquer comportamento do sistema, seja ele de crescimento ou de declínio, gerando um círculo vicioso. Já o *loop* de balanceamento neutraliza e se opõe a mudanças, busca estabilidade e equilíbrio para o sistema, gerando um processo auto-regulador ou, em outras palavras, um círculo virtuoso (STERMAN, 2000).

A Figura 2 mostra um típico exemplo de diagrama de *loop* causal, o qual ilustra a dinâmica do crescimento populacional (nascimentos e mortes).

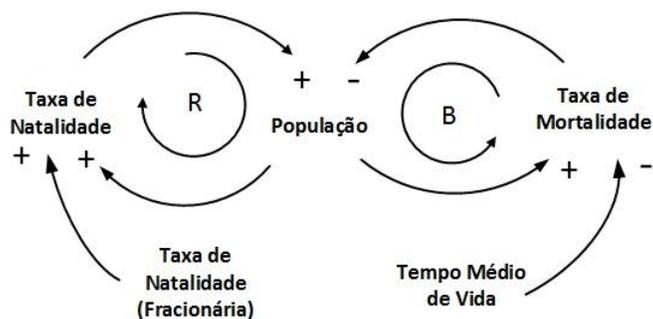


Figura 2 – Um diagrama de *loop* causal
Fonte: Adaptado de Sterman (2000, p. 138).

Por sua vez, os diagramas de estoque e fluxo são mais detalhados do que os diagramas de *loop* causal, seu foco está sobre entidades, recursos e atributos mensuráveis e são um passo vital para a simulação (LANE, 2008). São modelos matemáticos que capturam acumulações resultantes da diferença entre os fluxos de entrada e de saída, inércia e memória do sistema (STERMAN, 2000).

Segundo Gonçalves (2008), a inabilidade das pessoas para preverem como estas acumulações ocorrem ao longo do tempo (semelhante a um exercício intuitivo de integração) torna o comportamento de sistemas complexos altamente contra intuitivo. A principal

vantagem da modelagem de simulação é que ela permite aos gestores avaliarem as conseqüências de interações entre variáveis e experimentar os efeitos colaterais de suas decisões no longo prazo, bem como explorarem novas estratégias (STERMAN, 2000).

Os estoques são acumulações. No diagrama de estoque e fluxo, eles são representados graficamente por retângulos, conforme ilustra a Figura 4, caracterizando o estado do sistema e gerando a informação sobre a qual decisões e ações são baseadas (STERMAN, 2000). Um exemplo de estoque é o número de pessoas empregadas em uma empresa. Os estoques são alterados por entradas (*inflows*) e saídas (*outflows*), as quais são representadas na Figura 3 por tubos que chegam e saem do estoque. Válvulas controlam estes fluxos. As nuvens, por sua vez, representam as fontes e os sumidouros dos fluxos.



Figura 3 – Estrutura geral de um diagrama de estoque e fluxo
Fonte: Adaptado de Sterman (2000, p. 193)

Atualmente, existem programas computacionais de alto nível para apoiar a análise de modelos em Dinâmica de Sistemas (tais como *Vensim*®, *Stella*® e *i-think*®, por exemplo). Isto possibilita um entendimento de mais alto nível da dinâmica e permite ao modelador “enxergar” a situação de uma forma mais concreta por meio de simulações (GILLESPIE et al., 2004).

3. ESTUDO DE CASO E DESCRIÇÃO DO MODELO

Nesta parte do artigo é descrita a metodologia de estudo de caso adotada e apresentado e caracterizado o processo de modelagem do sistema, com algumas simulações em *software* computacional para explorar o comportamento do modelo criado.

3.1 O Sistema de Emissão de Alertas de Desastres Naturais: o caso do CEMADEN

O Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN - é um órgão federal de abrangência nacional, vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. Foi criado em 2011, pelo Decreto Presidencial nº 7.513, de 1º de

julho de 2011, como parte da Estratégia Nacional para a gestão de desastres naturais no Brasil, e em resposta imediata ao pior desastre já registrado no país em Janeiro de 2011, em que uma série de deslizamentos e enchentes causou a morte de cerca de 900 pessoas na região serrana do estado do Rio de Janeiro.

O CEMADEN possui uma equipe multidisciplinar composta por geólogos, hidrólogos, meteorologistas e especialistas em desastres naturais⁶ e atua de forma integrada ao Centro Nacional de Gerenciamento de Risco e Desastres (Cenad), órgão vinculado à Secretaria Nacional de Defesa Civil. Nesta estrutura, o CEMADEN faz o estudo e o acompanhamento sistemático da rede de dados meteorológicos e hidrológicos espalhada pelo país e, baseado em análises de risco geo-hidrológico de possíveis ocorrências de desastres nas áreas mapeadas, emite os alertas e os repassa de forma imediata ao Cenad. Este encaminha os alertas e aciona os órgãos de Defesa Civil nos Estados e Municípios, além de oferecer apoio às ações de recuperação a desastres.

Hoje, o CEMADEN emite alertas para riscos de inundação, enxurrada e movimento de massa (também denominado de deslizamento ou escorregamento), os perigos naturais que mais causam vítimas no país (CEPED UFSC, 2013).

O alerta é o instrumento que indica que a situação de risco de desastre é previsível em curto prazo. O CEMADEN classifica o alerta em três níveis: moderado, alto ou muito alto. Estes níveis são o resultado da combinação das variáveis “possibilidade de ocorrência” e “impacto potencial”, dispostas numa matriz de risco. Esta é a base conceitual mínima para a tomada de decisão acerca da emissão de um alerta

Por possibilidade de ocorrência entende-se o resultado final da análise técnica pelo hidrólogo ou pelo geólogo do evento extremo, considerando-se variáveis tais como meio físico (vegetação, solo e terreno), suscetibilidade e vulnerabilidade, condição meteorológica vigente, acumulado de precipitação, chuva prevista e elevação dos níveis hidrométricos. Desta forma, a possibilidade de ocorrência pode ser caracterizada em três níveis, os quais variam de moderado a muito alto, de acordo com a perspectiva de agravamento do cenário vigente.

⁶Os especialistas em desastres naturais atuam de forma multidisciplinar na avaliação dos impactos sociais e econômicos de um evento extremo sobre uma comunidade.

Por impacto potencial entende-se a gravidade do desastre em termos de danos materiais (moradias, afetação dos serviços públicos, perdas de safra e/ou gado, danos às estruturas como estradas, pontes, etc.) e/ou humanos (mortes e pessoas feridas ou desaparecidas) avaliados pelo especialista em desastres naturais. Assim como a possibilidade de ocorrência, o impacto potencial também pode ser associado aos níveis moderado, alto ou muito alto, a depender do potencial do evento em gerar vítimas e danos.

Enquanto determinada condição que gera o cenário de risco permanece inalterada, os alertas vigentes devem ser analisados continuamente pela equipe em relação aos parâmetros hidrológicos e meteorológicos a partir dos dados de precipitação junto ao operador de meteorologia. A análise contínua do cenário atual e do cenário seqüencial implica em duas possibilidades de ação: a atualização do nível do alerta ou o cessar do alerta. A atualização do alerta será realizada com o aumento ou redução do nível do mesmo nos casos em que houver previsão de mudança da situação de risco. A cessação do alerta ocorrerá se a situação meteorológica que propiciava a ocorrência do risco tender à normalização do cenário local.

3.2 A Hipótese Dinâmica – Contextualização e Propósito do Modelo

A partir de observações de campo e sessões de *brainstorming* realizadas com a equipe da sala de monitoramento do CEMADEN, observou-se que o processo decisório referente à emissão de alertas de desastres naturais é altamente empírico e marcado pela subjetividade na análise do risco pelos especialistas. Também se verificou que a ausência de um procedimento comum para apoiar a tomada de decisão não permite aos decisores terem uma visão sistêmica do processo e tampouco das inter-relações entre as variáveis que causam o comportamento responsável pelo maior ou menor grau de eficácia dos alertas.

Como os cenários de risco mudam constantemente, pode-se afirmar que o processo de emissão de alertas é dinâmico no tempo. A presença de vários decisores, alguns com perspectivas conflitantes, bem como a existência de intangíveis importantes e incertezas chave, caracterizam a complexidade do sistema.

A eficácia do alerta é avaliada segundo o seu nível de precisão (adequação entre o nível do alerta e a intensidade do desastre, medida em escalas) (BARNES et al., 2007) e é medida segundo a ocorrência de falsos alertas (o desastre não ocorre, mas o evento é alertado),

eventos não alertados (o desastre ocorre, mas o alerta não é enviado) e alertas emitidos com atrasos (o alerta é enviado sem tempo hábil para a ação).

Segundo Durage et al. (2016), repetidas ocorrências de falsos alertas podem desencadear uma série de problemas de ordem conjuntural: do ponto de vista da comunidade sob risco, afetam a confiança do público no sistema de alerta e a resposta imediata a futuros alertas, podendo causar inclusive a chamada síndrome *Cry Wolf* (pessoas tendem a se tornar menos propensas a evacuar após alertas falsos excessivamente frequentes, uma vez que os custos físicos e psicológicos cumulativos necessários para a evacuação são percebidos como maiores sob tais situações) (UCHIDA, 2012); do ponto de vista dos previsores, podem causar comportamentos não desejáveis, como não emitir o alerta quando deveria ou atrasar a emissão do alerta à espera de mais informações.

Por outro lado, as conseqüências potenciais de um evento não alertado podem ser maiores do que os de um falso alerta, uma vez que podem causar um grande número de mortos e feridos. Assim, o previsor tem que se esforçar para manter o número de eventos perdidos extremamente baixo ou idealmente igual a zero, o que o leva a emitir alertas mesmo quando existe incerteza sobre a ocorrência do desastre (DURAGE et al., 2016).

Por ainda estar em fase de experimentação, o modelo de Dinâmica de Sistemas apresentado no artigo dedicar-se-á a estudar a eficácia do sistema de emissão de alertas apenas a partir dos falsos alertas. Seu propósito, portanto, será verificar se e de que forma fatores comportamentais e subjacentes à tomada de decisão podem impactar a eficácia do alerta, aumentando ou reduzindo o número de situações em que o evento é alertado, mas o desastre não ocorre.

3.3 O Modelo

Após a apreciação e observação da situação problemática, foi construído um Diagrama de *Loop* Causal (DLC) para apoiar a conceitualização do problema e a subsequente formulação do modelo matemático. Por restrições de espaço, o DLC não será mostrado. Este diagrama auxilia os donos do problema a representarem seus modelos mentais na forma de relações de influências e realimentações (LANE, 2008).

A Tabela 2 relaciona e descreve os ciclos de realimentação identificados no DLC e replicados posteriormente no Diagrama de Estoque e Fluxo.

Tabela 2 – Ciclos de Realimentação

Ciclo	Componentes	Explicação
B1 Salvar Vidas	Risco – Alertas Emitidos – Famílias Evacuadas – Pessoas Suscetíveis – Impacto em Potencial –	À medida que o risco cresce, alertas são emitidos e famílias são evacuadas, a fim de reduzir o número de pessoas que podem ser afetadas pelo impacto do desastre. Isto, por consequência, reduz o risco ⁷ .
B2 Melhorias	Falsos Alertas – Desempenho do Sistema – Políticas de Melhoria – Qualidade do Alerta	À medida que aumenta o número de falsos alertas, o desempenho do sistema decresce. Isto incentiva a adoção de políticas de melhoria, aumentando, desta forma, a qualidade do alerta e reduzindo o número de falsos alertas.
R Efeito Colateral	Falsos Alertas - Confiança da Comunidade nos Alertas – Resistência para Evacuar – Perdas e Danos – Pressão para Emitir Mais Alertas – Qualidade do Alerta –	À medida que o número de falsos alertas cresce, a confiabilidade da população frente aos alertas emitidos pelo CEMADEN cai, o que implica numa maior resistência na evacuação, podendo resultar em mais perdas e danos (mortos e feridos). Em resposta, o Centro adota a política de emitir mais alertas, mesmo em situações de grandes incertezas, impactando de forma negativa a qualidade dos alertas, o que significa mais falsos alertas.

Fonte: Elaborado pelos autores

Sobre a variável *Intensidade do Evento*, apesar de ser uma componente do risco, o sistema de emissão de alerta não exerce nenhuma influência sobre ela, pois a ameaça é regulada por variáveis ambientais incontroláveis, como chuva, vento, descargas atmosféricas etc. Portanto, não é possível construir qualquer ciclo de realimentação no modelo envolvendo esta variável.

O Diagrama de Estoque e Fluxo da Figura 4 é um modelo matemático de simulação que foi construído com o auxílio do *software* Vensim®⁸. O Vensim® é uma ferramenta de modelagem que permite desenvolver, simular e analisar modelos dinâmicos.

Como a maioria dos modelos, este é uma simplificação da realidade: não leva em consideração a natureza do alerta (geodinâmico e hidrológico) e seus diferentes níveis, e traça uma linha de fronteira que deixa de fora os aspectos ambientais da análise estritamente

⁷ Risco é o produto da ameaça (representada no modelo pela variável *Intensidade do Evento*) pela vulnerabilidade (representada no modelo pela variável *Impacto em Potencial*).

⁸ <http://vensim.com/>

técnica (chuva, clima, solo, vegetação etc), os quais são representados pela variável *Intensidade do Evento*, exógena ao modelo.

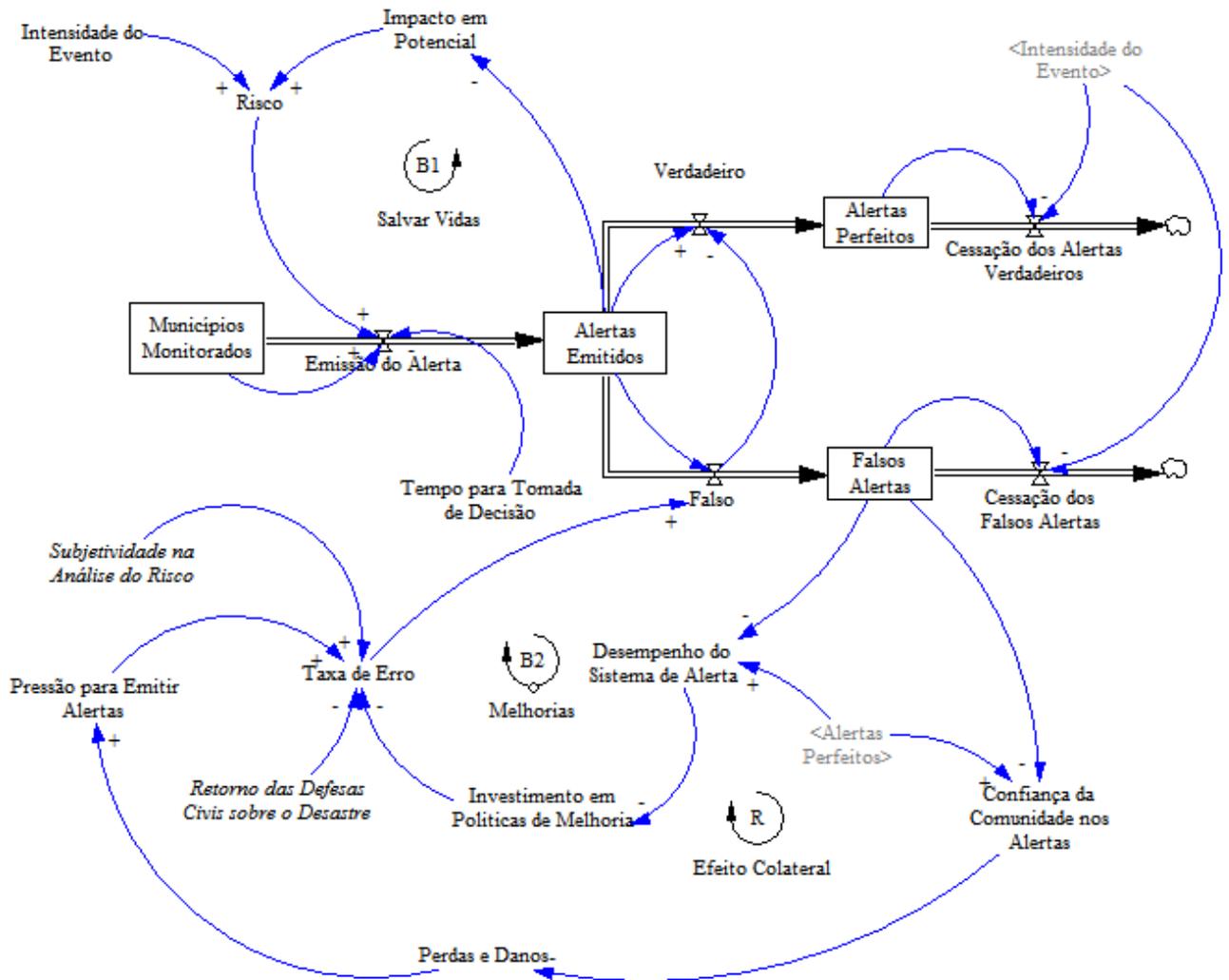


Figura 4 - Diagrama de Estoque e Fluxo
Fonte: Elaborado pelos autores.

Assim, dentro do seu propósito descrito na seção anterior, o modelo criado segue os limites descritos na Tabela 3, a qual lista as variáveis chaves endógenas e exógenas ao modelo, bem como as excluídas, conforme formato sugerido por Sterman (2000).

Tabela 3– Definição dos limites do modelo

Endógenas	Exógenas	Excluídas
Risco	Intensidade do Evento	Chuva
Municípios Monitorados	Tempo para Tomada de Decisão	Nível do Rio
Impacto em Potencial	Retorno das Defesas Cíveis sobre o Desastre	Presença de Vegetação
Alertas Emitidos	Subjetividade na Análise do Risco	Declividade do Terreno
Alertas Perfeitos		Qualidade do Solo
Falsos Alertas		Possibilidade de Ocorrência de Evento Geodinâmico
Pressão para Emitir Alertas		Possibilidade de Ocorrência de Evento Hidrológico
Taxa de Erro		Limiar de Deslizamento
Investimento em Políticas de Melhoria		Cota de Referência
Desempenho do Sistema de Alerta		Nível do Alerta
Confiança da Comunidade nos Alertas		Alertas Atrasados
Perdas e Danos		Eventos Não Alertados

Fonte: Elaborado pelos autores.

Na decisão acerca da emissão do alerta, dois aspectos são avaliados, segundo a matriz de risco descrita na seção 3.1: a gravidade do desastre em termos de danos materiais e humanos (variável *Impacto em Potencial*) e a intensidade do evento extremo, representando a possibilidade de ocorrência do desastre (variável *Intensidade do Evento*).

Os Falsos Alertas e os Alertas Perfeitos são representados por variáveis do tipo estoque, cujas acumulações variam no tempo de acordo com a influência de outras variáveis que impactam a qualidade do alerta, aumentando ou reduzindo o erro. Uma vez que os alertas são cessados quando a situação sendo monitorada não representa mais risco, como uma cessação da chuva na bacia de contribuição do rio, por exemplo, a variável *Intensidade do Evento* controla o fluxo de saída daqueles estoques.

O modelo evidencia os fatores comportamentais e subjacentes à tomada de decisão que podem exercer influência direta ou indireta sobre a variável *Taxa de Erro*, interferindo, desta forma, na eficácia do alerta. As variáveis exógenas que representam as hipóteses a serem testadas estão indicadas em itálico no modelo (*Subjetividade na Análise do Risco e Retorno das Defesas Cíveis sobre o Desastre*).

A Tabela 4, a seguir, mostra as equações utilizadas para as principais variáveis do modelo matemático.

Tabela 4 – Lista de equações das principais variáveis

Variável	Equação
Alertas Perfeitos	INTEG (Verdadeiro-Cessação dos Alertas Verdadeiros,2)
Confiança da Comunidade nos Alertas	(Alertas Perfeitos+Falsos Alertas)/FalsosAlertas
Desempenho do Sistema de Alertas	(Alertas Perfeitos+Falsos Alertas)/Falsos Alertas
Emissão do Alerta	((Municípios Monitorados/Tempo para Tomada de Decisão)*Risco)
Falsos Alertas	INTEG (Falso-Cessação dos Falsos Alertas,1)
ImpactoemPotencial	IF THEN ELSE((1/Alertas Emitidos) > 0.1 , 0.1 , (1/Alertas Emitidos))
Intensidade do Evento	0.3 - RAMP(0.3/(48-3) , 3 , 48)
Municípios Monitorados	INTEG (-Emissão do Alerta,100)
Risco	(Impacto em Potencial+Intensidade do Evento)/2
Taxa de Erro	IF THEN ELSE((Pressão para Emitir Alertas+Subjetividade na Análise do Risco) > (Retorno das Defesas Cíveis sobre o Desastre+Investimento em Políticas de Melhoria),((Pressão para Emitir Alertas +Subjetividade na Análise do Risco- Retorno das Defesas Cíveis sobre o Desastre - Investimento em Políticas de Melhoria)/4 + 0.1), 0.1)

Fonte: Elaborado pelos autores.

3.4 Simulação e Análise do Modelo

Após o modelo ser verificado e validado juntamente com os especialistas, o programa foi executado para diferentes cenários “o que-se” alternativos e os resultados foram então analisados.

Os parâmetros do modelo foram calibrados com base numa situação fictícia, mas que retrata a dinâmica do processo de emissão de alertas. O comportamento do modelo foi simulado para um horizonte de tempo de 48 horas, sob um conjunto de pressupostos de base hipotéticos. Para o cenário base, foi definida uma amostra inicial de 100 situações possíveis de emissão de alertas(estoque inicial da variável *Municípios Monitorados*), dentre os mais de novecentos municípios monitorados hoje pelo CEMADEN.

O processo decisório de emissão de alertas de desastres naturais é influenciado por fatores comportamentais de previsores e especialistas que afetam a eficácia do alerta. Dentre estes fatores, o mais evidente é a subjetividade na análise e na interpretação do risco, uma vez que diferentes equipes, com diferentes perfis decisores (algumas mais conservadoras, outras mais arrojadas), e com tempos de experiência e graus de conhecimento diferentes, tendem a ponderar os riscos de forma diversa entre si. Esta subjetividade, representada no modelo pela variável *Subjetividade na Análise do Risco*, também é condicionada pelo padrão de personalidade do previsor e pelo grau de importância que é atribuído à circunstância analisada, os quais podem interferir na percepção mais objetiva da realidade.

Buscando investigar como este fator interfere na eficácia do alerta, foi verificado como que o modelo se comporta quando há uma variação positiva (Cenário 1) e negativa (Cenário 2) na variável *Subjetividade na Análise do Risco* em relação ao seu valor inicial hipoteticamente definido no Cenário Base. O comportamento resultante do modelo, considerando que as demais variáveis permanecem constantes, é ilustrado na Figura 5, evidenciando que a subjetividade, embora de ordem não-técnica, interfere no desempenho do sistema, ao ser capaz de impactar a quantidade de falsos alertas emitidos.

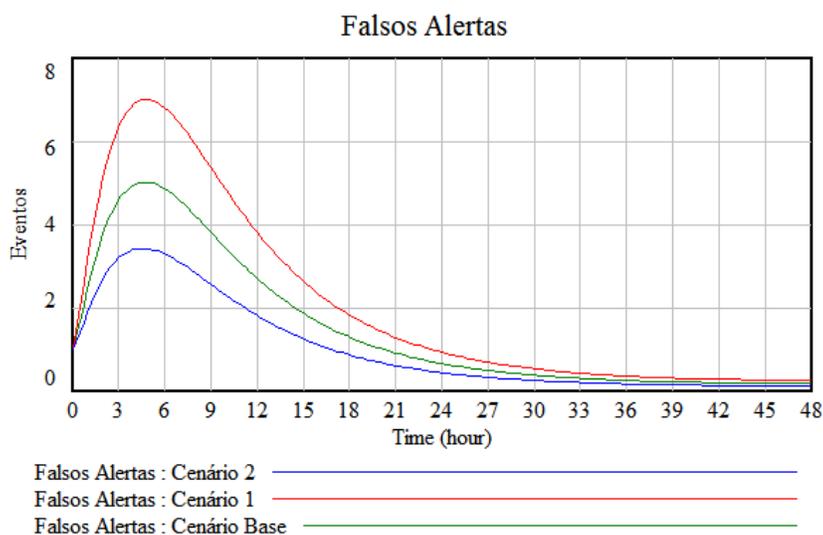


Figura 5 - Influência da variável *Subjetividade na Análise do Risco* sobre os Falsos Alertas
Fonte: Elaborado pelos autores.

Uma das hipóteses apontada pelos especialistas e considerada no modelo como favorável a um melhor desempenho do sistema de emissão de alertas é o conhecimento da real extensão do dano provocado pelo desastre alertado, bem como da intensidade do risco previsto. Isto poderia contribuir para o aprendizado organizacional e para o aprimoramento dos processos, bem como servir de base para futuras tomadas de decisão. Assim, acredita-se que poderia haver uma queda na emissão de falsos alertas. No modelo, esta hipótese é representada pela variável *Retorno das Defesas Civas sobre o Desastre*. Caracteriza a informação obtida após a emissão do alerta, fornecida pelas defesas civis que atuaram em campo.

Para investigar se e de que modo este fator interfere na eficácia do alerta, aplicou-se uma variação positiva (Cenário 3) e negativa (Cenário 4) sobre o valor inicialmente definido para a variável *Retorno das Defesas Civas sobre o Desastre* no Cenário Base e observou-se como que isto podia impactar o estoque *Falsos Alertas*, mantendo-se as demais variáveis constantes no tempo. O comportamento resultante do modelo, ilustrado na Figura 6, é condizente com a hipótese inicial, uma vez que o número de falsos alertas é menor quando o retorno das Defesas Civas é maior.

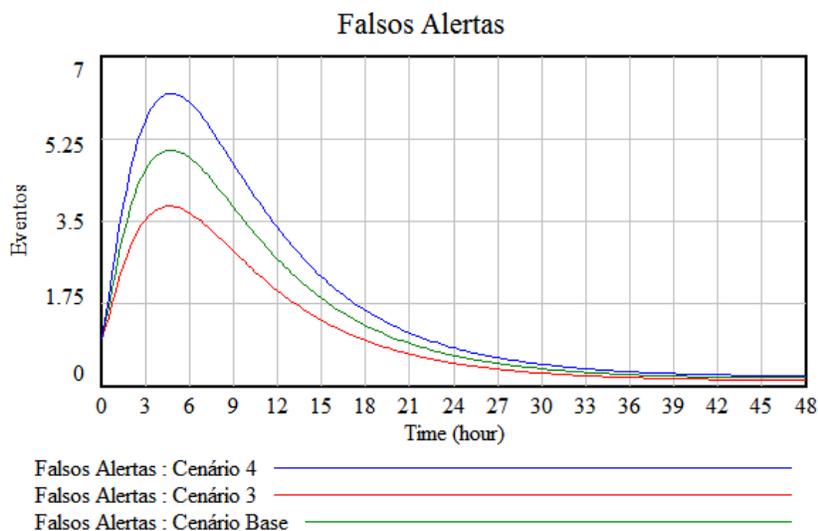


Figura 6 – Influência da variável *Retorno das Defesas Civas sobre o Desastre* sobre os Falsos Alertas

Fonte: Elaborado pelos autores.

A tomada de decisão com relação a alertas é desafiadora para previsores, devido às conseqüências negativas associadas a falsos alertas e eventos perdidos (DURAGE et al., 2016). Assim, é de suma importância compreender, numa visão sistêmica, os elementos que contribuem para o erro numa situação de emissão de alerta.

Os resultados obtidos com a exploração do modelo podem servir de base para um estudo mais aprofundado sobre quais aspectos devem ser considerados como relevantes na melhoria da percepção do risco, do monitoramento e do alerta, com vistas a obter sistemas de emissão de alertas eficazes, segundo o modelo das Nações Unidas (UNISDR, 2006), e alertas com maior grau de precisão, segundo as escalas de Barnes et al. (2007). Além disto, análises como as realizadas neste artigo permitem a gestores e tomadores de decisão conhecerem os fatores subjacentes aos falsos alertas, fatores estes que, segundo Durage et al. (2016), devem ser entendidos antes que o desempenho do sistema de alertas possa ser melhorado.

Na prática, o CEMADEN pode se utilizar do modelo criado para desenvolver ações estratégicas, testá-las, modificá-las e simulá-las, antes de sua efetiva implementação, a fim de ajustar os fatores que são controláveis e que impactam de forma negativa o sistema, como a subjetividade na análise do risco. O modelo também pode ser utilizado como justificativa para a adoção de planos de ação, como a criação de um banco de dados para o registro de ocorrências anteriores, alimentado pelas informações retornadas pelas Defesas Civas, a fim de apoiar o processo decisório.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo do artigo foi representar a complexidade do processo de emissão de alertas de desastres naturais por meio de modelagem e verificar se e de que forma fatores comportamentais e subjacentes à tomada de decisão podem impactar a eficácia de sistemas de emissão de alertas de desastres naturais. Para isto, foi desenvolvido um modelo de Dinâmica de Sistemas para um estudo de caso aplicado a um órgão do poder público federal brasileiro, o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN).

A intenção foi demonstrar aos decisores e gestores, por meio de uma visão sistêmica do processo, como as relações de causa e efeito entre elementos importantes da tomada de decisão podem afetar o desempenho dos alertas ao longo do tempo, bem como subsidiar a adoção de ações estratégicas que visem corrigir eventuais falhas no sistema, reduzindo, desta forma, a ocorrência de falsos alertas, eventos não alertados e alertas emitidos com atrasos. Além disto, o modelo desenvolvido pode resultar num mecanismo de aprendizagem organizacional e de ensaio para o planejamento estratégico.

Como os cenários de risco mudam constantemente, pode-se afirmar que o processo de emissão de alertas é dinâmico no tempo. A presença de vários decisores, alguns com perspectivas conflitantes, bem como a existência de intangíveis importantes e incertezas chave, caracterizam a complexidade do sistema. Devido a estas características, a Dinâmica de Sistemas mostrou-se como tendo grande potencial na análise de problemas relacionados à sistemas de emissão de alertas, uma vez que ela já se evidenciou apropriada para o estudo de outros problemas envolvendo desastres, tais como logística humanitária, por exemplo.

Em razão de seu caráter experimental, no estudo do modelo foram explorados apenas os falsos alertas (situações em que o desastre não ocorre, mas o evento é alertado), e não se levou em consideração elementos de ordem estritamente técnica, como previsão de chuva e limiares deflagradores de desastres, por exemplo.

Numa análise do tipo “o que-se”, por meio de simulação, verificaram-se os efeitos das variações em fatores que podem influenciar a eficácia do alerta. Os resultados obtidos contribuíram para a hipótese de que variáveis qualitativas de ordem comportamental e subjacentes à tomada de decisão também afetam a qualidade do alerta, resultando em mais falsos alertas.

Este conhecimento é relevante para o CEMADEN, pois permite que ações estratégicas e planos de ação sejam adotados, visando melhorar o desempenho do sistema. Para a sociedade, o benefício é extremamente importante, uma vez que sistemas de emissão de alertas eficazes resultam em alertas mais confiáveis (bem direcionados e bem classificados no que diz respeito aos graus de risco), reduzem o tempo de preparo dos planos de emergência pelas defesas civis e minimizam o impacto do desastre para a população, o que implica em menos perdas materiais e humanas.

Como sugestões para trabalhos futuros, têm-se a ampliação do modelo para incluir na análise os eventos perdidos e a calibração do modelo com alertas já emitidos, a fim de avaliar sua aderência às situações encontradas na prática. Aponta-se também a necessidade de se utilizar outra abordagem em conjunto com a Dinâmica de Sistemas, como os métodos *soft* de estruturação de problemas (ROSENHEAD, 1989), a fim de obter uma melhor compreensão e um melhor entendimento da situação problemática enfrentada pelos decisores frente às incertezas, aos conflitos e à complexidade do processo de emissão de alertas.

A SYSTEM DYNAMICS MODEL FOR ISSUING OF NATURAL DISASTER EARLY WARNINGS – A CASE STUDY

ABSTRACT: Among the preparation measures that enable the population to respond quickly and effectively to disasters, is the implementation of early warning systems. So, this paper aims to represent the complexity of the process of issuance of natural disasters early warnings and to check on if and how behavioral and underlying factors to decision making can impact the effectiveness of the alert. In order to support this study, a System Dynamics model for an early warning system will be developed, based on a case study applied to the National Center for Monitoring and Early Warning of Natural Disasters (CEMADEN). As a result, it is hoped to demonstrate to decision-makers and managers, through a systemic view of the process, like cause and effect relationships between important elements of decision making can affect the performance of the early warnings over time, as well as subsidize the adoption of strategic actions to correct eventual system failures, thus reducing the occurrence of false alerts, lost events and early warnings issued with delays. In addition, the developed model may result in an organizational learning and testing mechanism for strategic planning.

Keywords: System Dynamics. Early Warning Systems. Natural Disasters.

REFERÊNCIAS

ALFIERI, Lorenzo; SALAMON, Peter; PAPPENBERGER, Florian; WETTERHALL, Fredrik. Operational Early Warning Systems for Water-Related Hazards in Europe. *Environmental Science & Policy*, n. 21, p. 35-49, 2012.

ALHMOUDI, Abdulla Ali; AZIZ, Zeeshan. Integrated Framework for Early Warning System in UAE. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, vol. 7, n. 4, p. 361-373, 2016.

ALTAY, Nezhig; GREEN, Walter G. OR/MS Research in Disaster Operations Management. *European Journal of Operational Research*, v. 175, p.475-493, 2006.

BARNES, Lindsey R.; GRUNTFEST, Eve C.; HAYDEN, Mary H.; SCHULTZ, David M.; BENIGHT, Charles. False Alarms and Close Calls: A Conceptual Model of Warning Accuracy. *Weather Forecasting*, v. 22, n. 5, p. 1140-1147, 2007.

BESIOU, Maria; STAPLETON, Orla; VAN WASSENHOVE, Luk N. System Dynamics for Humanitarian Operations. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, v. 1, n. 1, p.78-103, 2011.

BUZOGANY, Raquel Froese. *Modelagem da Convergência de Materiais em Desastres por Meio de Dinâmica de Sistemas*. Dissertação de Mestrado. Engenharia de Sistemas Logísticos, Universidade de São Paulo, 2017.

CARTER, W. Nick. *Disaster Management: A Disaster Manager's Handbook*. Mandaluyong City, Phil: Asian Development Bank, 2008, 416 p.

CEPED UFSC. Centro Universitário para Estudos e Pesquisas sobre Desastres Naturais. Universidade Federal de Santa Catarina. *Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 a 2012*. Volume Brasil. Florianópolis: CEPED/UFSC, 2 ed., 2013.

COSTA, Otávio; SANTOS, Joaquim; MARTINS, Marcelo Ramos; YOSHIZAKI, Hugo. A System Dynamics Analysis of Humanitarian Logistics Coordination. Anais da 34^a Conferência Internacional da Sociedade de Dinâmica de Sistemas. *Delft: System Dynamics Society*, v. 1. p. 1, 2016.

CUERVO, Rafael; DIAZ, Fabio; NAMEN, Isabel; PALACIO, Cristina; SIERRA, Catherine. *Humanitarian Crisis: When Supply Chains Really Matter*. Anais da 28^a Conferência Internacional de Dinâmica de Sistemas, 2010.

DIEDRICHS, Danilo R; PHELPS, Kaile; ISIHARA, Paul A. Quantifying Communication Effects in Disaster Response Logistics: A Multiple Network System Dynamics Model. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, v.6, n. 1, p. 24-45, 2016.

DURAGE, Samanthi W.; WIRASINGHE, S.C.; RUWANPURA, J.Y. Decision Analysis for Tornado Warning and Evacuation. *Natural Hazards Review*, v. 17, n. 1, 2016.

GALINDO, Gina; BATTÀ, Rajan. Review of Recent Developments in OR/MS Research in Disaster Operations Management. *European Journal of Operational Research*, v. 230, p.201-211, 2013.

GILLESPIE, David F.; ROBARDS, Karen Joseph; CHO, Sungsook. Designing Safe Systems: Using System Dynamics to Understand Complexity. *Natural Hazards Review*, v. 5, n. 2, p. 82–88, 2004.

GONÇALVES, Paulo. Balancing Provision of Relief and Recovery with Capacity Building in Humanitarian Operations. *Operations Management Research*, v. 4, n. 1, p. 39-50, 2011.

GONÇALVES, Paulo. *System Dynamics Modeling of Humanitarian Relief Operations*. MIT Sloan School Working Paper No. 4704-08, 2008.

GUPTA, Sushil; STARR, Martin K.; FARAHANI, Reza Zanjiraniet; MATINRAD, Niki. Disaster Management from a POM Perspective: mapping a new domain. *Production and Operations Management*, vol. 25, n. 10.p. 1611-1637, 2016.

HOLGUÍN-VERAS, José; JALLER, Miguel; WASSENHOVE, Luk N. Van; PEREZ, Noel; WACHTENDORF, Tricia. On the Unique Features of Post-Disaster Humanitarian Logistics. *Journal of Operations Management*, v. 3, p. 494-506, 2012.

HOYOS, Maria Camila; MORALES, Ridley S.; TABATABAEI, Raha Akhavan .OR Models with Stochastic Components in Disaster Operations Management: a literature survey. *Computers & Industrial Engineering*, n. 82, p. 183-197, 2015.

IFRC. International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies. *What is a disaster?* 2012. Disponível em: <<http://www.ifrc.org/en/what-wedo/disastermanagement/about-disasters/what-is-a-disaster/>>.

KHAN, Himayatullah; VASILESCU, Laura Giurco; ASMATULLAH, Khan. Disaster Management Cycle – a theoretical approach. *Journal of Management and Marketing*, v. 6, n. 1, p. 43–50, 2008.

KOBYAMA, Masato et al. *Prevenção de Desastres Naturais: Conceitos Básicos*. 1. ed. Florianópolis: Organic Trading, 2006.

LANE, David C. The Emergence and Use of Diagramming in System Dynamics: a critical account. *Systems Research and Behavioral Science*, v. 25, p. 3-23, 2008.

LETTIERI, Emanuele; MASELLA, Cristina; RADAELLI, Giovanni. 2009. Disaster Management: Findings from a Systematic Review. *Disaster Prevention and Management*, v. 18, n. 2, p. 117-136, 2009.

LIMA, Fabiana Santos; DÁVALOS, Ricardo Villarroel; GONÇALVES, Mirian Buss; SOUZA, João Carlos. Modelagem e Simulação de Processos para Entrega de Itens de Assistência Humanitária em Desastres. *Revista Iberoamericana de Engenharia Industrial*, Florianópolis, SC, Brasil, v. 8, n. 15, p. 155-175, 2016.

MANZOOR, Umar; ZUBAIR, Maria; BATOOL, Kanwal. Using Multi-Agent Systems to Solve Food Distribution Problem in Disaster Area. *International Journal of Internet Technology and Secured Transactions*, v. 5, n. 4, p. 327-343, 2014.

NEAL, David M. Reconsidering the Phases of Disaster. *International Journal of Mass Emergencies and Disasters*, v. 15, n. 2, p. 239-264, 1997.

NETO, Sílvio Luís Rafaeli. *Um Modelo Conceitual de Sistema de Apoio à Decisão Espacial para Gestão de Desastres por Inundações*. 2000. 208 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

PEARCE, Laurence Dominique Renee. *An Integrated Approach for Community Hazard, Impact, Risk and Vulnerability Analysis: HIRV*. Tese de Doutorado. The School of Community and Regional Planning, The University of British Columbia, 2000.

PENG, Min; PENG Yi; CHEN, Hong. Post-Seismic Supply Chain Risk Management: A System Dynamics Disruption Analysis Approach for Inventory and Logistics Planning. *Computers & Operations Research*, v. 42, p. 14-24, 2014.

QUARANTELLI, E.L. *Catastrophes Are Different From Disasters: Implications For Crisis Planning And Managing Drawn From Katrina Understanding Katrina Perspectives From The Social Sciences*. SSRC - **Social Science Research Council**, 2006. Disponível em: <<http://understandingkatrina.ssrc.org/Quarantelli>>. Acesso em 05 de abril de 2017.

RODRIGUEZ-ULLOA, Ricardo; PAUCAR-CACERES, Alberto. Soft System Dynamics Methodology (SSDM): A combination of Soft Systems Methodology (SSM) and System Dynamics (SD). *Systemic Practice and Action Research*, v. 18, n. 3, p.303-334, 2005.

ROSENHEAD, Jonathan. *Rational Analysis for a Problematic World: Problem Structuring Methods for Complexity, Uncertainty and Conflict*. Chichester: John Wiley & Sons, 1989, 386 p.

SENGE, Peter M. *A Quinta Disciplina*. São Paulo: Best Seller, 1990, 423 p.

SOLER, Luciana S.; SAITO, Silvia; GREGORIO, Leandro T.; LEAL, Paulo; GONÇALVES, Demerval; LONDE, Luciana; SORIANO, Érico; CARDOSO, Jarbas; COUTINHO, Marcos; SANTOS, Leonardo B. L. *Challenges and Perspectives of Innovative*

Iberoamerican Journal of Industrial Engineering, Florianópolis, SC, Brasil, v. 9, n. 18, p. 84-111, 2017.

Digital Ecosystems Designed to Monitor and Warn Natural Disasters in Brazil. Anais da Quinta Conferência Internacional sobre Gerenciamento de Ecossistemas Digitais Emergentes - MEDES '13, 2013, Luxemburgo, p. 254-261, 2013.

STERMAN, John D. *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. 1. ed. McGraw-Hill, 2000.

UCHIDA, Kenetsu. A Model Evaluating Effect of Disaster Warning Issuance Conditions on “Cry Wolf Syndrome” in the Case of a Landslide. *European Journal of the Operational Research*, v. 218, p. 530-537, 2012.

UNISDR. UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK. *Platform for the Promotion of Early Warning, 2006*. Disponível em: <<http://www.unisdr.org/2006/ppew/whats-ew/basics-ew.htm>>. Acesso em: 08 de abril de 2017.

_____. *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030, 2015*. Disponível em: <<http://goo.gl/E6IM74>>. Acesso em: 08 de abril de 2017.

_____. *Terminology on disaster risk reduction, 2017*. Disponível em: <<http://www.preventionweb.net/english/professional/terminology/v.php?id=478>>. Acesso em 08 de abril de 2017.

VLACHOS, Dimitrios; GEORGIADIS, Patroklos; IAKOVOU, Eleftherios. A System Dynamics Model for Dynamic Capacity Planning of Remanufacturing in Closed-Loop Supply Chains. *Computers & Operations Research*, v. 34, p. 367-394, 2007.

VOYER, John; DEAN, Matthew; PICKLES, Christopher. *Understanding Humanitarian Supply Chain Logistics with System Dynamics Modeling*. Anais da 33ª Conferência Internacional da Sociedade de Dinâmica de Sistemas, Cambridge, 2015.

WILTSHIRE, Alison. *Developing Early Warning Systems: a checklist*. Anais da Terceira Conferência Internacional sobre Emissão de Alertas, EWC III, Bonn, 2006. Disponível em: <<http://www.unisdr.org/2006/ppew/info-resources/ewc3/checklist/English.pdf>>. Acesso em: 09 de abril de 2017.

Originals recebidos em: 18/06/2017

Aceito para publicação em: 14/09/2017