

## **Avaliação de impactos em políticas públicas para primeira infância: Aplicação da abordagem de sistemas complexos na projeção de cenários em município brasileiro**

**DANIEL BORIERO**

ESCOLA DE ARTES, CIÊNCIAS E HUMANIDADES - GPP - EACH - USP

**TADEUSZ ALABI**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP)

**RAFAEL PEREIRA DA SILVA**

**GABRIEL MAIA**

**FLÁVIA MORI SARTI**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP)

### **Agradecimento à órgão de fomento:**

Agradecemos à FAPESP pelo financiamento através da linha de pesquisa PPPP, Programa de Pesquisa em Políticas Públicas, fornecendo os recursos necessários através de bolsas de pesquisa e demais auxílios.

# **Avaliação de impactos em políticas públicas para primeira infância: Aplicação da abordagem de sistemas complexos na projeção de cenários em município brasileiro**

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1. Problema de pesquisa**

A primeira infância, definida como período compreendido entre nascimento e seis anos de idade, representa uma fase caracterizada por inúmeras oportunidades para promoção do melhor potencial de crescimento e desenvolvimento infantil em decorrência dos processos de formação da estrutura física, psicológica e mental das crianças (NCPI, 2014; Halfon et al., 2022). Mecanismos vinculados à epigenética, à nutrição, ao crescimento físico, ao aprendizado e à formação de vínculos sociais e emocionais na primeira infância resultam em alta sensibilidade da criança aos estímulos apresentados ao longo dos primeiros anos de vida, gerando plasticidade e maleabilidade no desenvolvimento humano (Arriagada et al., 2018; Fandakova & Hartley, 2020; Cantor et al., 2021; Ho & King, 2021).

Ao longo das últimas décadas, programas sociais para promoção da primeira infância têm sido focalizados a partir de várias iniciativas em nível internacional, tendo sido incorporada à agenda de políticas públicas no Brasil no contexto do Plano Nacional pela Primeira Infância (PNPI). O PNPI foi originalmente proposto pela Rede Nacional Primeira Infância (RNPI) e, em seguida, aprovado pelo Conselho Nacional dos Direitos da Criança e do Adolescente (CONANDA) em 2010, englobando estratégias de ação em favor da primeira infância para implementação no período entre 2010 e 2022 (RNPI/ANDI, 2020). Recentemente, o PNPI foi revisado e atualizado para composição do Pacto Nacional pela Primeira Infância, a partir de elementos do Marco Legal da Primeira Infância (Brasil, 2016b).

A criação do Programa Criança Feliz em 2016, sob coordenação do então Ministério do Desenvolvimento Social e Agrário (2017), buscou consolidar ações de promoção e proteção do desenvolvimento infantil integral por meio de ações intersetoriais. Posteriormente revisado em 2018, o programa focaliza estratégias voltadas à melhoria do desenvolvimento na primeira infância em diversas dimensões, incluindo aspectos cognitivos, linguísticos, psicossociais e motores (Brasil, 2016b, 2018). Entretanto, o panorama da primeira infância no Brasil ainda é caracterizado por substancial desigualdade, decorrente das diferenças estruturais e da ausência de condições objetivas para provisão das melhores oportunidades para crianças entre 0 e 6 anos em várias localidades do país (RNPI/ANDI, 2020).

Ademais, estratégias de políticas públicas em favor da primeira infância geralmente são caracterizadas por ações transversais conduzidas no bojo de diferentes programas setoriais (por exemplo, ações de saúde, educação, assistência social, entre outras). A necessidade de combinação de esforços intersetoriais para produção de ações transversais envolve maior complexidade na coordenação de atores sociais em diferentes áreas, especialmente devido às incertezas inerentes à condução da gestão pública como sistema influenciado por interesses de inúmeros *stakeholders* (Mosqueira & Alessandro, 2023; Carvalho et al., 2024; Carvalho & Becker, 2024).

Consequentemente, a adoção da abordagem de sistemas complexos permitiria incorporação de elementos relacionados à complexidade da dinâmica social inerente às políticas públicas para promoção da primeira infância, favorecendo processos de tomada de decisão baseada em evidências (Lin & Desouza, 2011; Atkinson et al., 2015; Halfon et al., 2022). A definição de sistemas complexos é baseada na existência de múltiplos agentes autônomos com diferentes interesses (por exemplo, stakeholders no contexto de uma política intersetorial pela primeira infância), cuja dinâmica de interação entre si gera fenômenos emergentes em nível sistêmico (por exemplo, resultados inesperados – positivos ou negativos – decorrentes da implementação da política) (Mitchell, 2009).

Levantamento de literatura quanto à aplicação de teoria da complexidade em políticas públicas no Brasil apontou concentração em temas relacionados a urbanização, transporte,

economia, saúde pública e políticas sociais (Furtado et al., 2015). Entretanto, ainda há lacunas na literatura quanto à aplicação da abordagem de sistemas complexos na avaliação de potenciais impactos de políticas públicas para primeira infância, assim como na práxis da gestão pública no Brasil e outros países (Furtado et al., 2015; Halfon et al., 2022; Carvalho & Becker, 2024). Estudo recente na abordagem do tema de políticas públicas para primeira infância no Brasil limita-se ao delineamento de modelo conceitual direcionado às ações em alimentação, nutrição e saúde (Carvalho et al., 2024).

## 1.2. Objetivo

O presente estudo tem como objetivo propor avanços na aplicação da abordagem de sistemas complexos no campo da gestão de políticas públicas para promoção do bem-estar na primeira infância. A pesquisa busca preencher uma lacuna de conhecimento quanto à complexidade na construção da intersetorialidade em programas sociais de natureza transversal a partir da incorporação de elementos essenciais de interações dinâmicas em redes de cooperação em nível municipal. A fundamentação teórica em sistemas complexos foi empregada como base para construção de pesquisa empírica quantitativa de avaliação dos potenciais impactos advindos do estabelecimento de mecanismos de colaboração entre gestores locais sobre indicadores de bem-estar na primeira infância, a partir da implementação de ações de política social baseada em transferência de renda.

A temática de promoção do bem-estar na primeira infância foi selecionada com base nas características de complexidade e transversalidade impostas na estruturação do Programa Criança Feliz (Brasil, 2016a), pautada em intersetorialidade da política pública. Ademais, a priorização de ações de redução de desigualdades vinculadas à iniciativa coaduna-se com objetivos estratégicos de diversas políticas sociais no país, favorecendo alinhamento de incentivos aos *stakeholders* no desenho e implementação de redes de cooperação para otimização dos resultados em nível local.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A teoria da complexidade como campo de conhecimento em plena expansão consolida-se ao longo das últimas décadas, a partir do desenvolvimento de inovações tecnológicas na área da computação. Entretanto, o debate sobre sistemas complexos remonta à década de 1940, como parte do esforço de construção de teoria unificadora sobre complexidade (Silvestrini et al., 2022).

Sistemas complexos são geralmente definidos como arcabouço dinâmico caracterizado pela interação entre agentes independentes, capazes de tomada de decisão pautada em regras simples que, entretanto, resultam em efeitos agregados não-lineares. Assim, modelos tradicionais são incapazes de capturar comportamentos emergentes não-determinísticos expressos em fenômenos de sistemas complexos, uma vez que são baseados em estimativas médias sintetizadas na forma de agentes representativos (Ladyman et al., 2013; Manson, 2001; Rand, 2015).

O pressuposto de modelos tradicionais baseados em agentes representativos dentro do contexto da sociedade resulta na supressão de interações dos diversos agentes intra-grupos e entre grupos sociais, reduzindo variabilidade e eliminando diversidade nas relações sociais em avaliação. A principal vantagem dos modelos tradicionais refere-se à baixa demanda computacional capaz de sintetizar determinados fenômenos observados na natureza por meio de aproximações lineares (Gleick & Hilborn, 1987). Entretanto, efeitos não-lineares são relevantes sob certas condições, como espaço de interação restrito entre agentes (como áreas urbanas de maior densidade populacional), que gera aumento dos efeitos das interações intra-grupos e entre grupos sociais (Bettencourt, 2021).

Consequentemente, a aplicação de modelos de sistemas complexos busca incorporar interações entre variados tipos de agentes, permitindo evolução dos estados dos agentes por meio diferentes dimensões relacionais ao longo do tempo (Gallegati & Kirman, 2012). Os tipos de forças dinâmicas nas interações entre agentes referem-se às múltiplas dimensões de relacionamento

social, como relações de natureza social (Dietz, 2002; Schelling, 1969), econômica (Haynes & Alemna, 2022), ecológica (Rosser, 2011), saúde (Garcia et al., 2017), transporte (Ettema, 2015) ou políticas públicas (Furtado et al., 2015; Gentile et al., 2015; Colander & Kupers, 2016; Sowels, 2021; Jalonen, 2025), entre outras. Aplicações em políticas públicas incluem desde estudos de caso qualitativos até modelagem quantitativa (Dennard et al., 2008).

Entretanto, ainda há escassez de literatura com aplicação da abordagem de sistemas complexos no contexto de políticas públicas para promoção do bem-estar na primeira infância. Estudos no tema concentram-se na construção de *frameworks* teóricos para mapeamento conceitual das interações sociais entre agentes (Hayden et al., 2013; Mevawalla, 2013; Carvalho et al., 2024). Consequentemente, a presente pesquisa buscou promover avanços na adoção da teoria da complexidade para avaliação de impactos em políticas públicas para primeira infância no contexto do município de São Paulo, destacando a possibilidade de expansão para outros municípios brasileiros.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Delineamento do estudo

O presente trabalho é baseado em aplicação de abordagem de sistemas complexos para avaliação de impactos em políticas públicas de promoção do bem-estar na primeira infância no município de São Paulo (SP), a partir de construção e validação de modelo de simulação computacional com estrutura multinível, incorporando camadas de geolocalização e interação entre agentes em rede complexa para projeção de cenários alternativos.

O desenvolvimento da pesquisa envolveu cinco etapas:

- Coleta de dados para construção de indicadores sociais vinculados à política pública;
- Mapeamento da rede complexa de setores censitários do município de São Paulo;
- Construção de algoritmo para simulação da dinâmica de interações entre agentes;
- Validação do modelo por meio de comparação de linha de base com dados reais;
- Projeção de cenários alternativos com mudança na cobertura da política pública.

#### 3.2. Fontes de informação

O modelo de simulação foi construído e validado a partir de coleta de dados secundários extraídos de fontes de informação publicamente disponíveis: Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde (DATASUS), Sistema de Vigilância Alimentar e Nutricional (SISVAN) e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Os dados secundários em nível de setor censitário foram empregados na construção de indicadores sociais vinculados ao bem-estar na primeira infância no período de 2013 a 2020:

- Prevalência de baixo peso entre crianças entre 0 e 3 anos;
- Cobertura do Programa Bolsa Família entre famílias com crianças entre 0 e 3 anos matriculadas em creches públicas;
- Proporção de famílias em situação de extrema pobreza;
- Proporção de indivíduos com empregos formais.

#### 3.3. Elementos da simulação computacional

O modelo de simulação computacional multinível (**simulador**) foi construído com base no método de interação entre agentes (**modelagem baseada em agentes**) de Schelling (1969), a partir da transposição do **mapa** da área urbana do município de São Paulo para **grafo (rede)**. Cada setor censitário (**unidade geográfica**) é caracterizado pelos indicadores sociais de bem-estar na primeira infância, representando um **nó** conectado a outros setores censitários na rede das relações de colaboração entre agentes no contexto das políticas públicas em nível municipal (Figura 1).

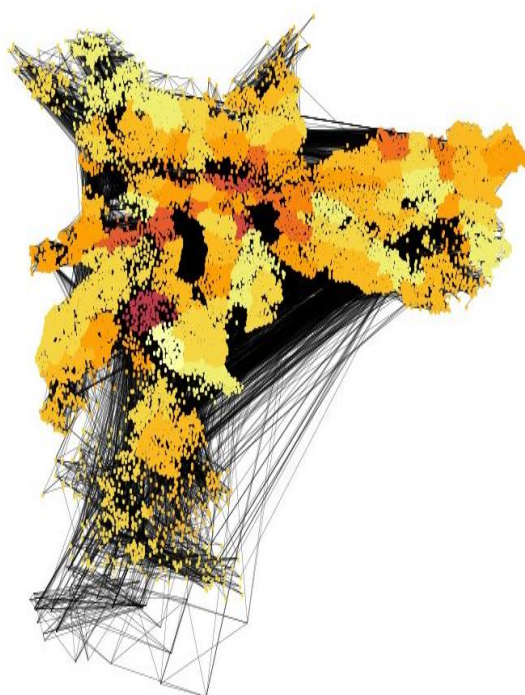


Figura 1: Prevalência de crianças entre 0 e 3 anos de idade com baixo peso segundo setor censitário. São Paulo, 2013.

● 0 a 7,6%    ● 7,6% a 9,2%    ● 9,2% a 10,8%    ● 10,8% a 12,4%    ● 12,4% a 14,1%

A **evolução temporal** do modelo representa a linha do tempo composta por iterações discretas que permitem mudança de estado dos agentes, sendo que uma **simulação** completa compreende a evolução temporal dos indicadores sociais, iniciando-se com valores conhecidos dos indicadores sociais de bem-estar na primeira infância no período de 2013 a 2020. Cada simulação é delineada a partir de diferentes condições iniciais, baseadas em **cenários** de políticas públicas de interesse na pesquisa (**experimentos computacionais**).

Um conjunto de simulações permite análises estatísticas dos resultados do modelo, a partir da identificação dos impactos das intervenções de políticas públicas (por exemplo, transferência de renda ou campanhas de vacinação) sobre **indicadores sociais** relacionados à primeira infância nos setores censitários do município. As relações entre agentes no grafo são descritas nas próximas subseções.

### 3.4. Características dos setores censitários

A partir da definição do espaço discreto de interação dos agentes representados no grafo, é possível desenvolver a modelagem dinâmica das interações entre agentes ao longo do tempo. O algoritmo de modelagem construído no presente estudo é baseado na transformação do mapa do município em grafo, que permite preservar informações sobre distribuição espacial dos agentes nas unidades geográficas, como vizinhança e distância. As propriedades definidas para cada nó do grafo incluem:

- **Condição inicial do setor censitário** quanto aos indicadores sociais (baixo peso, pobreza, emprego, etc.): valores obtidos a partir dos dados secundários extraídos das fontes de informação públicas supramencionadas;
- **Taxa de variação própria de cada indicador social** ao longo do tempo: valores obtidos por autorregressão baseada em análise empírica para identificação do padrão de evolução de cada indicador (tendência histórica do indicador social);
- **Taxa de variação cruzada** de cada indicador em função dos demais indicadores

sociais no próprio setor censitário: valores obtidos por regressões lineares multivariadas com múltiplas defasagens e múltiplos vetores para identificação de interação entre indicadores sociais ao longo do tempo;

- **Taxa de variação por efeito de vizinhança** para cada indicador social em função da variação de indicadores nos setores censitários próximos: valores obtidos por modelagem dos efeitos de propagação de informação quanto à mudança nos indicadores sociais (Dietz, 2002; Cheng et al., 2013; Garcia et al., 2017; Kumar et al., 2020). As interações entre agentes (setores censitários definidos como nós) na rede de relações geograficamente delimitada (município definido como grafo) são representadas por equações de atualização de cada indicador social, alterando o estado do setor censitário a cada iteração temporal pela combinação das taxas de variação própria, cruzada entre indicadores sociais e influência da vizinhança na rede, a partir da aplicação de modelo epidemiológico suscetível-exposto-infectado (SEI), conforme implementação descrita por Kiss et al. (2010). O efeito de vizinhança representa interação entre agentes, sendo acionado mediante limiar de  $\pm 10\%$  de mudança nos indicadores sociais dos vizinhos, sujeito a um componente probabilístico para ocorrência de contágio (propagação de efeito) entre setores censitários;
- **Ocorrência de intervenção** por meio de ações de políticas públicas para promoção do bem-estar na primeira infância e seus efeitos sobre cada indicador social.

Informações acerca da tendência central e dispersão de cada indicador social são armazenadas a cada iteração, assim como peso de cada propriedade dos nós dos grafos (taxas de variação própria e cruzada dos indicadores, efeito da vizinhança e efeito da intervenção), gerando uma base de dados de impactos mensurados em cada simulação.

### 3.5. Características das interações entre setores censitários

Os parâmetros de variação cruzada entre indicadores sociais, variação por efeito de vizinhança e efeito da política pública de promoção do bem-estar na primeira infância são definidos em nível local por meio de processo de aprendizado de máquina supervisionado aplicado aos dados dos setores censitários do município. Conseqüentemente, a extrapolação do simulador construído com base em parâmetros de um município para aplicação em outros municípios é contraindicada, em vista da necessidade de parametrização da simulação com dados específicos à região geográfica em avaliação.

O processo de construção dos parâmetros é baseado na utilização dos dados reais para implementação de dois regimes de ajuste. O primeiro regime de ajuste é realizado por meio de aproximação linear (Equação 1), que fornece estimativa inicial dos parâmetros sem inclusão da taxa de variação própria de cada indicador social ou taxa de variação por efeito de vizinhança.

$$\begin{aligned}
 Y(i+1) &= \alpha(t)Y(i) + \sum_j \beta_j(t)Y_j(i), \\
 \alpha(t), \beta_j(t) &< 1, \forall j, t \\
 \alpha(t)', \beta_j(t)' &< 1, \forall j, t
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Sendo que:  $Y$  = indicador social;  $\alpha$  = taxa de variação temporal;  $j$  = valores dos demais indicadores sociais;  $\beta$  = taxa de variação cruzada entre indicadores sociais;  $t$  = parâmetro temporal das funções independentes.

Os parâmetros obtidos na aproximação linear são incorporados à equação de interação complexa para realização do segundo regime de ajuste (Equação 2), até convergência da simulação em relação aos dados reais (conclusão do processo de ajuste).

$$Y_{kn}(i+1) = \alpha_k(t)Y_{kn}(i) + \eta(t)_{knm}\alpha_k(t)Y_{km}(i) + \sum_j \beta_{kj}(t)Y_j(i),$$

$$\alpha_k(t), \beta_{kj}(t) < 1, \forall k, j, t$$

$$\alpha_k(t)', \beta_{kj}(t)' < 1, \forall k, j, t$$
(2)

Sendo que:  $Y$  = indicador social calculado  $k$  em cada setor censitário  $n$ ;  $\alpha$  = taxa de evolução temporal do indicador social  $k$ ;  $j$  = valores dos demais indicadores sociais;  $\eta_{knm}$  = efeito de vizinhança para cada indicador social  $k$  entre cada par de setores censitários vizinhos  $n$  e  $m$ ;  $\beta$  = taxa de interação cruzada entre indicadores sociais;  $t$  = parâmetro temporal das funções independentes.

O principal desafio na consolidação do processo de ajuste dos parâmetros refere-se à implementação de equações diferenciais acopladas nos dois regimes de ajuste. Enquanto o primeiro ajuste permite estabelecer condições iniciais realistas com implementação rápida, o segundo ajuste é necessário para identificação de interações não-lineares por meio de iteratividade individual dos indicadores de cada unidade geográfica (taxa de variação própria do indicador social com base na tendência histórica) em conjunto com interações entre agentes (taxa de variação por efeito de vizinhança).

A estimativa dos resultados finais do simulador deve ser baseada nos dados provenientes do segundo regime de ajuste, uma vez que cálculos de sistemas complexos exigem condições de contorno ainda inexistentes, a partir da execução iterativa das simulações com graus de liberdade adicionais provenientes das contribuições dos efeitos de tendência histórica e vizinhança, que permitem a manifestação de fenômenos emergentes.

### 3.6. Etapas da simulação computacional

#### 3.6.1. Características das interações dinâmicas entre agentes

Os agentes do modelo são estacionários, sendo que seus indicadores sociais são influenciados por sua própria inércia, pela influência dos agentes na vizinhança e pelas intervenções públicas na área. A informação disseminada no sistema refere-se à propagação das tendências de evolução de indicadores sociais entre setores censitários, restrita ao escopo de uma região densamente populada. A estrutura do simulador é apresentada em forma esquemática no fluxograma com três etapas para cada simulação (Figura 2).

##### 1. Entrada de dados:

A etapa inicial do algoritmo é baseada na leitura e armazenamento de dados referentes à localização geográfica de cada setor censitário (nó) da rede de interações (município), seus respectivos indicadores sociais e taxas de variação próprias e cruzadas em relação aos demais indicadores sociais, assim como suas interações na vizinhança e ocorrência de intervenção da política pública.

##### 2. Simulação

A segunda etapa do algoritmo refere-se à aplicação de processo iterativo para simulação da evolução temporal das características de cada setor censitário, a partir das condições iniciais e propriedades de interação com demais agentes. As três fases do processo iterativo que conduzem à atualização das características de cada setor censitário para cada unidade de tempo são:

- (a) Evolução temporal de cada indicador social;
- (b) Efeito dinâmico da variação cruzada entre indicadores sociais em conjunção com estímulo externo da intervenção de política pública;
- (c) Efeito dinâmico da interação entre agentes por cooperação na vizinhança em conjunção com interação cruzada entre indicadores sociais.

O processo de simulação da evolução temporal é baseado na otimização da duração

das unidades de tempo para ocorrência de interações entre agentes que resultem na emergência de efeitos não-lineares (Equação 1).

$$T = \sum \Delta t \mid \min_{NLE(n_t)} \Delta t \quad (1)$$

Sendo que:  $T$  = intervalo de tempo total simulado;  $\Delta t$  = unidade de tempo simulada;  $NLE$  = identificação de efeito não-linear decorrente das interações entre agentes;  $n_t$  = interações entre agentes em cada unidade de tempo.

Uma característica importante do algoritmo simulador do presente estudo refere-se à facilidade no ajustamento das iterações de tempo no modelo, permitindo alternância entre simulações de maior ou menor granularidade na dimensão temporal para identificação de efeitos não-lineares no processo de projeção de cenários. Entretanto, o período inicial e o período final de cada simulação correspondem aos anos de 2013 e 2020, respectivamente. A partir dos elementos em questão, o algoritmo executa a atualização de cada indicador social para cada nó em cada iteração temporal.

### 3. Saída de resultados

Ao término da simulação, o algoritmo contém uma rotina final para cálculo da média dos valores dos indicadores sociais em cada um dos nós ao longo do tempo e estimativa da evolução dos indicadores sociais entre início e final da simulação. A média é calculada em cada setor censitário para compreensão dos efeitos simulados ao longo do período de análise.

Os resultados apresentados no presente trabalho incluem valores dos indicadores em nível municipal e em uma das regiões da cidade (zona leste), selecionada em decorrência do histórico de alta vulnerabilidade social.

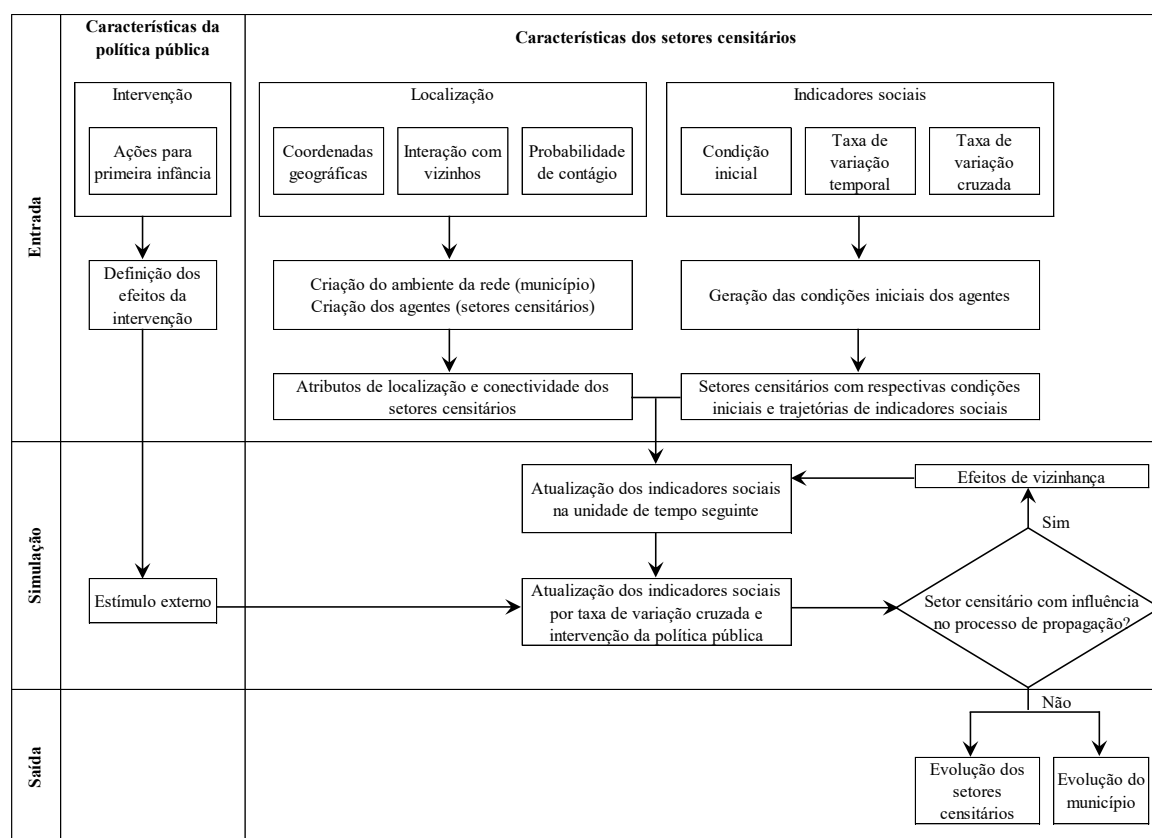


Figura 2: Fluxograma das atividades implementadas no algoritmo simulador.

### 3.6.2. Procedimentos para validação do modelo computacional

A primeira simulação conduzida no modelo foi calibrada para validação dos parâmetros de implementação do modelo, incluindo-se valores iniciais para indicadores sociais com base na amostra de dados secundários do primeiro ano (2013). Em seguida, a simulação é executada até o ano final (2020), permitindo comparação dos resultados obtidos em relação aos dados reais dos setores censitários do município de São Paulo em 2020. Após a validação dos parâmetros de implementação da simulação, torna-se possível propor cenários alternativos por meio de mudanças nas intervenções de políticas públicas de promoção do bem-estar na primeira infância.

### 3.6.3. Procedimentos para simulação de cenários alternativos

Após a validação do modelo, a etapa final da pesquisa baseou-se na projeção de cenários alternativos com modificações na intervenção da política pública de transferência de renda por meio de simulações computacionais. O indicador de cobertura do programa de auxílio financeiro do governo a famílias com crianças de 0 a 3 anos matriculadas em creches foi selecionado para simulação devido ao efeito direto sobre indicador de saúde do público alvo do estudo (Silva & Paes, 2019; Paes-Sousa et al., 2011; Sperandio et al., 2017). Consequentemente, foram avaliados potenciais impactos sobre prevalência de baixo peso entre crianças de 0 a 3 anos decorrentes de aumento ou redução do dispêndio governamental para mudança da cobertura populacional do programa em  $\pm 5$  pontos percentuais (em comparação com valores reais dispendidos no período de 2013 a 2020).

## 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1. Caracterização do bem-estar na primeira infância em São Paulo (SP)

A tendência central e dispersão dos indicadores sociais no município de São Paulo aponta estabilidade na prevalência de pobreza absoluta e de baixo peso entre crianças de 0 a 3 anos de idade no período de 2013 a 2020. A cobertura de programas de transferência de renda apresentou incremento a partir de 2016, possivelmente em decorrência da redução na taxa de emprego formal (Figura 3).

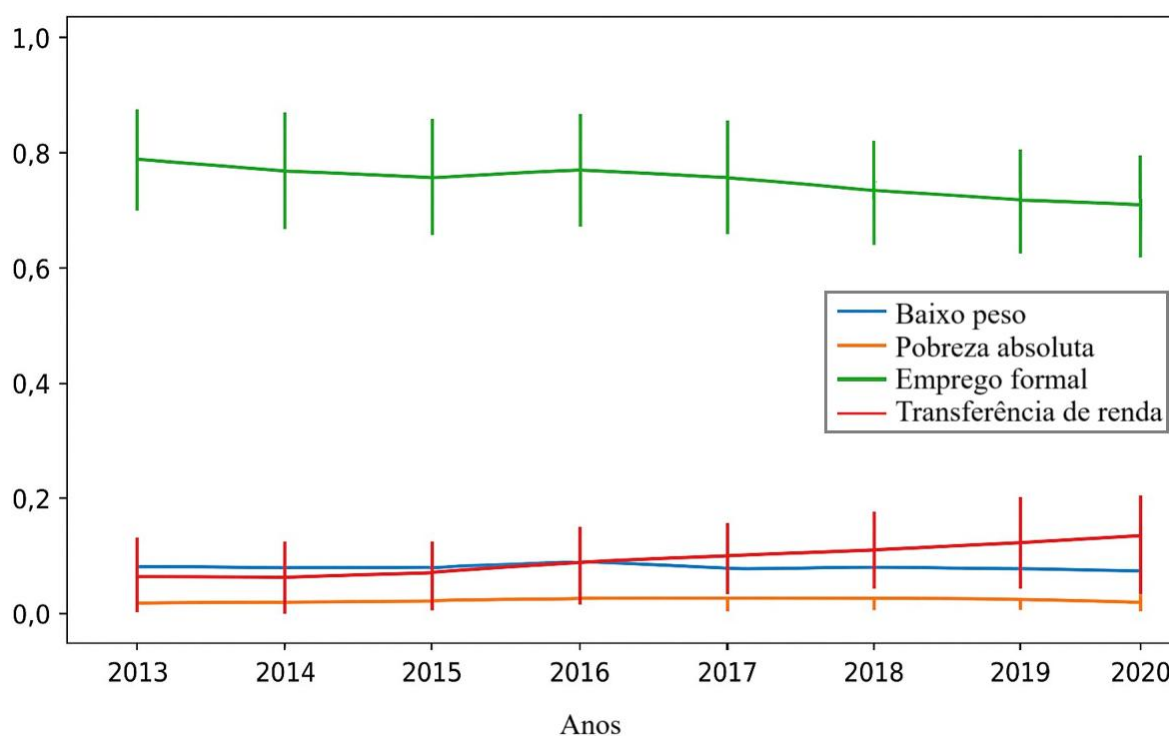


Figura 3: Medidas de tendência central e dispersão dos indicadores sociais no município de São Paulo. 2013-2020.

O resultado da simulação computacional indica potencial incremento na desigualdade em termos distribuição geográfica da prevalência de baixo peso entre crianças de 0 a 3 anos entre setores censitários do município de São Paulo (Figura 4).

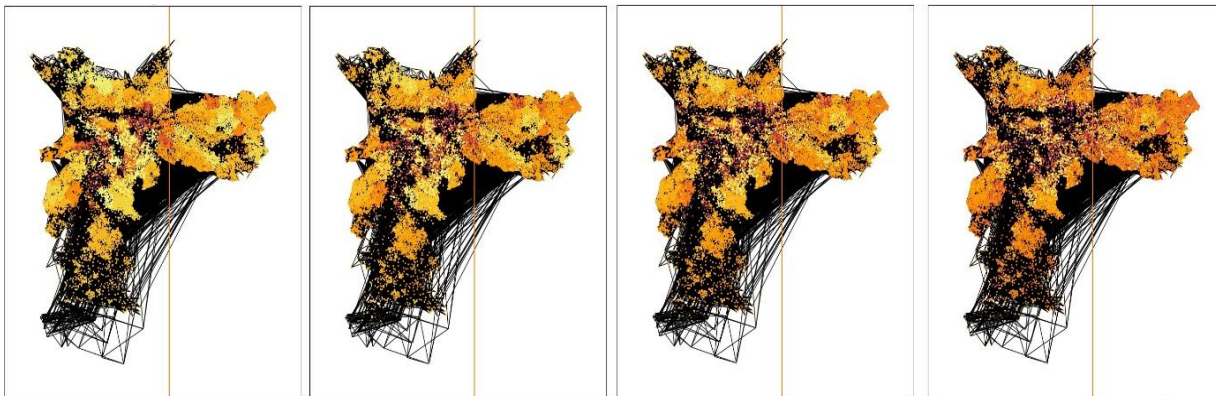
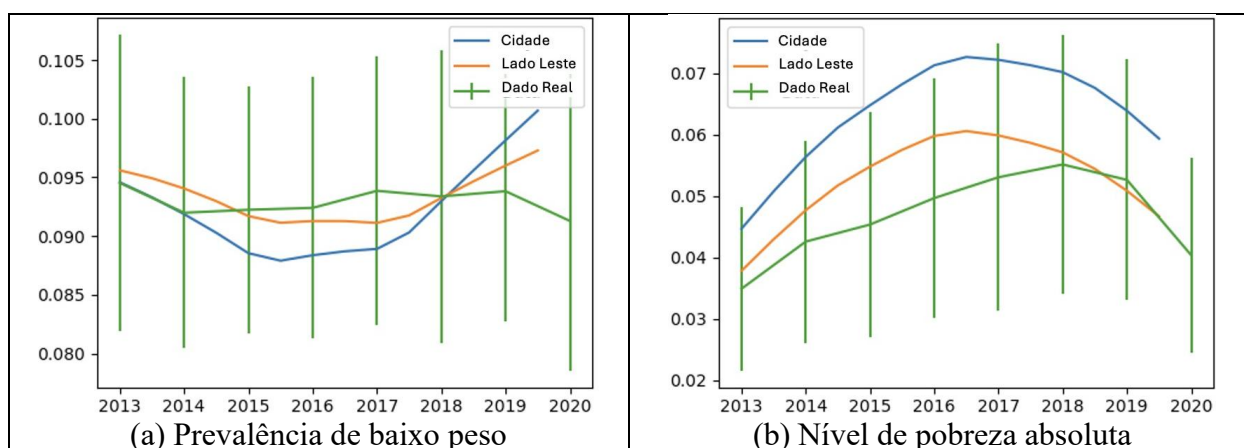


Figura 4: Distribuição geográfica da prevalência de baixo peso entre crianças de 0 a 3 anos. A linha vertical laranja na longitude -46,56 delimita à direita a zona leste da cidade de São Paulo.

#### 4.2. Validação do modelo computacional

A comparação dos resultados das simulações do modelo computacional em relação aos indicadores sociais demonstra médias dentro do intervalo  $1/\sigma$  da tendência histórica nos períodos de evolução temporal simulados. Ademais, o ajuste da prevalência baixo peso entre crianças resultou em  $\chi^2 < 0.0008$ , permitindo a validação do modelo face às condições iniciais, parâmetros de interação e propriedades dos agentes na rede (Figura 5).



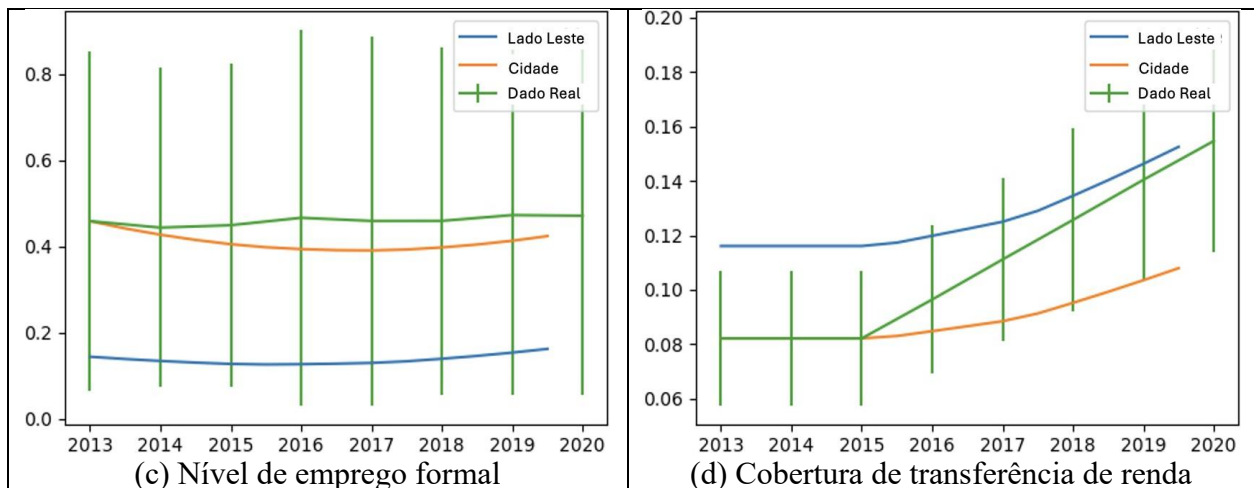


Figura 5. Evolução temporal de indicadores sociais no município de São Paulo (tendência central e dispersão) em comparação com resultados da simulação para cidade e zona leste.

### 4.3. Cenários alternativos com mudança no programa de transferência de renda

As simulações de cenários alternativos da política pública de transferência de renda (Bolsa Família), baseadas em mudança no dispêndio governamental para aumento ou redução da cobertura do programa em 5 pontos percentuais, apresentaram impacto substancial na prevalência de baixo peso entre crianças de 0 a 3 anos (Figura 6).

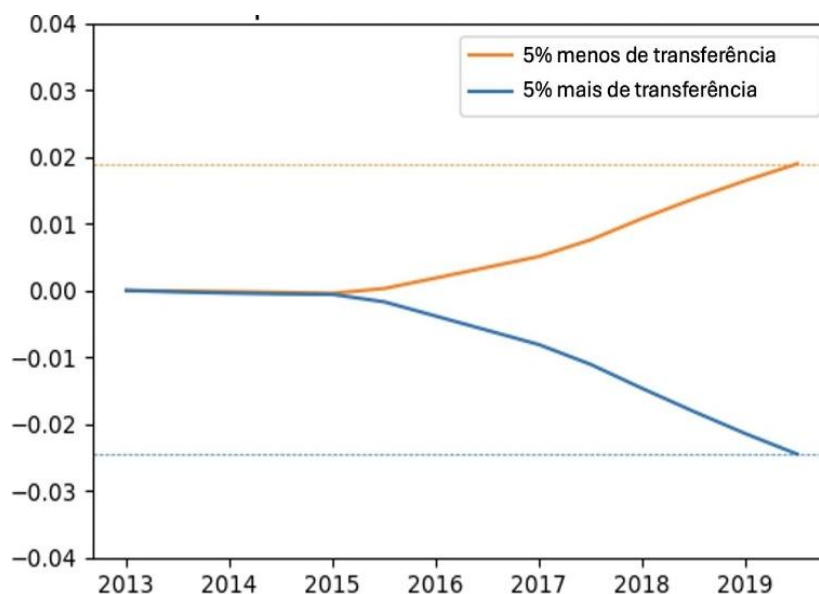


Figura 6: Avaliação do impacto de mudanças na cobertura de programa de transferência de renda sobre prevalência de baixo peso entre crianças de 0 a 3 anos. São Paulo, 2013-2020.

Os impactos decorrentes de incremento ou redução na cobertura populacional de programa de transferência de renda apontam respectivamente diminuição e aumento proporcional na prevalência de baixo peso infantil do município ao longo do tempo. Assim, os resultados das simulações de cenários alternativos sugerem que a política de transferência de renda é essencial para manutenção de melhorias na saúde de crianças na primeira infância. Ou seja, o modelo computacional permite recomendação direta para planejamento da política pública no município de São Paulo.

## 5. CONCLUSÃO

O estudo buscou contribuir ao avanço na aplicação da abordagem de sistemas complexos no campo da gestão de políticas públicas para promoção do bem-estar na primeira infância. A construção de modelagem computacional para simulação de cenários alternativos tem potencial para aplicação nos processos de tomada de decisão em planejamento e implementação de ações estratégicas no contexto de programas sociais. A partir da incorporação da dinâmica de interação cooperativa entre agentes no âmbito da rede de setores censitários no município de São Paulo, foi possível validar os parâmetros do modelo e identificar potenciais impactos de mudanças em políticas públicas de interesse para melhoria das condições de desenvolvimento infantil na cidade.

Os resultados do presente trabalho apoiam evidências na literatura quanto à necessidade de aplicação da teoria da complexidade para avaliação de impactos de programas sociais no contexto da primeira infância, grupo populacional cujo desenvolvimento físico, mental e emocional é bastante sensível às condições vigentes em seu entorno. Ademais, a construção de modelo de simulação computacional multinível alinha-se às análises de políticas públicas para primeira infância de estudos anteriores, cujos resultados também apontam para necessidade de validação de modelos fundamentados na abordagem de sistemas complexos às especificidades locais (Hayden et al., 2013; Mevawalla, 2013).

A superação de modelos lineares generalistas pautados na visão “*one-size-fits-all*” por meio do uso da teoria da complexidade é amparada pela identificação de resultados contraditórios na literatura sobre avaliação de impactos de políticas públicas. Experimentos locais sobre efeitos de programas de transferência de renda realizados em diferentes localidades apontam resultados positivos sob determinadas circunstâncias (Macours et al., 2008; Valadez-Martínez, 2016), mas também resultados negativos (Gitter et al., 2011). Os resultados do presente estudo reforçam a existência de correlação não-linear em múltiplas camadas entre transferência de renda e bem-estar na primeira infância. Conquanto tenha sido observado resultado geral com impacto positivo derivado do aumento da cobertura do auxílio financeiro sobre prevalência de baixo peso entre crianças, a aplicação da simulação computacional em outras localidades sob diferentes condições iniciais potencialmente geraria resultados diferentes.

Considerando que o presente trabalho foi desenvolvido no âmbito de projeto de pesquisa ainda em andamento, a primeira etapa executada no município de São Paulo para pré-teste do simulador de políticas públicas para primeira infância. A segunda etapa está em fase de execução, a partir de colaboração com membros da equipe Primeira Infância Campineira e Prefeitura Municipal de Campinas para aplicação do algoritmo no processo de delineamento e operacionalização de ações para promoção do desenvolvimento infantil integral na cidade. Isso permitirá adaptação do modelo computacional ao contexto de outro município por meio da validação de parâmetros com base na realidade local, além de gerar oportunidades para aprimoramento da capacidade de predição do simulador.

A contribuição do estudo à consolidação da teoria da complexidade no âmbito de avaliação de impactos de políticas públicas para promoção do bem-estar na primeira infância reside na identificação de emergência de efeitos diferenciados segundo setores censitários do município de São Paulo, destacando o potencial de aplicação do simulador para delineamento de ações estratégicas em programas sociais em prol da redução de desigualdades na população. A projeção dos efeitos de ampliação e redução da cobertura do programa de transferência de renda revelou dinâmicas locais decorrentes de interações entre agentes e disseminação de impactos em indicadores sociais por vizinhança e estabelecimento de cooperação na rede social, mostrando resultados proeminentes a partir de focalização das ações em áreas de menor renda da cidade, vislumbrando-se saturação do programa em áreas de maior renda.

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que a teoria da complexidade oferece arcabouço teórico-metodológico que permite expandir modelos de avaliação de impacto de políticas públicas com base na compreensão dos efeitos não-lineares decorrentes de interações entre *stakeholders* que influenciam condições de desenvolvimento de crianças na primeira infância. Por fim, o estudo apresenta elementos de apoio à necessidade de construção, teste e validação dos modelos com abordagem de sistemas complexos em nível local para garantir maior precisão dos cenários em

avaliação. Assim, a complementaridade entre métodos quantitativos e qualitativos torna-se essencial para identificação de especificidades locais na aplicação de modelos de simulação computacional para avaliação de impactos de políticas públicas em nível populacional.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arriagada, A.-M., Perry, J., Rawlings, L., Trias, J., & Zumaeta, M. (2018). *Promoting early childhood development through combining cash transfer and parenting programs*. Washington, DC: World Bank. Disponível em: <https://documents.worldbank.org/curated/en/489331538646764960/pdf/130492-WP-PUBLIC-P163425-BriefCombiningCashTransfersandParentingInterventionsWEB.pdf> [Acesso em 14 jul. 2025].
- Atkinson, J.-A., Page, A., Wells, R., Milat, A., & Wilson, A. (2015). A modelling tool for policy analysis to support the design of efficient and effective policy responses for complex public health problems. *Implementation Science*, 10:26. doi: 10.1186/s13012-015-0221-5.
- Bettencourt, L. M. A. (2021). *Introduction to urban science: evidence and theory of cities as complex systems*. Boston: MIT Press. 496p.
- Brasil. (2016a). *Decreto nº 8.869, de 5 de outubro de 2016*. Brasília. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2016/decreto/D8869impresao.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2016/decreto/D8869impresao.htm) [Acesso em 14 jul. 2025].
- Brasil. (2016b). *Lei nº 13.257, de 08 de março de 2016*. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2016/lei/113257.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2016/lei/113257.htm) [Acesso em 14 jul. 2025].
- Brasil. (2018). *Decreto nº 9.579, de 22 de novembro de 2018*. Brasília. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2015-2018/2018/Decreto/D9579.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2018/Decreto/D9579.htm) [Acesso em 14 jul. 2025].
- Cantor, P., Osher, D., Berg, J., Steyer, L., & Rose, T. (2021). Malleability, plasticity, and individuality: how children learn and develop in context. In: Cantor, P., & Osher, D. (Eds.). *The science of learning and development*. London: Routledge, 2021. 52p.
- Carvalho, A. K. S., & Becker, K. L. (2024). Desenvolvimento integral na primeira infância: desafios para as políticas públicas no Brasil. *Revista Brasileira de Economia Social e do Trabalho*, 6, e024023. doi: 10.20396/rbest.v6i00.20009.
- Carvalho, A. M., Garcia, L. M. T., Lourenço, B. H., Verly Junior, E., Carioca, A. A. F., Jacob, M. C. M., Gomes, S. M., & Sarti, F. M. (2024). Exploring the nexus between food systems and the global syndemic among children under five years of age through the complex systems approach. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 21(7), 893. doi: 10.3390/ijerph21070893.
- Cheng, J.-J., Liu, Y., Shen, B., & Yuan, W.-G. (2013). An epidemic model of rumor diffusion in online social networks. *European Physical Journal B*, 86(1), 29. doi: 10.1140/epjb/e2012-30483-5.
- Colander, D., & Kupers, R. (2016). *Complexity and the art of public policy: solving society's problems from the bottom up*. Princeton: Princeton University Press. 320p.
- Dennard, L. F., Richardson, K. A., & Morcol, G. (2008). *Complexity and policy analysis: tools and concepts for designing robust policies in a complex world (Exploring organizational complexity)*. New Delhi: Isce Publishing. 428p.
- Dietz, R. D. (2002). The estimation of neighborhood effects in the social sciences: an interdisciplinary approach. *Social Science Research*, 31(4), 539–575. doi: 10.1016/S0049-089X(02)00005-4.
- Ettema, D., Furtado, B. A., Sakowski, P. A. M., & Tóvolli, M. H. (2015). Complexity methods applied to transport planning. In: Furtado, B. A., Sakowski, P. A. M., & Tóvolli, M. H. (Eds.). *Modeling complex systems for public policies*. Brasília: IPEA. p.279–300.
- Fandakova, Y.; Hartley, C. A. (2020). Mechanisms of learning and plasticity in childhood and

- adolescence. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 42, 100764. doi: 10.1016/j.dcn.2020.100764.
- Furtado, B. A., Sakowski, P. A. M., & Tóvolli, M. H. (2015). *A complexity approach for public policies*. Discussion Paper n. 0205. Brasília/Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Disponível em: <https://ideas.repec.org/p/ipe/ipetds/0205.html> [Acesso em 15 jul. 2025].
- Gallegati, M., & Kirman, A. (2012). Reconstructing economics: agent based models and complexity. *Complexity Economics*, 1, 5–31. doi:10.7564/12-COEC2.
- Garcia, L. M. T., Cardoso, L. d. O., & Sarti, F. M. (2017). Modelagem de sistemas complexos em saúde, alimentação e nutrição. In: Sarti, F. M., & Torres, E. A. F. S. (Eds.). *Nutrição e saúde pública: produção e consumo de alimentos*. Barueri: Manole. p.299–320.
- Gentile, J., Glazner, C., & Koehler, M. (2015). Simulation models for public policy In: Furtado, B. A., Sakowski, P. A. M., & Tóvolli, M. H. (Eds.). *Modeling complex systems for public policies*. Brasília: IPEA. p.73–84.
- Gitter, S. R., Manley, J., & Barham, B. L. (2011). The coffee crisis, early childhood development, and conditional cash transfers. IDB Working Paper n. IDB-WP-245. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1858040> [Acesso em 15 jul. 2025].
- Gleick, J., & Hilborn, R. C. (1987). Chaos, making a new science. *American Journal of Physics*, 56, 1053–1054. doi: 10.1119/1.15345.
- Halfon, N., Russ, S. A., & Kahn, R. S. (2022). Inequality and child health: dynamic population health interventions. *Current Opinion in Pediatrics*, 34, 33–38. doi: 10.1097/MOP.0000000000001087.
- Hayden, J. D., Mevawalla, Z., Britt, C., & Palkhiwala, S. (2013). Complexity theory, early childhood development and social justice: creating a space for children’s voices. In: Basu, C., & Anderson-Patton, V. (Eds.). *Children and childhood: practices and perspectives*. Oxford: Inter-Disciplinary Press. p.217–227
- Haynes, P., & Alemna, D. (2022). A systematic literature review of the impact of complexity theory on applied economics. *Economies*, 10(8), 192. doi: 10.3390/economies10080192.
- Ho, T. C., & King, L. S. (2021). Mechanisms of neuroplasticity linking early adversity to depression: developmental considerations. *Translational Psychiatry*, 11, 517. doi: 10.1038/s41398-021-01639-6.
- Jalonen, H. (2025). A complexity theory perspective on politico-administrative systems: insights from a systematic literature review. *International Public Management Journal*, 28(1), 1–21. doi: 10.1080/10967494.2024.2333382.
- Kiss, I. Z., Broom, M., Craze, P. G., & Rafols, I. (2010). Can epidemic models describe the diffusion of topics across disciplines? *Journal of Informetrics*, 4(1), 74–82. doi: 10.1016/j.joi.2009.08.002.
- Kumar, S., Saini, M., Goel, M., & Aggarwal, N. (2020). Modeling information diffusion in online social networks using SEI epidemic model. *Procedia Computer Science*, 171, 672–678. doi: 10.1016/j.procs.2020.04.073.
- Ladyman, J., Lambert, J., & Wiesner, K. (2013). What is a complex system? *European Journal for Philosophy of Science*, 3, 33–67. doi: 10.1007/s13194-012-0056-8.
- Lin, Y., & Desouza, K. C. (2011). Towards evidence-driven policy design: Complex adaptive systems and computational modeling. *Annual Review of Policy Design*, 1(1), 1–19.
- Macours, K., Schady, N. R., & Vakis, R. (2008). *Cash transfers, behavioral changes, and cognitive development in early childhood: evidence from a randomized experiment*. Policy Research Working Paper n. 4759. Washington, DC: World Bank. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10986/6926> [Acesso em 15 jul. 2025].
- Manson, S. M. (2001). Simplifying complexity: a review of complexity theory. *Geoforum*, 32(3), 405–414. doi: 10.1016/S0016-7185(00)00035-X.
- Mevawalla, Z. (2013). The crucible: adding complexity to the question of social justice in early childhood development. *Contemporary Issues in Early Childhood*, 14(4), 290–299. doi:

10.2304/ciec.2013.14.4.290.

- Ministério do Desenvolvimento Social e Agrário (MDSA) (2017). *Programa Criança Feliz: a intersectorialidade na visita domiciliar*. Brasília: MDSA.
- Mitchell, M. (2009). *Complexity: a guided tour*. Oxford: Oxford University Press. 368p.
- Mosqueira, E., & Alessandro, M. (2023). *State capacities and wicked problems of public policy: addressing vulnerabilities that affect human development*. Washington, DC: Inter-American Development Bank. Disponível em: <https://doi.org/10.18235/0005052> [Acesso em 14 jul. 2025].
- Núcleo Ciência Pela Infância (NCPI). (2014). *O impacto do desenvolvimento na primeira infância sobre a aprendizagem*. São Paulo: NCPI, 2014. Disponível on-line em: [https://www.mds.gov.br/webarquivos/arquivo/crianca\\_feliz/Treinamento\\_Multiplicadores\\_Coordenadores/IMPACTO\\_DESENVOLVIMENTO\\_PRIMEIRA%20INFANCIA\\_SOBRE\\_APRENDIZAGEM.pdf](https://www.mds.gov.br/webarquivos/arquivo/crianca_feliz/Treinamento_Multiplicadores_Coordenadores/IMPACTO_DESENVOLVIMENTO_PRIMEIRA%20INFANCIA_SOBRE_APRENDIZAGEM.pdf) [Acesso em 14 jul. 2025].
- Paes-Sousa, R., Santos, L. M. P., & Miazaki, É. S. (2011). Effects of a conditional cash transfer programme on child nutrition in Brazil. *Bulletin of the World Health Organization*, 89(7), 496–503. doi: 10.2471/BLT.10.084202.
- Rand, W. (2015). Complex systems: concepts, literature, possibilities and limitations. In: Furtado, B. A., Sakowski, P. A. M., & Tóvolli, M. H. (Eds.). *Modeling complex systems for public policies*. Brasília: IPEA. p.37–54.
- Rede Nacional Primeira Infância / ANDI Comunicação e Direitos (RNPI/ANDI). (2020). *Plano Nacional Primeira Infância: 2010-2022 | 2020-2030*. 2ª ed. (revista e atualizada). Brasília: RNPI/ANDI, 2020. 260p. Disponível em: <https://primeirainfancia.org.br/wp-content/uploads/2020/10/PNPI.pdf> [Acesso em 14 jul. 2025].
- Rosser, J. B. (2011). *Complex evolutionary dynamics in urban-regional and ecologic- economic systems: from catastrophe to chaos and beyond*. New York: Springer. 320p. doi: 10.1007/978-1-4419-8828-7.
- Schelling, T. C. (1969). Models of segregation. *The American Economic Review*, 59(2), 488–493. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/1823701> [Acesso em 19 jun. 2023].
- Silva, E. M., & Paes, N. A. (2019). Bolsa Família Programme and the reduction of child mortality in the municipalities of the Brazilian semiarid region. *Ciência & Saúde Coletiva*, 24(2), 623–630. doi: 10.1590/1413-81232018242.04782017.
- Silvestrini, M. M., Simoyama, F. O., Pinheiro Filho, F. P., Magri, G. L. K. P. M. F. G., Trottmann, P., Pereira, C. B., Adams, C., & Sarti, F. M. (2022). Sistemas complexos. In: Marchioni, D. M. L., & Carvalho, A. M. (Eds.). *Sistemas alimentares e alimentação sustentável*. Barueri: Manole. p.19-31.
- Sowels, N. (2021). A brief introduction to complexity theory in managing public services. *Revue Française de Civilisation Britannique*, 26, 2. doi: 10.4000/rfcb.8103.
- Sperandio, N., Rodrigues, C. T., Franceschini, S. C. C., & Priore, S. E. (2017). Impact of Bolsa Família Program on the nutritional status of children and adolescents from two Brazilian regions. *Revista de Nutricao*, 30(4), 477–487. doi: 10.1590/1678-98652017000400007.
- Valadez-Martínez, L. (2016). Household income trajectories, PROGRESA-Oportunidades, and child well-being at pre-school age in Rural Mexico. *Journal of Human Development and Capabilities*, 17(4), 516–539. doi: 10.1080/19452829.2016.1225701.