

An Agent-Based Model Integrating the Theory of Planned Behavior for Simulating the Effect of Public Policies on Agricultural Diversity

Pedro H. I. Soares¹, Marcos A.S. da Silva², Márcia H.G. Dompieri³,
Fábio R. de Moura⁴, Neíza C. S. Batista² e Sonise dos S. Medeiros²

¹Bolsista PIBIC/FAPITEC, Depto. de Computação, Universidade Federal de Sergipe
Cidade Universitária, São Cristóvão, SE

²Embrapa Tabuleiros Costeiros, Av. Gov. Paulo B. de Menezes, 3250, Aracaju, SE

³Embrapa Territorial, Av. Sd. Passarinho, 303, Campinas, SP

⁴Depto. de Economia, Universidade Federal de Sergipe
Cidade Universitária, São Cristóvão, SE

pedro.isidorio.soares@gmail.com
{marcos.santos-silva, neiza.batista, sonise.medeiros}@embrapa.br
marcia.dompieri@embrapa.br, fabiromoura@gmail.com

Abstract. *The study proposes an agent-based model that incorporates the Theory of Planned Behavior (TPB) to simulate the impact of public policies on agricultural diversification in the municipality of Santana de So Francisco (SE, Brazil). Implemented in NetLogo, the model simulated scenarios with climate variability, market prices, and financial incentives. The results indicated that economic incentives alone did not increase diversification, while extreme climate shocks (high rainfall and humidity variability) had a stronger influence on farmer decisions. The interviews revealed barriers such as limited financial and human resources, which reduced the effectiveness of the policy. The study concludes that effective strategies must combine incentives, technical support, and climate adaptation, along with involving farmers in policy design.*

Resumo. *O estudo propõe um modelo baseado em agentes integrando a Teoria do Comportamento Planejado (TCP) para simular o impacto de políticas públicas na diversificação agrícola no município de Santana de São Francisco (SE). Implementado no NetLogo, o modelo simulou cenários com variações climáticas, preços de mercado e incentivos financeiros. Os resultados indicaram que incentivos econômicos isolados não aumentaram significativamente a diversificação, enquanto choques climáticos extremos (alta variabilidade de precipitação e umidade) tiveram maior influência nas decisões dos produtores. Entrevistas revelaram barreiras como falta de recursos financeiros e humanos, reduzindo a eficácia das políticas. Conclui-se que estratégias eficazes devem combinar incentivos, suporte técnico e adaptação climática, além de envolver os produtores no desenho das políticas.*

1. Introdução

Os sistemas de produção agrícola são constantemente submetidos a diferentes pressões. Destacam-se as variações climáticas, a sazonalidade dos preços e as demandas crescentes

do arcabouço legal relativo às obrigações ambientais. Por outro lado, há demanda crescente por alimentos mais acessíveis à população mundial e em maior diversidade. De fato, estamos diante de demandas conflitantes sobre o espaço rural e de desafios que nos obriga a desenvolver sistemas sócio-agro-ambientais economicamente viáveis, mas sobretudo *resilientes*, *conservacionistas* e que aumentem os níveis de *segurança alimentar* da população.

Uma solução para promover o desenvolvimento desses sistemas é a contenção da monotonia da produção agrícola, e sua tendência em se acentuar [Paschoalino and Parré 2023]. Ou seja, promover a diversificação da produção agrícola surge como um dos mecanismos possíveis. Diversas ações governamentais buscam contribuir direta ou indiretamente para essa diversificação [Piedra-Bonilla et al. 2020]. No entanto, se observa pouco sinergismo entre os programas, ações e instrumentos de políticas públicas que acabam gerando resultados com efeitos indesejados ou inesperados.

Além das questões político-administrativas que envolvem a elaboração de políticas públicas efetivas, temos a complexidade inerente dos fenômenos sócio-ambientais que as intervenções públicas tentam influenciar [Fuentes et al. 2022]. Dentre as características desses sistemas complexos destacamos as múltiplas interações entre os elementos sociais, técnicos e ambientais que geram efeitos inesperados, impossibilitam a predição, e geram padrões emergentes na escala regional a partir de uma miríade de comunicações e fluxos na escala local [Fuentes et al. 2022].

Diante da impossibilidade de se avaliar *in loco* ou realizar experimentos sociais para análise dos efeitos de diferentes políticas públicas para diferentes contextos econômicos e climáticos, surge a opção de criação de ambientes virtuais para análise desses cenários *in silico*, por meio de modelos matemáticos, estatísticos ou computacionais [Bastidas-Orrego et al. 2023]. Os modelos computacionais baseados em agentes se destacam quanto a sua maior capacidade de integrar elementos geoespaciais, múltiplos perfis de agentes (atores sociais), permitir a conectividade entre os atores (redes sociais), acoplar outros modelos matemáticos/estatísticos, além de permitir a adição de aspectos comportamentais dos agentes baseados em suas crenças, valores e capacidade de ação.

Neste trabalho propomos um modelo empírico espacial baseado em agentes para a simulação de um instrumento de política pública voltada para o incentivo à diversidade da produção agrícola no município de Santana de São Francisco, SE. Neste modelo os estabelecimentos rurais serão representados como sistemas sócio-agro-ambientais, e o comportamento dos produtores rurais serão mapeados à luz da Teoria do Comportamento Planejado oriunda da psicologia social.

Na seção 2 tem-se uma breve revisão dos principais modelos baseados em agentes de sistemas agrícolas, na seção 3 apresentamos os materiais e métodos, detalhando os submodelos econômicos, climáticos e de políticas públicas, sua implementação na plataforma Netlogo e parâmetros das simulações. Na seção 5 apresentamos os resultados para uma determinada parametrização, e por fim, as conclusões na seção 6.

2. Modelagem de sistemas sócio-agroambientais

Observa-se amplo uso de modelos matemáticos, estatísticos e computacionais como suporte à elaboração, implantação e monitoramento de políticas públicas para

o setor agrícola [Bastidas-Orrego et al. 2023, Mellaku and Sebsibe 2022]. Segundo [Bastidas-Orrego et al. 2023], esses modelos estão focados em variáveis econômicas, nem sempre tratam diretamente as interrelações entre as diversas escalas decisórias, e apresentam limites quanto à representação das questões comportamentais no nível micro de propriedade rural [Rausser and Just 2022]. No entanto, esses modelos vêm sendo usados para a avaliação do impacto na escala regional de políticas públicas de incentivos voltados para o produtor rural com destaque para os trabalhos sobre o impacto da política comum para a agricultura da União Europeia [Paulus et al. 2022, Wittstock et al. 2022].

Estudos recentes indicam alguns fatores chave para o sucesso na construção de modelos empíricos baseados em agentes como instrumentos para elaboração, avaliação e monitoramento de políticas públicas voltadas para sistemas sócio-agroambientais [Polhill and Rouchier 2023]. [Will et al. 2021] destaca a questão comportamental no nível de propriedade, o uso intensivo de dados e modelagem participativa onde as partes interessadas ou envolvidas no processo de elaboração de políticas públicas participam ativamente do processo. Outros autores destacam a necessidade de desenvolvimento incremental dos modelos, e integração dos modelos econômicos, biofísicos e comportamentais [Malawska and Topping 2016].

Na maioria dos casos avaliados os modelos baseados em agentes representam explicitamente os produtores, que podem ser especializados em função do tamanho da propriedade [Sanga et al. 2023], do modelo de produção (orgânico ou convencional) [Shaaban 2023] ou representados como uma entidade econômico-social [Orach and Schlüter 2020]. Os agentes públicos monitores de políticas públicas são representados explicitamente em [Emami et al. 2024] e [Orach and Schlüter 2020]. Outros atores relevantes representados nesses modelos são agentes políticos [Orach and Schlüter 2020], entidades ambientalistas [Shaaban 2023], entidades portadoras de inovação e agentes que representam coletividade como associações, cooperativas etc. [Sanga et al. 2023]. Os conflitos modelados colocam de um lado agentes do setor produtivo com metas de curto prazo e do outro, agentes públicos ou privados reguladores ou conservacionistas com metas de longo prazo [Emami et al. 2024, Shaaban 2023].

Em termos de modelagem espacial empírica de sistemas sócio-agro-ambientais um desafio se impõe. Trata-se da decisão de modelar o comportamento dos agentes de forma *ad hoc* ou baseado em teorias sociais. Destacam-se nos modelos *ad hoc* os estudos sobre difusão da inovação [Emami et al. 2024], propriedades emergentes espaciais a partir de eventos extremos [Zhang et al. 2018], estudos do efeito de subsídios para serviços ecossistêmicos [Shaaban 2023], e o estudo comparativo entre ações *top-down* e *bottom-up* visando o desenvolvimento de sistemas inovadores resilientes às mudanças climáticas [Sanga et al. 2023]. Esses modelos apresentam a vantagem de representar fielmente o fenômeno modelado, mas são de difícil generalização para outros casos.

Recentemente, tem crescido o desenvolvimento de modelos amparados em teorias sociais, com destaque para a teoria do prospecto, abordagem da ação racional, teoria fundamentada, teoria do comportamento planejado, aprendizagem por reforço e as teorias da escolha racional e da racionalidade limitada [Bartkowski et al. 2022, Schlüter et al. 2017]. O uso de teorias sociais como suporte à modelagem comportamental dos agentes permite o desenvolvimento de modelos mais robustos, com maior capacidade explicativa, comparáveis a outros modelos baseados no mesmo arcabouço teórico,

além de possibilitar a integração, avaliação e evolução das teorias comportamentais.

Observa-se, portanto, que a meta dos modelos baseados em agentes é explorar cenários onde os subsídios e intervenções do poder público sejam efetivos, que haja viabilidade econômica da atividade agrícola e que as pressões sobre os recursos naturais sejam mínimas [Haensel et al. 2023]. Embora essa abordagem seja consolidada internacionalmente, nota-se a ausência de estudos nacionais que apliquem tais modelos para simular a diversidade da produção agropecuária. Além disso, o uso crescente de teorias sociais como suporte para a modelagem comportamental dos agentes evidencia uma tendência atual. Em geral, a maioria dos modelos se dedica a identificar fatores-chave para a difusão de tecnologias conservacionistas ou aumento da adesão a políticas públicas.

Este trabalho visa contribuir para a literatura, sobretudo nacional, no processo de construção de modelos computacionais para análise da emergência de padrões de diversidade da produção agrícola a partir das decisões dos produtores rurais em escala de propriedade. Outro diferencial desta pesquisa é a modelagem do comportamento dos produtores rurais baseada na Teoria do Comportamento Planejado, considerando variáveis climáticas, contexto econômico, influência de políticas públicas e interações com produtores vizinhos.

3. Material e Métodos

3.1. Área de estudo

Dos municípios com menor extensão territorial no Território de Planejamento Baixo São Francisco, Sergipe, Santana do São Francisco se destaca na diversidade do valor da produção de culturas temporárias a partir do índice de Shannon, mas, sobretudo, das culturas permanentes [Silva et al. 2022]. O município, então, foi escolhido como unidade piloto devido à sua reduzida extensão territorial (46.340 km^2), permitindo levantamento do uso da terra a partir de campanhas de campo no tempo disponível.

O município faz parte do perímetro irrigado do Platô de Neópolis, abrigando empreendimentos rurais de produção de alimentos (Fig. 1). A produção de cana visa atender demanda da Usina Taquari, a produção de frutas atende tanto o mercado estadual quanto nacional, com destaque para a produção de coco verde irrigado. Na área municipal não coberta pelo perímetro irrigado, predomina a agricultura familiar, com destaque para a produção animal, mandioca, feijão e milho, com algumas iniciativas na produção de hortaliças e melancia.

3.2. Teoria do Comportamento Planejado

Tomamos como embasamento teórico para a modelagem do comportamento do produtor rural a Teoria do Comportamento Planejado (TCP) [Ajzen 1991]. A TCP, proposta por [Ajzen 1991], analisa o comportamento do agente em função de três constructos principais, a *atitude* ou sua própria opinião frente à diversificação agrícola, a *norma social* ou opinião de outros atores sociais sobre a diversificação, e o *Controle Comportamental Percebido (CCP)*, que é a percepção do agente sobre sua capacidade (e.g., recursos financeiros, humanos e materiais) de efetivamente diversificar sua propriedade [Senger et al. 2017]. Esses constructos combinados linearmente indicam o nível de intenção à diversificação do produtor, que levando em consideração o seu CCP elabora

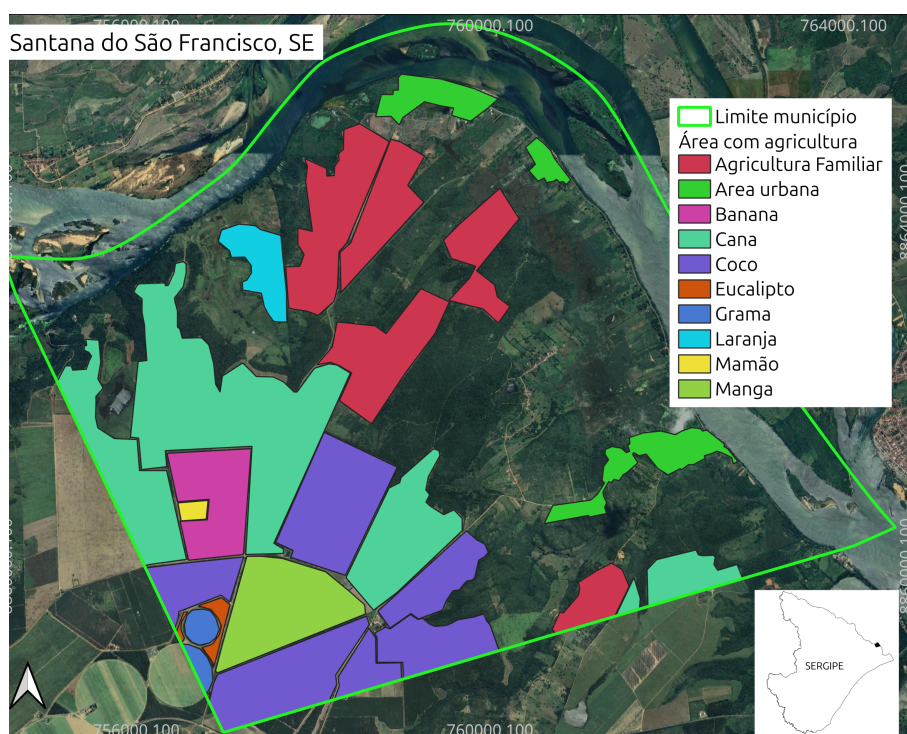


Figura 1. Município de Santana do São Francisco, Sergipe, e suas principais áreas de culturas permanentes e temporárias. Fonte: pesquisa de campo elaborada pelos autores.

as ações possíveis (e.g., alocar novas culturas na sua propriedade caso tenha espaço e recursos para tal).

Para auxiliar a identificação dos fatores relevantes para os constructos da TCP foram realizadas entrevistas com os produtores rurais do município segundo uma versão adaptada de formulário proposto por [Senger et al. 2017]. O formulário foi elaborado após entrevistas exploratórias com instituições dos setores público e privado locais.

3.3. Modelagem da produção baseada nos parâmetros climáticos

O modelo empírico espacial baseado em agentes foi proposto considerando elementos como subsistemas climáticos, econômicos e de políticas públicas com simulações para os próximos 15 anos, tendo 2023 como ano de referência. Para o clima consideramos as variáveis precipitação, umidade e temperatura, estimados a partir das séries históricas do INMET disponíveis para o município. Os valores simulados para essas variáveis seguiram a função de distribuição de probabilidade lognormal para a precipitação, normal para a temperatura e beta para simulação da umidade [Dressler et al. 2019].

O subsistema econômico considera valores futuros dos preços dos produtos agrícolas de acordo com estimativas para quinze anos, elaboradas a partir das séries temporais dos preços por unidade estimados a partir de modelos ARIMA a partir das estimativas anuais do IBGE da série histórica a partir de 1995. No modelo, os preços dos produtos podem sofrer variação aleatória ao longo do período simulado. A produção de uma cultura c no tempo t , $Prod_c(t)$, será dada pela Eq. 1.

$$Prod_c(t) = P_{c, max} T_c(t) U_c(t) P_c(t) A_c(t) \quad (1)$$

$$T_{laranja}(t) = \begin{cases} 0 & \text{se } T_t < 10 \text{ ou } T_t > 40 \\ \frac{T_t-10}{10} & \text{se } 10 \leq T_t < 20 \\ 1 & \text{se } 20 \leq T_t \leq 30 \\ \frac{40-T_t}{8} & \text{se } 30 \leq T_t \leq 40 \end{cases} \quad (2)$$

$$U_{laranja}(t) = \begin{cases} 0 & \text{se } U_t < 40 \text{ ou } U_t > 90 \\ \frac{U_t-40}{10} & \text{se } 40 \leq U_t < 50 \\ 1 & \text{se } 50 \leq U_t \leq 70 \\ \frac{90-U_t}{20} & \text{se } 70 \leq U_t \leq 90 \end{cases} \quad (3)$$

$$P_{laranja}(t) = \begin{cases} 0 & \text{se } P_t < 500 \text{ ou } P_t > 2000 \\ \frac{P_t-500}{700} & \text{se } 500 \leq P_t < 1200 \\ 1 & \text{se } 1200 \leq P_t \leq 1800 \\ \frac{2000-P_t}{200} & \text{se } 1800 \leq P_t \leq 2000 \end{cases} \quad (4)$$

onde $Prod_{c, max}$ é a produção máxima por hectare, $T_c(t)$, $U_c(t)$ e $P_c(t)$ são funções de temperatura, umidade e precipitação para cada cultura que assumem valores no intervalo $(0, 1]$, de forma que quando todas as condições climáticas estão favoráveis à cultura essas três funções assumem valor igual a um e consequentemente atingem a produção máxima. Por exemplo, as Eqs. 2-4 mostram essas funções para a cultura da laranja considerando os valores T_t , P_t e U_t simulados no tempo t . A variável A_c corresponde a área ocupada pela cultura na propriedade no tempo t . Em cada época, é calculado o valor do faturamento $F(t)$ do produtor baseado na produção $Prod(t)$, valor por unidade V_c e taxa de variação δ dos preços por cultura, $F(t) = \sum_c Prod_c(t) * V_c * \delta$.

Para esta primeira versão do modelo, implementamos uma proposta de política pública de incentivo à diversificação na propriedade rural baseada em incentivos econômicos, a exemplo do que vem sendo feito na União Europeia [Ziv et al. 2020]. Assim, o governo repassa um bônus (percentual do faturamento do empreendimento rural) para os produtores caso o município atinja um determinado nível de diversificação da produção agrícola. Cada período de simulação corresponde a um ano.

As informações das unidades produtivas e seu respectivo mapa georreferenciado foram elaborados a partir de levantamentos de campo entre setembro e novembro de 2024 referente ao estado das unidades produtivas em 2023. Assim, 2023 será a referência inicial do modelo, e os demais anos até 2038 serão simulados. Os valores simulados serão validados e calibrados à medida que obtivermos dados das estimativas do IBGE para os anos simulados, a partir de 2024, pois será possível calcular a diversidade na escala regional a partir das estimativas anuais do IBGE ou a partir do mapeamento de culturas por imagem de satélite e técnicas de sensoriamento remoto.

4. Percepção dos produtores e modelo comportamental

Foram entrevistados seis produtores rurais familiares e dois empreendimentos do perímetro irrigado. Observou-se que a área de cultivo não é um impeditivo para a diversificação da propriedade, que os produtores possuem conhecimento para diversificar, e que os principais impeditivos seriam a ausência de recursos humanos e financeiros para conduzir mudanças na propriedade. Logo, conclui-se que os entrevistados, principalmente os pequenos agricultores, possuem intenção de diversificar, embora ainda não tenham elaborado planos para isso. Em termos da norma subjetiva, opinião/percepção de atores relevantes para os agricultores, observou-se que embora a rede social dos agricultores não o pressionem sobre a diversificação da propriedade, quase a unanimidade dos produtores afirmaram que os produtores vizinhos (atores sociais mais relevantes) aprovavam a iniciativa. Sobre o Controle Comportamental Percebido (CCP) temos que os produtores possuem confiança e conhecimento para diversificação, mas demonstram desconfiança, certa dependência de terceiros e pouco controle sobre tal iniciativa em função da necessidade de recursos financeiros e humanos.

Neste modelo, o único agente é o produtor rural e o ambiente considerado são suas propriedades que podem desenvolver atividade irrigada (cana, coco, mamão, eucalipto, manga, banana, laranja e limão, maracujá), se estiver no perímetro irrigado, ou de sequeiro (laranja, limão, mandioca, maracujá, milho, feijão) nas outras áreas. Cada cultura tem uma área mínima de cultivo. Não previmos no modelo a expansão da área cultivada, nem a fusão ou desmembramento das propriedades.

Algoritmo 1 Comportamento do agente - produtor rural

Requer: T, U, P – Dados climáticos da área de estudo

Requer: $Preços$ – Lista de preços correntes dos produtos

Requer: L – Lista dos produtos cultivados por cada produtor

Repita

$Prod_c(t) \leftarrow P_t, T_t, U_t$ Calcula produção por produtor

$F(t) \leftarrow Preços$ Calcula o faturamento baseado nos preços correntes

Se Então *Há política de incentivo?*

$$Atitude(t) = (1/2) \left\{ \frac{(G_{sim}(t) - G(t) - C_{div}(t))}{G(t)} + 1 \right\}$$

$$Norma_social(t) = Média\ Intenção\ vizinhos$$

$$CCP(t) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{G(t) - G(t-1)}{G(t-1)} + 1 \right\} \text{ Controle Comportamental Percebido}$$

$$Intenção(t) = (Atitude(t) + Norma_social(t) + CCP(t))/3$$

Se Então $Intenção > random_number$

Escolhe cultura mais rentável

Aloca uma área da propriedade

Implementa essa nova cultura

Fim Se

Fim Se

Até $t = t_{máximo}$

O comportamento do produtor baseado na TCP seguiu a proposta de [Muelder and Filatova 2018] (Algoritmo 1). A *Atitude* foi definida em função do ganho total, $G(t) = F(t) + I_{div}(t)$, (faturamento $F(t)$ + incentivo governamental $I_{div}(t)$), do ganho simulado, $G_{sim}(t)$, que corresponde à média dos lucros esperados simulados,

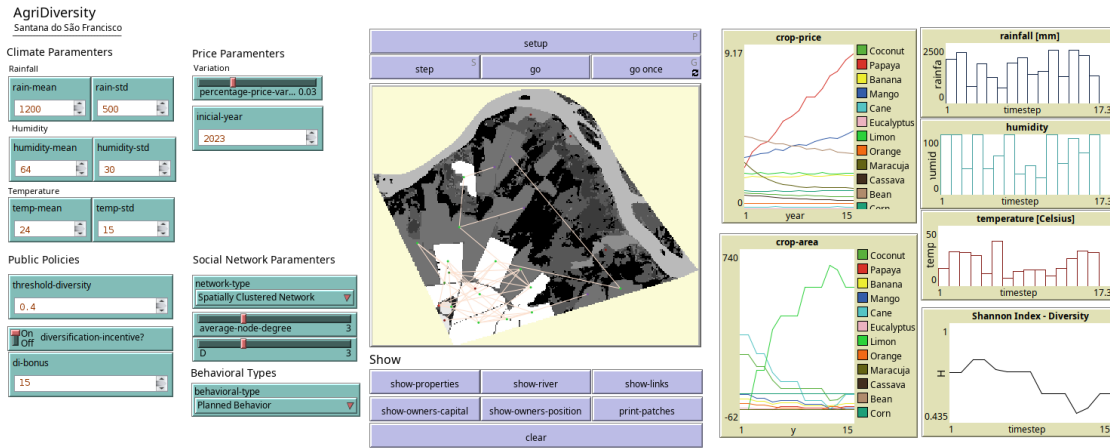


Figura 2. Tela inicial da implementação Netlogo do modelo proposto. Fonte: elaborado pelos autores.

incluindo os incentivos e do custo de diversificação $C_{div}(t)$ que equivale a 10% do faturamento $F(t)$. Para calcular os valores de faturamento e incentivo que compõem $G_{sim}(t)$, simula-se a realocação de 25% da área produtiva para culturas alternativas, estimando o faturamento e o incentivo resultantes de cada nova configuração.

No constructo *Normal social* o agente avalia a média das intenções dos vizinhos de acordo com as conexões de sua rede social. A vizinhança é determinada pelo estabelecimento da conexão entre os proprietários (agentes) segundo o modelo de rede social clusterizada por proximidade geográfica. Assim, proprietários vizinhos tendem a estar conectados e influenciarem uns aos outros. No *Controle Comportamental Percebido* (CCP) o produtor avalia se tem área cultivada disponível para diversificação e se tem recursos para esta mudança, ou seja se o faturamento aumentou no último ciclo. Ao final, a *Intenção* em diversificar no tempo t será determinada pela equação $INTENCAO_t = (CCP_t + Norma\ social_t + Atitude_t)/3$. Assim, o agricultor *decide sua ação* baseado na disponibilidade de área e recursos disponíveis para adotar uma outra cultura mais rentável e compatível com sua propriedade (irrigada ou não).

4.1. Implementação Netlogo

A Fig. 2 mostra a tela inicial da implementação Netlogo do modelo proposto. A partir deste modelo, é possível avaliar o efeito das mudanças nos parâmetros climáticos, na taxa de variação aleatória dos preços de mercado dos produtos, o limiar que define a partir de qual valor de diversidade os produtores passam a receber o bônus, o incentivo (bônus) da política pública hipotética avaliada e média do grau da rede social especialmente clusterizada. O modelo foi configurado para 15 *ticks*, ou simulação de 15 anos. As ações na escala micro serão monitoradas a partir da variável de diversidade baseada na entropia de Shannon, calculada para todo o município de Santana do São Francisco, SE. A produção de cada cultura também poderá ser acompanhada, assim como os valores simulados para precipitação, umidade e temperatura.

4.2. Experimento

O modelo empírico espacial simplificado foi parametrizado para que fossem avaliadas diversas combinações dos parâmetros relativos ao limite de diversidade a partir do

qual o proprietário teria direito ao bônus (0.4 e 0.6), desvio padrão dos parâmetros climáticas, precipitação (375 e 500), umidade (8 16 e 24) e temperatura (0.8 e 10), bônus (0(*semincentivos*), 10%, 20% e 30%), que corresponde ao percentual do incentivo financeiro em função do faturamento do produtor rural, e a taxa de variação dos preços dos produtos (0.03 e 0.50). Os parâmetros climáticos foram definidos de forma que refletissem a situação atual (estabelecido a partir da série histórica do município) e choques climáticos extremos a partir do substancial aumento dos desvios padrão.

Para cada combinação dos parâmetros foram realizadas 30 simulações, sendo que foram analisadas as médias dos índices de diversidade de Shannon para cada um dos quinze anos simulados, considerando o ano de referência o ano de 2023. Todas as séries temporais das médias dos índices foram comparadas a partir de testes de correlação cruzada visando identificar diferenças estatisticamente significativas entre as séries simuladas de 2024 a 2038.

5. Resultados e Discussão

Tomamos para análise duas parametrizações que geraram a médias da série temporal com a menor correlação-cruzada positiva (não ocorreram correlações negativas) para LAG = 0, 0.711 com $p - valor = 0.003$, que correspondem as seguintes configurações: uma com bonus de 20%, limite de diversidade no valor de 0.4, desvios-padrão para precipitação, temperatura e umidade nos valores respectivos de 500, 0.8 e 24, com taxa de variação de preço dos produtos igual a 0.5; a outra parametrização possui os seguintes valores respectivos, 0.4, 30%, 375, 10,8 e 0.5. Consideramos constantes as médias de precipitação (990 ± 375), temperatura (24 ± 0.8) e umidade (94 ± 8).

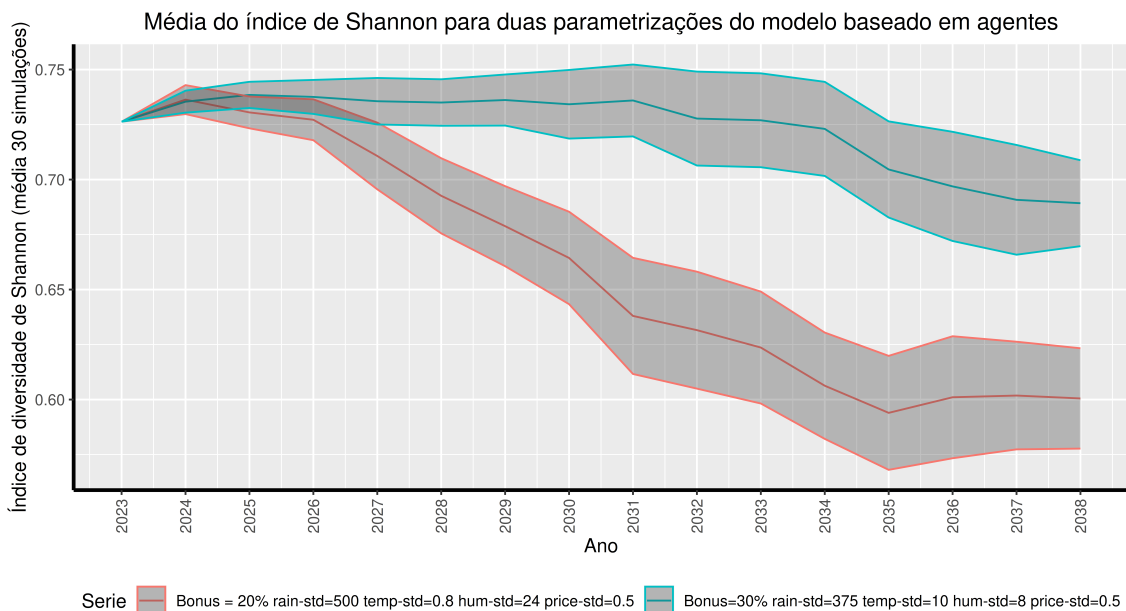


Figura 3. Curvas das médias dos índices de diversidade de Shannon simulados para duas diferentes parametrizações com intervalos de confiança ao nível de 95%. Fonte: resultados da pesquisa.

As duas curvas das médias das séries temporais simuladas podem ser observadas no gráfico da Fig. 3. Observa-se que ambas as curvas apresentam tendência de decresci-

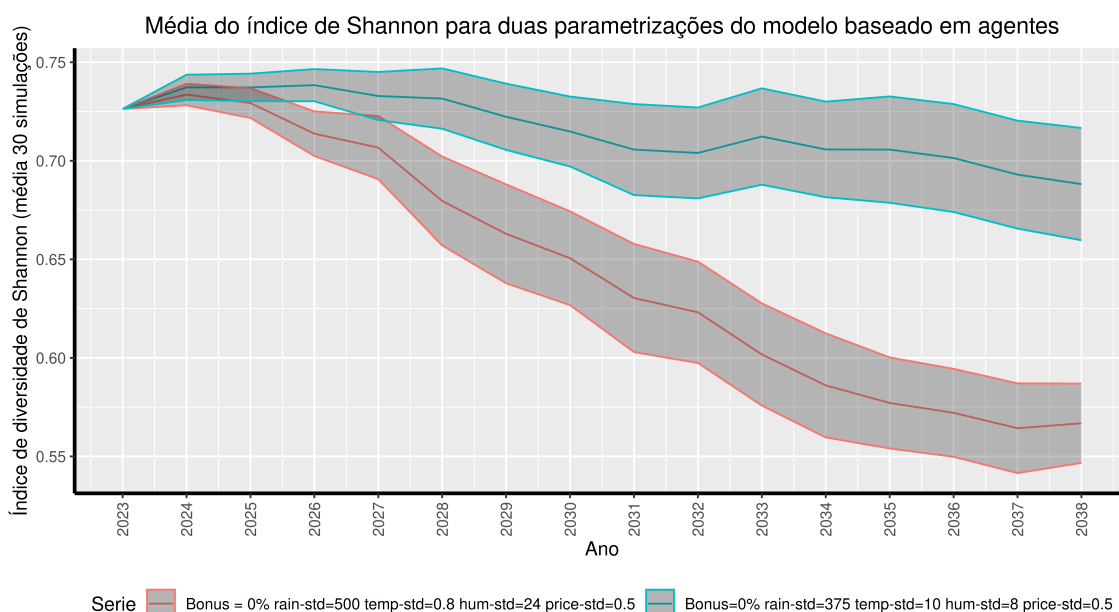


Figura 4. Curvas das médias dos índices de diversidade de Shannon simulados para as duas diferentes parametrizações exceto o bônus da política pública que foi eliminado ($bonus = 0$) com intervalos de confiança ao nível de 95%. Fonte: resultados da pesquisa.

mento da diversidade na escala municipal, que é uma tendência atual [Silva et al. 2022], mesmo com incentivos de 20% e 30% da política pública hipotética. A série temporal com bônus de 20% apresenta essa tendência mais acelerada, provavelmente devido aos maiores choques climáticos simulados para precipitação (desvio padrão igual a 500) e umidade (desvio padrão igual a 24). A segunda série, com bônus de 30% apresentou decréscimo mais suave que poderia ser atribuído ao maior bônus, mas que provavelmente se deve ao menor choque climático. Isto observamos no gráfico da Fig. 4, onde foram avaliadas as séries temporais para a simulação dos mesmos parâmetros das séries avaliadas, mas dessa vez sem o bônus. E aqui observamos que sem a política pública hipotética de incentivos, o comportamento das curvas é praticamente o mesmo. Isso sugere que para este sistema simulado o efeito dos choques climáticos são mais proeminentes que o efeito dos incentivos públicos.

6. Conclusões e Trabalhos Futuros

Os resultados indicaram que apenas os incentivos financeiros não foram suficientes para alterar significativamente os padrões de produção, pois mesmo com variações nos valores do bônus (de 0% a 30% do faturamento), a diversificação agrícola não apresentou mudanças relevantes em comparação com cenários sem qualquer incentivo. Um dos achados relevantes foi o impacto das condições climáticas na decisão dos produtores. Quando submetidos a cenários de alta variabilidade em precipitação e umidade, a tendência foi de redução da diversificação ao longo do tempo. Isso sugere que fatores ambientais podem influenciar mais as escolhas dos produtores do que os estímulos econômicos propostos. As entrevistas com os agricultores revelaram que, embora muitos tenham intenção de diversificar, enfrentam barreiras práticas, como falta de recursos financeiros, dependência

de assistência técnica e limitações na mão de obra. Esses obstáculos reduzem o chamado Controle Comportamental Percebido (CCP), um dos pilares da TCP, indicando que políticas públicas baseadas apenas em subsídios podem não ser suficientes. Diante dos resultados, fica evidente que uma estratégia mais eficaz exigiria uma abordagem integrada, combinando incentivos financeiros com suporte técnico, capacitação e políticas de adaptação climática. O envolvimento dos produtores no desenho dessas políticas garante que suas necessidades e limitações sejam consideradas. Como o modelo desenvolvido considera a simplificação de dinâmicas territoriais e a ausência de outros atores relevantes (como cooperativas e órgãos ambientais), futuros estudos poderiam incorporar essas variáveis para simulações mais realistas. No entanto, os resultados já apontam que, para promover a diversificação agrícola de forma sustentável, é preciso ir além de incentivos econômicos, considerando fatores climáticos, sociais e estruturais que moldam as decisões dos produtores rurais.

Agradecimentos

Agradecemos o suporte da Fundação de Apoio à Pesquisa e à Inovação Tecnológica do Estado de Sergipe (FAPITEC/SE) através do seu programa institucional de bolsas de iniciação científica e de desenvolvimento tecnológico e inovação.

Referências

- Ajzen, I. (1991). The theory of planned behavior. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 50(2):179–211.
- Bartkowski, B., Schübler, C., and Müller, B. (2022). Typologies of European farmers: approaches, methods and research gaps. *Reg Environ Change*, 22(43):–.
- Bastidas-Orrego, L. M. et al. (2023). A systematic review of the evaluation of agricultural policies: Using prisma. *Heliyon*, 9(10):e20292.
- Dressler, G. et al. (2019). Implications of behavioral change for the resilience of pastoral systems—lessons from an agent-based model. *Ecological Complexity*, 40(Part B):100710.
- Emami, S., Dehghanisani, H., and Hajimirzajan, A. (2024). Agent-based simulation model to evaluate government policies for farmers’ adoption and synergy in improving irrigation systems: A case study of Lake Urmia basin. *Agric. Water Manag.*, 294:108730.
- Fuentes, M. A., Tessone, C. J., and Furtado, B. A. (2022). Public policy modeling and applications 2021. *Complexity*, (9764151):1–3.
- Haensel, M., Schmitt, T. M., and Bogenreuther, J. (2023). World of cows - exploring land-use policies for a dairy-farm world.
- Malawska, A. and Topping, C. J. (2016). Evaluating the role of behavioral factors and practical constraints in the performance of an agent-based model of farmer decision making. *Agricultural Systems*, 143:136–146.
- Mellaku, M. T. and Sebsibe, A. S. (2022). Potential of mathematical model-based decision making to promote sustainable performance of agriculture in developing countries: A review article. *Heliyon*, 8(2):e08968.

- Muelder, H. and Filatova, T. (2018). One theory - many formalizations: Testing different code implementations of the theory of planned behaviour in energy agent-based models. *JASSS*, 21(4).
- Orach, K. and Schlüter, M. (2020). Polisea: model of policy – social ecological system adaptation.
- Paschoalino, P. A. T. and Parré, J. L. (2023). Diversificação e produção agrícola no Brasil uma análise por modelos espaciais. *Revista de Política Agrícola*, 32(1):121–140.
- Paulus, A. et al. (2022). Landscape context and farm characteristics are key to farmers' adoption of agri-environmental schemes. *Land Use Policy*, 121:106320.
- Piedra-Bonilla, E., Braga, C., and Braga, M. (2020). Diversificação agropecuária no Brasil: conceitos e aplicações em nível municipal. *Rev. de Agron. e Agro.*, 18(2):1–28.
- Polhill, J. G. and Rouchier, J. (2023). Policy modelling requires a multi-scale, multi-criteria and diverse-framing approach. *RofASSS*.
- Rausser, G. and Just, R. (2022). *Principles of Policy Modeling in Food and Agriculture*, chapter 1. Springer, Cham.
- Sanga, U., Berrío-Martínez, J., and Schlüter, M. (2023). Modelling agricultural innovations as a social-ecological phenomenon. *SESMO*, 5:18562.
- Schlüter, M. et al. (2017). A framework for mapping and comparing behavioural theories in models of social-ecological systems. *Ecological Economics*, 131:21–35.
- Senger, I., Borges, J. A. R., and Machado, J. A. D. (2017). Using the theory of planned behavior to understand the intention of small farmers in diversifying their agricultural production. *Journal of Rural Studies*, 49:32–40.
- Shaaban, M. (2023). Viability of the social–ecological agroecosystem (visa). *SoftwareX*, 22:101360.
- Silva, M. A. S. d. et al. (2022). Tracking the connection between Brazilian agricultural diversity and native vegetation change by a Machine Learning approach. *IEEE Latin America Transactions*, 20(11):2371–2380.
- Will, M. et al. (2021). How to make socio-environmental modelling more useful to support policy and management? *People and Nature*, 3(3):560–572.
- Wittstock, F. et al. (2022). Understanding farmers' decision-making on agri-environmental schemes: A case study from Saxony, Germany. *Land Use Policy*, 122:106371.
- Zhang, R. et al. (2018). Projecting cropping patterns around poyang lake and prioritizing areas for policy intervention to promote rice. *Land Use Policy*, 74:248–260.
- Ziv, G. et al. (2020). Bestmap: behavioural, ecological and socio-economic tools for modelling agricultural policy. *Research Ideas and Outcomes*, 6(e52052).