

## **DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E INOVAÇÃO EM ÁREAS RURAIS: UMA ABORDAGEM BASEADA EM MODELO MATEMÁTICO E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

### **Herbert Kimura**

Doutor em Administração de Empresas pela Fundação Getulio Vargas – FGV/SP  
Doutor em Administração pela Universidade de São Paulo – USP  
Professor de Lato Sensu em Administração da Universidade Presbiteriana Mackenzie  
E-mail: [herbertk@terra.com.br](mailto:herbertk@terra.com.br) [Brasil]

### **Roberto Giro Moori**

Doutor em Engenharia pela Universidade de São Paulo – USP  
Professor do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Administração de Empresas da Universidade Presbiteriana Mackenzie  
E-mail: [roberto.moori@pq.cnpq.br](mailto:roberto.moori@pq.cnpq.br) [Brasil]

### **Luiz Carlos Jacob Perera**

Doutor em Administração pela Universidade de São Paulo – USP  
Professor colaborador do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Ciências Contábeis da Universidade Presbiteriana Mackenzie  
E-mail: [jperera@mackenzie.br](mailto:jperera@mackenzie.br) [Brasil]

### **Resumo**

No contexto de diversidade de perspectivas para o estudo de desenvolvimento sustentável, este artigo enfoca uma análise quantitativa baseada na modelagem matemática e na implementação computacional de um algoritmo. O modelo construído teve como objetivo entender e analisar a dinâmica de difusão de inovações como, por exemplo, a propagação de conhecimentos ou tecnologias para o plantio de culturas e a criação de animais entre pequenos produtores rurais. Os principais resultados obtidos pela simulação foram: a) as características da tecnologia parecem não ter influência na velocidade de adoção. Este resultado pode estar associado ao fato de as atividades agropecuárias já apresentarem elevado nível de risco; b) as conexões sociais nas redes de agricultores surgem como importantes instrumentos de difusão. As conexões sociais, em geral, envolvem investimentos de baixo custo, uma vez que elas normalmente já existem entre os produtores. Por fim, os resultados sugerem que esforços de divulgação da tecnologia, subsídios governamentais, fortalecimento das relações entre produtores e aumento das interações dentro da rede social constituem as principais estratégias para aumento da velocidade de adoção de tecnologia.

**Palavras-chave:** Inovação tecnológica; Difusão da tecnologia; Agronegócios; Gestão do conhecimento; Desenvolvimento sustentável.

## 1 INTRODUÇÃO

O progresso para o desenvolvimento sustentável requer uma composição adequada de instrumentos e instituições capazes de fomentar políticas tecnológicas, mercadológicas e regulatórias efetivas (ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT, 2001). Considerando a complexidade e a amplitude do tema, a análise a partir de diversas perspectivas torna-se relevante para que iniciativas construtivas possam ser implementadas, contemplando os variados aspectos econômicos, sociais e ambientais do desenvolvimento sustentável.

Nesse contexto de diversidade de perspectivas, este artigo apresenta uma abordagem pouco usual em estudos realizados no Brasil sobre desenvolvimento sustentável. O artigo enfoca uma análise quantitativa baseada na modelagem matemática e na implementação computacional de um algoritmo que permite analisar a dinâmica de difusão de inovações com aplicações, por exemplo, na propagação de conhecimentos ou tecnologias para o plantio de culturas e a criação de animais entre pequenos produtores rurais. Hersh (2006) destaca que, apesar de grande parte dos estudos em desenvolvimento sustentável envolverem abordagens ‘*soft*’, com análises menos quantitativas, dado o caráter complexo e a natureza interativa dos problemas envolvidos em questões de desenvolvimento sustentável, o uso de métodos matemáticos e computacionais pode ser vantajoso.

Conforme sugere Stigson (2000), novas tecnologias são elementos-chave para atingir um desenvolvimento sustentável. Contudo, as interligações entre ambiente e tecnologia ainda são pouco compreendidas. Desta maneira, a investigação da difusão de tecnologias pode contribuir para um maior conhecimento sobre o potencial de políticas e incentivos na sustentabilidade de uma região. Em especial, considerando as características da agropecuária brasileira, formada não somente por grandes produtores com acesso a tecnologia e investimentos, como também por pequenos fazendeiros, este trabalho permite investigar variáveis que afetam a propagação de conhecimentos ou de tecnologia entre pequenos produtores.

Uma vez que desequilíbrios em uma sociedade podem ser causados por diversos fatores, incluindo êxodo rural, torna-se importante identificar mecanismos que permitam o desenvolvimento sustentável de áreas rurais, implicando uma maior fixação de fazendeiros e um melhor aproveitamento e conservação de recursos naturais. Sacquet (2005), por exemplo, alerta para a estimativa de que em 2025, metade da população que vive em cidades estará em países em desenvolvimento.

Os desafios que pequenos produtores enfrentam para acompanhar o rápido desenvolvimento tecnológico não são restritos ao Brasil. De acordo com Murray (2005), produtores rurais de alimentos nos Estados Unidos e na Europa têm enfrentado pressões provenientes de diversos setores, seja de consumidores exigindo menores preços, seja de supermercados – pelo aumento de seu grau de influência e maior poder de barganha, seja de ambientalistas, que demandam maior controle do desgaste ambiental.

Através da simulação do modelo desenvolvido, identifica-se que subsídios do governo e esforços de divulgação representam importantes aspectos para a difusão de tecnologias entre produtores rurais. Além disso, os resultados sugerem que os impactos de variáveis relativas às redes sociais podem ter mais importância do que as características de retorno e risco da tecnologia no processo de tomada de decisão de adoção da inovação. Desta maneira, fomentar o fortalecimento de conexões na rede social bem como o aumento da interação entre os produtores pode reduzir consideravelmente os gastos com subsídios, gerando economias para a sociedade e melhor alocação de recursos.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Segundo o World Commission on Environment and Development (1987), desenvolvimento sustentável é ter as necessidades atuais sem comprometer a habilidade de as futuras gerações de obtê-las. Dentro do contexto de áreas rurais com atividades agropecuárias, o conceito de desenvolvimento sustentável é relevante, uma vez que os desmatamentos, a degradação do solo e a má utilização dos recursos naturais podem inviabilizar futuras gerações de produtores.

Em termos de representatividade, nos países em desenvolvimento, a atividade agrícola representa 12% do PIB, e cerca de 50% da população depende diretamente da agricultura (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2004). Em termos de potencial para promoção de crescimento, mesmo uma modesta taxa de crescimento no setor agrícola pode alavancar significativamente a economia de um país (HAZELL; HADDAD, 2001). Assim, o uso adequado de tecnologias que aumentem a produtividade torna-se fator determinante para a diminuição da pobreza em países em desenvolvimento. De fato, Costanza e Daly (1992) estabelecem a promoção do progresso de tecnologias de aumento de eficiência como princípio para que as nações pobres possam ter um maior nível de conforto.

Ressalta-se que ao, mesmo tempo em que promove ganhos de produtividade, a tecnologia também pode ocasionar maior destruição do ambiente na forma de maior poluição, por exemplo (VOLLENBROEK; WETERINGS; BUTTER, 1998). Portanto, a tecnologia em uma visão de sustentabilidade agrícola, adaptando Doering (2004), deve promover a produção sem a degradação da capacidade de o sistema natural proporcionar o atendimento das necessidades dos fazendeiros ao longo do tempo.

Frasen et al. (2005) afirmam que a biotecnologia moderna, aplicada à agricultura, representa um desafio comum a países e sociedades, dada a necessidade de um processo de tomada de decisão cuidadoso que assegure aos indivíduos o aproveitamento dos benefícios da tecnologia e, concomitantemente, minimize ou evite potenciais custos. Segundo Munda (1997), enquanto a teoria econômica tradicional advoga que o desenvolvimento implica mudanças quantitativas, medidas pelo PIB, e mudanças qualitativas, através da evolução de uma base agrícola para uma base industrial capitalista, as teorias de desenvolvimento sustentável vêm como objetivo uma harmonização de aspectos econômicos e ambientais.

Dentro de uma discussão que se afasta dos modelos econômicos tradicionais, podem ser levantadas escolas de pensamento distintas que estabelecem o paradigma de desenvolvimento humano: (i) a abordagem voltada às necessidades básicas proposta por Haq (1995) e; (ii) a abordagem que liga capacitações, escolhas, renda e controle sobre as rendas, proposta por Sen (1999). Nesse paradigma, argumentos econômicos de eficiência, voltados para a maximização de utilidade individual dos agentes, são desafiados por investimentos em capital humano tais como programas voltados a educação, nutrição e saúde, que promovem um crescimento econômico generalizado. Esses programas, eventualmente, podem ser a base para o desenvolvimento sustentável.

Para Toman (1994), de forma simplificada, três conceitos de sustentabilidade podem ser derivados: (i) o presentismo neoclássico, no qual a geração de riqueza pode ser analisada através do critério do valor presente e as diferentes formas de capital são consideradas substitutas; (ii) o igualitarismo neoclássico, no qual existe a substitutibilidade de capital, porém pesos maiores são atribuídos às necessidades futuras em comparação com os pesos atribuídos pelo valor presente e; (iii) o organicismo ecológico, no qual a substitutibilidade entre o capital

natural e outros ativos é limitada, estendendo o conceito de justiça entre gerações, contemplando seres humanos e as espécies como um todo.

Chambers (1992) argumenta que três processos não sustentáveis ocorrem em áreas rurais: (i) crescimento populacional que ocorre mais acentuadamente em regiões rurais frágeis; (ii) pressões e invasões por instituições urbanas que tornam zonas rurais menos seguras e; (iii) respostas da população rural pobre às pressões que implicam uma exploração insustentável dos recursos locais. Desta maneira, ações dentro da comunidade rural devem envolver pelo menos os seguintes objetivos (CHAMBERS, 1992): (i) estabilização da população, através, por exemplo, da redução dos benefícios do trabalho infantil; (ii) redução de migração devido às dificuldades de sobrevivência nas áreas rurais; (iii) proteção legal, política e física para assegurar os direitos dos proprietários aos recursos e; (iv) avaliação de longo prazo para evitar exploração predatória dos recursos.

Destaca-se, portanto, a importância da inovação através do uso de novas tecnologias de plantio e criação nas áreas rurais. Maior conscientização e maior uso de tecnologia podem assegurar maior produtividade e menor degradação dos recursos. Indiretamente, a tecnologia pode ser fundamental para a consecução de objetivos citados anteriormente como, por exemplo, a diminuição da importância do trabalho braçal, reduzindo os índices de natalidade nessas áreas.

Segundo Scherr (1997), as inovações tecnológicas e institucionais aumentaram consideravelmente a capacidade de produção mundial de alimentos, porém, práticas agrícolas inadequadas, exploração da vegetação e desflorestamento têm contribuído para a degradação das terras. Mais alarmantes ainda são os indicadores de uso da terra. Enquanto se espera a continuação de altos índices de desflorestamento, estima-se que o crescimento da área cultivada seja apenas de 12% entre 1997 e 2010. Além disso, a área cultivável per capita tem apresentado declínio considerável, passando de 0,5 hectares por pessoa em 1950 para 0,3 hectares por pessoa em 1990, esperando-se que atinja níveis entre 0,1 a 0,2 hectares por pessoa em 2050 (SCHERR, 1997).

Assim, a contínua inovação nas áreas rurais torna-se relevante frente à rápida degradação. Adicionalmente, programas de conscientização são necessários, não somente para o aumento da velocidade de difusão de novas tecnologias como também para a diminuição de atividades e procedimentos prejudiciais ao ambiente e à terra. Em especial, com relação à difusão de tecnologias, os estudos de Rogers (1962) e de Bass (1969) constituem trabalhos seminais sobre os processos de difusão. Em particular, considerando o modelo de Bass (1969), fatores externos e internos podem afetar a difusão de um novo produto ou uma nova tecnologia.

Dentre os fatores externos, programas de *marketing* ou divulgação podem motivar a adoção de tecnologias. Dentre os fatores internos, o contágio de não-usuários a partir de interação com usuários representa o principal instrumento de difusão de tecnologias.

Considerando a modelagem a partir de contágio, a propagação de informação e de opiniões através do boca-a-boca entre os indivíduos dentro de uma rede social pode constituir importante mecanismo de difusão de tecnologias. Conforme Brass (1984), a abordagem das redes sociais tem como premissa o fato de as interações sociais aprimorarem ou restringirem o acesso a recursos. A partir das experiências seminais de Milgran (1967) sobre cadeias de relacionamento mútuo, o estudo quantitativo de redes sociais tem sido aplicado a uma variedade de problemas como, por exemplo, conforme explicita Granovetter (1973), em pesquisas em teoria de administração.

Com relação à difusão dentro da rede social, Collier (1998) estabelece que a interação social incorpora um capital social e pode gerar três externalidades: (i) o conhecimento sobre o comportamento dos outros agentes; (ii) o conhecimento sobre o mercado e; (iii) o benefício da

ação em grupo. Com isso, a interação entre os indivíduos dentro de uma rede social pode representar um importante mecanismo de difusão de novas tecnologias. No caso de pequenos produtores, o processo de convencimento para a adoção de uma tecnologia pode ser mais eficaz através das redes sociais informais que, adaptando Podolny e Baron (1997), permitem a troca de experiências ou dicas sobre atividades e a conseqüente difusão de informações estratégicas.

### 3 MODELAGEM

Conforme já discutido, o modelo desenvolvido busca apresentar uma estrutura de análise da dinâmica de difusão de inovações como, por exemplo, a propagação de conhecimentos ou tecnologias para o plantio de culturas e a criação de animais entre pequenos produtores rurais.

No modelo proposto, inicialmente estabelece-se um mapa simplificado, no qual são distribuídos os produtores rurais. As redes sociais, estabelecidas por conexões entre os produtores, são influenciadas pela proximidade geográfica dos indivíduos. Desta forma, produtores mais próximos geograficamente possuem maior probabilidade de formarem conexões.

Além da distância geográfica, outro fator que contribui para a formação de conexões está associado com uma semelhança de comportamento. Por exemplo, produtores com perfis de gestão similares, com mesma origem cultural ou com níveis de propensão ou aversão a risco comparáveis podem ter maior afinidade, aumentando a probabilidade de formarem conexões entre si em uma rede social.

A modelagem traz ainda uma diferenciação entre conexões, distinguindo ligações fracas e fortes. Desta forma, a difusão de informação ou de tecnologias dentro da rede social depende também de a conexão entre indivíduos ser forte ou fraca. Em termos simplistas, a difusão de tecnologias torna-se mais provável quando existirem mais conexões fortes entre indivíduos na rede social. O resultado agregado, porém, pode ser mais complicado, uma vez que as relações na rede social podem tomar configurações bastante complexas. A seguir, o modelo utilizado é descrito em maiores detalhes.

#### 3.1 CONFIGURAÇÃO DO MODELO

Considera-se uma região retangular com dimensões  $L$  e  $C$ , na qual se distribuem  $N$  produtores rurais, por exemplo, agricultores ou pecuaristas. As dimensões são dadas em unidades compatíveis com o tipo de cultura predominante na região. Tendo em vista o enfoque deste artigo no desenvolvimento sustentável associado à inovação entre pequenos produtores, a área total da região, resultante do produto entre  $L$  e  $C$ , não pode ser grande em relação ao número  $N$ . Nesta configuração, obtém-se uma região marcada por vários produtores que dividem uma área relativamente pequena, configurando-se o caso de inexistência de latifúndios. Assim, o modelo é mais apropriado para pequenos agricultores ou pecuaristas que têm maior dificuldade para acessar inovações e implementar tecnologias em seu cultivo ou criação.

No modelo, esses produtores são distribuídos aleatoriamente na região retangular. Desta maneira, não se estabelecem regiões mais privilegiadas para o plantio da cultura ou para a criação do rebanho como, por exemplo, áreas com maior acesso à irrigação natural. Porém, o algoritmo pode ser adaptado para situações reais, bastando mapear o formato da região analisada e incluí-lo na modelagem.

### 3.2 FORMAÇÃO DA REDE SOCIAL

As conexões nas redes sociais facilitam a difusão de informação sobre determinada inovação. A distância geográfica dos produtores dentro da região está associada à possibilidade de conexões em uma rede social. Ou seja, os agricultores ou pecuaristas da região formam uma rede social, cujas conexões entre indivíduos podem ser inexistentes, fracas ou fortes, dependendo, dentre outros fatores, da distância geográfica entre eles.

A distância geográfica corresponde também a uma medida de semelhança de condições. Por exemplo, espera-se que produtores próximos geograficamente possuam vantagens e desvantagens competitivas semelhantes com relação à qualidade do solo, à topologia, implicando desafios semelhantes para o desenvolvimento. Apesar de os meios de comunicação atuais permitirem diversas formas de contato, supõe-se que grande parte da interação entre pequenos produtores seja facilitada pela proximidade geográfica.

A formação de conexões também está associada a uma variável que resume características comportamentais dos indivíduos. Por exemplo, indivíduos provenientes de uma mesma família, com formação escolar semelhante, com perfis frente a riscos semelhantes, devem ter valores próximos para a variável que mede as características comportamentais. Apesar de ser uma simplificação, a junção de várias características em uma única variável permite que o modelo seja explicado com mais facilidade. Eventualmente, a aplicação em uma situação real pode ser extrapolada a partir da inclusão de mais variáveis consideradas relevantes na formação das redes sociais. Portanto, no modelo, de maneira simplificada, a formação de conexões na rede social de agricultores depende de duas variáveis: (i) a distribuição geográfica entre agricultores e; (ii) a característica comportamental.

#### a) Distribuição geográfica

Cada agricultor  $i$  tem sua propriedade em um ponto  $L_i, C_i$  da área LC. Os valores desses parâmetros são gerados aleatoriamente através de uma distribuição uniforme. A distância geográfica entre dois agricultores  $i$  e  $j$  é uma medida espacial dada por uma distância euclidiana. Como fator de normalização, é utilizada a distância máxima entre dois pontos da região. Portanto, sob essas condições, o grau de proximidade geográfica  $\alpha_{ij}$  entre dois indivíduos  $i$  e  $j$  pode ser definido como:

$$\alpha_{ij} = 1 - \sqrt{\frac{(L_i - L_j)^2 + (C_i - C_j)^2}{L^2 + C^2}} \quad (1)$$

#### b) Característica comportamental

A característica comportamental  $c_i$  de cada produtor  $i$  é simulada através de realizações de uma variável aleatória com distribuição normal padrão. A distância comportamental é medida simplesmente através da diferença entre as realizações. O fator de ajuste para a normalização é dado pela diferença entre o maior e o menor valor das realizações da variável aleatória. Assim, a proximidade comportamental  $\beta_{ij}$  entre dois indivíduos  $i$  e  $j$  é, em termos matemáticos, dada por:

$$\beta_{ij} = 1 - \frac{|c_i - c_j|}{\left| \max_{n=1, \dots, N} (c_n) - \min_{n=1, \dots, N} (c_n) \right|} \quad (2)$$

A partir de  $\alpha$  e  $\beta$ , pode-se gerar uma variável que denota uma proximidade geral entre indivíduos para a determinação do grau de conexão na rede social. Supondo que a distribuição geográfica e a característica comportamental podem estar relacionadas, estabelece-se uma correlação  $\rho$  entre  $\alpha$  e  $\beta$ . Por exemplo, é razoável supor que produtores de uma determinada região tenham perfis culturais semelhantes.

Assim, a proximidade conjunta normalizada  $\gamma_{ij}$  entre dois indivíduos  $i$  e  $j$  é dada por:

$$\gamma_{ij} = \sqrt{\frac{\alpha_{ij}^2 + \beta_{ij}^2 + 2 \cdot \alpha_{ij} \cdot \beta_{ij} \cdot \rho}{2(1 + \rho)}} \quad (3)$$

O status das conexões  $S_{ij}$  entre os agentes  $i$  e  $j$  na rede social baseia-se na proximidade conjunta  $\gamma_{ij}$ :

$$S_{ij} = \begin{cases} \text{inexistente,} & \text{se } 0 \leq \gamma_{ij} < \varphi_1 \\ \text{fraca,} & \text{se } \varphi_1 \leq \gamma_{ij} < \varphi_2 \\ \text{forte,} & \text{se } \varphi_2 \leq \gamma_{ij} \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

$\varphi_1$  representa o valor-limite a partir do qual a proximidade leva a uma conexão pelo menos fraca entre os indivíduos

$\varphi_2$  representa o valor-limite a partir do qual a proximidade conjunta leva a uma conexão forte entre os indivíduos

Destaca-se que a difusão de informação pode ocorrer através de conexões tanto fracas quanto fortes. A influência das conexões fortes tende a ser relevante tendo em vista a maior proximidade e a maior possibilidade de interação. De maneira análoga, a influência das conexões fracas também tende a ser relevante, já que, em geral, o número de conexões fracas é maior.

Assim, a rede social é formada a partir das proximidades geográficas e comportamentais que geram as conexões entre os produtores. Essa rede social é elemento relevante na difusão de inovações, tratada a seguir.

### 3.3 DIFUSÃO DA INOVAÇÃO

Conforme já discutido, seguindo o modelo de Bass (1969), a adoção de um produto, uma tecnologia ou um novo processo é transmitida por meio de fatores internos e externos. Dentro dos fatores internos, a propagação através de interações na rede social pode constituir importante processo de difusão da inovação entre os agricultores. Dentre os fatores externos, subsídios governamentais e esforços de capacitação e treinamento podem fomentar uma maior adoção. Além disso, o resultado diferenciado dos produtores que usam a nova tecnologia pode também motivar novos usuários.

Neste contexto, uma das premissas do modelo fundamenta-se no fato de que a esperança do resultado dos produtores que adotam a tecnologia é superior à esperança do

resultado dos produtores que não adotam a tecnologia. É importante destacar que o resultado, para fins de sustentabilidade, deve envolver uma perspectiva de curto e longo prazo. Esse item é importante, principalmente considerando-se pequenos agricultores que podem estar inclinados a privilegiar lucros de curto prazo em detrimento dos benefícios futuros.

A seguir, são discutidos os principais aspectos relacionados com a difusão de inovação, dentro do modelo desenvolvido.

#### a) Fatores externos

Inicialmente, nenhum dos  $N$  agricultores adota a nova tecnologia. Assim, a única maneira de sensibilizar um agente é através de estímulos externos. Por exemplo, no modelo de Bass (1969), voltado ao *marketing*, o estímulo externo pode ser dado na forma de propaganda do produto.

No contexto de pequenos produtores rurais, o estímulo externo pode ocorrer na forma de conscientização por meio de divulgação institucional da inovação e de capacitação de potenciais usuários. Observe que, principalmente no caso brasileiro, em que as dimensões geográficas são grandes e o grau de instrução da população em geral é baixo, esses esforços de conscientização podem envolver investimentos consideráveis. Dentre esses investimentos, podem também estar contemplados subsídios dados pelo governo para que agricultores adotem a nova tecnologia.

Utilizando uma modelagem de difusão semelhante à de Goldberg et al. (2001), pode-se estabelecer uma probabilidade de uso baseada em mecanismos de contágio de autômatos celulares. A probabilidade de um produtor se infectar, ou seja, passar a usar uma dada tecnologia devido aos investimentos de disseminação  $I$ , é dada por  $\pi_1$ :

$$\pi_1 = I^{1-\theta_1} \quad (5)$$

Sendo que:

$I$  representa um volume normalizado de investimentos, ou seja,  $0 \leq I < 1$

$\theta_1$  representa um parâmetro associado ao grau de influência do investimento na probabilidade de adoção da tecnologia pelos produtores.

Observe que a probabilidade  $\pi_1$  aumenta com o aumento de investimentos, porém, com ganhos marginais decrescentes, pois  $d\pi_1/dI > 0$  e  $d^2\pi_1/dI^2 < 0$ . Quanto maior  $\theta_1$ , maior a probabilidade de adoção da tecnologia. O limite inferior para  $I$  representa inexistência de investimentos e o limite superior, investimentos infinitamente elevados, uma vez que a variável é normalizada. Para fins de aplicação em situações reais,  $I$  pode estar associada à restrição orçamentária para investimentos externos de difusão da tecnologia entre os produtores. Esse valor pode incluir também subsídios dados para agentes que adotam a tecnologia.

À medida que mais agentes adotam a tecnologia, torna-se mais provável que outros sigam a tendência. Desta maneira, existe também uma probabilidade  $\pi_2$  de adoção da tecnologia em função da tendência de usuários:

$$\pi_2 = \left( \frac{n}{N} \right)^{1-\theta_2} \quad (6)$$

Sendo que:

$n$  representa o número total de usuários da tecnologia

$\theta_2$  representa um parâmetro associado ao grau de influência da porcentagem de usuários na probabilidade de adoção da tecnologia pelos produtores.

Quanto maior  $\theta_2$ , maior é a probabilidade  $\pi_2$  de adoção. É importante destacar que os indivíduos adotam uma tecnologia ou um processo não somente em função do número de usuários como também em função do resultado que essas tecnologias propiciam a seus usuários. Conforme já discutido, uma das premissas da modelagem envolve o fato de a tecnologia ser positiva para a região, refletida em um resultado maior para os usuários. Dentro do contexto de sustentabilidade, esse resultado envolve questões de curto prazo, como lucro observado em um período, assim como preservação de recursos e desenvolvimento da região no longo prazo.

Assim, no modelo,  $\theta_2$  é função da esperança e do desvio-padrão do diferencial entre os resultados de usuários e de não-usuários da tecnologia. Desta maneira, o modelo considera que os indivíduos observam resultados dos usuários da tecnologia e podem relevar esses parâmetros em consideração na tomada de decisão sobre a adoção da tecnologia. Sem perda de generalidade, supõe-se que os resultados dos não-usuários representam um valor de referência nulo e que os resultados dos usuários seguem realizações de uma variável aleatória com distribuição normal com média  $\mu > 0$  e desvio padrão  $\sigma > 0$ . Quanto mais vantajosa a tecnologia para o desenvolvimento sustentável, maior  $\mu$ . Quanto maior o risco da tecnologia ou o risco da atividade agropecuária em análise, maior  $\sigma$ .

Nas simulações, a média  $\mu$  e o desvio-padrão  $\sigma$  são estimados pelas realizações da variável aleatória. Assim, sendo  $r_i$  as realizações dos resultados dos  $n$  usuários, a estimativa  $\bar{x}$  da média e a estimativa  $s_x$  do desvio-padrão dos resultados dos produtores que adotam as tecnologias são dadas, respectivamente, por:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{r_i}{n} \quad \text{e} \quad s_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(r_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (7)$$

Para evitar problemas computacionais, se  $n = 0$ , então considera-se  $\bar{x}$  e  $s_x$  nulos.

Considerando que os produtores avaliam o resultado médio e a dispersão de resultados dos usuários da tecnologia, pode-se definir arbitrariamente que  $\theta_2$  possui a seguinte configuração:

$$\theta_2 = \begin{cases} 0, & \text{se } \frac{\bar{x} - z \cdot s_x}{\left| \max_{i=1, \dots, n}(r_i) - \min_{i=1, \dots, n}(r_i) \right|} \leq 0 \\ \frac{\bar{x} - z \cdot s_x}{\left| \max_{i=1, \dots, n}(r_i) - \min_{i=1, \dots, n}(r_i) \right|}, & \text{se } 0 < \frac{\bar{x} - z \cdot s_x}{\left| \max_{i=1, \dots, n}(r_i) - \min_{i=1, \dots, n}(r_i) \right|} < 1 \\ 1, & \text{se } \frac{\bar{x} - z \cdot s_x}{\left| \max_{i=1, \dots, n}(r_i) - \min_{i=1, \dots, n}(r_i) \right|} \geq 1 \end{cases} \quad (8)$$

$z$  é um parâmetro auxiliar associado à disposição de um indivíduo adotar uma tecnologia em função do risco  $s_x$ .

Por exemplo, além de analisarem os ganhos médios gerados pela tecnologia entre os usuários, produtores não-usuários observam também o nível de dispersão dos resultados, que é um indicador do risco. À medida que  $\bar{x} - z.s_x$  torna-se maior que 0, os resultados conferem maior segurança aos não-usuários sobre os benefícios da tecnologia. Observe que, quanto maior  $z$ , maior o grau de aversão a risco, uma vez que somente resultados médios muito superiores ao desvio-padrão tornam a tecnologia mais atraente. Assim, o modelo possibilita incorporar, de maneira simplificada, o grau de aversão a riscos dos produtores na análise da difusão de tecnologias.

#### b) Fatores internos

Sob uma perspectiva interna, a difusão de uma tecnologia por um grupo de agricultores pode ocorrer através da propagação de informação dentro da rede social. No modelo, o status da conexão entre os agentes será fator determinante para a ocorrência da difusão. Assim, são definidas mais duas probabilidades auxiliares para cada indivíduo: (i) a probabilidade  $\pi_{3i}$  de um produtor  $i$  adotar uma tecnologia devido à propagação de informação através de conexões fracas com outros produtores que já são usuários e; (ii) a probabilidade  $\pi_{4i}$  de um produtor  $i$  adotar uma tecnologia devido à propagação ou convencimento através de conexões fortes com outros produtores que já são usuários.

Seguindo o modelo de Goldberg et al. (2001) para processos de difusão através de vínculos fortes e fracos, podem-se definir as probabilidades  $\pi_{3i}$  e  $\pi_{4i}$  como:

$$\pi_{3i} = 1 - (1 - \pi_3)^{n_w} \text{ e } \pi_{4i} = 1 - (1 - \pi_4)^{n_s} \quad (9)$$

Sendo que:

$\pi_3$  e  $\pi_4$  representam probabilidades básicas, comuns a todos os indivíduos, de transmissão de tecnologia através das conexões fracas e fortes, respectivamente.

$n_w$  e  $n_s$  representam o número de conexões fracas e fortes, respectivamente, do produtor  $i$  com um produtor  $j$  usuário de uma dada tecnologia.

Finalmente, consolidando todas as probabilidades auxiliares, cada indivíduo  $i$  possui uma probabilidade  $\Pi_i$  de adoção de uma tecnologia que é função de (i) aspectos externos, através, por exemplo, esforços de conscientização e capacitação, de tendências de mercado e de resultado gerado pela nova tecnologia e; (ii) aspectos internos, nos quais a difusão ocorre através das conexões fortes ou fracas na rede social. Assim,  $\Pi_i$  é dada por:

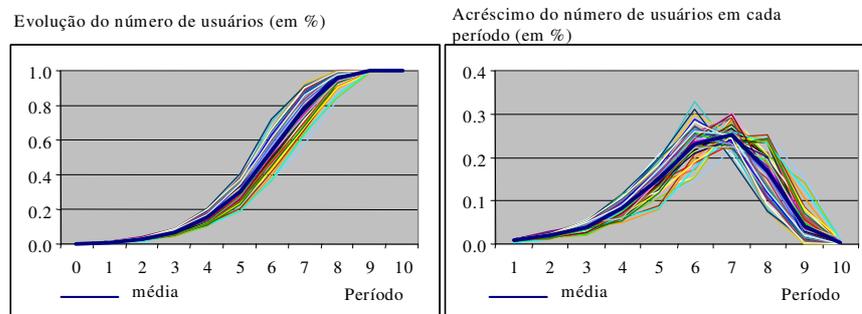
$$\Pi_i = 1 - (1 - \pi_1)(1 - \pi_2)(1 - \pi_{3i})^{n_w} \cdot (1 - \pi_{4i})^{n_s}$$

## 4 SIMULAÇÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Inicialmente, fixou-se um caso-base com a definição arbitrária dos parâmetros do modelo. Esses parâmetros sofrem alterações controladas para a realização da análise de estática comparada. Desse modo, pode-se avaliar a sensibilidade do processo de difusão de tecnologia em função de cada parâmetro do modelo. Uma aplicação real do modelo envolve a calibragem de parâmetros de acordo com as características da região e dos produtores.

O modelo matemático foi programado no ambiente VBA do Excel e rodado usando um computador com processador Pentium M, clock de 1,8 GHz e 1 GB de memória RAM. Para

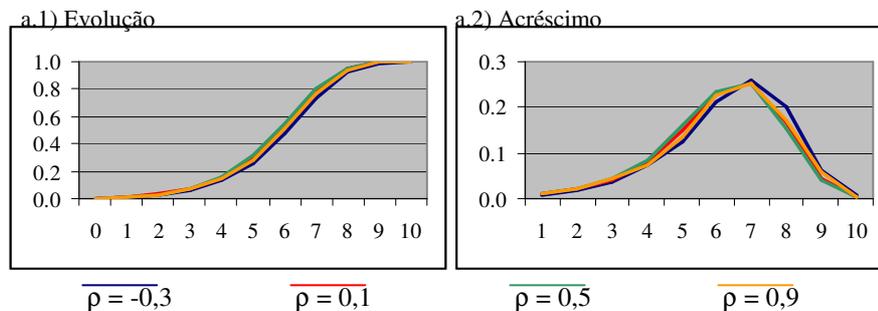
fins de análise de desempenho do algoritmo, o tempo de processamento de um horizonte de 15 períodos leva cerca de 2 minutos. Observe que, dada a modelagem, relações não-lineares devem ser comuns, evidenciando a relevância da construção de um modelo que possa gerar associações relativamente complexas, como deve ser o caso da difusão de tecnologias entre pequenos produtores rurais.



**Figura 1 - Resultados do caso-base para 50 simulações**

Fonte: Elaborado pelos autores

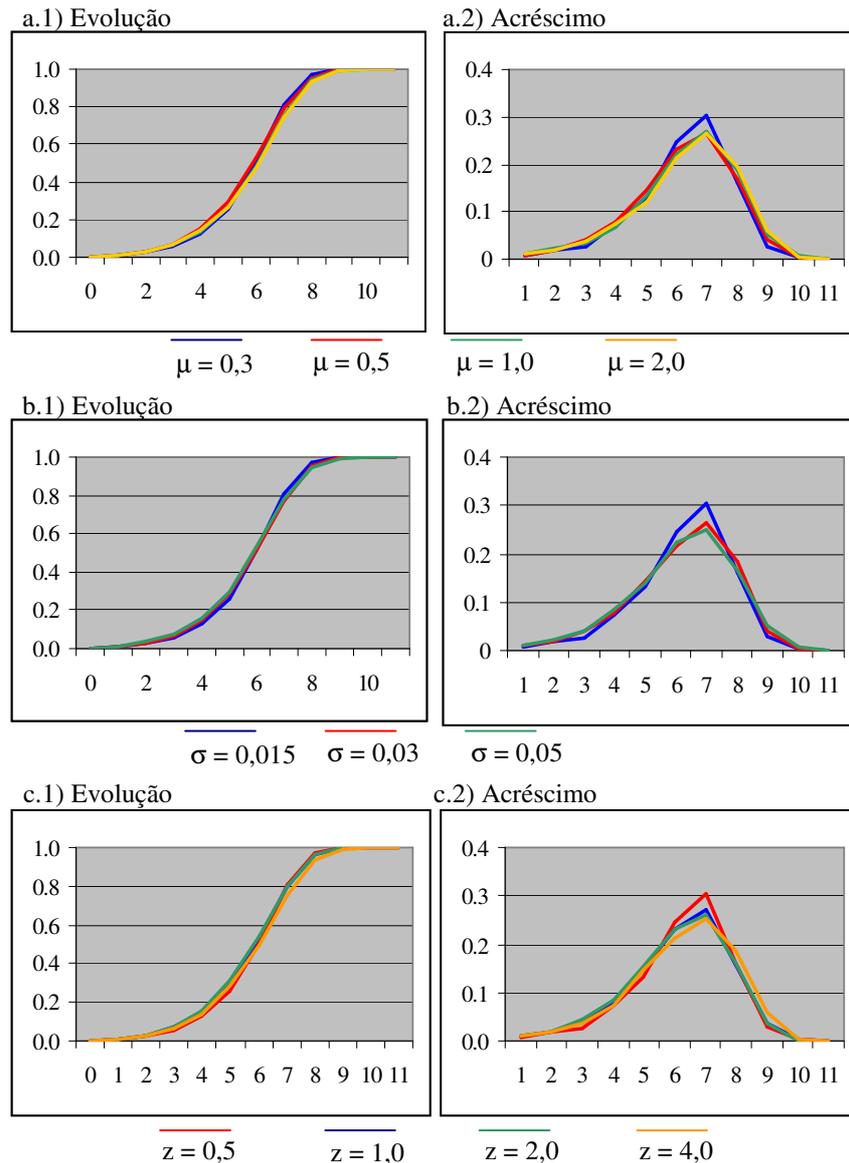
A Figura 1 mostra os resultados de 50 simulações para o caso-base. A linha mais espessa representa a média das simulações. O primeiro gráfico na Figura 1 denota a evolução do percentual do número de usuários em cada iteração do algoritmo, que corresponde a um período. Na prática, o período pode estar associado ao ciclo de produção como, por exemplo, horizonte de tempo entre o plantio e a colheita de uma cultura. Observa-se que o formato da curva em S é compatível com os modelos de Bass (1969) e Rogers (1962). O segundo gráfico da Figura 1 apresenta a evolução marginal da porcentagem de usuários. Pode-se identificar, dada a menor inclinação nos períodos iniciais, a importância dos esforços externos decorrentes principalmente da conscientização, da capacitação sobre a tecnologia e de eventuais subsídios para a adoção.



**Figura 2 - Análise de estática comparada em relação à  $\rho$**

Fonte: Elaborado pelos autores

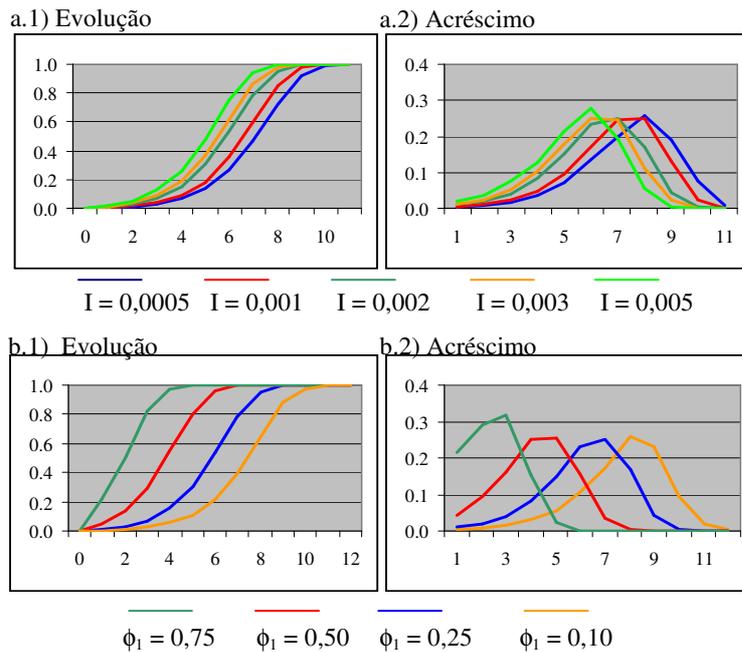
Fazendo uma análise de estática comparada, pode-se identificar o comportamento da difusão da tecnologia entre os produtores em função de variações nos parâmetros do modelo. A Figura 2 mostra os resultados médios de várias simulações considerando-se diferentes valores de correlações  $\rho$  entre a proximidade geográfica e a proximidade comportamental. A pequena diferença dos valores simulados sugere a baixa sensibilidade da difusão da tecnologia entre os produtores em função da correlação.



**Figura 3 - Análise de estática comparada em relação à  $\mu$ ,  $\sigma$ ,  $z$**

Fonte: Elaborado pelos autores

De maneira análoga, os resultados da simulação denotados na Figura 3 mostram baixa sensibilidade da velocidade de difusão em relação ao ganho médio  $\mu$ , ao risco  $\sigma$  e ao parâmetro  $z$  que está associado à aversão ao risco, conforme discutido na modelagem. Assim, embora o parâmetro  $\pi_2$  seja sensível ao número de usuários  $n$ ,  $\phi_2$  não causa muito impacto nos resultados finais das simulações. Estas observações são interessantes, pois sugerem que a decisão de adoção da tecnologia sofre pouca influência dos resultados observados ou do grau de dispersão dos resultados dos usuários da tecnologia. De certa maneira, produtores do setor agropecuário, dada a grande incerteza de seus resultados, que dependem de diversos fatores muitas vezes incontroláveis, como condições climáticas, podem avaliar outros aspectos para a tomada de decisão de uso de uma inovação.



**Figura 4: Análise de estática comparada em relação à  $I$  e  $\phi_1$**

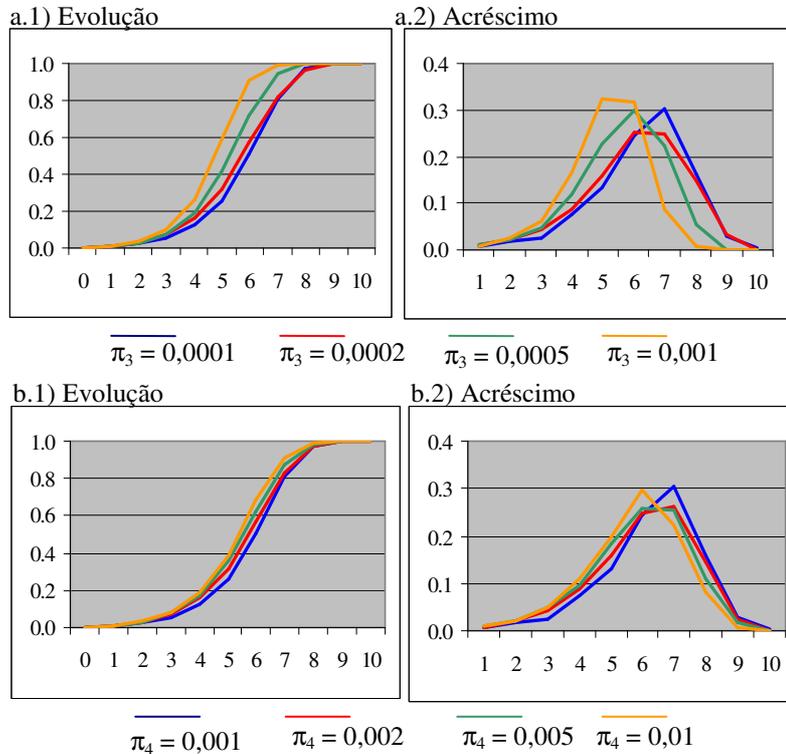
Fonte: Elaborado pelos autores

De fato, a Figura 4 sugere que o processo de difusão, na modelagem construída, é muito mais sensível aos parâmetros externos associados aos investimentos. Os gráficos a.1 e a.2 mostram a sensibilidade da probabilidade de difusão em relação aos investimentos  $I$  de divulgação da inovação ou de gastos com subsídios para a adoção da tecnologia. Os gráficos b.1 e b.2 apresentam os resultados da sensibilidade em relação ao parâmetro  $\phi_1$ , que é uma medida da influência dos investimentos na probabilidade de adoção. A separação das curvas nos gráficos mostra que alterações em  $I$  e  $\phi_1$  têm impacto considerável na dinâmica da adoção da inovação.

Desta maneira, o papel do governo torna-se fundamental, uma vez que pequenos produtores têm poucas condições de, sem iniciativas externas, tomarem conhecimento de novas tecnologias que poderiam fomentar um desenvolvimento sustentável. Além disso, os subsídios seriam relevantes também para diminuir as barreiras que podem naturalmente surgir quando indivíduos se defrontam com alternativas de novos processos ou tecnologias, uma vez que inovação pode causar ansiedade e bloqueio por parte de pequenos produtores.

Simulações para diferentes valores-limites de  $\phi_1$  e  $\phi_2$  de proximidade conjunta para a existência de conexões fracas ou fortes sugerem que, quando um produtor tem conexões com outros usuários, maior a probabilidade de vir a usar a nova tecnologia. Dada a configuração do modelo, as conexões fracas têm pouca influência na decisão de adoção da tecnologia. Em contrapartida, conexões fortes permitem que usuários tenham mais chances de convencer não-usuários a usar a tecnologia. Desta forma, uma outra maneira para fomentar a implementação da inovação, talvez mais barata do que aumentar investimentos, envolve o fortalecimento de vínculos nas redes sociais. Assim, a formalização de conglomerados, o estabelecimento de cooperativas ou o simples agrupamento de produtores em reuniões ou eventos pode aumentar o número de vínculos fortes e agilizar o processo de difusão dentro da rede social. Deve-se

destacar, portanto, que um mecanismo tipicamente social pode ter implicações na adoção de tecnologias, com impactos de ordem econômica e que podem promover o desenvolvimento sustentável. O papel das prefeituras e das comunidades locais para incentivar essas interações sociais é, portanto, relevante.



**Figura 5 - Análise de estática comparada em relação à  $\pi_3$ ,  $\pi_4$**

Fonte: Elaborado pelos autores

Finalmente, a Figura 5 reforça a importância das redes sociais no ambiente definido no modelo. Dentro das condições da modelagem, observa-se que pequenos esforços no aumento da probabilidade básica  $\pi_3$  de adoção da tecnologia através de vínculos fracos podem ter influência representativa na velocidade de difusão da tecnologia. O resultado, de certa maneira, é compatível com Granovetter (1973), que estabelece a força das conexões fracas. Dado que o número de vínculos fracos tende a ser maior do que o número de vínculos fortes, iniciativas para aprimorar o processo de convencimento entre conexões fracas tornam-se representativas. A partir desse resultado, por exemplo, pode-se realizar o treinamento de agentes facilitadores dentro das redes sociais para reduzir gastos com subsídios. Assim, alternativas criativas e baratas podem ser vislumbradas para substituir recursos monetários.

## 5 COMENTÁRIOS FINAIS

A construção de modelos matemáticos, apesar de incorrer em uma simplificação do mundo real, possibilita que cenários possam ser projetados sem a influência de diversas variáveis exógenas que, em estudos empíricos, podem distorcer a análise de dados. Análises empíricas envolvendo procedimentos amostrais podem ser problemáticas, principalmente no estudo de desenvolvimento sustentável em áreas rurais, pois: (i) podem envolver inúmeras variáveis difíceis de serem controladas e, portanto, conduzindo à baixa explicação das técnicas

estatísticas sobre a evolução de tecnologias em áreas rurais; (ii) ser pouco significativas, devido ao baixo número de observações, pois o levantamento de dados pode acompanhar ciclos longos de plantio ou criação e; (iii) ser pouco representativas, em razão das rápidas mudanças ambientais e de mercado que podem ocorrer ao longo dos ciclos. No caso de estudos voltados às áreas rurais, dada a grande incerteza, por exemplo, associada a aspectos climáticos, o estudo sob condições controláveis pode indicar potenciais sugestões para políticas e estratégias para o desenvolvimento sustentável.

Apesar de o modelo estabelecer teoricamente que o resultado médio – considerando curto e longo prazo – dos agentes que usam a tecnologia é maior do que o dos agentes que não usam a tecnologia; na prática, uma das dificuldades é justamente demonstrar ao agricultor os benefícios da inovação, principalmente refletidos em ganhos de longo prazo. Neste artigo, o valor observado do resultado deve levar em consideração não somente aspectos de valores presentes de fluxos de caixa como também benefícios futuros que a adoção da tecnologia gera. Desta forma, busca-se seguir um conceito de sustentabilidade próximo ao igualitarismo neoclássico, conforme discutido no referencial.

Alguns resultados das simulações devem ser destacados. As características da tecnologia fornecidas pelo resultado superior médio e pelo grau de dispersão dos resultados não parecem ter influência na velocidade de adoção. Este resultado pode estar associado ao fato de as atividades agropecuárias já apresentarem elevado nível de risco e, desta forma, outros parâmetros serem mais relevantes para a decisão de adoção de uma nova tecnologia. Neste contexto, investimentos em divulgação da inovação e gastos com subsídios para adoção tornam-se fundamentais, principalmente para que os primeiros produtores passem usar a tecnologia.

Destaca-se também que, no modelo, as conexões das redes surgem como importantes mecanismos de difusão. Mais ainda, esses mecanismos sociais, em geral, envolvem menos investimentos, uma vez que a rede social entre os produtores já existe. O modelo sugere, dentro do contexto da rede social, que a velocidade de adoção da tecnologia pode ser aprimorada principalmente através do aumento de conexões fortes entre os produtores e do aprimoramento dos mecanismos de propagação por meio das conexões fracas.

As conexões fortes, apesar de menos numerosas, são mais contundentes no sentido de convencimento de agentes a adotarem uma tecnologia. As conexões fracas, por sua vez, apesar de terem uma influência menor para o convencimento de produtores não-usuários, são em geral numerosas. Algumas estratégias para aprimorar a difusão de tecnologias através das conexões das redes envolvem, por exemplo, incentivos à formação de conglomerados, estruturação de cooperativas, realização de reuniões ou eventos que aproximem produtores e fornecedores de tecnologias, capacitação de facilitadores que possam difundir os benefícios do uso da inovação, explorando seus contatos na rede social. Desta maneira, estratégias de fortalecimento e ampliação das redes sociais, bem como de fomento das interações entre produtores podem constituir importantes alternativas em relação a investimentos em divulgação ou subsídios, comumente escassos em países em desenvolvimento.

## REFERÊNCIAS

BASS, F. A new product growth model for consumer durables. *Management Science*, Linthicum, v. 15, n. 5, p. 215-227, Jan. 1969.

BRASS, D. J. Being in the right place: a structural analysis of individual influence in an organization. *Administrative Science Quarterly*, Ithaca, v. 28, n. 4, p. 518-539, Dec. 1984.

CHAMBERS, R. Sustainable development: the poor's reconciliation of environment and development. In: ELKINS, P.; MAX-NEEF, M. *Real-life economics: understanding wealth-creation*. New York: Routledge, 1992. p. 214-219.

COLLIER, P. *Social capital and poverty*. Washington, DC: World Bank, 1998.

COSTANZA, R.; DALY, H. Natural capital and sustainable development. *Conservation Biology*, Cambridge, v. 6, n. 1, p. 37-46, 1992.

DOERING, D. S. *Designing genes: how can genetic engineering serve U.S. midwestern agricultural sustainability?* Washington: World Resources Institute, 2004.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. *The state of food and agriculture 2003–2004: agricultural biotechnology: meeting the needs of the poor?* Rome: FAO, 2004.

FRANSEN, L. et al. *Integrating socio-economic considerations into biosafety decisions: the role of public participation*. Washington: World Resources Institute, 2005.

GOLDBERG, J. et al. Talk of the network: a complex systems look at the underlying process of word-of-mouth. *Marketing Letters*, Dordrecht, v. 12, n. 3, p. 211-223, 2001.

GRANOVETTER, M. S. The strength of weak ties. *American Journal of Sociology*, Chicago, v. 78, n. 6, p. 1360-1380, May 1973.

HAQ, M. The human development paradigm. In: \_\_\_\_\_. *Reflections on human development*. New York: Oxford University, 1995. p. 13-23.

HAZELL, P.; HADDAD, L. *Agricultural research and poverty reduction*. Washington: International Food Policy Research Institute, 2001.

HERSH, M. *Mathematical modeling for sustainable development*. New York: Springer, 2006.

MILGRAM, S. The small world problem. *Psychology Today*, Del Mar, v. 22, p. 61-67, 1967.

MUNDA, G. Environmental economics, ecological economics, and the concept of sustainable development. *Environmental Values*, Cambridge, v. 6, n. 2, p. 213-233, 1997.

MURRAY, S. Food industry: small farmers struggle with rapid change. *The Financial Times*, London, October 7, 2005.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. *Sustainable development: critical issues*. Paris: OECD, 2001.

PODOLNY, J. M.; BARON, J. N. Resources and relationships: social networks and mobility in the workplace. *American Sociological Review*, Washington, v. 62, n. 5, p. 673-693, Oct. 1997.

ROGERS, E. M. *Diffusion of innovations*. New York: Free Press, 1962.

SACQUET, A. *World atlas of sustainable development*. London: Anthem Press, 2005.

SCHERR, S. J. People and environment: what is the relationship between exploitation of natural resources and population growth in the South? *Forum for Development Studies*, Oslo, n. 1, p. 33-58, 1997.

SEN, A. *Development as freedom*. New York: Alfred A. Knopf, 1999.

STIGSON, B. Sustainable development and business. *OECD Observer*, Paris, n. 221-222, 2000.

TOMAN, M. Economics and “sustainability”: balancing trade-offs and imperatives. *Land Economics*, Madison, v. 70, n. 4, p. 399-413, Nov. 1994.

VOLLENBROEK, F. A.; WETERINGS, R. A. P. M.; BUTTER, M. Technology options for sustainable development. In: WORKSHO ON TECHNOLOGY FORESIGHT AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 1998, Budapest. *Proceedings...* Paris: OCDE, 1998. p. 83-94

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. *Brundtland report*: report of the World Commission on Environment and Development. New York: United Nations, 1987.

### **SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND INNOVATION IN AGRICULTURAL AREAS: AN APPROACH BASED ON MATHEMATICAL MODELING AND COMPUTER SIMULATION**

#### **Abstract**

In a context of multiple perspectives for the study of sustainable development in agricultural areas, this paper presents a quantitative analysis based on the development of a mathematical model and on the implementation of a computing algorithm. The objective of the mathematical model construction was to investigate the dynamics of diffusion of innovations as, for instance, the propagation of knowledge or technologies among small rural producers. The main obtained results based on the simulation were: a) the technology characteristics seem to have no influence on the speed of the adoption of new technologies. This result can be associated to the fact that agricultural activities already need high risk investments; b) the social ties in the producer networks evidenced to be an important mechanism for diffusion of technologies. The mechanisms of social ties, in general, involve investments of low costs because normally they already exist among the producers. Finally, the results suggest that efforts for popularization of the technology, subsidies from the government, invigoration of the relationship among producers and interactions inside a social network can constitute the main strategies for the increase of the speed in the adoption of new technologies.

**Keywords:** Technological innovation; Diffusion of technology; Agribusiness; Knowledge management; Sustainable development.

---

Data do recebimento do artigo: 16/11/2007

Data do aceite de publicação: 17/12/2007

---

RAI - Revista de Administração e Inovação, São Paulo, v. 4, n. 3, p. 17-33, 2007.