

## Uso do método de pesos de evidência na análise do manejo da cana-de-açúcar para o estado de São Paulo

Maikon Roberth de Novaes <sup>1</sup>  
Cláudia Maria de Almeida <sup>2</sup>  
Bernardo Friedrich Theodor Rudorff <sup>2</sup>  
Daniel Alves Aguiar <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE  
Unidade Estadual do Rio Grande do Norte – Supervisão de Base Territorial  
Av. Prudente de Moraes, 161 CEP 59020-400 – Natal - RN, Brasil.  
maikon.novaes@ibge.gov.br

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{bernardo, almeida, daniel}@dsr.inpe.br

**Abstract.** Assuming that several spatial variables can influence the harvest practice of sugarcane straw burning, this study aims to evaluate the influence of these variables using a dynamic model based on the concept of weights of evidence and cellular automata. Thematic maps of sugarcane harvest with and without the practice of straw burning for the years of 2006 to 2008 were used together with other land uses such as urban areas, rivers and conservation units. The model was adequate to understand the conditioning variables and the likelihood of the transition of sugarcane harvest practice from burning to not-burning. Variables such as slope and distance to rivers, roads, power plants, classes of sugarcane and urban areas were very influential to understand the straw burning practice.

**Palavras-chave:** remote sensing, sugarcane, environment protocol, cellular automata, sensoriamento remoto, cana-de-açúcar, protocolo ambiental, autômatos celulares.

### 1. Introdução

No contexto atual, o Brasil encontra-se como o maior produtor de cana-de-açúcar e exportador de açúcar e álcool no mundo. A área de cana cultivada é de quase 8 milhões de hectares, e o estado de São Paulo é responsável por cerca de 60% de toda esta extensão (IBGE, 2008a), distribuída de maneira heterogênea pelo território estadual.

Técnicas em sensoriamento remoto e geoprocessamento permitem identificar o manejo da colheita de cana-de-açúcar em dois tipos: com ou sem a prática da queima da palha na pré-colheita (Aguiar et al., 2007). Esta prática não só facilita, mas viabiliza a colheita manual, embora cause poluição, prejudicando o meio ambiente e a saúde da população residente no entorno.

Dentre as ferramentas de geoinformação, a simulação de sistemas auxilia o entendimento dos fatores que induzem a ocorrência do fenômeno, bem como permite representar cenários diversos de possibilidades futuras, segundo quadros socioeconômicos, políticos e ambientais diferentes (Soares Filho et al., 2001).

A extinção da prática da queima da palha está prevista em legislação estadual, e segundo o protocolo agro-ambiental assinado entre a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA) e a Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo, os prazos se antecipam para o ano de 2014 para áreas mecanizáveis e 2017 para áreas não mecanizáveis.

A presente lei ainda proíbe a prática da queima a menos de: a) 1 (um) quilômetro do perímetro da área urbana, definida por lei municipal, e das reservas e áreas tradicionalmente ocupadas por indígenas; b) 100 (cem) metros do limite das áreas de domínio de subestações de energia elétrica; c) 50 (cinquenta) metros contados ao redor do limite de estação ecológica, de reserva biológica, de parques e demais unidades de conservação estabelecidos em atos do

poder federal, estadual ou municipal e de refúgio da vida silvestre, conforme as definições da Lei Federal Nº 9.985, de 18 de julho de 2000; d) 25 (vinte e cinco) metros ao redor do limite das áreas de domínio das estações de telecomunicações; e) 15 (quinze) metros ao longo dos limites das faixas de segurança das linhas de transmissão e de distribuição de energia elétrica, e f) 15 (quinze) metros ao longo do limite das áreas de domínio de ferrovias e rodovias federais e estaduais.

Partindo da hipótese que tais variáveis físicas espaciais podem influenciar o manejo da colheita da cana-de-açúcar, este trabalho tem como objetivo avaliar a importância destes fatores utilizando um modelo dinâmico baseado no conceito de autômatos celulares (Wolfram, 1983; Almeida et al., 2007) a partir de dados de manejo da colheita da cana para os anos de 2006 a 2008. Além disso, pretende-se identificar a probabilidade de áreas suscetíveis a mudança de uso e cobertura da terra, auxiliando, desta maneira, a compreensão do fenômeno da queima da cana-de-açúcar no estado de São Paulo.

## 2. Metodologia

### 2.1. Área de Trabalho

Foram selecionadas duas regiões de estudo (Figura 1) para este trabalho com o apoio de técnicas de análise espacial (Novaes et al., 2010), as quais apresentam padrões de manejo da cana bem distintos.

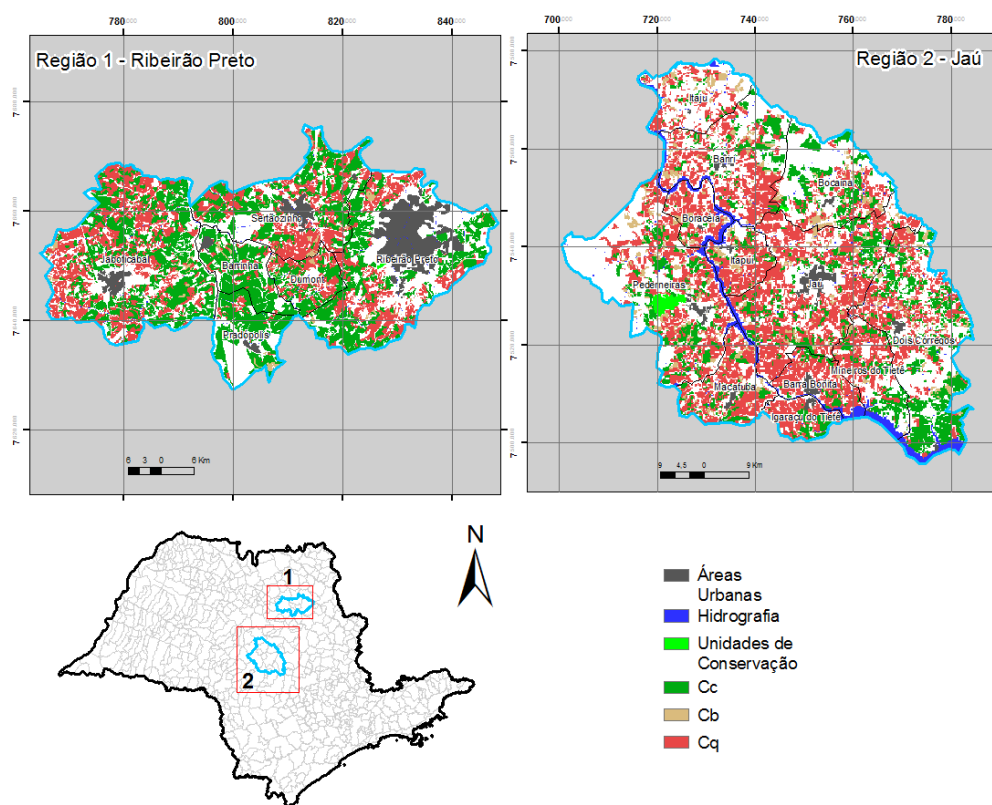


Figura 1 – Localização das regiões de estudo.

A região 1 está localizada entre os paralelos  $21^{\circ} 45' 54,60''$  e  $20^{\circ} 37' 49,19''$  sul e os meridianos  $48^{\circ} 45' 53,02''$  e  $47^{\circ} 18' 48,32''$  oeste e abrange os municípios de Barrinha, Dumont, Jaboticabal, Pradópolis, Ribeirão Preto e Sertãozinho. Esta região situa-se na porção centro-oeste da Região Administrativa de Ribeirão Preto e se destaca pela consolidação na plantação canavieira, produtividade e intensa mecanização nos últimos anos.

A região 2 está localizada entre os paralelos  $22^{\circ} 56' 11,00''$  e  $21^{\circ} 34' 27,00''$  sul e os meridianos  $49^{\circ} 20' 30,00''$  e  $47^{\circ} 57' 20,00''$  oeste e comporta os municípios de Bariri, Barra

Bonita, Bocaina, Boracéia, Dois Córregos, Igaracú do Tietê, Itaju, Itapuí, Jaú, Macatuba, Mineiros do Tietê e Pederneiras. Esta região situa-se na porção leste da Região Administrativa de Bauru e representa uma área bastante consolidada, porém, conservadora em relação ao protocolo agro-ambiental. Jaú, em 2006, foi o 5º maior produtor de cana-de-açúcar do estado; contudo, o manejo da colheita costuma ser realizado com o uso do fogo e, no ano de 2009, foi queimada cerca de 90% da área cultivada (CANASAT, 2009).

## 2.2. Material

O banco de dados espacial foi construído na plataforma SPRING 4.3.3, contendo dois diferentes projetos, correspondendo às duas regiões de estudo. Os dados originais utilizados nesta pesquisa são oriundos de classificação supervisionada e não-supervisionada e trabalhos de campo, fruto do monitoramento realizado pelo projeto CANASAT, adquiridos em três anos-safra 2006, 2007 e 2008. O dado classificado é do tipo matricial, com resolução de 30 m, e possui as classes de cana-crua (sem o uso do fogo); cana-queima (com o uso do fogo), além da cana-bisada (cana não-colhida até o final da época de colheita). Além desse conjunto principal de dados, foram também utilizadas bases vetoriais para compor o grupo de classes e variáveis de entrada no modelo. Todos os dados utilizados encontram-se detalhados em Novaes (2010), com seus respectivos sistemas de projeção, datum e fonte de origem.

Neste banco encontra-se, também, um conjunto de variáveis de distância selecionado para analisar a dinâmica das mudanças ocorridas no período observado, a saber: a) hidrografia; b) estradas; c) unidades de conservação; d) usinas; e e) áreas urbanizadas. Outro conjunto de variáveis foi selecionado com base na Lei No 11.241, que prevê a proibição da queima da palha da cana em certas faixas de distâncias. Assim, foram calculados *buffers* fatiados relativos a estas determinações. O resultado deste procedimento são mapas de variáveis discretas: a) áreas de preservação permanente (APP) ao longo de cursos d'água; b) 50 m às unidades de conservação; c) 1 km aos aglomerados urbanos; d) 15 m às principais vias, e) áreas com declividade superior a 12%.

Os mapas de cobertura e uso da terra foram construídos na plataforma SPRING 4.3.3 e o modelo foi desenvolvido na plataforma DINAMICA EGO 1.4.0 (Soares Filho et al., 2008). Estes mapas representam os períodos inicial e final, relativos aos anos 2006 e 2008, respectivamente. Foi acrescida uma área *buffer* de 15 km, a fim de não provocar efeito de borda durante a etapa de simulação. As classes de cana no início (2006) e no final (2008) foram: Cc (cana-crua); Cq (cana-queima); Cb (cana bisada); e não-cana. As classes que não sofreram alteração entre o período inicial e final foram: áreas urbanizadas, hidrografia e unidades de conservação. Estas classes foram inseridas nos mapas por exercerem restrição real à expansão e mudança de colheita das lavouras de cana. As áreas urbanizadas foram consideradas estáveis para efeito de simplificação do modelo e por não serem foco de análise desta pesquisa (Figura 1)

## 2.3. Métodos

### 2.3.1 – Parametrização do Modelo

Os dados de entrada necessários para efetuar a calibração do modelo são um mapa de uso e cobertura inicial e final correspondente aos anos de 2006 e 2008, respectivamente, além de um cubo de variáveis físicas estáticas discretas e contínuas. O modelo probabilístico de análise da dinâmica de mudança do uso e cobertura da terra, concebido por Soares Filho et al. (2001), é composto por seis etapas: a) cálculo de percentual das mudanças de classes através de matrizes de transição; b) cálculo das faixas para discretização das variáveis contínuas; c) cálculo dos pesos de evidência ( $W^+$ ); d) análise da correlação dos pesos entre as variáveis de

entrada para todas as transições; e) simulação e ajustes; f) validação do mapa final simulado com base no mapa histórico. Todas estas etapas foram realizadas na plataforma DINAMICA EGO 1.4.0.

Primeiramente, foi realizado o cálculo de percentual de mudanças globais oriunda das classes de cobertura e uso da terra. Esse cálculo ocorre após uma tabulação cruzada entre o mapa referente ao ano final (2008) e inicial (2006), gerando matrizes de transição contendo o percentual de mudança no período analisado.

Outro tipo de cálculo é o da probabilidade local de transição, em que são calculadas as probabilidades de transição de cada célula considerando particularidades naturais e antrópicas do sítio físico. Para esse fim, é utilizada uma equação que converte a fórmula de *logit*<sup>1</sup> para uma fórmula de probabilidade condicional comum, conforme a seguinte equação:

$$P(T_i^\alpha / V_i^1, \dots, V_i^{m_\alpha}) = O(T_i^\alpha) \cdot e^{\sum_{v=1}^{m_\alpha} W_{i,v}^+} / 1 + \sum_{\eta} O(T_i^\alpha) \cdot e^{\sum_{v=1}^{m_\alpha} W_{i,v}^+} \quad (1)$$

$$W_{i,v}^+ = \log_e \frac{P\{V_i/T\}}{P\{V_i/\bar{T}\}} \quad (2)$$

em que:

$P$  corresponde à probabilidade de transição  $T$  de cobertura e uso da terra;  $i$  corresponde a uma notação de posicionamento das células da área de estudo, definido em termos de coordenadas  $x,y$ ;  $\alpha$  representa um tipo de transição de cobertura ou uso da terra, p.ex., de uma classe  $c$  para uma classe  $k$ , em um total de  $\eta$  transições;  $V_i^1$  corresponde à primeira variável observada na célula  $i$ , utilizada para explicar a transição  $\alpha$ ;  $V_i^{m_\alpha}$  corresponde à  $m$ -ésima variável observada na célula  $i$ , utilizada para explicar a transição  $\alpha$ ;  $O(T_i^\alpha)$  representa o *odds* da transição  $T^\alpha$  na  $i$ -ésima célula, expresso pela razão entre a probabilidade de ocorrência de  $T_i^\alpha$  e a probabilidade complementar, isto é,  $P(T_i^\alpha) / \bar{P}(T_i^\alpha)$ ; e  $W_{i,v}^+$  corresponde ao peso positivo de evidência para a  $i$ -ésima célula referente à  $v$ -ésima variável.

Os resultados dos pesos de evidência são utilizados para parametrizar o modelo de simulação, relativo à dinâmica espacial do fenômeno estudado. O método implementado por Soares Filho et al. (2008) calcula faixas ou intervalos de acordo com as estruturas dos dados que se apresentam sob a forma de grades contínuas, visto que o método de pesos de evidência opera apenas com variáveis categóricas<sup>2</sup>.

As variáveis que terão seus pesos calculados devem ser mencionadas no modelo. As variáveis discretas ou categóricas, como as faixas de distância preventivas de vias, unidades de conservação, APP de rios, áreas urbanas e áreas não mecanizáveis (declividade >12%), não necessitam de parâmetros para este cálculo. Logo, as variáveis contínuas requerem seguintes os parâmetros assim definidos: 1) intervalo mínimo de distância no eixo x = 1 pixel; 2) intervalo máximo de distância no eixo x = 100.000 pixels; e 3) ângulo de tolerância = 5°; com incremento = 30 m, que é a resolução espacial do mapa. No caso da variável declividade, considerando que a unidade desta é em percentagem, o seu incremento foi definido em 1%.

Foram também calculados os pesos para distâncias às classes de cana (Cc, Cq e Cb). A distância às classes é considerada uma distância dinâmica, porque ao passo que as suas células mudam ao longo da simulação, o modelo se encarrega de atualizar as novas faixas de

1 O *logit* corresponde ao logaritmo natural da chance ou *odds*, que consiste na razão entre a probabilidade de transição da cobertura ou uso ocorrer e a probabilidade complementar de não ocorrer.

2 Para mais detalhes sobre os parâmetros de cálculo de faixas de distâncias ver Novaes (2010) e Soares Filho et al., (2008).

distância para a ocorrência de cada transição. Por exemplo, a transição de áreas de não-cana para cana-crua pode ter maior probabilidade de ocorrer em áreas próximas da classe de cana-bisada. O processo de cálculo das faixas e pesos foi feito em um único modelo, e as saídas são arquivos em formato DCF (texto), indicando as faixas mais favoráveis às respectivas transições.

As variáveis, com seus pesos calculados, submeteram-se ao teste de associação espacial por meio do *Joint Information Uncertainty (JIU)*, implementado na plataforma DINAMICA EGO, com a finalidade de verificar a dependência espacial entre todas as possíveis combinações pareadas de variáveis destinadas a explicar uma mesma transição (Bonham-Carter, 1994). Segundo Bonham-Carter (1994), valores para este índice acima de 0,50 indicam mais associação do que menos, sendo que uma das variáveis deve ser descartada, ou então, ambas as variáveis devem ser combinadas em único plano de informação, a fim de se evitar redundância no modelo. Em nenhuma das regiões de estudo, as variáveis mostraram-se associadas espacialmente.

As transições das células, neste modelo, ocorrem pela expansão de manchas previamente existentes de certa classe de cobertura ou uso da terra – função *expander*, ou através da geração novas manchas, através de um mecanismo de constituição de sementes – função *patcher*. Em outras palavras, a função *expander* executa transições de um estado *j* somente nas vizinhanças adjacentes de células com o estado *j*. Já a função *patcher* realiza transições de um estado *i* para um estado *j* apenas nas vizinhanças imediatas de células com estado diferente de *j* (Almeida e Gleriani, 2007).

Para a avaliação de um modelo, é necessária a comparação do mapa final simulado com um mapa-referência, através de técnicas que irão quantificar o grau de semelhança entre ambos. Uma forma de aplicação é através de medidas de similaridade *fuzzy* em um contexto de vizinhança local. Entre diversos métodos que visam avaliar a similaridade de padrões espaciais, pode-se citar o método de Hagen (2003), que se baseia no conceito de *fuzziness of location*, implementado na plataforma DINAMICA EGO.

Neste método, a representação de uma célula é influenciada por ela mesma e, em menor magnitude, pelas células na sua vizinhança, em janelas de tamanhos variados de 1x1 até 13x13 pixels (Soares Filho et al., 2008). Neste trabalho, foram consideradas janelas de 3x3 a 11x11 pixels.

A validação, neste caso, colabora para que sejam feitos ajustes nos parâmetros das funções *expander* e *patcher*, até que o modelo esteja compatível com o fenômeno ocorrido no período de 2006 a 2008. Índices próximos a 0,4 indicam um nível bom de compatibilidade entre o cenário simulado e o real.

### 3. Resultados e Discussões

#### 3.1 Análise de Variáveis através do Método de Pesos de Evidência

Parte do resultado gerado pela calibração do modelo consiste em dados cruciais para revelar a influência exercida pelas variáveis de entrada na ocorrência das transições. A análise dos pesos de evidência facilita reconhecer áreas potenciais de mudança de estado em cada transição que podem ser verificadas por meio dos mapas de probabilidades de transição.

A região que abrange o município de Ribeirão Preto e seu entorno possui características que a insere como a mais direcionada ao cumprimento do protocolo ambiental. Para tanto, observam-se algumas variáveis que contribuíram para as transições nos gráficos da Figura 2.

Uma proximidade a estradas aliada à localização das áreas com maior declividade são fatores que potencializam a ocorrência do surgimento de novas áreas de cana com o uso da queima na colheita (a). Por outro lado, nota-se que áreas com menor declividade e próximas a áreas sem queima favorecem o manejo de cana-crua (b).

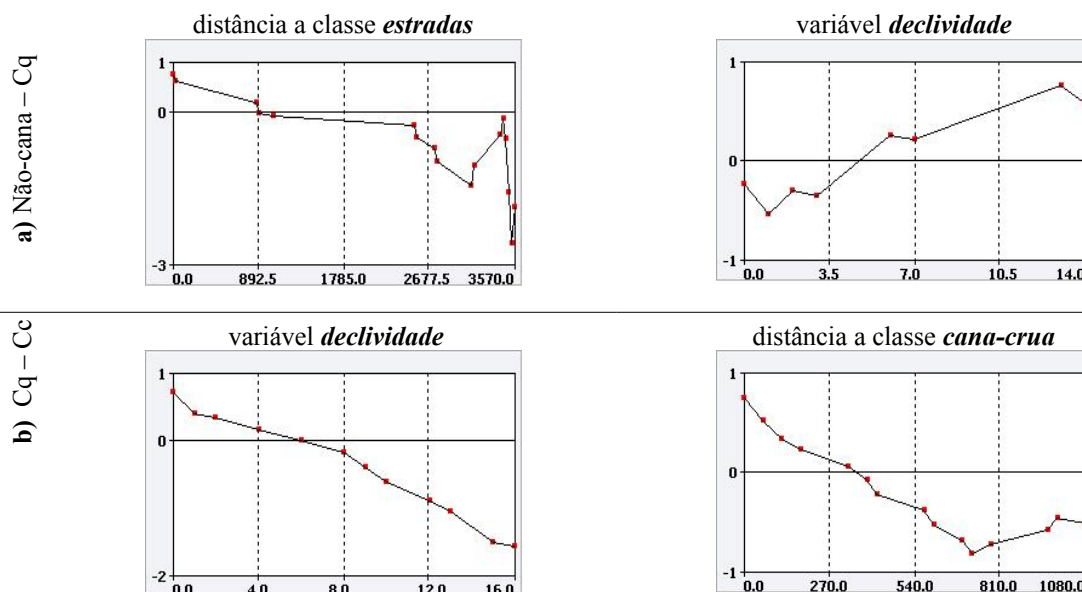


Figura 2 - Pesos de variáveis relativas à Região 1.

Na Figura 3, observa-se que a mudança de novas áreas de plantação de cana em 2008 na região 2, onde foi utilizada a prática da queima (a), foi condicionada pela distância aos rios e pela proximidade a áreas onde já se praticava a colheita com o uso do fogo.

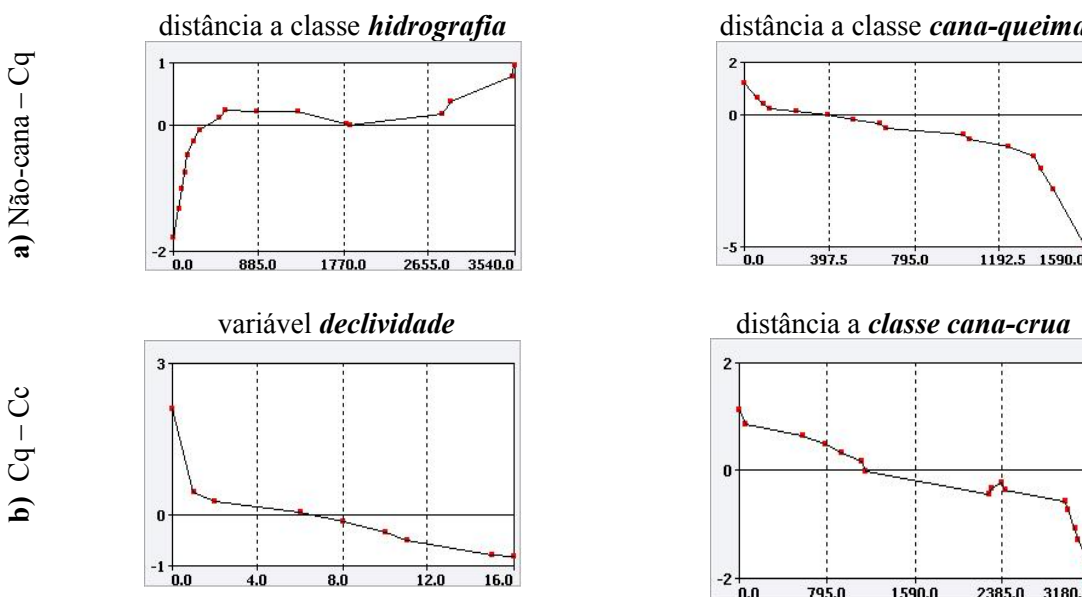


Figura 3 - Pesos de variáveis relativas à Região 2.

Uma mudança esperada com o protocolo ambiental é a extinção da prática da queima em função da adoção de máquinas na colheita da cana (b). A proximidade às áreas mecanizadas exerce papel de atração, visto que esta região se encontra consolidada, e as mudanças ao longo das principais vias já ocorreram em tempo pretérito. E como esperado, nas áreas cuja declividade permite a mecanização, há uma maior chance para este tipo de transição.

Dentre os 11 mapas de probabilidade de transição gerados para cada região de estudo, destaca-se, na Figura 4, que nos municípios de Ribeirão Preto e Jaboticabal é maior a probabilidade de ocorrência de queima (a), sendo que o contrário apresenta-se como mais favorável na parte leste de Ribeirão Preto e a leste e sul de Jaboticabal, coincidentemente, onde já existem lavouras predominantemente mecanizadas (b).

Na região 2, nota-se que os municípios de Itaju, Dois Córregos e a parte central de Jaú possuem maior probabilidade de ocorrer ainda novas lavouras que utilizem a queima como prática na colheita da cana (c). Por outro lado, nos municípios de Bocaina e Pederneiras existe alta probabilidade de surgir novas lavouras em consonância com o protocolo ambiental, isto é, sem queima (d).

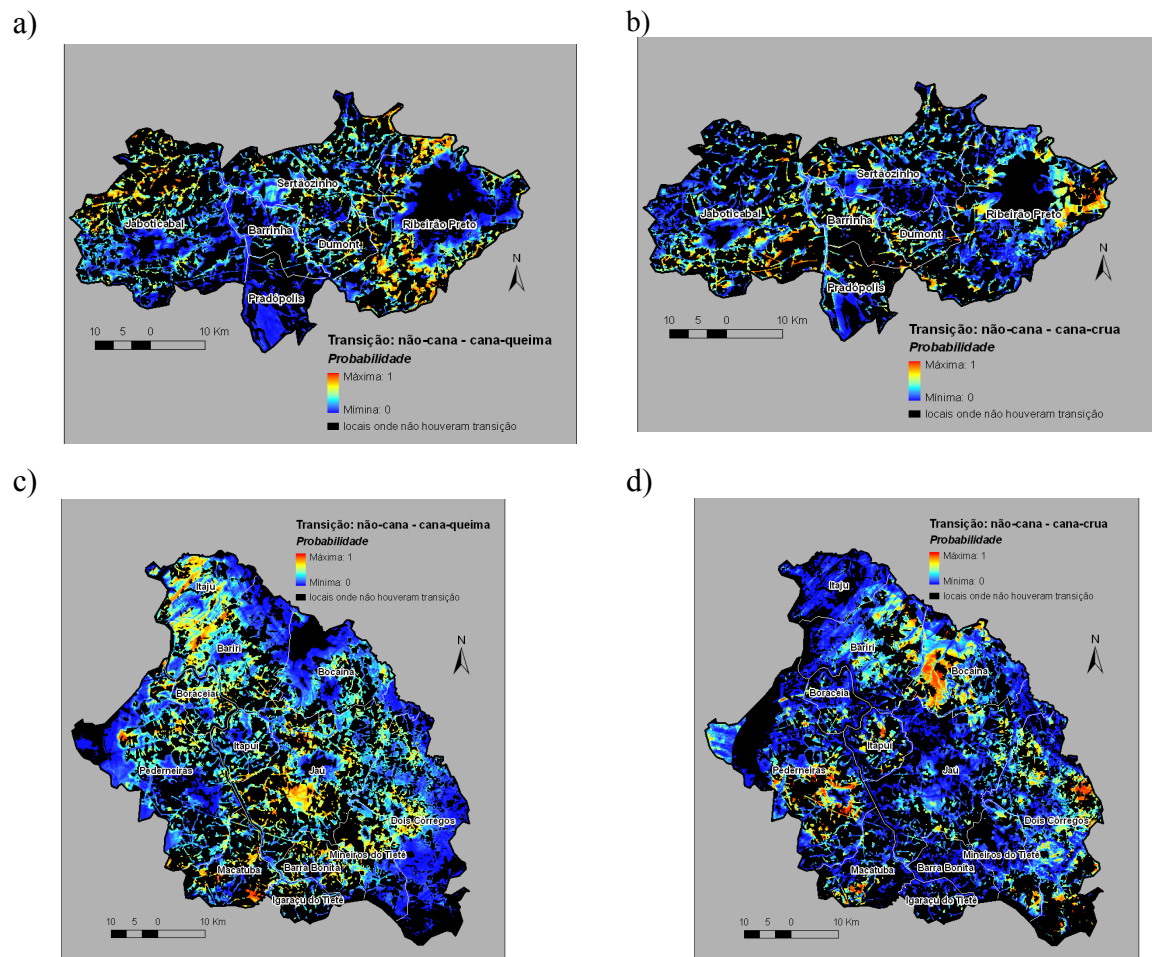


Figura 4 – Mapas de probabilidade de transição. a) Região 1: não-cana – cana-queima; b) Região 1: não-cana – cana-crua; Região 2: não-cana – cana-queima; Região 2: não-cana – cana-crua

#### 4. Conclusões

Este trabalho permitiu apreender a complexidade manifestada no espaço agrícola do estado de São Paulo no tocante à cultura da cana e às suas formas de manejo, por meio do aporte de um conjunto de fatores intervenientes estáticos e dinâmicos. Variáveis físicas e econômicas combinadas tornam-se necessárias para a elaboração de um modelo dotado de complexidade condizente com a dinâmica do modo de colheita da cana.

O modelo dinâmico, parametrizado pelo método bayesiano de pesos de evidência, mostrou-se adequado para o entendimento das variáveis condicionantes e da probabilidade da ocorrência das transições relativas às áreas de cana-queima e de cana-crua. Das variáveis que contribuem para a dinâmica da colheita da cana, destacam-se as variáveis contínuas, como declividade e distância aos rios, às estradas, às usinas, às classes de cana e aos aglomerados urbanos. As demais variáveis pouco ou nada contribuíram para este entendimento.

Por fim, o período de observações ainda é pequeno. Ao longo de uma série histórica mais extensa, a probabilidade de resultados mais precisos e confiáveis torna-se maior. Sugere-se, a

partir desta metodologia, que a análise desses condicionantes seja realizada anualmente. Além disso, recomenda-se avaliar se as transições indicadas pelos mapas de probabilidade realmente ocorrem nos anos seguintes, com o intuito de validar a metodologia.

## Referências Bibliográficas

Aguiar, D. A.; Adami, M.; Rudorff, B. F. T.; Sánchez, G. A.; Barros, M. A.; Sugawara, L. M.; Shimabukuro, Y. E.; Moreira, M. A. **Mapeamento da colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo: ano safra 2006/2007**. São José dos Campos: INPE, 2007b. 48 p. (INPE-14788-RPE/811). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/12.10.12.56>>. Acesso em: dezembro de 2009.

Almeida, C. M.; Gleriani, J. M. Redes Neurais e Autômatos Celulares como uma Plataforma para a Simulação de Mudanças do Uso do Solo Urbano. In: Almeida, Cláudia Maria de; Câmara, Gilberto; Monteiro, Antonio Miguel Vieira (Ed.). **Geoinformação em urbanismo: cidade real x cidade virtual**. São José dos Campos, SP: Digital Press, 2007. p. 300-323. ISBN 9788586238550. (INPE--/). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m12@80/2007/05.09.13.44>>. Acesso em: 23 abr. 2010.

Almeida, C. M.; Monteiro, A. M. V.; Câmara, G. Perspectiva histórica de modelos de dinâmicas urbanas e regionais. In: Almeida, Cláudia Maria de; Câmara, Gilberto; Monteiro, Antonio Miguel Vieira (Ed.). **Geoinformação em Urbanismo: cidade real x cidade virtual**. São José dos Campos, SP: Digital Press, 2007b. p. 249-281. ISBN 9788586238550. (INPE--/). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m12@80/2007/05.09.12.35>>. Acesso em: 23 abr. 2010

Bonham-Carter, G. F. **Geographic Information Systems for geoscientists: modelling with GIS**. Ontario: Pergamon, 1994, 305 p.

Briassoulis, H. Analysis of land use change: theoretical and modelin approaches. Lescos, Greece. Tese de Doutorado em Geografia – University of Aegean, 2000. Disponível em: <http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/contents.htm>. Acesso em 22 de janeiro de 2010.

CANASAT, 2009. Disponível em: [www.inpe.br/CANASAT](http://www.inpe.br/CANASAT) (acesso em janeiro de 2009)

Hagen, A. Multi-method assessment of map similarity. In: 5th AGILE Conference on Geographic Information Science, Palma, Spain. **Anais...** Palma: Universitat de les Illes Balears, 2003. p. 171–182.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) . Levantamento sistemático da produção agrícola. 2008. Disponível em: [www.sidra.ibge.gov.br](http://www.sidra.ibge.gov.br) (acesso em novembro de 2009).

Novaes, M. R. Análise da redução da queima na colheita da cana-de-açúcar por meio de modelagem dinâmica espacial. 2010. 153 p. (INPE-16696-TDI/1640). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2010. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/02.25.12.38>>. Acesso em: 20 out. 2010.

Novaes, M. R.; Rudorff, B. F. T.; Almeida, C. M.; Aguiar, D. A. Análise espacial da redução da queima na colheita da cana-de-açúcar. **Revista de Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, SP. 2010. (no prelo).

Soares filho, B. S.; Assunção, R. M.; Pantuzzo, A. E. Modeling the spatial transition probabilities of landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. **BioScience**, v. 51, n. 12, p. 1059-1067, 2001.

Soares filho, B. S.; Rodrigues, H. O.; Falieri, A.; Costa, W. L. **DINAMICA EGO Tutorial**. Belo Horizonte. CSR-UFMG. 2008.

Wolfram, S. Statistical mechanics of cellular automata. **Review of Modern Physics**, v. 55, p. 601-643, 1983.