

## Cinética de congelamento e difusividade térmica efetiva do feijão fava<sup>1</sup>

Regilane Marques Feitosa<sup>2</sup>, Renato Costa da Silva<sup>3</sup>, João Carlos Soares de Melo<sup>4</sup>, Analha Dyalla Feitosa Lins<sup>5</sup>, Patricia Rodrigues Pê<sup>5</sup>, Silvana Nazareth Oliveira<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Submetido em: 01-08-2016 e aprovado em: 15-06-2017

<sup>2</sup>Bolsista PNP/CAPEs, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande-PB, CEP: 58107-670; e-mail: regilanemarques@gmail.com

<sup>3</sup>Mestrando em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande-PB, CEP: 58107-670; e-mail: renatinocosta@gmail.com

<sup>4</sup>Técnico de Laboratório, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), Caicó-RN, CEP: 59300-000; e-mail: jcarlosmequi@yahoo.com.br

<sup>5</sup>Mestrando em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande-PB, CEP: 58107-670; e-mail: dyallalins@gmail.com; patriciarodriguespe@yahoo.com.br

<sup>6</sup>Profª. Drª., Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Garanhuns-PE, CEP: 58.429-140; e-mail: silvana\_nazareth@yahoo.com.br

**Resumo:** O feijão fava é uma leguminosa produzida na região Nordeste e existe um mercado consumidor assegurado para seu consumo, porque além de fornecer proteína vegetal, oferta um sabor diferente para a população como substituto do feijão, tornando-se uma fonte de renda para os produtores. O feijão fava é cultura que logo após a colheita é submetida ao processo de secagem para a conservação, porém verificar o comportamento dos grãos em diferentes condições é importante como forma de conservação. O congelamento é uma forma de conservação que inibi o crescimento microbiano e praticamente retarda todo o processo metabólico. Diante do exposto, teve-se como objetivo umidificar o feijão fava de lima, até 30% b.u, e determinar o comportamento da cinética de congelamento utilizando diferentes temperaturas: -15 e -25°C; -50 e -80°C (temperaturas semi-criogênicas); -170° C (vapor de nitrogênio) e -196°C, assim como a difusividade térmica. A equação utilizada para a obtenção da cinética de congelamento foi a de resfriamento unidirecional. Nas curvas de congelamento obtidas, nas temperaturas estudadas, não se distinguem as três fases típicas das curvas de congelamento da água pura, indicando que 30% é um valor, relativamente, baixo quanto ao percentual de teor de água. Em relação a difusividade, ocorreu uma tendência de aumento com a diminuição da temperatura.

**Palavras-chaves:** *Phaseolus lunatus* L; Grãos, Resfriamento; Temperaturas criogênicas; Curvas de congelamento.

## Kinetics of freezing and effective thermal diffusivity of fava beans

**Abstract:** The fava beans is a legume grown in the Northeast and there is a consumer market assured to its consumption, because in addition to providing supply vegetable protein yet a different flavor to the population, such as beans substitute, becoming a source of income for producers. It is a culture that soon after harvest is subjected to drying process for conservation, but verify the behavior of the grains in different conditions is important as a way of conservation. The freezing is a way of preservation which inhibit microbial growth slows down and virtually all metabolic process. Given the above, we had to aim to humidify the fava beans (*Phaseolus lunatus* L), up to 30% b.u, and determine the behavior of freezing kinetics using different temperatures: -15 to -25° C; -50 And -80°C (semi-cryogenic temperatures); -170°C (nitrogen vapor) and -196°C (cryogenic temperature) and the thermal diffusivity. The equation used for obtaining the freezing kinetics was unidirectional cooling. Freezing curves obtained, at all temperatures, studied did not distinguish between the three typical phases of freezing curves of pure water; indicating that 30% is a value relatively low percentage of humidity; In relation to diffusivity, a tendency of increase occurred with the decrease of the temperature.

**Key words:** *Phaseolus lunatus* L; Grain; Cooling; Cryogenic temperatures; Freezing curves.

## 1 Introdução

A fava ou feijão-fava (*Phaseolus lunatus* L.), desenvolveu uma notória resistência ao clima semiárido nordestino, que é uma região caracterizada pelo baixo índice pluviométrico (Francisco et al., 2016). Por esse motivo, ela é uma importante opção de alimento a ser produzido nas comunidades rurais do Nordeste.

É considerada a segunda leguminosa com maior importância do gênero *Phaseolus*, em virtude do seu conteúdo proteico, sendo explorada como fonte de alimentação e alternativa de renda pela população e pequenos produtores, na forma de grãos verdes, secos e até mesmo cozidos (SANTOS et al., 2009).

Segundo o IBGE (2015), o Brasil teve uma área de 21.329 ha destinada a o plantio de fava resultando na produção de 4.048 t do grão. Diante da possível demanda, a compreensão do desempenho fisiológico e nutritivo do grão, constitui um importante parâmetro para tomada de decisão sobre o modo mais adequado de armazenamento (OLIVEIRA et al., 2011). Sabendo que os produtos agrícolas são bastante perecíveis, Braga, Cavalcanti Mata e Silva (2003) descreveram o congelamento como um método viável de conservação.

Além de todas essas potencialidades, o feijão-fava é constantemente usado em pesquisas de melhoramento genético e para que essas pesquisas continuem sendo realizadas é indispensável a sua manutenção em bancos de germoplasma, onde as sementes são armazenadas com o propósito de desenvolvimento de estudos de novas cultivares com uma maior produtividade para diversas condições edafoclimáticas e uma maior resistência a doença (ALMEIDA et al., 2010; TRESENA et al., 2009). Um parâmetro indispensável a conservação de germoplasma é o congelamento do material genético (CAVALCANTI et al., 2012).

O congelamento é uma importante ferramenta para a manutenção da qualidade fisiológica de sementes e materiais vegetais armazenados, com possibilidade de oferecer uma qualidade desejável para o consumo. A qualidade desses produtos dependerá da velocidade de congelamento, que é influenciada por um grande número de variáveis (ALMEIDA et al., 2013).

Pode-se dar três nomenclaturas ao congelamento: convencional ou lento, feito a

baixas temperaturas (geralmente em freezer a  $-80^{\circ}\text{C}$ ); semicriogênico ou rápido, realizado através do vapor de nitrogênio a  $-170^{\circ}\text{C}$  e o criogênico que é um congelamento ultra-rápido feito em nitrogênio líquido com uma temperatura de  $-196^{\circ}\text{C}$  (CAVALCANTI-MATA; DUARTE, 2011). Ao aplicar as temperaturas de  $-196^{\circ}\text{C}$  e  $-170^{\circ}\text{C}$ , COELHO (2006) afirma que os processos metabólicos são praticamente paralisados, fazendo com que os processos de deterioração do material ocorram de forma muito lenta, podendo ser armazenados por períodos prolongados.

Para o congelamento, o conhecimento do coeficiente da difusividade térmica é de fundamental importância, por ser uma propriedade de transporte necessária na modelagem e nos cálculos de transferência de calor transiente, além de ser essencial para a simulação durante o congelamento no interior de um alimento, tornando-se de grande valia para a indústria, pois sem esta propriedade termofísica não seria possível calcular a transferência de calor nas substâncias (TRES et al. 2011).

Diante do exposto, o trabalho teve como objetivo determinar a velocidade de congelamento e a difusividade térmica em sementes de feijão-fava.

## 2 Material e Métodos

O trabalho foi realizado na Universidade Federal de Campina grande – UFCG no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola. O feijão fava, da variedade lima (*Phaseolus lunatus* L), foi obtido na feira livre da cidade de Campina Grande – PB. Os grãos encontravam-se secos, apresentando teor de água inicial em torno de 13% b.u., e foram umidificados até atingirem o teor de 30% b.u.

Os grãos foram medidos quanto ao comprimento, espessura e largura utilizando-se um paquímetro digital. Para realização da cinética de congelamento, foi realizado um furo no centro geométrico de cada amostra (3 grãos - individualmente) e inserido um termopar para monitoramento da temperatura no interior da amostra. Outro termopar foi afixado no interior do ambiente em que se realizaram as leituras, ou seja, em freezer horizontal para as temperaturas de  $-15^{\circ}\text{C}$ ,  $-25^{\circ}\text{C}$ ,  $-50^{\circ}\text{C}$  e  $-80^{\circ}\text{C}$ , no nitrogênio a vapor  $-170^{\circ}\text{C}$ , e no nitrogênio líquido  $-196^{\circ}\text{C}$ . Com a finalidade de monitorar a variação de

temperatura registradas em tempos já definidos. Os valores experimentais obtidos das curvas de congelamento das amostras foram tratados matematicamente empregando as equações de Fourier:

$$RT = \frac{T-T_{\infty}}{T_0-T_{\infty}} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \text{Exp}(\sigma_n^2 \cdot Fo) \quad (1)$$

$$\frac{T-T_{\infty}}{T_0-T_{\infty}} = RT \quad (2)$$

$$A_n = \frac{2 \cdot \text{sen} \sigma_1}{\sigma_1 + \text{sen} \sigma_1 \cdot \text{cos} \sigma_1} \quad (3)$$

$$Fo = \left(\frac{\sigma}{L^2}\right) \cdot t \quad (4)$$

Em que:

- RT - razão de temperatura, adimensional;
- T - temp. em cada momento, °C;
- T<sub>∞</sub> - temp. do meio de congelamento, °C;
- T° - temp. inicial do produto, °C;
- F<sub>o</sub> - número de Fourier, adimensional;
- A<sub>n</sub> - constante que depende do produto;
- σ<sub>n</sub> - raiz transcendental;
- α - difusividade térmica efetiva, mm<sup>2</sup>/s;
- L - espessura da semente/2;
- t - tempo, segundos.

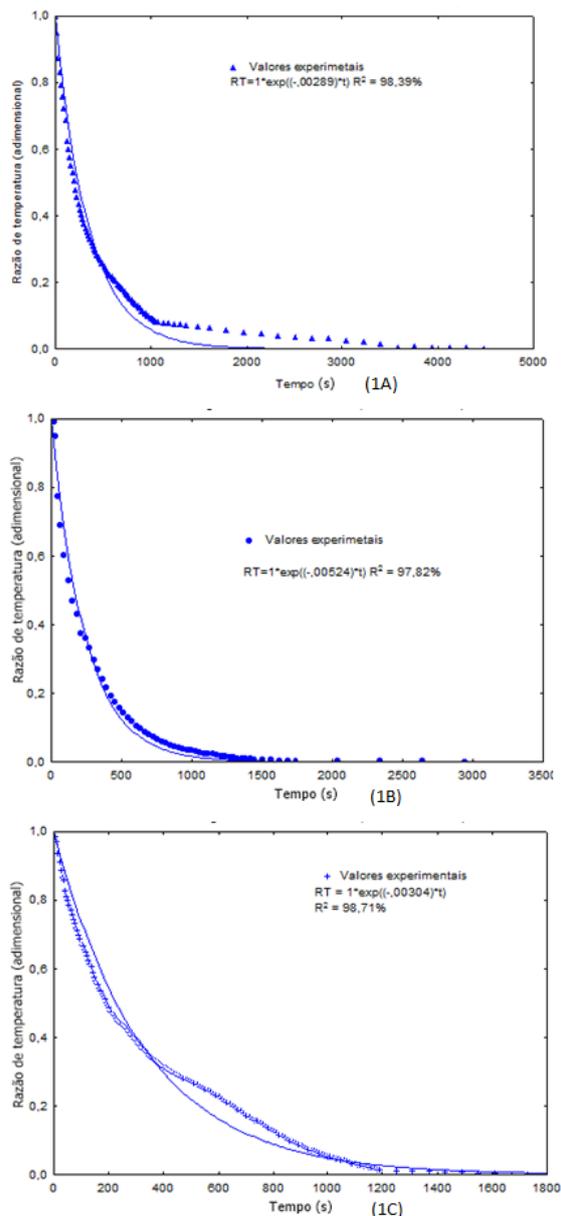
Para obtenção dos coeficientes da equação (1), utilizando os dados da razão de temperatura em função do tempo, foi feita uma análise de regressão não linear, através do software Statística, versão 7.0.

### 3 Resultados e Discussão

Observa-se na Figura 1 (A, B e C) as curvas de congelamento do feijão-fava submetido as temperaturas de -15° C, -25° C e -50° C. Verifica-se que para atingir as temperaturas pré-estabelecidas foi necessário o tempo de 4485 s, 3075 s e 1730 s, respectivamente, e que a redução da temperatura fez com que as amostras congelassem mais rápido. Nota-se um comportamento exponencial semelhante nas curvas devido a presença de água no grão (30% b.u.)

Estudando sementes de algodão, Coelho (2006) percebeu que com 12% b.u. as curvas de congelamento não tiveram fases distintas, o que implica que o conteúdo de água foi insuficiente para se gerar uma curva sigmóide, tendo a curva

comportamento de matéria seca que é uma curva exponencial.

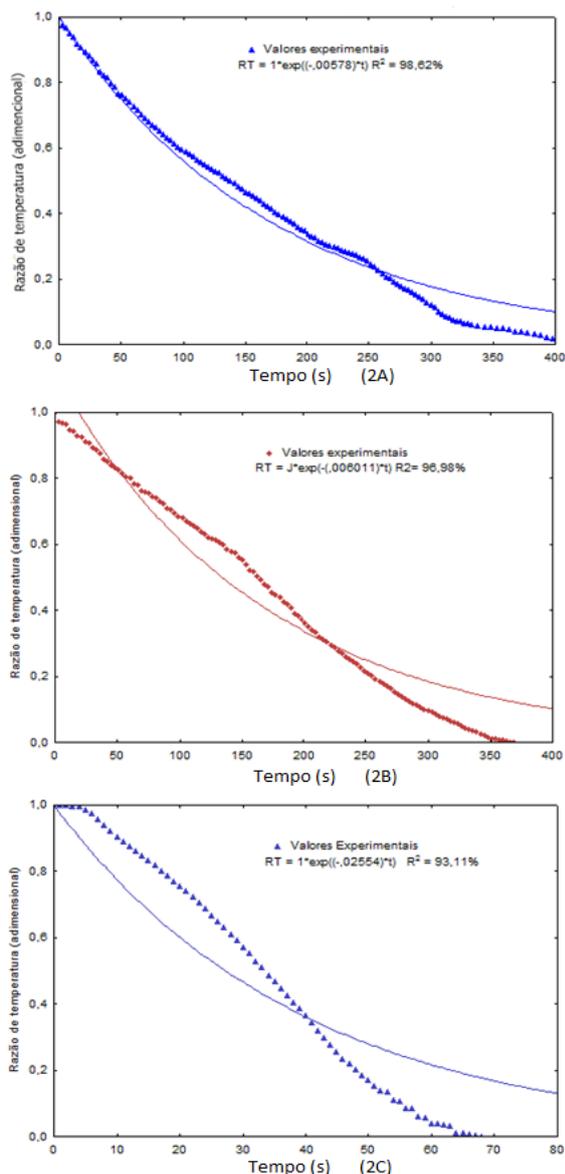


**Figura 1** Curvas de congelamento do feijão-fava nas temperaturas de -15° C (1A), -25° C (1B), -50° C (1C) a 30% b. u.

Verifica-se que quanto menor a temperatura, mais rápido ocorre o congelamento. Goldfarb et al. (2010) ao estudarem o comportamento de sementes de pinhão manso exposto ao congelamento as temperaturas de -170° C e -196° C chegaram à conclusão que quanto maior o gradiente térmico a que o produto está exposto, maior também será a velocidade de congelamento.

Na Figura 2 (A, B e C) são apresentadas as curvas de congelamento do feijão-fava, nas

temperaturas de  $-80^{\circ}\text{C}$  (semi-criogênica),  $-170^{\circ}\text{C}$  (vapor de nitrogênio) e a  $-196^{\circ}\text{C}$  (nitrogênio na fase líquida), cujo comportamento é semelhante as curvas de  $-15^{\circ}\text{C}$ ,  $-25^{\circ}\text{C}$  e  $-50^{\circ}\text{C}$ , ou seja, apresentam comportamento semelhante a fase de resfriamento no congelamento.



**Figura 2** Curvas de congelamento do feijão-fava a temperatura de  $-80^{\circ}\text{C}$  (2A),  $-170^{\circ}\text{C}$  (2B) e  $-196^{\circ}\text{C}$  (2C) a 30% b. u.

Diante das curvas obtidas é possível afirmar que a amostra umedecida, não apresenta as três fases típicas de congelamento, mas predomina a curva característica da matéria seca, por apresentar baixo percentual de água. Goldfarb et al. (2010) observaram que as curvas da cinética de congelamento de sementes de pinhão manso (8% b.u), nas temperaturas de  $-170^{\circ}\text{C}$  e  $-196^{\circ}\text{C}$ , não apresentaram as três fases típicas de

congelamento, sendo uma curva exponencial típica. Coelho (2006) ao congelar sementes de algodão apresentando teor de água na faixa de 7,9, 9,0, 10,5, 12,0 e 13,0%, afirma que não se distinguem as três fases nas curvas de congelamento das sementes por imersão em nitrogênio líquido ( $-196^{\circ}\text{C}$ ), isso é devido à maior velocidade de congelamento e um maior gradiente térmico a que estão expostas às sementes.

O tempo necessário para a amostra chegar à temperatura semi-criogênica de  $-80^{\circ}\text{C}$  foi igual a 400 s; para as sementes congeladas em nitrogênio na fase vapor, a  $-170^{\circ}\text{C}$ , o tempo para alcançar a temperatura pré-definida foi aos 369 s e as sementes imersas em nitrogênio líquido a  $-196^{\circ}\text{C}$ , foi de 68 s. Observa-se o mesmo decréscimo no tempo de congelamento com a diminuição da temperatura. Verifica-se que ocorreu uma queda brusca no tempo de congelamento do feijão-fava, ao aplicar o congelamento rápido ( $-196^{\circ}\text{C}$ ), esse fato é positivo por formar pequenos cristais de gelo sem danificar a qualidade do produto submetidos a esse tipo de conservação.

### 3.1 Difusividade Térmica

Na Tabela 1, encontram-se as difusividades térmicas efetivas do grão da fava, nas temperaturas de  $-15^{\circ}\text{C}$ ,  $-25^{\circ}\text{C}$ ,  $-50^{\circ}\text{C}$ ,  $-80^{\circ}\text{C}$ ,  $-170^{\circ}\text{C}$  e  $-196^{\circ}\text{C}$ . Observa-se que a difusividade térmica apresentou um comportamento de aumento com a diminuição da temperatura; e ao aplicar a temperatura de  $-196^{\circ}\text{C}$  observa-se um valor representativo em relação as outras temperaturas aplicadas, cujo calor se propaga rapidamente.

**Tabela 1** Difusividade térmica do grão da fava a 30% de b.u

Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\alpha$ ( $\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$ )
-15	3,54
-25	3,42
-50	3,72
-80	7,08
-170	9,43
-196	31,3

Alimentos com valor de difusividade térmica elevado agem rapidamente a mudanças térmicas em seu ambiente, enquanto alimentos de pequenos valores agem mais lentamente, demorando a alcançar um novo estado de

equilíbrio (BERGMAN *et al.*, 2011). Almeida *et al.* (2013b) obtiveram valor de difusividade para a temperatura de  $-150^{\circ}\text{C}$  de  $0,0000676\text{ mm}^2/\text{s}$ , para o feijão Caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp.) variedade Itaim, com teor de água de 20% b.u. Segundo Tres *et al.* (2011) a difusividade térmica de um material é influenciada pela quantidade de água, pela temperatura, pela composição e pela porosidade; como em muitos processos, o conteúdo de água e a temperatura de um produto podem variar, consideravelmente, o valor da difusividade térmica também pode variar.

Aumento da difusividade com a redução da temperatura também foi relatado por, Cavalcanti-Mata *et al.* (2012) ao traçarem as curvas de congelamento do feijão, cultivar 'gordo', nas temperaturas de  $-25$ ,  $-50$ ,  $-170$  e  $-196^{\circ}\text{C}$  e determinarem sua difusividade térmica efetiva relataram valores de  $0,2688$ ,  $0,3987$ ,  $0,7394$  e  $4,0457\text{ (mm}^2\text{ min}^{-1}\text{)}$ , respectivamente; e Araújo, Braga e Cavalcanti Mata (2000) constatando valores da difusividade térmica efetiva média da polpa de acerola a  $-22,6^{\circ}\text{C}$  de  $1,23\text{ m}^2\text{s}^{-1}$ , a  $-100^{\circ}\text{C}$  foi de  $10,77\text{ m}^2\text{s}^{-1}$  e a  $-196^{\circ}\text{C}$  de  $24,21\text{ m}^2\text{s}^{-1}$ . Almeida *et al.* (2013a) ao estudarem a cinética de congelamento de três tipos diferentes de óleos de mamona BRS Paraguaçu, BRS Energia e Asselvajada relataram valores de  $8,3$ ,  $6,5$  e  $8,08\text{ mm}^2/\text{s}$ , respectivamente, para a difusividade na temperatura de  $-196^{\circ}\text{C}$ .

#### 4 Conclusões

O gradiente térmico influi na velocidade de congelamento e não se distinguem as três fases típicas das curvas de congelamento para as amostras umedecidas até 30% b. u, em todas as temperaturas;

Em relação a difusividade, ocorreu uma tendência de aumento com a diminuição da temperatura.

#### Referências

- ALMEIDA, F. de A. C. *et al.* Estudo de técnicas para o armazenamento de cinco oleaginosas em condições ambientais e criogênicas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.12, p.189202, 2010.
- ALMEIDA, K. M. *et al.* Cinética de resfriamento e congelamento do óleo obtido de três diferentes genótipos de mamona. **Revista Verde** (Mossoró – RN - Brasil), v. 8, n. 1, p. 178 – 183, 2013a.
- ALMEIDA, R. D. *et al.* Estudo das curvas de congelamento criogênico das sementes de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) walp.) variedade itaim. III CONAC Congresso Nacional de Feijão Caupi. Abril de 2013, **Anais...** Recife: IPA. 2013b.
- ARAÚJO, M. S. O de; BRAGA, M. E. D.; CAVALCANTI MATA, M. E. M. Cinética de congelamento de polpa de acerola a baixas temperaturas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 2, n. 1, p.55-62, 2000.
- BERGMAN, L. T. *et al.* **Introduction to Heat Transfer**, 6ª Ed, New York, John Wiley & Sons, Inc. 2011, 953p.
- BRAGA, M. E. D.; CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; SILVA, M. Curvas de congelamento de frutos de cajá (*Spondias lutea* L.). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. especial, n.1, p.55-62, 2003.
- CAVALCANTI MATA, M. E. R. M. *et al.* Cinética de congelamento do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) a baixas temperaturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.6, p.667–674, 2012.
- CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; DUARTE, M. E. M. Teoria e modelos matemáticos para congelamento de sementes. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.13, p. 256-266, 2011.
- COELHO, R. R. P. **Protocolo de criopreservação de sementes de algodão (*Gossypium hirsutum* L. raça *Latifolium* Hutch.) cultivares BRS 200 marrom e BRS verde**. 2006. 89p. Tese (Doutorado em Agronomia), Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências Agrárias, Areia, PB, 2006.
- FRANCISCO, P. R. M. *et al.* Oscilação pluviométrica anual e mensal no estado da Paraíba-Brasil. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 33, n. 3, p.141-154, 2016.
- GOLDFARB, M. *et al.* Cinética de congelamento criogênico de sementes de pinhão manso (*Jatropha curcas* L.). **Engenharia Ambiental**. v. 7, n. 1, p. 195-203, 2010.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal Culturas Temporárias e Permanentes**. v. 42, 2015, p. 17.

- OLIVEIRA S. N. et al. Cinética de congelamento de grãos de soja em diferentes temperaturas. XXXV CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS DE PARTÍCULADOS, 2011, Rio de Janeiro, **Anais...** Rio de Janeiro: UFRRJ– RJ, 2011.
- SANTOS, J. O. et al. Ontogenia da nodulação em feijão-fava (*Phaseolus lunatus*). **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 4, n. 4, p. 426-429, 2009
- TRES, M. V. et al. Determinação da difusividade térmica de alimentos: medidas experimentais e simulação numérica. **Perspectiva**, v.35, n.131, p. 43-56, 2011.
- TRESENA, N. de L. et al. Qualidade fisiológica da semente de ipê rosa (*Tabebuia heptaphylla* (Vellozo) Toledo) submetidas à crioconservação. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.11, p.87-93, 2009.