



Um modelo baseado no indivíduo para avaliação de configurações de plantio *push and pull* no controle do HLB dos citros

Sônia Ternes¹, Marcos Cezar Visoli¹, Marilene Fancelli², Maria de Fátima Ferreira da Costa Pinto², Francisco Ferraz Laranjeira²

¹Embrapa Agricultura Digital
Av. André Tosello 209 – Campus da Unicamp – 13083-886 – Campinas – SP – Brasil

²Embrapa Mandioca e Fruticultura
Rua Embrapa s/nº – Caixa Postal 007 – 44380-000 – Cruz das Almas – BA – Brasil

{sonia.ternes,marcos.visoli, marilene.fancelli, fatima.costa,
francisco.laranjeira}@embrapa.br

Abstract. *Citrus greening (HLB) is a severe and incurable disease that significantly impacts the citrus industry. To mitigate the impact of this disease, new control strategies have been explored, including the manipulation of spatial configurations of citrus plantings with companion plants that attract or repel the HLB insect vector. This study introduces an individual-based model to assess three simulation scenarios in orchards (in silico) with varying spatial configurations: citrus alone, citrus with mango ("push plant"), and citrus with rue ("pull plant"). The findings demonstrate the potential of intercropping rue with citrus as a pesticide-free method to control the epidemic in the field.*

Resumo. *O amarelão dos citros (HLB) é uma doença grave e incurável que causa grande impacto econômico na citricultura nacional. Para minimizar seu impacto, novas estratégias de controle vem sendo exploradas, considerando diferentes configurações espaciais de plantio de citros em conjunto com plantas atratoras ou repulsoras do inseto vetor do HLB. Este trabalho apresenta um modelo baseado no indivíduo para avaliar três cenários de simulação em pomares (in silico) com diferentes configurações espaciais: somente citros, citros com manga (repulsora) e citros com arruda (atratora). Os resultados mostram o potencial do plantio de arruda intercalar com citros no controle da epidemia no campo sem necessidade de uso de pesticida.*

1. Introdução

O Huanglongbing (HLB) dos citros (ou *greening*) é uma importante doença presente atualmente em cinco estados brasileiros, que já causa grande prejuízo para a citricultura nacional [Fundecitrus 2023]. A bactéria *Candidatus Liberibacter asiaticus* é a principal causadora da doença no Brasil e seu vetor é o psílídeo *Diaphorina citri*, encontrado facilmente em todo o território nacional [Parra *et al.* 2022]. A doença é incurável e seu controle exige a eliminação de plantas doentes, o plantio de mudas sadias e o controle do psílídeo [Belasque *et al.* 2010].

O psílídeo passa por seis estágios de desenvolvimento de ovo a adulto no hospedeiro principal (citros) e em hospedeiros alternativo (como a *Murraya paniculata* ou murta) [García *et al.* 2016]. Ao se alimentar da seiva de plantas infectadas a *D. citri* adquire a bactéria e pode transmiti-la ao se alimentar em plantas sadias. O inseto pode adquirir a bactéria na fase de ninfa, gerando adultos altamente infectivos quando comparados àqueles que adquiriram a bactéria na fase adulta [Ammar *et al.* 2016].

Pesquisas foram desenvolvidas visando compreender a dinâmica de disseminação do inseto em diferentes configurações de plantio envolvendo citros e murta [Vilamiu *et al.* 2013; Laranjeira 2015], não demonstrando diferenças significativas no uso deste hospedeiro alternativo como estratégia para controle da disseminação da doença.

Este trabalho apresenta um modelo baseado no indivíduo (MBI) para avaliar a dinâmica da doença em diferentes configurações de plantio *push and pull* (repele – atrai) para o inseto vetor, explorando o potencial de limitação da disseminação do HLB em pomares de citros. No MBI são comparados os resultados de três diferentes cenários de simulação *in silico* em um pomar fictício no Recôncavo Baiano, composto por nove talhões: 1) pomar somente com citros (*baseline*); 2) pomar contendo manga (interferente repelente) nas bordas de cada talhão e citros no meio; 3) pomar contendo arruda (interferente atrator) em configuração intercalar com citros nas colunas dos nove talhões.

Nas seções seguintes são apresentados detalhes do MBI implementando em linguagem de programação Python, bem como os resultados obtidos, visualizados a partir de um software desenvolvido em linguagem de programação Java.

2. Modelo Baseado no Indivíduo (MBI)

Na modelagem baseada no indivíduo (MBI), cada indivíduo das populações envolvidas é representado explicitamente como entidade única que carrega informação ao longo da simulação (características do indivíduo), que evolui estocasticamente no tempo [Grimm e Railsback 2005]. O MBI permite observar as interações entre os indivíduos e do indivíduo com o meio. Assim, tal abordagem facilita o estudo da propagação espaço-temporal do HLB e, conseqüentemente, a identificação de impactos não intuitivos destas interações.

O modelo desenvolvido representa quatro populações envolvidas no patossistema: 1) hospedeiro principal (citros); 2) inseto vetor *D. citri* na fase de ninfa; 3) inseto vetor na fase adulta; 4) planta interferente atratora (arruda) ou repulsora (manga). A Tabela 1 apresenta as características consideradas para cada indivíduo das populações.

O modelo considera que as plantas estão dispostas numa área de plantio composta por nove talhões de citros e cada talhão possui uma configuração retangular de 20x42 plantas (totalizando 840 plantas por talhão e 7.560 plantas no pomar). Em cada posição do talhão encontra-se uma planta hospedeira ou interferente, dependendo do cenário de simulação testado. Há um espaçamento de 6x4m entre plantas e considera-se espaçamento duplo entre os talhões. Os cenários aqui avaliados são: a) Cenário 1: apenas citros no pomar (*baseline*); b) Cenário 2: manga nas bordas de cada talhão e citros no interior (interferente repulsor); c) Cenário 3: arruda e citros em configuração intercalar na vertical (interferente atrator).

O modelo de simulação foi implementado em linguagem de programação Python e o usuário pode escolher os valores de parâmetros de entrada. Para todos os cenários, as simulações consideram: a) período de latência da doença em citros: 30 dias; b) período de incubação da doença em citros: 180 dias; c) quantidade inicial de insetos no início da simulação: 100 insetos x probabilidade do inseto entrar no sistema conforme cenário; d) quantidade de insetos na migração diária: 100 insetos x probabilidade do inseto entrar no sistema conforme cenário; e) fração de insetos migrantes bacterilíferos: 0,15; f) probabilidade de detecção de plantas hospedeiras sintomáticas na inspeção a campo realizada a cada 90 dias: 0,476. Os parâmetros biológicos foram obtidos por experimentos em casa de vegetação realizados pela Embrapa Mandioca e Fruticultura (Cruz das Almas, BA) ou a partir da literatura [Vilamiu *et al.* 2013]. Para os valores da capacidade de suporte, com base em dados observados em campo, utilizou-se 150 e 300 insetos/planta para os meses do primeiro e segundo semestres, respectivamente.

A simulação se inicia hipoteticamente no dia 01/01, a partir da entrada de insetos pelo lado esquerdo do pomar. A cada dia de simulação, cada indivíduo das populações envolvidas executa processos específicos, e o novo valor da categoria do indivíduo é atualizado ao final do dia de simulação. Os processos considerados no MBI são:

- Planta hospedeira: a) remoção; b) inspeção; c) infecção; d) capacidade de suporte; e) envelhecimento;
- Inseto adulto em citros: a) morte por pesticida; b) aquisição da bactéria; c) reprodução; d) migração; e) morte natural; f) envelhecimento;
- Inseto adulto na planta interferente atratora: a) morte por pesticida; b) migração; c) morte natural; d) envelhecimento;
- Inseto na fase de ninfa (em citros): a) morte por pesticida; b) aquisição da bactéria; c) maturidade; d) morte natural; e) envelhecimento;
- Processos relativos à paisagem: a) imigração diária de insetos; b) inspeção no campo (a cada 90 dias); c) controle periódico por pesticida (a cada 15 dias).

Na seção seguinte são apresentados os resultados para os três cenários de simulação citados anteriormente. As simulações foram realizadas para um período de dois anos em dois diferentes modos: a) tipo *single*: onde é possível acompanhar visualmente o resultado diário de uma execução específica, mostrando um “mapa” do pomar; b) tipo *mult*: onde são executadas 100 simulações do cenário escolhido para um mesmo conjunto de parâmetros, gerando os gráficos para os estados epidemiológicos da população de citros e de insetos adultos resultantes.

Tabela 1. Características das populações das plantas hospedeiras (citros), interferentes (manga e arruda) e inseto vetor

População	Característica	Categoria	
H: Planta	H ₁ : tipo	-1: citros removido	
		0: carreador (sem planta)	
		1: citros (hospedeiro)	
		3: manga (interferente atraente)	
		5: arruda (interferente atrator)	
	H ₂ : posição no pomar	(x _n , y _n) : posição da planta no pomar	
	H ₃ : estado epidemiológico (planta hospedeira)	0: suscetível	
		1: (0 < x <= τ ₁) infectado em estado de latência, com x igual ao número de dias no período de latência	
		2: (τ ₁ < x <= τ ₁ +τ ₁) infectado assintomático (incubação), com x igual ao número de dias no período de incubação	
		3: (x > τ ₁ +τ ₁) infectado sintomático	
H ₄ : idade	Número de dias		
H ₅ : capacidade de suporte corrente (planta hospedeira)	Quantidade de insetos adultos na planta no mês		
H ₆ : capacidade de suporte máxima (planta hospedeira e interferente atrator)	Quantidade máxima de insetos por mês que a planta pode suportar (sazonalidade)		
N: inseto vetor em estágio de ninfa	N ₁ : posição no pomar	(x _n , y _n) : localização na área de plantio (sobre uma planta)	
	N ₂ : estado epidemiológico	0: não infectivo	
		1: infectivo	
	N ₃ : idade corrente	Número de dias na fase ovo/ninfa	
N ₄ : idade máxima	Tempo máximo do indivíduo na fase ovo/ninfa		
A: inseto vetor adulto	A ₁ : posição no pomar	(x _a , y _a) : localização na área de plantio (sobre uma planta)	
		A ₂ : estado epidemiológico	0: não infectivo
			1: infectivo desde a fase de ninfa
		2: infectivo a partir da fase adulta	
	A ₃ : idade corrente	Número de dias na fase adulta	
A ₄ : idade máxima	Tempo máximo de vida		

3. Resultados

As figuras 1, 2 e 3 ilustram os resultados das simulações tipo *single* para cenários 1, 2 e 3, respectivamente, ao final de dois anos de execução (720 dias). Nessas figuras podemos visualizar, a cada dia de simulação, como ocorre a evolução da dinâmica da doença no pomar.

HLB Biomath3 - Simulador MBI

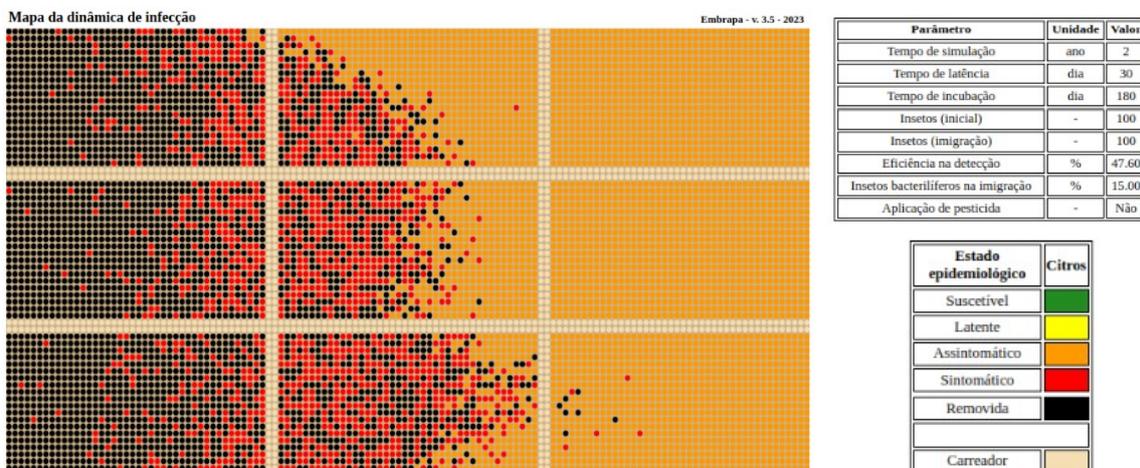


Figura 1. Mapa do pomar para o Cenário 1 (*baseline*) ao final da execução da simulação (720 dias).

HLB Biomath3 - Simulador MBI

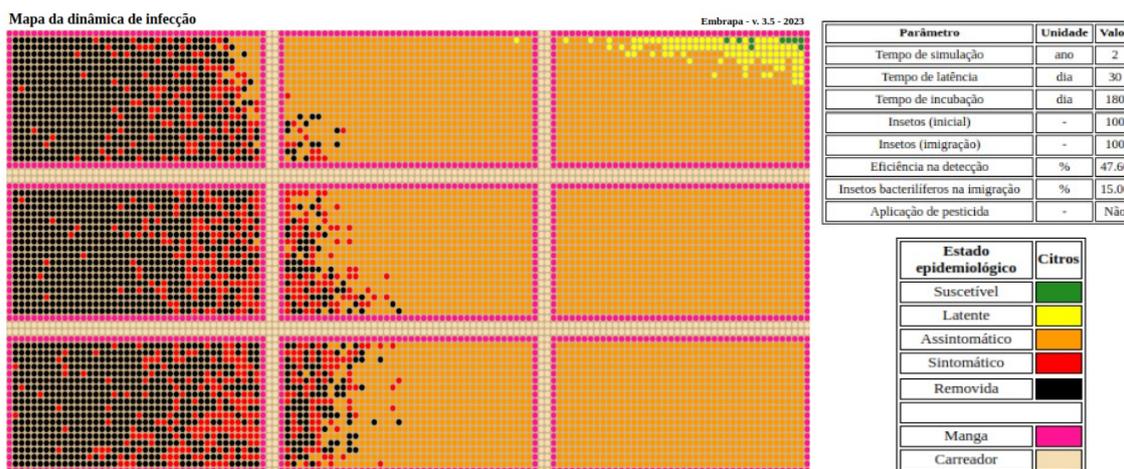


Figura 2. Mapa do pomar para o Cenário 2 ao final da execução da simulação (720 dias).

Na execução do Cenário 1 mostrado na Figura 1, observa-se que ao final de 720 dias temos a presença da doença em sete dos nove talhões, com uma grande quantidade removida de citros e com todo o pomar infectado. Observou-se que, em média, a doença atingiu o talhão alvo (talhão central) em torno de $435,0 \pm 17,6$ dias de simulação. Para o Cenário 2 (Figura 2), percebe-se a existência de algumas plantas suscetíveis ao final de dois anos de simulação. O tempo médio para a chegada da doença no talhão alvo foi de $459,5 \pm 28,6$ dias e, portanto, não se obteve diferença estatística para o tempo médio de chegada no talhão alvo entre os cenários 1 e 2, ao nível de significância de 95%. Entretanto, é possível perceber a diferença visual na dinâmica da doença ao final de dois anos para a configuração intercalar com planta interferente atratora (Figura 3). Nas várias simulações realizadas para o Cenário 3, o tempo médio para a doença atingir o talhão alvo foi de $1.421,5 \pm 85,6$ dias.



Figura 3: Mapa do pomar para o Cenário 3 ao final da execução da simulação (720 dias).

As figuras 4, 5 e 6 ilustram a dinâmica dos estados epidemiológicos para as populações de citros e insetos adultos resultantes de 100 execuções dos cenários 1, 2 e 3, respectivamente, em simulações sem aplicação de pesticidas. Nessas figuras, a curva preta representa as médias das populações obtidas nas 100 execuções para cada cenário e a faixa colorida representa um desvio padrão acima ou abaixo da média. Observando-se os gráficos à esquerda (estados epidemiológicos das plantas cítricas no pomar), mais uma vez não se observa grandes diferenças das dinâmicas populacionais entre os cenários 1 e 2. Ao contrário, para o Cenário 3, a simulação ao final de dois anos apresenta mais de 80% de citros suscetíveis. O padrão “dentado” nas curvas vermelhas (plantas sintomáticas) está relacionado com a remoção de plantas periódicas após a ocorrência de inspeção no campo a cada 90 dias. Analisando os gráficos à direita que representam a dinâmica de insetos adultos no pomar, observam-se enormes picos populacionais para os cenários 1 e 2, sendo que o Cenário 2 apresenta uma dinâmica de crescimento populacional levemente mais lenta quando comparada ao Cenário 1. Por outro lado, os picos populacionais obtidos no Cenário 3 são da ordem de 1.000 vezes menor que os anteriores, além de se perceber que a dinâmica populacional do inseto adulto tende a um equilíbrio em baixo patamar referente à quantidade de insetos no pomar (entre 400 e 1.000 insetos adultos no pomar).

4. Conclusões

Ao se comparar os cenários 1 e 2 apresentados, observa-se que no cenário de simulação contendo citros e a planta interferente repulsora (Cenário 2) há menos insetos no sistema e, portanto, a dinâmica de propagação da doença é desacelerada quando comparada ao cenário contendo apenas citros. Entretanto, essa diferença encontrada nas dinâmicas populacionais não é suficiente para controlar a dinâmica de propagação do HLB em configuração de pomar contendo manga ao redor de cada talhão e citros no interior.

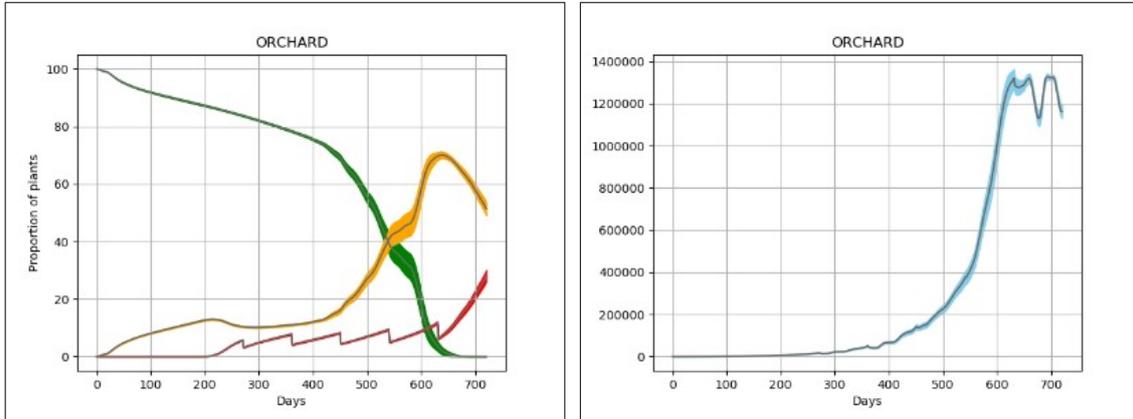


Figura 4. Dinâmica de populações para o Cenário 1. Esquerda: citros sadios (verde), suscetíveis (amarelo) e infectados (vermelho). Direita: insetos adultos.

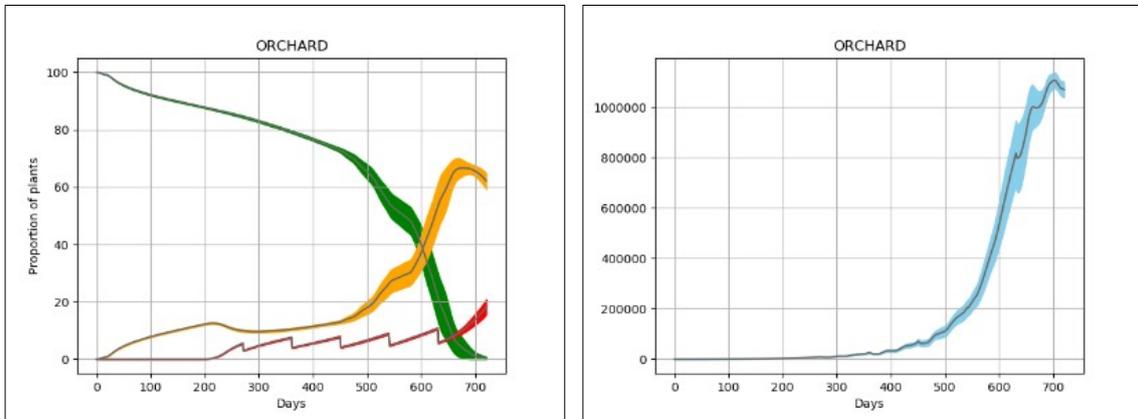


Figura 5. Dinâmica de populações para o Cenário 2. Esquerda: citros sadios (verde), suscetíveis (amarelo) e infectados (vermelho). Direita: insetos adultos.

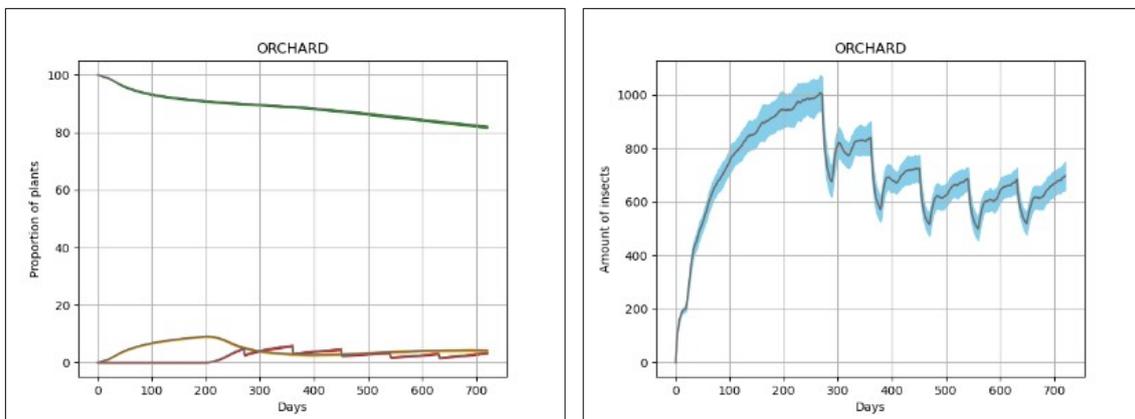


Figura 6. Dinâmica de populações para o Cenário 3. Esquerda: citros sadios (verde), suscetíveis (amarelo) e infectados (vermelho). Direita: insetos adultos.

Por outro lado, a configuração intercalar com planta interferente atratora (arruda) mostra um grande potencial de impacto na dinâmica de crescimento da população de insetos e, conseqüentemente, na propagação da doença no campo. Como os insetos não se reproduzem na planta interferente, quando a arruda atrai a *D. citri* há um retardo na reprodução do inseto vetor e, conseqüentemente, um impacto na quantidade total de insetos no pomar ao longo do tempo.

Portanto, pelas simulações *in silico* para os três cenários aqui apresentados, conclui-se que a arruda possui potencial para efeito no controle da epidemia no campo sem necessidade de uso de pesticida.

Como etapas futuras da pesquisa destaca-se: a) a criação de novos cenários de simulação envolvendo plantas interferentes sendo atualmente avaliadas por experimentos em casa de vegetação; b) a integração dos algoritmos responsáveis pela execução do MBI e do visualizador das simulações, oferecendo uma interface amigável para o usuário e c) a inclusão de paralelismo na execução do MBI, para que as simulações do tipo “mult” possam ser mais rapidamente executadas, explorando adequadamente os recursos de hardware disponíveis.

Referências

- Ammar, E. D.; Ramos, J. E.; Hall, D. G.; Dawson, W. O.; Shatters Jr, R. G. (2016). Acquisition, replication and inoculation of *Candidatus Liberibacter asiaticus* following various acquisition periods on Huanglongbing-infected citrus by nymphs and adults of the Asian citrus psyllid. PLoS One, 11(7), e0159594.
- Belasque Jr, J.; Yamamoto, P. T.; de Miranda, M. P.; Bassanezi, R. B.; Ayres, A. J.; Bové, J. M. (2017). Controle do Huanglongbing no estado de São Paulo, Brasil. Citrus Research & Technology, 31(1), 53-64.
- Fundecitrus, Fundo de Defesa da Citricultura (2023) “Greening: Huanglongbing”, <https://www.fundecitrus.com.br/doencas/greening>, julho.
- García, Y.; Patricia Ramos, Y.; Andrea Sotelo, P.; Kondo, T. (2016). Biología de *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae) bajo condiciones de invernadero en Palmira, Colombia. Revista Colombiana de Entomología, 42(1), 36-42.
- Grimm, V. e Railsback, S. (2005), Individual-based modeling and ecology. Princeton: Princeton University Press.
- Laranjeira, F. F. (2015) “HLB BioMath fase 2: abordagem bio-matemática como suporte à defesa fitossanitária e avaliação ex-ante de tecnologias de manejo”. Cruz das Almas: Centro Nacional de Pesquisa em Mandioca e Fruticultura. 26p. (Embrapa. SEG 02.13.03.007.00.000).
- Parra, J. R. P.; Garcia, A. G.; Diniz, A. J. F.; Bento, J. M. S. (2022). Sustainability in Brazilian citriculture: three decades of successful biological control of insect pests. Frontiers in Agronomy, 4, 874188.
- Vilamiu, R.G. d’A.; Ternes, S.; Laranjeira, F.F.; Santos, T.T. de C. (2013) “Modelling the effect os an alternative host population on the spread of citrus Huanglongbing”. AIP conference proceedings. New Yor, n. 1558, p. 2504-2508.