

Modelos para estimativas de ataque de *Sirex noctilio* (Fabricius) em povoamentos de *Pinus taeda* L.

Models for attack estimates of *Sirex noctilio* (Fabricius) in *Pinus taeda* L.

Silvio Carolo Junior^I, Daniele Ukan^{II},
Susete do Rocio Chiarello Penteado^{III}, Evandro Vagner Tambarussi^{II}

Resumo

Uma das principais pragas dos plantios florestais de *Pinus* spp. é *Sirex noctilio* (Fabricius), conhecida popularmente como vespa-da-madeira. Este trabalho tem por objetivo desenvolver um modelo matemático para estimar o número de árvores atacadas por *Sirex noctilio* em povoamentos de *Pinus taeda* L. baseado nos métodos de monitoramento e nas características dendrométricas do reflorestamento. Selecionaram-se, para a coleta de dados, cinco áreas localizadas no município de Palmas - PR. Foram utilizadas como variáveis independentes do modelo a serem selecionadas pelo método *Stepwise* a amostragem sequencial, número de indivíduos da parcela, árvores-armadilha, diâmetro a altura do peito (DAP) médio, altura média, volume médio individual, volume da parcela, idade, espaçamento, sítio, área basal da parcela, área transversal média, diâmetro médio quadrático e o DAP estratificado em três classes de diâmetro. A maior influência sobre a estimativa de ataque (Y) foi exercida pelas variáveis número de árvores atacadas detectadas na amostragem sequencial (AS) (p-valor < 0,001) e o número de indivíduos da parcela (n) (p-valor < 0,05). O modelo mais adequado para a obtenção da variável resposta foi $\delta = \beta_0 + \beta_1 AS + \beta_2 n + \varepsilon$, o qual apresentou coeficiente de determinação ajustado (R^2_{adj}) de 0,965 e erro padrão de estimativa (S_{yx} %) de 18,65% obtendo o melhor desempenho na análise gráfica dos resíduos. O modelo pode ser utilizado pelos gestores florestais como uma ferramenta na tomada de decisões quanto ao manejo do povoamento.

Palavras-chave: Modelo matemático; Regressão linear; Vespa-da-madeira

Abstract

One of the main pests of *Pinus* spp forest plantations is *Sirex noctilio* (Fabricius), popularly known as the woodwasp. This work aims to develop a mathematical model to estimate the number of trees attacked by *Sirex noctilio* in *Pinus taeda* L. stands based on the monitoring methods and the dendrometric characteristics of the reforestation itself. For the data collection, five areas were located in the city of Palmas, Paraná state. Sequential sampling, number of plot individuals, trap trees, mean breast height diameter (DBH), mean height, individual mean volume, plot volume, age, spacing, site, plot basal area, mean transverse area, diameter quadratic mean and DBH stratified into three diameter classes were used as model independent variables to be selected by the *Stepwise* method. The greatest influence on the attack estimate (Y) was exerted by the variables number of attacked trees detected in the sequential sampling (AS) (p-value <0.001) and number of individuals in the plot (n) (p-value <0, 05). The most appropriate model for obtaining the response variable was $\delta = \beta_0 + \beta_1 AS + \beta_2 n + \varepsilon$, which presented an adjusted coefficient of determination (R^2_{adj}) of 0.965, a standard error of estimation (S_{yx} %) of 18.65% and better performance in the graphical analysis of waste. It is also noteworthy that the model can be used by forest managers as a tool in decision-making regarding to the stand management.

Keywords: Mathematical model; Linear regression; Woodwasp

^I Engenheiro Florestal, Me., Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Rua Elias Fonseca Mila, 76, Dissenha, CEP 85555-000, Palmas (PR), Brasil. silviocarolojr@hotmail.com (ORCID: 0000-0001-5690-9270)

^{II} Engenheiro(a) Florestal, Dr(a), Professor(a) do Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Rua Professora Maria Roza Zanon de Almeida, Engenheiro Gutierrez, CEP 84505-677, Irati (PR), Brasil. daniukan@yahoo.com.br (ORCID: 0000-0003-3914-6739) / tambarussi@gmail.com (ORCID: 0000-0001-9478-5379)

^{III} Bióloga, Dra., Pesquisadora da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA Florestas, Estrada da Ribeira, km 111, CEP 83411-000, Curitiba (PR), Brasil. susete.penteado@embrapa.br (ORCID: 0000-0001-7237-5862)



Introdução

A demanda de madeira e seus subprodutos vem crescendo exponencialmente tanto no mercado interno quanto para exportação, incidindo diretamente na implantação e na capacidade produtiva das florestas plantadas. A principal espécie plantada na região sul do Brasil é o *Pinus taeda* L., pois, além de se adaptar às condições edafoclimáticas, subsidia o crescimento e a produção acima da média nacional e de suas regiões de ocorrência natural (continente norte-americano), o que pode ser um indicativo do sucesso da sua implantação (KRONKA; BERTOLANI; PONCE, 2005; HIGA *et al.*, 2008).

Os plantios de *Pinus* ocupam 1,6 milhões de hectares, concentrando-se principalmente no estado do Paraná (42%), seguidos por Santa Catarina (34%), Rio Grande do Sul (12%) e São Paulo (8%), em decorrência das condições de solo e clima favoráveis ao desenvolvimento desse gênero nessas regiões (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2019).

A implantação e condução dos povoamentos florestais demandam um manejo efetivo. No entanto, quando essas práticas não são realizadas, os reflorestamentos tornam-se locais ideais para o surgimento de pragas florestais. Aliado a isso, a disponibilidade de alimentos e a ausência ou baixa efetividade de inimigos naturais podem tornar esses locais vulneráveis ao estabelecimento e dispersão de pragas (HURLEY *et al.*, 2008; PENTEADO; IEDE; REIS FILHO, 2015).

Dentre as principais pragas florestais, pode-se citar *Sirex noctilio* F. (Hymenoptera: Siricidae), popularmente conhecida como vespa-da-madeira, a qual ataca povoamentos de *Pinus* spp. provocando severos danos aos mesmos (PENTEADO; IEDE; REIS FILHO, 2015). A espécie é originária da Europa, Ásia e Norte da África, sendo considerada uma praga secundária nos povoamentos de *Pinus* spp. na região de origem (SPRADBERY; KIRK, 1978). Os primeiros registros de *Sirex noctilio* fora do seu *habitat* natural, ocorreram na Nova Zelândia (1900) e Tasmânia (1952) (TAYLOR, 1981). Na década de 1980, a espécie foi detectada na América do Sul, mais precisamente no Uruguai (REBUFFO, 1990), depois na Argentina em 1985 (KLASMER *et al.*, 2000), no Brasil em 1988 (IEDE; PENTEADO; BISOL, 1988) e no Chile em 2001 (CISTERNAS, 2007). No ano de 2005 foi registrado o ataque de *Sirex noctilio* nos Estados Unidos (HOEBEKE; HAUGEN; HAACK, 2005) e no Canadá em 2006 (DE GROOT; NYSTROM; SCARR, 2006), consolidando o estabelecimento da praga na América do Norte. Em 2013, *Sirex noctilio* foi detectada na China (LI *et al.*, 2015).

Dentro desse contexto, acredita-se que as condições fitossanitárias do povoamento refletem no surgimento da vespa-da-madeira. *Sirex noctilio* é atraída por árvores de *Pinus* estressadas, perfurando o tronco no qual deposita seus ovos (PENTEADO; IEDE; REIS FILHO, 2015). Concomitante à oviposição, a fêmea introduz na árvore também os esporos de um fungo simbiote, *Amylostereum areolatum* (Chaillet ex Fr.) Boidin (Russulales: Amylostereaceae) e uma mucossecção. O fungo e o muco juntos tornam-se tóxicos à planta ocasionando a clorose em aproximadamente 10 a 14 dias após a postura, dependendo da intensidade do ataque e da suscetibilidade da árvore hospedeira. Esse conjunto de fatores contribui para levar a árvore à morte (PENTEADO; IEDE; REIS FILHO, 2015).

Outros danos provenientes do ataque de *Sirex noctilio* são as galerias causadas pelas larvas que se desenvolvem no interior da madeira, as manchas azuladas ocasionadas por fungos oportunistas do gênero *Lasiodiplodia* e os orifícios provocados pelos insetos adultos para sua emergência (EMBRAPA FLORESTAS, 2011).

Devido aos prejuízos causados pelo ataque dessa espécie, faz-se necessário utilizar métodos para seu monitoramento, sendo eles, árvores-armadilha, amostragem sequencial (PENTEADO; IEDE; REIS FILHO, 2015) e amostragem sistemática (PENTEADO *et al.*, 2017). No presente estudo, utilizaram-se as informações oriundas dos agrupamentos de árvores-armadilha e das amostragens sequenciais, como variáveis independentes para desenvolver um modelo matemático que será usado para estimar o número de árvores atacadas por *Sirex noctilio*, com base nas características dos povoamentos e dos métodos de monitoramento.

Material e métodos

Localização da área de estudo

O presente estudo foi realizado no município de Palmas - PR, localizado no sudoeste do estado do Paraná, a uma latitude 26°29'03"S e a uma longitude 51°59'26"W, com altitudes variando entre 950 a 1.356 m. A temperatura média anual é de 16°C. O clima da região segundo a classificação de Köppen é Cfb.

Características da área de estudo

Os dados para o desenvolvimento do trabalho foram coletados em povoamentos de *Pinus taeda*, pertencentes à empresa Reflorasul Agroflorestral S.A., com diferentes idades, espaçamentos e regimes de manejo (Tabela 1).

Tabela 1 – Descrição das áreas de coleta dos dados para o teste dos modelos estatísticos no município de Palmas - PR

Table 1 – Description of data collection areas for testing statistical models in the city of Palmas - PR state

Área	Ano do plantio	Área (ha)	Densidade.ha ⁻¹	Desbaste	Espaçamento	N
1	2005	15,3495	1667	-	2 x 3 m	1
	2006	72,4968	1600	-	2,5 x 2,5 m	3
	2007	110,99	1600	-	2,5 x 2,5 m	4
2	2000	145,23	665	2º (Misto)	2 x 3 m	6
3	2002	105,36	1600	-	2,5 x 2,5 m	4
	2002	90,32	1100	1º (Misto)	2,5 x 2,5 m	4
4	2003	147,207	1600	1º (Misto)	2,5 x 2,5 m	6
	2005	51,6783	1600	1º (Misto)	2,5 x 2,5 m	2
5	2003	65,23	1600	-	2,5 x 2,5 m	3
	2003	61,23	1150	1º (Misto)	2,5 x 2,5 m	3

Fonte: Autores (2020)

Em que: N - Quantidade de parcelas (600 m²) e métodos de monitoramento instaladas em cada ano de plantio.

Obtenção de dados de amostragem

Para determinar o número de árvores atacadas foram utilizadas três metodologias de monitoramento: amostragem sequencial (AS), árvores-armadilha (AA) e o censo em parcela de 1,0 ha cada.

O primeiro método utilizado foi a amostragem sequencial empregando-se a metodologia descrita pela EMBRAPA Florestas (2005), em que todas as 272 árvores da parcela foram avaliadas.

A instalação dos grupamentos de árvores-armadilha (AA) foi realizada entre os meses

de agosto e setembro de 2017. Para realizar o estressamento das árvores-armadilha utilizou-se o herbicida 2,4-D amina + picloran, a uma concentração de 20%. Para a aplicação do herbicida foram realizados quatro entalhes na árvore, utilizando uma machadinha, e em cada entalhe foi colocado 2 mL da solução com o auxílio de uma seringa descartável, totalizando 8 mL por árvore. Os indivíduos selecionados para compor o grupo de árvores-armadilha apresentavam alguma deformidade ou encontravam-se no estrato das dominadas.

A inspeção dos grupamentos de árvores-armadilha foi efetuada no mês de junho de 2018. As árvores foram cortadas, e do terço médio ao superior do fuste retiraram-se três toretes de 30 cm cada, os quais foram partidos ao meio a fim de detectar sintomas de ataque ocasionado pela *Sirex noctilio*. Nas árvores em que se constataram os sintomas de ataque de *Sirex noctilio* foi inoculado o nematoide *Deladenus siricidicola* (Bedding) (Tylenchida: Neotylenchidae), principal agente de controle biológico dessa praga.

Para obtenção da variável resposta, foram instaladas parcelas de 1,0 ha, denominadas de censo, nas quais foram identificadas todas as árvores atacadas pela vespa-da-madeira. Concomitantemente, foram instaladas parcelas retangulares de 20 x 30 m, totalizando 600 m². Nessas parcelas, foram mensurados o diâmetro a altura do peito (DAP, em cm) e a altura total de 20% dos indivíduos, a altura total de seis árvores dominantes, bem como o número de indivíduos/parcela, para avaliar a relação das variáveis do povoamento com o número de árvores atacadas por *Sirex noctilio*.

A variável DAP foi estratificada em três classes (d_1 , d_2 e d_3), utilizando-se a Equação (1):

$$x = \frac{D_{max} - D_{min}}{3} \quad (1)$$

onde: x = intervalo de classe, D_{max} e D_{min} = diâmetro máximo e mínimo do povoamento, respectivamente.

Para todos os métodos de monitoramento utilizados neste estudo (amostragem sequencial, árvores-armadilha, censo e para as parcelas de 600 m²) foi instalado um total de 36 amostras, e a área do plantio foi estratificada por área e idade (Tabela 1).

Análise estatística dos dados

As variáveis utilizadas para definição do modelo matemático foram: o número de árvores atacadas por *Sirex noctilio* encontradas no censo como variável dependente; a amostragem sequencial, o número de indivíduos da parcela, as árvores-armadilha, o diâmetro a altura do peito (DAP) médio, a altura média, o volume médio individual, volume da parcela, idade, espaçamento, sítio, área basal da parcela, área transversal média, diâmetro médio quadrático e o DAP estratificado em três classes de diâmetro, como variáveis independentes.

Procederam-se os testes de normalidade dos resíduos (Kolmogorov-Smirnov), homocedasticidade dos resíduos (Breusch-Pagan), o teste de independência (Durbin-Watson), colinearidade e multicolinearidade, sendo esta feita por meio do VIF (valor de inflação da variância). Para a validação do modelo ajustado utilizou-se o teste do Qui-quadrado (χ^2), por meio da técnica da separação dos dados.

Para as diferentes variáveis candidatas a termo independente do modelo ajustado, foi feita uma matriz de correlação de Pearson, sendo suas significâncias testadas pelo teste t , com $\alpha=0,05$. A seleção de variáveis do modelo foi realizada pelo procedimento *Stepwise*, no *software* Microsoft Excel utilizando-se o suplemento *Action*, usando teste F parcial, com F_{in} ($\alpha=0,05$) e F_{out} ($\alpha=0,05$) sendo as probabilidades da variável de entrar e de sair do modelo, respectivamente.

Resultados e discussão

Correlação entre as variáveis

A correlação entre as variáveis foi verificada por meio da correlação linear de Pearson (r), e suas significâncias pelo teste t a 95% de probabilidade (Tabela 2).

Tabela 2 – Correlação entre as variáveis candidatas para compor o modelo em plantio de *Pinus taeda* no município de Palmas - PR

Table 2 – Correlation between the candidate variables to compose the model in *Pinus taeda* plantation in the city of Palmas - PR state

Variáveis independentes	Censo (variável Y)	t_{cal}	P-valor
AS	0,98	28,24	3,47954 ^{-25**}
n	0,35	2,21	0,03395 [*]
AA	0,33	2,07	0,04628 [*]
DAP	-0,01	0,09	0,93220
h	0,21	1,25	0,21844
v_i	0,08	0,50	0,62228
Vol.par ⁻¹	0,62	4,63	5,22473 ^{-05**}
I	0,23	1,41	0,16890
Esp	0,14	0,80	0,42765
S	0,08	0,47	0,64159
G	0,58	4,18	0,00019 [*]
g	-0,02	0,11	0,91346
dg	-0,01	0,04	0,96547
d_1	0,13	0,78	0,44086
d_2	0,20	1,18	0,24447
d_3	0,22	1,31	0,19827

Fonte: Autores (2020)

Em que: Número de árvores atacadas por *Sirex noctilio* encontradas na amostragem sequencial (AS), número de indivíduos da parcela (n), número de árvores atacadas por *Sirex noctilio* encontradas nos grupamentos de árvores-armadilha (AA), diâmetro médio a altura do peito (DAP), altura média (h), volume médio individual (v_i), volume da parcela (Vol.par⁻¹), idade (I), espaçamento (Esp), sítio (S), área basal da parcela (G), área transversal média (g), diâmetro médio quadrático (dg) e o DAP estratificado em três classes de diâmetro (d_1 , d_2 e d_3). ** e * - Significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente.

O coeficiente de correlação de Pearson foi significativo a 1% para as variáveis AS, Vol. par⁻¹ e G (p-valor < 0,01**), enquanto as variáveis n e AA foram significativas a 5% de probabilidade (p-valor < 0,05*).

Conforme ocorre um acréscimo nos valores das variáveis explicativas (AS, Vol.par⁻¹, G, AA e n) aumenta o número de árvores.ha⁻¹ atacadas por *Sirex noctilio* no povoamento (Censo), indicando que a correlação entre as variáveis dependente e independente é positiva. Supõe-se que a correlação significativa e positiva entre o volume da parcela, área basal e o número de árvores atacadas (censo) seja em função da densidade do povoamento. Geralmente, povoamentos com maior área basal e volume por parcela apresentam maior número de árvores por unidade de área. A área basal total da floresta é função do diâmetro médio das árvores e da densidade populacional, sendo que maiores densidades acarretam valores maiores de área basal até o momento em que o povoamento entra em competição causando uma redução no incremento diamétrico e, por consequência, do incremento em área basal (SELLE; PAULESKI; BRAZ, 2008). Essa situação pode ocasionar o estresse dos povoamentos, tornando-os mais vulneráveis ao ataque da vespa-da-madeira. O risco de ataque de vespa-da-madeira está baseado em características do povoamento favoráveis ao inseto, como a competição excessiva entre árvores (OLIVEIRA, 2011).

Para o desenvolvimento de modelos é indicado que seja realizada uma análise de correlação entre as variáveis coletadas, selecionando-se as que apresentarem maiores correlações. Ainda, com o advento de novas técnicas de testes para o ajuste de modelos, pode-se partir para análises automatizadas dessas seleções, como é o caso do uso do processo *Stepwise* (SANQUETTA *et al.*, 2014).

Seleção das variáveis e ajuste dos modelos

Utilizando como variável resposta o número real de árvores atacadas em 1,0 ha (censo), o procedimento *Stepwise* selecionou como variáveis explicativas a amostragem sequencial (AS) e o número de indivíduos da parcela (n) (Tabela 3), usando o teste *F* parcial, com F_{in} ($\alpha = 0,05$) e F_{out} ($\alpha = 0,05$).

As condições "selecionada" e "não selecionada" (Tabela 3) indicam quais variáveis foram selecionadas para compor o modelo ($\alpha = 0,05$). As variáveis que obedeceram às condições determinadas para serem selecionadas foram a amostragem sequencial (AS) e o número de árvores da parcela (n). Em relação às variáveis selecionadas pelo método *Stepwise*, acredita-se que o número de árvores atacadas na amostragem sequencial reflete o *stress* natural ocasionado pela competição entre os indivíduos que leva ao ataque da praga.

A variável densidade (n) reflete as condições do espaço vital do povoamento, indicando que quanto mais adensado, maior será a competição e o *stress* entre os indivíduos. Reforçando isso, Gaiad (2001) ressalta que existe uma relação diretamente proporcional entre a densidade do povoamento e a porcentagem de ataque da vespa-da-madeira. Dessa forma, povoamentos adensados tornam-se mais susceptíveis ao ataque de *Sirex noctilio*.

Modelos matemáticos podem ser utilizados para prever picos populacionais, ocorrência de doenças e controle de pragas, no entanto modelos para previsão de pragas são mais difíceis, uma vez que o número de fatores envolvidos é complexo, pois necessita-se de dados contínuos, completos e de longo prazo (REIS JUNIOR; PARRA; BENTO, 2005). Variáveis representativas dos povoamentos podem ser utilizadas para obtenção das mais diversificadas respostas. A exemplo, Pinto (1998) empregou as variáveis idade, DAP, densidade do povoamento e espessura da casca para estimar a mortalidade em povoamentos de *Pinus pinaster* causada por escolitídeos. Até o momento não se tem conhecimento de modelos desenvolvidos para estimar o número de árvores atacadas por *Sirex noctilio* empregando-se informações dos métodos de monitoramento e/ou variáveis do povoamento.

Tabela 3 – Variáveis selecionadas e não selecionadas como termos independentes no modelo pelo método *Stepwise* em plantio de *Pinus taeda* no município de Palmas - PR

Table 3 – Variables selected and not selected as independent terms in the model by Stepwise method in planting *Pinus taeda* in the city of Palmas - PR state

Abreviações	Denominação das variáveis candidatas a termos independentes	Condição	P-valor
AS	Amostragem sequencial	Selecionada	3,48 ⁻²⁵
AA	Árvores-armadilha	Não selecionada	-
n	Número de indivíduos da parcela	Selecionada	9,06 ⁻³
DAP	Diâmetro médio	Não selecionada	-
h	altura média	Não selecionada	-
v _i	Volume médio individual	Não selecionada	-
Vol.par ⁻¹	Volume da parcela	Não selecionada	-
I	Idade	Não selecionada	-
Esp	Espaçamento	Não selecionada	-
S	Sítio	Não selecionada	-
G	Área basal da parcela	Não selecionada	-
g	Área transversal	Não selecionada	-
dg	Diâmetro médio quadrático	Não selecionada	-
d ₁	Classe inferior do diâmetro	Não selecionada	-
d ₂	Classe intermediária do diâmetro	Não selecionada	-
d ₃	Classe superior do diâmetro	Não selecionada	-

Fonte: Autores (2020)

Além das variáveis selecionadas pelo método *Stepwise* (AS e n) também foram utilizados os termos AA, Vol.par⁻¹ e G para desenvolver um modelo adequado para estimar o número de árvores atacadas pela vespa-da-madeira, uma vez que os mesmos apresentaram uma forte correlação com a variável Y (censo). Supõe-se que as variáveis DAP médio, DAP estratificado, altura média, sítio e volume médio, não tenham entrado no modelo devido à baixa variação entre os valores. Na Tabela 4 são mostrados os modelos desenvolvidos e os resultados dos ajustes para estimar o número de árvores.ha⁻¹ atacadas por *Sirex noctilio*.

Tabela 4 – Coeficientes e estatísticas dos modelos desenvolvidos para estimar o número de árvores.ha⁻¹ atacadas por *Sirex noctilio* em plantio de *Pinus taeda* no município de Palmas - PR

Table 4 – Coefficients and statistical models developed to estimate the number of trees.ha⁻¹ attacked by *Sirex noctilio* in planting *Pinus taeda* in the city of Palmas - PR state

Modelo	Coefficientes	R ² _{adj}	S _{vx} (%)	N ^o
$\delta = \beta_0 + \beta_1 AS + \beta_2 n + \varepsilon$	$\beta_0 = -4,42165445^+$ $\beta_1 = 2,60396932^{**}$ $\beta_2 = 0,07844158^{**}$	0,965	18,65	1
$\delta = \beta_0 + \beta_1 As + \beta_2 n + \beta_3 AA + \varepsilon$	$\beta_0 = -3,59194974^{ns}$ $\beta_1 = 2,62777909^+$ $\beta_2 = 0,07479042^+$ $\beta_3 = -0,29503796^{ns}$	0,964	18,84	2
$\delta = \beta_0 + \beta_1 As + \beta_2 n + \beta_3 AA + \beta_4 vol.par^{-1} + \beta_5 G + \varepsilon$	$\beta_0 = -7,57333636^+$ $\beta_1 = 2,51519155^{**}$ $\beta_2 = 0,08396201^{**}$ $\beta_3 = -0,75861279^{ns}$ $\beta_4 = 0,18477027^{ns}$	0,966	18,23	3
$\delta = \beta_0 + \beta_1 As + \beta_2 n + \beta_3 AA + \beta_4 vol.par^{-1} + \beta_5 G + \varepsilon$	$\beta_0 = -7,08687266^+$ $\beta_1 = 2,50035955^{**}$ $\beta_2 = 0,12158875^{ns}$ $\beta_3 = -0,78580224^{ns}$ $\beta_4 = 0,27739221^{ns}$ $\beta_5 = -1,7816134^{ns}$	0,965	18,47	4
$\delta = \beta_0 + \beta_1 AS + \beta_2 vol.par^{-1} + \varepsilon$	$\beta_0 = -0,61003926^{ns}$ $\beta_1 = 2,62516047^{**}$ $\beta_2 = 0,0443251^{ns}$	0,957	20,65	5
$\delta = \beta_0 + \beta_1 AS + \beta_2 n + \beta_3 vol.par^{-1} + \varepsilon$	$\beta_0 = -7,76748469^+$ $\beta_1 = 2,5090092^{**}$ $\beta_2 = 0,08787974^{**}$ $\beta_3 = 0,11697334^{ns}$	0,956	18,48	6
$\delta = \beta_0 + \beta_1 AS + \beta_2 G + \varepsilon$	$\beta_0 = -8,32096863^+$ $\beta_1 = 2,51807672^{**}$ $\beta_2 = 3,15348527^+$	0,964	18,79	7
$\delta = \beta_0 + \beta_1 AS + \varepsilon$	$\beta_0 = 0,43631547^{ns}$ $\beta_1 = 2,65865091^{**}$	0,958	20,4	8

Continua ...
Continuation ...

Tabela 4 – Conclusão ...

Table 4 – Conclusion ...

Modelo	Coefficientes	R ² _{adj}	S _{yx} (%)	N ^o
$\delta = \beta_0 + \beta_1 \ln(AS) + \beta_2 \ln(n) + \varepsilon$	$\beta_0 = -59,49517473^{**}$	0,8	44,42	9
	$\beta_1 = 13,97967755^{**}$			
	$\beta_2 = 13,67424759^{**}$			
$\ln\delta = \beta_0 + \beta_1 \ln(AS) + \beta_2 \ln(n) + \varepsilon$	$\beta_0 = -3,34897381^{**}$	0,762	51,48	10
	$\beta_1 = 1,05699572^{**}$			
	$\beta_2 = 1,00599638^{**}$			

Fonte: Autores (2020)

Em que: δ = número de árvores atacadas por *Sirex noctilio* em 1 ha; AS = número de árvores atacadas por *Sirex noctilio* na amostragem sequencial; n = número de indivíduos da parcela; AA = número de árvores atacadas por *Sirex noctilio* nas árvores-armadilha; $vol.par^{-1}$ = volume da parcela; G = área basal da parcela; ε = erro do modelo; R²_{adj} = coeficiente de determinação ajustado; S_{yx}(%) = erro padrão de estimativa em porcentagem; β_{is} = coeficientes estimados; N.^o = número do modelo, ns = não significativo; * e ** = significativo a 5% e 1%, respectivamente.

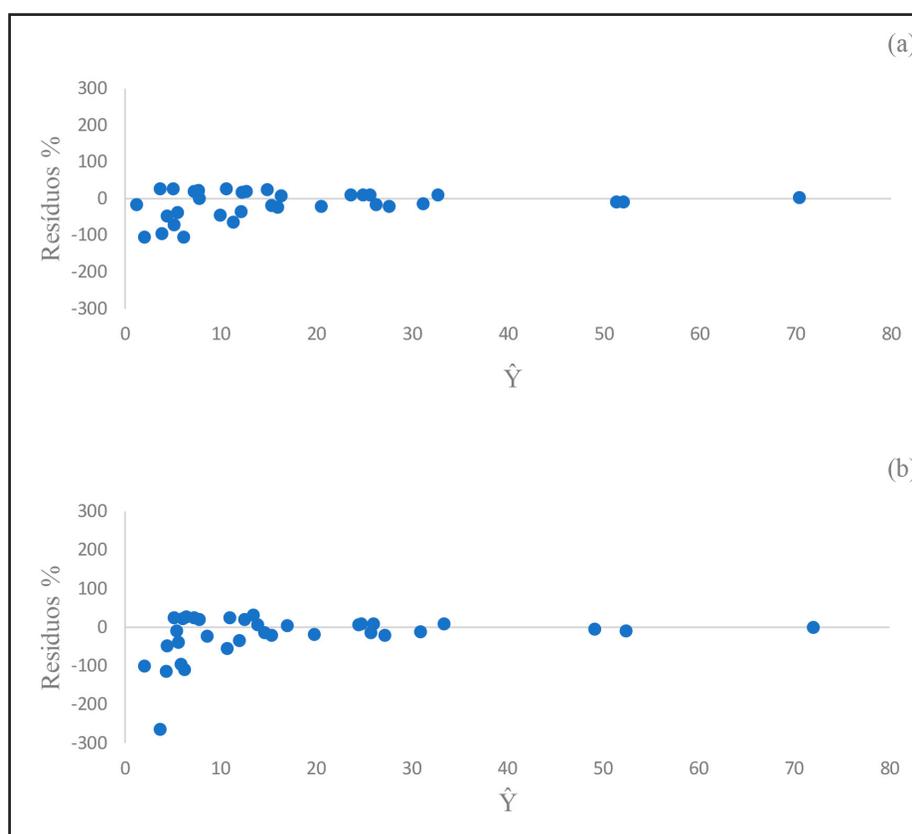
O modelo que apresentou melhores parâmetros de comparação foi o modelo 3 (Tabela 4), no entanto, selecionou-se para este estudo o modelo 1, levando-se em conta alguns critérios: Parâmetros de comparação entre os modelos com valores muito similares; todos os coeficientes do modelo 1 são significativos a 5% de significância, enquanto que os coeficientes β_3 e β_4 do modelo 3 não foram significativos; as variáveis independentes utilizadas no modelo 1 (AS e n) são práticas, de baixo custo e de fácil obtenção; as variáveis independentes do modelo 1 não apresentam erros de estimativa de ajuste, quando comparadas com o modelo 3; o modelo 1 apresenta maior uniformidade na distribuição dos resíduos ao longo da linha de regressão (Figura 1).

Os dois modelos apresentaram uma distribuição de resíduos similar (Figura 1), com pontos próximos a linha central. No entanto, o modelo 3 apresenta tendência em superestimar os valores quando o povoamento encontra-se com um baixo ataque da praga. Essa acentuada dispersão faz com que o modelo 3, mesmo apresentando-se estatisticamente superior ao modelo 1, torne-se inadequado, uma vez que os erros se aproximam de 300%. A análise gráfica de resíduos permite visualizar o desempenho da regressão, permitindo observar tendências nas estimativas (SANQUETTA *et al.*, 2014), verificando assim se os pressupostos da regressão foram respeitados e se as estimativas serão confiáveis.

O modelo 1 apresentou um coeficiente de determinação ajustado (R²_{adj}) de 0,965 indicando que é adequado para estimar o número de árvores.ha⁻¹ atacadas por *Sirex noctilio*, ou seja, aproximadamente 96% da variável dependente foi explicada pelas variáveis independentes. Para comparar modelos com quantidade de variáveis independentes distintas, deve-se utilizar o coeficiente de determinação ajustado (R²_{adj}), o qual é corrigido em função dos graus de liberdade do modelo. Além disso, o sinal dos coeficientes estimados, bem como, sua significância estatística deve ser considerada na escolha de um modelo. Baseando-se nesses critérios um modelo com um R² menor pode ser aceitável (GUJARATI; PORTER, 2011). O erro padrão de estimativa foi de 18,65%, demonstrando uma precisão aceitável na estimativa da variável Y.

Figura 1 – Distribuição gráfica dos resíduos dos modelos utilizados para estimar o número de árvores.ha⁻¹ atacadas por *Sirex noctilio*. (a) Modelo 1 (b) Modelo 3, em plantio de *Pinus taeda* no município de Palmas - PR

Figure 1 – Graphical distribution of the residues of the models used to estimate the number of trees.ha⁻¹ attacked by *Sirex noctilio*. (a) Model 1 (b) Model 3, *Pinus taeda* plantation in the city of Palmas - PR state



Fonte: Autores (2020)

Cabe ressaltar que os parâmetros de comparação do modelo 10 foram recalculados, uma vez que a variável Y encontra-se em uma unidade diferente dos demais modelos (lnY). Para averiguar se a regressão, bem como, os coeficientes foram significativos, ou seja, são estatisticamente diferentes de zero, realizou-se a Análise de Variância (ANOVA) do modelo ajustado (Tabela 5).

Tabela 5 – Análise de Variância para o modelo 1 em plantio de *Pinus taeda* no município de Palmas - PR

Table 5 – Analysis of Variance for the first model in *Pinus taeda* in the city of Palmas - PR state

	GL	SQ	MQ	F	P-valor
Regressão	2	8.741,087	4.370,544	480,9	3,92 ⁻²⁵
Resíduo	33	299,9126	9,08826		
Total	35	9.041			

Fonte: Autores (2020)

A regressão foi significativa pelo teste F ao nível de 99% de probabilidade (p-valor < 0,001^{***}) (Tabela 5), demonstrando consistência na regressão e indicando que pelo menos um dos coeficientes da equação é significativo. O p-valor dos coeficientes β_0 , β_1 e β_2 (p-valor < 0,05) indica que todos os coeficientes da equação são significativos pelo teste t ao nível de 95% de probabilidade, ou seja, diferentes de zero.

A análise de variância da regressão, bem como, o teste t demonstrou que todos os parâmetros estimados foram significativos, dessa forma, a Equação (2) ajustada apresenta a seguinte forma.

$$\delta = -4,42165445 + 2,60396932 AS + 0,07844158 n \quad (2)$$

Considerando a expressão acima, nota-se que a variável dependente da equação se dá em função de duas variáveis independentes: número de árvores atacadas encontradas na amostragem sequencial e o número de indivíduos da parcela (X_1 e X_2).

Outro fator importante a ser observado é que os resíduos apresentaram distribuição normal, são homocedásticos e independentes pelos testes de Kolmogorov-Smirnov (p-valor= 0,060), Breusch-Pagan, (p-valor = 0,123) e Durbin-Watson (p-valor= 0,581), respectivamente. Essas informações indicam que os testes estatísticos necessários para averiguar os pressupostos da regressão foram realizados, apresentando resultados satisfatórios, mostrando que o modelo ajustado não apresenta tendenciosidade, gerando, portanto, resultados confiáveis.

Existe uma vasta literatura demonstrando que, quando se trabalha com mais de uma variável regressora, é importante verificar se essas variáveis explicativas não são correlacionadas (SEBER, 1977; MONTGOMERY; PECK; VINING, 2006). Dessa forma, a associação entre AS e n foi de $r = 0,223$ e o VIF foi de 1,052, o qual representa o incremento da variância devido à presença de multicolinearidade (MONTGOMERY; PECK; VINING, 2006). Valores de VIF superiores a 10 indicam que a multicolinearidade pode estar influenciando as estimativas dos mínimos quadrados, porém os valores para AS e n foram abaixo, indicando que as estimativas não estão sendo influenciadas pela relação entre as variáveis.

Validação do modelo

Para validar o modelo ajustado, o conjunto de dados foi dividido em dois grupos aleatoriamente, um deles compôs os dados de treinamento e outro foi utilizado para a validação, empregando-se o teste de Qui-quadrado (χ^2). O valor do χ^2_{calc} (13,86) foi menor que χ^2_{tab} (27,6), portanto considera-se a equação validada, uma vez que existe aderência entre os valores estimados e os observados pelo teste de Qui-quadrado a 95% de probabilidade de confiança.

Realizou-se também a validação prática do modelo, comparando os valores observados com os estimados tanto da amostragem sequencial como do modelo desenvolvido (Tabela 6).

O erro obtido na amostragem sequencial foi de 48,8%, enquanto que, utilizando-se o modelo $\delta = \beta_0 + \beta_1 AS + \beta_2 n + \varepsilon$, o erro diminuiu para 11,43% (Tabela 6), evidenciando assim uma melhora de 37,37% na estimativa de árvores.ha⁻¹ atacadas pela vespa-da-madeira.

Por meio desse resultado pode-se perceber que a utilização do modelo, além de fornecer parâmetros de comparação, torna-se uma alternativa mais acurada para estimar o número de árvores atacadas por *Sirex noctilio*, quando comparado com a amostragem sequencial.

Tabela 6 – Comparação do número de árvores/atacadas por *Sirex noctilio* observadas com os valores estimados pela amostragem sequencial e pelo modelo $\delta = \beta_0 + \beta_1 AS + \beta_2 n + \varepsilon$, em plantio de *Pinus taeda* no município de Palmas - PR

Table 6 – Comparison of the number of trees/attacked by *Sirex noctilio* observed with the values estimated by sequential sampling and the model $\delta = \beta_0 + \beta_1 AS + \beta_2 n + \varepsilon$, in *Pinus taeda* plantation in the municipality of Palmas - PR state

Número de árvores. ha ⁻¹ atacadas (Censo)	Número de árvores atacadas (AS)	Número de árvores atacadas estimadas pelo modelo	Erro AS (%)	Erro do modelo (%)
0	0	0	0,00%	0,00%
0	0	0	0,00%	0,00%
1	0	1	-100,00%	0,00%
10	11	8	10,00%	-20,00%
3	5	4	66,67%	33,33%
9	10	7	11,11%	-22,22%
15	14	12	-6,67%	-20,00%
28	25	25	-10,71%	-10,71%
2	5	4	150,00%	100,00%
3	6	6	100,00%	100,00%
74	143	70	93,24%	-5,41%
7	10	11	42,86%	57,14%
37	54	33	45,95%	-10,81%
49	104	52	112,24%	6,12%
48	92	51	91,67%	6,25%
23	46	28	100,00%	21,74%
17	25	20	47,06%	17,65%
20	17	15	-15,00%	-25,00%
29	31	26	6,90%	-10,34%
7	12	10	71,43%	42,86%
23	36	26	56,52%	13,04%
18	24	16	33,33%	-11,11%
8	10	8	25,00%	0,00%
1	3	2	200,00%	100,00%
15	14	11	-6,67%	-26,67%
5	4	4	-20,00%	-20,00%
27	32	24	18,52%	-11,11%
3	7	5	133,33%	66,67%
28	59	31	110,71%	10,71%
9	19	12	111,11%	33,33%

Continua ...

Continuation ...

Tabela 6 – Conclusão ...

Table 6 – Conclusion ...

Número de árvores. ha ⁻¹ atacadas (Censo)	Número de árvores atacadas (AS)	Número de árvores atacadas estimadas pelo modelo	Erro AS (%)	Erro do modelo (%)
16	21	13	31,25%	-18,75%
13	28	16	115,38%	23,08%
4	6	5	50,00%	25,00%
10	11	8	10,00%	-20,00%
7	5	5	-28,57%	-28,57%
13	26	15	100,00%	15,38%
Média			48,80%	11,43%

Fonte: Autores (2020)

Para melhor visualização dos resultados obtidos com a utilização do modelo desenvolvido neste estudo, elaborou-se pelo método analítico uma tabela de dupla entrada (Tabela 7).

Tabela 7 – Tabela de estimativa de árvores.ha⁻¹ atacadas por *Sirex noctilio*, em plantio de *Pinus taeda* no município de Palmas - PRTable 7 – Estimate table of trees.ha⁻¹ attacked by *Sirex noctilio* in *Pinus taeda* plantation in the city of Palmas - PR state

Nº de árvores atacadas encontradas na Amostragem Sequencial	Densidade (10.000 m ²)						
	1000	1167	1333	1500	1667	1833	2000
	Número estimado de árvores.ha ⁻¹ atacadas por						
1	3	4	4	5	6	7	8
2	5	6	7	8	9	9	10
3	8	9	10	10	11	12	13
4	11	11	12	13	14	15	15
5	13	14	15	16	16	17	18
6	16	17	17	18	19	20	21
7	19	19	20	21	22	22	23
8	21	22	23	23	24	25	26
9	24	25	25	26	27	28	28
10	26	27	28	29	29	30	31

Fonte: Autores (2020)

As tabelas de dupla entrada organizam os dados com base em duas variáveis explicativas. No meio florestal são comumente utilizadas para estimativas de volume de madeira com e sem casca, índices de sítio, produção e incrementos, entre outros (CAMPOS; LEITE, 2009).

Para obtenção do número de árvores atacadas.ha⁻¹ deve-se ter conhecimento do número de indivíduos atacados por *Sirex noctilio* encontrados na amostragem sequencial e a densidade do povoamento. Essa tabela permite visualizar de forma rápida e direta o número de árvores estimadas atacadas pela vespa-da-madeira.

O modelo estima o número de árvores atacadas.ha⁻¹, ou seja, reproduz um dado relevante para o manejo florestal e concomitante a isso havendo informações do volume médio das árvores do povoamento, o modelo poderá ser utilizado na determinação de perdas econômicas em decorrência do ataque de *Sirex noctilio*. Como também pode ser empregado na quantificação de doses do nematoide *Deladenus siricidicola* utilizado no controle biológico da vespa-da-madeira, auxiliando assim na elaboração do planejamento operacional econômico das empresas florestais. Além disso, conhecendo-se o número de árvores atacadas pela praga, o gestor florestal tem mais uma ferramenta para auxiliá-lo na tomada de decisões quanto à realização de desbastes, uma vez que estes podem ser antecipados, caso o percentual de ataque seja elevado e resulte em níveis de danos econômicos significativos.

Cabe informar que o modelo desenvolvido é empírico, portanto os dados devem ser ajustados para as diferentes áreas em que será utilizado. Segundo Neves (2004), é comum a utilização de modelos empíricos de danos para estabelecer uma relação entre intensidade de ataque e redução de produção. Por outro lado, apresentam a limitação de serem práticos somente para as condições específicas que foram gerados. Acredita-se que novas variáveis devem ser testadas visando ao aperfeiçoamento.

Apesar do modelo desenvolvido neste estudo mostrar-se adequado para estimar o número de árvores atacadas por *Sirex noctilio*, o mesmo não consegue prever quais árvores serão atacadas e nem determinar sua localização espacial dentro do povoamento, sendo que, para identificá-las, podem ser utilizadas fotografias obtidas por meio de aerolevantamentos ou por meio dos métodos de monitoramento, os quais devem ser realizados anualmente, tanto para determinação do nível de ataque, quanto para a inoculação dos inimigos naturais, reforçando que o modelo não substitui esses procedimentos.

As árvores a serem inoculadas com o nematoide devem ser as mesmas encontradas na amostragem sequencial, tornando esse processo menos dispendioso, em contraponto, se a porcentagem de árvores inoculadas for inferior a 20% das árvores atacadas, deve-se selecionar e inocular na área, um maior número de árvores atacadas, até que se atinja o valor estabelecido (20%), aumentando assim a eficiência do controle pelo nematoide *Deladenus siricidicola*. Portanto, a inoculação de uma menor porcentagem de árvores fará com que o nematoide leve mais tempo para se estabelecer na área e, nessa situação, poderão ocorrer perdas em produtividade e prejuízos econômicos (PENTEADO *et al.*, 2017). Dessa forma, com a utilização do modelo, pode-se estimar com maior acurácia o número de árvores atacadas por *Sirex noctilio* e determinar a quantidade de árvores a serem inoculadas.

Deve-se também levar em consideração que *Sirex noctilio* é uma praga e sua dinâmica populacional é dependente de inúmeros fatores edafoclimáticos, ocorrência de inimigos naturais, além de parâmetros (co)evolutivos e populacionais.

Conclusão

As variáveis número de árvores atacadas por *Sirex noctilio* encontradas na amostragem sequencial (AS) e densidade do povoamento (n) foram apropriadas para estimar o número de árvores atacadas por *Sirex noctilio*. Considerando o local do estudo e englobando todas as particularidades do ambiente, o modelo $\delta = \beta_0 + \beta_1 AS + \beta_2 n + \varepsilon$ mostrou-se adequado para estimar o número de árvores atacadas.

O modelo pode ser utilizado como ferramenta para auxiliar a tomada de decisões acerca do manejo do povoamento, bem como, prever gastos e perdas econômicas decorrentes do ataque da vespa-da-madeira.

Referências

- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 3. ed. Viçosa, MG: UFV, 2009.
- CISTERNAS, M. B. Official Program for Detection and Control of *Sirex noctilio* (HYMENOPTERA: SIRICIDAE) in Chile. In: INTERNATIONAL *Sirex* SYMPOSIUM AND WORKSHOP, 2007, Pretoria e Pietermaritzburg. **Anais [...]**. Pretoria; Pietermaritzburg: [s. n.], 2007. p. 21.
- DE GROOT, P.; NYSTROM, K. L.; SCARR, T. A. Discovery of *Sirex noctilio* (Hymenoptera: Siricidae) in Ontario, Canada. **The Great Lakes Entomologist**, Michigan, v. 39, n. 1, p. 49-53, 2006.
- EMBRAPA FLORESTAS. **Vespa-da-madeira amostragem sequencial: o primeiro passo para o controle da praga**. Colombo, 2005. 1 fôlder.
- EMBRAPA FLORESTAS. **Vespa-da-madeira**. Colombo, 2011. 1 fôlder.
- GAIAD, D. C. M. **Efeito de desbastes em povoamentos de *Pinus taeda* na ocorrência da vespa-da-madeira, *Sirex noctilio* F., 1792**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.
- GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. **Econometria básica**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.
- HIGA, R. C. V. *et al.* **Zoneamento Climático: *Pinus taeda* no Sul do Brasil**. Colombo: EMBRAPA Florestas, 2008. 17 p. (EMBRAPA Florestas. Documentos, 175).
- HOEBEKE, E.; HAUGEN, D. A.; HAACK, R. *Sirex noctilio*: Discovery of a Palearctic siricid woodwasp in New York. **Newsletter of the Michigan Entomological Society**, Michigan, v. 50, n. 1/2, p. 24-25, 2005.
- HURLEY, B. P. *et al.* Factors influencing parasitism of *Sirex noctilio* (Hymenoptera: Siricidae) by the nematode *Deladenus siricidicola* (Nematoda: Neotylenchidae) in summer rainfall areas of South Africa. **Biological Control**, [s. l.], v. 45, n. 3, p. 450-459, 2008.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório IBÁ 2019**. São Paulo, 2019.
- IEDE, E.T.; PENTEADO, S. do R. C.; BISOL, J. C. **Primeiro registro de ataque de *Sirex noctilio* em *Pinus taeda* no Brasil**. Curitiba: EMBRAPA - CNPF, 1988. 12 p. (EMBRAPA - CNPF. Circular técnica, 20).
- KLASMER, P. *et al.* Avances en el control biológico de *Sirex noctilio* em la región patagónica de la Argentina. In: SIMPÓSIO DO CONE SUL SOBRE MANEJO DE PRAGAS E DOENÇAS DE *PINUS*, 33., 2000, Piracicaba. **Anais [...]**. Piracicaba: IPEF, 2000. p. 21-30.
- KRONKA, F. J. N.; BERTOLANI, F.; PONCE, R. H. **A Cultura do *Pinus* no Brasil**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2005.
- LI, D. *et al.* Detection and Identification of the Invasive *Sirex noctilio* (Hymenoptera: Siricidae) Fungal Symbiont, *Amylostereum areolatum* (Russulales: Amylostereaceae), in China and the Stimulating Effect of Insect Venom on Laccase Production by *A. areolatum* YQL03. **Journal of Economic Entomology**, [Oxford], v. 108, n. 3, p. 1136-1147, 2015.
- MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINING, G. G. **Introduction to linear regression analysis**. New York: John Wiley and Sons, 2006.
- NEVES, A. D. **Estimativa do nível de dano de *Orthezia praelonga* Douglas, 1891 e de *Leucoptera coffeella* (Guérin-Meneville, 1842) por variáveis fisiológicas vegetais**. 2004. Dissertação (Mestrado em Entomologia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2004.
- OLIVEIRA, E. B de. **Softwares para manejo de precisão e análise econômica de plantações**

- florestais**. Colombo: EMBRAPA Florestas, 2011. 68 p. (EMBRAPA Florestas. Documentos, 216).
- PENTEADO, S. do R. C. *et al.* **Metodologias para o monitoramento da vespa-da-madeira em plantios de pinus visando ao planejamento das ações de controle**. Colombo: EMBRAPA Florestas, 2017. 7 p. (EMBRAPA Florestas. Comunicado técnico, 398).
- PENTEADO, S. do R. C.; IEDE, E. T.; REIS FILHO, W. **Manual para o controle da vespa-da-madeira em plantio de pinus**. 2. ed. rev. atual. Colombo: EMBRAPA Florestas, 2015. 39 p. (EMBRAPA Florestas. Documentos, 76).
- PINTO, M. A. Modelos de previsão de ataque de escolitídeos em povoamentos de *Pinus pinaster* Aiton. **Boletín de Sanidad Vegetal Plagas**, Madrid, v. 24, n. 2, p. 429-434, 1998.
- REBUFFO, S. **La "avispa de la madera" *Sirex noctilio* F. em el Uruguay**. Montevideo: Ministério de Ganadería, Agricultura y Pesca, Dirección General de Recursos Naturales Renovables, 1990.
- REIS JUNIOR, R.; PARRA, J. R. P.; BENTO, J. M. S. Desenvolvimento de um modelo para previsão de ocorrência do Bicho-Furão-dos-Citros, *Ecdytolopha aurantiana*(Lima) (Lepidoptera: Tortricidae). **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 34, n. 4, p. 627- 637, 2005.
- SANQUETTA, C. R. *et al.* **Inventários florestais: planejamento e execução**. 3. ed. Curitiba: Multi Graphic, 2014.
- SEBER, G. A. F. **Linear Regression Analysis**. New York: John Wiley and Sons, 1977.
- SELLE, G. L.; PAULESKI, D. T.; BRAZ, E. M. **Procedimento prático para elaboração de uma tabela de produção**. Colombo: EMBRAPA Florestas, 2008. 91 p. (EMBRAPA Florestas. Documentos, 165).
- SPRADBERY, J. P.; KIRK, A. A. Aspects of the ecology of siricid woodwasps (Hymenoptera: Siricidae) in Europe, North Africa and Turkey with special reference to the biological control of *Sirex noctilio* F. in Australia. **Bulletin of Entomological Research**, Cambridge, v. 68, n. 3, p. 341-359, 1978.
- TAYLOR, K. L. The *Sirex* woodwasp: ecology and control of an introduced forest insect. In: KITCHING, R. L.; JONES, R. E. **The ecology of pests: some Australian case histories**. Melbourne: CSIRO, 1981. p. 231-248.