

COMPLEMENTARIEDADE E SUBSTITUTABILIDADE NA ADOÇÃO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO POR PRODUTORES DE SOJA EM GOIÁS E DISTRITO FEDERAL

Complementarity and substitutability in the adoption of precision agriculture by soybean producers in Goiás and Federal District

Heverton Eustáquio Pinto

Economista. Mestre em Agronegócio pela Universidade Federal de Goiás, Doutorando em Agronegócio no Programa de Pós-Graduação em Agronegócio da Universidade Federal de Goiás. Endereço postal: Universidade Federal de Goiás, Escola de Agronomia, Campus Samambaia, Avenida Esperança, s/n. Setor de Desenvolvimento Rural, Goiânia-GO, CEP: 74.690-900. heverton.mg@uol.com.br

Érica Basílio Tavares Ramos

Economista. Mestre em Agronegócio no Programa de Pós-Graduação em Agronegócio da Universidade Federal de Goiás, Doutoranda em Agronegócio no Programa de Pós-Graduação em Agronegócio da Universidade Federal de Goiás. Endereço postal: Universidade Federal de Goiás, Escola de Agronomia, Campus Samambaia, Avenida Esperança, s/n. Setor de Desenvolvimento Rural, Goiânia-GO, CEP: 74.690-900. ericabasiliotavares@gmail.com

Marcelo Dias Paes Ferreira

Bacharel em Gestão do Agronegócio pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), Mestre e Doutor em Economia Aplicada pela UFV. Professor Adjunto da Escola de Agronomia da Universidade Federal de Goiás, Programa de Pós-Graduação em Agronegócio e Programa de Pós-Graduação em Economia. Endereço postal: Universidade Federal de Goiás, Escola de Agronomia, Campus Samambaia, Avenida Esperança, s/n. Setor de Desenvolvimento Rural, Goiânia-GO, CEP: 74.690-900. marcelo.ferreira@ufg.br

Sônia Milagres Teixeira

Bacharel em Matemática pela Universidade Federal de Viçosa, Mestre em Economia Rural pela University of Wisconsin - Madison, Doutorado em Economia Rural pela Purdue University. Professora Titular da Escola de Agronomia da Universidade Federal de Goiás, Programa de Pós-Graduação em Agronegócio. Endereço postal: Universidade Federal de Goiás, Escola de Agronomia, Campus Samambaia, Avenida Esperança, s/n. Setor de Desenvolvimento Rural, Goiânia-GO, CEP: 74.690-900. soniamilagresteixeira@gmail.com

Resumo: O presente trabalho buscou analisar as relações de complementariedade e substitutabilidade entre as tecnologias de diagnóstico de agricultura de precisão no estado de Goiás e no Distrito Federal. Utilizou-se o modelo Tobit para estimar modelos do tempo de adoção de tecnologias de diagnóstico, quantificando a complementariedade e substitutabilidade, entre elas, tecnologias a partir do efeito escala pela análise do uso de tecnologia precedente e a sua interação com o tamanho da propriedade. A adoção de tecnologias de diagnósticos aponta uma relação que favorece a substituição entre Amostra de Solo em Grade e Sensoriamento Remoto em propriedades acima de 450 hectares. Contudo, ao analisar a adoção daquelas com a tecnologia de Mapa de Produtividade, o processo de adoção se mostra complementar. Para que haja melhor difusão tecnológica em agricultura de precisão entre os produtores de soja, especialmente em diagnósticos de solo na região, é necessário que o poder público e agentes privados levem em consideração a escala da propriedade, a presença de infraestrutura tecnológica de comunicação, bem como fornecimento de pacotes tecnológicos para a adoção.

Palavras-chaves: Amostra de solo em grade; Sensoriamento remoto; Mapa de produtividade; Tobit.

Abstract: This article aimed to assess the complementarity and substitutability relation of precision agriculture diagnosis technologies in Goiás and Federal District. We use the Tobit model to explain the time of adoption between diagnostic technologies, quantifying their complementarity and substitutability from the scale effect by understanding the use of previous technology and its interaction with farm size. The adoption of diagnostic technologies indicates a substitution trend between Grid Soil Sample and Remote Sensing in farm sizes greater than 450 hectares. However, when analyzing the adoption of Yield Monitoring technology, its adoption process is complementary. Thus, for rapid improvement in technological diffusion in precision agriculture, especially among soil diagnostic technologies in the region among soybean producers, it is necessary the public authorities and private agents to consider of the scale of the property, the presence of technological infrastructure in communication as well as the provision of technological packages for the adoption.

Keywords: Grid Soil Sample; Remote Sensing; Yield Monitoring; Tobit.

1 INTRODUÇÃO

O processo de adoção e difusão tecnológica na agricultura é bastante complexo. Há uma variedade de pacotes tecnológicos que, muitas vezes, podem apresentar características similares. Em alguns casos, pacotes tidos como complementares do ponto de vista técnico podem guardar certo tipo de substitutabilidade entre si. Quando isso acontece, o processo de adoção de uma tecnologia pode inibir a adoção da tecnologia substituta. Como exemplo, podem-se citar as tecnologias de diagnóstico na agricultura de precisão, tais como Mapa de Produtividade (MP), Amostra de Solo em Grade (ASG) e Sensoriamento Remoto (SR). Essas três tecnologias estão entre as principais tecnologias de agricultura de precisão e, tem como principal atribuição diagnosticar parâmetros agronômicos do solo e do desenvolvimento de lavouras (AUBERT; SCHROEDER; GRIMAUDO, 2012; MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015; TEY; BRINDAL, 2012).

A literatura técnica aponta que essas tecnologias de diagnósticos agronômicos podem ser complementares ou substitutas na presença ou ausência de suas funcionalidades. Por exemplo, a funcionalidade de SR pode complementar ou substituir MP e/ou ASG quando a variabilidade da produção agrícola for atribuída às pragas ou aos problemas de fertilidade do solo (MOLIN et al., 2015). A mensuração realizada na colheita por MP é limitada a uma amostragem destrutiva e tardia, o que impede o diagnóstico durante o ciclo da cultura. Contudo, a presença de alto custo de coleta de amostragem em ASG pode ser um desincentivo à sua adoção, o que corrobora a substituição de tal tecnologia por outras ferramentas de diagnóstico (AUBERT et al., 2012; MOLIN et al., 2015; TEY; BRINDAL, 2012). Embora a literatura técnica indique que essas tecnologias de diagnóstico possam ser substitutas entre si, trabalhos que buscam identificar a adoção de tecnologias de agricultura de precisão tratam as tecnologias de diagnóstico como complementares (LAMBERT et al., 2015; TENKORANG; LOWENBERG-DEBOER, 2008; WATCHARAANANTAPONG et al., 2013).

O incentivo à adoção de tecnologias de agricultura de precisão pode melhorar o desempenho da agricultura. Por exemplo, tais tecnologias poderiam se configurar em uma estratégia de melhor uso de solos de baixa qualidade (KHANNA, 2001). Isso ocorre pelo fato de o uso de tecnologias de diagnóstico permitir o melhor gerenciamento do uso de fertilizantes e subsidiar a tomada de decisão com relação ao solo de forma localizada e precisa (KHANNA, 2001; LAMBERT et al., 2014).

A complementariedade ou a substitutabilidade entre tecnologias podem estar associadas às questões de economia de escala. Tal divergência se baseia nas hipóteses levantadas pelo modelo teórico de Feder (1982), em que o produtor enfrenta a decisão de adotar duas inovações agrícolas inter-relacionadas. Essas inovações se distinguem por seus retornos de escala, o que leva ao comportamento de adoção por tamanhos distintos de propriedade. Esta análise permite considerar o quanto essas tecnologias podem ser complementares ou substitutas.

Dessa forma, este trabalho buscou analisar as relações de complementariedade e substitutabilidade entre as tecnologias de diagnóstico de agricultura de precisão no estado de Goiás e no Distrito Federal. Cabe destacar que o presente trabalho não teve a intenção de avaliar se as tecnologias de diagnóstico da agricultura de precisão são complementares ou substitutas no sentido de ganho de produtividade. O que se pretendeu foi analisar se os agricultores encaram tais tecnologias como substitutas ou complementares na tomada de decisão relativa à adoção. O conhecimento a respeito dessas relações entre as tecnologias poderá auxiliar a tomada de decisão de agentes privados e públicos, caso objetivem construir políticas de difusão tecnológica a partir das funcionalidades inerentes às tecnologias de Amostra de Solo em Grade, Mapa de Produtividade e Sensoriamento Remoto como práticas de diagnóstico do solo, fertilidade e recomendações na agricultura de precisão. Assim, a hipótese nula a ser testada é: há complementariedade no processo de adoção de tecnologias em agricultura de precisão na produção de soja em Goiás e Distrito Federal, expressa nos anos de adoção (tratada aqui como proxy de difusão) entre as três tecnologias (ASG, MP e SR) por meio do modelo em-

pírico proposto por Watcharaanantapong et al., (2013).

Trabalhos que analisam a adoção de uma tecnologia geralmente utilizam modelos de variáveis dicotômicas que consideram a adoção ou não de determinada prática (CIRANI; MORAES, 2010; KOTSIRI et al., 2011; MANDA et al., 2016; MCBRIDE; DABERKOW, 2003; TEY; BRINDAL, 2012). Trabalhos empíricos, que levam em consideração o tempo no processo de adoção de tecnologias, buscam analisar a adoção precedente entre tecnologias e práticas agrícolas, além de prever a probabilidade de adoção (LAMBERT et al., 2014; PAXTON et al., 2011; ROBERTSON et al., 2012; WATCHARAANANTAPONG et al., 2013; WINSSTEAD et al., 2010). Esses trabalhos levam em consideração particularidades temporais no processo de adoção, tendo como vantagem a análise do impacto do fator tempo no fenômeno investigado. Para este tema de investigação, os modelos mais contemplados para a realização da pesquisa são modelos tobit e variações multinomiais dos modelos da classe probit e logit.

Nesta pesquisa, aplicou-se o modelo estatístico tobit para estimar o comportamento de escolha censurada. A estratégia adotada está na análise dos anos de uso de determinada tecnologia (variável dependente), explicada pelo uso precedente de outra tecnologia de diagnóstico de solos e a sua interação com o tamanho de propriedade. Dessa forma, buscou-se estimar o efeito da complementariedade e substitutabilidade entre as tecnologias de diagnóstico em agricultura de precisão. A inovação metodológica reside na mensuração da complementariedade e substitutabilidade das tecnologias em que, o tamanho das propriedades, como variável explanatória, representa componente importante na adoção tecnológica agrícola conforme destacado por Feder (1982). Além das variáveis de interesse supracitadas, foram utilizadas variáveis de controle apontadas na literatura teórica e empírica.

O artigo segue, além desta introdução, com: seção de revisão de literatura sobre o processo de adoção no que tange as implicações da complementariedade e substitutabilidade; seção de exposição da metodologia, na qual é apresenta-

do o processo de amostragem e estratégia empírica; seguida de resultados e conclusões.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Trabalhos seminais sobre adoção e difusão tecnológica são caracterizados, segundo Vieira Filho e Silveira (2012), como epidemiológicos, tratados a partir do comportamento análogo de uma epidemia ao analisar como é difundida e adotada determinada inovação biotecnológica. Os trabalhos de Griliches (1957) e Mansfield (1961) buscaram investigar como as inovações em sementes de milho híbrido se difundiram entre os potenciais adotantes em algumas regiões nos EUA. Tais trabalhos descobriram que o seu uso é guiado pela expectativa de ganhos em produtividade, maior eficiência técnica e pelo potencial retorno econômico.

O que diferencia os trabalhos em meados do século passado e as preocupações acadêmicas sobre adoção tecnológica atual, é a complexidade do processo de adoção diante de tecnologias que assumem características complementares e substitutas entre si. Feder (1982) mostra que a adoção de tecnologias na agricultura pode ser vista como um problema de escolha múltipla em que os produtores consideram adotar, a partir de um conjunto de novas tecnologias, o pacote tecnológico que maximiza a utilidade esperada do lucro.

Na mesma linha de pressuposição teórica, Dorfman (1996) argumenta que modelos que buscam investigar apenas uma determinada tecnologia “mascaram” ou “escondem” a realidade enfrentada por produtores que envolvem fatores ligados a pressões sociais, institucionais, políticas e econômicas. Desta forma, Dorfman (1996) explica que a decisão de adoção é multivariada, ou seja, contida em decisões de adoção interdependentes e simultâneas. Assim, o estudo de tais decisões de adoção multivariada é importante para a compreensão das perspectivas de práticas e políticas de produções sustentáveis.

Feder (1982) identificou que duas tecnologias aparentemente complementares podem ser substitutas em determinado contexto. Em outras palavras, duas tecnologias podem ser complementares se o seu uso em conjunto gerar um incremento na produção maior que o seu uso

individual. Contudo, essas inovações podem ser substituídas, segundo Feder (1982), se uma delas for aplicada juntamente com alguma técnica tradicional e não incorrer em maior variabilidade da produtividade agrícola, o que eleva, portanto, o risco da adoção dessas inovações.

Feder e Umali, (1993) argumentam que a escolha da tecnologia e a intensidade de seu uso pelos produtores, acompanhadas do seu uso frequente, são realizadas simultaneamente. Sunding e Zilberman (2011) afirmam que há um intervalo relevante entre o momento da disponibilidade comercial da tecnologia, ou seja, do lançamento até a sua ampla adoção por produtores. As medidas de adoção podem revelar tanto a época quanto a intensidade de utilização de inovações tecnológicas por indivíduos, havendo possibilidade de serem representados por mais de uma variável, assim a adoção pode ser uma escolha discreta ou uma variável contínua que demonstra em que medida uma inovação é usada (SUNDING; ZILBERMAN, 2011; ZILBERMAN et al., 2012).

Todavia, a adoção de novas tecnologias para a produção de alimentos é marcada por laços políticos-econômicos-institucionais que fazem com que esse processo não se dê na velocidade adequada. Isso ocorre, dado que as práticas agrícolas consistem em ações adaptativas realizadas por agricultores avessos a riscos associados às novas técnicas com que eles não estão familiarizados (FEDER; UMALI, 1993). Tais ações resultam em um comportamento multifacetado decorrente de benefícios percebidos além de retornos em escala e restrição de crédito (ADRIAN et al., 2005; FEDER, 1982; TEY; BRINDAL, 2012). Outros condicionantes podem ser encontrados na literatura, como a idade do produtor, anos de experiência, nível educacional. Essas são variáveis que evidenciam a capacidade de absorver conhecimento tácito das inovações (KOTSIRI et al., 2011; PAXTON et al., 2011; ROGERS, 2010; VIEIRA FILHO; SILVEIRA, 2012). Outro conjunto de variáveis que estariam associadas ao processo de adoção de tecnologia são: a estrutura técnica e as redes de informação, a associação em cooperativas, a existência de internet na propriedade, o uso de computadores e smartphones na gestão, e o compartilhamento da gestão com profissionais (diretores ou gerentes) (FEDER; UMALI,

1993; LAMBERT et al., 2014; NELSON; WINTER, 2005; ROBERTSON et al., 2012; RUTAN; HAYAMI, 1984; SCHUMPETER, 1982; WATCHARAANANTAPONG et al., 2013).

Para testar a hipótese de complementariedade e substitutabilidade entre as tecnologias aqui investigadas, fundamentou-se no modelo teórico de adoção de inovações agrícolas inter-relacionadas, proposto por Feder (1982). Em tal modelo, duas inovações são introduzidas, sendo que, uma é neutra à escala (N) devido ao seu rendimento líquido não ser influenciado pelo número de hectares em que é aplicado. E a outra inovação apresenta custos fixos de operacionalização, que tendem a ser diluídos conforme a escala produtiva (tamanho da propriedade), caracterizando-a como inovação irregular com custos decrescentes à escala.

Essa característica implica que o seu custo por hectare diminui com o tamanho da exploração, de forma que o custo da inovação seja decrescente. Nesse contexto, assume-se que a tecnologia MP é neutra à escala. Como essa tecnologia está associada ao processo de colheita que aconteceria de qualquer forma, a introdução de tal tecnologia não geraria custos associados à escala de produção. Em outras palavras, a tecnologia MP não altera de forma significativa os custos médios de produção, esse fato permite a abordagem empírica do modelo teórico proposto por Feder (1982). O SR apresentaria custos fixos elevados associados às técnicas de sensoriamento remoto, o que indica que os custos são decrescentes à escala de produção. Já ASG apresentaria custos crescentes à escala, visto que, quanto maior a propriedade, mais recursos e tempo seriam gastos para se ter um diagnóstico da propriedade. Diante desse arcabouço, MP poderia ser substituída a SR para propriedades menores, devido aos custos fixos por sensoriamento remoto. Contudo, em propriedades maiores, tais técnicas seriam complementares, devido à diluição dos custos fixos com SR. Na comparação com ASG, MP seria complementar para pequenas propriedades e substituída para grandes propriedades devido aos custos crescentes à escala de ASG. Por fim, a relação entre ASG e SR seria de substituição à medida que as propriedades aumentam.

3 METODOLOGIA

Para estimar o efeito da complementariedade e substitutabilidade utiliza-se o mesmo procedimento para a mensuração do tempo de adoção proposto por Watcharaanantapong et al. (2013).

$$YR_{ij}^* = \beta_0 + x_{ik}\beta_k + x_{ik}Tamanho\beta_{kt} + x_{il}\beta_l + x_{il}Tamanho\beta_{lt} + \delta\beta_c + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

Em que: o tempo de adoção da tecnologia j pelo produtor i é representado por YR_{ij}^* , como variável dependente. As variáveis de interesse são o uso precedente das outras duas tecnologias k e l , e os seus respectivos coeficientes β_k e β_l . Para verificar a complementariedade e substitutabilidade,

A partir disso, forma-se um grupo de variáveis de interesse constituído de quatro variáveis que são: adoção precedente das outras duas tecnologias de agricultura de precisão e as suas interações com o tamanho da propriedade, como segue no Quadro 1. Desta forma, o modelo econométrico a ser estimado é:

de, de acordo com o referencial teórico, entre as tecnologias utiliza-se a interação entre o uso precedente das respectivas tecnologias k e l e o tamanho da propriedade, denotado em $Tamanho$, com seus respectivos coeficientes β_{kt} e β_{lt} . As variáveis de interesse estão expostas no Quadro 1 a seguir.

Quadro 1 – Variáveis de interesse

Variáveis	Descrição das variáveis
MP/ASG	Dummy – Se o produtor utilizou MP antes de adotar ASG.
MP/ASG*Tamanho	Contínua – Adoção precedente de MP e tamanho de propriedade.
SR/ASG	Dummy – Se o produtor utilizou SR antes de adotar ASG
SR/ASG*Tamanho	Contínua – Adoção precedente de SR e tamanho de propriedade
ASG/MP	Dummy – Se o produtor utilizou ASG antes de adotar MP.
ASG/MP*Tamanho	Contínua – Adoção precedente de ASG e tamanho de propriedade.
SR/MP	Dummy – Se o produtor utilizou SR antes de adotar MP.
SR/MP*Tamanho	Contínua – Adoção precedente de SR e tamanho de propriedade

Fonte: elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa.

Como variáveis de interesse têm-se quatro: MP/ASG se o produtor adotou MP antes ou ao mesmo tempo ao adotar ASG; a interação com tamanho de propriedade e adoção anterior de MP em relação à ASG (MP/ASG*Tamanho); se adotou SR antes ou ao mesmo tempo em que adotou ASG (SR/ASG) e, a interação entre tamanho da propriedade e SR/ASG (SR/ASG*Tamanho)[No Quadro 1 também estão expostas relações semelhantes, mas que dizem respeito à adoção prévia de ASG e SR antes de MP. Conforme será exposto na seção de resultados,

não se avaliou a adoção de SR. Portanto, não se criou variáveis que avaliam a precedência de tecnologia em relação à SR.]. Com o objetivo de avaliar a robustez dos resultados, utilizam-se de variáveis controles, observadas na literatura teórica e empírica, expressas no vetor X com seus respectivos coeficientes β_c . E, por fim, um termo de erro estocástico ε_{ij} . O Quadro 2 apresenta as variáveis de controle, distinguindo entre variável contínua e variável dummy. A escolha de tais variáveis de controle se baseou no trabalho de Watcharaanantapong et al. (2013).

Quadro 2 – Variáveis de controle

Variáveis	Descrição das variáveis
Idade	Variável contínua – Anos de idade
Rendas não agrícolas	Variável dummy – Se obtém rendas em outras atividades
Experiência	Variável contínua – Anos de experiência na agricultura

Variáveis	Descrição das variáveis
Ensino médio	Variável dummy – Tem pelo menos o ensino médio completo
Tamanho	Variável contínua – Tamanho da propriedade em hectares
Irrigação	Variável contínua – Anos de uso de irrigação
Manejo Integrado de Pragas (MIP)	Variável contínua – Anos de uso de MIP
Internet	Variável dummy – Tem internet na propriedade
AT Contratada	Variável dummy – Utiliza assistência técnica contratada na propriedade
Computador	Variável dummy – Utiliza computadores na gestão da propriedade
Cooperado	Variável dummy – Participa de redes de cooperativas
Curso em AP	Variável dummy – Realizou algum curso ou treinamento em AP

Fonte: elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa.

A variável dependente detém pontos de censura em sua distribuição, contendo informações não desprezíveis para o processo de estimação a partir de boa parte da população. Devido aos modelos com variável dependente limitada (censurada), métodos convencionais de estimação, como Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), não produzem estimativas eficientes em seus parâmetros, os quais também serão viesados e inconsistentes.

Ao investigar anos de adoção das tecnologias aqui abordadas, espera-se que parte dos produtores não as utilizem, assumindo assim, um valor censurado 0 (zero) anos em considerável parte das observações. Ademais, haverá especificamente pela natureza da variável, uma censura a 15 anos considerando que a disponibilidade comercial de tais tecnologias, no Brasil, esteja nesses patamares, segundo Molin et al., (2015). Assim, assume-se que a distribuição da variável dependente está censurada acima de 0 (não utilização da tecnologia) e abaixo de 15 (anos de disponibilidade das tecnologias no Brasil). A não utilização de tecnologias é um resultado esperado da solução que, em sua natureza, é uma escolha ótima e conduz, conseqüentemente, a uma solução de canto. Esse tipo de variável resposta, por sua vez, é conhecido como modelo de regressão censurada (GREENE, 2012).

O método estatístico utilizado no presente trabalho foi o Tobit. Essa técnica é uma extensão de modelos de escolha binária probit, que além de mensurar a probabilidade de determinada variável dependente assumir valores 0 e 1, estimam-se variáveis dependentes que apresentam limites, porém, é possível que se apre-

sentem também de forma contínua. No caso do presente trabalho, os dados foram coletados de forma aleatória, com respondentes que adotam determinada tecnologia e seguida da quantidade de anos que vem sendo adotada, caso contrário, não adotando a tecnologia, atribui-se 0 (zero)

Watcharaanantapong et al. (2013) sugerem que a temporização da adoção pode ser estimada separadamente usando regressão tobit para cada uma das tecnologias j , com o número de anos de adoção por parte do agricultor i , relacionada a utilização da tecnologia j , no ys (YR_{ij}) como variável dependente para a tecnologia j . Neste caso, o modelo de regressão é dado:

$$YR_{ij}^* = x'_{ijy}\beta_j + \varepsilon_{ijy}, \quad \varepsilon_{ijy} \sim N(0, \sigma_j^2)$$

$$YR_{ij}^* = \begin{cases} YR_{ij}^* & \text{se } YR_{ij}^* > 0 \\ 0 & \text{se } YR_{ij}^* \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$YR_{ij} = \max(0, YR_{ij}^*) \quad (3)$$

Onde, YR_{ij}^* é uma variável latente (AME-MIYA, 1973; GREENE, 2012).

A variável latente YR_{ij}^* satisfaz as suposições do modelo de regressão linear clássico, possuindo uma distribuição normal homocedástica com média condicional linear. A equação (4) demanda que a variável observada YR_{ij} seja igual a YR_{ij}^* quando $YR_{ij}^* \geq 0$ mas $YR_{ij} = 0$, quando $YR_{ij}^* < 0$.

O valor esperado de $YR_{ij}^* I_{x_{ijy}}$, dado a censura a YR_{ij}^* , é:

$$E(YR_{ij}^* I x_{ijy}) = \left[x'_{ijy} \beta_j \Phi \left(\frac{x'_{ijy} \beta_j}{\sigma_j} \right) + \sigma_j \Phi \left(\frac{x'_{ijy} \beta_j}{\sigma_j} \right) \right] \quad (4)$$

em que σ_j e Φ são uma função de distribuição normal cumulativa e função de densidade, respectivamente (GREENE, 2012).

O efeito marginal de uma variável contínua l sobre o valor esperado de $YR_{ij}^* I x_{ijy}$ é dado:

$$\frac{\partial E(YR_{ij}^* I x_{ijy})}{\partial x_{ijy,l}} = \beta_{jl} \Phi \left(\frac{x'_{ijy} \beta_j}{\sigma_j} \right) \quad (5)$$

Para uma variável binária, o efeito marginal é calculado como a diferença entre os valores esperados na presença e ausência do indicador:

$$E[YR_{ij}^* I x_{ijy,l} = 1] - E[YR_{ij}^* I x_{ijy,l} = 0] \quad (6)$$

Os efeitos marginais são interpretados como uma variação de YR_{ij}^* associada à variação de uma unidade em uma variável contínua ou na presença de um indicador para uma variável binária. De forma alternativa, através da equação (5) os efeitos marginais implicam que a adoção da tecnologia j foi adiantada (ou atrasada), dada uma variação na variável contínua ou na presença do indicador (WATCHARAANANTAPONG et al., 2013). A estimação de σ_j e β_j é feita por procedimentos de máxima verossimilhança.

A metodologia utilizada por Watcharaanantapong et al. (2013) é superior às metodologias de escolha binária devido ao tratamento do fator tempo de adoção ser explicado, inferindo o que faz o produtor adotar precocemente ou retardar o uso de tecnologias e/ou práticas agrícolas, contribuindo, assim, para a literatura, o padrão de comportamento dos produtores de soja de Goiás e Distrito Federal e caminhos para a difusão da agricultura de precisão no segmento produtivo destes dois estados.

3.1 COLETA DOS DADOS

Os dados trabalhados na pesquisa foram obtidos por colaboração do Sindicato Rural de Rio Verde – Goiás, mediante aplicação de questionários em dois grandes eventos, o TecnoShow em Rio Verde – Goiás, em abril de 2016 e a Feira Internacional dos Cerrados no PADF (Pro-

grama de Assentamento do Distrito Federal) – Distrito Federal, em junho de 2016.

A justificativa amostral utilizada foi do tipo aleatório simples, no qual a escolha de um indivíduo em determinada população tem a mesma probabilidade de ocorrência. De acordo com Fonseca e Martins (1996), o cálculo para amostras de uma população finita é apresentado em:

$$N = \frac{Z^2 \cdot p \cdot q \cdot N}{d^2(N-1) + Z^2 \cdot p \cdot q} \quad (7)$$

em que n é o tamanho da amostra; Z , a abscissa da curva normal padrão; p , a estimativa da verdadeira proporção de um dos níveis da variável escolhida, expresso em decimais; $q = 1 - p$; N , o tamanho da população; e d , o erro amostral admitido, expresso decimais.

Segundo os dados do Censo Agropecuário 2006, em Goiás e no Distrito Federal, havia 4.791 produtores de soja. Para encontrar o cálculo mínimo de aplicações necessárias de questionários, foram utilizados um nível de confiança de 95% (1,96) com um nível de precisão de $d=10\%$ e um valor p de 50% já que são desconhecidos o número de produtores que utilizam as tecnologias em agricultura de precisão. Portanto, o valor q foi de 50%.

Utilizando os dados preliminares para o cálculo da amostra, obteve-se uma quantidade amostral necessária n igual a 96 respondentes. Foram aplicados, em Rio Verde, 25 questionários-testes que logo foram incorporados à amostra, totalizando 124 agricultores entrevistados. Na literatura, estima-se que a disponibilidade comercial das tecnologias de diagnóstico, no mercado brasileiro, esteja por volta de 15 anos até a presente data da aplicação dos questionários da pesquisa (MOLIN et al., 2015). Portanto, produtores que declararam terem utilizado as tecnologias investigadas por um período superior a 15 anos no momento da pesquisa foram retirados da amostra. Após a retirada desses produtores, a amostragem totalizou 105 produtores.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, seguem os resultados do modelo proposto para o tempo de adoção das tecno-

logias investigadas, exceto para a tecnologia em SR, pois não houve convergência na estimação do modelo econométrico. Isso se deveu, possivelmente, à baixa frequência de adoção por parte dos agricultores, em que muitos valores nulos foram observados. Todavia, a adoção prévia da tecnologia SR foi usada como variável explicativa para as estimações do tempo de adoção das tecnologias ASG e MP, o que permitiu medir a relação de adoção entre essas duas tecnologias. Na estimativa do modelo foram levados em consideração os erros robustos para o tratamento de heterocedasticidade.

A disposição dos modelos estimados segue em quatro grupos de variáveis explicativas, sendo o primeiro as variáveis de interesse, as quais serão testadas sobre a hipótese de complementariedade e substitutabilidade entre as tecnologias. Os outros três grupos foram estabelecidos como variáveis de controle através da literatura teórica e indicam possíveis determinantes para o processo de adoção de tecnologias e inovações agrícolas. Estão divididos em uso da terra, características sociodemográficas e infraestrutura técnica. As colunas contidas nas tabelas de resultados representam a inserção sequencial das variáveis de controle.

Na Tabela 1 estão dispostos os resultados para explicar o tempo de adoção para a tecnologia ASG. Com exceção de MP/ASG*Tamanho, todas as variáveis de interesse foram significativas a 1% na coluna (4), que contém o maior número de variáveis de controle. A coluna 4, por apresentar maior número de variáveis explicativas, foi escolhida para a análise dos resultados. A adoção anterior ou ao mesmo tempo de MP contribui positivamente para o tempo de adoção

de ASG, sugerindo uma complementariedade entre as tecnologias. Nota-se que à medida que se incluem variáveis de controle, há um aumento no coeficiente, além de ganhar significância sobre o efeito do tempo de adoção.

A variável que representa a adoção precedente ou ao mesmo tempo de SR, inicialmente, não apresenta efeito significativo sobre o tempo de adoção de ASG. Contudo, à medida que se incluem as variáveis de controle, a adoção precedente de SR ganha significância e tem seu coeficiente elevado, denotando também uma relação de complementariedade em relação à ASG. No entanto, a variável SR/ASG*Tamanho aponta que, conforme há o aumento do tamanho da propriedade, as duas tecnologias tendem a se tornar substitutas, expresso no coeficiente negativo e denotando um menor tempo de uso da tecnologia ASG, com isso, é possível evidenciar, também, que essas tecnologias podem conter indícios de substitutabilidade nessa relação.

Na Figura 1 estão expostos os efeitos marginais de MP/ASG e SR/ASG para diversos tamanhos de propriedades contidos na amostra. Ao testar a complementariedade na adoção de MP sobre ASG, esse não foi significativo. Entretanto, quando se analisa os efeitos marginais médios de SR sobre ASG, a partir do tamanho de propriedade, percebe-se que quanto maior a propriedade, menor é a adoção de ASG, sendo que em propriedades maiores, esse processo é retardado. Esta é uma evidência de que grandes produtores de soja enxergam ASG e SR como tecnologias substitutas entre si. Nota-se que, quanto maior a propriedade, maior é o efeito marginal de substituição de ASG por SR.

Tabela 1 – Resultado das regressões dos modelos de Amostragem de Solo em Grade

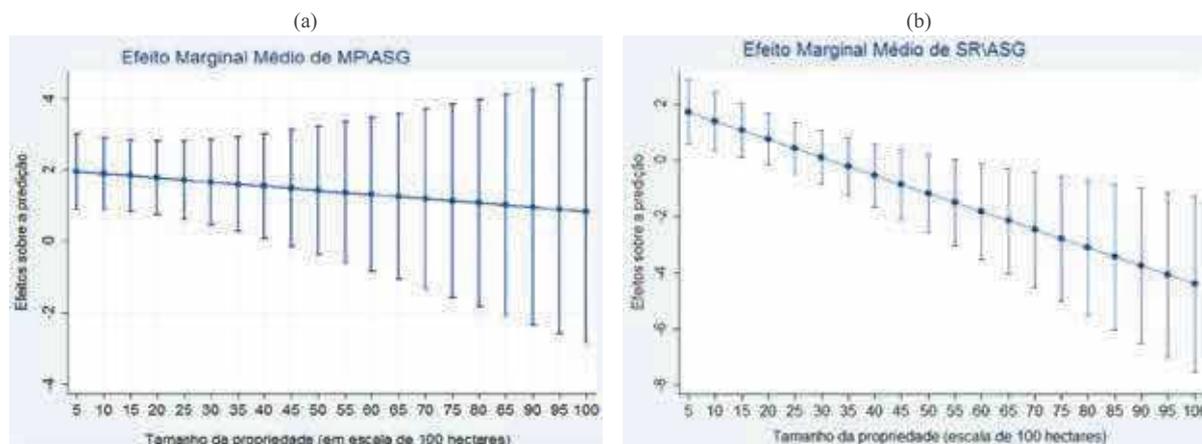
	(1)	(2)	(3)	(4)
Variáveis de interesse				
MP/ASG	1,611** (0,771)	1,247 (1,201)	1,873*** (0,686)	2,011*** (0,581)
MP/ASG*Tamanho	0,0000779 (0,000168)	-0,000204 (0,000602)	0,000108 (0,000249)	-0,000117 (0,000209)
SR/ASG	2,545 (2,382)	0,0729 (2,147)	1,812** (0,692)	2,039*** (0,646)
SR/ASG*Tamanho	0,0000228 (0,000552)	0,000756 (0,000566)	-0,000707*** (0,000239)	-0,000645*** (0,000198)
Uso da terra				

	(1)	(2)	(3)	(4)
Variáveis de interesse				
Tamanho	-	0,00236**	-0,000383	-0,000793*
	-	(0,00101)	(0,000431)	(0,000447)
Tamanho ao Quadrado	-	-0,000000372*	6,81E-08	0,000000147*
	-	(0,000000191)	(0,0000000815)	(0,0000000849)
Arrendamento	-	0,966	0,283	0,228
	-	(1,047)	(0,351)	(0,342)
Residência	-	-0,932	-0,17	-0,427
	-	(1,082)	(0,343)	(0,363)
Distância do Mercado	-	0,0115	-0,00053	-0,00153
	-	(0,0139)	(0,00454)	(0,00471)
Goiás	-	-0,744	0,509	0,188
	-	(1,45)	(0,527)	(0,56)
Características sociodemográficas				
Idade	-	-	-0,0703	-0,0276
	-	-	(0,0837)	(0,0859)
Idade ao Quadrado	-	-	0,00102	0,000716
	-	-	(0,000885)	(0,000923)
Experiência	-	-	0,0261	0,0764
	-	-	(0,0815)	(0,0872)
Experiência ao Quadrado	-	-	-0,0302***	-0,0293***
	-	-	(0,00337)	(0,00292)
Idade*Experiência	-	-	-0,00234	-0,00337**
	-	-	(0,00152)	(0,0016)
Ensino Médio	-	-	1,322**	1,077**
	-	-	(0,578)	(0,508)
Ensino Superior	-	-	-0,43	-0,543
	-	-	(0,5)	(0,491)
Homem	-	-	2,650***	1,931**
	-	-	(0,999)	(0,932)
Infraestrutura técnica e redes de informação				
Cooperado	-	-	-	-0,551
	-	-	-	(0,47)
Computador	-	-	-	1,078**
	-	-	-	(0,501)
Internet	-	-	-	-0,0442
	-	-	-	(0,414)
AT Contratada	-	-	-	0,77
	-	-	-	(0,517)
Curso em AP	-	-	-	0,0321
	-	-	-	(0,355)
Irrigação	-	-	-	0,0622*
	-	-	-	(0,0355)
Manejo Integrado de Pragas	-	-	-	-0,0429*
	-	-	-	(0,0242)
Constant	1,454**	0,151	0,217	-0,492
	(0,608)	(1,602)	(2,22)	(2,278)
Pseudo R2	0,007	0,031	0,416	0,452
AIC	466,5	467,6	307,4	304,7
BIC	482,4	499,4	360,5	376,4
Log-MV	-227,2	-221,8	-133,7	-125,4
Estatística F	3,096**	7,594***	30,58***	22,06***

Fonte: Elaborada pelos autores com base nos dados da pesquisa.

Notas: Desvio padrão em parênteses. Significância dos parâmetros * p < 10%, ** p < 5%, *** p < 1%.

Figura 1 – Efeito Marginal da adoção precedente de MP (a) e SR (b) sobre ASG



Fonte: elaborada pelos autores com base nos dados da pesquisa.

Tal resultado é explicado pelo fato de SR ser uma tecnologia de custo fixo elevado, em que tais custos são diluídos à medida que a propriedade aumenta. ASG, por seu turno, apresenta custos crescentes com a escala, o que faz com que grandes produtores que adotaram SR atrasem a adoção de ASG. Já ASG e MP são complementares do ponto de vista do produtor.

Ao analisar o conjunto de variáveis uso da terra, somente tamanho da propriedade e tamanho da propriedade ao quadrado foram significantes ao nível de 10%, respectivamente. Através dos coeficientes estimados foi possível encontrar o mínimo da função da relação entre adoção, tamanho e tamanho ao quadrado, sendo cerca de 2.700 hectares, aplicando as propriedades da derivada. Tal resultado indica que até (a partir de) 2.700 hectares, a propensão a adotar ASG reduz (aumenta) com o tamanho. Nesse sentido, torna-se relevante destacar a existência da expectativa de que o fator tamanho da propriedade ofereceria contribuição negativa para os anos de uso ASG. Além de questões técnicas (determinação da densidade amostral e distância entre pontos, os quais determinam o tamanho da grade) e de custos na coleta de amostras maiores, quanto maior o tamanho da terra maior será o custo operacional da adoção (MOLIN et al., 2015), esta evidência está presente e em linha com outros achados empíricos (PAXTON et al., 2011; ROBERTSON et al., 2012; WALTON et al., 2008).

No grupo de variáveis sociodemográficas, o coeficiente da variável experiência ao quadrado, significativo ao nível de 1%, apresenta-se negativo. Resultados empíricos dessa variável apon-

tam que essa relação não é consensual, pois, por exemplo, enquanto Anselmi (2012) e Kotsiri et al. (2011) constataram que a experiência está positivamente correlacionada com o uso de agricultura de precisão, por outro lado, Paxton et al. (2011) encontraram os mesmos resultados como no presente trabalho. Tanto a variável experiência ao quadrado e a idade*experiência sugerem que os produtores mais experientes são menos inovadores e menos propensos a utilizarem ASG. Alguns apontamentos são destacados, na literatura, sobre o efeito negativo da experiência dos produtores quando se trata da adoção de inovações agrícolas, primeiro pode estar ligado à baixa capacidade de absorver e gerenciar conhecimento, ou à baixa percepção do produtor sobre utilidade do ferramental tecnológico no processo de produção.

Entre as variáveis de nível educacional, somente Ensino Médio foi significativa, nesse caso ao nível de 5%, onde de certa forma, como em outros trabalhos teóricos e empíricos, a educação influencia positivamente o processo de difusão da ASG na região (AUBERT et al., 2012; FEDER et al., 1985; FEDER; UMALI, 1993; MCBRIDE; DABERKOW, 2003). De forma inesperada, o Ensino Superior não apresentou relação com a adoção de ASG. Por fim, o fato de o agricultor ser do sexo masculino está positivamente associado a adoção da tecnologia ASG.

No terceiro e último grupo está o conjunto de variáveis que representam a infraestrutura técnica e redes de informação. O uso de computador reportou um coeficiente positivo ao nível de 5% de significância. Esse resultado está em linha

com trabalhos empíricos que também investigam adoção de ASG, o uso de computadores nas propriedades aumentam a propensão a adotar ASG empíricos (PAXTON et al., 2011; WALTON et al., 2008; WATCHARAANANTAPONG et al., 2013). As variáveis Manejo Integrado de Pragas (MIP), com coeficiente negativo e significativo ao nível de 10%, e Irrigação, com coeficiente positivo e significativo ao nível de 10%, são variáveis que representam outras práticas agrícolas. Trabalhos empíricos apontam que o uso de práticas de manejo tem influenciado positivamente a adoção de tecnologias agrícolas. No entanto, o sinal reportado pela variável MIP indicou que esta prática retarda o tempo de adoção ASG, o que não era esperado (EMERICK et al., 2016; LAMBERT et al., 2015; MANDA et al., 2016; WAINAINA; TONGRUKSAWATTANA; QAIM, 2016).

A Tabela 2 apresenta os resultados para a adoção de MP. Nota-se que o grupo de variáveis de interesse, somente SR/MP não foi significativo, enquanto para as outras variáveis foram significativos ao nível de 1%. A exemplo dos resultados para ASG, os resultados da coluna 4 serão explorados pelo fato de apresentarem um maior número de variáveis de controle. A adoção precedente de ASG contribui significativamente para o tempo de adoção de MP à medida que são incluídas variáveis de controle, contudo, há uma diminuição do valor do coeficiente. Assim, ao interagir o uso precedente de ASG com tamanho de propriedade, a ASG e MP não se demonstraram complementares, apesar do baixo valor do coeficiente. O contrário ocorre quando se analisa a adoção precedente de SR com o tamanho da propriedade sobre os anos de adoção de MP. Neste caso, à medida que aumenta o tamanho da propriedade, reforça-se o efeito de complementariedade entre as duas tecnologias.

Tamanho da propriedade e Tamanho ao quadrado apresentaram coeficientes significativos ao nível de 1%. Neste modelo, também é possível encontrar o ponto crítico da relação entre tempo de adoção, tamanho e tamanho ao quadrado, sendo um ponto máximo em razão do sinal, indicando uma concavidade voltada para baixo. Assim, ao aplicar as propriedades da derivada, encontrou-se o ponto máximo de tempo de adoção de MP em cerca de 3.300 hectares. Em outras palavras, o tempo de adoção de MP é função crescente (decrecente) do tamanho da propriedade até (a partir de) 3.300 ha.

Produtores que vivem nas propriedades são menos inovadores, segundo o presente modelo. A variável dummy Residência foi negativa e significativa ao nível de 1%. Implica que produtores que vivem na propriedade demoram mais tempo para adotar MP, portanto, menos propensos a difundir o uso da tecnologia.

Nas características sociodemográficas, alguns resultados divergem em relação à ASG. A idade do agricultor foi positiva e significativa ao nível de 5%, enquanto a experiência como produtor agrícola foi negativa e significativa também ao nível de 5%. Produtores mais experientes tendem a adotar de forma tardia MP. Contudo, a variável interação Idade*Experiência apresenta-se positiva e significativa ao nível de 5%, quanto maior a idade e experiência em negócios agrícolas, maior será o tempo de adoção de MP. Essas divergências também estão presentes em trabalhos empíricos (DABERKOW; MCBRIDE, 2003; KOTSIRI et al., 2011; LAMBERT et al., 2015; PAXTON et al., 2011). O coeficiente da variável Homem (gênero=1, homem e mulher=0) negativo e significativo ao nível de 5%, implica que, neste caso, produtoras são mais propensas a utilizarem esta tecnologia por mais tempo que produtores.

Tabela 2 – Modelos de Mapas de Produtividade

	(1)	(2)	(3)	(4)
Variáveis de interesse				
ASG/MP	8,404*** (1,276)	8,972*** (1,515)	3,106*** (0,618)	5,484*** (0,994)
ASG/MP*Tamanho	-0,000268 (0,000225)	-0,00119* (0,000657)	-0,000444* (0,000251)	-0,00124*** (0,000293)
SR/MP	-2,612*** (0,9)	-0,952 (1,522)	-0,107 (0,707)	-1,571 (0,97)
SR/MP*Tamanho	0,000741*** (0,000282)	0,00129** (0,000545)	0,000136 (0,000279)	0,00126*** (0,000424)

	(1)	(2)	(3)	(4)
Variáveis de interesse				
Uso da terra				
Tamanho	-	0,0016	0,000763	0,00225***
	-	(0,00119)	(0,000466)	(0,000586)
Tamanho ao Quadrado	-	-0,00000015	-0,000000115	-0,00000338***
	-	(0,000000201)	(0,000000775)	(0,00000107)
Arrendamento	-	1,163	-0,165	-0,133
	-	(1,281)	(0,375)	(0,376)
Residência	-	0,482	0,14	-1,055**
	-	(1,314)	(0,408)	(0,506)
Distância do Mercado	-	-0,00877	0,000355	0,000867
	-	(0,0237)	(0,00643)	(0,00642)
Goiás	-	3,086***	0,263	1,172
	-	(1,113)	(0,361)	(0,859)
Características sociodemográficas				
Idade	-	-	0,14	0,340**
	-	-	(0,114)	(0,159)
Idade ao Quadrado	-	-	-0,00177	-0,00470**
	-	-	(0,00123)	(0,00202)
Experiência	-	-	-0,190*	-0,341**
	-	-	(0,105)	(0,137)
Experiência ao Quadrado	-	-	-0,0380***	-0,0399***
	-	-	(0,00486)	(0,00326)
Idade*Experiência	-	-	0,00223	0,00491**
	-	-	(0,00172)	(0,00243)
Ensino Médio	-	-	-0,0631	0,863
	-	-	(0,487)	(0,591)
Ensino Superior	-	-	0,236	0,51
	-	-	(0,541)	(0,603)
Homem	-	-	-2,376*	-4,354***
	-	-	(1,328)	(1,04)
Infraestrutura técnica e redes de informação				
Cooperado	-	-	-	0,931**
	-	-	-	(0,451)
Computador	-	-	-	-1,675***
	-	-	-	(0,553)
Internet	-	-	-	-0,401
	-	-	-	(0,4)
Infraestrutura técnica e redes de informação	-	-	-	
AT Contratada	-	-	-	0,629
	-	-	-	(0,526)
Curso em AP	-	-	-	-1,817***
	-	-	-	(0,67)
Irrigação	-	-	-	0,0725**
	-	-	-	(0,0339)
Manejo Integrado de Pragas	-	-	-	-0,0610**
	-	-	-	(0,0249)
Constant	-4,489***	-8,646***	-0,454	-1,775
	(0,985)	(2,449)	(2,719)	(2,782)
Pseudo R2	0,15	0,18	0,575	0,627
AIC	233,2	237,4	150,8	151,1
BIC	249,2	269,3	203,9	222,7
Log-MV	-110,6	-106,7	-55,39	-48,55
Estatística F	15,66***	6,643***	21,42***	22,38***

Fonte: elaborada pelos autores com base nos dados da pesquisa.

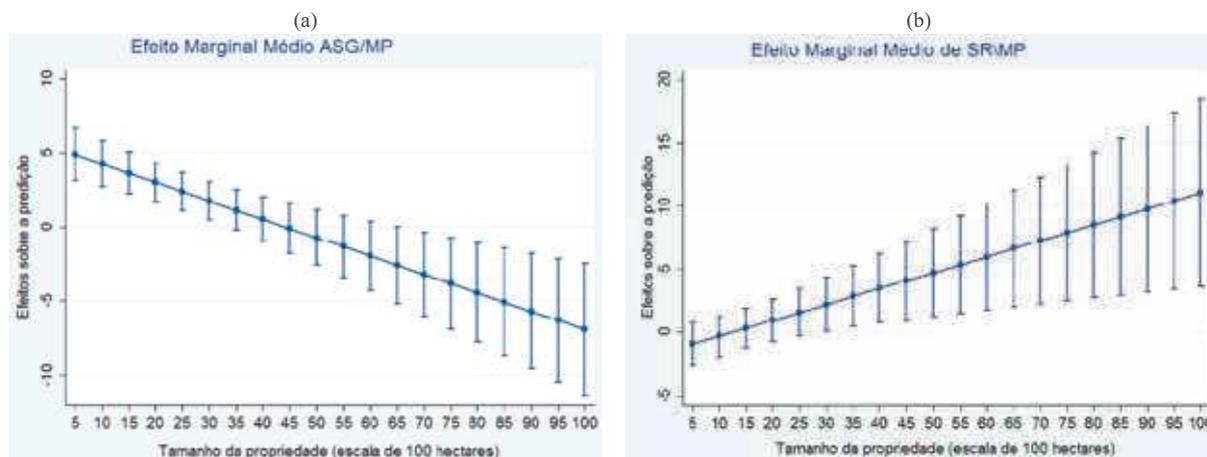
Desvio padrão em parênteses; Significância dos parâmetros * p < 10%, ** p < 5%, *** p < 1%.

No último grupo, infraestrutura técnica e redes de informação, nota-se que o cooperativismo está associado a um maior tempo de adoção em MP, com coeficiente positivo e significativo ao nível de 5%. Essa variável tem grande respaldo teórico e empírico nas análises de adoção de inovações agrícolas e o seu resultado está em linha com o que é versado na literatura (FEDER et al., 1985; FEDER; UMALI, 1993; MANDA et al., 2016; MONTE; TEIXEIRA, 2006). Contudo, não se esperava que a variável Computador e Cursos em AP fossem contribuir para um menor tempo de adoção, coeficientes negativos e significantes ao nível de 1%. Quanto às vari-

áveis Irrigação e MIP, os resultados estatísticos obtidos foram semelhantes à ASG (Tabela 1).

A Figura 2 expõe os efeitos da adoção precedente de ASG/MP e SR/MP em relação à interação com o tamanho da propriedade. Nota-se um efeito de complementariedade entre as tecnologias em ASG e MP, contudo, a partir dos 450 hectares há um efeito negativo sobre o tempo de uso de MP denotando um efeito de substituição entre essas duas tecnologias. Como evidenciado em SR/MP*Tamanho, o uso de SR e MP são complementares, independentemente, do tamanho da propriedade. Assim, quanto maior o tamanho da propriedade, maior é a relação de complementariedade dessas tecnologias.

Figura 2 – Efeito Marginal da adoção precedente de ASG (a) e SR (b) sobre MP



Fonte: elaborada pelos autores com base nos dados da pesquisa.

Tais resultados indicam que pequenos produtores que adotaram ASG antes de MP, consideram MP complementar à ASG, visto que a adoção desta adianta a adoção de MP. Contudo, à medida que o tamanho da propriedade aumenta, produtores que adotaram previamente ASG, atrasam a adoção de MP. Isto acontece pelo fato de MP ser praticamente neutra à escala de produção. Produtores grandes que já incorrem no custo do ASG, que apresentam custos crescentes à escala de operação, se sentem menos estimulados a incorrer em novos custos. Contudo, os resultados contidos na Figura 1 indicam que a adoção prévia de MP por grandes produtores não tem impacto na adoção de ASG. A adoção prévia de SR, por seu turno, apresenta relação crescente na adoção de MP ao se considerar o tamanho da propriedade. Isto indica que as informações obtidas por meio de SR, tecnologia

com custos decrescentes à escala de produção, é complementada com a verificação da produtividade por meio do MP, que apresenta retorno neutro à escala.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho objetivou explicar o tempo de adoção de tecnologias de agricultura de precisão pelos produtores de soja de Goiás e Distrito Federal. Investigou-se o tempo de uso de Amostragem de Solo em Grade e o Mapa de Produtividade. Essas tecnologias têm como função diagnosticar parâmetros agrônômicos da produção com base no princípio da variabilidade do solo e clima. Além de terem funções semelhantes, o que não é tratado na literatura empírica, no modelo estimado foi possível quantificar os

efeitos das variáveis de interesse e controle sobre o tempo de adoção dessas tecnologias.

Os resultados demonstram que o tempo de adoção das tecnologias está ligado à adoção precedente, em outras palavras, os condicionantes da difusão destas tecnologias estão ligados à experiência prévia do produtor com Agricultura de Precisão. Contudo, após a interação com o tamanho da propriedade, o modelo aponta que quanto maior a propriedade menor a relação de complementariedade entre Sensoriamento Remoto e Amostra de Solo em Grade. Tal resultado também foi verificado sobre a adoção precedente de Amostra de Solo em Grade sobre Mapa de Produtividade. Ao analisar a relação de precedência de SR em relação a MP foi encontrada complementariedade entre as duas tecnologias.

A hipótese nula de que essas tecnologias são complementares, o que é comumente definido na literatura empírica, não ocorreu em sua totalidade, portanto o trabalho traz novas evidências da presença de substitutabilidade na adoção das tecnologias aqui tratadas. Exceto para a precedência de Sensoriamento Remoto à Amostra de Solo em Grade, onde há evidências de que são complementares. Recomenda-se que, ao propor políticas de difusão de tecnologias em agricultura de precisão, levem-se em consideração as especificidades e características do produtor, especificidades ligadas à escala produtiva e perfil socioeconômico, como demonstrados pelo modelo.

REFERÊNCIAS

ADRIAN, A. M.; NORWOOD, S. H.; MASK, P. L. Producer's perceptions and attitudes toward precision agriculture technologies. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 48, p. 256–71, 2005.

AMEMIYA, T. Regression Analysis when the Dependent Variable Is Truncated Normal. **Econometrica**, v. 41, n. 6, p. 997, 1973.

ANSELMINI, A. A. **Adoção da agricultura de precisão no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

AUBERT, B. A.; SCHROEDER, A.; GRIMAUDO, J. IT as enabler of sustainable farming: An empirical analysis of farmers' adoption decision of precision agriculture technology. **Decision Support Systems**, v. 54, n. 1, p. 510–20, 2012.

CIRANI, C. B. S.; MORAES, M. A. F. D. Determinantes da Adoção das tecnologias de agricultura de precisão. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 48, n. 4, p. 543–65, 2010.

DABERKOW, S. G.; MCBRIDE, W. D. Farm and operator characteristics affecting the awareness and adoption of precision agriculture technologies in the US. **Precision Agriculture**, v. 4, n. 2, p. 163–77, 2003.

DORFMAN, J. H. Modeling Multiple Adoption Decisions in a Joint Framework. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 78, n. 3, p. 547–57, 1996.

EMERICK, K. et al. Technological innovations , downside risk , and the modernization of agriculture. **American Economic Review**, v. 106, n. 6, p. 1537–561, 2016.

FEDER, G. Adoption of Interrelated Agricultural Innovations: Complementarity and the Impacts of Risk, Scale, and Credit. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 64, n. 1, p. 94–101, 1982.

FEDER, G.; JUST, R. E.; ZILBERMAN, D. Adoption of Agricultural Innovations in Developing Countries: A Survey. **Economic Development and Cultural Change**, v. 33, n. 2, p. 255–98, 1985.

FEDER, G.; UMALI, D. L. Special Issue Technology and Innovation In Agriculture and Natural Resources The adoption of agricultural innovations. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 43, n. 3, p. 215–39, 1993.

FONSECA, J. S.; MARTINS, G. A. **Curso de estatística**. 6.ed. São Paulo: Atlas, 1996.

GREENE, W. W. H. . **Econometric analysis**. 7.ed. New York: Prentice Hall, 2012.

- GRILICHES, Z. Hybrid Corn : An Exploration in the Economics of Technological Change. **Econometrica**, v. 25, n. 4, p. 501–22, 1957.
- KHANNA, M. Sequential adoption of site-specific technologies and its implications for nitrogen productivity: A double selectivity model. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 83, n. 1, p. 35–51, 2001.
- KOTSIRI, S. et al. Farmers' perceptions about spatial yield variability and precision farming technology adoption: An empirical study of cotton production in 12 Southeastern states. **Southern Agricultural Economics Association**, 2011.
- LAMBERT, D. M. et al. Adoption and Frequency of Precision Soil Testing in Cotton Production. **Journal of Agricultural and Resource Economics**, v. 39, n. 1, p. 106–132, 2014.
- LAMBERT, D. M.; PAUDEL, K. P.; LARSON, J. A. Bundled adoption of precision agriculture technologies by cotton producers. **Journal of Agricultural and Resource Economics**, v. 40, n. 2, p. 325–45, 2015.
- MANDA, J. et al. Adoption and Impacts of Sustainable Agricultural Practices on Maize Yields and Incomes: Evidence from Rural Zambia. **Journal of Agricultural Economics**, v. 67, n. 1, p. 130–53, 2016.
- MANSFIELD, E. Technical Change and the Rate of Imitation. **Journal of the Econometric Society**, p. 741–66, 1961.
- MCBRIDE, W. D.; DABERKOW, S. G. Information and the adoption of precision farming Technologies. **Journal Agribusiness**, v. 21, n. 1, p. 21–38, 2003.
- MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. **Agricultura de Precisão**. 1a ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.
- MONTE, E. Z.; TEIXEIRA, E. C. Determinantes da Adoção da Tecnologia de Despolpamento na Cafeicultura. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 44, n. 2, p. 201–17, 2006.
- NELSON, R. R.; WINTER, S. G. **Uma teoria evolucionária da mudança econômica**. Campinas: Editora Unicamp, 2005.
- PAXTON, K. W. et al. Intensity of precision agriculture technology adoption by cotton producers. **Agricultural and Resource Economics Review**, v. 40, n. 1, p. 133–44, 2011.
- ROBERTSON, M. J. et al. Adoption of variable rate fertiliser application in the Australian grains industry: status, issues and prospects. **Precision Agriculture**, v. 13, n. 2, p. 181–99, 2012.
- ROGERS, E. M. **Diffusion of innovations**. New York: Simon and Schuster, 2010.
- RUTTAN, V. W.; HAYAMI, Y. Toward a theory of induced institutional innovation. **The Journal of Development Studies**, v. 20, n. 4, p. 203–23, 1984.
- SCHUMPETER, J. A. **Teoria do Desenvolvimento Econômico**. São Paulo: Abril Cultural, 1982.
- SUNDING, D.; ZILBERMAN, D. The agricultural innovations process: research and technology adoption in a changing agricultural sector. In: **Handbook of Agricultural Economics**. North-Holland: Elsevier, 2011.
- TENKORANG, F.; LOWENBERG-DEBOER, J. On-farm profitability of remote sensing in agriculture. **Journal of Terrestrial Observation**, v. 1, n. 1, p. 6, 2008.
- TEY, Y. S.; BRINDAL, M. Factors influencing the adoption of precision agricultural technologies: A review for policy implications. **Precision Agriculture**, v. 13, n. 6, p. 713–30, 2012.
- VIEIRA FILHO, J. E. R.; SILVEIRA, J. M. F. J. Mudança tecnológica na agricultura: uma revisão crítica da literatura e o papel das economias de aprendizado. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 50, n. 4, p. 721–42, 2012.

WAINAINA, P.; TONGRUKSAWATTANA, S.; QAIM, M. Tradeoffs and complementarities in the adoption of improved seeds, fertilizer, and natural resource management technologies in Kenya. **Agricultural Economics (United Kingdom)**, v. 47, n. 3, p. 351–62, 2016.

WALTON, J. C. et al. Adoption and abandonment of precision soil sampling in cotton production. **Journal of Agricultural and Resource Economics**, v. 33, n. 3, p. 428–48, 2008.

WATCHARAANANTAPONG, P. et al. Timing of precision agriculture technology adoption in US cotton production. **Precision Agriculture**, v. 15, n. 4, p. 427–46, 2013.

WINSTEAD, A. T. et al. Adoption and use of precision agriculture technologies by practitioners. In: **Proceedings of the 10th International Conference of Precision Agriculture**. Denver, Colorado: [s.n.]. p. 18–21.

ZILBERMAN, D.; ZHAO, J.; HEIMAN, A. Adoption Versus Adaptation, with Emphasis on Climate Change. **Annual Review of Resource Economics**, v. 4, p. 27–53, 2012.