

DÊNIS ANTÔNIO DA CUNHA

**EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS
NA AGRICULTURA BRASILEIRA: ANÁLISE DA IRRIGAÇÃO
COMO ESTRATÉGIA ADAPTATIVA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2011

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

C972e
2011

Cunha, Dênis Antônio da, 1983-
Efeitos das mudanças climáticas globais na agricultura
brasileira: análise da irrigação como estratégia adaptativa /
Dênis Antônio da Cunha. – Viçosa, MG, 2010.
xvii, 128f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui anexos.

Orientador: Alexandre Bragança Coelho.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 114-122

1. Irrigação - Aspectos econômicos. 2. Mudanças
climáticas. 3. Agricultura - Brasil. I. Universidade Federal de
Viçosa. II. Título.

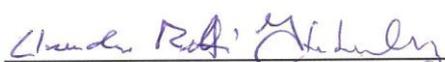
CDD 22. ed. 338.1

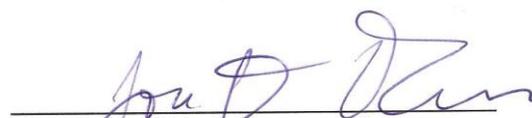
DÊNIS ANTÔNIO DA CUNHA

**EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS
NA AGRICULTURA BRASILEIRA: ANÁLISE DA IRRIGAÇÃO
COMO ESTRATÉGIA ADAPTATIVA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

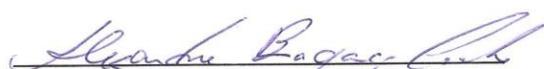
APROVADA: 29 de junho de 2011.


Pes. Cláudio Ritti Itaborahy


Prof. José Gustavo Féres
(Coorientador)


Prof. Roberto Serpa Dias


Profª Viviani Silva Lirio


Prof. Alexandre Bragança Coelho
(Orientador)

*À minha mãe, Gracinha, e à minha tia, Imaculada,
com amor e gratidão incondicionais.*

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho envolveu esforços de professores, orientadores, amigos, familiares e diferentes instituições. Agradecer, portanto, é imprescindível. Mesmo ciente de que é praticamente impossível listar todos os que contribuíram, abaixo procurarei expressar minha gratidão àqueles que estiveram mais próximos, oferecendo-me oportunidades de crescimento intelectual, profissional e pessoal.

À Universidade Federal de Viçosa, pela excelência em ensino e pela competência de seus profissionais. Também pelo compromisso com a assistência estudantil, que permite que mais estudantes tenham acesso ao ensino superior, contribuindo para um país mais justo e igualitário.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), ao Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) e ao Latin American and Caribbean Environmental Economics Program (LACEEP) pelo apoio financeiro, fundamental ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Alexandre Coelho, pela orientação séria e comprometida, pelos aconselhamentos e por ter apoiado todas as minhas decisões ao longo do doutorado.

Ao Prof. José Féres, pela inestimável contribuição durante a realização deste trabalho e também pelas oportunidades profissionais.

A todos os professores que vêm contribuindo para a minha formação. Com carinho ao Prof. Roberto Serpa Dias, com quem tive a primeira oportunidade de desenvolver um trabalho de pesquisa; à Prof^ª. Sônia Leite, pela orientação no Mestrado e pela amizade; aos professores Maurinho Luiz dos Santos, Viviani Silva

Lírio, Marília Gomes, Marcelo Braga e Orlando Monteiro da Silva, pelos incentivos e bons conselhos que, certamente, farão grande diferença em minha carreira profissional.

Ao Dr. Claudio Ritti Itaborahy, pela leitura atenciosa da tese e pelas sugestões que enriqueceram muito o trabalho.

A toda a equipe do IPEA-RJ, em especial ao Dr. Eustáquio Reis, pelo fundamental apoio na obtenção da base de dados utilizada na tese. À Juliana Speranza, pela ajuda no tratamento dos dados. Com carinho à Maria do Carmo, pela amizade e pelos bons momentos durante as seis semanas em que trabalhei no IPEA.

Aos muitos funcionários da UFV com quem tive a oportunidade de conviver. Em especial à Nena, da BBT, ao Vicente, do RU e à Rita, do IPC-Viçosa. Aos funcionários do DER, Helena, Tedinha, Élide, Brilhante, Otto, Leoní e Maria, pela disposição e prontidão em sempre me ajudar. Com afeição muito especial à Cida e à Carminha.

A todos os muitos amigos e colegas de profissão pelos ensinamentos e experiências compartilhados. Ao João Ricardo, Aracy e Ana Carolina, pela ajuda com a econometria. Ao Tharcísio, pelo apoio na confecção dos mapas. Ao Marcel, pela leitura atenciosa das várias versões da tese, pela explicação das questões agrônômicas/fisiológicas e pela ajuda com toda a parte visual da tese. Ao Marlon e à Joyce, por terem me recebido em sua casa durante o período no IPEA. A todos os companheiros do DER, em especial à Giovanna, ao Gil, ao Marcos, ao Filipe, ao Roni, à Graciela, à Cristiana, ao Elvanio e à Fernanda. Aos novos amigos da Fisiologia Vegetal e da UFOP, em particular à Isabel, à Giuliana, ao Leandro Elias e ao Evandro.

Aos meus grandes amigos, Josiane, Mirelle, Simone, Norberto, Humberto, Daiane, Juliana, Vitória, Silmara e Marcel, pelas conversas, pelas broncas e pelas tristezas e alegrias compartilhadas.

Aos meus pais, Gracinha e Antônio, e aos meus tios, Imaculada e Hélio, pelo trabalho árduo e incansável e por não terem medido esforços para que eu chegasse até aqui. Ao meu primo, Guilherme, pela paciência e compreensão. À tia Dica e minhas primas, Kellen e Déa, por me ensinarem a levar a vida de um jeito mais tranquilo e paciente. À tia Aparecida e aos demais tios e tias, primos e primas, por toda a ajuda concedida.

Às minhas “avós” do Lar dos Velinhos, por encherem de alegria e emoção a minha vida.

Ao meu amor, por ter me feito entender que a felicidade só é real quando compartilhada.

Por fim, a Deus, fonte inesgotável de misericórdia, por me dar forças para não desistir jamais.

BIOGRAFIA

DÊNIS ANTÔNIO DA CUNHA, filho de Antônio Alves da Cunha e Maria das Graças de Oliveira Cunha, nasceu em Capela Nova, Minas Gerais, em 12 de julho de 1983.

Em maio de 2002, iniciou o curso de Ciências Econômicas pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), MG, graduando-se em outubro de 2006.

Em outubro de 2006, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada da UFV, concluindo os requisitos necessários para obtenção do título de *Magister Scientiae* em junho de 2008.

Em agosto de 2008 iniciou o curso de Doutorado em Economia Aplicada, também na UFV, tendo defendido tese em junho de 2011.

Em julho de 2010 tomou posse como professor do Departamento de Ciências Econômicas e Gerenciais da Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, em Mariana – MG. Em agosto de 2011 foi aprovado em Concurso Público para professor no Departamento de Economia Rural da UFV, onde futuramente realizará suas atividades de ensino, pesquisa e extensão.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	xii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xvi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações iniciais	1
1.2. O problema e sua importância.....	4
1.4. Hipótese	9
1.5. Objetivos	9
1.6. Estrutura do trabalho	10
2. A IRRIGAÇÃO E SUA PRÁTICA NO BRASIL.....	11
2.1. Custos e benefícios associados à irrigação	11
2.2. Breve histórico da política de irrigação no Brasil	15
2.3. Situação atual da irrigação brasileira.....	18
2.4. Perspectivas futuras da irrigação	25
3. REVISAO DE LITERATURA.....	27
3.1. Modelos tradicionais.....	28
3.2. Modelos com adaptação.....	36
3.3. Questões relativas à irrigação.....	38
4. REFERENCIAL TEÓRICO.....	40
4.1. Efeito da mudança climática sobre a agricultura.....	42
4.2. Conceito de adaptação	43

4.3. Modelo teórico	45
5. METODOLOGIA.....	49
5.1. O modelo de Efeito de Tratamento e o Pareamento por Escore de Propensão	50
5.2. Simulações de mudança climática.....	56
5.3. Avaliação da qualidade das estimativas.....	58
5.4. Descrição das variáveis e fonte dos dados utilizados	60
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	68
6.1. Análise descritiva das variáveis	68
6.2. Análise dos fatores associados à decisão de irrigar	71
6.3. Efeito da irrigação sobre o desempenho dos produtores no período atual	78
6.4. Qualidade da estimação	80
6.5. Cenários futuros de mudança climática	83
6.5.1. Análise da probabilidade de irrigar no Brasil e suas regiões geográficas	86
6.5.2. Impactos da mudança climática sobre a produção irrigada e de sequeiro.....	93
6.6. Análise para pequenos produtores.....	98
6.6.1. Análise descritiva das variáveis	99
6.6.2. Análise dos fatores associados à decisão de irrigar de pequenos produtores	101
6.6.3. Efeito da irrigação sobre o desempenho de pequenos produtores no período atual.....	105
6.6.4. Simulações de mudança climática: modelo para pequenos produtores	107
7. RESUMO E CONCLUSÕES.....	111
REFERÊNCIAS	115
ANEXOS.....	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Evolução da área irrigada no Brasil e regiões geográficas (1.000 ha).....	19
Tabela 2	Modelos de Circulação Geral do IPCC, estimativas de temperatura e precipitação para a América Latina, 2060.....	65
Tabela 3	Descrição das variáveis utilizadas no estudo.....	67
Tabela 4	Distribuição regional das AMC's conforme as categorias irrigantes e produtores de sequeiro.....	69
Tabela 5	Estatísticas descritivas por tipo de produção.....	70
Tabela 6	Teste de <i>Wald</i> para as variáveis utilizadas no estudo.....	72
Tabela 7	Estimativas do modelo probit de determinação da probabilidade de irrigar.....	73
Tabela 8	Estimativa do efeito de tratamento (ETM_1) no Brasil.....	79
Tabela 9	Teste do Pseudo R2 para qualidade do pareamento.....	81
Tabela 10	Análise da redução do viés padronizado para a amostra de AMC's pareadas e não pareadas.....	82
Tabela 11	Teste de sensibilidade do efeito de tratamento por meio dos limites de Rosenbaum.....	83
Tabela 12	Previsões de temperatura ($^{\circ}C/mês$) e precipitação (mm/mês) para cenários futuros de mudança climática no Brasil e regiões geográficas.....	84

Tabela 13	Variações de temperatura (Δ °C) e precipitação (Δ mm) para cenários futuros de mudança climática no Brasil considerando irrigantes e produtores de sequeiro.....	85
Tabela 14	Valores da probabilidade de irrigar (atual e simulações futuras) estimados para o Brasil e grandes regiões.....	86
Tabela 15	Estimativas do efeito das mudanças climáticas sobre o valor médio da terra de irrigantes e produtores de sequeiro.....	94
Tabela 16	Variação percentual do valor da terra estimado em cada período futuro e cenário climático em relação ao valor estimado para o período atual.....	95
Tabela 17	Estatísticas descritivas por tipo de produção, modelo para pequenos produtores.....	100
Tabela 18	Teste de <i>Wald</i> para as variáveis utilizadas no estudo, modelo para pequenos produtores.....	102
Tabela 19	Estimativas do modelo probit de determinação da probabilidade de irrigar para pequenos produtores.....	103
Tabela 20	Estimativa do efeito de tratamento (ETM_1) no Brasil, modelo para pequenos produtores.....	105
Tabela 21	Estimativas do efeito das mudanças climáticas sobre o valor médio da terra de irrigantes e produtores de sequeiro, modelo para pequenos produtores.....	107
Tabela 22	Variação percentual do valor da terra estimado em cada período futuro e cenário climático em relação ao valor estimado para o período atual, modelo para pequenos produtores.....	108
Tabela A1	Modelos de Circulação Geral usados na construção da base de dados das projeções climáticas.....	124
Tabela A2	Teste de heterocedasticidade.....	125
Tabela A3	Valores da probabilidade de irrigar (atual e simulações futuras) estimados para os estados brasileiros, cenário A1B.....	125
Tabela A4	Valores da probabilidade de irrigar (simulações futuras) estimados para os estados brasileiros, cenário A2.....	126
Tabela A5	Análise da redução do viés padronizado para a amostra de AMC's pareadas e não pareadas, modelo para pequenos produtores.....	127

Tabela A6	Teste do Pseudo R2 para qualidade do pareamento, modelo para pequenos produtores.....	128
Tabela A7	Teste de sensibilidade do efeito de tratamento por meio dos limites de Rosenbaum, modelo para pequenos produtores.....	128

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Área irrigada (1.000 ha) nas regiões (a) e estados brasileiros do Norte (b), Nordeste (c), Sudeste (d), Sul (e) e Centro-Oeste (f).....	20
Figura 2	Área irrigada das principais culturas produzidas no setor agrícola brasileiro (1.000 ha).....	22
Figura 3	Distribuição regional da área irrigada considerando o total de estabelecimentos agropecuários em cada classe de tamanho.....	23
Figura 4	Distribuição da área irrigada conforme diferentes métodos nas regiões geográficas brasileiras.....	24
Figura 5	Representação do modelo hedônico.....	30
Figura 6	Mudança climática, vulnerabilidade e capacidade adaptativa no setor agrícola.....	41
Figura 7	Mudança climática e os custos e benefícios da adaptação.....	44
Figura 8	Etapas metodológicas e estratégias empíricas utilizadas.....	56
Figura 9	Etapas metodológicas e estratégias empíricas utilizadas para as simulações de mudança climática.....	58
Figura 10	Áreas mínimas comparáveis (AMC's) excluídas e consideradas na pesquisa.....	61
Figura 11	Probabilidade de irrigar (atual e simulações futuras) estimados para o Brasil e regiões geográficas, cenários A1B (a) e A2 (b).....	87
Figura 12a	Distribuição estadual da probabilidade de irrigar no Brasil (%), período atual (a).....	89

Figura 12b	Distribuição estadual da probabilidade de irrigar no Brasil (%), simulações futuras para o cenário A1B (b).....	90
Figura 12c	Distribuição estadual da probabilidade de irrigar no Brasil (%), simulações futuras para o cenário A2 (c).....	91
Figura 13	Variações percentuais do valor da terra de irrigantes e produtores de sequeiro em relação ao período atual, cenários A1B (a) e A2 (b).....	96
Figura 14	Variações percentuais do valor da terra de irrigantes e produtores de sequeiro em relação ao período atual, cenários A1B (a) e A2 (b), modelo para pequenos produtores.....	109

RESUMO

CUNHA, Dênis Antônio da, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, junho de 2011.
Efeitos das mudanças climáticas globais na agricultura brasileira: análise da irrigação como estratégia adaptativa. Orientador: Alexandre Bragança Coelho.
Co-orientadores: José Gustavo Féres e Marcelo José Braga.

O desafio da economia às mudanças climáticas globais tem sido oferecer respostas confiáveis a respeito da direção e magnitude dos impactos nos diversos setores econômicos e sobre onde, quanto, como e quando se deve investir em mitigação e adaptação. Para o setor agrícola de países em desenvolvimento, esperam-se os maiores efeitos negativos. Considerando que a produção agropecuária responde por parcela expressiva da renda brasileira, pode-se afirmar esse é um tema de especial relevância para a agenda de desenvolvimento do país. Nesse sentido, o presente estudo teve como objetivo analisar os efeitos das mudanças climáticas no setor agrícola nacional, incluindo as estratégias de adaptação na estimativa dos impactos. Partiu-se da pressuposição de que os agricultores não continuarão realizando a(s) mesma(s) atividade(s) sem alteração de suas técnicas produtivas. A estratégia adaptativa considerada foi a irrigação, já que o país tem ampla disponibilidade de água e condições favoráveis para o desenvolvimento sustentável dessa atividade. O estudo foi fundamentado na visão teórica de que a vulnerabilidade de um setor é condicionada pela magnitude das alterações do clima e também pela sua capacidade de empreender ações de adaptação. O modelo econômico utilizado procura explicar a decisão de irrigar dos produtores como um processo de maximização de benefícios, no qual somente são observadas escolhas ótimas.

Analiticamente, estimou-se um modelo de Efeito de Tratamento, por meio da técnica de Pareamento por Escore de Propensão, que permitiu avaliar os retornos da prática de irrigação e compará-los aos da produção de sequeiro. As previsões futuras das variáveis climáticas (temperatura e precipitação) se referem a três períodos de 30 anos (de 2010 a 2039, de 2040 a 2069 e de 2070 a 2099), sob dois cenários de mudanças climáticas (A1B e A2). Os resultados obtidos confirmaram a expectativa de que a irrigação é influenciada pelas variações climáticas e, dessa forma, pode ser modelada como medida adaptativa. De modo geral, a análise dos fatores associados à sua adoção no Brasil indicou que, para ser um irrigante, o produtor precisa ter renda suficiente para arcar com os custos de investimento, conhecimento técnico e capacidade administrativa. Além disso, sua propriedade deve ter disponibilidade hídrica e boas condições de solo. No que se refere ao efeito da irrigação sobre os rendimentos dos produtores, os resultados apontam duas conclusões distintas. No período atual, foram estimados retornos maiores para a produção de sequeiro. Essa resposta está diretamente ligada aos custos elevados de implantação de um sistema de irrigação. Não obstante, quando se consideram os cenários futuros de mudanças climáticas, o resultado se inverte. Foi possível identificar que a renda dos irrigantes tende a ser crescente e mais estável. Produtores de sequeiro, por outro lado, serão impactados negativamente, podendo ter seus ganhos reduzidos em até 14% do valor atual. Conclusões semelhantes foram obtidas para pequenos produtores, embora as perdas esperadas para a produção de sequeiro sejam consideravelmente maiores do que os impactos médios do setor agrícola. De modo geral, os resultados desta pesquisa reforçam a necessidade da formulação de políticas públicas no Brasil que busquem estratégias de combate aos efeitos do aquecimento global no setor. Ademais, dada a comprovação da importância da irrigação como medida adaptativa, deve-se incentivar a criação de políticas nacionais de crédito específicas para a implementação dessa prática, principalmente para os produtores menos capitalizados.

ABSTRACT

CUNHA, Dênis Antônio da, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, June of 2011.
Impacts of climate change on Brazilian agriculture: an analysis of irrigation as an adaptation strategy. Adviser: Alexandre Bragança Coelho. Co-Advisers: José Gustavo Féres and Marcelo José Braga.

The main objective of this paper was to analyze the effects of global climate change on agriculture in Brazil. But, unlike other studies performed for Brazil, it was considered that producers will try to adapt to climate change. Irrigation was considered as an adaptive strategy, since Brazil presents favorable conditions for sustainable development of this activity. The Treatment Effect model was used in this research. Results confirmed prior expectation that irrigation is influenced by climate variations and, thus, should be modeled as an adaptive measure. Given current conditions, irrigation has been adopted more as a response to reduced rainfall occurrences than to temperature variations. In general, the analysis of factors associated with its adoption in Brazil showed that to be an irrigator, the farmer must have enough income to afford the costs of investment, technical knowledge (which involves understanding the potential and limitations of the technique, and its operation and functioning) and administrative capacity. Furthermore, his/her farm must have good water availability as well as good soil conditions. It is possible to conclude that irrigators' income tends to be more stable, demonstrating the effectiveness of irrigation as an adaptive measure. Given the predictions of climate change, irrigation has the potential to contribute to improve Brazil agricultural performance, making producers less vulnerable to climate. It is confirmed, thus, the

need to include adaptation measures in the estimation, providing a good assessment of what really happens. Ignoring the adjustment causes an overestimation of damages, sometimes in a dramatic way. In general, results of this study suggest that the impacts of climate change on agriculture in Brazil will not be so pessimistic. At the same time, they reinforce the need for public policies that seek strategies to combat the effects of global warming in agriculture. Moreover, given the evidence of irrigation importance as an adaptive measure, the creation of specific credit policies for irrigation should be encouraged, especially for less capitalized producers. It would be a way to avoid the increase of regional inequalities in Brazil.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

As mudanças climáticas globais têm sido amplamente discutidas por pesquisadores das mais diversas áreas do conhecimento, principalmente a partir da década de 1990. Tais alterações, cuja magnitude não é totalmente conhecida, têm se manifestado de diferentes maneiras, destacando-se o aquecimento global, a alta frequência e intensidade dos eventos climáticos extremos (tempestades, inundações, secas e geadas intensas), mudanças no sistema de chuvas, perturbações nos fluxos marítimos, derretimento das geleiras e elevação do nível do mar. Com base nas informações disponíveis, estudos já indicam efeitos no cenário atual e fazem projeções para cenários futuros no tocante aos recursos naturais, à economia e aos diversos setores da sociedade.

A análise do aquecimento global e de suas consequências é um dos principais desafios para a comunidade científica. A maior parte dos especialistas em clima concorda que a temperatura do planeta está mais elevada (DIAS et al., 2007). De acordo com o 4º Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (International Panel on Climate Change – IPCC, 2007), os anos compreendidos entre 1995 e 2006 foram os mais quentes do registro instrumental da temperatura da superfície global (desde 1850). Além disso, nos 50 anos anteriores à publicação do relatório, foi observado um crescimento linear de 0,13°C por década, o dobro da taxa verificada nos 100 anos precedentes.

O aumento das concentrações atmosféricas dos chamados gases de efeito estufa (GEE's)¹ é apontado pelo IPCC (2007) como a causa primária da alteração na temperatura. As emissões de natureza antrópica têm sido um importante determinante dessa tendência. De fato, as queimadas e a utilização de combustíveis fósseis, como o petróleo e o carvão, e o desmatamento, contribuem significativamente para as emissões de GEE's. Esses gases têm apresentado maior crescimento de concentração na atmosfera desde a revolução industrial. De valores pré-industriais de 280 ppm², a concentração de CO₂ na atmosfera, por exemplo, aumentou para 384 ppm em 2006; com um aumento médio de 1,74 ppm e 2,09 ppm por ano, nos períodos de 1996 a 2001 e de 2002 e 2006, respectivamente. Além disso, na ausência de ações para reduzir as emissões de GEE's, há expectativas de que em 2025 elas possam ser 50% maiores que as atuais (BAUMERT et al., 2005; National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA, 2009). Por essa razão, até mesmo entre os cientistas que admitem que o processo natural é a causa primária do aquecimento, parcela expressiva concorda que a ação humana está acelerando o processo.

As mudanças no clima têm potencial para alterar a geografia física e humana, mas esse processo ainda é caracterizado por considerável incerteza em nível global. Esse grau de incerteza pode ser reduzido quando as análises contemplam variáveis regionais de tempo e clima, uma vez que os impactos são muito distintos em termos locais e setoriais (STERN, 2008).

O setor agrícola, por depender diretamente de temperatura e precipitação, pode ser um dos mais afetados pelas mudanças climáticas, uma vez que, mesmo com todos os avanços tecnológicos, as condições ambientais ainda são fator chave para a produtividade agrícola (DESCHÊNES; GREENSTONE, 2007; FISHER et al., 2009). O clima influencia tanto o crescimento e o desenvolvimento das plantas, quanto as diversas etapas das atividades agrícolas, como o preparo da terra para semeadura, época de plantio, colheita, transporte e armazenamento dos produtos. As condições climáticas igualmente afetam a relação das plantas com doenças e pragas que prejudicam as culturas, causando perdas sociais e econômicas. Fenômenos meteorológicos adversos,

¹ A concentração atmosférica de gases de efeito estufa (GEE's) é a razão do número de moléculas desses gases em relação ao número total de moléculas de ar seco. Dentre os GEE's, destacam-se o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O).

² A sigla ppm refere-se ao termo "partes por milhão".

de difícil previsibilidade em médio e longo prazo, como geadas, secas, chuva excessiva ou granizo, aumentam o risco associado à agricultura (GOUVÊA, 2008)³.

Em nível global, há significativa discordância em termos do impacto das mudanças climáticas sobre o setor agrícola. Os estudos de Mendelsohn (2000) e Tol (2002), por exemplo, concluem que haverá, no agregado, um efeito positivo sobre a agricultura. Stern (2007) apresenta estimativas de perdas entre 5% e 10% da produção mundial de cereais, dependendo do cenário climático considerado. Já Cline (2007) estima perdas de aproximadamente 3% na capacidade produtiva global e afirma que tal valor certamente subestima os danos potenciais. Em adição, diversos estudos (DESCHÊNES; GREENSTONE, 2007; SCHLENKER; ROBERTS, 2008; HANEMANN, 2008; FISHER et al., 2009) têm enfatizado que os potenciais efeitos sobre a produção agrícola são multidimensionais e não lineares, e que uma das razões para a divergência das estimativas é a complexidade das interações entre o clima e o crescimento das culturas.

Mesmo com essa divergência de entendimento sobre a forma e a magnitude dos impactos, verifica-se que a maior parte dos pesquisadores acredita que as nações em desenvolvimento serão as mais afetadas negativamente. Em primeiro lugar, por ser a agropecuária atividade econômica responsável por expressiva parcela do Produto Interno (PIB) desses países. Além disso, muitos deles apresentam partes significativas de seus territórios em áreas onde as temperaturas já estão próximas ou acima dos níveis ótimos para a agricultura. Por essa razão, até mesmo elevações moderadas na temperatura levarão a perdas de produtividade (CLINE, 2007; STERN, 2007).

Respostas políticas às mudanças do clima incluem a mitigação das emissões de GEE's e adaptação aos potenciais impactos. A primeira é amplamente vista como uma resposta proativa, ao passo que a segunda é uma medida reativa. Segundo Margulis e Dubeux (2010), a estratégia básica da mitigação é a de custo-efetividade, isto é, buscase a forma mais barata de reduzir as emissões de GEE's, independentemente do país ou da fonte de emissão. Já a adaptação se relaciona às alterações das decisões dos agentes, as quais poderiam reduzir a vulnerabilidade às mudanças observadas ou esperadas no

³ Deve-se notar que as atividades agropecuárias não apenas sofrem os efeitos das mudanças climáticas, mas também as influenciam. Segundo o IPCC (2007), os aumentos da concentração de metano e de óxido nítrico são devidos, principalmente, à agropecuária. Além disso, o setor é responsável por aproximadamente 13,5% das emissões anuais de CO_{2-eq} (gás carbônico equivalente, unidade-padrão que mede a capacidade de contribuir para o aquecimento global de todos os GEE, em quantidade de CO_2).

clima⁴. Patt et al. (2010) ressaltam que ambos os processos envolvem ações tanto de agentes privados quanto do setor público, porém, os benefícios das ações de mitigação são sentidos por todo o mundo, ao passo que os da adaptação recaem sobre o agente, a organização ou comunidade que tenha empreendido a ação.

Embora as ações referentes à redução de emissões de GEE's venham dominando a política climática global, as estratégias de adaptação têm sido cada vez mais enfatizadas de modo a formar uma resposta política mais abrangente (KUMAR, 2009). Em outras palavras, é cada vez mais improvável que as mudanças climáticas poderão ser evitadas somente com esforços de mitigação (MARGULIS; DUBEUX, 2010). A adaptação é necessária porque, mesmo que emissões adicionais de GEE's não ocorram (que seria o padrão ideal de mitigação), o estoque desses gases tende a permanecer por muitos anos na atmosfera, dando continuidade ao aquecimento global. Portanto, de acordo com Stern (2007), a adaptação é crucial para lidar com os impactos inevitáveis das mudanças no clima.

1.2. O problema e sua importância

O desempenho favorável do setor agrícola depende sobremaneira de condições ambientais adequadas. De acordo com Göepfert et al. (1993), o clima é um dos principais fatores limitantes e determinantes da produção agrícola, pois a seca na fase inicial das culturas (semeadura e germinação) e o excesso de chuva na colheita, respondem por parcela expressiva da redução das safras. Isso se verifica no Brasil, em que, de acordo com Pinto et al. (2003), a grande dimensão territorial ocasiona considerável heterogeneidade climática e condições que podem ser favoráveis ou desfavoráveis, dependendo da cultura agrícola. Infere-se daí que as alterações climáticas certamente implicarão em mudanças nas áreas consideradas aptas para plantio no país, com efeito negativo ou positivo para cada tipo de cultura.

As previsões do IPCC (2007) indicam que o aquecimento atmosférico no Brasil variará de acordo com as estações do ano. Nas regiões mais centrais do país, o período caracterizado por maior quantidade de chuvas, de dezembro a fevereiro, terá aumentos

⁴ Na Biologia, denomina-se “estratégias de adaptação” a variação de forma e fisiologia que organismos vivos apresentam para sobreviver e competir em um dado habitat submetido à variação ambiental. Em Economia, a expressão é empregada de forma análoga, indicando ações possíveis, porém ainda não utilizadas, frente à variação de um fator de produção.

de temperatura que podem variar de 0,96°C nos próximos 30 anos até 2,95°C no período de 2070 a 2099 (num cenário mais pessimista). Nos meses mais secos, de junho a agosto, esperam-se elevações mais drásticas, de até 3,41°C no fim do século XXI.

A partir dos prognósticos futuros de aumento das temperaturas, pode-se inferir que, nas regiões climatologicamente limítrofes àquelas de delimitação de cultivo adequado de plantas agrícolas, o provável aumento da temperatura será desfavorável ao desenvolvimento vegetal. Quanto maior a variação climática, menos aptas as localidades se tornarão. Todavia, as culturas mais resistentes a altas temperaturas poderão ser beneficiadas até o seu limite próprio de tolerância ao estresse térmico. Já nas áreas caracterizadas por baixas temperaturas, que atualmente são limitantes ao desenvolvimento de culturas sensíveis a geadas, o aumento do nível térmico poderá fazer com que haja condições favoráveis (PINTO et al., 2003).

Os principais estudos que analisaram a agricultura brasileira (SIQUEIRA et al., 1994; SANGHI et al., 1997; NOBRE et al., 2005; ÁVILA et al., 2006; FÉRES et al.; 2008; e EMBRAPA, 2008) são unânimes ao afirmar que as mudanças climáticas causarão impacto líquido negativo para o país em médio e longo prazos. Há concordância também que as diversas regiões serão afetadas distintamente, o que está diretamente relacionado à substancial variação das condições edafoclimáticas ao longo do território nacional.

No entanto, exceto pelas análises de Evenson e Alves (1998), Anderson e Reis (2007) e de Féres et al. (2009), nenhum dos vários trabalhos que analisaram os impactos das mudanças climáticas globais sobre o setor agrícola nacional considerou explicitamente a potencialidade das medidas de adaptação. Portanto, os estudos deixaram de seguir a tendência expressa na literatura internacional sobre o tema, que é de reconhecimento às estratégias adaptativas como fonte de redução dos impactos.

Segundo Seo e Mendelsohn (2008b), para quantificar adequadamente os impactos das alterações climáticas sobre a agricultura, é preciso levar em conta as estratégias de adaptação. As análises não podem simplesmente estimar como uma cultura específica será afetada, mas devem reconhecer que os produtores irão modificar suas decisões de produção para maximizar o lucro conforme cada cenário climático. Estudos que assumem que os produtores continuarão cultivando a(s) mesma(s) cultura(s), sem alteração de suas técnicas produtivas, certamente superestimam os prejuízos.

A capacidade de adaptar-se é dinâmica e é influenciada pela base produtiva da sociedade, em particular, pelos bens de capital, capital humano, instituições, tecnologia e disponibilidade de recursos naturais (IPCC, 2007). As principais estratégias adaptativas para o setor agrícola incluem diversificação de culturas, alterações das datas de plantio e colheita, aumento do uso de irrigação, implementação de técnicas de conservação de solo, sombreamento e abrigo e, por fim, melhoramento genético, por meio do desenvolvimento de cultivares mais resistentes à seca e, ou, ao estresse hídrico.

Deve-se considerar que o planejamento de ações de adaptação climática requer, necessariamente, a análise das opções de decisão, levando em conta as possibilidades e limitações de cada técnica, assim como as incertezas associadas às mudanças climáticas (PIDGEON; FISCHHOFF, 2011). De acordo com Magrin et al. (2007) e Seo (2011), a irrigação configura-se como uma das principais medidas de adaptação para os produtores da América Latina.

A irrigação é considerada como uma medida adaptativa, no contexto de mudanças climáticas, pois permite o controle da deficiência hídrica na produção agrícola. Com a prática, garante-se o atendimento integral às plantas nas regiões mais secas ou se conta com fornecimento de água suplementar nas épocas de estiagem das regiões mais úmidas. A irrigação também pode ser benéfica, em alguns de seus métodos, na redução da temperatura do ar e das plantas e na diminuição dos efeitos de geadas.

A irrigação constitui-se uma ferramenta indispensável para o incremento da produtividade, principalmente em regiões nas quais a variabilidade climática caracteriza-se por baixa precipitação (COELHO et al., 2006). Em termos de produtividade física, cada hectare irrigado produz o equivalente a mais do que três hectares de sequeiro, proporção que pode ser ainda maior quando se considera o valor da produção (ITABORAHY, 2004). Sendo assim, devido a esse aumento de produtividade, a prática de irrigação tende a reduzir a demanda de novas áreas para plantio e, conseqüentemente, contribui para a conservação da vegetação nativa, preservando também as nascentes dos cursos de águas superficiais e os solos, que se constituem em reservatórios naturais de água (MMA, 2006).

Esse diferencial entre a agricultura irrigada e a de sequeiro tem sua importância indiretamente destacada quando se leva em conta os resultados de estudos que tratam das mudanças no uso do solo como medidas de adaptação frente aos cenários de

mudanças climáticas no Brasil, como os de Anderson e Reis (2007) e Féres et al. (2009). Esses autores concluem que as mudanças no padrão de uso da terra certamente serão caracterizadas por redução das áreas florestais nos estabelecimentos agrícolas. Tal alteração tende a pressionar positivamente as taxas de desmatamento e, em consequência, as emissões de CO₂. Dessa forma, a agricultura irrigada, ao possibilitar o aumento da produção sem a necessidade de aumento de área destinada ao plantio, oferece uma solução para essa externalidade negativa.

Seo (2011), considerando a decisão de irrigar como estratégia adaptativa, analisou os impactos das mudanças climáticas no setor agrícola da América do Sul. Em seu estudo, foram utilizados dados da Argentina, Chile, Colômbia, Equador, Uruguai, Venezuela e, inclusive, do Brasil. O autor demonstrou que tanto a agricultura irrigada quanto a de sequeiro serão negativamente afetadas, porém a segunda tende a sofrer mais prejuízos. O referido estudo apresentou importante contribuição ao entendimento da realidade latino-americana, até então pouco estudada. Todavia, apresentou resultados genéricos, não fazendo inferências a respeito de como cada país será afetado, tampouco considerou especificidades regionais⁵.

No Brasil, devido à grande disponibilidade de água e de solos aptos para a irrigação, essa pode ser uma estratégia adaptativa importante. O país detém cerca de 12% das reservas de água doce do planeta e possui aproximadamente 30 milhões de hectares que se configuram como solos potencialmente aptos para desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada. Por sustentável entende-se que há disponibilidade de recursos hídricos sem risco de conflitos com outros usos prioritários da água e que as exigências da legislação ambiental e Código Florestal estão sendo atendidas (Ministério do Meio Ambiente – MMA, 2006; CHRISTOFIDIS, 2009). Embora tenha havido um aumento de 42% no total da área irrigada no país em relação ao censo agropecuário de 1995/96, apenas 4,4 milhões de hectares estão em produção com técnicas e sistemas de irrigação (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, 2006;). Em outras palavras, ainda há mais de 25 milhões de hectares de terras passíveis de produção com métodos de irrigação e drenagem agrícola.

⁵ Deve-se ressaltar que a base de dados do estudo de Seo (2011) continha observações de apenas 1.395 produtores divididos entre os sete países incluídos na amostra. Esse é um número pequeno quando se pensa que somente o Brasil, segundo dados do Censo Agropecuário 2006, tem 5.204.130 estabelecimentos agrícolas.

Nesse contexto, este estudo se propõe a realizar uma análise alternativa dos efeitos das mudanças climáticas sobre o setor agrícola do Brasil, considerando a decisão de irrigar como estratégia de adaptação. Pretende-se investigar como a variabilidade climática influencia a irrigação e se a sua prática de fato tornará menor a vulnerabilidade dos produtores brasileiros às alterações climáticas. Pretende-se analisar também qual serão os possíveis prejuízos para as produções de sequeiro.

A análise específica do caso brasileiro é importante, uma vez que o país apresenta características climáticas, sociais, econômicas e institucionais bastante distintas em relação a outras nações da América do Sul. Especificamente, a produção agrícola brasileira tem características peculiares, tanto no que se refere às culturas produzidas, à disponibilidade hídrica para a prática de irrigação e à capacidade adaptativa. Sendo assim, pretende-se verificar como essas especificidades influenciarão os efeitos das mudanças climáticas sobre a agricultura brasileira.

O presente trabalho utilizou uma versão adaptada do modelo de Mendelsohn et al. (1994), que permitiu a inclusão da irrigação como estratégia adaptativa. Foram examinadas produções irrigadas e de sequeiro separadamente, mas tratando a irrigação como variável influenciada pelo clima. As projeções de mudança climática foram baseadas nas previsões de temperatura e precipitação do IPCC (IPCC, 2007).

Entre as justificativas para se desenvolver um modelo de adaptação às mudanças climáticas, pode-se destacar o fato de que o Brasil é altamente preparado para implementar estratégias adaptativas em larga escala, já que tem um sistema de pesquisa que pode oferecer infraestrutura e organização para responder às pressões impostas pelo aquecimento global (ANDERSON; REIS, 2007). Além disso, conforme Christofidis (2006), o país detém um potencial superior a 13% da capacidade mundial de incorporação de novas áreas à agricultura irrigada, ou seja, ainda são elevadas suas possibilidades de desenvolvimento sustentável dessa atividade.

Outra informação sobre a conjuntura atual é que, de acordo com estudo do MMA (2006), tem aumentado o interesse dos agricultores pelo emprego de sistemas de irrigação, principalmente depois das perdas de produção devido a fatores climáticos nas safras de 2004 e 2005. No entanto, a descapitalização que caracteriza o setor nos últimos anos tem inibido sua adoção. Dessa forma, ao analisar a importância da irrigação para mitigar os efeitos das mudanças climáticas, pode-se incentivar a criação de políticas de crédito específicas para a implementação de tais sistemas.

A partir dos resultados deste estudo, pretende-se fornecer subsídios para futuras políticas públicas que visem mitigar os impactos das mudanças climáticas no setor agrícola brasileiro, dada sua grande importância para a economia nacional. Além disso, ao identificar os principais determinantes do uso de irrigação, pode-se contribuir para uma melhor gestão dos recursos hídricos do país. O estudo pode também contribuir para a divulgação dos potenciais benefícios da agricultura irrigada como medida de adaptação às mudanças climáticas, principalmente no que se refere aos seus ganhos de produtividade, física ou econômica, que podem ser um incentivo à redução do desmatamento para expansão da fronteira agrícola no Brasil.

Por fim, deseja-se, também, ampliar a literatura que trata das implicações econômicas da adaptação, a qual, segundo o IPCC (2007), ainda é limitada em algumas regiões, como, por exemplo, o Brasil.

1.4. Hipótese

A prática de irrigação, como medida adaptativa, tem o potencial de mitigar os efeitos negativos das mudanças climáticas globais sobre o setor agrícola brasileiro.

1.5. Objetivos

O objetivo principal deste estudo é analisar os impactos das mudanças climáticas globais sobre a decisão de irrigar e sobre a lucratividade do setor agrícola brasileiro, considerando a irrigação como estratégia adaptativa.

Especificamente, pretende-se:

- a) Identificar qual é a importância da mudança climática sobre a decisão de irrigar e como as diferentes regiões do Brasil serão afetadas;
- b) Avaliar o desempenho agrícola dos produtores por meio da simulação dos impactos em produções irrigadas e de sequeiro;
- c) Identificar os possíveis prejuízos relacionados à decisão de não irrigar; e
- d) Verificar se há um padrão distinto de efeitos para pequenos produtores, uma vez que estes possuem menor capacidade adaptativa.

1.6. Estrutura do trabalho

Para cumprir os objetivos propostos, este trabalho está organizado em seis capítulos, além desta introdução. No Capítulo 2 faz-se uma revisão a respeito da irrigação, apresentando seus benefícios e custos, discutindo a evolução de sua prática no Brasil e traçando um panorama da conjuntura atual e das perspectivas futuras. O Capítulo 3 contém breve revisão da literatura a respeito dos modelos utilizados para análises econômicas das mudanças climáticas, ressaltando sua evolução e as principais características. Os Capítulos 4 e 5 apresentam, respectivamente, o Referencial Teórico que fundamenta a análise e a Metodologia utilizada para responder às questões propostas na pesquisa. No Capítulo 6 são discutidos os resultados. Por fim, no Capítulo 7 são tecidas as principais conclusões do estudo.

2. A IRRIGAÇÃO E SUA PRÁTICA NO BRASIL

O presente capítulo apresenta, na primeira seção, uma discussão a respeito dos benefícios e custos (econômicos e ambientais) da irrigação; na segunda, um breve histórico das políticas implantadas pelo Estado brasileiro com vistas a promover sua utilização; na terceira, traça um perfil da situação atual da irrigação no país; e, na última, são delineadas perspectivas futuras.

2.1. Custos e benefícios associados à irrigação

A irrigação vem sendo praticada desde a antiguidade, e seu aperfeiçoamento acompanhou o desenvolvimento do progresso técnico-científico da humanidade. Atualmente, de acordo com Turrall et al. (2010), cerca de 40% da produção mundial de alimentos é procedente da agricultura irrigada. No Brasil, apesar da disponibilidade de água e do grande potencial de solos para o desenvolvimento sustentável dessa técnica, a irrigação ainda é pouco explorada. Em nível mundial, o país ocupa a 16ª posição, com pouco mais de 1% da área total irrigada no mundo (Agência Nacional de Águas – ANA, 2009).

A opção por implantar um sistema de produção irrigado pode estar relacionada a fatores climáticos, agrônômicos ou de ordem econômica e gerencial. Em geral, o produtor deseja se proteger contra eventos climáticos desfavoráveis e, assim, garantir sua produção e, ou, aumentar sua produtividade.

O risco de ocorrência de estiagem em períodos críticos da lavoura sempre existe, principalmente em regiões nas quais a distribuição das chuvas é irregular e a frequência dos veranicos⁶ é grande, elevando a incerteza associada à produção agrícola. Assim, de acordo com Itaborahy et al. (2004), em termos climáticos, para verificar a necessidade de irrigação, deve-se analisar o balanço hídrico da região, ou seja, considerar as entradas e saídas de água no sistema. Para avaliar esse balanço, é comum levar em conta a precipitação e a evapotranspiração⁷. Segundo os referidos autores, calcula-se a extensão do período em que o balanço hídrico não é favorável e o tamanho do déficit a que as culturas estão submetidas, de modo que a esses fenômenos sejam associadas probabilidades de ocorrência.

Com o emprego de irrigação, o risco climático inerente à agricultura é reduzido, possibilitando ao produtor utilizar os fatores de produção e insumos em níveis mais elevados, o que resulta em maior produtividade e cultivos mais rentáveis. Dessa forma, como o valor da terra em determinada região está relacionado ao seu potencial produtivo, aumentam-se os benefícios ao agricultor, que tem seus ativos mais valorizados (SCHOENGOLD; ZILBERMAN, 2007).

A técnica também cria condições para que a água seja aplicada na quantidade adequada e no tempo certo, evitando déficits ou excessos em períodos críticos do desenvolvimento das plantas. Portanto, o plantio pode ser planejado para a época mais propícia à condução de determinada cultura em relação aos aspectos climáticos. A maior segurança da produção irrigada possibilita que o agricultor planeje melhor seu cultivo e possa realizar contratos de fornecimento com agroindústrias e fornecedores em geral (ITABORAHY, 2004).

A irrigação permite que a oferta de alguns produtos seja mantida durante praticamente todo o ano, inclusive nos períodos considerados de entressafra. No Brasil, em função da produção irrigada, verifica-se melhor distribuição de diversos produtos agrícolas, em especial frutas e hortaliças. Segundo Schoengold e Zilberman (2007), por um lado, isso aumenta as oportunidades de emprego, já que a terra será cultivada mais

⁶ Veranico é um fenômeno meteorológico que consiste em um período de estiagem, acompanhado por calor intenso, forte insolação, e baixa umidade relativa. Para ser considerado veranico, é necessária uma duração mínima de quatro dias, às vezes prolongada a várias semanas. Ressalta-se que veranicos são altamente prejudiciais à agricultura.

⁷ Evapotranspiração refere-se à perda de água do solo por evaporação e à perda de água da planta por transpiração. Esses dois processos ocorrem concomitantemente e tendem a se tornar mais intensos com o aumento da temperatura.

vezes. Por outro, também há vantagens aos consumidores finais, por meio de maior estabilidade de preços ao longo do ano.

Conforme Itaborahy et al. (2004), são inegáveis os benefícios da agricultura irrigada. Não obstante, a opção por essa forma de organização da produção não deve ser baseada apenas em seus pontos fortes em relação à produção de sequeiro, mas também nos custos inerentes à implantação, operação e manutenção do sistema. Em geral, tais custos são elevados, ainda que variem de acordo com o sistema escolhido, grau de automação, qualidade do material utilizado e tamanho da área a ser irrigada. Itaborahy et al. (2004) explicam que os gastos operacionais podem chegar a 30% ou 35% do custo total de produção, fazendo com que, em muitas culturas, a margem de lucro seja muito pequena. Portanto, para que o empreendimento seja rentável, é necessário que sejam produzidas culturas de mais alto valor.

De acordo com Schoengold e Zilberman (2007), os custos de desenvolver sistemas de irrigação têm aumentado muito desde os anos 1970. Entre as razões para essa tendência, pode-se citar que os melhores locais para a instalação já foram utilizados, e os que permanecem são cada vez mais caros ou exigem grandes investimentos em adequação do terreno às exigências de cada sistema.

Além dos custos econômicos, há também aqueles relacionados ao meio ambiente. No contexto das mudanças climáticas, por exemplo, a produção de arroz por meio do sistema de alagamento contínuo representa uma das principais fontes de emissões de metano (CH_4). O metano é considerado o segundo gás em importância no efeito estufa antrópico e seu potencial de absorção de radiação infravermelha é aproximadamente 21 vezes maior que o do CO_2 (IPCC, 2007). No Brasil, esse fato assume considerável relevância, dado que o arroz irrigado por inundação é uma das principais culturas agrícolas da região Sul. Segundo o IBGE (2006), no país há cerca de um milhão de hectares de terras irrigadas com a utilização desse método, dos quais mais 70% se encontram no Rio Grande do Sul.

Ademais, a irrigação pode causar grandes impactos ambientais quando ocorre o manejo inadequado da água e da lavoura. Esses impactos iniciam-se na derivação ou captação da água na fonte, notadamente quando são construídas obras de médio a grande porte, como canais, aquedutos, diques, açudes e barragens (ITABORAHY et al., 2004). A construção de uma barragem, por exemplo, provoca alterações no ecossistema fluvial e em seu entorno. Há mudanças no fluxo de corrente, temperatura e qualidade da

água. Estas mudanças afetam, conseqüentemente, a flora e fauna local, gerando problemas não só para as espécies envolvidas, mas também para o bem-estar das pessoas que dependem desses recursos para sua subsistência (SCHOENGOLD; ZILBERMAN, 2007).

Outro dano grave gerado pelo manejo incorreto da irrigação é a salinização. Nas regiões áridas e semi-áridas irrigadas, a salinização do solo é um dos fatores que afetam o rendimento dos cultivos, limitando a produção agrícola e causando prejuízos. Nessas regiões, caracterizadas por baixos índices pluviométricos e intensa evapotranspiração, a baixa eficiência da irrigação e a drenagem insuficiente contribuem para a aceleração do processo de salinização, tornando as terras improdutivas em curto espaço de tempo (SCHOENGOLD; ZILBERMAN, 2007).

Segundo Itaborahy et al. (2004), práticas agrícolas incorretas numa lavoura irrigada podem levar a sérios riscos ambientais devido ao carreamento de resíduos de agroquímicos, por meio do escoamento superficial ou da percolação desses resíduos no solo. Os autores explicam que em projetos de irrigação nos quais a água é distribuída por canais ou por sulcos e faixas, pode haver sobras no final da área. Essa água, que leva sais dissolvidos, defensivos ou até mesmo metais pesados, certamente comprometerá outras atividades que dela dependem e que são desenvolvidas a jusante.

O manejo inadequado da irrigação também pode levar ao sério problema de desperdício de água. Christofidis (2008) ressalta que um dos maiores desafios na agricultura irrigada é a necessidade de redução de perdas nos sistemas, seja daquelas relacionadas à aplicação de água nas culturas produzidas, seja das perdas nos sistemas de condução e distribuição pelas infraestruturas hídricas. Uma forma de lidar com essa questão é a escolha dos métodos de irrigação apropriados às características da produção e do local onde é desenvolvida. Esse problema assume considerável importância quando se leva em conta que, num contexto de mudanças climáticas, é crescente a possibilidade de conflitos entre os diversos usos da água.

A fim de minimizar os impactos ambientais relacionados à utilização inadequada da irrigação, a legislação brasileira estabelece uma série de normas para a instalação do sistema. O produtor precisa de um licenciamento ambiental, cuja principal função é conciliar a atividade desenvolvida com a conservação do meio ambiente. São priorizados os projetos que incorporam equipamentos e métodos de irrigação mais eficientes e sustentáveis em relação ao consumo de água e energia. Também é

necessário obter a outorga para uso da água, um instrumento legal que regulamenta a sua captação, a derivação e construção de barragens, assim como a abertura de poços⁸. Se o agricultor constrói o sistema à revelia dessas normas, sem consulta aos órgãos públicos, ele corre o risco de ter sua obra embargada e seus equipamentos confiscados, além de estar sujeito a multas e outras penalizações.

De acordo com o Ministério da Integração Nacional (MI, 2008), diversas inovações tecnológicas foram introduzidas na irrigação brasileira nos últimos anos. Essas mudanças vêm garantindo um maior controle da aplicação de água e de fertilizantes e pesticidas, diminuindo, por um lado, a drenagem e, por outro, os perigos de contaminação. O resultado é um processo produtivo mais eficiente e ambientalmente mais vantajoso. Além disso, os novos sistemas de irrigação elevaram os rendimentos, possibilitando a maximização dos benefícios socioeconômicos.

Embora se observe a melhoria do uso da água nas parcelas com irrigação, são ainda preocupantes as perdas de água até a entrada dessas áreas. Para citar um exemplo, segundo o MI (2008), 36% da água derivada para a irrigação no país perde-se durante o processo de condução e distribuição nas infra-estruturas hidráulicas, o que provoca grande desperdício em sua utilização na agricultura.

Como se vê, apesar das novas tecnologias, modernos equipamentos e técnicos especializados, o Brasil ainda tem um longo caminho a percorrer no que se refere às questões da condução e distribuição de água bruta para irrigação e da eficiência do uso desse recurso nas lavouras irrigadas.

2.2. Breve histórico da política de irrigação no Brasil

Em comparação com as primeiras experiências mundiais, a utilização de irrigação no Brasil iniciou-se tardiamente. De acordo com o MI (2008), a experiência pioneira de irrigação no Brasil começou no Rio Grande do Sul, em 1881. Tratava-se de iniciativa privada, por meio da construção do reservatório Cadro, que tinha como objetivo garantir o suprimento de água para a lavoura irrigada de arroz. Porém, o emprego da técnica tornou-se mais intenso apenas nos últimos 40 anos, estimulado

⁸ Para mais detalhes sobre o licenciamento ambiental, consultar o Portal Nacional de Licenciamento Ambiental (disponível em: <http://www.mma.gov.br/sitio/>); sobre a outorga do uso da água, consultar a Agência Nacional de Águas (disponível em: <http://www.ana.gov.br>).

pelas plantações de arroz no Rio Grande do Sul, café em São Paulo e os pólos de fruticultura na região Nordeste.

A evolução do emprego de técnicas de irrigação no Brasil pode ser dividida em quatro etapas principais. A primeira inicia-se em meados do último quartel do século XIX e estende-se até a metade da década de 1960; a segunda abrange o período entre fins dos anos de 1960 até o final da primeira metade dos anos 1980; a terceira corresponde a um intervalo de dez anos, entre 1985 até meados da década de 1990; e, a quarta, compreende os anos a partir de 1995 até os dias atuais. Cada uma dessas etapas apresenta características peculiares que serão apresentadas a seguir, de acordo com o estudo do MI (2008).

A primeira etapa não apresentou uma estrutura de políticas ou de programas nacionais. Foi caracterizada, basicamente, por ações isoladas, direcionadas para alvos regionais, como o semi-árido Nordeste, ou setoriais, como o arroz no Rio Grande do Sul. O objetivo básico foi o combate à seca e a redução da pobreza. De acordo com Coelho Neto (2009), o Estado elegeu a agricultura irrigada como alternativa para romper com o atraso e promover o desenvolvimento regional. No entanto, não houve qualquer apoio direto às atividades produtivas, tampouco à geração de conhecimento e tecnologia, formação de recursos humanos, informação de mercado e concessão de crédito.

A etapa seguinte foi caracterizada pela implantação de programas nacionais de amplo alcance, como o Programa Plurianual de Irrigação (PPI), em 1969, e o Programa de Integração Nacional (PIN), em 1970. Houve também incentivo às ações da iniciativa privada, por meio do Programa Nacional para Aproveitamento Racional de Várzeas Irrigáveis (PROVÁRZEAS) e do Programa de Financiamento de Equipamentos de Irrigação (PROFIR). Nessa fase, ainda houve o desenvolvimento do I Plano Nacional de Irrigação, no qual foram estabelecidos os objetivos, diretrizes e metas de um variado conjunto de iniciativas nos domínios da irrigação, destinadas ao setor privado, mas cujas ações seriam coordenadas pelo setor público. Conforme Brito (1991), pode-se afirmar que houve uma mudança da orientação do Estado no que diz respeito à agricultura irrigada, já que houve o estabelecimento de metas, ampliação do conhecimento sobre os recursos disponíveis e elaboração de estudos de viabilidade técnica e econômica. Diferentemente da primeira fase, foi considerada a necessidade de

investimentos estruturais, de organização da comercialização e de estabelecimento de marcos institucionais e parâmetros para gestão dos recursos humanos.

A terceira etapa foi marcada pela definição clara do papel do governo e do setor privado na execução de programas de irrigação. A ação do Estado foi restrita ao desenvolvimento de condições para a viabilização dos projetos, com a construção de infra-estrutura (obras hidráulicas, elétricas, estradas etc.) e a realização de pesquisas e formação técnica; à iniciativa privada, couberam as demais providências para a consecução das atividades produtivas. No ano de 1986, foram instituídos o Programa Nacional de Irrigação (PRONI) e o Programa de Irrigação do Nordeste (PROINE). Definiram-se metas desafiadoras, como, por exemplo, aumentar em três milhões de hectares a área irrigada no país até o ano de 1990 (BANCO DO NORDESTE, 2001). Segundo Coelho Neto (2009), nessa época houve avanços no que se refere ao planejamento e sistematização da política de irrigação.

A partir da segunda metade dos anos 1990, a Política Nacional de Irrigação e Drenagem passou por um movimento de redirecionamento, que foi denominado de Projeto Novo Modelo da Irrigação. Conforme o MI (2008), os objetivos do projeto eram estimular o investimento privado na instalação de projetos de irrigação, redirecionar a participação do governo, dando prioridade aos papéis de indução, orientação, regulação e promoção, garantir eficiência no uso e na gestão da água e propor mecanismos para geração de informações e controle dos impactos ambientais e sociais. De acordo com Coelho Neto (2009), os diversos instrumentos de sistematização da política de irrigação formulados foram integrados aos propósitos de modernização da agricultura e redução de desigualdades regionais.

Comum a todas essas etapas foi a descontinuidade das ações governamentais e a falta de compromisso com o planejamento integrado nos níveis regional, estadual e municipal. A implantação de áreas irrigadas sempre foi marcada por altos e baixos e pelas mudanças, muitas vezes repentinas, das políticas federais para o setor. Ademais, a maior parte dos projetos sempre foi planejada pelo governo federal, sem que, ao mesmo tempo, estivessem integrados com os planos de governo estaduais e municipais e, além disso, sem qualquer consulta às populações locais (MI, 2008). Coelho Neto (2009) ressalta que a falta de articulação entre os instrumentos institucionais impediu que se alcançassem melhores resultados.

Em termos de resultados da política brasileira de irrigação, a análise do MI (2008) reconhece que alguns projetos foram eficazes e ainda estão gerando benefícios socioeconômicos. Os projetos públicos de irrigação implantados nas últimas quatro décadas despertaram o interesse da iniciativa privada, o que pode ser confirmado pela existência de diversas empresas investindo em irrigação e obtendo altas taxas de produtividade. A partir de 1996, o crescimento da área irrigada no país deveu-se, principalmente, à expansão da irrigação privada. Considerando a área irrigada àquela época, apenas cerca de 10% eram projetos públicos, sendo que os 90% restantes estavam sob a responsabilidade da iniciativa privada (ITABORAHY et al., 2004).

Todavia, o processo não está livre de críticas, uma vez que pode ser comprovado o não alcance das metas estabelecidas em muitos projetos. A principal crítica é que a ênfase sempre foi colocada nas obras, enquanto o foco sobre a geração de renda para as populações locais por meio da produção irrigada e sua integração com as cadeias produtivas sempre foi relegado a segundo plano.

2.3. Situação atual da irrigação brasileira

De acordo com o Censo Agropecuário 2006 (IBGE, 2006), 6,3% dos estabelecimentos agropecuários brasileiros utilizam algum tipo de técnica de irrigação (inundação, infiltração, aspersão, entre outras), sendo que a área irrigada corresponde a aproximadamente 4,45 milhões de hectares. A fim de comparar a evolução desse valor ao longo do tempo, a Tabela 1 apresenta os valores de área irrigada no Brasil e suas regiões geográficas apurados nos censos agropecuários, desde o de 1960 até o mais recente, de 2006.

Tabela 1 – Evolução da área irrigada no Brasil e regiões geográficas (1.000 ha)

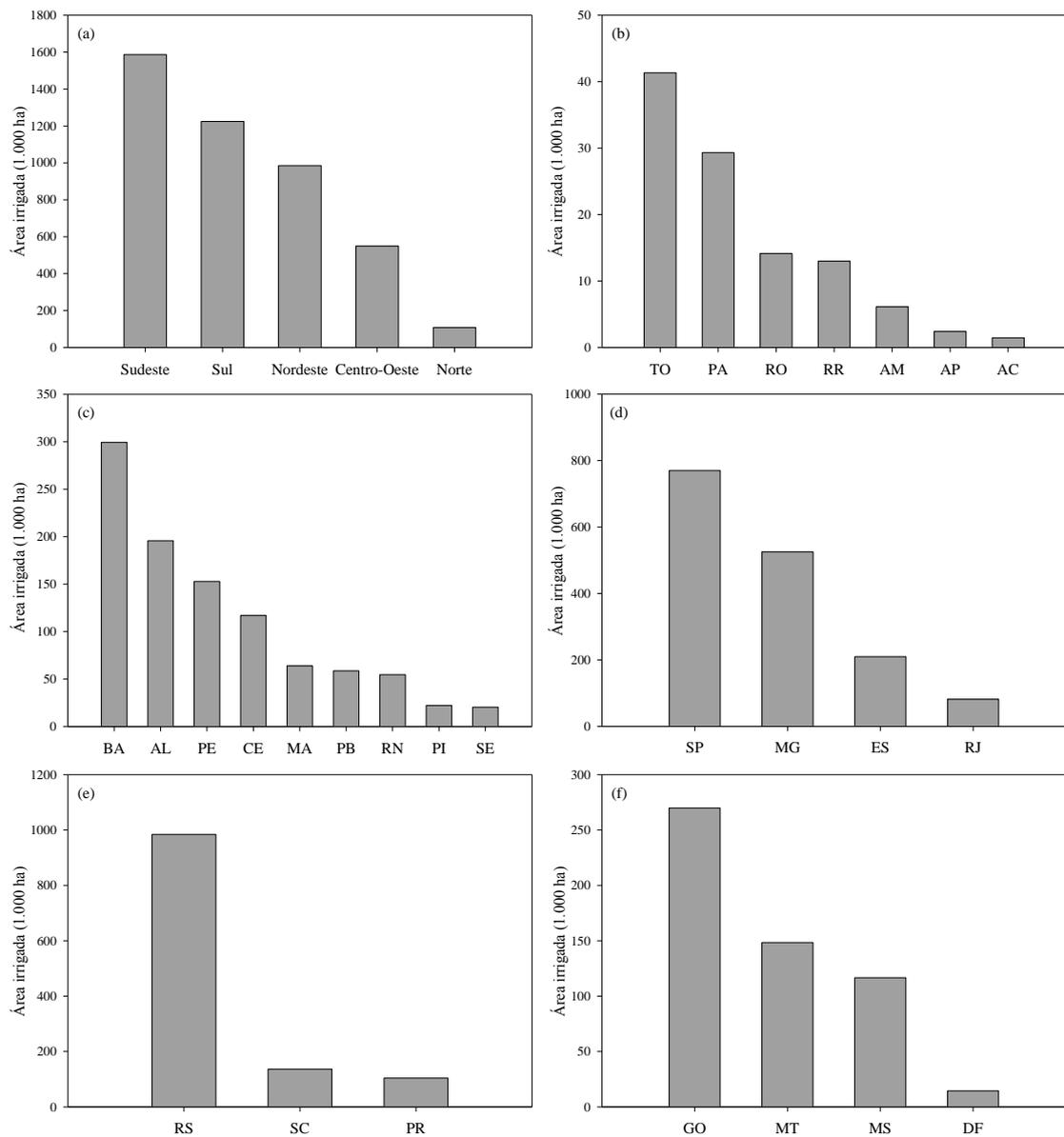
Região	Censos Agropecuários						TGC
	1960	1970	1980	1985	1996	2006	1960-2006
Norte	0,46	5,64	19,19	43,24	83,02	107,79	12,59
Nordeste	51,77	115,97	256,74	366,83	751,89	985,35	6,61
Sudeste	116,17	184,62	428,82	599,56	929,19	1.586,74	5,85
Sul	285,39	474,66	724,57	886,96	1.096,59	1.224,58	3,22
Centro-Oeste	1,64	14,36	47,22	63,22	260,95	549,47	13,47
Brasil	455,43	795,25	1.476,54	1.959,81	3.121,64	4.453,93	5,08

Nota: TCG indica Taxa Geométrica de Crescimento, em percentagem.

Fonte: IBGE (vários anos).

Pode-se observar que a área irrigada aumentou consideravelmente em todas as regiões desde a década de 1960. No país como um todo, o valor atual é dez vezes maior do que era em 1960, sendo que a taxa de crescimento foi de aproximadamente 5,1% ao ano até 2006. Ainda assim, a representatividade ainda é pequena diante das disponibilidades de terras irrigáveis e agricultáveis. Embora as regiões Centro-Oeste e Norte tenham apresentado as maiores taxas de crescimento, o fato de a maior concentração de áreas irrigadas ser verificada no Sudeste e no Sul não se modificou.

A distribuição dos totais irrigados para os diferentes estados brasileiros está apresentada na Figura 1. O Rio Grande do Sul, em função do cultivo do arroz irrigado por inundação, tem a maior área irrigada do país, com cerca de 794 mil hectares, que representa 21,9% do total nacional. São Paulo e Minas Gerais também se destacam, com 747 mil e 453 mil hectares, respectivamente (16,8% e 10,2% do total). No Nordeste, a Bahia, sobretudo em função da fruticultura irrigada, é o estado que mais pratica irrigação, ocupando a quarta posição nacional, com 287 mil hectares (6,5% do total). Os estados do Norte, principalmente em face da reduzida proporção de áreas destinadas a fins agrícolas, são os que menos utilizam agricultura irrigada. Nessa região, predominam grandes áreas destinadas à pecuária extensiva, em detrimento de cultivos agrícolas. Além disso, o excesso de chuvas em épocas específicas do ano reduz a necessidade de irrigação.



Fonte: IBGE (2006)

Figura 1 – Área irrigada (1.000 ha) nas regiões (a) e estados brasileiros do Norte (b), Nordeste (c), Sudeste (d), Sul (e) e Centro-Oeste (f).

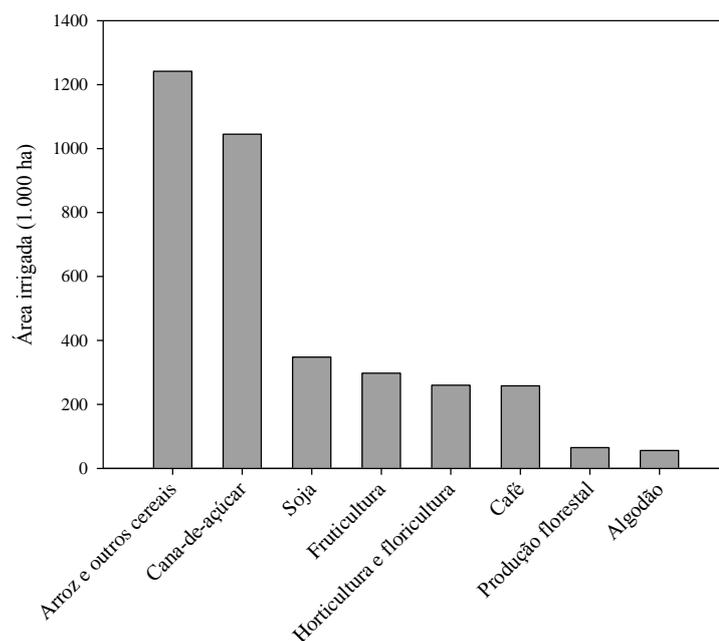
O padrão de distribuição da irrigação observado na Figura 1 tem relação, entre outros fatores, com as características climáticas das regiões. Sob essa perspectiva, as regiões podem ser caracterizadas, conforme Silva et al. (2010), da seguinte forma:

- i. *Norte*: apresenta temperaturas elevadas durante todo o ano e o regime de chuvas é bem definido (apresentando um período seco, de junho a novembro, e outro

com grande volume de precipitação, de dezembro a maio). O clima quente e úmido praticamente dispensa o uso de irrigação.

- ii. *Nordeste*: é caracterizado por altas temperaturas e distribuição irregular da precipitação, com média anual variando de menos de 250 mm a 750 mm. As condições climáticas são extremamente favoráveis à agricultura irrigada, principalmente da fruticultura, olericultura e produção de sementes. Atualmente, é crescente a utilização de sistemas de irrigação por aspersão e gotejamento, principalmente na fruticultura.
- iii. *Sudeste*: possui temperaturas elevadas no verão e amenas no inverno. Grande parte da precipitação ocorre durante o verão e o inverno é moderadamente seco. Os produtores usam a tecnologia da irrigação de forma suplementar, principalmente durante o inverno.
- iv. *Sul*: caracteriza-se por verões quentes e úmidos e invernos frios e secos e há regularidade do regime pluviométrico e uniformidade do clima. Quanto à irrigação, apresenta grandes áreas por inundações, principalmente com a cultura do arroz, em rotação com pastagens. Em anos de invernos com seca prolongada, a irrigação suplementar pode ser uma garantia para a produção.
- v. *Centro-Oeste*: a região é quente e chuvosa no verão e seca no inverno; a distribuição da precipitação no extremo oeste da região atinge até 2500 mm/ano chegando aos 1.000 mm/ano à medida que se desloca para o leste, requerendo desde irrigação suplementar até irrigação contínua, respectivamente, durante os seis meses da estação seca.

Com relação às principais culturas produzidas no setor agrícola brasileiro, pode-se observar, na Figura 2, que os cultivos de arroz e outros cereais, e de cana-de-açúcar são os que mais utilizam irrigação. O total verificado para arroz e outros cereais deve-se sobretudo ao montante de áreas cultivadas com cultivo de arroz inundado.

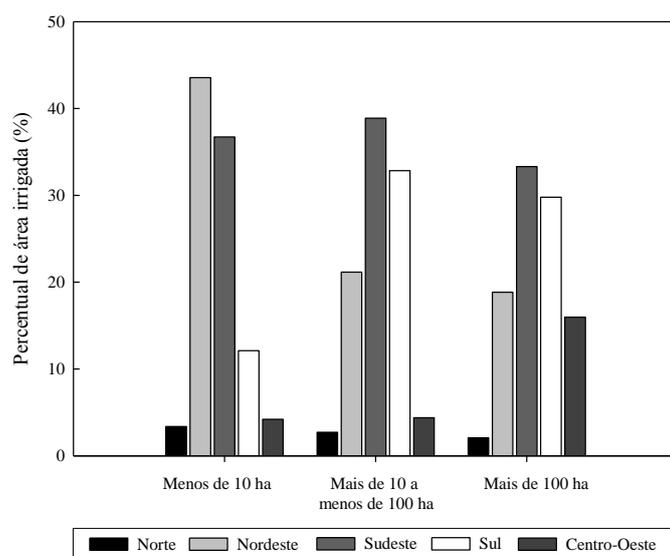


Fonte: IBGE (2006)

Figura 2 – Área irrigada das principais culturas produzidas no setor agrícola brasileiro (1.000 ha).

A produção irrigada de arroz e outros cereais ocupa, aproximadamente, 1.241.716 hectares e a de cana-de-açúcar, 1.044.936 hectares, o que corresponde a 28% e 23%, respectivamente, da área irrigada total do país. Embora com menor representatividade, a produção de soja, a fruticultura, a horticultura e floricultura e a produção de café também se destacam na utilização de irrigação, respondendo, juntas, por cerca de 26% da área irrigada nacional.

A análise da área irrigada de pequenos, médios e grandes proprietários (para essa classificação considerou-se, respectivamente, proprietários com menos de 10 hectares, com mais de 10 e menos de 100 hectares e com mais de 100 hectares), revela importantes características da distribuição regional da irrigação (Figura 3).



Fonte: IBGE (2006)

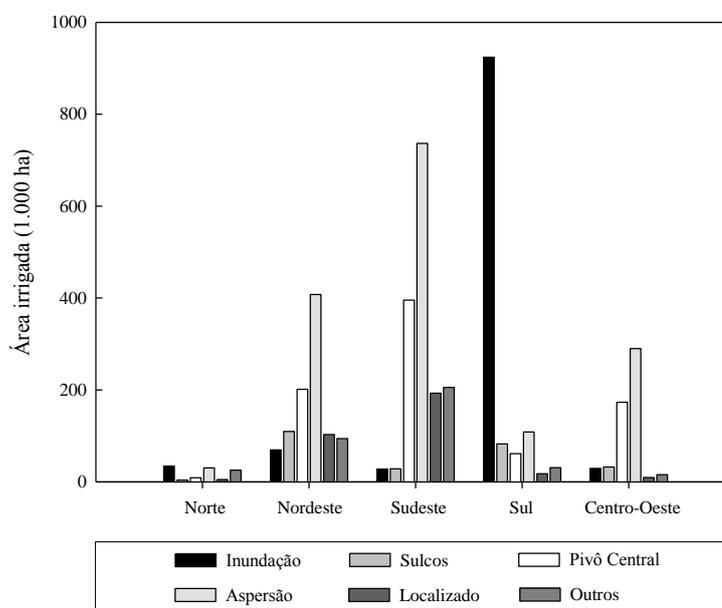
Figura 3 – Distribuição regional da área irrigada considerando o total de estabelecimentos agropecuários em cada classe de tamanho.

Ao analisar os diferentes tamanhos de propriedade, verifica-se que, entre os pequenos produtores, o maior percentual de área irrigada encontra-se no Nordeste. Considerando que, segundo o MI (2008), a maior parcela dos pequenos produtores irrigantes ainda produz com baixos níveis de rendimento e qualidade, não tendo acesso a mercados competitivos, pode-se confirmar a ineficiência dos programas direcionados ao Nordeste.

Essa realidade, entretanto, não se mantém quando se considera estabelecimentos maiores que 10 hectares, tanto para médios quanto para grandes proprietários. Para essas classes, o Sul e o Sudeste são os que mais irrigam. Nessas regiões, são desenvolvidas atividades que necessitam de irrigação, como a produção de frutas, arroz, café, entre outras. Na maior parte dos estados do Sul e do Sudeste, pratica-se agricultura comercial, muitas vezes voltada para a exportação. No caso do Centro-Oeste, a menor expressividade do uso de irrigação deve-se, em parte, ao cultivo de grandes áreas utilizando sementes geneticamente modificadas, sendo que a soja é um dos principais exemplos. Essas sementes são, muitas vezes, resistentes à falta de água, o que explica a reduzida parcela de áreas irrigadas nessa região.

No que diz respeito aos métodos de irrigação, em 35% da área irrigada brasileira são utilizados métodos de aspersão (aspersão convencional, autopropelido, rolamento

lateral, deslocamento linear etc.); inundação, em 24%; pivô central, em 18%; métodos de molhação ou regas manuais, em 8,3%; métodos localizados (gotejamento, microaspersão etc.) em 7,3%; e sulcos, em 5,7%⁹ (IBGE, 2006). A distribuição desses métodos nas diferentes regiões brasileiras pode ser vista na Figura 4.



Fonte: IBGE (2006)

Figura 4 – Distribuição da área irrigada conforme diferentes métodos nas regiões geográficas brasileiras.

Pode-se observar na Figura 4, que os métodos de aspersão predominam nas regiões Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste. A região Sudeste é a que mais utiliza o método de pivô central; como esse método exige maior investimento, era esperado que a sua utilização fosse mais expressiva na região onde os produtores têm mais condições de arcar com os elevados custos de implantação e manutenção da técnica. A inundação, por sua vez, é expressivamente utilizada no Sul, respondendo por mais de 75% da área irrigada da região. Tal observação está em consonância com o cultivo de arroz, que é predominante na região e que utiliza áreas inundadas em sua produção. Embora essa técnica de irrigação seja menos eficiente quanto à utilização racional de água, trata-se de

⁹ Deve-se ressaltar que pivô-central é um sistema do método de aspersão. Mas, como o IBGE costuma apresentar seus valores separadamente, nesta pesquisa optou-se por seguir tal desagregação. Para obter detalhes de cada uma dessas técnicas, ver Andrade (2001).

uma opção quase obrigatória pelas características de solo e de clima das áreas mais baixas do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina.

Considerando os diferentes tamanhos de propriedade, entre os pequenos proprietários prevalece a utilização de métodos mais rudimentares, como as regas manuais (com utilização de regadores, baldes, mangueiras e latões). Médios e grandes estabelecimentos, por sua vez, empregam, em geral, métodos de aspersão (pivô-central e outros).

Segundo Christofidis (2006), as áreas irrigadas nas quais se utilizam os métodos de irrigação por superfície (sulcos, faixas, inundação) têm mantido baixo crescimento no Brasil, em comparação com áreas dotadas de métodos mais eficientes no uso de água. Portanto, há indícios de melhorias nas técnicas e uso mais eficiente dos recursos hídricos. Isso poderia ser o resultado de maior utilização de assistência técnica e acesso à informação por parte dos produtores irrigantes. No entanto, esse entendimento merece ressalvas, uma vez que os dados do Censo Agropecuário 2006 (IBGE, 2006) mostram que apenas 59% da área irrigada no país foi realizada em estabelecimentos agropecuários que receberam orientação técnica permanente e não há informação sobre a qualidade do serviço.

2.4. Perspectivas futuras da irrigação

A irrigação precisa se adaptar a um mundo que passa por mudanças. Por um lado, a fase de grandes investimentos públicos em irrigação já passou. Por outro, muitos dos fatores que impulsionaram o desenvolvimento dessa técnica no passado (crescimento da população, redução da pobreza, mudanças nas preferências alimentares) continuam tendo importância. Portanto, é preciso equilibrar esses fatores com novas tendências, como por exemplo, a adaptação às mudanças climáticas globais (TURRAL et al.; 2010).

A elevação da temperatura, o mais previsível dos impactos das mudanças climáticas globais, vai aumentar a demanda hídrica das culturas e reduzir a umidade do solo mais rapidamente. Espera-se, também, que as alterações nos padrões de chuva agravem o atual déficit de precipitação em regiões secas (TURRAL et al., 2010). Esses fatores levarão ao aumento da demanda de irrigação como forma de se adaptar às alterações do clima.

Contudo, temperaturas mais elevadas terão também efeito indireto sobre a produção irrigada, uma vez que poderão levar à redução da disponibilidade hídrica. No caso do Brasil, o estudo de Margulis e Dubeux (2010) indica que algumas regiões hidrográficas¹⁰, como Nordeste Oriental, Atlântico Leste e Parnaíba, terão suas vazões reduzidas devido às mudanças climáticas.

A fim de contornar essa dificuldade, é preciso melhorar os métodos e sistemas de irrigação. Christofidis (2006) propõe a utilização de métodos apropriados ao uso racional de energia e água. Segundo o autor, para a prática sustentável da irrigação, é necessário combinar equipamentos e tecnologias que permitam melhor manejo e maior controle do uso dos recursos hídricos. Essas medidas, somadas a aumentos de produtividade, podem, inclusive, resultar em redução das demandas de água.

Para que tais transformações se efetivem, são necessários grandes investimentos em expansão e modernização dos sistemas de irrigação e de seu manejo. Futuros investimentos privados devem ser mais estratégicos e, diferentemente do passado, mais alinhados com políticas agrícolas. Para estimular o investimento privado, de acordo com o MI (2008), é preciso desenvolver políticas de longo prazo, que garantam possibilidades concretas de negócios. É importante ainda que tais políticas sejam estáveis e passíveis de mudança somente mediante a avaliação continuada dos resultados.

De modo geral, pode-se afirmar que, em longo prazo, a irrigação continuará tendo papel importante na provisão global de alimentos. Também é fato que, diante de maiores necessidades de água para a agricultura e os demais usos consumptivos, haverá pressões para aumentar a sua produtividade. Ao mesmo tempo, o preço da água tenderá a ser crescente. No entanto, ainda existem muitas incertezas no que diz respeito às mudanças globais que podem ter efeito sobre a prática de irrigação, notadamente as alterações climáticas. Sendo assim, estabelecer prognósticos precisos sobre a evolução da irrigação ao longo dos anos ainda é uma tarefa extremamente complexa e que exige análises mais elaboradas.

¹⁰ O Brasil é dividido em 12 regiões hidrográficas definidas segundo o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). Essas regiões hidrográficas são: Amazônica, Tocantins-Araguaia, Atlântico Nordeste Ocidental, Parnaíba, Atlântico Nordeste Oriental, São Francisco, Atlântico Leste, Atlântico Sudeste, Paraná, Paraguai, Uruguai, Atlântico Sul.

3. REVISAO DE LITERATURA

De acordo com Hanemann (2008), a maior parte dos estudos socioeconômicos que tratam das mudanças climáticas procura explicar qual é o custo associado a esse fenômeno, considerando os diferentes cenários propostos para o futuro. Tratando especificamente do setor agrícola, a literatura é vasta, diversificada e, em geral, apresenta resultados muito distintos. Essas diferenças se devem, principalmente, aos métodos alternativos de análise, às condições climáticas tomadas como base, às previsões de crescimento econômico e aos cenários climáticos considerados. Alguns estudos incluem adaptação, fertilização por carbono¹¹ e, ou, adoção de mudanças técnicas, ao passo que outros ignoram todos esses fatores; alguns consideram cenários climáticos antigos, muito pessimistas ou otimistas demais e são calibrados para espaços territoriais pequenos e bem definidos ou para vastos territórios (MENDELSON, 2000). Por essa razão, qualquer tentativa de síntese desses estudos seria incompleta.

Não obstante, em termos dos objetivos deste estudo, é possível organizar essa literatura em duas abordagens principais. Uma delas procura entender o impacto sobre o setor agrícola, desconsiderando, ou apenas incluindo implicitamente, as estratégias adaptativas, ao passo que a outra modela explicitamente a adaptação, analisando seu

¹¹ Evidências sugerem que muitas espécies vegetais cultivadas poderão responder positivamente ao aumento da concentração de CO₂ na atmosfera, na ausência de outras condições de estresse (LONG et al., 2004). Entretanto, os efeitos benéficos da elevação da concentração de CO₂ na atmosfera podem ser compensados por outros efeitos das mudanças climáticas, tais como o aumento da temperatura e alterações nos padrões de precipitação (EASTERLING et al., 2007).

potencial de mitigar os efeitos negativos das mudanças climáticas. Nessa seção serão apresentados e discutidos os aspectos principais dessas diferentes metodologias.

3.1. Modelos tradicionais

A metodologia pioneira nas análises de impactos das mudanças climáticas sobre o setor agrícola é conhecida como modelo agroeconômico ou abordagem da função de produção. O modelo é baseado em experimentos controlados que estimam a produtividade de cada cultura sob diferentes cenários climáticos futuros. Não é permitido nenhuma alteração nos métodos de cultivo ou quaisquer outros fatores que possam influenciar a produtividade. Assim, todas as alterações podem ser atribuídas às variáveis de interesse, ou seja, temperatura, precipitação ou níveis de CO₂ na atmosfera, possibilitando estimativas não viesadas. As mudanças na produtividade são então utilizadas em modelos econômicos que estimam produção e preços (MENDELSON, 2000). Essa modelagem teve ampla aplicação para a agricultura americana, sendo que alguns estudos seminais foram os de Adams et al. (1989, 1990, 1995 e 1998). No Brasil, pode-se citar os estudos de Siqueira et al. (1994) e Nobre et al. (2005) e Embrapa (2008).

Siqueira et al. (1994) simularam o impacto do efeito estufa sobre a produção brasileira de trigo, milho e soja. Os resultados indicaram redução no ciclo e na produção de trigo e milho, sendo a soja menos afetada devido ao efeito benéfico da maior concentração de CO₂ (fertilização por carbono). As regiões Nordeste e Centro-Oeste foram identificadas como as mais vulneráveis.

As estimativas de Nobre et al. (2005) indicam que, com aumento de 1°C na temperatura, haveria redução das áreas de cultivo do café nos estados de Minas Gerais, Paraná e São Paulo, cujo impacto poderia chegar à diminuição de quatro milhões de sacas/ano. Diferentemente de Siqueira et al. (1994), os autores estimaram que o maior impacto relativo devido ao aumento de temperatura seria para a soja, com redução de até 60% na área de plantio potencial.

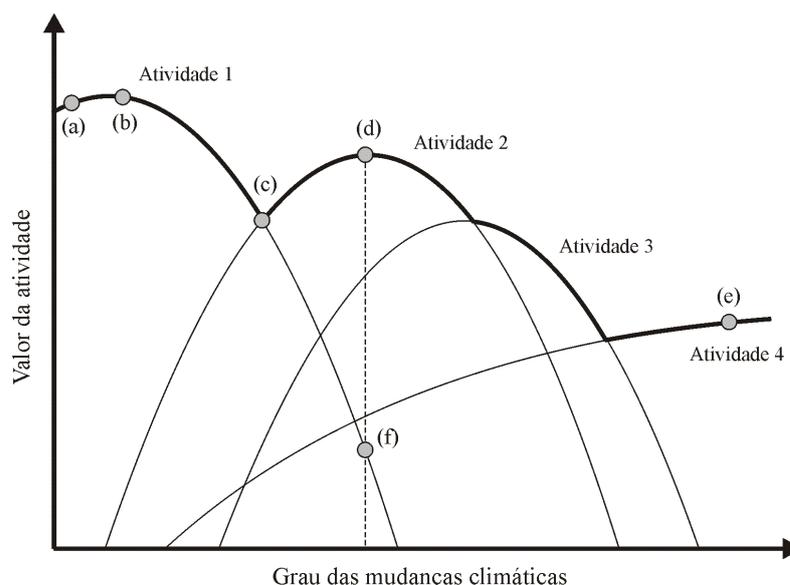
As projeções do estudo da Embrapa (2008) são bastante pessimistas e indicam que o aquecimento global pode provocar perdas nas safras de grãos de R\$ 7,4 bilhões em 2020 e de até R\$ 14 bilhões em 2070. De acordo com o estudo, a soja deverá ser a cultura mais afetada, com perdas que podem chegar a 40%; o café arábica poderá perder

até 33% da área de baixo risco em São Paulo e Minas Gerais, embora possa haver um aumento de produção no Sul do país; milho, arroz, feijão, algodão e girassol sofrerão perdas significativas da produção, principalmente no Nordeste; por fim, a produção de cana-de-açúcar será beneficiada, podendo até mesmo dobrar.

Em geral, as estimativas baseadas em funções de produção não levam em conta as possibilidades de adaptação aos efeitos da mudança climática. A principal consequência de não considerar as estratégias adaptativas é a superestimação dos impactos das mudanças do clima sobre o setor agrícola. Contudo, alguns esforços para corrigir essa limitação foram feitos e estão relacionados com a simulação de métodos alternativos de cultivo, mudança nas culturas, nas épocas de plantio e colheita, entre outros, como nos estudos de Kaiser et al. (1993) e Easterling et al. (1993), ou com a inclusão de livre mobilidade do insumo trabalho ao estimar a função de produção, como em Assunção e Chein (2008). Infelizmente, essas alternativas não consideram importantes fatores relacionados às decisões de produtores, como por exemplo, limitações de capital.

Procurando corrigir a sobreestimação característica dos resultados baseados na abordagem da função de produção, Mendelsohn et al. (1994) desenvolveram a metodologia que ficou conhecida como modelo Ricardiano¹² (ou hedônico). De acordo com os autores, o objetivo é estimar como o clima, em diferentes localidades, afeta os ganhos dos produtores. O modelo incorpora a adaptação indiretamente, considerando que os produtores utilizarão suas terras sempre do modo mais lucrativo, levando em conta as condições econômicas e climáticas. Assume-se que, para maximizar seus lucros, os agricultores tomam as variáveis climáticas como dadas e ajustam seus insumos e a forma de exploração da terra. Portanto, para cada cenário climático haverá um tipo específico de organização da produção; na medida em que o clima se modifica, o produtor também altera suas atividades. A representação do modelo pode ser vista na Figura 5.

¹² A metodologia recebeu esse nome pois é baseada nas observações de David Ricardo, segundo o qual o valor da terra seria o reflexo de sua produtividade (sob competição perfeita).



Fonte: Adaptado de Mendelsohn et al. (1994)

Figura 5 – Representação do modelo hedônico.

A Figura 5 apresenta as funções de produção estimadas para quatro atividades agrícolas diferentes. Assume-se que cada uma dessas funções represente adequadamente o comportamento do valor econômico da atividade, considerando o grau das mudanças climáticas. No caso da *Atividade 1*, seu valor aumenta a partir de baixa intensidade da mudança climática até atingir o valor máximo no ponto (b), decrescendo a partir de então. Segundo Mendelsohn et al. (1994), o produtor perceberá a redução de seus ganhos e, hipoteticamente, a partir do ponto (c) passará a praticar outra atividade, possibilitando que seus lucros voltem a crescer. Note que no ponto (d) o agricultor obtém lucro máximo com a *Atividade 2*. No entanto, a abordagem da função de produção não consideraria essa mudança e, conseqüentemente, estimaria que os ganhos seriam dados pelo ponto (f). Esse raciocínio permite compreender como o modelo de Mendelsohn et al. (1994) corrige o viés causado pela análise baseada em funções de produção. Em outras palavras, o modelo hedônico parte da pressuposição de que sempre que as alterações no clima tornem os ganhos decrescentes, o produtor racional procurará se adaptar, alterando suas técnicas ou praticando outras formas de exploração agrícola.

Para considerar a dinâmica descrita pela Figura 5, no modelo de Mendelsohn et al. (1994) analisa-se como a mudança climática afeta o valor da terra dos produtores, ao invés de estimar a produtividade de culturas específicas. Para isso, pressupõe-se que, sob mercados competitivos, o valor da terra será igual à receita líquida do seu melhor uso, já que os produtores são racionais e sempre praticarão a atividade mais lucrativa.

Ao considerar o preço da terra, o modelo estima diretamente os impactos do clima sobre a produtividade de diferentes culturas e, indiretamente, a substituição de insumos e a introdução de diferentes técnicas produtivas e outras potenciais adaptações. Se os mercados de terra funcionarem adequadamente, o modelo Ricardiano permitirá medir o impacto das mudanças climáticas sobre o valor econômico de diferentes atividades.

Empiricamente, no modelo Ricardiano estima-se uma regressão do valor da terra em função de variáveis climáticas, socioeconômicas e agronômicas:

$$y_{it} = X_{it}\beta + \sum_j \theta_j f_j(\bar{W}_{ij}) + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

em que y_{it} refere-se ao valor da terra em cada localidade i no período t ; X_{it} é um vetor de determinantes observáveis do valor da terra, como por exemplo o tipo e a qualidade do solo (o subscrito t indica que alguns podem variar ao longo do tempo); \bar{W}_{ij} representa as diversas variáveis climáticas j para cada localidade i (no modelo original, médias de temperatura e precipitação); f indica a forma funcional para as variáveis climáticas (a maior parte da literatura utiliza termos lineares e quadráticos); ε_{it} é o termo de erro estocástico, formado por um componente permanente e específico de cada localidade, α_i , e um componente transitório, que varia ao longo do tempo, u_{it} (ou seja, $\varepsilon_{it} = \alpha_i + u_{it}$); e β e θ são os coeficientes que serão estimados. As estimativas de θ são utilizadas para simular o impacto do clima futuro sobre o valor da terra (DESCHÊNES; GREENSTONE, 2007).

Após o estudo pioneiro de Mendelsohn et al. (1994), diversos autores vêm utilizando o modelo Ricardiano, fazendo com que este seja, até então, o método mais empregado na literatura. Segundo Nordhaus e Boyer (2000), essa metodologia fez com que a análise de impactos das mudanças climáticas sobre o setor agrícola se tornasse menos pessimista. Contudo, os resultados para uma mesma região nem sempre são compatíveis. Para os Estados Unidos, por exemplo, Mendelsohn et al. (1994) sugerem impactos significativamente baixos ou até mesmo benefícios para a agricultura, ao passo que Schlenker et al. (2005), Schlenker et al. (2006), Schlenker e Roberts (2008) e Fisher et al. (2009) concluem que o setor terá sérios prejuízos.

Nas análises da agricultura brasileira, alguns exemplos de utilização do modelo hedônico são os estudos de Sanghi et al. (1997), Ávila et al. (2006) e Féres et al. (2008) e Speranza e Féres (2010). Sanghi et al. (1997) analisaram os impactos da mudança

climática sobre a produção agrícola nacional utilizando dados dos censos agropecuários de 1970, 1975, 1980 e 1985 e baseando-se em previsões de aumento de 2,5°C na temperatura e de 7% na precipitação. O resultado principal do estudo foi um impacto líquido negativo, ainda que tenham sido identificadas diferenças sazonais e regionais: as temperaturas de dezembro causariam os piores impactos e os maiores prejuízos seriam para o Centro-Oeste, em contraste com os possíveis benefícios para a região Sul.

O estudo de Ávila et al. (2006) se concentrou no impacto sobre o valor da terra, distinguindo entre pequenos e grandes produtores. Quando consideraram um cenário climático menos pessimista, caracterizado por aumento de 2°C na temperatura e maior precipitação, seus resultados indicaram que em 2020 haveria um impacto positivo, mas que provavelmente seria revertido em 2060 e 2100. No entanto, caso haja 5°C de aumento na temperatura e redução na precipitação, em 2100 as perdas poderiam variar entre 9% e 31%, para pequenos produtores, e 47% a 80% para os grandes.

Os resultados de Féres et al. (2008) indicaram que o valor da terra poderá decrescer cerca de 21% no período de 2040 a 2069 e até 42% entre 2070 e 2099. Segundo os autores, a magnitude das perdas estimadas pode ter sido superestimada pois o modelo hedônico teve como base os anos de 1970 a 1985. Dessa forma, não foi captado o progresso tecnológico pelo qual o setor agrícola nacional passou após meados da década de 1980.

Speranza e Féres (2010) estimaram o modelo Ricardiano para diferentes tamanhos de propriedade (pequenos, médios e grandes produtores) considerando sua localização ao longo dos biomas brasileiros (caatinga, cerrado, mata atlântica etc.). As estimativas para o país como um todo indicaram perdas que podem variar de 10% a 14% para cenários de mudança climática compreendidos entre 2010 e 2099. Os maiores impactos negativos identificados foram mais elevados para os pequenos produtores. Considerando que, entre as diferentes classes de tamanho de propriedade consideradas, esta é a que contém o maior número de estabelecimentos agrícolas, os autores concluíram que o país poderá ter sérios prejuízos.

Apesar da larga utilização do modelo Ricardiano, é preciso destacar suas limitações. Por se tratar de uma análise de equilíbrio parcial, na qual os preços são mantidos fixos, ignora a potencial perda de bem-estar devido à redução no excedente do consumidor que resultaria, por exemplo, de uma queda na oferta. Também não considera que os preços dos insumos se modificarão, o que pode aumentar os efeitos

negativos das alterações no clima (CLINE, 1996). Além disso, o modelo assume que o produtor irá alterar suas técnicas e, ou, culturas produzidas, mas ignora o processo de substituição, desconsiderando a existência de custos nesse processo. Por fim, dado que é um modelo *cross-section*, não é possível considerar os possíveis efeitos benéficos da fertilização por carbono. Esses aspectos negativos da metodologia tendem a subestimar os efeitos da mudança climática.

Em termos da estimação econométrica, Deschênes e Greenstone (2007) apresentam outra limitação do modelo Ricardiano. Os autores questionam a robustez das estimativas afirmando que características específicas de cada localidade (ou qualquer outra variável), que não se modificam ao longo do tempo e que afetam os valores da terra, são variáveis omitidas na estimação. Dessa forma, pode haver correlação com as variáveis climáticas, tornando os coeficientes do modelo viesados. Em termos econométricos, os autores estão enfatizando que a estimação consistente de θ requer que seja satisfeita a condição de ortogonalidade para cada variável climática, ou seja, $E[f_j(\bar{W}_{ij})\varepsilon_{it} | X_{it}] = 0$. Entretanto, essa condição não será válida se existirem fatores permanentes (α_i) e, ou, transitórios (u_{it}) que sejam correlacionados com as variáveis climáticas.

Para eliminar o viés de variável omitida, Deschênes e Greenstone (2007) propõem um modelo de dados em painel com efeitos fixos, que permite controlar as especificidades de cada localidade. Para que essa abordagem seja implementada não é possível usar variáveis climáticas semelhantes às utilizadas no modelo Ricardiano, dado que elas são fixas ao longo do horizonte temporal do painel e, assim, perfeitamente colineares com os efeitos fixos de cada localidade. Por essa razão, deve-se usar dados anuais de tempo (temperatura e precipitação). A variável dependente usada é o lucro anual (receita com as vendas menos os custos de produção). Para justificar a inclusão de lucros agrícolas, ao invés de valores da terra, pressupõe-se que, como as variações climáticas afetam as receitas e os custos dos produtores, isso será refletido nos lucros. Portanto, é medido o efeito de variações de temperatura e precipitação sobre os lucros de curto prazo, ao invés do efeito de variações climáticas sobre os valores de longo prazo da terra. Os choques climáticos são modelados como desvios em relação à média histórica das variáveis de temperatura e precipitação.

A equação 2 representa a especificação econométrica do modelo de Deschênes e Greenstone (2007):

$$y_{it} = \alpha_i + \gamma_t + X_{it}'\beta + \sum_j \theta_j f_j(W_{ij}) + u_{it} \quad (2)$$

em que y_{it} se refere aos lucros agrícolas, em cada localidade i no período t ; X_{it} é um vetor de determinantes observáveis dos lucros agrícolas, alguns dos quais variam no tempo; α_i capta os fatores específicos de cada localidade, que não variam com o tempo, e que afetam y_{it} ; γ_t controla as diferenças anuais em y_{it} que são comuns a todas as localidades (supõe-se que essas *dummies* temporais incorporam determinantes da lucratividade agrícola, como progresso tecnológico, por exemplo); W_{ij} representa realizações anuais das variáveis climáticas (temperatura e precipitação); e u_{it} é o termo de erro estocástico.

A validade das inferências a respeito do impacto das mudanças climáticas no setor agrícola, baseadas nesse modelo, depende de que sejam obtidas estimativas não viesadas do vetor θ . Assim como no modelo Ricardiano, isso requer que seja válida a condição de ortogonalidade, que nesse caso será $E[f_i(W_{ij})u_{it} | X_{it}, \alpha_i, \gamma_t] = 0$. Para garantir a condição de ortogonalidade, todas as variáveis climáticas W_{ij} são introduzidas como desvios em relação às suas médias (desvios da temperatura e precipitação observados em determinado ano em relação às suas médias históricas). Dessa forma, supõe-se que as variáveis de clima não serão correlacionadas com os determinantes não observados da lucratividade agrícola que fazem parte de u_{it} , o que é uma possível solução ao problema de viés de variável omitida apresentado pela abordagem hedônica¹³.

Os resultados de Deschênes e Greenstone (2007) indicam que, nos EUA, as mudanças no clima tendem a aumentar os lucros agrícolas anuais em cerca de US\$ 1,3 bilhão (em dólares de 2002) ou em 4% no fim do século XXI. Segundo os autores, embora o efeito seja pequeno, há considerável heterogeneidade entre os estados americanos, sendo que alguns têm ganhos e outros perdas expressivas. Esses resultados, no entanto, foram questionados por Fisher et al. (2009), que identificaram erros nas

¹³ Segundo Féres et al. (2009), os desvios não podem ser antecipados pelos produtores, e, dessa forma, são supostamente ortogonais aos determinantes não observáveis dos lucros agrícolas.

estimativas e, após corrigi-las, concluíram que a agricultura norte-americana sofrerá fortes impactos negativos¹⁴.

Féres et al. (2008) utilizaram o modelo de Deschênes e Greenstone (2007) para os avaliar efeitos da mudança climática sobre a produção agrícola brasileira. Os autores consideraram como variável dependente os lucros do setor, reportados nos censos agropecuários de 1970, 1975, 1980, 1985 e 1995/96. Os resultados do estudo indicaram que, a médio prazo (período de 2040 a 2069), mesmo considerando um cenário pessimista, haveria perda líquida de apenas 3,7% para a agricultura do país. No entanto, quando se considera o longo prazo (2070 a 2099), as perdas seriam substanciais e poderiam chegar a 26%. Suas simulações sugerem ainda que os efeitos seriam diferenciados quando se considera as regiões do Brasil; o Norte e o Centro-Oeste sofreriam as maiores perdas, mas o Sudeste e o Sul teriam ganhos em termos de aumento da lucratividade.

Mesmo oferecendo vantagens econométricas em relação à abordagem hedônica, a metodologia de Deschênes e Greenstone (2007) apresenta algumas limitações. De modo similar às funções de produção discutidas acima, o modelo não permite a inclusão de estratégias adaptativas em resposta às variações no clima. O conceito de lucro também é problemático. Conforme Fisher et al. (2009), ao considerar como lucro o valor das receitas líquidas, deixa-se de levar em conta a possível existência de estoques. Em anos de alta produtividade, os produtores podem acumular estoques que, posteriormente, serão desfeitos quando as condições de produção forem ruins. Os estoques são uma forma de reduzir prejuízos relacionados, por exemplo, a variações climáticas e, portanto, criam uma desconexão entre a medida de lucro utilizada e o impacto da mudança no clima.

Todavia, a principal limitação do modelo de efeitos fixos está relacionada à modelagem do choque climático como um desvio em relação à média históricas das variáveis de temperatura e precipitação. Segundo Fisher et al. (2009), esse é um choque temporário, relativo às condições do tempo para um período particular, ao passo que mudança climática é um fenômeno de longo prazo. Dessa forma, os parâmetros estimados podem não refletir as respostas do setor agrícola aos efeitos permanentes das alterações futuras do clima global.

¹⁴ Os erros se referem à especificação e cálculo das variáveis climáticas. Para fazer as simulações de impacto, Fischer et al. (2009) utilizaram o modelo climático Hadley III, que é menos otimista que o Hadley II (usado por Deschênes e Greenstone, 2007).

Após a apresentação da abordagem da função de produção, do modelo Ricardiano de Mendelsohn et al. (1994) e do método de efeitos fixos de Deschênes e Greenstone (2007), é possível perceber a evolução das metodologias que visam estimar o efeito das mudanças climáticas sobre o setor agrícola. Tais modelos abriram caminho para o desenvolvimento de estudos que consideram as ações que os produtores podem empreender para se adaptar, modelando a adaptação explicitamente como variável de controle.

3.2. Modelos com adaptação

Uma das formas de considerar adaptação é por meio da análise da influência da mudança climática nos padrões de uso da terra. Trata-se de analisar, explicitamente, como o clima influencia o processo de mudança de uma atividade para outra, descrito na Figura 5. A análise foi desenvolvida inicialmente por Evenson e Alves (1998) e, posteriormente, aprimorada por Anderson e Reis (2007) e Féres et al. (2009). O modelo é derivado do problema de maximização de lucro do produtor rural, que decide a alocação de suas terras entre alternativos tipos de uso, como pastagens, agricultura temporária ou permanente, florestas etc. Segundo Féres et al. (2009), a partir dos preços dos produtos, do custo dos insumos e das características agrônômicas e climáticas, o produtor escolherá a quantidade de área a ser destinada a cada uso procurando maximizar seu lucro total, respeitando a restrição de que a soma das áreas alocadas para cada atividade não ultrapasse a área total de sua propriedade:

$$\text{Max}_{n_1, n_2, \dots, n_m} \left(\sum_{i=1}^m \Pi_i(P_{qi}, P_{xi}, n_i, X) : \sum_{i=1}^m n_i = N \right) \quad (3)$$

em que o índice i é o tipo de atividade desenvolvida; m é o número total de usos da terra; n_i refere-se à área alocada para o uso i ; Π_i representa o lucro obtido com a atividade i ; P_{qi} é o preço do produto relativo à atividade i ; P_{xi} é o vetor de preços dos insumos; X é o vetor de variáveis que influenciam a lucratividade; e N é a área total do estabelecimento agrícola.

Evenson e Alves (1998), Anderson e Reis (2007) e de Féres et al. (2009) analisaram as mudanças no padrão de uso da terra nos estabelecimentos agrícolas brasileiros, considerando lavouras, pastagens e floresta. A conclusão comum aos três

estudos foi que as mudanças climáticas potencialmente levarão ao aumento da utilização do solo para agricultura e pastagens, em detrimento da área de floresta (natural ou plantada). Uma importante implicação disso é que o processo de adaptação às alterações no clima no Brasil se dará com base em aumento do desmatamento, um dos principais responsáveis pelas emissões de CO₂, contribuindo, portanto, para o agravamento do aquecimento global.

Outra metodologia que procura incluir medidas adaptativas é o modelo Ricardiano estrutural. De acordo com Seo e Mendelsohn (2008c), diferentemente da abordagem tradicional de Mendelsohn et al. (1994), que faz referência à adaptação apenas indiretamente, o modelo estrutural a considera explicitamente e quantifica sua influência sobre os impactos das mudanças climáticas no setor agrícola. Em outras palavras, no modelo estrutural, o agente faz uma escolha entre múltiplas alternativas de adaptação no primeiro estágio e maximiza seu lucro no segundo estágio, condicional à seleção inicial. Estima-se, dessa forma, não apenas o efeito do clima sobre o desempenho dos produtores, mas também sua influência na opção por determinada medida adaptativa¹⁵.

Há diversas versões do modelo Ricardiano estrutural, sendo que a decisão da medida adaptativa pode ser caracterizada por um processo binário ou múltiplo. Essa metodologia já foi utilizada para analisar a escolha de cultivos alternativos, pecuária e uso de irrigação e tem sido implementada, em grande parte, no estudo de países em desenvolvimento da África e do continente americano (KURUKULASURIYA; MENDELSON, 2007 e 2008; MENDELSON; SEO, 2007; SEO; MENDELSON, 2008c; SEO, 2010 e 2011). Os resultados de alguns estudos realizados para a América Latina serão apresentados a seguir¹⁶.

Mendelsohn e Seo (2007) analisaram se os produtores, em face de diferentes cenários climáticos, tendem a escolher distintas formas de exploração agrícola. Foram considerados cinco tipos de organização da produção: agricultura de sequeiro, agricultura irrigada, pecuária, ou combinações de pecuária e agricultura (de sequeiro e irrigada). O estudo conclui que todos os tipos de produtores irão sofrer prejuízos devido às mudanças esperadas no clima, mas a agricultura de sequeiro será a mais prejudicada.

¹⁵ A derivação formal do modelo Ricardiano estrutural será feita na seção relativa ao Referencial Teórico.

¹⁶ Todos os estudos referentes à América Latina descritos nessa seção foram desenvolvidos utilizando a mesma base de dados. A amostra contém dados da Argentina, Brasil, Chile, Colômbia, Equador, Uruguai e Venezuela.

A análise desenvolvida por Seo (2010) considerou a possibilidade de escolher entre agricultura, pecuária ou combinação de ambas. Seus resultados mostraram que em regiões mais quentes há predominância de sistemas mistos. Num cenário climático mais seco e com maiores temperaturas, o valor da terra dos três sistemas tende a decrescer, mas os produtores que combinam agricultura e pecuária serão menos afetados. A principal conclusão do estudo é que, na ausência de adaptação, os impactos das mudanças climáticas tendem a ser mais severos.

Diferentemente dos estudos anteriores, o foco do trabalho de Seo (2011) foi a utilização de esquemas de irrigação públicos e privados como medida adaptativa. O autor analisou a influência do clima na escolha de cada tipo de esquema no primeiro estágio e, posteriormente, no valor da terra. De acordo com os resultados apresentados, a irrigação privada ocorre em resposta a aumentos de temperatura, ao passo que os esquemas públicos são desenvolvidos devido à escassez de água. Tanto a produção irrigada quanto a produção de sequeiro irão sofrer prejuízos com as mudanças climáticas, no entanto, espera-se menos efeitos adversos para a primeira.

De modo geral, pode-se inferir que produtores adaptados, seja pela prática de mais de um tipo de exploração agrícola, pelo uso de irrigação ou de sementes geneticamente melhoradas etc., serão menos prejudicados pelas mudanças climáticas. Essa conclusão empírica confirma que estudos que não levam em conta as estratégias adaptativas tendem a superestimar os impactos adversos das mudanças climáticas. Além disso, sob outra perspectiva, desconsiderar a adaptação corresponde a subestimar a capacidade de percepção e tomada de decisões dos agricultores. Ainda que persistam muitas incertezas a respeito da magnitude do fenômeno, há cada vez mais consenso de que as mudanças climáticas são reais e podem causar severos impactos negativos no setor agrícola. Assim, para tornar as análises mais realistas, é fundamental desenvolver modelos que considerem explicitamente a adaptação.

3.3. Questões relativas à irrigação

Deve-se ressaltar que questões relacionadas especificamente ao uso de irrigação como estratégia adaptativa têm sido analisadas na literatura internacional desde o clássico trabalho de Mendelsohn et al. (1994). Todavia, diversos autores

(KAUFMANN, 1994; CLINE, 1996; DARWIN, 1999; QUIGGIN; HOROWITZ, 1999) consideraram seus resultados viesados devido ao tratamento inadequado da irrigação.

A razão das críticas é que, no estudo de Mendelsohn et al. (1994), o impacto da mudança climática sobre o setor agrícola é estimado baseando-se na pressuposição de que a(s) variável(is) referente(s) à precipitação representa(m) a oferta total de água para as culturas que são produzidas nos estabelecimentos (SCHLENKER et al., 2005). Entretanto, essa afirmação somente é verdadeira para as áreas nas quais a precipitação ocorre imediatamente antes do plantio/semeadura e durante o período de crescimento das plantas. Segundo Coelho et al. (2006), em regiões nas quais há longos períodos de pouca precipitação, ou naquelas que, embora tenham bons regimes hídricos durante o ano, estão sujeitas a períodos de deficiência hídrica (veranicos), a situação é bastante diferente, pois o volume de água da chuva, em geral, é insuficiente para as necessidades hídricas das plantas e, dessa forma, se faz necessário o uso de sistemas de irrigação.

Nas localidades em que se realiza a agricultura irrigada, a precipitação é uma medida incorreta da oferta de água. Pode-se afirmar ainda que, em estabelecimentos com cultivo de sequeiro, a água é um insumo fixo, dado que sua fonte é a precipitação; já nas áreas irrigadas, a água é um insumo variável que pode, inclusive, ter preço (SCHLENKER et al., 2005)¹⁷.

Procurando corrigir essa limitação do modelo de Mendelsohn et al. (1994), Schlenker et al. (2005) e Kurukulasuriya et al. (2006) incluíram a irrigação na análise dos impactos da mudança climática por meio da estimação de impactos para áreas irrigadas e de sequeiro separadamente. Todavia, esse ainda é um tratamento inadequado, pois, segundo Kurukulasuriya e Mendelsohn (2007), deixa-se de considerar que quando o clima muda, a decisão de irrigar certamente também será alterada.

Portanto, o tratamento apropriado da irrigação deve considerar que a decisão de irrigar é uma escolha condicionada pelas condições econômicas do produtor, disponibilidade de recursos hídricos, tipos de solo, tipo de cultura e, também, pelas variações climáticas. O modelo desenvolvido no presente estudo procurou tratar essas especificidades.

¹⁷ No Brasil, a Lei Federal no 9.433, de 1997, definiu a cobrança pelo uso da água como um dos instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos. No entanto, as experiências de cobrança no país são ainda bastante restritas, podendo-se citar o caso das bacias do Paraíba do Sul, Piracicaba, Capivari e Jundiá.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

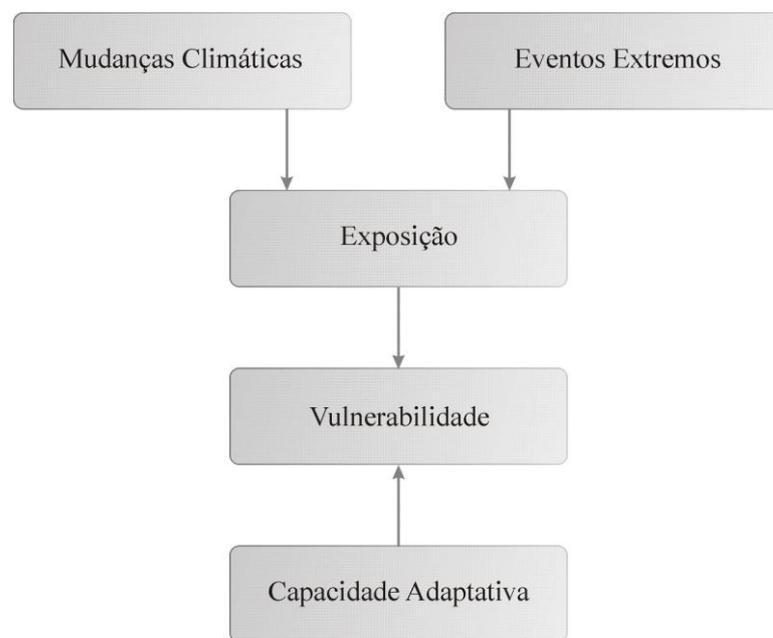
O termo mudança climática, conforme definido pela Convenção das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC, 2009), refere-se a qualquer alteração no clima consequente, direta ou indiretamente, da atividade humana, modificando a composição da atmosfera global, e que seja adicional à variabilidade climática natural observada em períodos de tempo comparáveis. Por sua vez, o IPCC (2007), define mudança climática como qualquer mudança no clima ocorrida ao longo do tempo, devido à variabilidade natural ou em decorrente da atividade humana.

Independentemente de qual definição seja considerada, pode-se afirmar a mudança climática é um fenômeno permanente, distinto das alterações que ocorrem nas condições do tempo no dia-a-dia. Segundo Fisher et al. (2009), tempo é o que ocorre num momento particular, sendo essencialmente de curto prazo, como temperatura e precipitação (realizações diárias, mensais, anuais etc.). Clima, por sua vez, é o padrão de longo prazo do tempo. Para cientistas climáticos, portanto, mudança climática é um fenômeno de longo prazo.

O grau ao qual um sistema econômico é suscetível aos efeitos adversos da mudança climática (incluindo a variabilidade do clima e os eventos extremos), é chamado de vulnerabilidade. O nível de vulnerabilidade das diferentes regiões, setores econômicos e grupos sociais é determinado por fatores ambientais e socioeconômicos. Estes incluem o nível de desenvolvimento tecnológico, a infra-estrutura, as instituições e a organização política, enquanto aqueles estão relacionados às características, à

magnitude e taxa de variação climática ao qual o sistema está exposto, e à disponibilidade de recursos naturais. A capacidade adaptativa das regiões, também determinada por esses dois conjuntos de fatores, igualmente interfere no grau de exposição às mudanças climáticas (IPCC, 2007).

A Figura 6 apresenta o quadro conceitual no qual esta pesquisa foi baseada, considerando os conceitos de mudança climática, vulnerabilidade e capacidade adaptativa. Observa-se, inicialmente, que o setor agrícola é afetado tanto pelas alterações do tempo (secas, veranicos, enchentes etc.), quanto pelas mudanças climáticas (mudanças do padrão de longo prazo da temperatura e precipitação). A magnitude e taxa de variação no clima determinam o grau de exposição do setor, que por sua vez interfere em sua vulnerabilidade, ou seja, os ganhos ou perdas esperados para a produção agrícola. Mas a sensibilidade ao clima é diretamente afetada pela capacidade adaptativa. Em outras palavras, dado um nível fixo de exposição, alta (baixa) capacidade adaptativa diminui (aumenta) a vulnerabilidade do sistema.



Fonte: Adaptado de Deressa et al. (2008)

Figura 6 – Mudança climática, vulnerabilidade e capacidade adaptativa no setor agrícola

Partindo dessas definições, o presente capítulo apresenta os aspectos teóricos específicos que norteiam o problema de pesquisa proposto. Primeiramente, analisa-se como as mudanças climáticas globais afetam os lucros da agricultura. Em seguida, os conceitos de adaptação e capacidade adaptativa são discutidos, considerando suas

diversas dimensões. Por fim, é apresentado um modelo de produção multiproduto que considera explicitamente a irrigação como estratégia adaptativa.

4.1. Efeito da mudança climática sobre a agricultura

Para entender como as mudanças no clima afetam o setor agrícola, Deschênes e Greenstone (2007) propõem uma função de lucro simplificada para um produtor representativo, tal como:

$$\Pi = P_q [Q(t)]Q(t) - C[Q(t)] \quad (4)$$

em que P_q , Q e C denotam preço, quantidade e custo total, respectivamente; a quantidade é função das condições do tempo, t , pois temperatura e precipitação afetam diretamente a produtividade das culturas.

Deschênes e Greenstone (2007) também supõem que esse produtor não tenha condições de empreender qualquer mudança em sua produção em resposta a variações de curto prazo no tempo. Assim, sua resposta à mudança climática será:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial t} = \left(\frac{\partial P_q}{\partial Q} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) Q + \left(P_q - \frac{\partial C}{\partial Q} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) \quad (5)$$

Desde que a mudança climática é um fenômeno de longo prazo, é preciso isolar seu efeito sobre os lucros, o que é representado pelo segundo termo do lado direito da equação (5). Esse termo representa a diferença entre o preço e o custo marginal, multiplicada pela alteração na quantidade. Esse será, conseqüentemente, o efeito da mudança climática sobre os lucros agrícolas, sob a hipótese de que nenhuma adaptação seja realizada e de que o custo marginal seja crescente. É esse efeito que a análise econômica procura isolar, considerando a possibilidade de que o primeiro termo de (5) seja igual a zero.

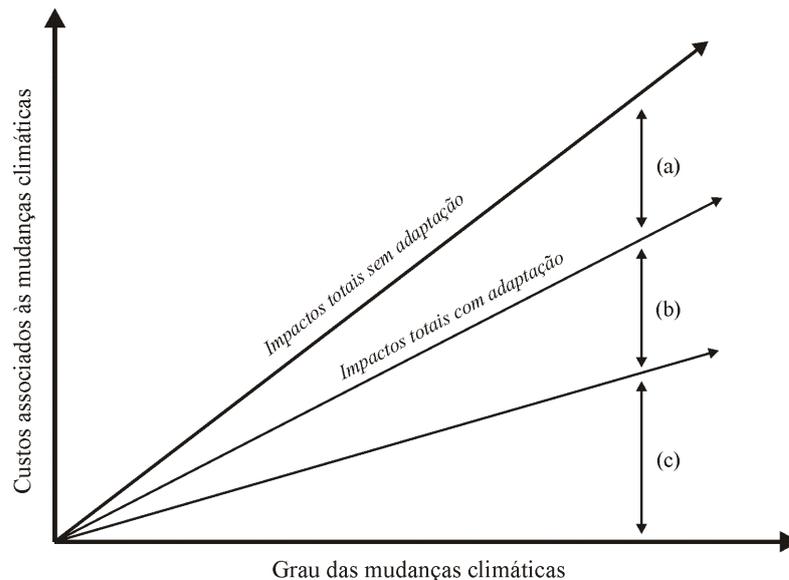
O primeiro termo de (5) representa a mudança nos preços devido ao choque no tempo (indiretamente, por meio do efeito sobre a quantidade), multiplicado pela quantidade inicial. Quando a mudança nas condições do tempo afeta o produto, é comum que este termo divirja no curto e no longo prazo. Para verificar como isso ocorre, supõe-se que o efeito sobre o produto seja negativo ($\partial Q / \partial t < 0$). No curto prazo, a oferta tende a apresentar baixa elasticidade-preço (ou mesmo inelasticidade) devido à defasagem existente entre o plantio e a colheita. O aumento nos preços

resultante contribui para mitigar as perdas do produtor em função da menor safra. Por outro lado, no longo prazo, a elasticidade preço da oferta é maior, já que outros produtores (novos ou os que já participavam do mercado) responderão aos preços mais elevados aumentando sua produção. Por conseguinte, é razoável supor que $|\partial P_q / \partial Q|_{\text{longo prazo}} < |\partial P_q / \partial Q|_{\text{curto prazo}}$ ou mesmo que $\partial P_q / \partial Q_{\text{longo prazo}} = 0$. O resultado disso é que o primeiro termo será positivo no curto prazo, mas no longo prazo, quando ocorre a mudança climática, será substancialmente menor ou até mesmo zero.

4.2. Conceito de adaptação

As estratégias de adaptação se referem aos ajustamentos efetivos ou mudanças em decisões relacionadas ao meio ambiente (ações antecipatórias e, ou, reativas, de agentes públicos e privados), as quais poderiam aumentar a resiliência ou reduzir a vulnerabilidade às mudanças observadas ou esperadas no clima e eventos extremos associados (secas, enchentes, furacões etc.). Pode incluir a redução ou a administração de riscos climáticos, assim como a construção de capacidade para realizar mudanças no futuro. A adaptação ocorre em sistemas físicos, ecológicos e humanos e envolve mudanças nos processos sociais e ambientais, nas percepções de risco climático e nas práticas para reduzir seus prejuízos potenciais (IPCC, 2007).

A Figura 7 apresenta de maneira esquemática o relacionamento entre os prejuízos associados às mudanças climáticas e os custos e benefícios da adaptação. Na figura é mostrado o impacto total das mudanças climáticas considerando a hipótese de que nenhuma adaptação seja feita e o impacto com medidas adaptativas. As distâncias representadas por (a), (b) e (c), respectivamente, se referem aos benefícios líquidos da adaptação, aos custos associados à adoção de medidas adaptativas e às perdas residuais (prejuízos que persistem após a adoção de medidas adaptativas). Pode-se verificar que a adaptação reduz os efeitos adversos, mas não consegue eliminá-los, o que confirma seu caráter de medida reativa. Deve-se ressaltar que, à medida que as previsões de mudança do clima se tornam mais severas, os benefícios líquidos da adaptação tendem a ser decrescentes (STERN, 2007).



Fonte: Adaptado de Stern (2007)

Figura 7 – Mudança climática e os custos e benefícios da adaptação.

O desenho e implementação de práticas de adaptação é condicionado pela capacidade adaptativa, que é a habilidade ou o potencial de um sistema de responder com sucesso à variabilidade do clima e inclui ajustamentos tanto de comportamento quanto nos recursos e na tecnologia (BROOKS; ADGER, 2005). A alta capacidade adaptativa reduz o potencial de perda para qualquer nível de exposição à mudança climática. A capacidade de se adaptar é desigual entre e dentro das sociedades, uma vez que o nível de desenvolvimento e a disponibilidade de infra-estrutura e instituições têm importante papel nesse processo (DERESSA et al., 2008). De modo geral, considera-se que uma combinação de condições biofísicas (quantidade e qualidade dos recursos naturais), socioeconômicas (redes sociais, instituições e governança, direitos de propriedade, recursos humanos etc.) e tecnológicas a influenciam.

De acordo com Stern (2007), na maior parte dos casos, as ações de adaptação geram benefícios locais, obtidos em curtos períodos de tempo. Por essa razão, muitas medidas são tomadas por agentes privados, como indivíduos ou firmas, sem intervenção governamental direta. Esse tipo de medida é conhecida como adaptação autônoma. Em contraste, podem ser realizadas ações deliberadas de política, implementadas por agências públicas. A adaptação pública pode ser caracterizada por ações que apoiem as medidas privadas (medidas planejadas e coordenadas pelo governo, com vistas em obter custos menores) ou por investimentos públicos diretos. De modo geral, a aptidão da

sociedade de realizar medidas autônomas é que vai definir a necessidade de adaptação pública.

Numa perspectiva temporal, a adaptação aos riscos climáticos pode ser vista em três níveis, incluindo respostas a i) variabilidade corrente, as quais também refletem o aprendizado de adaptações passadas ao histórico de alterações no clima; ii) tendências de médio prazo observadas nas condições climáticas; e iii) alterações de longo prazo no clima previstas pelos modelos de circulação geral (IPCC, 2007).

A distinção entre a adaptação de curto e de longo prazo está ligada ao ritmo das mudanças do clima e à flexibilidade das opções de adaptação. No curto prazo, a resposta dos tomadores de decisão para as mudanças climáticas é limitada pelo estoque de capital fixo. No caso do setor agrícola, as principais opções disponíveis estão restritas à alteração dos insumos de produção; por exemplo, um produtor pode alternar culturas e adiar ou antecipar as datas de plantio. Por outro lado, no longo prazo, é possível alterar o estoque de capital e as formas de organização da produção. A partir das expectativas de mudança no clima, pode-se avaliar custos e benefícios associados a novos investimentos (STERN, 2007).

De modo geral, as várias dimensões da adaptação são interligadas e devem formar um *continuum*. Na prática, as ações serão realizadas à medida que o clima e as condições socioeconômicas das sociedades se modificam. Respostas autônomas às variações do tempo (secas e inundações ou tempestades mais frequentes, por exemplo) são o primeiro passo da adaptação; aprimorar essas medidas e criar os marcos regulatórios para sua adequada implementação de modo a se preparar para futuros impactos é a segunda etapa.

4.3. Modelo teórico

Fatores técnicos, econômicos e culturais interferem na decisão de irrigar. Entre tais fatores, destacam-se: i) o potencial hídrico da região e a demanda para outros usos consumptivos; ii) as características do solo (retenção de água, infiltração, textura, estrutura, profundidade, salinidade, drenagem, topografia e erosibilidade); iii) o tipo de cultura cultivada (efeito da irrigação na produtividade das culturas e suas necessidades de água); iv) os aspectos econômicos (custos iniciais, operacionais e de manutenção e a disponibilidade de capital para investimento); v) os fatores humanos (nível educacional,

tradição e outros); e vi) as condições climáticas (a necessidade de irrigação diminui na medida em que se move das regiões áridas e semi-áridas para as regiões mais úmidas) (SCALOPPI, 1986).

Entre as diversas variáveis que afetam a escolha de agricultura irrigada, uma das mais importantes é a quantidade e distribuição das chuvas. O risco de produção induzido por condições climáticas adversas tem papel importante sobre a decisão de irrigar. Os níveis de produção agrícola e sua lucratividade tornam-se aleatórios quando são função de condições climáticas exógenas (ANDRADE, 2001; SCHOENGOLD; ZILBERMAN, 2007; KOUNDOURI et al., 2006).

As condições climáticas incertas fazem com que o abastecimento de água seja estocástico. A adoção de irrigação como estratégia adaptativa vai, então, reduzir o risco associado a essa incerteza. De acordo com Schoengold e Zilberman (2007), para entender esse processo, deve-se supor que, durante períodos de seca, que ocorrem em $\alpha\%$ do tempo, o abastecimento de água disponível para agricultura será A_L ; em períodos chuvosos, que ocorrem em $(1-\alpha)\%$ do tempo, o abastecimento será A_H . Mas, se um sistema de irrigação é desenvolvido, os produtores poderão eliminar a incerteza e contar com um abastecimento A em cada ano agrícola, sendo que $A = \alpha A_L + (1-\alpha)A_H$. A eliminação da incerteza do abastecimento de água permite que os agricultores melhorem seu bem-estar, tornando sua lucratividade menos susceptível às mudanças climáticas.

As influências da mudança do clima sobre as decisões de produção agrícola e sua lucratividade podem ser analisadas por meio de um modelo de produção multi-produto baseado em Negri et al. (2005). O modelo permite a substituição tanto de insumos quanto de produtos, ou seja, os produtores podem se adaptar alterando o conjunto de culturas produzidas ou as suas práticas produtivas. A ênfase aqui recai sobre a decisão de irrigar, que é modelada explicitamente como medida adaptativa, o que difere da abordagem Ricardiana tradicional.

Para caracterizar os elementos do modelo, considera-se Q como um vetor de produtos agrícolas e X um vetor de insumos variáveis (por exemplo, trabalho, água, fertilizantes, energia etc.); P_q e P_x se referem, respectivamente, aos vetores de preços exógenos dos produtos e dos insumos; T é um escalar que representa a escolha discreta de irrigação, ou seja, a decisão de investir num sistema de irrigação para complementar

a precipitação natural; ϖ é o custo anual da irrigação e W é um vetor de variáveis exógenas, que incluem características edafoclimáticas (como tipos de solos, temperatura e precipitação), fatores demográficos, socioeconômicos e estruturais que estão associados à escolha de irrigação¹⁸; por fim, nessa abordagem, a quantidade de terra utilizada para a produção agrícola é considerada como um insumo fixo e é representada por um escalar N .

Considerando produtores avessos ao risco, mercados competitivos para insumos e produtos, uma quantidade fixa de terra e a tecnologia representada por uma função de produção bem-comportada (duas vezes continuamente diferenciável, estritamente quase-côncava e com produtos marginais positivos), a função de lucro pode ser escrita como dependente dos preços dos produtos e insumos variáveis e das quantidades fixas de insumos:

$$\Pi(P_q, P_x, \varpi, N, W) = \max_{X, T} \{P_q' Q - P_x' X - \varpi T \quad : \quad Q \in Q(X, W, N, T)\} \quad (6)$$

em que $Q(X, W, N, T)$ é o conjunto restrito de possibilidades de produção imposto pela tecnologia de produção, restrição de terra, N , variáveis exógenas, W , e a escolha discreta de irrigação, T .

A decisão de produzir utilizando irrigação é oposta à produção de sequeiro. O produtor que maximiza lucro irá instalar a infraestrutura de irrigação se

$$\Pi^I(P_q, P_x, \varpi, N, W) > \Pi^S(P_q, P_x, N, W) \quad (7)$$

em que Π^I e Π^S denotam, respectivamente, os retornos associados à produção irrigada e de sequeiro.

As funções de lucro associadas à escolha do produtor podem ser escritas como:

$$\begin{aligned} \Pi^I(P_q, P_x, \varpi, N, W) &= \max_X \{P_q' Q - P_x' X - \varpi T^I \quad : \quad Q \in Q(X, W, N, T^I)\} \\ \Pi^S(P_q, P_x, N, W) &= \max_X \{P_q' Q - P_x' X \quad : \quad Q \in Q(X, W, N, T^S)\} \end{aligned} \quad (8)$$

A análise do impacto das alterações climáticas sobre cada tipo de produção não pode ser realizada sobre a lucratividade anual, tal qual representada por (8). Isso ocorre pois Π^I e Π^S expressam valores que variam de ano para ano, como resultado das condições meteorológicas e dos preços, ao passo que o interesse recai sobre a análise dos efeitos do clima, que é o padrão de longo prazo do tempo.

¹⁸ As variáveis representativas de cada um desses aspectos serão descritas no Capítulo 5, seção 5.4.

Os valores da terra são uma boa aproximação para a lucratividade pois representam o valor presente do fluxo das rendas líquidas futuras. Segundo Mendelsohn et al. (1994), valores da terra proporcionam uma melhor medida de análise dos efeitos do clima pois refletem a expectativa de receita líquida em muitos anos, considerando que a terra é sempre utilizada para a atividade mais lucrativa. Conforme Schlenker et al. (2005), é possível afirmar também que futuras mudanças nos custos de produção, incluindo aquelas associadas à implantação do sistema de irrigação e captação de água, serão capitalizados nos valores futuros da terra, da mesma forma que os custos de produção no passado foram capitalizados nos valores da terra passados. Dessa forma, o valor da terra é o mesmo que uma variação intertemporal de (8).

O valor de uma parcela de terra é determinado pela renda líquida que ela pode gerar e, por conseguinte, as diferenças em termos de quantias pagas por parcelas distintas resultam de diferenças de produtividade. Dessa forma, qualquer fator que influencie a produtividade será refletido no valor da terra. O impacto da mudança no clima é, então, capturado pela alteração no valor da terra, utilizada para produções irrigadas e de sequeiro, entre diferentes condições climáticas (MENDELSON et al., 1994).

5. METODOLOGIA

O objetivo principal deste trabalho é avaliar se a adoção de irrigação, como medida adaptativa, irá reduzir o impacto negativo esperado das mudanças climáticas globais sobre os produtores agrícolas brasileiros. Em termos metodológicos, para responder a essa questão de pesquisa, é preciso mensurar o efeito causal de uma variável binária (adoção ou não de irrigação) sobre o resultado de uma variável de interesse (valor da terra). Uma forma direta e simples de analisar o efeito dessa decisão voluntária seria comparar os resultados para irrigantes e produtores de sequeiro. De fato, estudos pioneiros do tema, como os de Schlenker et al. (2005) e Kurukulasuriya et al. (2006) recorriam à estimação de modelos hedônicos separados para a produção irrigada e de sequeiro, avaliando o retorno, em termos de lucratividade, de cada uma dessas formas de organização agrícola.

Essa seria uma abordagem válida caso os irrigantes fossem uma amostra aleatória dos produtores elegíveis à adoção da técnica. Mas esse não é o caso, já que a decisão de irrigar é uma ação de otimização, influenciada pelo ambiente no qual o produtor se encontra, isto é, suas características pessoais, condição econômica, fatores climáticos etc. Desse modo, a simples comparação entre os resultados das duas formas de exploração agrícola resultaria numa superestimação da efetividade da técnica. Se aqueles produtores com características mais favoráveis ao bom desempenho agrícola forem também mais propensos a utilizar irrigação, é provável que tenham resultados melhores, em média, que os não irrigantes, independentemente de terem irrigado ou não. De acordo com Bryson et al. (2002), essa é a essência do problema conhecido

como auto-seleção. Caso ele não seja considerado, serão obtidas estimativas viesadas do efeito da irrigação.

Todavia, além da auto-seleção, há outra dificuldade para a estimação. Para verdadeiramente conhecer o efeito da irrigação sobre um produtor individual, seria necessário comparar seu resultado observado com o retorno que seria obtido caso ele não tivesse irrigado. No entanto, com dados *cross-section* (como os desta pesquisa), somente um desses valores é observado – chamado de resultado factual. O contrafactual não está disponível para o mesmo indivíduo, o que leva ao problema de avaliação conhecido como “dados faltantes” (*missing data*) (BRYSON et al., 2002).

Para lidar com o problema da auto-seleção e dos dados faltantes, neste estudo foi utilizado o modelo de Efeito de Tratamento, cujas estimativas foram obtidas a partir da técnica conhecida como Pareamento por Escore de Propensão – PSM (*Propensity Score Matching*). O PSM permite que a auto-seleção seja considerada e, ao mesmo tempo, estima o contrafactual. Dessa forma, foi possível identificar o impacto da irrigação sobre a lucratividade agrícola e simular seus efeitos num contexto de mudanças climáticas globais.

5.1. O modelo de Efeito de Tratamento e o Pareamento por Escore de Propensão

O modelo de Efeito de Tratamento permite responder às seguintes questões:

- i) Qual é o impacto que a adoção de irrigação tem sobre um produtor escolhido aleatoriamente entre todos os agricultores?; e
- ii) Qual é o impacto que a adoção de irrigação tem sobre os produtores que efetivamente irrigaram?

A primeira questão é conhecida como Efeito do Tratamento Médio (*ETM*) e, a segunda, como Efeito do Tratamento Médio sobre o Tratado (*ETM_T*). Ambas procuram analisar o efeito parcial da irrigação (o “tratamento”) sobre os rendimentos dos produtores. A distinção é feita para considerar que, aqueles que voluntariamente escolhem irrigar se diferenciam da maior parte da população elegível em termos de ganhos pela participação. Isso ocorre porque os irrigantes avaliam os benefícios de irrigar antes de tomar sua decisão. Se o processo se desenvolve dessa forma, é pouco provável que as estimativas de impacto sejam relevantes para não participantes elegíveis (BRYSON et al., 2002).

O ETM e o ETM_1 podem ser definidos, respectivamente, como:

$$ETM \equiv E(y_{1i} - y_{0i}) \quad (9)$$

$$ETM_1 \equiv E(y_{1i} - y_{0i} | D=1) \quad (10)$$

em que y_{1i} é o resultado esperado do valor da terra para cada produtor irrigante e y_{0i} para cada produtor de sequeiro; $E(y_{1i} - y_{0i})$ refere-se à expectativa do efeito do tratamento, de modo que, para chegar ao resultado do ETM é preciso obter a diferença $y_{1i} - y_{0i}$; $D=1$ identifica a adoção de irrigação (ROSENBAUM; RUBIN, 1983; CAMERON; TRIVEDI, 2005).

A estimação de ETM e ETM_1 , a partir de dados *cross-section*, como é o caso deste estudo, fica complicada pois não é possível observar y_{0i} para o irrigante, tampouco y_{1i} para o produtor de sequeiro. Em outras palavras, não é possível verificar, ao mesmo tempo, os dois *status* (irrigante e produtor de sequeiro) para um mesmo indivíduo. Sendo assim, o resultado observado a partir de (9) e (10) é:

$$y = (1 - D)y_{0i} + Dy_{1i} = y_{0i} + D(y_{1i} - y_{0i}), \quad (11)$$

em que, para proceder à estimação, é necessário supor que D seja estatisticamente independente de y_{0i} e de y_{1i} , ou seja, deve-se admitir que a adoção de irrigação é aleatória entre os agentes. Admitindo essa independência, ETM e ETM_1 serão iguais, e a estimação de ambos poderá ser feita da mesma forma.

Partindo-se da equação (11), tem-se que

$$E(y | D=1) = E(y_{1i} | D=1) = E(y_{1i}) \quad (12)$$

$$E(y | D=0) = E(y_{0i} | D=0) = E(y_{0i}). \quad (13)$$

Segue-se, então, que

$$ETM = ETM_1 = E(y | D=1) - E(y | D=0). \quad (14)$$

Se o tratamento for aleatório, garante-se que o estimador da diferença, em médias, é não viesado, consistente e assintoticamente normal. Contudo, a escolha entre praticar agricultura de sequeiro ou irrigada não pode ser analisada como uma decisão aleatória, visto que o produtor somente será um irrigante se essa forma de produção for mais lucrativa que a primeira, isto é, $\Pi^I(P_q, P_x, \varpi, N, W) > \Pi^S(P_q, P_x, N, W)$. Ou seja, a decisão do produtor é tomada num processo de maximização de benefícios que garante que somente sejam observadas escolhas ótimas, independentemente de qual opção tenha

sido selecionada. É razoável afirmar ainda que, mesmo que os produtores sejam potenciais irrigantes, eles podem decidir não fazê-lo devido aos atuais incentivos de mercado. Como o produtor pode optar por irrigar ou não, caracteriza-se a existência de auto-seleção.

Para lidar com a auto-seleção, o modelo de Efeito de Tratamento pressupõe que, se é possível controlar as diferenças nas características observáveis entre tratados e não tratados, o resultado que seria obtido na ausência do tratamento seria o mesmo para os dois grupos ($y_{1i}, y_{0i} \perp D | W$). Essa hipótese de identificação é chamada de Pressuposição de Independência Condicional (ROSENBAUM; RUBIN, 1983). Ela permite a obtenção de um contrafactual para o grupo de tratados e, dessa forma, qualquer diferença entre irrigantes e produtores de sequeiro será atribuída ao efeito da irrigação.

A partir da Pressuposição de Independência Condicional, o efeito médio do tratamento pode ser calculado como a diferença nos resultados entre tratados (irrigantes) e não tratados (produtores de sequeiro). Contudo, é preciso usar como controle um grupo de produtores de sequeiro que tenham características semelhantes aos irrigantes; a ideia é obter um contrafactual que permita identificar o que teria acontecido aos irrigantes, caso eles não tivessem realizado essa forma de organização da produção (CAMERON; TRIVEDI, 2005).

A obtenção do contrafactual pode ser realizada por meio do método de Pareamento por Escore de Propensão – PSM. Rosenbaum e Rubin (1983) indicaram a utilização do PSM para analisar efeitos de tratamento como método de redução de viés nos estudos com dados observacionais, como é o caso desta pesquisa. Deve-se utilizar o pareamento quando a participação no tratamento não é definida aleatoriamente, mas depende estocasticamente de um vetor de variáveis observáveis.

Conforme Rosenbaum e Rubin (1983), o escore de propensão é definido como a probabilidade condicional de receber o tratamento, dadas as características pré-estabelecidas:

$$p(W) \equiv \Pr(D=1|W) = E(D|W) \quad (15)$$

em que $D = (1, 0)$ é a *dummy* indicadora de utilização de irrigação (tratamento) e W , o vetor multidimensional de características antes do tratamento (tipos de solos,

temperatura e precipitação, fatores demográficos, socioeconômicos e estruturais que condicionam a escolha de irrigação).

Considerando cada produtor i , se o escore de propensão, $p(W_i)$, é conhecido, então o ETM_1 pode ser estimado da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} ETM_1 &= \{y_{1i} - y_{0i} \mid D_i = 1\} \\ &= E[E\{y_{1i} - y_{0i} \mid D_i = 1, p(W_i)\}] \\ &= E[E\{y_{1i} \mid D_i = 1, p(W_i)\} - E\{y_{0i} \mid D_i = 0, p(W_i)\} \mid D_i = 1] \end{aligned} \quad (16)$$

Para que a equação (16) seja derivada de (15), é preciso supor que $p(W_i)$ é uma função de variáveis observadas W_i , tal que a distribuição condicional de W_i , dado $p(W_i)$, seja a mesma para o grupo tratado e não tratado. Além disso, é preciso considerar que a Pressuposição de Independência Condicional seja válida, ou seja, que a diferença entre os tratados e não tratados, para um dado escore de propensão, vai gerar uma estimativa não viesada para o efeito de tratamento¹⁹.

De acordo com Becker e Ichino (2002), para a estimação do escore de propensão pode ser utilizado qualquer modelo de probabilidade, por exemplo, $\Pr(D_i = 1 \mid W_i) = F\{h(W_i)\}$. Neste trabalho, foi utilizado o modelo probit, de modo que $F(\cdot)$ é a distribuição normal. A equação do probit que representa a decisão de irrigar é representada por:

$$Y_i^* = \alpha'W_i + \mu \quad (17)$$

em que Y_i^* é uma variável latente que representa a decisão de irrigar; W_i é o vetor de variáveis associadas à decisão; e μ é o termo de erro aleatório normalmente distribuído com média zero e variância igual a 1 [$\mu \sim N(0,1)$]. A variável efetivamente observada, Y_i , será:

$$Y_i = \begin{cases} 1 & \text{se } \Pi^I > \Pi^S \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (18)$$

A probabilidade de haver irrigação, condicional aos valores das variáveis presentes em W_i ²⁰, é dada por:

¹⁹ A derivação e a prova dessas duas hipóteses podem ser obtidas em Rosenbaum e Rubin (1983).

²⁰ Para analisar se as variáveis presentes no vetor W_i contribuem na explicação da decisão de irrigar, será realizado o teste de *Wald*. Detalhes sobre o teste podem ser obtidos em Gujarati (2000).

$$p(Y_{1i} = 1 | W_i) = G(\alpha_0 + \alpha_1 W_{1i} + \dots + \alpha_k W_{ki}) \quad (19)$$

em que G é a função de distribuição normal padrão acumulada expressa como:

$$G(z) = \Phi(z) = \int_{-\infty}^z \phi(z) dz \quad (20)$$

em que $\phi(z)$ é a densidade normal padrão, $\phi(z) = (2\pi)^{-0.5} \exp(-z^2 / 2)$.

Os valores de $p(Y_i = 1 | W_i)$ são estritamente compreendidos entre 0 e 1 para todos os valores dos parâmetros α e variáveis explicativas W_i , o que é garantido pela escolha de G . Além disso, admitindo que o termo de erro aleatório μ tenha distribuição normal padrão, tem-se que este será simetricamente distribuído ao redor de zero, isto é, $1 - G(-z) = G(z)$ para todos os números z reais.

As probabilidades estimadas serão usadas para obter os contrafactuais desejados, isto é, a partir delas obtêm-se pares de observação, em que um dos elementos do par pertence ao grupo de irrigantes e o outro ao grupo de produtores de sequeiro (controle). No entanto, antes da formação dos pares, é preciso garantir que qualquer combinação de características observadas entre os tratados também será obtida entre os elementos do grupo de controle. Esse procedimento é consequência direta da Pressuposição de Independência Condicional e significa que a estimação do efeito do tratamento só pode ser realizada numa região de suporte comum. Em termos práticos, a necessidade de suporte comum sugere que, se para um indivíduo tratado não for encontrado um par não tratado com características semelhantes (ou seja, um $p(W_i)$ com valor próximo), ele será excluído da amostra²¹.

Uma vez que tenha sido obtida a região de suporte comum, o próximo passo é construir um grupo de comparação a partir dos indivíduos não tratados. Para isso, vários métodos têm sido propostos na literatura, sendo que os mais utilizados são o pareamento por estratificação, pareamento pelo vizinho mais próximo, *radius matching* e *kernel matching*.

O método de estratificação consiste em dividir os valores do escore de propensão em intervalos, de tal forma que, em cada intervalo, tratados e unidades de controle tenham em média o mesmo escore de propensão. Dentro de cada intervalo, a diferença entre os resultados médios dos tratados e os controles é computada. O efeito

²¹ Para mais detalhes sobre o “suporte comum” ver Bryson et al. (2002).

do tratamento é finalmente obtido como uma média da diferença entre tratados e controles de cada bloco, tomando como pesos a distribuição das unidades tratadas entre os blocos (BECKER; ICHINO, 2002).

Uma das fontes de problema do método de estratificação é que ele descarta observações em blocos onde estejam ausentes unidades de tratamento ou de controle. Essa observação sugere uma forma alternativa para combinar unidades tratadas e de controle, que consiste em tomar cada indivíduo tratado e procurar um controle com o valor mais próximo do escore de propensão. Esta é a lógica do método do vizinho mais próximo. Esse método pode ser aplicado com reposição, ou seja, uma unidade de controle pode ser o melhor par para mais de um tratado. Uma vez que todos os tratados tenham um par não tratado, o efeito do tratamento é calculado pela média da diferença entre cada um desses pares (BECKER; ICHINO, 2002).

Enquanto no método de estratificação alguns indivíduos são descartados pois não obtêm um controle no bloco, no método do vizinho mais próximo todos os tratados encontram um par. No entanto, alguns destes pares são bastante ruins, uma vez que, para algumas unidades de tratamento, o vizinho mais próximo pode ter um escore de propensão muito diferente. Os métodos *radius matching* e *kernel matching* podem oferecer a solução para esses problemas (BECKER; ICHINO, 2002).

Com o *radius matching*, cada unidade de tratamento só é comparável com as unidades de controle cujos escores de propensão estejam em uma “vizinhança” pré-definida com base no escore do tratado em questão. Se a dimensão dessa “vizinhança” (ou seja, o raio) é configurada para ser muito pequena, é possível que algumas unidades tratadas não encontrem pares, devido à não existência de unidades de controle. Por outro lado, quanto menor o raio, melhor a qualidade do pareamento (BECKER; ICHINO, 2002).

Com o *kernel matching*, todos os tratados são comparados com a média ponderada de todos os controles, com pesos que são inversamente proporcionais à distância entre os escores de propensão dos tratados e dos controles. Em outras palavras, o *Kernel* é uma função que pondera a contribuição de cada membro do grupo de comparação, mas fazendo com que mais importância seja dada àqueles que propiciam um melhor pareamento. Todos os membros do grupo de controle são utilizados para a construção de uma correspondência para cada membro do grupo de tratamento. Todavia, pares com correspondências exatas obtêm maior peso e a contribuição

daqueles para os quais o pareamento é ruim pode ser negligenciável (BRYSON et al., 2002; BECKER; ICHINO, 2002).

Assintoticamente, todos esses métodos de pareamento devem gerar o mesmo resultado, pois, à medida que aumenta o tamanho da amostra, todos tendem a considerar apenas pares exatos (SMITH, 2000). No entanto, considerando as características de cada método, pode-se dizer que há um *trade-off* entre quantidade e qualidade de pareamentos. Por suas características, o *kernel matching* é, aparentemente, o que mais se aproxima de reduzir esse *trade-off* e, por essa razão, será utilizado nesta pesquisa.

As etapas da metodologia apresentada nessa seção podem ser resumidas na Figura 8, na qual são descritas as estratégias empíricas utilizadas para a obtenção dos resultados.

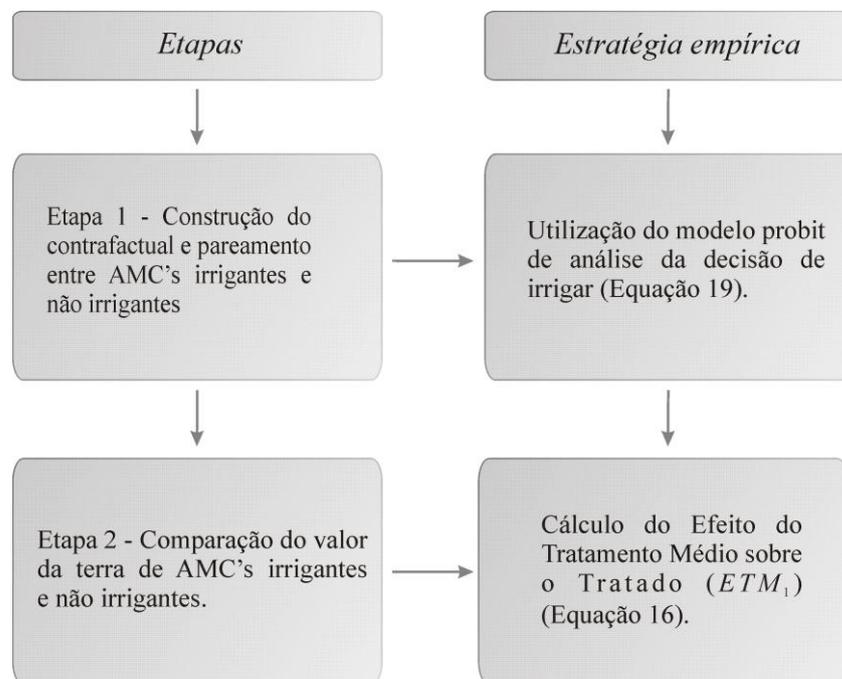


Figura 8 – Etapas metodológicas e estratégias empíricas utilizadas.

5.2. Simulações de mudança climática

Após a etapa inicial da pesquisa, em que foram estimadas as equações considerando o padrão atual do clima (conforme descrito na Figura 8), seguiu-se às simulações para analisar os efeitos da mudança climática sobre o setor agrícola em

médio e longo prazo. Para seu cálculo, partiu-se do pareamento realizado para as variáveis no período atual, mas utilizando os valores de temperatura e precipitação para a média de três períodos de tempo, 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099, sob dois diferentes cenários climáticos. Após a alteração do pareamento, calcularam-se novos efeitos de tratamento, considerando a diferença no valor da terra de AMC's irrigantes e não irrigantes. Seguindo o procedimento descrito em Mendelsohn et al. (1994), que é comum em estudos que tratam de mudanças climáticas, as simulações foram realizadas partindo-se do pressuposto que as variáveis agrônômicas e socioeconômicas não se modificarão ao longo do tempo, permanecendo no futuro como são hoje.

A partir dos valores simulados para a produção irrigada e de sequeiro em cada um dos três períodos futuros, obteve-se a variação percentual dos retornos em relação ao período atual, com vistas em analisar possíveis ganhos ou prejuízos resultantes das mudanças climáticas. Nesse procedimento foi utilizada a seguinte fórmula:

$$\Delta\hat{\Pi}^m = \frac{\hat{\Pi}_{Ti}^m - \hat{\Pi}_{Tbase}^m}{\hat{\Pi}_{base}^m} \times 100 \quad (21)$$

em $\Delta\hat{\Pi}^m$ refere-se à variação percentual do lucro estimado, entre o período Ti (2010-2039, 2040-2069 ou 2070-2099) e o período $Tbase$, para cada tipo de produção m (irrigantes ou produtores de sequeiro).

As etapas referentes às simulações de mudança climática podem ser sintetizadas na Figura 9, que complementa a estratégia empírica descrita na Figura 8.

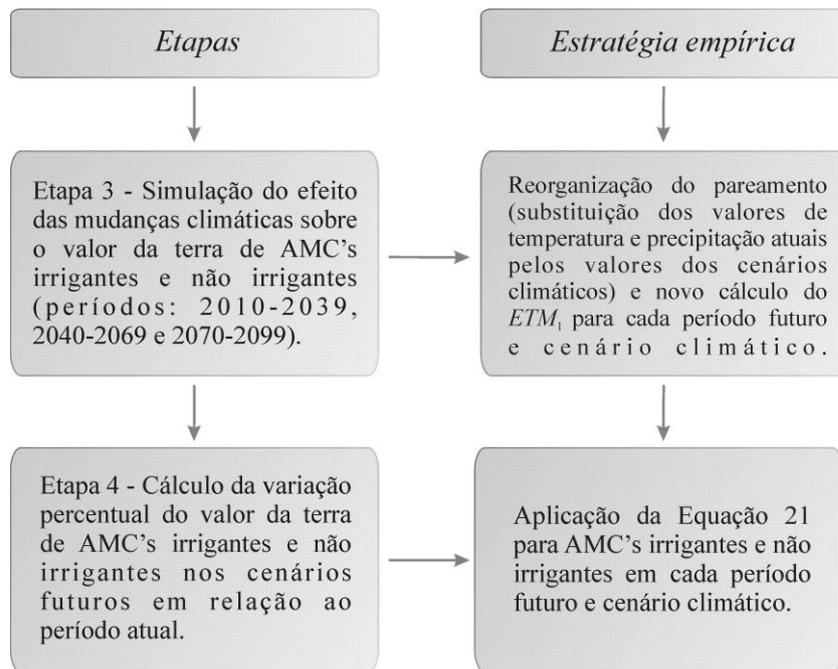


Figura 9 – Etapas metodológicas e estratégias empíricas utilizadas para as simulações de mudança climática.

5.3. Avaliação da qualidade das estimativas

De acordo com Caliendo e Kopeing (2005), a qualidade do pareamento está diretamente relacionada à sua capacidade de balancear as características dos indivíduos entre os grupos de tratamento e controle. Existem diversas formas de testar se o pareamento foi realizado de modo satisfatório: a ideia comum a todas elas é comparar a situação antes e depois do pareamento para verificar se houve diferenças sistemáticas após a utilização do score de propensão.

Uma das formas de obter a qualidade do pareamento mais utilizadas na literatura é a análise de redução do viés padronizado, sugerida Rosenbaum e Rubin (1985). O teste consiste em calcular o viés padronizado antes e depois do pareamento, a partir das seguintes fórmulas:

$$VP_{antes} = 100 \frac{\left(\bar{W}_1 - \bar{W}_0 \right)}{\sqrt{0.5(V_1(W) + V_0(W))}} \quad (22)$$

e

$$VP_{depois} = 100 \frac{\left(\bar{W}_{1M} - \bar{W}_{0M} \right)}{\sqrt{0.5(V_{1M}(W) + V_{0M}(W))}}, \quad (23)$$

em que $V_0(W)$ e $V_1(W)$ representam a variância no grupo de controle e de tratamento, respectivamente, antes do pareamento; $V_{0M}(W)$ e $V_{1M}(W)$ e se referem à variância para controles e tratados, respectivamente, para a amostra pareada. Não há indicação clara de quanto deve ser a redução do viés; na maioria dos trabalhos consideram-se reduções entre 3% a 5% como sendo satisfatórias (CALIENDO; KOPENIG, 2005).

Outra forma de avaliar a qualidade do pareamento é o teste do Pseudo R2, sugerido por Sianesi (2004). O procedimento consiste em refazer o pareamento considerando somente a amostra pareada, ou seja, apenas irrigantes e não irrigantes pareados, e comparar o Pseudo R2 antes e depois do pareamento. Após o pareamento não deve haver diferenças sistemáticas entre as variáveis explicativas de ambos os grupos e, dessa forma, o Pseudo R2 deverá ser consideravelmente menor.

Além da qualidade do pareamento, deve-se verificar também a existência de viés causado por variáveis omitidas. Conforme Caliendo e Kopeinig, (2005), esse viés ocorre quando há variáveis não observadas que afetam, simultaneamente, o tratamento e a variável de resposta ao tratamento. Na presença de viés, pode-se chegar a um resultado no qual dois indivíduos com características observáveis semelhantes no vetor W teriam diferentes chances de receber o tratamento. Para testar a existência de viés de variável omitida, deve-se realizar a análise dos limites de Rosenbaum (2002). Embora a Condição de Independência Condicional não seja testável, essa é uma forma de fazer inferências sobre sua validade.

O procedimento consiste em, após estimar o efeito de tratamento médio, admitir que existe uma variável omitida, Z , que afeta a probabilidade de receber o tratamento ($D=1$). Se Z não afeta D , a participação no tratamento é aleatória e os limites de Rosenbaum (Γ) são iguais aos níveis de significância estimados pelo método de pareamento. Mas, se o impacto potencial de Z sobre D é forte, o intervalo de confiança dos efeitos estimados aumenta, assim como o nível de significância do teste, ou seja, o P-valor torna-se cada vez maior (DIPRETE; GANGL, 2004).

5.4. Descrição das variáveis e fonte dos dados utilizados

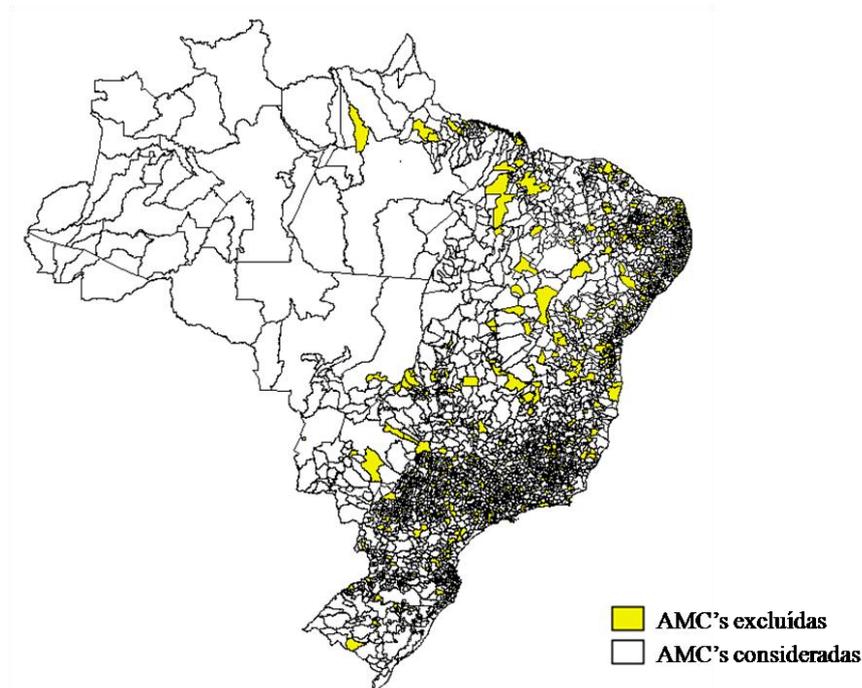
Neste estudo procurou-se incluir, além das condições agronômicas e do clima (valores observados e projeções futuras), como é comum nos estudos de mudanças climáticas, também as características socioeconômicas dos estabelecimentos agropecuários. A escolha das variáveis foi baseada no referencial teórico apresentado anteriormente e em diversos estudos, como os de Negri et al. (2005), He et al. (2007), Kurukulasuriya e Mendelsohn (2007), Mendelsohn e Seo (2007), Seo e Mendelsohn (2008 a, b, c), Seo (2011), entre outros. Os dados foram obtidos das seguintes fontes:

- i) Censo Agropecuário 2006, disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE por meio do Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA (variáveis socioeconômicas);
- ii) Base CL 2.0 10' do Climate Research Unit – CRU/University of East Anglia (valores observados de temperatura e precipitação para o período atual);
- iii) Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA, por meio do IPEADATA (variáveis agronômicas); e
- iv) Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – CPTEC/INPE (projeções futuras de temperatura e precipitação, conforme cada cenário climático).

Idealmente, deveriam ser utilizados dados em nível de produtor para cada variável. No entanto, o IBGE apenas disponibiliza esses dados sem identificação das coordenadas geográficas (latitude e longitude), para preservar a privacidade dos produtores que responderam aos questionários do Censo. Diante disso, não é possível atribuir valores das variáveis climáticas a cada produtor. Para contornar essa dificuldade metodológica, a unidade de estudo considerada nesta pesquisa foi a Área Mínima Comparável – AMC. Segundo Reis et al. (2007), as AMC's se referem à área agregada do menor número de municípios necessários para garantir comparações de uma mesma área geográfica entre diferentes anos censitários, não se tratando de uma divisão política ou administrativa. Além disso, a opção por essa unidade, ao invés de municípios, deveu-se à disponibilidade de dados relacionados às variáveis agronômicas. Tal agregação já foi utilizada nos estudos de Anderson e Reis (2007) e Féres et al. (2008 e 2009).

A base de dados agregados em AMC's continha, originalmente, 3.659 observações. No entanto, algumas exclusões precisaram ser realizadas, por diferentes

razões, descritas a seguir. Inicialmente, foram desconsideradas 232 AMC's urbanas, já que, segundo Schlenker et al. (2005), a forte influência da urbanização sobre os valores das terras nessas regiões poderia causar vies. A ilha de Fernando de Noronha também foi excluída, pois não tem representatividade no contexto da produção agrícola nacional. Por fim, foram retiradas as AMC's para as quais o banco de dados não registrava os valores da terra, além de outros dados considerados questionáveis (por exemplo, observações cuja área agrícola reportada era maior que a área total da AMC). A base de dados final foi composta por 3.123 observações. A Figura 10 apresenta a distribuição das AMC's mantidas e excluídas. Pode-se observar que, mesmo após as exclusões, a amostra representa adequadamente todas regiões do país.



Fonte: IPEADATA, com dados trabalhados pelo autor

Figura 10 – Áreas mínimas comparáveis (AMC's) excluídas e consideradas na pesquisa.

Para caracterizar as AMC's em termos socioeconômicos, foram incluídas variáveis relativas à renda gerada com a produção agropecuária nas AMC's, ao acesso à informação (assistência técnica e internet), à formação educacional dos produtores e à sua experiência (essa última tendo como *proxy* a idade dos produtores). A inclusão dessas variáveis é importante, pois as decisões dos agricultores não estão condicionadas apenas a fatores climáticos ou agrônômicos. Se um produtor opta pela produção de

sequeiro, essa escolha pode ter diferentes explicações, como por exemplo, suas características pessoais, falta de recursos monetários ou de conhecimento suficiente sobre os recursos e as potencialidades da tecnologia de irrigação.

Conforme Anderson e Reis (2007) e Féres et al. (2008 e 2009), pressupõe-se que as variáveis climáticas (temperatura e precipitação) tenham efeitos distintos sobre as decisões de irrigação e produtividade das culturas em diferentes estações do ano. Por exemplo, espera-se que uma variação positiva de 1°C nas temperaturas no período de verão impacte distintamente as culturas em relação a um aumento de 1°C que ocorra nos meses de inverno. Por essa razão, foram incluídas as variáveis relativas às médias trimestrais de temperatura e precipitação: dezembro a fevereiro (verão) e junho a agosto (inverno) para incorporar a questão da sazonalidade dos efeitos climáticos no estudo. Além disso, supondo que a relação entre as variáveis climáticas e a produtividade das culturas seja caracterizada por não-linearidades, incluiu-se também os termos quadráticos dessas variáveis.

A opção por considerar apenas a temperatura e a precipitação de verão e inverno, ao invés das quatro estações do ano, foi baseada nos estudos de Seo e Mendelsohn (2008a) e Seo (2010 e 2011). Segundo os autores, esse tipo de especificação é mais adequada a análises referentes à América do Sul, já que nessa região as quatro estações não são tão bem definidas como no hemisfério Norte. Dessa forma, espera-se que verão e inverno captem melhor os efeitos das mudanças climáticas.

Não obstante, sabe-se que o foco apenas em médias das variáveis climáticas pode levar a conclusões limitadas sobre a influência do clima na agricultura (MEARNS et al.; 1997). De acordo com Negri et al. (2005), a mudança climática certamente irá afetar mais que o primeiro momento das distribuições de temperatura e precipitação. Mesmo mantendo a variância constante, um aumento da temperatura levará a uma maior frequência e severidade dos dias quentes; similarmente, a mudança do clima afetará a intensidade e a duração da precipitação. Assim, estatísticas que sumarizam apenas a média das distribuições de temperatura e precipitação não podem capturar o impacto de mudanças na probabilidade de eventos que ocorram nos extremos da distribuição, já que o relacionamento entre valores médios e extremos tende a ser não linear. Além disso, pequenas mudanças na variância podem levar a grandes aumentos na frequência e severidade de eventos extremos, pois os valores de temperatura e

precipitação são mais sensíveis a mudanças na variância do que na média. Por essa razão, utilizaram-se também medidas de variância da temperatura e da precipitação para o período base (1961-1990), o que pode ser considerado um avanço em termos dos trabalhos já realizados para o Brasil.

Os dados das projeções climáticas se referem a valores de temperatura e precipitação para o período de 2010 a 2099, divididos em três amostras (2020, 2050 e 2080). Os valores de 2020 correspondem à média das simulações para os anos compreendidos entre 2010 e 2039, os de 2050 se referem à média de 2040 a 2069 e os de 2080 à média de 2070 a 2099. Optou-se por trabalhar com médias de períodos de tempo ao invés projeções para anos particulares para evitar a possível escolha de anos com valores *outliers*. Os períodos temporais proporcionam uma melhor medida da tendência geral, sendo que esse foi o interesse da pesquisa.

A unidade original de análise tanto da base de dados de temperatura quanto de precipitação fornecidas pelo CPTEC/INPE era *grid*²². Por meio do programa ArcGis (versão 9.3), os pontos de *grid* foram unidos às fronteiras das AMC's usando suas coordenadas de latitude e longitude, gerando médias de temperatura e precipitação para cada AMC. No caso de AMC's nas quais não havia pontos de *grid* dentro de suas fronteiras, foi utilizado o ponto relativo ao vizinho mais próximo; já no caso de AMC's nas quais havia mais de um ponto, considerou-se a informação média de todos os pontos de *grid*.

Deve-se ressaltar que, se por um lado, o uso variáveis climáticas baseadas em médias de períodos de 30 anos reduz as incertezas relacionadas às previsões de clima, por outro, traz limitações ao modelo. Especificamente, o uso de médias para longos períodos de tempo não permite a análise de eventos climáticos extremos (como períodos de secas prolongadas ou tempestades e enchentes, entre outros). Tais eventos podem ser importantes para a explicação do declínio na produtividade agrícola e também para direcionar as decisões dos produtores com relação às medidas adaptativas que vão tomar. Todavia, deve-se reforçar também que até mesmo os modelos do IPCC ainda não

²² Um *grid* é caracterizado como cada célula de um modelo de dados espaciais, as quais contêm um valor de atributo e coordenadas de localização. Tal modelo define espaço como uma matriz de células de mesmo tamanho – os *grids* – organizadas em linhas e colunas.

são capazes de capturar com precisão os eventos climáticos extremos (SPERANZA; FÉRES, 2010).

Todas as projeções climáticas usadas nas especificações econométricas foram baseadas em cenários climáticos desenvolvidos pelo IPCC (2007). De acordo com Margulis e Dubeux (2010), esses cenários são roteiros mais ou menos detalhados sobre o possível comportamento da economia mundial nas próximas décadas, para que se possa quantificar as prováveis emissões de GEE's. Cada cenário pressupõe um grau de crescimento econômico e seus possíveis níveis de utilização de combustíveis fósseis, desmatamento etc. Os cenários utilizados nessa pesquisa correspondem ao A1B e ao A2: ambos são pessimistas, porém o primeiro faz previsões mais severas de aumento das emissões de GEE's (devido ao uso intensivo de combustíveis fósseis e, ou, fontes não renováveis de energia).

O contexto e a família de cenários A1 descrevem um mundo futuro de crescimento econômico muito rápido, com a população global atingindo um pico em meados do século e declinando em seguida e a rápida introdução de tecnologias novas e mais eficientes. As principais questões subjacentes são a convergência entre as regiões, com redução substancial das diferenças regionais na renda *per capita*. A família de cenários A1 se desdobra em três grupos que distinguem-se por sua ênfase tecnológica: intensiva no uso de combustíveis fósseis (A1F1), fontes energéticas não fósseis (A1T) ou um equilíbrio entre todas as fontes (A1B), em que o equilíbrio é definido como “não se depender muito de uma determinada fonte de energia, supondo-se que taxas similares de aperfeiçoamento apliquem-se a todas as tecnologias de oferta de energia e uso final” (IPCC, 2007).

O contexto e a família do cenário A2 descrevem um mundo muito heterogêneo. O tema subjacente é a autosuficiência e a preservação das identidades locais. Os padrões de fertilidade entre as regiões convergem muito lentamente, o que acarreta um aumento crescente da população. O desenvolvimento econômico é orientado primeiramente para a região e o crescimento econômico per capita e a mudança tecnológica são mais fragmentados e mais lentos do que nos outros contextos (IPCC, 2007).

Dado um cenário particular, os Modelos de Circulação Geral (MCG's) “traduzem” os níveis de emissões de GEE's em mudanças de temperatura, precipitação, radiação solar, elevação do nível do mar etc. (HANEMANN, 2008). Os MCG's

consistem em formulações matemáticas dos processos atmosféricos e das superfícies terrestre e oceânica baseados nos princípios físicos clássicos da hidrodinâmica (MARGULIS; DUBEUX, 2010). Eles têm grande potencial para o estudo das mudanças climáticas. No 4º Relatório do IPCC (2007) foram apresentados resultados de 17 modelos.

Não obstante, os vários MCG's apresentam resultados bastante distintos sobre as variações de temperatura e precipitação para cada cenário. Isso pode ser observado nos resultados de três desses modelos para os países da América Latina: CCC – Canadian Climate Centre, CCSR – Centre for Climate System Research e PCM – Parallel Climate Model (Tabela 2).

Tabela 2 – Modelos de Circulação Geral do IPCC, estimativas de temperatura e precipitação para a América Latina, 2060

	Temperatura (°C)		Precipitação (mm)	
	Verão	Inverno	Verão	Inverno
Período base	20,64	14,86	121,67	75,18
Δ CCC	2,78	2,34	-9,62	4,73
Δ CCSR	2,06	1,96	7,67	-2,69
Δ PCM	0,34	2,03	-1,37	2,15

Fonte: Seo (2011).

Com relação às temperaturas, os três modelos projetam aumentos em relação ao período base, embora as magnitudes sejam bastante distintas. No caso das previsões de precipitação, há discordâncias entre os modelos quanto à direção da mudança; enquanto o modelo CCC projeta reduções de aproximadamente 10 mm/mês no verão, o modelo CCSR espera um aumento de cerca de 8 mm/mês. Outros modelos, além desses aqui apresentados, embora concordem em relação à direção da mudança, têm muitos problemas com *outliers*. Por utilizarem metodologias distintas e, dessa forma, não serem diretamente comparáveis, não é possível indicar qual é o melhor modelo.

Diante dessas discordâncias entre os MCG's, neste estudo optou-se por utilizar estimativas de temperatura e precipitação para cenários futuros brasileiros baseados na média de 10 principais modelos apresentados no 4º Relatório do IPCC (2007)²³. A escolha de estimativas médias tem como objetivo eliminar *outliers* e possíveis erros de medida; a ideia é que, por meio da média, os erros sejam eliminados. Como não se sabe

²³ Os modelos utilizados são descritos na Tabela A1 do Anexo.

que estimativas serão confirmadas no futuro, evita-se entrar no mérito das discordâncias entre os modelos e, assim, apresenta-se um resultado médio. A desvantagem dessa opção é que, com simulações baseadas em estimativas separadas de cada modelo, seria possível apresentar um intervalo de ganhos ou prejuízos resultantes das mudanças climáticas.

O uso de vários modelos separadamente poderia também permitir considerações de risco e incerteza, já que uma característica básica da mudança do clima é o aumento das oscilações de fenômenos climáticos. No entanto, um resultado médio pode ser mais útil para ajudar na tomada de decisões de políticas públicas do que várias estimativas que podem não concordar em sinal.

Por fim, as variáveis agronômicas foram incluídas para levar em conta o relacionamento entre qualidade do solo e produtividade/lucratividade agrícola. Utilizaram-se dados relativos ao potencial de erosão, uma *proxy* para a disponibilidade hídrica e índices representativos da potencialidade agrícola do solo. Deve-se ressaltar que, diferentemente de outros estudos, que utilizam variáveis referentes à proporção de cada tipo de solo (argissolos, luvisolos, latossolos etc.), optou-se por considerar o potencial para agricultura do solo, pois essa variável leva em conta, além do tipo específico de solo, a quantidade de nutrientes existentes, o grau de salinidade, o potencial de drenagem e risco de inundação e o teor de metais.

A Tabela 3 contém a descrição das variáveis utilizadas nesta pesquisa.

Tabela 3 – Descrição das variáveis utilizadas no estudo

Variáveis	Descrição
<i>Condições climáticas</i>	
Temperatura Verão	Temperatura média de verão (°C) (1961-1990).
Precipitação Verão	Precipitação média de verão (mm) (1961-1990).
Temperatura Inverno	Temperatura média de inverno (°C) (1961-1990).
Precipitação Inverno	Precipitação média de inverno (mm) (1961-1990).
Variabilidade Temperatura	Variância da temperatura (1961-1990).
Variabilidade Precipitação	Variância da precipitação (1961-1990).
<i>Condições agrônômicas</i>	
Recursos Hídricos	Número de estabelecimentos agropecuários da AMC com recursos hídricos.
Alto Potencial Agrícola	Proporção da área de solo da AMC com potencialidade agrícola na classe média/alta.
Baixo Potencial Agrícola	Proporção da área de solo da AMC com potencialidade agrícola na classe baixa.
Potencial Erosão	Proporção da área da AMC com limitação acentuada de erosão.
<i>Condições socioeconômicas</i>	
Proprietário	Número de estabelecimentos agropecuários na AMC cuja condição do produtor com relação às terras é proprietário.
Acesso Internet	Número de estabelecimentos agropecuários na AMC com acesso à Internet.
Renda	Somatório do valor das receitas obtidas pelos estabelecimentos agropecuários da AMC (1.000 R\$).
Experiência	Número de estabelecimentos agropecuários na AMC cuja classe de idade da pessoa que dirige o estabelecimento está compreendida entre 25 e 45 anos.
Ensino Superior	Número de estabelecimentos agropecuários na AMC cujo nível de instrução da pessoa que dirige o estabelecimento é o superior.
Ensino Médio	Número de estabelecimentos agropecuários na AMC cujo nível de instrução da pessoa que dirige o estabelecimento é no máximo o ensino médio.
Sem Assistência Técnica	Número de estabelecimentos agropecuários na AMC que não recebeu nenhuma orientação técnica.
Nordeste	Variável <i>dummy</i> que assume o valor 1 se a AMC está localizada na região Nordeste.
Valor Terra	Valor médio da terra nas AMC's (1.000 R\$).

Fonte: CPTEC/INPE; CRU; IBGE; IPEADATA.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos na pesquisa. A primeira parte procura analisar como a decisão de irrigar dos produtores responde aos fatores climáticos no período atual e em cenários futuros. Em seguida, discutem-se os prováveis benefícios associados à adoção de irrigação, como medida adaptativa, para a produção agrícola do país como um todo e, conseqüentemente, os prejuízos relacionados à prática da agricultura de sequeiro num contexto de mudança climática. Por fim, é feita uma análise específica para pequenos produtores.

6.1. Análise descritiva das variáveis

A partir dos dados de área irrigada apresentados no Censo Agropecuário 2006 (IBGE, 2006), foi construída a variável binária indicativa da adoção de irrigação, que assumiu o valor 1 (um) se houve área irrigada numa determinada AMC e 0 (zero) caso contrário. Das 3.123 AMC's consideradas na pesquisa, 2.315 (74% da amostra) possuíam área irrigada. Deve-se considerar que, como o Censo Agropecuário 2006 (IBGE, 2006) empregou o conceito de “molhação” ou regas manuais (utilização de regadores, mangueiras, baldes e latões) em sua definição de irrigação, nesta pesquisa optou-se por não classificar como irrigantes as AMC's cujo valor de área irrigada tenha sido igual ou inferior a 0,1% de sua área agropecuária total. Essa medida foi tomada para retirar da amostra aquelas AMC's cuja área irrigada se referia apenas às regas

manuais. A distribuição da variável entre as regiões brasileiras é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Distribuição regional das AMC's conforme as categorias irrigantes e produtores de sequeiro

Região	Número de AMC's		Percentual (%)	
	Irrigantes	Produtores de sequeiro	Irrigantes	Produtores de sequeiro
Norte	54	78	41	59
Nordeste	766	286	73	27
Sudeste	1031	173	86	14
Sul	346	194	64	36
Centro-Oeste	118	77	61	39
Brasil	2.315	808	74	26

Como já descrito no capítulo referente à Metodologia, foram utilizadas como variáveis explicativas as características climáticas, agronômicas e socioeconômicas das AMC's. As estatísticas descritivas dessas variáveis, considerando produção irrigada e de sequeiro separadamente, são apresentadas na Tabela 5. Ainda que de modo preliminar, os dados da Tabela 5 permitem fazer importantes considerações com relação à adoção de irrigação no Brasil.

Analisando a Tabela 5, verifica-se que as médias das variáveis de precipitação mostram que a produção irrigada está exposta a um volume inferior de chuva, embora essa diferença seja mais expressiva no inverno; por sua vez, as médias de temperatura não revelam diferenças importantes. Portanto, pode-se afirmar que, quando a chuva é abundante, os produtores tendem a praticar agricultura de sequeiro; mas, à medida que a precipitação se torna escassa, há gradual troca para os sistemas irrigados. Constatações semelhantes são encontradas no estudo de Seo (2011), que analisou a irrigação na América Latina. Com relação ao segundo momento das distribuições das variáveis climáticas, embora a variabilidade na temperatura esteja dentro da expectativa (ao não se observarem diferenças para a produção irrigada e de sequeiro), não se esperava que a variância da precipitação fosse maior para os não irrigantes. Diferentemente do observado, uma variância maior da precipitação no verão estaria confirmando um fator de recomendação de irrigar. Uma constatação geral é que tanto irrigantes quanto produtores de sequeiro estão expostos a alta variabilidade da precipitação e baixa variação de temperatura.

Tabela 5 – Estatísticas descritivas por tipo de produção

Variáveis	Irrigantes		Produtores de sequeiro	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
<i>Condições climáticas</i>				
Temperatura Verão	24,43	1,97	24,67	2,01
Precipitação Verão	168,86	74,10	171,46	74,64
Temperatura Inverno	20,02	3,65	20,63	4,31
Precipitação Inverno	52,67	51,31	59,46	52,15
Variabilidade Temperatura	3,74	2,71	3,75	3,28
Variabilidade Precipitação	5.437,18	3.398,00	5.529,35	4.137,05
<i>Condições agronômicas</i>				
Recursos Hídricos	969,14	2.478,62	958,06	1.949,93
Alto Potencial Agrícola	0,11	0,27	0,09	0,24
Baixo Potencial Agrícola	0,56	0,43	0,57	0,41
Potencial Erosão	0,43	0,36	0,38	0,35
<i>Condições socioeconômicas</i>				
Propriedade	1.160,67	2.475,59	1.189,63	2.078,59
Acesso Internet	25,64	66,02	12,2	21,90
Renda	41.641,30	134.372,00	20.597,36	38.461,33
Experiência	527,93	1195,65	585,52	1119,25
Ensino Superior	47,69	83,35	29,10	43,68
Ensino Médio	973,22	2.257,37	970,92	1.732,02
Sem Assistência Técnica	42.999,50	219.918,60	71.510,35	254.928,80
Nordeste	72,80	–	27,20	–
Valor Terra	161.793,50	217.654,60	135.048,0	245.810,90

Notas: (1) As variáveis *Renda* e *Valor Terra* estão cotadas em 1.000 R\$ (valores referentes ao Censo Agropecuário 2006); (2) O valor associado à variável *Nordeste* se refere ao percentual de irrigantes e produtores de sequeiro que estão localizados na região Nordeste.

Quanto aos aspectos agronômicos, produtores de sequeiro têm menor acesso aos recursos hídricos e estão localizados em AMC's cujo percentual da área de solo com potencialidade agrícola na classe média/alta é inferior. Essas informações confirmam que a irrigação está diretamente relacionada à disponibilidade hídrica e também à qualidade do solo no qual a produção é realizada.

A renda da produção irrigada é substancialmente superior à da produção de sequeiro; enquanto a primeira tem um valor médio de receita superior a R\$41 milhões de reais, a outra tem apenas R\$20,5 milhões. Considerando o valor da receita auferida como um indicativo da disponibilidade de capital para investimento na montagem e operação do sistema de irrigação, pode-se afirmar que produtores com menos recursos financeiros tendem a realizar produção de sequeiro.

No que se refere ao acesso a conhecimento e às informações que podem contribuir na tomada de decisão, observa-se na Tabela 5 que a média de estabelecimentos que não receberam assistência técnica é inferior entre os irrigantes; estes, além disso, tem maior acesso à internet e ao ensino superior. Em geral, espera-se que produtores com essas características possuam maior conhecimento sobre a tecnologia de irrigação e, portanto, tenham mais predisposição a adotar a técnica.

A variável *dummy* que indica as AMC's do Nordeste, foi incluída para capturar diferenças regionais não controladas pelas demais variáveis do modelo. Exemplo disso é o fato de a maior parte dos projetos de irrigação pública estarem localizados naquela região. Ademais, o Nordeste possui importantes pólos de irrigação, como os de Petrolina – PE/Juazeiro – BA, Jaguaribe/Apodi (PE) e Livramento/Dom Basílio (BA). O valor médio dessa variável indica que 72,8% das AMC's que compõem a região Nordeste são irrigantes. Uma das explicações para essa alta proporção de AMC's irrigantes é que, principalmente na região semi-árida, a produção agropecuária é de alto risco e baixo rendimento sem a irrigação.

Por fim, a variável referente ao preço da terra, indica que nas AMC's irrigantes o valor médio é superior ao da produção de sequeiro. Esse é um primeiro indício confirmatório de que a utilização de técnicas de irrigação, ao reduzir o risco associado a alterações no clima e garantir produção agrícola sem sazonalidade, entre outros benefícios, gera maiores rendimentos ao produtor, configurando-se como efetiva medida de adaptação.

6.2. Análise dos fatores associados à decisão de irrigar

Nessa seção são apresentadas as estimativas do modelo probit que visam explicar os fatores associados à decisão de irrigar. A estimação é o primeiro passo para a comparação entre irrigantes (tratados) e produtores de sequeiro, dados os cenários de mudança climática. De acordo com a metodologia do Pareamento por Escore de Propensão, descrita anteriormente, o modelo probit foi estimado para calcular os escores de propensão que permitirão obter um grupo de produtores de sequeiro (controle) que, dadas as características observáveis, seja o mais próximo possível dos irrigantes.

O produtor, como expresso anteriormente, escolhe entre a produção irrigada ou de sequeiro de modo que a decisão de irrigar somente é tomada se o ganho for maior

com o uso da técnica. O teste de *Wald* é, então, realizado para verificar se, de fato, as variáveis selecionadas contribuem para a explicação das alternativas de organização da produção. Os resultados do teste para cada variável são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados do teste de *Wald* para as variáveis utilizadas no estudo

Variáveis	Valor F calculado	P-valor
Temperatura Verão	3,14*	0,0762
Temperatura Verão ²	3,56*	0,0591
Precipitação Verão	15,34***	0,0001
Temperatura Inverno	4,49**	0,0341
Temperatura Inverno ²	10,18***	0,0014
Precipitação Inverno	22,61***	0,0000
Variabilidade Temperatura	5,05**	0,0246
Variabilidade Precipitação	15,97***	0,0001
Recursos Hídricos	3,58*	0,0585
Alto Potencial Agrícola	4,44**	0,0351
Baixo Potencial Agrícola	0,01 ^{NS}	0,9085
Potencial Erosão	11,90***	0,0006
Propriedade	1,70 ^{NS}	0,1919
Acesso Internet	16,96***	0,0000
Renda	16,78***	0,0000
Experiência	3,53*	0,0601
Ensino Superior	9,88***	0,0017
Ensino Médio	3,53*	0,0601
Sem Assistência Técnica	14,11***	0,0002
Nordeste	0,35 ^{NS}	0,5531

Nota: (***), (**) e (*) indicam significância a 1%, 5% e 10%, respectivamente; (^{NS}) indica não significativo.

Considerando os resultados do teste, apenas as variáveis relativas à proporção da área de solo da AMC com potencialidade agrícola na classe baixa, ao número de estabelecimentos agropecuários na AMC cuja condição do produtor com relação às terras é proprietário e às AMC's localizadas no Nordeste, não foram estatisticamente significativas. As demais variáveis foram significativas, indicando que são importantes para explicar as alternativas do modelo probit.

Os coeficientes das variáveis associadas à decisão de irrigar estimados pelo modelo probit estão apresentados Tabela 7.

Tabela 7 – Estimativas do modelo probit de determinação da probabilidade de irrigar

Variáveis	Coefficiente	P-valor
<i>Condições climáticas</i>		
Temperatura Verão	-0,973374*	0,0760
Temperatura Verão ²	0,019682*	0,0590
Precipitação Verão	-0,003958***	0,0000
Temperatura Inverno	0,496995**	0,0340
Temperatura Inverno ²	-0,014755***	0,0010
Precipitação Inverno	-0,003417***	0,0000
Variabilidade Temperatura	-0,104093**	0,0250
Variabilidade Precipitação	0,000053***	0,0000
<i>Condições agronômicas</i>		
Recursos Hídricos	0,000146*	0,0590
Alto Potencial Agrícola	0,232210**	0,0350
Baixo Potencial Agrícola	-0,008683 ^{NS}	0,9080
Potencial Erosão	0,262831***	0,0010
<i>Condições socioeconômicas</i>		
Propriedade	-0,000079 ^{NS}	0,1920
Acesso Internet	0,007533***	0,0000
Renda	0,000004***	0,0000
Experiência	0,000217*	0,0600
Ensino Superior	0,004495***	0,0020
Ensino Médio	-0,000219**	0,0600
Sem Assistência Técnica	-0,000002***	0,0000
Nordeste	-0,084465 ^{NS}	0,5530
Intercepto	9,333422*	0,0510

Notas: (1) A estatística LR estimada foi 292,46 com P-valor = 0,0000; (2) Os P-valores foram obtidos após a correção de heterocedasticidade; (3) Os efeitos marginais foram calculados para o valor médio das variáveis; (***) , (**) e (*) indicam significância a 1%, 5% e 10%, respectivamente; (^{NS}) indica não significativo.

Considerando a estatística razão de verossimilhança (LR), o modelo estimado foi altamente significativo. O teste de *White* identificou a existência de heterocedasticidade no modelo. Sendo assim, para indicar a significância dos coeficientes estimados, foi utilizada a matriz de variância-covariância de *White* que possibilita obter erros-padrão robustos²⁴. Após a correção da heterocedasticidade, apenas as variáveis referentes ao baixo potencial agrícola do solo, à condição do produtor em relação às terras (*Proprietário*), e a *dummy* regional *Nordeste* não foram estatisticamente significativas; essas variáveis são as mesmas que já haviam sido identificadas pelo teste de *Wald* como não importantes para explicar a decisão do produtor. As demais foram significativas aos

²⁴ Os resultados do teste de heterocedasticidade antes e depois da correção são apresentados na Tabela A2 do Anexo.

níveis convencionais de significância (nove variáveis significativas a 1%, quatro a 5% e quatro a 10%), o que permite afirmar que fatores climáticos, agrônômicos e socioeconômicos, em conjunto, foram importantes na determinação da decisão de irrigar.

Como descrito na Metodologia, optou-se por analisar o efeito do clima incluindo dados de temperatura e precipitação apenas de verão e inverno. Contudo, foram testadas diversas especificações, incluindo também as demais estações do ano. Os modelos estimados com variáveis referentes a verão, outono, inverno e primavera, em geral, apresentam poucos coeficientes estatisticamente significativos, confirmando a sua baixa adequação ao caso brasileiro.

De modo a confirmar a robustez dos sinais e significância dos parâmetros apresentados na Tabela 7, testaram-se ainda especificações alternativas, ora incluindo apenas o conjunto previamente determinado de variáveis climáticas (como é comum em estudos dessa natureza), ora abrangendo as condições agrônômicas e socioeconômicas, mas apenas controlando por verão (e vice-versa). Em todas essas estimações, os sinais das variáveis referentes às médias e variâncias da temperatura e da precipitação se mantiveram constantes e os parâmetros estimados foram estatisticamente significantes. Esse resultado indica, assim como nos estudos de Kurukulasuriya e Mendelsohn (2007), Mendelsohn e Seo (2007) e Seo (2011), que a escolha de irrigação é sensível tanto à temperatura quanto à precipitação, o que valida sua modelagem como medida adaptativa.

A análise conjunta dos termos linear e quadrático da temperatura de verão revelou um padrão da forma de U para a probabilidade de irrigar no período de verão, ou seja, à medida que a temperatura aumenta, a probabilidade de irrigar decresce até atingir um mínimo, quando então volta a crescer. Para entender esse comportamento, deve-se considerar que a quantidade de água necessária às culturas é função da espécie cultivada, da produtividade desejada, do local de cultivo, do tipo de solo, da época de plantio e do estágio de desenvolvimento da cultura. Durante a fase de maturação e germinação das sementes, bem como durante o crescimento inicial das plântulas, condições excessivas de água no solo podem ser prejudiciais, visto que o aumento da umidade do solo pode acarretar acúmulo de fungos e outros patógenos nocivos às sementes e às plantas em estágios iniciais de desenvolvimento (BERNARDO, 1997; NEGRI et al.; 2005; SEVERINO et al., 2005).

Considerando as observações acima, depreende-se que a finalidade básica da irrigação é proporcionar água às culturas de maneira a atender às suas exigências hídricas, e que altas temperaturas podem ser benéficas ou prejudiciais, dependendo da disponibilidade de umidade no solo. Dessa forma, se a quantidade de água no solo necessária para o desenvolvimento das plantas se mantiver constante, à medida que a temperatura aumenta, as necessidades de irrigação podem diminuir. Porém, se as condições se tornam mais quentes e a temperatura ótima de cultivo é excedida, o crescimento das plantas tende a ficar comprometido, o que leva ao aumento da irrigação como alternativa para mitigar os efeitos adversos das temperaturas elevadas.

Além disso, o padrão de U pode estar associado à relação entre a precipitação e a temperatura no verão. Entre 1961 e 1990, intervalo temporal utilizado neste estudo como período base das variáveis climáticas, observou-se que aumentos de temperatura eram acompanhados por maior volume de precipitação. No entanto, a partir de certo ponto, as temperaturas se mantinham elevadas, mas a precipitação tendia a decrescer. Isso também explica que a probabilidade de irrigar inicialmente diminua e, posteriormente, volte a crescer.

No caso da temperatura de inverno, os sinais indicaram um padrão oposto ao do verão. Em outras palavras, o aumento da temperatura aumenta a probabilidade de irrigar até um valor máximo e, posteriormente, decresce. Esse resultado é semelhante ao de Mendelsohn e Seo (2007) e de Seo (2011). Considerando que as decisões de irrigação são tomadas antes da estação de crescimento das plantas, baseando-se nas condições do tempo esperadas para o referido período, faz sentido pensar em maior pré-disposição a irrigar à medida que se espera temperaturas mais elevadas. No entanto, como afirmam Mendelsohn e Seo (2007), para aumentos de temperatura a partir de determinados níveis, a lucratividade esperada da irrigação deixa de ser tão expressiva, já que as plantas têm limites de tolerância ao calor. Com isso, a eficiência da irrigação passa a diminuir e os ganhos obtidos podem não compensar seus custos.

A explicação de Mendelsohn e Seo (2007) também se aplica ao aparente sinal controverso da variabilidade da temperatura²⁵. Inicialmente esperava-se que, com o aumento da variância da temperatura, houvesse maior irrigação. Porém, o sinal negativo faz sentido se a maior variância representa mais risco de elevadas ondas de calor (ou

²⁵ Esse sinal, assim como a significância estatística do parâmetro, foi invariante aos diferentes tipos de especificações mencionadas acima.

frio) e se, para certos níveis de elevação (redução) da temperatura, a irrigação não tem grande poder adaptativo e é menos lucrativa. Esse poderia ser mais um indício que confirma a ideia de que no Brasil a irrigação é adotada mais como resposta ao estresse hídrico do que térmico.

Com relação às variáveis de precipitação, os sinais apresentaram o comportamento esperado. À medida que a precipitação aumenta, a probabilidade de irrigar diminui. A irrigação procura responder à deficiência hídrica (resultante de pequena quantidade de chuva ou de sua distribuição irregular durante o ano), sendo fundamental para os ganhos de produtividade (COELHO, et al. 2006). Porém, como destacam Mendelsohn e Seo (2007), a contribuição marginal da irrigação à lucratividade dos produtores diminui à medida que a precipitação aumenta. Isso faz sentido, já que produtores não precisam fazer uso intensivo de técnicas de irrigação em locais onde a precipitação é alta. No caso da variância da precipitação, o sinal positivo pode estar indicando produtores avessos ao risco, que tendem a se tornar irrigantes quanto maior for o risco associado à ocorrência de secas e, ou, veranicos.

No que diz respeito às condições agronômicas, exceto pela variável que descreve a proporção da área de solo das AMC's com potencialidade agrícola na classe baixa, as demais variáveis foram estatisticamente significativas e apresentaram o sinal esperado. Altas proporções de solo com potencialidade agrícola média/alta aumentam a probabilidade de irrigar. Solos com essas características são os mais adequados à prática agrícola e com o auxílio de irrigação tornam-se ainda mais produtivos, aumentando a rentabilidade dos produtores. Esse resultado está em conformidade com os de Negri et al. (2005), Mendelsohn e Seo (2007) e Seo (2011). Embora esses autores tenham baseado suas análises em tipos específicos de solo, seus resultados indicam que aqueles considerados como ruins à prática agrícola tendem a diminuir a probabilidade de irrigar.

No caso da variável *Potencial Erosão*, o sinal positivo indica que solos com maior potencial de erosão aumentam a probabilidade de irrigar, resultado que é semelhante ao de He et al. (2007). A irrigação, se praticada de modo adequado, tomando-se os devidos cuidados técnicos, tem condições de restabelecer o nível de compactação do solo erodido e, ao promover o aumento da umidade, restabelecer os níveis de matéria orgânica e nutrientes perdidos com a erosão (NOBEL, 2009). Todavia, esse sinal deve ser visto com cautela, uma vez que a prática inapropriada de irrigação pode causar o efeito inverso, potencializando ainda mais a erosão.

Em termos das características socioeconômicas dos produtores, os sinais das variáveis *Ensino Médio*, *Ensino Superior* e *Experiência* indicaram que, quanto maior o nível de educação e experiência dos produtores, maior a probabilidade de praticar irrigação. Em geral, produtores mais experientes e com mais anos de estudo tendem a estar predispostos a adotar novas tecnologias (HE et al., 2007). Em termos específicos, na variável referente ao ensino superior, foi considerado, entre outros cursos de graduação, o número de estabelecimentos agropecuários na AMC cuja formação da pessoa que dirige o estabelecimento é Agronomia, Engenharia Agrícola e Engenharia Florestal. Nesses cursos há disciplinas específicas sobre técnicas de irrigação, o que aumenta o conhecimento e a habilidade dos indivíduos em lidar com essa tecnologia. Já no caso da variável *Experiência*, consideraram-se produtores na faixa etária de 25 a 45 anos de idade, ou seja, indivíduos que têm experiência relativamente alta na atividade agrícola e, portanto, com mais condições de decidir sobre a adoção de irrigação.

Inferências semelhantes podem ser feitas para as variáveis relativas ao acesso à internet e à não utilização de assistência técnica; a primeira apresentou sinal positivo, indicando que o acesso à internet aumenta a probabilidade de irrigar, enquanto a segunda teve sinal negativo, demonstrando que a ausência de assistência técnica pode contribuir para a não adoção da irrigação.

Atualmente, a internet é uma importante ferramenta de busca dos mais diferentes tipos de informações, entre elas as mudanças climáticas. Os produtores podem acessar previsões de temperatura e precipitação para vários períodos de tempo, facilitando sua tomada de decisões. Qualquer produtor com acesso à internet pode, por exemplo, obter informações sobre o Zoneamento Agrícola de Risco Climático, que é um instrumento de gestão de riscos na agricultura brasileira. Essa técnica, de fácil entendimento, permite que o produtor identifique a melhor época de plantio de diferentes culturas, visando minimizar os riscos climáticos que podem ocasionar perdas de produção. Além disso, tem se tornado comum a assistência técnica remota, em que as informações são transmitidas diariamente aos irrigantes por meio da internet. Controla-se, à distância, o manejo da irrigação do dia atual e calcula-se a probabilidade de irrigação para dias futuros. Para dar a orientação, a assistência técnica igualmente recebe informações via internet ou telefone.

No sentido contrário, produtores que não utilizam assistência técnica podem estar menos informados a respeito do funcionamento de sistemas de irrigação

suplementar e, conseqüentemente, de seu potencial em termos de aumento de produtividade e, ou, redução de perdas advindas do aumento da temperatura ou redução da precipitação. Os dados do Censo Agropecuário 2006 (IBGE, 2006) dão suporte a esse resultado, já que, atualmente, apenas 20% da área irrigada brasileira localiza-se em propriedades que nunca receberam assistência técnica (embora os valores de assistência técnica informados pelo Censo não representem atividade contínua e tampouco indicam a qualidade do serviço).

A variável *Renda* (valor das receitas dos estabelecimentos) apresentou sinal positivo, confirmando que produtores com mais disponibilidade de capital tem maior probabilidade de investir num sistema de irrigação suplementar. Como destaca Negri et al. (2005), produtores menos capitalizados, em geral, não tem condições de arcar com os altos custos relacionados à compra dos equipamentos e instalação do sistema. Esse é o caso, por exemplo, dos sistemas de irrigação do tipo pivô central – que no Brasil correspondem a 18% da área irrigada –, que requerem grandes investimentos iniciais e, portanto, são empregados por produtores que praticam agricultura comercial com alta receita líquida.

Com relação às especificidades regionais, a variável *Nordeste* não foi estatisticamente significativa. Dessa forma, têm-se indícios de que as características intrínsecas aos mercados de insumos e produtos, instituições ou mesmo os investimentos públicos em irrigação no Nordeste não geraram diferenças significativas em termos da probabilidade de irrigar no país como um todo.

De modo geral, a análise dos determinantes da adoção de irrigação no Brasil apresentada nessa seção indicou que, para ser um irrigante, o produtor precisa ter renda suficiente para arcar com os custos de investimento, conhecimento técnico e capacidade administrativa. Além disso, sua propriedade deve ter disponibilidade hídrica e boas condições de solo. Por fim, é possível inferir ainda que, dadas as condições atuais, a irrigação tem sido adotada mais como resposta à redução da precipitação do que às variações de temperatura.

6.3. Efeito da irrigação sobre o desempenho dos produtores no período atual

O modelo probit, cujos resultados foram apresentados na seção anterior, foi calculado para realizar o pareamento entre AMC's irrigantes e AMC's não irrigantes

com características semelhantes. Feito esse procedimento, avaliou-se o desempenho agrícola dos produtores em produções irrigadas e de sequeiro. Essa análise foi realizada por meio do cálculo do Efeito do Tratamento Médio sobre o Tratado (ETM_I) considerando a variável de interesse, que nesta pesquisa é o valor da terra.

Cabe lembrar que desde o pioneiro estudo de Mendelsohn et al. (1994), o valor da terra tem sido utilizado como variável explicativa para análises dos efeitos das mudanças climáticas. Conforme descrito no Referencial Teórico, valores da terra representam uma medida de análise melhor que o lucro anual, pois refletem a expectativa de receita líquida ao longo do tempo, partindo da premissa de que o produtor é racional e utilizará sua terra sempre do modo mais lucrativo.

Na Tabela 8 são apresentados os valores do efeito do tratamento. Observa-se que o valor da terra dos produtores de sequeiro foi superior ao dos irrigantes. A diferença calculada é estatisticamente significativa a menos de 1% de probabilidade. De acordo com a metodologia utilizada, esse resultado indica que, se os atuais irrigantes deixassem de irrigar, eles teriam retornos aproximadamente 3% superiores.

Tabela 8 – Estimativa do efeito de tratamento (ETM_I) no Brasil

Variável de resposta	Irigantes	Produtores de sequeiro	Diferença	P-valor
Valor Terra	153.504,54	158.493,00	-4.988,46***	0,0060

Notas: (1) A variável *Valor Terra* está cotada em 1.000 R\$ (valores referentes ao Censo Agropecuário 2006); (2) ETM_I calculado pelo método *kernel*; (3) P-valor baseado no erro padrão calculado por *bootstrap*; (4) (***) indica significância 1%.

Embora houvesse a expectativa de que a diferença entre o valor da terra dos irrigantes e de produtores de sequeiro fosse positiva, existem alguns fatores que podem explicar o resultado obtido. Inicialmente, destaca-se que a produção de sequeiro gera cerca de 65% do valor da produção agrícola brasileira e predomina em todas as regiões do país. Existem grandes produções comerciais, cujo exemplo mais expressivo é o da soja, que na maior parte das localidades não utiliza irrigação. No Brasil, o uso dessa técnica, mesmo tendo crescido nos últimos anos, ainda é baixo. Conforme o Censo Agropecuário 2006 (IBGE, 2006), a irrigação ocupa apenas 7,4% da área total em lavouras temporárias e permanentes. A área irrigada *per capita* (0,018 ha/habitante) e a relação *área irrigada/área irrigável* (cerca de 10%) figuram entre as mais baixas do

mundo, o que coloca o país em desvantagem competitiva em termos de produtividade dos recursos envolvidos na implantação de áreas irrigadas (ANA, 2009; MI, 2011).

Adicionalmente, acredita-se que o principal fator explicativo do resultado obtido seja o elevado custo da irrigação. Apesar de a irrigação aumentar a produtividade, o resultado parece indicar que, no período presente, em média, seu custo não compensa o aumento de receita. Para citar um exemplo concreto, a produção irrigada de grãos, nas condições vigentes no país, tem grande dificuldade de competir com a de sequeiro, em razão dos investimentos que devem ser realizados e dos custos de administração, operação e manutenção (MI, 2008). Espera-se, entretanto, que essa tendência seja revertida diante das previsões de mudança climática calculadas para o Brasil, uma vez que, segundo Magrin et al. (2007) e Seo (2011), a irrigação é considerada como uma das principais medidas de adaptação para os produtores da América Latina.

Apesar da expressiva contribuição da agricultura irrigada para o PIB do setor agropecuário, os seus resultados ainda estão aquém do ideal. No que se refere à produtividade média alcançada, à eficiência na utilização dos recursos hídricos, ao emprego de insumos modernos, à capacitação da mão de obra e à integração dos projetos com as cadeias produtivas, dentre outros aspectos, o desempenho brasileiro ainda requer melhoria substancial (MI, 2008).

Por outro lado, numa aparente contradição com a explicação acima, o resultado obtido pode estar indicando que a irrigação brasileira necessita de maior investimento por unidade de área, uma vez que esse recurso adicional pode representar grande ganho de eficiência da prática. Esse “esforço adicional” visaria à modernização de equipamentos de irrigação e a instalação de infraestrutura para melhoria do manejo da água. Complementarmente, a garantia dada pela irrigação no tocante à segurança alimentar pode indicar que se justificaria a concessão de algum tipo de subsídio nos casos em que a produção objetivasse o abastecimento do mercado interno. Logicamente, esses avanços somente serão obtidos num ambiente de evolução das políticas públicas e do sistema de extensão rural.

6.4. Qualidade da estimação

A robustez das estimativas, bem como a validade das inferências realizadas nas seções anteriores, dependem da qualidade estatística do modelo estimado. Dessa forma,

nessa seção são apresentados os testes do modelo, em termos do pareamento realizado e da possível existência de viés causado por variáveis omitidas.

O modelo probit, etapa inicial do procedimento metodológico, foi estimado para realizar o pareamento entre as AMC's, de modo a obter uma região de suporte comum na qual existissem produtores de sequeiro comparáveis a irrigantes. É fundamental analisar a qualidade do pareamento, ou seja, verificar se ele foi capaz de balancear a distribuição das variáveis relevantes entre os grupo de tratados e o controle. Em outras palavras, é necessário verificar se houve redução do viés causado pelas diferenças na distribuição das características observáveis entre os dois grupos (CALIENDO; KOPEINIG, 2005).

Neste estudo, a qualidade do pareamento foi identificada, inicialmente, pela comparação do Pseudo R2 para indivíduos pareados e não pareados (Tabela 9). Após o pareamento, observou-se que o valor calculado do R2 para pareados foi cerca de 20 vezes inferior ao valor dos não pareados, indicando que não houve diferenças sistemáticas na distribuição das variáveis entre os dois grupos.

Tabela 9 – Teste do Pseudo R2 para qualidade do pareamento

Grupos	Pseudo R2	LR Chi2	P-valor
Não pareados	0,12	434,49***	0,0000
Pareados	0,01	35,61**	0,0330

Nota: (***), (**) indicam significância a 1% e 5%, respectivamente.

Outro teste realizado para verificar a qualidade do pareamento foi a análise da redução do viés padronizado. Os resultados são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Análise da redução do viés padronizado para a amostra de AMC's pareadas e não pareadas

Variáveis	Amostra	Média		Redução do viés (%)
		Tratados	Controles	
Temperatura Verão	Não pareados	24,43	24,67	93,70
	Pareados	24,43	24,45	
Temperatura Verão ²	Não pareados	600,67	612,78	95,30
	Pareados	600,85	601,42	
Precipitação Verão	Não pareados	168,86	171,46	-25,20
	Pareados	168,48	165,21	
Temperatura Inverno	Não pareados	20,02	20,63	88,30
	Pareados	20,04	19,96	
Temperatura Inverno ²	Não pareados	413,92	444,03	89,80
	Pareados	414,73	411,65	
Precipitação Inverno	Não pareados	52,67	59,46	58,70
	Pareados	52,49	55,30	
Variabilidade Temperatura	Não pareados	3,74	3,75	-49,00
	Pareados	3,71	3,81	
Variabilidade Precipitação	Não pareados	5.437,20	5.529,30	40,30
	Pareados	5.448,20	5.393,20	
Recursos Hídricos	Não pareados	969,14	958,06	-48,30
	Pareados	816,54	881,03	
Alto Potencial Agrícola	Não pareados	0,11	0,09	82,40
	Pareados	0,11	0,11	
Baixo Potencial Agrícola	Não pareados	0,56	0,57	4,30
	Pareados	0,55	0,54	
Potencial Erosão	Não pareados	0,43	0,38	91,20
	Pareados	0,43	0,43	
Propriedade	Não pareados	1.160,70	1.189,60	-20,60
	Pareados	1.018,60	1.105,70	
Acesso Internet	Não pareados	25,64	12,20	87,50
	Pareados	20,56	22,25	
Renda	Não pareados	41.641,00	20.597,00	90,60
	Pareados	31.821,00	33.791,00	
Experiência	Não pareados	527,93	585,52	23,70
	Pareados	468,18	512,12	
Ensino Superior	Não pareados	47,69	29,10	90,60
	Pareados	40,74	39,00	
Ensino Médio	Não pareados	973,22	970,92	-29,90
	Pareados	829,01	898,80	
Sem Assistência Técnica	Não pareados	42.999,00	71.510,00	87,40
	Pareados	33.586,00	37.185,00	
Nordeste	Não pareados	0,33	0,35	63,80
	Pareados	0,34	0,34	

Conforme Becker e Ichino (2002), o alcance da redução do viés depende da qualidade das variáveis de controle com as quais o escore de propensão foi calculado. Sendo assim, pode-se afirmar, a partir da análise da Tabela 9, que as variáveis utilizadas

tiveram bom desempenho, uma vez que apenas *Precipitação Verão*, *Variância Temperatura*, *Recursos Hídricos*, *Proprietário* e *Ensino Médio* levaram a aumento do viés.

Além da qualidade dos pareamentos, verificou-se também a possível existência de viés causado por variáveis omitidas por meio da análise dos limites de Rosenbaum (2002). Na Tabela 11 são apresentados os resultados do teste para a variável referente ao valor da terra, considerando seis valores para os limites de Rosenbaum (Γ).

Tabela 11 – Teste de sensibilidade do efeito de tratamento por meio dos limites de Rosenbaum

Variáveis	Γ	P-valor crítico
Valor Terra	1,0	0,0000
	1,1	0,0000
	1,2	0,0000
	1,3	0,0000
	1,4	0,0000
	1,5	0,0000

Observa-se que, mesmo para valores de Γ mais elevados, o P-valor indicou alta significância do coeficiente de efeito de tratamento estimado, o que assegura a não existência de viés significativo resultante de variáveis omitidas no modelo.

Pelos resultados dos testes apresentados nessa seção, pode-se afirmar que o modelo foi bem ajustado e atendeu aos critérios de qualidade definidos na literatura. Obteve-se a distribuição balanceada das variáveis explicativas para os dois grupos e a condição de não-influência de variáveis omitidas, fundamental para a validade do modelo, foi atendida.

6.5. Cenários futuros de mudança climática

Nessa seção são apresentados os valores simulados da probabilidade de irrigar e do valor da terra considerando as previsões de mudança climática propostos pelo IPCC (2007). As previsões de temperatura e precipitação correspondentes à média de três períodos de tempo utilizados nas simulações, 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099 (denominados de 2020, 2050 e 2080, respectivamente), são mostradas na Tabela 12.

Tabela 12 – Previsões de temperatura (°C/mês) e precipitação (mm/mês) para cenários futuros de mudança climática no Brasil e regiões geográficas

Regiões/Variáveis climáticas	Atual	Cenário A1B			Cenário A2		
		2020	2050	2080	2020	2050	2080
Temperatura Verão							
Norte	26,30	27,40	28,43	29,48	27,29	28,38	29,96
Nordeste	26,10	27,28	28,23	29,15	27,26	28,19	29,63
Sudeste	23,40	24,29	25,27	26,36	24,27	25,33	26,87
Sul	23,10	23,77	24,78	25,71	23,72	24,77	26,16
Centro-Oeste	25,00	26,18	27,28	28,45	26,14	27,32	28,97
Brasil	24,50	25,46	26,44	27,45	25,43	26,45	27,94
Temperatura Inverno							
Norte	26,10	27,41	28,57	29,74	27,33	28,49	30,30
Nordeste	23,60	25,02	25,98	26,82	25,01	25,94	27,37
Sudeste	18,40	19,89	20,94	21,97	19,75	20,78	22,47
Sul	15,30	16,78	17,64	18,61	16,65	17,45	18,94
Centro-Oeste	22,20	23,74	24,91	26,03	23,66	24,76	26,64
Brasil	20,20	21,64	22,64	23,61	21,55	22,51	24,10
Precipitação Verão							
Norte	264,70	263,25	264,13	266,48	269,10	265,53	266,35
Nordeste	88,20	87,15	90,76	96,66	93,07	95,84	95,06
Sudeste	221,50	211,98	217,61	212,67	210,05	210,67	213,94
Sul	159,70	152,52	148,67	154,94	150,36	148,99	154,40
Centro-Oeste	249,00	240,40	245,73	246,90	237,18	244,47	249,32
Brasil	167,50	163,59	166,68	168,03	164,51	165,75	168,03
Precipitação Inverno							
Norte	100,80	95,13	93,36	92,33	96,59	93,51	92,99
Nordeste	67,60	61,90	60,07	59,15	61,50	60,13	59,15
Sudeste	27,10	40,37	40,54	40,90	39,77	40,83	40,75
Sul	105,20	118,41	121,62	122,28	118,44	119,17	122,81
Centro-Oeste	17,10	31,10	31,04	31,13	30,15	31,03	30,33
Brasil	56,50	62,86	62,78	62,69	62,49	62,47	62,69

Nota: Os valores correspondem à média de 10 MCG's apresentados no 4º Relatório do IPCC (2007).

Fonte: CRU e CPTEC/INPE, com dados trabalhados pelo autor.

Os valores apresentados na Tabela 12 indicam que a mudança climática resultará em aumento das temperaturas no Brasil. As elevações de temperatura podem variar de 2,95°C a 3,44°C no verão e de 3,41°C a 3,9°C no inverno, em 2080. As regiões mais afetadas com elevação da temperatura serão o Centro-Oeste, o Norte (notadamente a região amazônica) e o Nordeste. De acordo com Margulis e Dubeux (2010), as projeções indicam ainda aumentos dos extremos de calor, bem como reduções na frequência de geadas devido à elevação da temperatura mínima, principalmente nos

estados do Sudeste, Sul e Centro-Oeste. Haverá, ainda, maior precipitação no inverno, cujos aumentos podem chegar a 6 mm em ambos os cenários em 2080. No verão espera-se apenas um pequeno aumento na precipitação, de aproximadamente 0,53 mm.

A fim de comparar como a configuração atual de irrigantes e produtores de sequeiro serão afetadas pelas alterações no clima, as previsões médias dos 10 MCG's utilizados nesta pesquisa foram desagregadas para as duas classes de produtores. A Tabela 13 apresenta a variação da temperatura e da precipitação, em relação aos valores atuais, em cada período e cenário climático.

Tabela 13 – Variações de temperatura ($\Delta^{\circ}\text{C}$) e precipitação (Δmm) para cenários futuros de mudança climática no Brasil, irrigantes e produtores de sequeiro

Variáveis / Cenários	Irrigantes			Produtores de sequeiro		
	2020	2050	2080	2020	2050	2080
Cenário A1B						
Δ Temperatura Verão	0,93	1,91	2,92	1,32	2,32	3,33
Δ Precipitação Verão	-6,63	-3,36	-2,64	-1,35	1,23	4,35
Δ Temperatura Inverno	1,44	2,43	3,39	2,15	3,18	4,16
Δ Precipitação Inverno	8,62	8,56	8,49	14,72	14,57	14,42
Cenário A2						
Δ Temperatura Verão	0,91	1,93	3,41	1,27	2,31	3,82
Δ Precipitação Verão	-5,9	-4,72	-2,67	0,13	1,52	4,45
Δ Temperatura Inverno	1,35	2,31	3,88	2,07	3,04	4,66
Δ Precipitação Inverno	8,23	8,24	8,49	14,41	14,31	14,43

Fonte: CPTEC/INPE, com dados trabalhados pelo autor.

Conforme apresentado na Tabela 13, os MCG's estimam aumentos de temperatura para todos os produtores, principalmente no inverno. Porém, para ambas as estações, a produção de sequeiro atual estará exposta às maiores elevações. Por um lado, pode-se inferir, se for mantida a atual configuração de não irrigantes, que esses agricultores poderão sofrer prejuízos relacionados à mudança de temperatura. Por outro, que se esses agricultores passarem irrigar, diferentemente do período atual, no qual a decisão de irrigar está mais relacionada a quedas nas taxas de precipitação, no futuro sua prática responderá também a aumentos de temperatura.

No caso da precipitação, há diferenças consideráveis entre as duas formas de organização da produção. Irrigantes enfrentarão decréscimos no volume de chuva no verão e acréscimos no inverno, sendo que os aumentos desta estação superam as quedas

daquela. Exceto por uma pequena variação negativa da precipitação de verão no período de 2010 a 2039, produtores de sequeiro terão expressivos aumentos de precipitação. Contudo, esses valores devem ser vistos com cautela, já que segundo o 4º Relatório do IPCC (2007), há discordâncias com relação às alterações nos padrões de precipitação.

Feitas essas considerações sobre os cenários futuros de mudanças climáticas para o Brasil, pode-se apresentar as simulações. Para o seu cálculo, partiu-se das estimativas anteriores, mas utilizando os valores de temperatura e precipitação cujas médias foram apresentadas na Tabela 12, considerando os cenários climáticos A1B e A2. Como explicado na Metodologia, foi pressuposto que as demais variáveis não se modificarão ao longo do tempo. Sendo assim, na próxima seção são discutidos os principais aspectos relacionados à decisão futura de irrigar, e, na seção seguinte, são tecidas considerações sobre o impacto da mudança climática na produção agrícola irrigada e de sequeiro brasileira.

6.5.1. Análise da probabilidade de irrigar no Brasil e suas regiões geográficas

A Tabela 14 e a Figura 11 apresentam os valores de probabilidade de irrigar estimados para o período atual e os cenários futuros de mudança climática. Os desvios-padrão calculados indicam que todos os valores são estatisticamente significativos a 1% de probabilidade.

Tabela 14 – Valores da probabilidade de irrigar (atual e simulações futuras) estimados para o Brasil e grandes regiões

Regiões	Atual	Cenário A1B			Cenário A2		
		2020	2050	2080	2020	2050	2080
Norte	0,44 (0,1730)	0,70 (0,0193)	0,55 (0,0231)	0,38 (0,0328)	0,72 (0,0213)	0,55 (0,0281)	0,31 (0,0310)
Nordeste	0,73 (0,1399)	0,73 (0,0353)	0,57 (0,0521)	0,38 (0,0559)	0,73 (0,0221)	0,57 (0,0441)	0,31 (0,0546)
Sudeste	0,82 (0,0936)	0,84 (0,0191)	0,71 (0,0360)	0,51 (0,0521)	0,83 (0,0205)	0,67 (0,0396)	0,41 (0,0516)
Sul	0,68 (0,1760)	0,89 (0,0105)	0,75 (0,0203)	0,59 (0,0439)	0,89 (0,0151)	0,72 (0,0379)	0,48 (0,0603)
Centro-Oeste	0,73 (0,1704)	0,78 (0,0367)	0,60 (0,0409)	0,38 (0,0417)	0,78 (0,0287)	0,56 (0,0273)	0,30 (0,0301)
Brasil	0,74 (0,1704)	0,80 (0,0669)	0,66 (0,0856)	0,47 (0,0959)	0,80 (0,0626)	0,63 (0,0742)	0,38 (0,0848)

Nota: Os valores entre parêntesis referem-se aos desvios-padrão estimados

De modo geral, observou-se que, em relação ao período atual, houve aumentos na probabilidade de irrigar para o primeiro intervalo temporal de simulações (2010-2039) e, posteriormente, tendência de queda. Os dois cenários apresentaram valores bastante próximos, embora no A2 as probabilidades estimadas tenham sido menores. Considerando as estimativas para o Brasil como um todo, as simulações indicaram aumento de seis pontos percentuais em 2020. Porém, em médio e longo prazo (simulações para 2050 e 2080, respectivamente), pode haver reduções de oito a 27 pontos percentuais, em relação ao período atual. Em termos regionais, o Sul e o Sudeste apresentaram os maiores valores e, o Norte, os menores. Conforme indicam os dados do mais recente censo agropecuário (IBGE, 2006), o Sudeste apresenta a maior área irrigada do país, o Sul a segunda maior e, o Norte, a última.

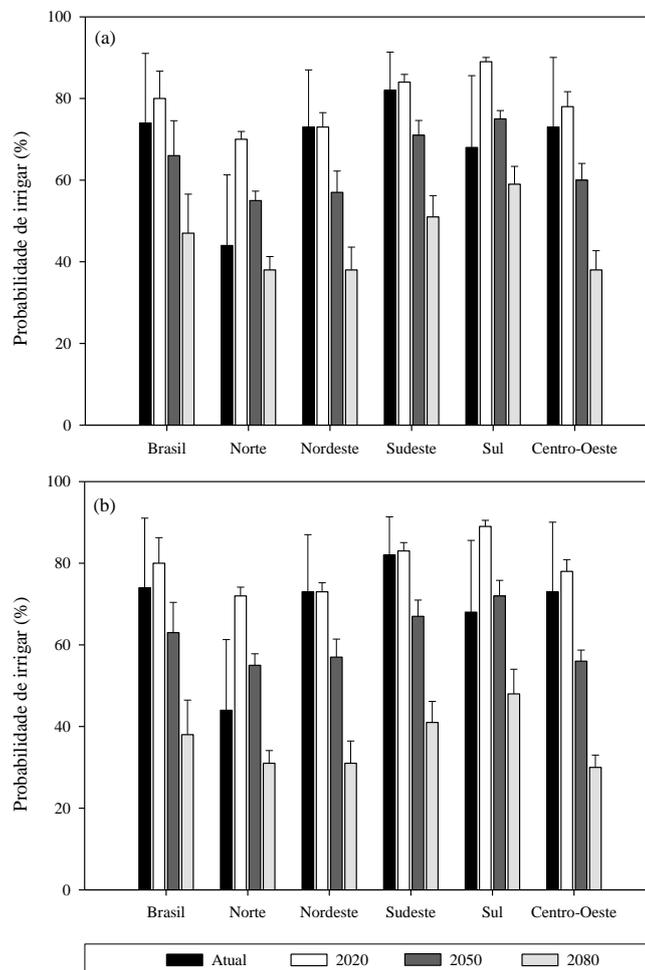


Figura 11 – Probabilidade de irrigar (atual e simulações futuras) estimados para o Brasil e regiões geográficas, cenários A1B (a) e A2 (b).

A partir das previsões do comportamento das variáveis de clima utilizadas neste estudo, algumas considerações a respeito dos resultados apresentados na Tabela 14 e na Figura 11 podem ser feitas. De acordo com Cline (2007), a necessidade de irrigação aumenta à medida que as condições climáticas se tornam mais secas. Porém, esse aumento é função da diferença entre a evapotranspiração e a precipitação. Dessa forma, a irrigação depende da magnitude das taxas de crescimento de temperatura e precipitação. Como as previsões aqui consideradas apontam maior aumento da precipitação, acredita-se que essa seja uma das explicações para a redução nas chances de irrigar nos períodos de 2040-2069 e 2070-2099.

Ademais, as plantas têm limites de tolerância ao calor, indicando que a irrigação, a partir de certos níveis de aumento da temperatura, já não se mostra eficiente como medida adaptativa. Conforme as estimativas de mudança climática utilizadas na presente pesquisa, para esse período são esperados aumentos de temperatura que podem chegar a 3,44°C (cenário A2) no verão e até 3,9°C (A2) no inverno. Por um lado, essa é a mais provável explicação para a queda nas probabilidades de irrigar observadas nas simulações; por outro, também explica as maiores probabilidades estimadas no Sul, já que nessa região são esperados os menores aumentos de temperatura.

Com vistas a explorar os resultados da Tabela 14 e da Figura 11 e inferir sobre a capacidade adaptativa de cada região do país, buscou-se verificar como está distribuída regionalmente a probabilidade de irrigar no período atual e nas simulações para o médio e longo prazos. Essa análise é necessária, uma vez que o Brasil, com sua extensa dimensão territorial, possui grandes diferenças regionais em termos de clima, qualidade e disponibilidade de terras agrícolas e recursos hídricos, condições socioeconômicas e, conseqüentemente, formas distintas de organização da produção agrícola. Todas essas especificidades influenciam na adoção de medidas adaptativas, já que a capacidade de adaptação é condicionada pelo nível de desenvolvimento local e pela disponibilidade de infraestrutura e recursos naturais (IPCC, 2007; DERESSA et al., 2008).

A Figura 12 permite a observação da distribuição regional da probabilidade de irrigar, o que complementa os dados mostrados na Figura 11, apresentando os valores calculados para cada unidade da Federação. Para facilitar o entendimento e a visualização, os valores calculados para cada estado, em cada período e cenário climático, foram divididos em quatro grupos. A divisão desses grupos foi realizada conforme os valores estimados para cada período (isto é, a divisão de cada grupo é

diferente, implicando que o grupo com maiores valores da probabilidade de irrigar em 2020, por exemplo, pode ter magnitudes distintas das de 2050 ou 2080)²⁶. O critério final aplicado para a formação dos grupos foi a busca de homogeneidade interna.

Os valores estaduais da probabilidade de irrigar seguiram a tendência verificada na Figura 11, ou seja, aumento no período de 2010-2039 (para ambos os cenários) e queda nos períodos subsequentes. Destaca-se na Figura 12 que, embora decrescente a partir de 2040, a probabilidade de irrigar sempre teve seus valores mais altos nas regiões Sul e Sudeste, em parte do Centro-Oeste (destacando-se o Mato Grosso do Sul) e em alguns estados da região Nordeste, notadamente a Bahia, Sergipe e Alagoas. Em todas as simulações, o maior impacto das mudanças climáticas sobre a probabilidade de irrigar é verificado nos estados do Sul, com destaque para o Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Isso permite inferir que, se a irrigação, de fato, for uma medida adaptativa eficaz, a agricultura dessa região estará mais preparada para lidar com possíveis efeitos adversos das alterações do clima que as demais. No sentido oposto, o Norte estará mais exposto, já que em seus estados são estimados os menores valores de probabilidade.

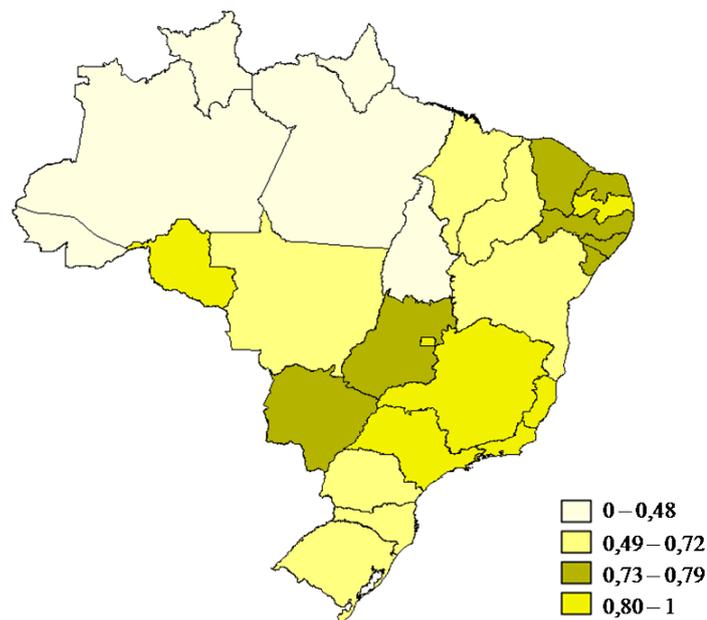
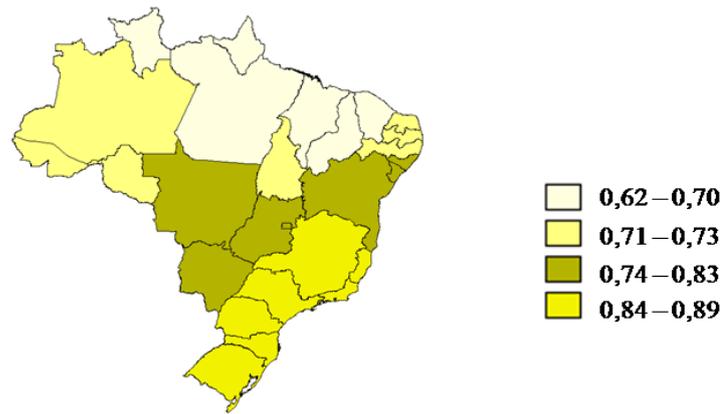
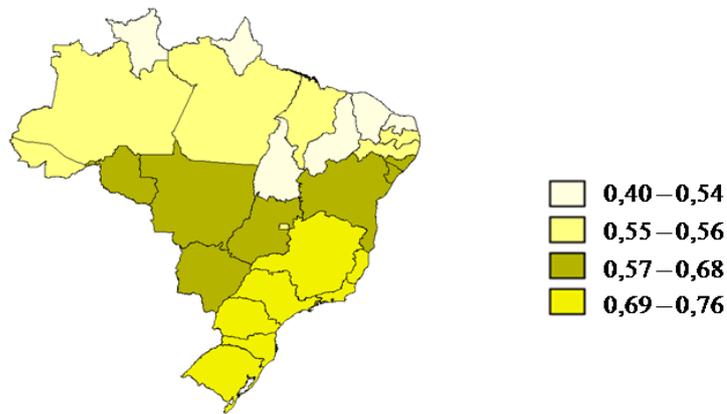


Figura 12a – Distribuição estadual da probabilidade de irrigar no Brasil (%), período atual.

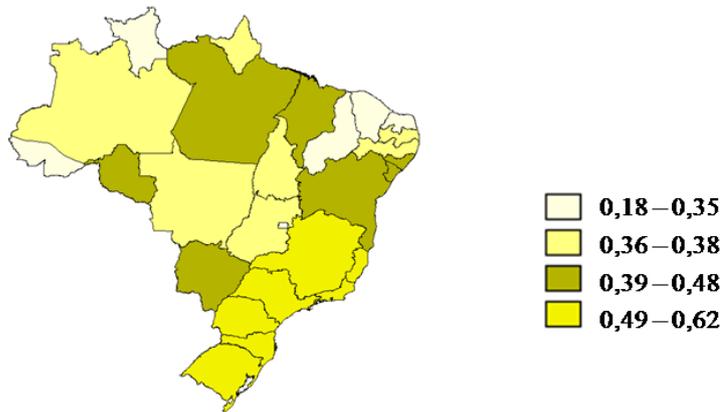
²⁶ Os valores calculados para cada estado, em cada período de tempo, podem ser vistos nas Tabelas A3 e A4 do Anexo.



2020

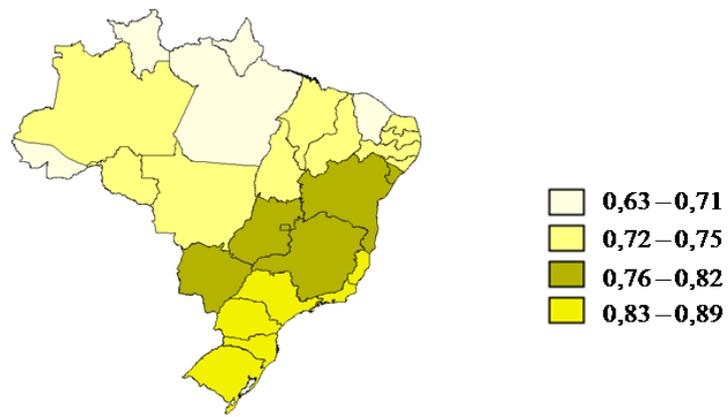


2050

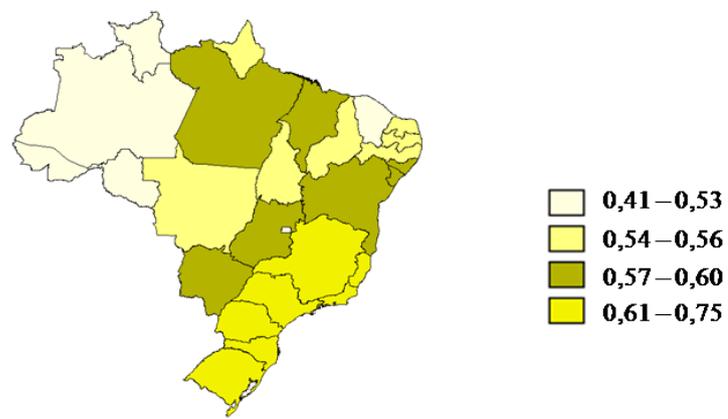


2080

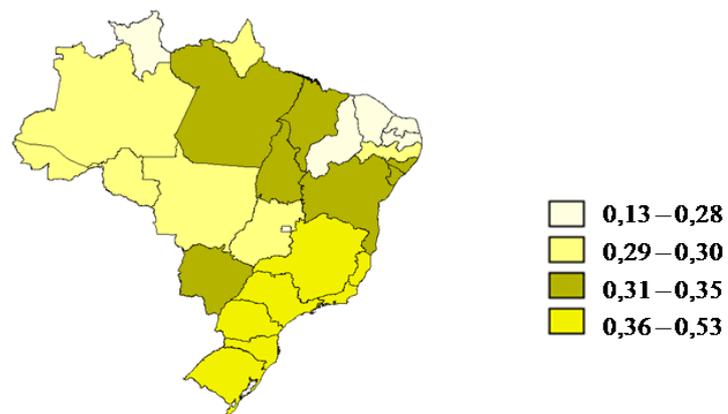
Figura 12b – Distribuição estadual da probabilidade de irrigar no Brasil (%), simulações futuras para o cenário A1B.



2020



2050



2080

Figura 12c – Distribuição estadual da probabilidade de irrigar no Brasil (%), simulações futuras para o cenário A2.

Os aumentos na probabilidade de irrigar esperados para o período de 2010 a 2039 encontram respaldo na análise dos efeitos das mudanças climáticas sobre a agricultura brasileira realizada pela EMBRAPA (2008). Embora o referido estudo não tenha considerado alterações na precipitação, e modelado apenas aumentos de temperatura, seus resultados oferecem explicação para os valores mais altos da probabilidade de irrigar estimados para alguns estados nesta pesquisa. Considerando culturas específicas, o estudo indica que na região Sul a área de baixo risco de produção de soja deverá ser reduzida devido a veranicos mais intensos e deficiência hídrica, o que leva a maior necessidade de irrigação. O mesmo trabalho adverte que a produção de café em algumas regiões de Minas Gerais (em parte do triângulo mineiro, do norte e do centro do estado), e o cultivo de cana-de-açúcar em parcelas expressivas do referido estado, além de São Paulo e Mato Grosso, somente terão baixo risco com irrigação de manutenção (em certas localidades haverá, inclusive, a necessidade de irrigação constante).

Os resultados apresentados nas Figuras 12b,c são resultado da grande variabilidade climática do país, fazendo com que as regiões apresentem características diferenciadas para fins de irrigação das culturas. Portanto, pode-se dizer que há dois padrões bem definidos: o primeiro com as mais baixas probabilidades de irrigar, composto, basicamente, por estados do Norte, e o segundo com as maiores probabilidades, formado pelas regiões Sul e Sudeste, mais o Mato Grosso do Sul, a Bahia, o Sergipe e Alagoas. Fatores relacionados a características socioeconômicas, climáticas, disponibilidade hídrica e formas de produção agrícola podem ser apontados para explicar esses dois padrões.

Inicialmente, com relação ao Norte, o resultado era esperado. Historicamente, essa região tem o menor número de estabelecimentos com uso de irrigação e a menor área irrigada. Segundo Silva et al. (2010), a irrigação tem sido utilizada apenas em viveiros de mudas florestais e no cultivo protegido de hortaliças. Além do clima, que impõe menor necessidade de irrigação, a forma de exploração agrícola praticada no Norte é a principal explicação desse resultado. Sabe-se que a atividade agropecuária mais praticada na região é a pecuária extensiva que não utiliza irrigação de pastagens. Ademais, sua agricultura apresenta baixa produtividade e produtores menos capitalizados e, portanto, menos aptos a investir nessa forma de organização da produção.

Por outro lado, a prática agrícola nos estados com valores mais elevados da probabilidade de irrigar apresenta características bastante distintas. Trata-se de produção comercial, com alta produtividade e rentabilidade, na qual estão incluídos os dois cultivos que geram os maiores rendimentos monetários da agricultura do país (soja e café), com parcela expressiva voltada para a exportação. Em função disso, inclui os produtores com mais condições de investir em tecnologias de irrigação. De fato, conforme indica estudo da ANA (2009), o crescimento da área irrigada que tem sido observado no país nos últimos anos deve-se principalmente à expansão da irrigação privada nos cultivos de fruticultura, grãos e café, notadamente em São Paulo e Minas Gerais, e na produção de grãos nas fronteiras agrícolas do Centro-Oeste. No estado da Bahia, a fruticultura irrigada também tem bastante importância, com destaque para os pólos de Juazeiro e Livramento/Dom Basílio. Ademais, as principais empresas de equipamentos para irrigação, bem como o maior número de profissionais aptos a oferecer assistência técnica, estão localizados nas regiões Sul e Sudeste.

As regiões hidrográficas do Paraná, Atlântico Sul, Atlântico Nordeste Oriental, São Francisco e Uruguai, possuem os maiores valores de área irrigada do Brasil. Com relação à retirada média anual por região hidrográfica, a região do Atlântico Sul possui a maior demanda para o setor, seguida pelas regiões Atlântico Nordeste Oriental, São Francisco e Uruguai (ANA, 2009). Exceto pela região do Atlântico Nordeste Oriental, os estados com probabilidades de irrigar mais elevadas estão localizados exatamente nessas regiões hidrográficas.

6.5.2. Impactos da mudança climática sobre a produção irrigada e de sequeiro

Essa seção trata da análise de como irrigantes e produtores de sequeiro respondem às mudanças na temperatura e precipitação previstas pelos cenários de mudanças climáticas globais. Avaliam-se os possíveis benefícios da irrigação como medida adaptativa e são identificados os prejuízos relacionados à decisão de não irrigar. Diferentemente de outros estudos (por exemplo, SCHLENKER et al., 2005; KURUKULASURIYA et al., 2006; SEO; MENDELSON, 2008a), considerou-se que a decisão de irrigar é influenciada pelas alterações no clima. A Tabela 15 contém as estimativas médias do valor da terra para cada período de tempo e cenário climático.

Tabela 15 – Estimativas do efeito das mudanças climáticas sobre o valor médio da terra de irrigantes e produtores de sequeiro

Variável de resposta	Irrigantes	Produtores de Sequeiro	Diferença	P-valor
Período Atual				
Valor Terra	153.504,54	158.493,00	-4.988,46***	0,0060
Cenário A1B				
Valor Terra (2020)	159.334,30	148.091,54	11.242,76***	0,0040
Valor Terra (2050)	161.410,56	142.387,28	19.023,28***	0,0030
Valor Terra (2080)	161.283,88	136.521,30	24.762,58***	0,0050
Cenário A2				
Valor Terra (2020)	160.050,10	147.919,81	12.130,29***	0,0070
Valor Terra (2050)	161.514,27	136.725,95	24.788,32***	0,0060
Valor Terra (2080)	161.289,03	135.740,94	25.548,09***	0,0090

Notas: (1) A variável *Valor Terra* está cotada em 1.000 R\$ (valores referentes ao Censo Agropecuário 2006); (2) ETM calculado pelo método *kernel*; (3) P-valor baseado no erro padrão calculado por *bootstrap*; (4) (***) indica significância a 1%.

Observa-se na Tabela 15 que, nas simulações futuras, os retornos associados à produção irrigada são sempre maiores que os da produção de sequeiro. O P-valor indica que as diferenças entre as duas classes de produtores são estatisticamente significativas a menos de 1% de probabilidade. Nas AMC's onde a agricultura é praticada utilizando técnicas de irrigação, o valor médio da terra tende a ser crescente (embora haja pequena redução no período de 2070-2099, em relação a 2040-2069). Já nas AMC's cuja produção agrícola é exclusivamente de sequeiro, os resultados indicam que o valor médio da terra será decrescente ao longo do tempo. O valor também é consideravelmente inferior ao da produção irrigada, sendo que a diferença pode variar de R\$ 11,2 milhões (cenário A1B) no curto prazo, a R\$ 25,5 milhões (cenário A2) no longo prazo, quando as estimativas de aumento das temperaturas tornam-se mais elevadas. Em outras palavras, pode-se afirmar que, tudo o mais constante, os produtores deixariam de ganhar até R\$ 25,5 milhões caso não adotassem a irrigação como estratégia adaptativa. Os resultados são aproximadamente semelhantes para ambos os cenários.

Por conseguinte, diferentemente do período atual, no qual o valor médio da terra estimado para irrigantes foi inferior ao dos produtores de sequeiro (Tabela 8), observou-se a eficácia da irrigação como medida adaptativa. Conforme discutido por Schlenker et al. (2005), os benefícios e custos (incluindo os gastos associados à implantação do

sistema de irrigação) são capitalizados nos valores futuros da terra. Dessa forma, pode-se afirmar que, sob cenários de mudanças climáticas, os retornos obtidos com a adoção de irrigação são superiores aos seus custos. Esse resultado está em conformidade com os apresentados no estudo de Margulis e Dubeux (2010). Segundo os autores, a relação entre o custo de implantação de um sistema de irrigação e o benefício (medido pelas perdas evitadas), mostra-se vantajosa, variando de 2% em 2020 a 19% em 2070 na produção de milho, e de 11% a 41% na produção de arroz.

A evolução dos valores da terra de irrigantes e produtores de sequeiro (Tabela 15), em relação às estimativas do período atual (Tabela 8), pode ser vista na Tabela 16 e na Figura 13. A partir dos dois cenários utilizados, foi possível criar intervalos para a variação nos retornos dos produtores em cada período de simulação em relação ao cenário atual (Equação 21).

Tabela 16 – Variação percentual do valor da terra estimado em cada período futuro e cenário climático em relação ao valor estimado para o período atual

Variável de resposta	Cenário A1B		Cenário A2	
	Irrigantes	Produtores de Sequeiro	Irrigantes	Produtores de Sequeiro
$\Delta\%$ Valor Terra (2020)	3,80	-6,56	4,26	-6,67
$\Delta\%$ Valor Terra (2050)	5,14	-10,16	5,22	-13,73
$\Delta\%$ Valor Terra (2080)	5,07	-13,86	5,09	-14,36

Com uso de irrigação, há a expectativa de crescimento do valor da terra, que pode variar de 3,8% a 4,3% em 2020, 5,2% em 2050 e 5,1% em 2080. No caso da agricultura não irrigada, esperam-se reduções do valor da terra da ordem de 6,7% em 2020, de 10,2% a 13,7% em 2050 e de 13,9% a 14,4% em 2080. Considerando o valor médio atual da terra no Brasil (produção irrigada e de sequeiro somadas), as perdas estimadas podem chegar a aproximadamente R\$10,3 milhões em 2020, R\$21,2 milhões em 2050 e R\$22,8 milhões em 2080 (cenário A2).

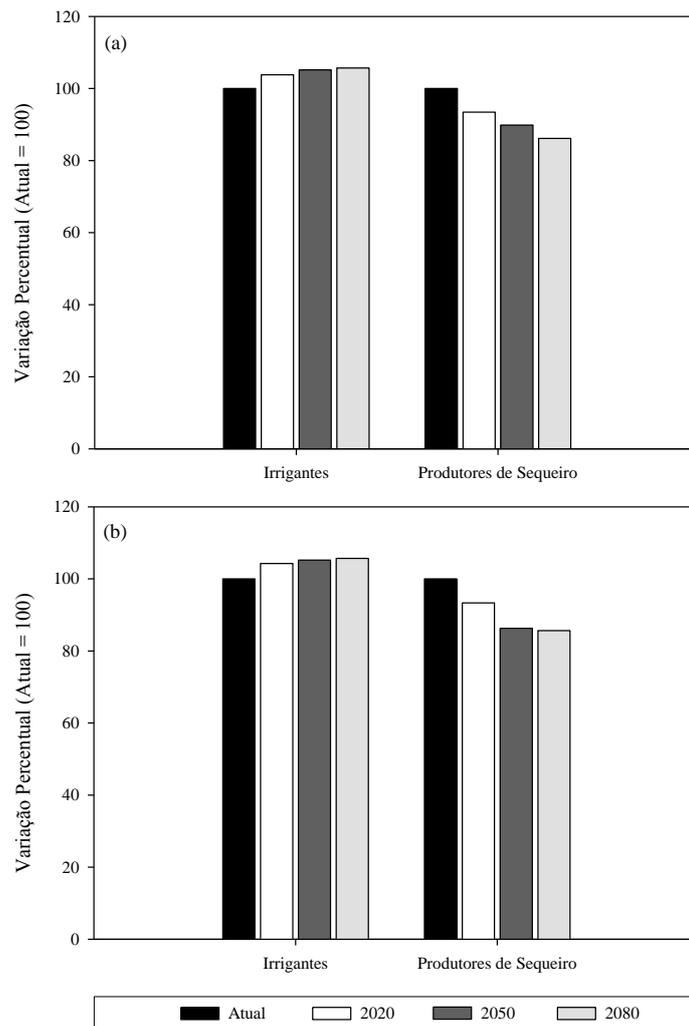


Figura 13 – Variações percentuais do valor da terra de irrigantes e produtores de sequeiro em relação ao período atual, cenários A1B (a) e A2 (b).

Em termos da direção dos efeitos, os resultados desta pesquisa estão em conformidade com os de Seo (2011). Conforme mencionado na Introdução, no referido estudo foram analisados esquemas de adaptação utilizando irrigação na América do Sul. Segundo o autor, o valor da terra irá diminuir 17,2%, para produtores de sequeiro, e aumentará cerca de 17% para os produtores que utilizam projetos privados de irrigação, considerando o modelo PCM (*Parallel Climate Model*). Acredita-se que os ganhos e perdas mais modestos estimados nesta pesquisa devem-se às diferentes condições da estrutura de produção agrícola brasileira. Em relação aos demais países considerados no estudo de Seo (2011), o Brasil conta com a agricultura mais diversificada e moderna e, por isso, tem muito mais condições de empreender ações adaptativas. Além disso, os

resultados do presente estudo também foram condicionados pelos cenários climáticos considerados, já que em ambos são previstos aumentos de precipitação maiores que os de temperatura. Mendelsohn e Seo (2007) e Seo e Mendelsohn (2008a), também estudando produtores da América do Sul, demonstraram que tanto os que irrigam quanto os não irrigantes são positivamente impactados por aumentos de precipitação.

A magnitude dos parâmetros estimados também pode estar relacionada às mudanças pelas quais tem passado a agricultura brasileira nos últimos anos. Como neste estudo foram utilizados dados de valor da terra obtidos do Censo Agropecuário 2006 (IBGE, 2006), tais valores podem estar refletindo melhorias tecnológicas ocorridas no passado recente, como por exemplo, a utilização de sementes transgênicas mais produtivas e mais resistentes às condições climáticas adversas. Dessa forma, a irrigação viria contribuir ainda mais para o desempenho agrícola do país, tornando-o menos susceptível às mudanças climáticas.

Embora a probabilidade de irrigar tenda a ser decrescente, é possível afirmar que os produtores que conseguirem irrigar estarão menos expostos aos efeitos negativos de alterações no clima. A partir dessa constatação e da análise de estudos que tratam do impacto das mudanças climáticas sobre países em desenvolvimento (MENDELSON; SEO, 2007; KURUKULASURIYA; MENDELSON, 2007; SEO; MENDELSON, 2008a; WANG et al., 2008; e SEO, 2011), constatou-se que a irrigação pode ser uma ferramenta muito eficaz para neutralizar os efeitos nocivos das mudanças climáticas. Além disso, as rendas de produções irrigadas são menos vulneráveis que as de produções de sequeiro.

Alguns estudos para o Brasil, que também basearam suas estimativas em dados de valor da terra, apresentaram resultados que variam desde pequenas perdas, por exemplo 2,2% (SANGHI et al., 1997) ou 3,7% (FÉRES et al., 2008), até prejuízos de 47% a 80% (ÁVILA et al. 2006). Os resultados desta pesquisa, no entanto, indicam um quadro menos pessimista a respeito dos efeitos das mudanças climáticas na agricultura brasileira, uma vez que assume que os produtores não continuarão realizando a(s) mesma(s) atividade(s) sem alteração de suas técnicas produtivas. Confirma-se a necessidade de incluir medidas adaptativas na estimação de impactos, possibilitando uma avaliação mais completa do que vai acontecer. De acordo com Mendelsohn (2009), ignorar a adaptação faz com que a estimação de impactos sempre superestime os danos.

É importante notar que os resultados apresentados nesta seção se referem à média dos impactos para o Brasil como um todo, sendo que as diferentes regiões do país podem apresentar níveis diferentes de vulnerabilidade e adaptabilidade²⁷. De acordo com o IPCC (2007), o grau ao qual uma localidade é susceptível aos efeitos adversos da mudança climática é função das características e da magnitude da variação do clima e também de sua capacidade adaptativa. Uma alta capacidade adaptativa reduz o potencial de perda para qualquer nível de exposição à mudança climática. Sendo assim, espera-se que o Sudeste e o Sul, parte do Centro-Oeste e a Bahia sofram menos impactos negativos, já que, para essas regiões, estimou-se maior probabilidade de irrigar. No Sul, em especial, o aumento da temperatura poderá melhorar a prática agrícola em localidades mais frias. Em sentido oposto, aquelas regiões com menor probabilidade de irrigar certamente serão mais afetadas. O Nordeste, além de sofrer grandes aumentos de temperatura, também precisará lidar com redução da disponibilidade hídrica. Por fim, ainda que os efeitos fossem uniformes para todo o país, a expectativa é que, regiões mais pobres, com agricultura familiar e pouco capitalizada, seriam as mais vulneráveis.

6.6. Análise para pequenos produtores

O estudo dos efeitos das mudanças climáticas globais sobre o setor agrícola brasileiro deve considerar, além das questões discutidas nas seções anteriores, que os produtores têm graus diferenciados de vulnerabilidade, que variam conforme sua capacidade adaptativa. Em geral, pequenos produtores estão mais expostos aos impactos devido à elevada dependência da produção agrícola, que muitas vezes é sua principal fonte de subsistência. Como têm maiores restrições de renda e maior dificuldade de acesso à informação, estão menos aptos a empreenderem ações de adaptação. No caso do Brasil, a análise do impacto sobre pequenos produtores ganha destaque pois, de acordo com o Censo Agropecuário 2006 (IBGE, 2006), do total de estabelecimentos agropecuários existentes, cerca de 50% compreendem produções agrícolas realizadas em áreas com, no máximo, 10 hectares.

²⁷ O modelo empírico utilizado não permite desagregações regionais dos resultados a partir da estimação original. A obtenção de estimativas para cada região, ou mesmo para cada estado do país, requereria a reestimação do modelo, considerando os dados referentes à desagregação desejada. Entretanto, como nesta pesquisa a unidade de análise foi AMC, não haveria o número mínimo de observações necessárias para aplicar adequadamente o método (ou seja, não haveria graus de liberdade suficientes).

Dessa forma, nesta seção foi realizada uma análise específica para pequenos produtores, a fim de testar a validade das afirmações acima. O modelo de Efeito de Tratamento foi reestimado para os agricultores com até 10 hectares de área agrícola. Procurou-se realizar o pareamento a partir de uma especificação semelhante àquela utilizada para a totalidade dos produtores agrícolas brasileiros.

6.6.1. Análise descritiva das variáveis

Seguindo as especificações descritas na Metodologia, foram criadas as mesmas variáveis para a amostra de produtores com até 10 hectares de área. No entanto, duas mudanças devem ser registradas:

- i) Excluíram-se as variáveis relativas à experiência dos produtores e à não utilização de assistência técnica, já que o Censo Agropecuário não tem disponibilidade dessas informações desagregadas por classes distintas de tamanho de propriedade; e
- ii) Foi incluída a variável *Pronaf*, que se refere ao valor dos financiamentos obtidos pelos agricultores por meio do Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar – PRONAF. Esse programa do governo federal financia projetos individuais ou coletivos de agricultores familiares e assentados da reforma agrária. Por meio dele, os pequenos produtores podem obter crédito para custeio da safra ou atividade agroindustrial, seja para o investimento em máquinas, equipamentos ou infraestrutura de produção e serviços agropecuários e não agropecuários. Há linhas de crédito específicas para financiar estruturas de armazenamento, distribuição, instalação, ligação e utilização de água para irrigação (PRONAF ECO, PRONAF semi-árido, por exemplo). Acredita-se, portanto, que essa possa ser uma importante fonte de financiamento da instalação de um sistema de irrigação.

As estatísticas descritivas das variáveis utilizadas são apresentadas na Tabela 17. De modo geral, observa-se um padrão muito semelhante àquele apresentado na Tabela 5, que representa o total dos estabelecimentos agropecuários brasileiros.

Tabela 17 – Estatísticas descritivas por tipo de produção, modelo para pequenos produtores

Variáveis	Irrigantes		Produtores de sequeiro	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
<i>Condições climáticas</i>				
Temperatura Verão	24,51	1,97	24,45	2,02
Precipitação Verão	165,28	73,27	184,21	75,71
Temperatura Inverno	20,17	3,81	20,19	3,93
Precipitação Inverno	53,02	50,46	59,27	55,13
Variabilidade Temperatura	3,76	2,91	3,66	2,72
Variabilidade Precipitação	5295,29	3483,17	6032,62	3939,46
<i>Condições agronômicas</i>				
Recursos Hídricos	427,40	738,10	122,05	165,03
Alto Potencial Agrícola	0,12	0,27	0,08	0,24
Baixo Potencial Agrícola	0,55	0,42	0,60	0,42
Potencial Erosão	0,42	0,35	0,38	0,38
<i>Condições socioeconômicas</i>				
Propriedade	616,64	980,51	195,83	324,97
Acesso Internet	6,99	23,78	1,76	3,83
Renda	5.776,12	15.406,47	1.717,93	7.321,48
Ensino Superior	6,95	12,61	1,93	2,91
Ensino Médio	399,89	705,27	118,31	175,69
Pronaf	270,88	807,74	73,09	161,48
Nordeste	81,56	–	18,44	–
Valor Terra	10.569,96	15.878,44	5.057,93	15.009,78

Notas: (1) As variáveis *Renda*, *Valor Terra* e *Pronaf* estão cotadas em 1.000 R\$ (valores referentes ao Censo Agropecuário 2006); (2) O valor associado à variável *Nordeste* se refere ao percentual de irrigantes e produtores de sequeiro que estão localizados na região Nordeste.

Pode-se afirmar que a irrigação nas pequenas propriedades agrícolas também é realizada em resposta à redução da precipitação, já que as médias dessa variável são inferiores nas AMC's irrigantes. Em termos da temperatura não se observam diferenças expressivas. Com relação aos aspectos agronômicos, os irrigantes têm maior acesso aos recursos hídricos e se localizam em AMC's cujo percentual da área de solo com potencialidade agrícola na classe média/alta é superior.

No que diz respeito às condições socioeconômicas, as médias da variável PROP indicam que a irrigação é praticada, principalmente, por agricultores que são proprietários de suas terras. Além disso, as receitas obtidas com a produção irrigada são superiores àquelas do cultivo de sequeiro, sendo que esses últimos têm utilizado, em média, menor volume de recursos advindos do PRONAF.

As variáveis representativas do acesso ao conhecimento (*Internet, Ensino Superior e Ensino Médio*) indicam que nas AMC's classificadas como irrigantes é maior a utilização de internet e há mais produtores com formação superior ou pelo menos ensino médio. No entanto, esses valores são consideravelmente inferiores aos da média do setor agrícola como um todo (apresentados na Tabela 5). Assim, pode-se dizer que o pequeno produtor agrícola tem muita dificuldade de obter informações que poderiam contribuir para melhorar sua produção e, por conseguinte, seus ganhos. Dessa forma, suas possibilidades de adaptação, que já são reduzidas pelas restrições de capital, ficam ainda mais limitadas.

A variável *dummy* indicativa dos produtores que estão localizados no Nordeste foi mantida, já que essa região é a que possui o maior número de estabelecimentos com até 10 hectares; conforme indica a Tabela 17, entre as AMC's nordestinas, cerca de 82% utilizam algum tipo de técnica de irrigação. Ressalta que essa distinção do Nordeste é importante pois essa é a região para qual se espera os impactos mais adversos das mudanças climáticas, principalmente em relação aos pequenos produtores agrícolas.

Por fim, o valor médio da terra, variável sobre a qual se deseja analisar o efeito do emprego de técnicas de irrigação, é consideravelmente maior para irrigantes.

6.6.2. Análise dos fatores associados à decisão de irrigar de pequenos produtores

A fim de realizar o pareamento entre pequenos produtores que irrigam e os que praticam agricultura de sequeiro, foi estimado o modelo probit. Utilizou-se o teste de *Wald* para verificar a contribuição das variáveis selecionadas para a explicação da decisão de irrigar. Os resultados do teste estão na Tabela 18.

De acordo com o teste, as variáveis *Variância Precipitação, Baixo Potencial Agrícola, Propriedade, Renda, Ensino Médio e Pronaf* não foram estatisticamente significativas. No entanto, essas variáveis não foram retiradas do modelo pois, conforme a literatura, estão associadas à decisão de irrigar. Segundo Caliendo e Kopeinig (2005), como a estimação do *Propensity Score Matching* é baseada em características observáveis dos indivíduos, uma variável somente deve ser retirada da amostra se for constatada sua não associação à variável de interesse; de outro modo, a omissão de variáveis importantes pode gerar aumento do viés na estimação. As demais

variáveis foram significativas aos níveis convencionais de significância (1%, 5% ou 10%).

Tabela 18 – Resultados do teste de *Wald* para as variáveis utilizadas no estudo, modelo para pequenos produtores

Variáveis	Valor F calculado	P-valor
Temperatura Verão	3,49*	0,0616
Temperatura Verão ²	2,55*	0,0965
Precipitação Verão	17,81***	0,0000
Temperatura Inverno	4,58**	0,0324
Temperatura Inverno ²	3,71*	0,0540
Precipitação Inverno	43,97***	0,0000
Variabilidade Temperatura	2,73*	0,0986
Variabilidade Precipitação	0,74 ^{NS}	0,3894
Recursos Hídricos	37,35***	0,0000
Alto Potencial Agrícola	4,61**	0,0318
Baixo Potencial Agrícola	0,01 ^{NS}	0,9129
Potencial Erosão	6,01**	0,0143
Propriedade	0,07 ^{NS}	0,7845
Acesso Internet	10,11***	0,0015
Renda	0,08 ^{NS}	0,7741
Ensino Superior	26,96***	0,0000
Ensino Médio	0,10 ^{NS}	0,7505
Pronaf	0,06 ^{NS}	0,8013
Nordeste	2,90*	0,0884

Nota: (***), (**) e (*) indicam significância a 1%, 5% e 10%, respectivamente; (^{NS}) indica não significância.

As estimativas do modelo probit estão apresentadas na Tabela 19. A estatística razão de verossimilhança (LR), significativa a menos de 1% de probabilidade, indica que o modelo foi bem ajustado. Por meio do teste de *White*, identificou-se a existência de heterocedasticidade no modelo; assim, foi utilizada a matriz de variância-covariância de *White* para a obtenção de erros-padrão robustos²⁸. Após a correção da heterocedasticidade, as variáveis *Precipitação Verão*, *Precipitação Inverno*, *Recursos Hídricos*, *Internet* e *Ensino Superior* foram significativas a 1%; *Temperatura Inverno*, *Alto Potencial Agrícola* e *Potencial Erosão* a 5%; *Temperatura Verão*, *Temperatura*

²⁸ Os resultados do teste de heterocedasticidade antes e depois da correção são apresentados na Tabela A2 do Anexo.

*Verão*², *Temperatura Inverno*², *Variância Temperatura* e *Nordeste* a 10%; e as demais não foram estatisticamente significativas.

Tabela 19 – Estimativas do modelo probit de determinação da probabilidade de irrigar para pequenos produtores

Variáveis	Coefficiente	P-valor
<i>Condições climáticas</i>		
Temperatura Verão	-1,031429*	0,0620
Temperatura Verão ²	0,016750*	0,0990
Precipitação Verão	-0,004941***	0,0000
Temperatura Inverno	0,530864**	0,0320
Temperatura Inverno ²	-0,009370*	0,0540
Precipitação Inverno	-0,005564***	0,0000
Variabilidade Temperatura	0,084056*	0,0990
Variabilidade Precipitação	0,000014 ^{NS}	0,3890
<i>Condições agronômicas</i>		
Recursos Hídricos	0,002135***	0,0000
Alto Potencial Agrícola	0,257648**	0,0320
Baixo Potencial Agrícola	0,008876 ^{NS}	0,9130
Potencial Erosão	0,204840**	0,0140
<i>Condições socioeconômicas</i>		
Propriedade	-0,000042 ^{NS}	0,7850
Acesso Internet	0,030718***	0,0010
Renda	0,00000 ^{NS}	0,7740
Ensino Superior	0,066990***	0,0000
Ensino Médio	-0,000139 ^{NS}	0,7500
Pronaf	-0,000040 ^{NS}	0,8010
Nordeste	-0,260781*	0,0880
Intercepto	9,140163 ^{NS}	0,0520

Notas: (1) A estatística LR estimada foi 292,46 com P-valor = 0,0000; (2) Os P-valores foram obtidos após a correção de heterocedasticidade; (3) Os efeitos marginais foram calculados para o valor médio das variáveis; (4) (***) , (**) e (*) indicam significância a 1%, 5% e 10%, respectivamente; (^{NS}) indica não significância.

Com relação às médias de temperatura e precipitação, o modelo estimado para estabelecimentos agropecuários com até 10 hectares foi semelhante ao do total de agricultores (estimativas da Tabela 7). Novamente, obteve-se o padrão de U para a temperatura de verão e de U invertido para a temperatura de inverno. Os sinais negativos da precipitação também confirmam seu relacionamento inverso com a probabilidade de irrigar. Verificou-se que a variância da precipitação não foi

significativa, diferentemente da variância da temperatura. O coeficiente de VTMP apresentou sinal positivo, indicando que os pequenos produtores são avessos ao risco de mudanças bruscas de temperatura. Por esses resultados, pode-se afirmar que nos estabelecimentos agropecuários com até 10 hectares, diferentemente do total de agricultores, a irrigação é praticada também como forma de minimizar os riscos associados às variações de temperatura.

No que se refere às características agronômicas e socioeconômicas, o modelo para pequenos agricultores foi similar ao que considera a totalidade dos produtores. Mais uma vez foi constatada a importância da disponibilidade de recursos hídricos, de solos mais aptos para a prática agrícola e do acesso à informação. Com relação a esse último aspecto, novamente o conhecimento técnico, representado pela variável relativa ao ensino superior, mostrou-se positivamente relacionado à prática de irrigação.

A variável indicadora de produtores localizados no Nordeste foi estatisticamente significativa, indicando que, se pequeno produtor realiza suas atividades naquela região, sua probabilidade de irrigar é diminuída. Esperava-se, a princípio, que essa relação fosse positiva, devido às condições climáticas da região, caracterizadas por altas temperaturas e baixa precipitação. Contudo, o sinal negativo pode estar relacionado a características específicas da região, como a menor disponibilidade de assistência técnica ou de empresas de irrigação. Porém, acredita-se que a principal explicação pode estar relacionada à baixa eficácia das políticas de irrigação direcionadas à região. Coelho Neto (2009) ressalta que, apesar de sempre ter havido prioridade da Política Nacional de Irrigação em relação ao Nordeste, os resultados efetivos, em termos de ampliação do espaço irrigado, assinalam pequeno avanço quando comparado com as demais regiões do país. O autor explica ainda que a expansão da área irrigada no Nordeste é insatisfatória em relação às potencialidades concretas identificadas pelos diversos estudos produzidos pelo governo.

Esperava-se que a variável *Pronaf* tivesse efeito significativo sobre a decisão de irrigar, já que se trata de importante fonte de crédito para a aquisição de máquinas, equipamentos ou infraestrutura de produção. No entanto, o coeficiente estimado não foi estatisticamente significativo, o que pode estar indicando baixa expressividade de créditos do PRONAF destinados especificamente a projetos de irrigação.

Em linhas gerais, o estudo dos fatores associados à prática de irrigação por pequenos agricultores apresentou resultados semelhantes à análise para a totalidade dos

produtores, apresentada na seção 6.2. A decisão é igualmente afetada pelas alterações climáticas, disponibilidade hídrica, condições de solo e por fatores socioeconômicos. Entretanto, características específicas a pequenos estabelecimentos agropecuários, como o acesso a créditos do PRONAF, parecem não ter efeito significativo sobre a decisão de irrigar.

6.6.3. Efeito da irrigação sobre o desempenho de pequenos produtores no período atual

Após a estimação do modelo probit, realizou-se o pareamento entre as AMC's irrigantes e não irrigantes, considerando a proximidade de suas características observáveis. A partir desse procedimento, foi possível avaliar o retorno associado à decisão de irrigar de produtores com até 10 hectares. Dessa forma, calculou-se o efeito da irrigação sobre o valor da terra de pequenos agricultores. O resultado está apresentado na Tabela 20.

Tabela 20 – Estimativa do efeito de tratamento (ETM_I) no Brasil, modelo para pequenos produtores

Variável de resposta	Irrigantes	Produtores de sequeiro	Diferença	P-valor
Valor da Terra	8.780,59	12.379,93	-3.599,34***	0,0000

Notas: (1) A variável *Valor Terra* está cotada em 1.000 R\$ (valores referentes ao Censo Agropecuário 2006); (2) ETM_I calculado pelo método *kernel*; (3) P-valor baseado no erro padrão calculado por *bootstrap*; (4) (***) indica significância a 1%.

Assim como no resultado da amostra que considerou a totalidade dos estabelecimentos agropecuários brasileiros (Tabela 8), no período atual, pequenos produtores irrigantes têm retornos menores que na produção de sequeiro. Essa diferença é estatisticamente significativa a menos de 1%. As justificativas mais prováveis para esse resultado são apresentadas a seguir.

Inicialmente, pode-se falar da baixa adoção de irrigação entre pequenos agricultores. Conforme o Censo Agropecuário 2006 (IBGE, 2006), o país tem aproximadamente 2,4 milhões de estabelecimentos agropecuários com até 10 hectares de área. Desses, pouco mais de 250 mil (cerca de 10%) utilizam algum tipo de técnica de irrigação. O principal entrave para expandir esse número está relacionado,

certamente, aos custos para implantar, operar e manter o sistema. Já foi discutido nesse capítulo (seção 6.3) que no Brasil, atualmente, a produção irrigada tem suas vantagens limitadas em função dos seus custos. Esse aspecto torna-se ainda mais dramático para pequenos produtores devido à sua reduzida capacidade de investimento.

Outro fator que poderia estar relacionado ao maior retorno dos produtores de sequeiro é a natureza da irrigação praticada por parcela substancial de pequenos agricultores. A técnica mais utilizada, em 38% dos estabelecimentos, é a que foi denominada pelo Censo Agropecuário 2006 (IBGE, 2006) de “molhação”, ou seja, regas manuais com a utilização de regadores, mangueiras, baldes e latões²⁹. O emprego desse tipo rudimentar de irrigação certamente está relacionado à produção de subsistência e, portanto, não visa o aumento da produtividade ou obtenção de mais de uma safra anual, tampouco a adaptação às mudanças climáticas.

Assim sendo, atribui-se o resultado apresentado na Tabela 20 principalmente à baixa adoção de irrigação, seus altos custos e a natureza da técnica empregada nos estabelecimentos agropecuários com até 10 hectares. Não obstante, é preciso analisar se, diante dos cenários de mudança climática, a irrigação poderá se tornar uma opção vantajosa também para os pequenos produtores.

Para validar as inferências feitas acima, é preciso verificar a qualidade do pareamento. Novamente, a análise foi baseada no teste do Pseudo R2, redução do viés padronizado e identificação de existência de viés por variáveis omitidas. De modo geral, o modelo atendeu aos critérios de distribuição balanceada das variáveis explicativas e não foi influenciado por variáveis omitidas. Pode-se afirmar que a estimação foi adequadamente realizada e, dessa forma, assegura-se a validade estatística das inferências até então feitas³⁰.

²⁹ Deve-se salientar que entre os pequenos produtores não são usadas apenas técnicas rudimentares de irrigação. Segundo o Censo Agropecuário 2006, em 35% dos estabelecimentos agropecuários com até 10 hectares que irrigam são empregados métodos de aspersão (exceto pivô central).

³⁰ Como a interpretação do testes é idêntica àquela da seção 6.4, optou-se por apresentar seus resultados no Anexo (Tabelas A5, A6 e A7).

6.6.4. Simulações de mudança climática: modelo para pequenos produtores

Os pequenos produtores estarão igualmente expostos às mudanças na temperatura e na precipitação previstas para o Brasil pelos cenários futuros de mudança climática (Tabela 12). Todavia, acredita-se que sua vulnerabilidade é maior que a média do setor, já que são mais dependentes da produção agrícola e menos preparados para empreender ações de adaptação. Nessa seção, portanto, foi testada a validade dessas hipóteses e verificado o papel da irrigação nesse processo.

A Tabela 21 apresenta as estimativas médias do valor da terra para estabelecimentos agropecuários com até 10 hectares, para cada período de tempo e cenário climático, considerando irrigantes e produtores de sequeiro.

Tabelas 21 – Estimativas do efeito das mudanças climáticas sobre o valor médio da terra de irrigantes e produtores de sequeiro, modelo para pequenos produtores

Variável de resposta	Irrigantes	Produtores de sequeiro	Diferença	P-valor
Período Atual				
Valor Terra	8.780,59	12.379,93	-3.599,34***	0,0000
Cenário A1B				
Valor Terra (2020)	10.578,71	4.951,34	5.627,38***	0,0000
Valor Terra (2050)	10.575,46	4.885,44	5.690,02***	0,0000
Valor Terra (2080)	10.567,44	4.841,43	5.726,01***	0,0000
Cenário A2				
Valor Terra (2020)	10.578,71	4.968,00	5.610,72***	0,0000
Valor Terra (2050)	10.578,00	4.999,81	5.578,19***	0,0000
Valor Terra (2080)	10.575,65	4.848,90	5.726,74***	0,0000

Notas: (1) A variável *Valor Terra* está cotada em 1.000 R\$ (valores referentes ao Censo Agropecuário 2006); (2) ETM_I calculado pelo método *kernel*; (3) P-valor baseado no erro padrão calculado por *bootstrap*; (4) (***) indica significância a 1%.

Verifica-se na Tabela 21 que, nos estabelecimentos agropecuários com até 10 hectares que continuarem praticando agricultura de sequeiro, poderá haver considerável prejuízo em relação à produção irrigada. Para todos os períodos de simulação, espera-se que o valor médio da terra de pequenos produtores irrigantes seja aproximadamente o dobro do valor de sequeiro. Em relação ao valor estimado para o período atual (Tabela

20), as perdas para a produção não irrigada poderiam chegar a cerca de R\$7,4 milhões já nos próximos 30 anos (período de 2010 a 2039).

A variação dos valores da terra de estabelecimentos agropecuários com até 10 hectares que praticam irrigação ou agricultura de sequeiro (Tabela 21), em relação às estimativas do período atual (Tabela 20), é apresentada na Tabela 22 e na Figura 14.

Tabela 22 – Variação percentual do valor da terra estimado em cada período futuro e cenário climático em relação ao valor estimado para o período atual, modelo para pequenos produtores

Variável de resposta	Cenário A1B		Cenário A2	
	Irrigantes	Produtores de Sequeiro	Irrigantes	Produtores de Sequeiro
$\Delta\%$ Valor Terra (2020)	20,48	-60,01	20,48	-59,87
$\Delta\%$ Valor Terra (2050)	20,44	-60,54	20,47	-59,61
$\Delta\%$ Valor Terra (2080)	20,35	-60,89	20,44	-60,83

Se os produtores com até 10 hectares utilizarem irrigação, espera-se aumento do valor da terra, que pode chegar a 20,5% em 2020 e 2050, e a 20,4% em 2080. Para a pequena produção não irrigada, são esperadas reduções do valor da terra da ordem de 60% em 2020, de 60,5% em 2050 e de 61% em 2080. Seo e Mendelsohn (2008a), utilizando a modelagem hedônica tradicional, estimaram que os pequenos produtores da América do Sul poderiam ter perdas de até 44%.

Esses valores permitem a construção de um cenário de impactos das mudanças climáticas bastante distinto ao da média da produção agrícola brasileira, descrito na seção 6.5. Inicialmente, sobre o aumento no valor da terra de irrigantes, acredita-se que os resultados sejam consequência dos ganhos de produtividade. Como, em geral, pequenos produtores são pouco produtivos, a utilização de irrigação tenderia a aumentar sua produtividade numa proporção superior à da média dos demais tipos de agricultores. Além disso, o valor da terra de pequenos agricultores pode ter dinâmica diferenciada. Se esses produtores estiverem localizados mais próximos ao meio urbano ou se realizam cultivos de maior valor de mercado, como, por exemplo, a agricultura orgânica, faz sentido que os ganhos em termos de valor da terra sejam mais expressivos.

Já as perdas, consideravelmente maiores, podem estar relacionadas à maior dependência desses produtores em relação à produção agrícola e ao fato de a maior

parcela dos estabelecimentos com até 10 hectares estar localizada no Nordeste (cerca de 60%). Essa região será a que sofrerá os maiores efeitos negativos das alterações futuras do clima. Segundo Margulis e Dubeux (2010), as principais culturas produzidas no Nordeste, notadamente as de subsistência, sofrerão forte impacto negativo devido à elevação da temperatura à redução da oferta de recursos hídricos; sem nenhum tipo de adaptação, as áreas de cultivo dos estados nordestinos podem ser consideravelmente reduzidas.

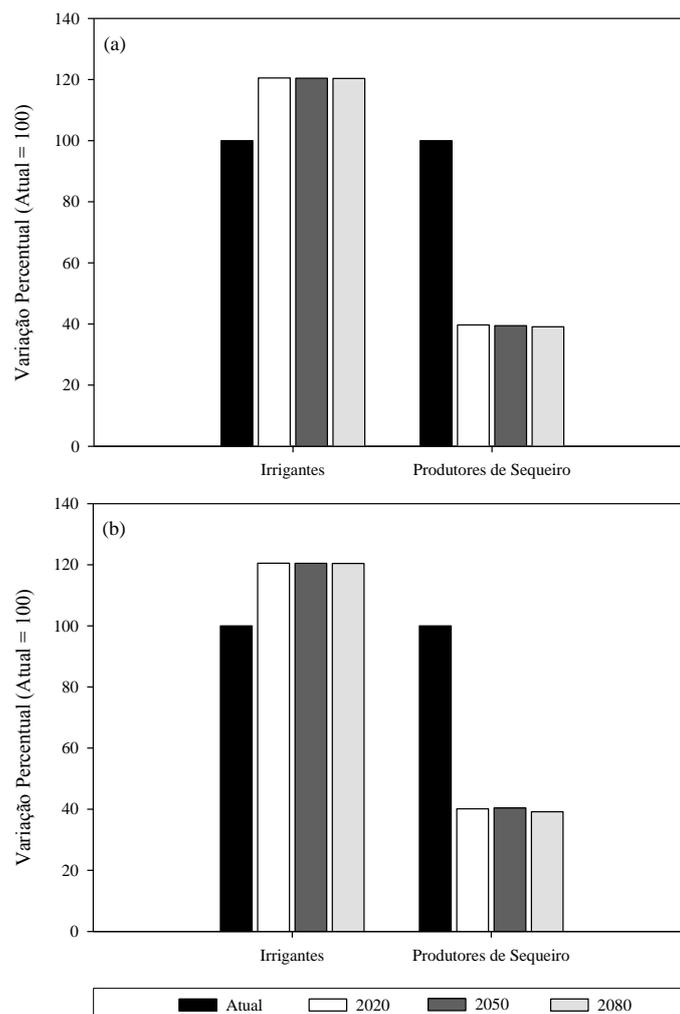


Figura 14 – Variações percentuais do valor da terra de irrigantes e produtores de sequeiro em relação ao período atual, cenários A1B (a) e A2 (b), modelo para pequenos produtores.

Os resultados dessa seção confirmam, novamente, que a irrigação configura-se como efetiva medida de adaptação. Embora no período presente, como esta pesquisa

tem mostrado, seus retornos ainda não sejam tão expressivos, é possível afirmar que, sob cenários futuros de mudanças climáticas, os benefícios serão superiores aos seus custos.

A confirmação de que pequenos produtores possivelmente terão impactos negativos superiores aos da média do setor agrícola pode trazer uma série de consequências adversas ao país, uma vez que, de acordo com o Censo Agropecuário 2006 (IBGE, 2006), cerca de 50% dos estabelecimentos agropecuários do Brasil têm produções agrícolas realizadas em áreas com, no máximo, 10 hectares. Além disso, conforme Speranza e Féres (2010), a pequena produção agrícola é uma das principais fontes de emprego no meio rural. Embora só responda por 30% do uso da terra, é responsável por aproximadamente 77% de toda a mão de obra empregada, sendo que em algumas regiões, como Norte, Nordeste e Sul, esse percentual é ainda mais alto. Dessa forma, os impactos negativos previstos nesta pesquisa podem desencadear desequilíbrios no mercado de trabalho rural, com efeitos diretos sobre os níveis de migração e o nível geral de bem-estar e segurança alimentar da sociedade.

7. RESUMO E CONCLUSÕES

As mudanças climáticas globais têm sido amplamente discutidas nas últimas décadas. Cada vez mais há concordância de que os aumentos de temperatura e variações na precipitação e na frequência e severidade de eventos climáticos extremos são consequência direta das atividades antrópicas. Esse fenômeno tem desafiado pesquisadores das diversas áreas do conhecimento, uma vez que envolve considerações sobre biologia, física, química, ecologia, geopolítica, demografia, direito, economia etc. O desafio da economia das mudanças climáticas tem sido oferecer respostas confiáveis a respeito da direção e magnitude dos impactos nos diversos setores econômicos e sobre quanto, como e quando se deve investir em mitigação e adaptação. Sabe-se que as diversas atividades econômicas e regiões mundiais serão impactadas distintamente. Para o setor agrícola de países em desenvolvimento esperam-se os maiores efeitos negativos.

No Brasil, o estudo dos impactos das mudanças climáticas sobre o setor agrícola tem ganhado visibilidade desde meados da década de 1990. As distintas análises indicam que o país sofrerá perdas econômicas, que podem variar de valores modestos no curto prazo até grandes prejuízos no longo prazo. E esta questão é de importância estratégica, ao se considerar que a produção agropecuária responde por parcela expressiva da renda nacional. As perdas na agricultura podem trazer outros problemas, como o aumento da pobreza rural e suas consequências nas cidades, que terão que receber milhares de migrantes. Trata-se, portanto, de um desafio para os formuladores de políticas públicas.

Nesse sentido, o presente estudo procurou realizar uma análise dos efeitos das mudanças climáticas sobre o setor agrícola do país, incluindo as estratégias de adaptação na estimativa dos impactos. Partiu-se da pressuposição, amplamente discutida na literatura, de que os agricultores realizarão medidas adaptativas para minimizar as perdas esperadas pelas mudanças climáticas. A estratégia adaptativa considerada foi a irrigação, já que o país tem ampla disponibilidade de água e condições favoráveis para o desenvolvimento sustentável dessa atividade.

O estudo foi fundamentado na visão teórica de que a vulnerabilidade de um setor é condicionada pela magnitude das alterações do clima e também pela sua capacidade de empreender ações de adaptação. Em outras palavras, assume-se que os fatores climáticos não são os únicos a determinar a exposição do setor, uma vez que esta é influenciada pelos recursos naturais e o grau de desenvolvimento da sociedade em questão. Além disso, o modelo econômico utilizado procura explicar a decisão de irrigar dos produtores como um processo de maximização de benefícios, no qual somente são observadas escolhas ótimas.

Analiticamente, utilizou-se o modelo de Efeito de Tratamento, por meio da estimação do Pareamento por Escore de Propensão, que permitiu avaliar os retornos da prática de irrigação e compará-los aos da produção de sequeiro. As previsões futuras das variáveis climáticas consideradas (temperatura e precipitação) se referem a três períodos de 30 anos (de 2010 a 2039, de 2040 a 2069 e de 2070 a 2099), sob dois cenários de mudanças climáticas (A1B e A2).

A análise dos fatores associados à adoção de irrigação no Brasil indicou que condições agronômicas, socioeconômicas e climáticas influenciam a sua prática. O acesso aos recursos hídricos e a existência de terras em boas condições para a prática agrícola são importantes. A decisão do produtor ainda é condicionada pelo seu conhecimento técnico e capacidade de gerenciamento, o que envolve entendimento sobre o potencial e limites da técnica, assim como sua operação e funcionamento. Boas condições de renda do estabelecimento são fundamentais, uma vez que a instalação de um sistema de irrigação envolve, geralmente, elevados custos; ademais, os recursos financeiros são também importantes para a modernização dos equipamentos de irrigação. Confirmou-se a expectativa de que a irrigação é influenciada pelas variações climáticas e, dessa forma, pode efetivamente ser modelada como estratégia adaptativa.

Dadas as condições atuais, a irrigação tem sido adotada mais como resposta à redução da precipitação do que às variações de temperatura.

A probabilidade de irrigar apresentou diferenças consideráveis entre as regiões, o que é explicado pelas distintas condições climáticas e diferentes estruturas de produção. Em termos das alterações futuras do clima, pode-se concluir que há expectativa de aumento na probabilidade de irrigar nos próximos 30 anos (2010 a 2039) em todas as regiões brasileiras. No entanto, essa tendência é revertida no longo prazo; para cenários climáticos nos períodos de 2040 a 2069 e de 2070 a 2099 a probabilidade de irrigar diminuirá. Esse resultado está associado às previsões de mudança climática utilizadas, que projetam grandes aumentos de precipitação e de temperatura.

Todo o país terá probabilidade de irrigar com tendência de redução, ainda que de modo menos expressivo no Sudeste e no Sul. Essas são regiões de agricultura mais consolidada, que produzem com os maiores rendimentos e retornos. Esse resultado permite concluir que produtores mais capitalizados são os que têm mais condições de investir em tecnologias de irrigação, fazendo com que sejam potencialmente menos afetados pelos efeitos adversos das mudanças climáticas.

No que se refere ao efeito da irrigação sobre os rendimentos dos produtores, os resultados apontam duas conclusões distintas. No período atual, foram estimados retornos maiores para a produção de sequeiro. Essa resposta está diretamente ligada aos custos elevados de implantação de um sistema de irrigação, fazendo com que essa forma de organização da produção seja menos rentável. Ademais, isso provavelmente se dá porque muitos agricultores utilizam a prática sem se preocuparem com o manejo da água e com os demais fatores que são necessários para que se produza eficientemente sob irrigação. Não obstante, quando se considera os cenários futuros de mudanças climáticas, o resultado se inverte, ou seja, a renda dos irrigantes tende a ser crescente e mais estável.

Diferentemente de outros estudos, que estimam perdas elevadas para toda a agricultura brasileira, neste trabalho conclui-se que os produtores que utilizarem a irrigação terão lucros crescentes no médio e longo prazos. Produtores de sequeiro, por outro lado, serão impactados negativamente, podendo ter seus ganhos reduzidos em até 14% do valor atual. Por conseguinte, face às previsões de mudanças climáticas, conclui-se, portanto, que a irrigação tem potencial de contribuir para melhorar o desempenho agrícola do país, tornando os produtores menos vulneráveis ao clima. Confirma-se,

assim, a necessidade de incluir medidas adaptativas na estimacão, possibilitando uma avaliao completa do que realmente vai acontecer.

Conclusões semelhantes são obtidas para pequenos produtores, indicando que, se empreenderem estratégias adaptativas, ficarão menos expostos aos efeitos adversos de alteraes futuras do clima. Em sentido oposto, as perdas esperadas para a produo de sequeiro são consideravelmente maiores do que os impactos médios do setor agrícola, já que grande parte desses produtores sequer tem consciência das mudanças climáticas que estão por vir.  necessário, dessa forma, implementar um programa de capacitao de pequenos agricultores, criando condies para que eles possam se adaptar.

De modo geral, os resultados desta pesquisa permitem concluir que o cenário não será tão pessimista para o setor agrícola do Brasil quando se consideram os impactos das mudanças climáticas. Ao mesmo tempo, reforçam a necessidade da formulao de políticas públicas que busquem estratégias de combate aos efeitos do aquecimento global no setor, já que pequenos produtores serão bastante prejudicados. Ademais, dada a comprovao da importância da irrigao como medida adaptativa, deve-se incentivar a expansão das políticas de crédito específicas para a implementao dessa prática, principalmente para os produtores menos capitalizados.

Por fim, este trabalho não teve a pretensão de oferecer uma resposta definitiva a respeito dos efeitos das mudanças climáticas no setor agrícola brasileiro, tampouco sobre as práticas de adaptao possíveis no país.  necessário ressaltar algumas limitaes do estudo. Primeiramente, não foi possível incluir a disponibilidade hídrica futura no modelo. A quantidade de água disponível para os diversos usos consuntivos provavelmente vai se modificar, o que traz implicaes para a irrigao. Este estudo também não capta toda a gama de adaptaes que podem ser realizadas, tampouco os efeitos da fertilizao por carbono. Ao pressupor porões fixas de terra, não foi possível analisar como serão as mudanças no padrão de uso da terra em termos agrícolas e não agrícolas. Ademais, por ser um estudo de equilíbrio parcial, não permite verificar as implicaes desses resultados em termos de encadeamento sobre outros setores da economia. Sugere-se que futuros trabalhos levem em considerao essas questões.

REFERÊNCIAS

ADAMS, R.; GLYER, D.; McCARL, B. The economic effects of climate change in US agriculture: a preliminary assessment. In: TIRPAK, D.; SMITH, J. (Eds.). **The potential effects of global climate change in the United States: report to congress**. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 1989.

ADAMS, R.; ROSENZWEIG, C.; PEART, R. M.; RITCHIE, J. T.; MCCARL, B.; GLYER, D.; CURRY, R. B.; JONES, J. W.; BOOTE; K. J.; ALLEN JR, L. H. Global climate change and US agriculture. **Nature**, v. 345, n. 6272, p. 219-224, 1990.

ADAMS, R.; FLEMING, R. A.; CHANG, C; McCARL, B.; ROSENZWEIG, C. A reassessment of the economic effects of global climate in US agriculture. **Climatic Change**, v. 30, n. 2, p. 147-167, 1995.

ADAMS, R.; McCARL, B.; SEGERSON, K.; ROSENZWEIG, C.; BRYANT, K. J.; DIXON, B. L.; CONNER, R.; EVENSON, R. E.; OJIMA, D. The economic effects of climate change on US agriculture. In: MENDELSON, R.; NEUMANN, J. (Eds.). **The economic impact of climate on the economy of the United States**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1998.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2009**. Brasília: ANA, 2009.

ANDERSON, K; REIS, E. **The effects of climate change on Brazilian agricultural profitability and land use: cross-sectional model with census data**. Final report to WHRC/IPAM for LBA project Global Warming, Land Use, and Land Cover Changes in Brazil. 2007.

ANDRADE, C. L. T. **Seleção do sistema de irrigação**. Circular Técnica 14. Embrapa. 2001. Disponível em: <http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/publica/2001/circular/Circ_14.pdf>. Acesso em: abr. 2010.

ASSUNÇÃO, J. J.; CHEIN, F. Climate change, agricultural productivity and poverty. In: Latin American and Caribbean Economic Association Annual Meeting - LACEA, 2008, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: LACEA, 2008.

ÁVILA, A. F. D.; IRIAS, L. J. M.; LIMA, M. **Impacto das mudanças climáticas na agricultura brasileira**. Brasília: Embrapa, 2006.

BANCO DO NORDESTE. **A importância do agronegócio da irrigação para o desenvolvimento do Nordeste**. Fortaleza: Banco do Nordeste, 2001.

BAUMERT, K. A.; HERZOG, T.; PERSHING, J. **Navigating the numbers: greenhouse gas data and international climate policy**. Washington, DC: World Resources Institute, 2005.

BECKER S. O.; ICHINO, A. Estimation of average treatment effects based on propensity score. **The Stata Journal**, v. 2, n. 4, p. 358-377, 2002.

BERNARDO, S. Impacto ambiental da irrigação no Brasil. In: SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. (Eds.). **Recursos hídricos e desenvolvimento sustentável da agricultura**. Brasília: MMA/SRH/ABEAS, 1997. p. 79-88.

BRITO, M. S. O Programa Nacional de Irrigação: uma avaliação prévia dos resultados. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 53, n. 2, p. 113-125, 1991.

BROOKS, N. ADGER, N. Assessing and enhancing adaptive capacity. In: LIM, B.; SPANGER-SIEGFRIED, E.; BURTON, I.; MALONE, E. L.; HUQ, S. (Eds.). **Adaptation policy frameworks for climate change**. New York: Cambridge University Press, 2005. p. 165-182.

BRYSON, A.; DORSETT, R.; PURDON, S. **The use of propensity score matching in the evaluation of active labour market policies**. Working Paper Number 4, Policy Studies Institute and National Centre for Social Research, 2002. Disponível em: <<http://eprints.lse.ac.uk/4993/>>. Acesso em jan. 2011.

CALIENDO, M.; KOPEINIG, S. **Some practical guidance for the implementation of propensity score matching**. Discussion paper nº 1588. Bonn: IZA, 2005.

CAMERON, A. C.; TRIVEDI, P. K. **Regression analysis of count data**. New York: Cambridge University Press, 2005.

CHRISTOFIDIS, D. Água na produção de alimentos: o papel da academia e da indústria no alcance do desenvolvimento sustentável. **Revista Ciências Exatas**, v. 12, n. 1, p. 37-46, 2006.

CHRISTOFIDIS, D. O futuro da irrigação e a gestão das águas. **Item**, n. 80, p. 40-47, 2008.

CHRISTOFIDIS, D. **Agricultura irrigada e desenvolvimento regional no Brasil**. 2009. Disponível em: <http://www.arrozeirosdealegrete.com.br/seminagricirrig_demetrius_christofidis.pdf>. Acesso em jan. 2010.

CLINE, W. R. **Global warming and agriculture: impact estimates by country**. Washington, DC: Peterson Institute for International Economics, 2007.

CLINE, W. R. The impact of global warming on agriculture: comment. **The American Economic Review**, v. 86, n. 5, p. 1309-1311, 1996.

COELHO, E.; COELHO FILHO, M.; SIMÕES, W.; COELHO, Y. Irrigação em citrus nas condições do nordeste do Brasil. **Laranja**, v. 27, n. 2, p. 297-320, 2006.

COELHO NETO, A. S. Trajetórias e direcionamentos da política de irrigação no Brasil: as especificidades da região Nordeste e do Vale do São Francisco. In: XIX Encontro Nacional de Geografia Agrária, 2009, São Paulo - SP. **Anais...** São Paulo: USP, 2009.

DARWIN, R. The impact of global warming on agriculture: a Ricardian analysis: comment. **The American Economic Review**, v. 89, n. 4, p. 1049-1052, 1999.

DERESSA, T.; HASSAN, R. M.; RINGLER, C. **Measuring Ethiopian Farmers' Vulnerability to Climate Change Across Regional States**. IFPRI Discussion Paper 00806, 2008. Disponível em: <<http://www.ifpri.org/sites/default/files/publications/ifpridp00806.pdf>>. Acesso em nov. 2009.

DÊSCHENES, O.; GREENSTONE, M. The economic impacts of climate change: evidence from agricultural output and random fluctuations in weather. **The American Economic Review**, v. 97, n. 1, p. 354-385, 2007.

DIAS, P. L. S.; RIBEIRO, W. C.; NUNES, L. H. (Eds). **A contribution to understanding the regional impacts of global change in South America**. São Paulo: Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo, 2007.

DIPRETE, T. A.; GANGL, M. **Assessing bias in the estimation of causal effects: Rosenbaum bounds on matching estimators and instrumental variables estimation with imperfect instruments**. Discussion paper SP I 2004-101. Berlin: WZB, 2004. Disponível em: <http://www.wjh.harvard.edu/~cwinship/cfa_papers/HBprop_021204.pdf>. Acesso em jan. 2011.

EASTERLING, W. E.; AGGARWAL, P. K.; BATIMA, P.; BRANDER, L. M.; ERDA, L.; HOWDEN, S. M. Food, fibre and forest products. In: PARRY, M. L.; CANZIANI, O. F.; PALUTIKOF, J. P.; VAN DER LINDEN, P. J.; HANSON, C. E. (Eds.). **Climate Change 2007: impacts, adaptation, and vulnerability – contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. p. 273-313.

EASTERLING, W. E.; CROSSON, P. R.; ROSENBERG, N. J.; MCKENNEY, M.S.; KATZ, L. A.; LEMON, K. M. Agricultural impacts of and responses to climate change in the Missouri-Iowa-Nebraska-Kansas (MINK) region. **Climatic Change**, v. 24, n. 1-2, p. 23-61, 1993.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Aquecimento Global e a nova Geografia da Produção agrícola no Brasil**. 2008. Disponível em <www.embrapa.br/publicacoes/tecnico/aquecimentoglobal.pdf>. Acesso em: jul. 2009.

EVENSON, R. E.; ALVES, D. C. O. Technology, climate change, productivity and land use in Brazilian agriculture. **Planejamento e Políticas Públicas**, v. 18, p. 223-258, 1998.

FÉRES, J.; REIS, E.; SPERANZA, J. Assessing the Impact of Climate Change on the Brazilian Agricultural Sector. In: 16th Annual EAERE Conference, 2008, Gothenburg. **Proceedings of the 16th Annual EAERE Conference**. Gothenburg: EAERE, 2008.

FÉRES, J.; REIS, E.; SPERANZA, J. Mudanças climáticas globais e seus impactos sobre os padrões de uso do solo no Brasil. In: XLVII Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural, 2009, Porto Alegre - RS. **Anais...** Brasília: SOBER, 2009.

FISHER, A. C.; HANEMANN, W. M.; ROBERTS, M. J.; SCHLENKER, W.; **Climate change and agriculture reconsidered**. Disponível em: <<http://www.columbia.edu/~ws2162/agClimateChange/agClimateChange.pdf>>. Acesso em ago. 2009.

GÖEPFERT, H., ROSSETTI, L. A., SOUZA, J. **Eventos generalizados e segurança agrícola**. Brasília: IPEA, 1993.

GOUVÊA, J. R. F. **Mudanças climáticas e a expectativa de seus impactos na cultura da cana-de-açúcar na região de Piracicaba, SP**. 98 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2008.

GUJARATI, D. N. **Econometria Básica**. 8. ed. Sao Paulo: Makron Books, 2000. 846 p.

HANEMANN, M. **What is the economic cost of climate change?** 2008. Disponível em: <<http://escholarship.org/uc/item/9g11z5cc>>. Acesso em: dez. 2009.

HE, X.; CAO, H.; LI, F. Econometric analysis of the determinants of adoption of rainwater harvesting and supplementary irrigation technology (RHSIT) in the semiarid Loess Plateau of China. **Agricultural Water Management**, v. 89, p. 243-250, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo Agropecuário 2006: Brasil, Grandes Regiões e Unidades da Federação**. Rio de Janeiro: IBGE. 2006.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** PACHAURI, R. K.; REISINGER, A. (Eds.). Geneva, Switzerland: IPCC, 2007.

ITABORAHY, C. R. **Agricultura irrigada: estudo técnico preliminar.** Brasília: Agência Nacional de Águas/MMA. 2004.

ITABORAHY, C. R.; COUTO, L.; SANTOS, D. G.; PRETO, L. A.; RESENDE, L. S. **Agricultura irrigada e o uso racional da água.** Brasília: Agência Nacional de Águas/Superintendência de Conservação de Água e Solo. 2004.

KAISER, H. M.; RIHA, S. J.; WILKS, D. S.; ROSSITER, D. G.; SAMPATH, R. K. A farm-level analysis of economics and agronomic impacts of gradual warming. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 75, n. 2, p. 387-398, 1993.

KAUFMANN, R. K. The impact of climate change on US agriculture: a response to Mendelsohn et al. **Ecological Economics**, v. 26, n. 2, p. 113-119, 1994.

KOUNDOURI, P.; NAUGES, C.; TZOUVELEKAS, V. Technology adoption under production uncertainty: theory and application to irrigation technology. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 88, n. 3, p. 657-670, 2006.

KUMAR, K. S. K. Climate sensitivity of Indian agriculture. **Working Paper 43/2009 – Madras School of Economics**, 2009. Disponível em: <<http://www.mse.ac.in/pub/working%20paper%2043.pdf>>. Acesso em out. 2009.

KURUKULASURIYA, P.; MENDELSON, R.; HASSAN, R.; JAMES, K.; DERESSA, T.; DIOP, M.; EID, H.; FOSU, K.; GBETIBOUO, G.; JAIN, S.; MAHAMADOU, A.; MANO, R.; KABUBO-MARIARA, J.; EL-MARSAFAWY, S.; MOLUA, E.; OUDA, S.; OUEDRAOGO, M.; SÉNE, I.; MADDISON, D.; SEO, N.; DINAR, A. Will African Agriculture Survive Climate Change? **World Bank Economic Review**, v. 20, n. 3, p. 367-388, 2006.

KURUKULASURIYA, P.; MENDELSON, R. Endogenous irrigation: the impact of climate change on farmers in Africa. **World Bank Policy Research Working Paper 4278**. 2007. Disponível em: <http://www-wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/IW3P/IB/2007/07/06/000016406_20070706160116/Rendered/PDF/wps4278.pdf>. Acesso em out. 2009.

KURUKULASURIYA, P.; MENDELSON, R. Crop switching as a strategy for adapting to climate change. **African Journal of Agricultural and Resource Economics**, v. 2, n. 1, p. 105-126, 2008.

LONG, S. P.; AINSWORTH, E. A.; ROGERS, A.; ORT, D. R. Rising atmospheric carbon dioxide: plants face the future. **Annual Review of Plant Biology**, v. 55, n. 1, p. 591-628, 2004.

MAGRIN, G.; GARCIA, C. G.; CHOQUE, D. C.; GIMENEZ, J. C.; MORENO, A. R.; NAGY, G. J.; CARLOS, N.; VILLAMIZAR, A. Latin America. In: PARRY, M. L.; CANZIANI, O. F.; PALUTIKOF, J. P.; VAN DER LINDEN, P. J.; HANSON, C. E. (Eds.). **Climate Change 2007: impacts, adaptation, and vulnerability – Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. p. 581-615.

MARGULIS, S.; DUBEUX, C. B. S. **Economia da Mudança do Clima no Brasil: custos e oportunidades**. São Paulo: IBEP Gráfica, 2010.

MEARNS, L.; ROSENZWEIG, C; GOLDBERG, R. Mean and variance change in climate scenarios: methods, agricultural applications, and measures of uncertainty. **Climatic Change**, v. 35, n. 4, p. 367-396, 1997.

MENDELSON, R. Measuring the effect of climate change on developing country agriculture. In: Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO. **Two essays on climate change and agriculture: a developing country perspective**. Rome: FAO, 2000, p. 1-32.

MENDELSON, R. The impact of climate change on agriculture in developing countries. **Journal of Natural Resources Policy Research**, v. 1, n. 1, p. 5-19, 2009.

MENDELSON, R.; NORDHAUS, W.; SHAW, D. The impact of global warming on agriculture: Ricardian analysis. **The American Economic Review**, v. 84, n. 4, p. 753-771, 1994.

MENDELSON, R.; SEO, N. **Changing farm types and irrigation as an adaptation to climate change in Latin American agriculture**. World Bank Policy Research Working Paper 4161. 2007. Disponível em: <http://www-wds.worldbank.org/servlet/WDSContentServer/WDSP/IB/2007/03/06/000016406_20070306145501/Rendered/PDF/wps4161.pdf>. Acesso em out. 2009.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL – MI. **A irrigação no Brasil: situação e diretrizes**. Brasília: IICA, 2008.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL – MI. **Programa Desenvolvimento da Agricultura Irrigada**. Disponível em: <http://www.integracao.gov.br/programas/infrastrukturahidrica/index.asp?area=sih_desenvolvimento>. Acesso em jan. 2011.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL – MI. **Programa Eficiência na Agricultura Irrigada**. Disponível em: <http://www.integracao.gov.br/programas/infrastrukturahidrica/index.asp?area=sih_eficiencia>. Acesso em jan. 2011.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. **Caderno Setorial de Recursos Hídricos: agropecuária**. Brasília: MMA. 2006.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION – NOAA. **Trends in Atmospheric Carbon Dioxide – Global**. Disponível em: <<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>>. Acesso em out. 2009.

NEGRI, D. H.; GOLLEHON, N. R.; AILLERY, M. P. The effects of climatic variability on US irrigation adoption. **Climatic Change**, v. 69, n. 2-3, p. 299-323, 2005.

NOBEL, P. S. **Physicochemical and environmental plant physiology**. 4th ed. San Diego: Academic Press/Elsevier, 2009.

NOBRE, C. A.; ASSAD, E. D.; OYAMA, M. D. Mudança ambiental no Brasil: o impacto do aquecimento global nos ecossistemas da Amazônia e na agricultura. **Scientific American Brasil**, v. 80, p. 70-75, 2005.

NORDHAUS, W; BOYER, J. **Warming the world: economic modeling of global warming**. Cambridge: MIT, 2000.

PATT, A.; PETERSON, N.; CARTER, M.; VELEZ, M.; HESS, U.; SUAREZ, P. Adaptation in integrated assessment modeling: where do we stand? **Climatic Change**, v. 99, n. 3-4, p. 383-402, 2010.

PIDGEON; FISCHHOFF. The role of social and decision sciences in communicating uncertain climate risks. **Nature Climate Change**, v. 1, n. 1, p. 35-41, 2011.

PINTO, H. S.; ASSAD, E. D.; ZULLO JUNIOR, J.; ÁVILA, A. M. H. Variabilidade climática. In: HAMADA, E. (Ed.). **Água, agricultura e meio ambiente no Estado de São Paulo: avanços e desafios**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2003. cap. I, 1 CD-ROM.

QUIGGIN, J.; HOROWITZ, J. K. The impact of global warming on agriculture: a Ricardian analysis: comment. **The American Economic Review**, v. 89, n.4, p. 1049-1052, 1999.

REIS, E.; PIMENTEL, M.; ALVARENGA, A. I. **Áreas mínimas comparáveis para os períodos intercensitários de 1872 a 2000**. 2007. Disponível em: <<http://www.nemesis.org.br>>. Acesso em fev. 2010.

ROSENBAUM, P. R. **Observational Studies**. 2nd ed. New York: Springer, 2002.

ROSENBAUM, P. R.; RUBIN D. B. Constructing a control group using multivariate matched sampling methods that incorporate the Propensity Score. **The American Statistician**, v. 39, n. 1, p. 33-38, 1985.

ROSENBAUM, P. R.; RUBIN D. B. The Central role of the Propensity Score in observational studies for causal effects. **Biometrika**, v. 70, n. 1, p. 41-55, 1983.

SANGHI, A.; ALVES, D.; EVENSON, R.; MENDELSON, R. Global warming impacts on Brazilian agriculture: estimates of the Ricardian model. **Economia Aplicada**, v. 1, n. 1, p. 7-33, 1997.

SCALOPPI, E. J. Critério básico para seleção de sistemas de irrigação. **Informe Agropecuário**, v. 12, n. 139, p. 54-62, 1986.

SCHLENKER, W.; HANEMANN, W. M.; FISHER, A. C. Will U.S. agriculture really benefit from global warming? Accounting for irrigation in the hedonic approach. **The American Economic Review**, v. 95, n. 1, p. 395-406, 2005.

SCHLENKER, W.; HANEMANN, W. M.; FISHER, A. C. The impact of global warming on US agriculture: an econometric analysis of optimal growing conditions. **Review of Economics and Statistics**, v. 88, n. 1, p. 113-125, 2006.

SCHLENKER, W.; ROBERTS, M. J. **Estimating the impact of climate change on crop yields: the importance of nonlinear temperature effects**. NBER Working Paper 13799, 2008. Disponível em: <<http://www.nber.org/papers/w13799>>. Acesso em out. 2009.

SCHOENGOLD, K.; ZILBERMAN, D. The economics of water, irrigation, and development. In: EVENSON, R.; PINGALI, P. (Eds.). **Handbook of Agricultural Economics, Volume 3: Agricultural development: farmers, farm production and farm markets**. Amsterdam: North-Holland, 2007. p. 2933-2977.

SEO, N. A microeconomic analysis of adapting portfolios to climate change: adoption of agricultural systems in Latin America. **Applied Economic Perspectives and Policy**, v. 32, n. 3, p. 489-514, 2010.

SEO, N. An analysis of public adaptation to climate change using agricultural water schemes in South America. **Ecological Economics**, v. 70, n. 4, p. 825-834, 2011.

SEO, N.; MENDELSON, R. A Ricardian analysis of the impact of climate change on South American farms. **Chilean Journal Of Agricultural Research**, v. 68, n.1, p. 69-79, 2008a.

SEO, N.; MENDELSON, R. An analysis of crop choice: adapting to climate change in South American farms. **Ecological Economics**, v. 67, n. 1, p. 109-116, 2008b.

SEO, N.; MENDELSON, R. Measuring impacts and adaptation to climate change: a structural Ricardian model of African livestock management. **Agricultural Economics**, v. 38, n. 2, p. 151-165, 2008c.

SEVERINO, L. S.; LIMA, C. L. D.; BELTRÃO, N. E. M.; CARDOSO, G. D.; FARIAS, V. A. **Comportamento da mamoneira sob encharcamento do solo**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 57 – Embrapa Algodão, 2005.

SIANESI, B. An evaluation of the active labour market programmes in Sweden. **The Review of Economics and Statistics**, v. 86, n. 1, p. 133-155, 2004.

SILVA, H. R.; CHRISTOFIDIS, D.; MAROUELLI, W. A. Situação da irrigação no Brasil. In: **El riego en los países del Cono Sur**. Montevideo: IICA, 2010. p. 51-64.

SIQUEIRA, O. J. F.; FARIAS, J. R. B.; SANS, L. M. A. Efeitos potenciais de mudanças climáticas globais na agricultura brasileira e estudos de adaptação para trigo milho e soja. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 2, n. 1, p. 115-129, 1994.

SMITH, J. A critical survey of empirical methods for evaluating active labor market policies. **Schweizerische Zeitschrift fr Volkswirtschaft und Statistik**, v. 136, n. 3, p. 1-22, 2000.

SPERANZA, J. ; FERES, J. 2010. **Evaluating the long-term effects of global climate change on Brazilian agriculture according to farm size**. Working Paper Series No. 2010-WP19, Laceep, 2010. Disponível em: <http://www.laceep.org/images/stories/working_papers/2010-wp19_speranza.pdf> . Acesso em jan. 2011.

STERN, N. **The economics of climate change: the Stern review**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

STERN, N. The economics of climate change. **The American Economic Review**, v. 98, n. 2, p. 1-37, 2008.

TOL, R. S. J. Estimates of the damages costs of climate change – Part 1: Benchmark estimates. **Environmental and Resource Economics**, v. 21, n. 1, p. 47-73, 2002.

TURRAL, H.; SVENDSEN, M.; FAURES, J. M. Investing in irrigation: reviewing the past and looking to the future. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 4, p.551-560, 2010.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE – UNFCCC. **Text of the Convention**. Disponível em: <<http://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>>. Acesso em: out. 2009.

WANG, J.; MENDELSON, R.; DINAR, A.; HUANG, J.; ROZZELLE, S. **Can China continue feeding itself? The impact of climate change on agriculture**. World Bank Policy Research Working Paper 4470, 2008. Disponível em: <http://www-wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/IW3P/IB/2008/03/03/000158349_20080303090028/Rendered/PDF/wps4470.pdf>. Acesso em: jan. 2011.

ANEXOS

Tabela A1 – Modelos de Circulação Geral usados na construção da base de dados das projeções climáticas

Nome do GCM	Nome do Centro que produziu	País
CNRM_CM3	Meteo-France/Centre National de Recherches Meteorologiques, the third version of the ocean-atmosphere model (CM3 Model)	França
CSIRO Mark 3.0	CSIRO Atmospheric Research	Austrália
GFDL_CM2.1	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)	USA
GISS_ER	NASA Goddard Institute for Space Studies, ModelE20/Russell	USA
IPSL_CM4	IPSL/LMD/LSCE	França
MIROC3.2_medres	Center for Climate System Research, University of Tokyo (CCSR) / National Institute for Environmental Studies (NIES) / Frontier Research Center for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (FRCGC), medium resolution	Japão
MPI_ECHAM5	Max Planck Institute for Meteorology	Alemanha
MRI_CGCM2.3.2a	Meteorological Research Institute	Japão
UKMO_HADCM3	Hadley Center for Climate Prediction and Research / Met Office	UK
UKMO_HADGEM1	Centre Global Environmental Model, version 1 (HadGEM1) / Met Office	UK

Fonte: CPTEC/INPE.

Tabela A2 – Teste de heterocedasticidade

	Todos os produtores		Pequenos produtores	
	Estatística LM	P-valor	Estatística LM	P-valor
Modelo original	50,88	0,0000	5,54	0,0186
Modelo corrigido	1,74	0,1868	0,12	0,7261

Tabela A3 – Valores da probabilidade de irrigar (atual e simulações futuras) estimados para os estados brasileiros, cenário A1B

Estados	Período atual		2020		2050		2080	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
RO	0,99	0,0000	0,72	0,0000	0,57	0,0000	0,38	0,0000
AC	0,41	0,2080	0,71	0,0075	0,55	0,0093	0,35	0,0059
AM	0,40	0,1251	0,71	0,0244	0,56	0,0287	0,36	0,0353
RR	0,01	0,0000	0,62	0,0000	0,41	0,0000	0,19	0,0000
PA	0,48	0,1809	0,70	0,0133	0,55	0,0183	0,39	0,0178
AP	0,47	0,1035	0,71	0,0049	0,55	0,0063	0,38	0,0159
TO	0,37	0,1296	0,71	0,0144	0,55	0,0130	0,36	0,0283
MA	0,62	0,1821	0,71	0,0138	0,56	0,0255	0,41	0,0389
PI	0,49	0,1572	0,69	0,0201	0,51	0,0217	0,34	0,0313
CE	0,77	0,0970	0,70	0,0254	0,52	0,0383	0,35	0,0458
RN	0,78	0,0722	0,72	0,0210	0,55	0,0351	0,35	0,0369
PB	0,80	0,0699	0,73	0,0185	0,55	0,0327	0,36	0,0374
PE	0,78	0,0914	0,74	0,0204	0,56	0,0367	0,36	0,0425
AL	0,79	0,0979	0,75	0,0083	0,60	0,0205	0,41	0,0228
SE	0,79	0,0947	0,76	0,0095	0,61	0,0244	0,42	0,0343
BA	0,71	0,1124	0,77	0,0297	0,61	0,0526	0,41	0,0700
MG	0,80	0,0844	0,83	0,0150	0,70	0,0328	0,50	0,0507
ES	0,86	0,0797	0,83	0,0131	0,71	0,0248	0,53	0,0357
RJ	0,87	0,0980	0,84	0,0084	0,72	0,0097	0,56	0,0107
SP	0,83	0,1020	0,85	0,0195	0,72	0,0361	0,52	0,0514
PR	0,72	0,1395	0,88	0,0081	0,74	0,0164	0,55	0,0269
SC	0,64	0,1798	0,89	0,0084	0,76	0,0158	0,62	0,0318
RS	0,64	0,2134	0,90	0,0073	0,74	0,0213	0,60	0,0416
MS	0,76	0,2016	0,83	0,0207	0,65	0,0308	0,43	0,0378
MT	0,67	0,2397	0,74	0,0226	0,59	0,0197	0,38	0,0148
GO	0,73	0,1447	0,77	0,0265	0,59	0,0356	0,36	0,0324
DF	0,99	0,0000	0,76	0,0000	0,56	0,0000	0,33	0,0000

Tabela A4 – Valores da probabilidade de irrigar (simulações futuras) estimados para os estados brasileiros, cenário A2

Estados	2020		2050		2080	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
RO	0,7171	0,0000	0,5391	0,0000	0,2889	0,0000
AC	0,6978	0,0042	0,5075	0,0072	0,2893	0,0125
AM	0,7230	0,0178	0,5224	0,0222	0,2902	0,0312
RR	0,6386	0,0000	0,4124	0,0000	0,1317	0,0000
PA	0,7109	0,0192	0,5625	0,0182	0,3134	0,0216
AP	0,7037	0,0145	0,5474	0,0036	0,2961	0,0193
TO	0,7346	0,0141	0,5605	0,0175	0,3157	0,0281
MA	0,7249	0,0166	0,5677	0,0242	0,3372	0,0328
PI	0,7158	0,0128	0,5416	0,0164	0,2757	0,0245
CE	0,7092	0,0151	0,5277	0,0286	0,2737	0,0430
RN	0,7158	0,0149	0,5411	0,0345	0,2858	0,0382
PB	0,7232	0,0133	0,5486	0,0333	0,2883	0,0397
PE	0,7356	0,0122	0,5575	0,0331	0,2961	0,0426
AL	0,7500	0,0050	0,5866	0,0140	0,3422	0,0232
SE	0,7539	0,0091	0,5977	0,0244	0,3536	0,0343
BA	0,7522	0,0192	0,6047	0,0479	0,3394	0,0678
MG	0,8248	0,0181	0,6603	0,0307	0,3905	0,0430
ES	0,8271	0,0137	0,6886	0,0246	0,4417	0,0416
RJ	0,8383	0,0077	0,7048	0,0077	0,4738	0,0164
SP	0,8408	0,0213	0,6760	0,0485	0,4308	0,0515
PR	0,8730	0,0105	0,6927	0,0261	0,4447	0,0401
SC	0,8956	0,0087	0,7562	0,0252	0,5370	0,0459
RS	0,8974	0,0090	0,7321	0,0248	0,4847	0,0536
MS	0,8213	0,0204	0,5780	0,0359	0,3096	0,0467
MT	0,7488	0,0219	0,5432	0,0161	0,2987	0,0144
GO	0,7788	0,0199	0,5611	0,0238	0,2978	0,0258
DF	0,7695	0,0000	0,5394	0,0000	0,2677	0,0000

Tabela A5 – Análise da redução do viés padronizado para a amostra de AMC's pareadas e não pareadas, modelo para pequenos produtores

Variáveis	Amostra	Média		Redução do viés (%)
		Tratados	Controles	
Temperatura Verão	Não pareados	24,51	24,45	-228,40
	Pareados	24,49	24,29	
Temperatura Verão ²	Não pareados	604,43	601,66	-237,20
	Pareados	603,42	594,10	
Precipitação Verão	Não pareados	165,28	184,21	68,90
	Pareados	166,73	172,61	
Temperatura Inverno	Não pareados	20,17	20,19	-124,30
	Pareados	20,18	19,96	
Temperatura Inverno ²	Não pareados	421,35	422,96	-348,70
	Pareados	421,50	414,29	
Precipitação Inverno	Não pareados	53,02	59,27	65,00
	Pareados	51,58	53,77	
Variabilidade Temperatura	Não pareados	3,76	3,66	30,10
	Pareados	3,68	3,75	
Variabilidade Precipitação	Não pareados	5295,30	6032,60	70,30
	Pareados	5343,90	5562,80	
Recursos Hídricos	Não pareados	427,40	122,05	99,90
	Pareados	283,43	283,05	
Alto Potencial Agrícola	Não pareados	0,12	0,08	24,60
	Pareados	0,12	0,09	
Baixo Potencial Agrícola	Não pareados	0,55	0,60	-28,10
	Pareados	0,55	0,61	
Potencial Erosão	Não pareados	0,42	0,38	97,60
	Pareados	0,43	0,43	
Propriedade	Não pareados	616,64	195,83	91,8
	Pareados	452,64	418,12	
Acesso Internet	Não pareados	6,99	1,76	92,30
	Pareados	4,02	4,43	
Renda	Não pareados	5776,10	1717,90	82,30
	Pareados	3811,70	4530,70	
Ensino Superior	Não pareados	6,95	1,93	99,90
	Pareados	4,62	4,61	
Ensino Médio	Não pareados	399,89	118,31	97,60
	Pareados	268,23	261,39	
Pronaf	Não pareados	270,88	73,09	95,10
	Pareados	169,79	179,45	
Nordeste	Não pareados	0,35	0,28	71,30
	Pareados	0,36	0,33	

Tabela A6 – Teste do Pseudo R2 para qualidade do pareamento, modelo para pequenos produtores

Grupos	Pseudo R2	LR Chi2	P-valor
Não pareados	0,19	653,47	0,0000
Pareados	0,01	67,47	0,0000

Tabela A7 – Teste de sensibilidade do efeito de tratamento por meio dos limites de Rosenbaum, modelo para pequenos produtores

Variáveis	Γ	P-valor crítico
Valor Terra	1,0	0,0000
	1,1	0,0000
	1,2	0,0000
	1,3	0,0000
	1,4	0,0000
	1,5	0,0000