

DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO GLOBAL DE EQUILÍBRIO GERAL
COMPUTÁVEL PARA AVALIAÇÃO DE POLÍTICAS CLIMÁTICAS:
O PAPEL DA MUDANÇA DE DIETA

Bruno Scola Lopes da Cunha

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Planejamento Energético.

Orientadores: André Frossard Pereira de Lucena
Angelo Costa Gurgel

Rio de Janeiro

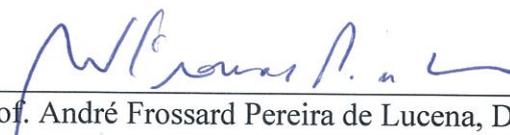
Maio de 2019

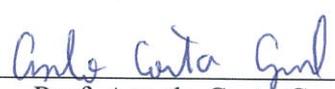
DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO GLOBAL DE EQUILÍBRIO GERAL
COMPUTÁVEL PARA AVALIAÇÃO DE POLÍTICAS CLIMÁTICAS:
O PAPEL DA MUDANÇA DE DIETA

Bruno Scola Lopes da Cunha

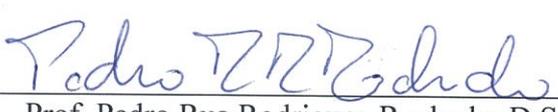
TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

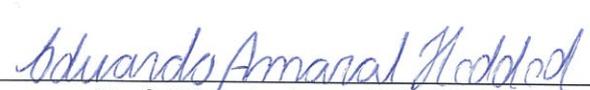
Examinada por:


Prof. André Frossard Pereira de Lucena, D.Sc.


Prof. Angelo Costa Gurgel, D.Sc.


Prof. Roberto Schaeffer, D.Sc.


Prof. Pedro Rua Rodriguez Rochedo, D.Sc.


Prof. Eduardo Amaral Haddad, D.Sc.


Dr. Jose Gustavo Feres, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MAIO DE 2019

Cunha, Bruno Scola Lopes da

Desenvolvimento de um Modelo Global de Equilíbrio Geral Computável para Avaliação de Políticas Climáticas: o Papel da Mudança de Dieta / Bruno Scola Lopes da Cunha – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XXI, 286 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: André Frossard Pereira de Lucena

Angelo Costa Gurgel

Tese (Doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 253-273.

1. Modelo de Equilíbrio Geral Computável. 2. Mudanças Climáticas. 3. Precificação de Emissões. 4. Mudança de Estilo de Vida. I. Lucena, André Frossard Pereira de *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

Não sei exatamente se ou como chegaremos onde precisamos ir,
mas sei que devemos definir as nossas melhores opções
com toda a paixão, poder e inteligência que temos.
Uma revolução é o que precisamos.
Em vez de esperar para ver o que acontece,
podemos ser o que acontece.
Amar a natureza é adorar a liberdade.
Crer na natureza é rebelar-se.

Ao meu primo Pietro Crescente Scola “In Memoriam”

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor André Frossard Pereira de Lucena pela orientação e pelos importantes conselhos que muito contribuíram para a minha formação acadêmica durante todos estes anos. Agradeço ao professor Angelo Costa Gurgel pela dedicação e excelente orientação que viabilizou o desenvolvimento do modelo, mesmo à distância. Agradeço também ao jovem professor Pedro Rua Rodriguez Rochedo pelo empenho em compartilhar seu vasto conhecimento. Ao professor Roberto Schaeffer pelo seu comprometimento em representar, com voz ativa, a ciência brasileira mundo afora, o que em muito contribui para elevar os limites do PPE, em especial, do laboratório Cenergia na busca de soluções para as mudanças climáticas. Aos professores Eduardo Haddad e José Feres, por aceitarem participar da banca examinadora e muito contribuírem para o desfecho deste trabalho.

Ao professor Alexandre Salem Szklo pela generosidade em compartilhar seu infinito conhecimento e visão de mundo. Ao colega Rafael Garaffa pela excelente parceria nesta empreitada de desenvolver e rodar modelo. A todos os grandes amigos que fiz no laboratório Cenergia, coordenadores, parceiros e colegas que tive um imenso privilégio de trabalhar e conviver durante estes últimos anos: Régis, Borba, David, Bettina, Joaquina, Rafa Soria, Hope, Eve, Mauro, Raul, Larissa, Bellinha, Alex, Mari (e Rafa), Camilla, Nanda, Milani, Cindy, Bela, Paula, Camila, Eduardo, Luan, Fábio A., Fábio T., Fran, Gerd, Rebeca, Camilo, Talita, Daniel, Julian... vocês são muitos! Aos amigos que fiz na COPPE: todos os professores do PPE; pessoal da secretaria, Sandrinha, Simone, Queila, Paulo, Fernando e Josi; pessoal do registro depois de tantas idas e vindas; pessoal do restaurante universitário; pessoal das aulas de vela; amigos de outros programas de pós-graduação...

Agradeço também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por financiar minha pesquisa e ajudar a manter a ciência viva no país. A ciência vive e evolui a partir do benefício da dúvida, do privilégio do debate e da possibilidade de discordância. Isso, no entanto, não deveria colocá-la em xeque, muito pelo contrário. A coloca como o melhor caminho, a melhor voz a ser creditada confiança.

Àqueles que fazem parte da minha grande família carioca e que sempre me deram aquela força para seguir em frente: Elói, Derick e Deborah, Amanda, Botelho, Ronaldo,

Thais, Sophia, Viola, Nicols e Leo, Lili e Zé, Ana, Gui, Flávio, Roberta, Isa, Renata... E mais recentemente e não menos importantes, meus conterrâneos Duda, Lari, Rafinha, Nati, Rafa Pinta, Rafa Behrends, sem esquecer, claro, Brin, Mário, Dolei, Malu, Giulia, Dudu, Filipe... encontro marcado. Galera da escalada que muito me ajudou a ter mais consciência corporal e controle da mente, em especial ao mestre Edu. Toda a galera do surf que é parceira em madrugar para pegar, em geral, ondas ruins, sabendo que isso é o menos importante, em especial ao amigo Lucas Zuch “*in memoriam*”. E, claro, toda a galera que eu praticamente só encontro no carnaval e, inevitavelmente, é sempre muito bom.

Agradeço ao pessoal do Youth Climate Leaders (YCL) que muito ainda vai ajudar na sensibilização da sociedade sobre os desafios das mudanças climáticas. Grandes amigos economistas da UFRGS que, mesmo à distância, proporcionam as velhas e boas risadas da época da faculdade, bem como participar de intensas discussões sobre Economia e Política. Agradeço também meus amigos de longa data que fiz no ensino médio do colégio Champagnat, em especial Thales, Jonathas, Seco, Pinto, Corona, Mozo, Mário.

Agradecimento sempre especial a família que só cresce nos já 7 anos de escola Kite&Surf: Lingue, Manu, Pita, Gutão, Pio, Jero, Chico, Johnny, Manuel, Alemão, Biel, Arthur, Pedro, Marina, Fê, Lou, Nicole, Flavinha, Maria Eduarda, Fernando, Petry, Leick, Ramon, Dudu, todos as famílias e todos os alunos.

A Duda Witt por todo o amor, apoio e compreensão. E, finalmente, à família que é a base de absolutamente tudo: meus avós, tios, primos e, sobretudo, meu pai, minha mãe e minha irmã. Amo vocês!

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc)

DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO GLOBAL DE EQUILÍBRIO GERAL
COMPUTÁVEL PARA AVALIAÇÃO DE POLÍTICAS CLIMÁTICAS:
O PAPEL DA MUDANÇA DE DIETA

Bruno Scola Lopes da Cunha

Maio/2019

Orientadores: André Frossard Pereira de Lucena
Angelo Costa Gurgel

Programa: Planejamento Energético

Diversos estudos têm reunido uma grande quantidade de evidências que mostram os efeitos das alterações climáticas sobre os sistemas naturais e a influência humana sobre o clima. Modelos de equilíbrio geral computável são utilizados pela comunidade científica, muitas vezes, em ferramentas de avaliação integrada, pois retratam o funcionamento da economia através da análise simultânea das interações existentes entre regiões, setores e agentes econômicos. Esta tese tem como objetivos: i) desenvolvimento e documentação de um modelo global de equilíbrio geral computável no âmbito das mudanças climáticas; e ii) simulação da metodologia proposta através de uma análise de cenários, num estudo de caso acerca do papel da mudança de dieta global oriunda de alterações no estilo de vida e induzida por precificação de emissões de GEE. Políticas climáticas, via instrumentos econômicos, devem ser planejadas com diligência, na busca de minimizar *trade-offs* relacionados à competitividade agropecuária e à segurança alimentar num futuro de baixo carbono. Embora resulte em penalizações a setores de produção de origem animal no Brasil e no mundo, alterações nas escolhas alimentares são essenciais para a sustentabilidade ambiental, econômica e social. A recusa da sociedade a uma mudança de dieta representa um custo de oportunidade em termos de mitigação de futuras emissões globais de GEE.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

DEVELOPMENT OF A GLOBAL COMPUTABLE GENERAL EQUILIBRIUM
MODEL FOR CLIMATE POLICY ASSESSMENT:
THE ROLE OF DIETARY CHANGE

Bruno Scola Lopes da Cunha

May/2019

Advisors: André Frossard Pereira de Lucena
Angelo Costa Gurgel

Department: Energy Planning

Several studies have shown the serious impacts of climate change on natural systems and human influence on the climate system. Computable general equilibrium models are commonly used by the scientific community in integrated assessment tools, to identify the functioning of the economy through the simultaneous analysis of interactions between regions, sectors and economic agents. This thesis aims to: i) developing and documentation of a global computable general equilibrium model in the context of climate change; and ii) simulation of the proposed methodology through a scenario analysis, in a case study about the role of the global dietary change arising from behavior *versus* induced by GHG emissions pricing. Climate policies, via market-based instruments, must be diligently planned, in order to minimize trade-offs related to agricultural competitiveness and food security in a low-carbon future. Although it results in penalties for animal-based production sectors in Brazil and around the world, changes in food choices are essential for environmental, economic and social sustainability. The society's refusal to dietary change represents an opportunity cost in terms of mitigating future global GHG emissions.

ÍNDICE

1. Introdução.....	1
2. Avaliação Integrada para Mudanças Climáticas	11
2.1. Perspectivas sobre a Evolução Socioeconômica: Análise de Cenários	14
2.2. Principais Grupos de Modelagem de Avaliação Integrada para Mudanças Climáticas	23
2.2.1. Principais Modelos de Avaliação Integrada para Análise das Mudanças Climáticas	29
2.3. Modelos de Equilíbrio Geral Computável	44
2.3.1. Teoria de Equilíbrio Geral	45
2.3.2. Modelos Globais de Equilíbrio Geral para Análise das Mudanças Climáticas	53
3. Proposta de Modelo Global de Equilíbrio Geral Computável: <i>Total-Economy Assessment</i> (TEA)	68
3.1. Dimensões e Estrutura Geral	69
3.2. Formas Funcionais	75
3.3. Fechamento Macroeconômico	85
3.4. Dinâmica e Premissas para Construção de Trajetórias	88
3.5. Energia	92
3.6. Agropecuária e Uso do Solo	107
3.7. Emissões de Gases de Efeito Estufa	113
3.8. Aplicação e Meta-análise para o Cenário de Referência	118
4. Estudo de Caso: o Papel da Mudança de Dieta Global	125
4.1. Procedimento de Análise	131
4.1.1. Cenário Referência (REF)	132
4.1.2. Cenário de Mudança Comportamental de Dieta (REF_50)	133

4.1.3. Cenários Climáticos de Estabilização da Temperatura Média Global (2.0C e 1.5C)	136
4.2. Resultados	141
4.2.1. Cenário Referência (REF)	141
4.2.2. Cenário de Mudança Comportamental de Dieta (REF_50)	160
4.2.3. Cenário Climático de Estabilização da Temperatura Média Global em até 2°C (2.0C)	172
4.2.4. Cenário Climático de Estabilização da Temperatura Média Global em até 1,5°C (1.5C)	191
4.3. Discussão	211
5. Considerações Finais	246
Referências	253
Anexo I – Detalhamento dos Setores do Modelo TEA	274
Anexo II – Problema de Complementaridade Mista e MPSGE	276
Anexo III – Elasticidades do Modelo TEA	280
Anexo IV – Mudança Estrutural no Consumo de Alimentos do Modelo TEA	282
Anexo V – Nova Dieta de Referência (The Lancet)	286

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Evolução da temperatura global entre 1880 e 2018 em relação a temperatura média de 1950 (em graus Celsius: °C)	2
Figura 2: Caracterização dos <i>storylines</i> e famílias dos cenários SRES.....	15
Figura 3: Forçamento radiativo e emissões de GEE dos RCP	17
Figura 4: Representação dos SSP	20
Figura 5: Projeções de PIB mundial para cada SSP	21
Figura 6: Projeções de população mundial para cada SSP	22
Figura 7: Projeções da porcentagem de urbanização para cada SSP.....	23
Figura 8: Visão geral da estrutura do modelo AIM/CGE.....	29
Figura 9: Representação do sistema energético do modelo COFFEE.....	30
Figura 10: Estrutura do modelo DNE21+	31
Figura 11: Diagrama conceitual do funcionamento do modelo GCAM	32
Figura 12: Fluxo circular de funcionamento do modelo GEM-E3.....	33
Figura 13: Estrutura do modelo GIAM	34
Figura 14: Esquema do funcionamento do modelo IGMS	35
Figura 15: Arquitetura recursiva e modular do modelo IMACLIM-R.....	36
Figura 16: Visão geral do modelo IMAGE	37
Figura 17: Visão integrada do modelo MERGE	38
Figura 18: Visão geral da estrutura do modelo MESSAGE.....	39
Figura 19: Estrutura do modelo POLES	40
Figura 20: Estrutura geral do modelo REMIND	41
Figura 21: Estrutura simplificada do sistema energético do modelo TIAM-WORLD ..	42
Figura 22: Visão geral do modelo WITCH	43
Figura 23: Fluxo circular da economia.....	50
Figura 24: Equilíbrio macroeconômico representado pelo modelo IS-LM.....	51
Figura 25: Estrutura do modelo ADAGE	58
Figura 26: Estrutura do modelo ENV-Linkages.....	61
Figura 27: Esquematização do modelo EPPA.....	62
Figura 28: Estrutura do modelo GTEM-C.....	63
Figura 29: Esquematização do modelo ICES	64
Figura 30: Visão geral do modelo MAGNET	65
Figura 31: Visão geral do modelo MIRAGE-e	66

Figura 32: Estrutura esquemática do modelo PACE.....	67
Figura 33: Regiões do modelo TEA.....	70
Figura 34: Árvore tecnológica da demanda das famílias do modelo TEA.....	81
Figura 35: Árvore tecnológica da demanda do governo do modelo TEA.....	81
Figura 36: Árvore tecnológica de produção dos setores (exceto agropecuários e energéticos) do modelo TEA.....	83
Figura 37: Árvore tecnológica da agregação das importações de um bem <i>i</i> qualquer do modelo TEA.....	84
Figura 38: Árvore tecnológica dos serviços de transporte do modelo TEA.....	85
Figura 39: Árvore tecnológica para produção de energias primárias do modelo TEA..	98
Figura 40: Árvore tecnológica para produção de derivados de petróleo do modelo TEA.....	99
Figura 41: Árvore tecnológica do transporte privado das famílias do modelo TEA....	100
Figura 42: Árvore tecnológica para geração elétrica do modelo TEA.....	101
Figura 43: Árvore tecnológica para geração elétrica eólica e solar do modelo TEA...	102
Figura 44: Árvore tecnológica para geração elétrica fóssil do modelo TEA.....	103
Figura 45: Árvore tecnológica para geração elétrica nuclear e hidro do modelo TEA	104
Figura 46: Árvore tecnológica para geração elétrica a partir de biomassa do modelo TEA.....	104
Figura 47: Participação das tecnologias de geração elétrica do modelo TEA (ano base: 2011).....	105
Figura 48: Árvore tecnológica para produção de biocombustível do modelo TEA.....	107
Figura 49: Modelo da curva de oferta de terra do modelo TEA.....	108
Figura 50: Tendências de uso da terra global para agropecuária e floresta em bilhões de ha (1961-2013).....	110
Figura 51: Árvore tecnológica para produção de setores agropecuários do modelo TEA.....	112
Figura 52: Consumo final de energia global para modelos selecionados.....	119
Figura 53: Consumo final de energia global por fonte energética para modelos selecionados.....	120
Figura 54: Geração elétrica global para modelos selecionados.....	121
Figura 55: Geração elétrica global por fonte energética para modelos selecionados...	123
Figura 56: Emissões de GEE globais para modelos selecionados.....	124

Figura 57: Consumo de calorias <i>per capita</i> por fonte (1961–2050).....	126
Figura 58: Consumo de proteína <i>per capita</i> por fonte (1961-2011)	126
Figura 59: Visão sindêmica global das relações entre dieta e mudanças climáticas	129
Figura 60: Cenários implementados no modelo TEA	132
Figura 61: Perfil da demanda das famílias brasileiras por setores selecionados no ano base	134
Figura 62: Mudança de dieta via redução das preferências de produtos do setor OMT	136
Figura 63: Orçamentos de carbono de IAMs selecionados para aquecimento global de até 2°C em 2100	138
Figura 64: Orçamentos de carbono de IAMs selecionados para aquecimento global de até 1,5°C em 2100	138
Figura 65: Árvore tecnológica de demanda de transporte privado à combustão interna nos cenários climáticos do modelo TEA	139
Figura 66: Evolução do PIB global desagregado para cada região no cenário REF do modelo TEA	142
Figura 67: Evolução da composição do PIB global e do Brasil no cenário REF do modelo TEA	142
Figura 68: Composição da produção setorial global no cenário REF do modelo TEA	143
Figura 69: Índices de produção setorial globais no cenário REF do modelo TEA	144
Figura 70: Índices de produção setorial brasileiros no cenário REF do modelo TEA .	145
Figura 71: Composição da produção agropecuária brasileira no cenário REF do modelo TEA	146
Figura 72: Composição da produção industrial brasileira no cenário REF do modelo TEA	147
Figura 73: Composição da produção de transportes brasileira no cenário REF do modelo TEA	147
Figura 74: Geração elétrica global por fonte no cenário REF do modelo TEA	148
Figura 75: Geração elétrica brasileira por fonte no cenário REF do modelo TEA	149
Figura 76: Consumo final de energia global no cenário REF do modelo TEA.....	150
Figura 77: Consumo final de energia do Brasil no cenário REF do modelo TEA.....	150
Figura 78: Emissões de GEE globais por tipo de gás e origem no cenário REF do modelo TEA	151

Figura 79: Emissões de GEE brasileiras por tipo de gás e origem no cenário REF do modelo TEA	152
Figura 80: Evolução da produção e do comércio internacional agrícola (AGR) brasileiro no cenário REF do modelo TEA	153
Figura 81: Evolução da produção e do comércio internacional da pecuária (CTL) brasileira no cenário REF do modelo TEA	154
Figura 82: Evolução da produção e do comércio internacional de outros animais (OAP) brasileira no cenário REF do modelo TEA	155
Figura 83: Evolução da produção e do comércio internacional da indústria de alimentos sem carne (OFD) brasileira no cenário REF do modelo TEA.....	155
Figura 84: Evolução da produção e do comércio internacional da indústria de alimentos com carne (OMT) no cenário REF do modelo TEA	156
Figura 85: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos agrícolas (AGR) no cenário REF do modelo TEA.....	157
Figura 86: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos da pecuária (CTL) no cenário REF do modelo TEA.....	157
Figura 87: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos de outros animais (OAP) no cenário REF do modelo TEA	158
Figura 88: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários por produtos da indústria de alimentos sem carne (OFD) no cenário REF do modelo TEA	159
Figura 89: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários por produtos da indústria de alimentos com carne (OMT) no cenário REF do modelo TEA	159
Figura 90: Índice de produção setorial global no cenário REF_50 do modelo TEA ...	160
Figura 91: Índice de produção setorial brasileiro no cenário REF_50 do modelo TEA	161
Figura 92: Composição da produção agropecuária brasileira no cenário REF_50 do modelo TEA	162
Figura 93: Composição da produção industrial brasileira no cenário REF_50 do modelo TEA	163
Figura 94: Emissões de GEE globais por tipo de gás e origem no cenário REF_50 do modelo TEA	164
Figura 95: Emissões de GEE brasileiras por tipo de gás e origem no cenário REF_50 do modelo TEA	165

Figura 96: Evolução da produção e do comércio internacional agrícola (AGR) brasileira no cenário REF_50 do modelo TEA	166
Figura 97: Evolução da produção e do comércio internacional da pecuária (CTL) brasileira no cenário REF_50 do modelo TEA	167
Figura 98: Evolução da produção e do comércio internacional de outros animais (OAP) brasileira no cenário REF_50 do modelo TEA	168
Figura 99: Evolução da produção e do comércio internacional da indústria de alimentos sem carne (OFD) no cenário REF_50 do modelo TEA.....	168
Figura 100: Evolução da produção e do comércio internacional da indústria de alimentos com carne (OMT) no cenário REF_50 do modelo TEA.....	169
Figura 101: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos agrícolas (AGR) no cenário REF_50 do modelo TEA	170
Figura 102: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos da pecuária (CTL) no cenário REF_50 do modelo TEA	170
Figura 103: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários por produtos de outros animais (OAP) no cenário REF_50 do modelo TEA	171
Figura 104: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos da indústria de alimentos sem carne (OFD) no cenário REF_50 do modelo TEA	171
Figura 105: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos da indústria de alimentos com carne (OMT) no cenário REF_50 do modelo TEA	172
Figura 106: Evolução do PIB mundial desagregado para cada região no cenário 2.0C do modelo TEA	173
Figura 107: Índice de produção setorial global no cenário 2.0C do modelo TEA	174
Figura 108: Índice de produção setorial brasileiro no cenário 2.0C do modelo TEA..	175
Figura 109: Composição da produção agropecuária brasileira no cenário 2.0C do modelo TEA	176
Figura 110: Composição da produção industrial brasileira no cenário 2.0C do modelo TEA	177
Figura 111: Geração elétrica global por fonte no cenário 2.0C do modelo TEA.....	178
Figura 112: Geração elétrica brasileira por fonte no cenário 2.0C do modelo TEA....	179
Figura 113: Consumo final de energia global no cenário 2.0C do modelo TEA	180

Figura 114: Consumo final de energia do Brasil no cenário 2.0C do modelo TEA.....	181
Figura 115: Emissões de GEE globais por tipo de gás e origem no cenário 2.0C do modelo TEA	182
Figura 116: Emissões de GEE brasileiras por tipo de gás e origem no cenário 2.0C do modelo TEA	183
Figura 117: Preço de carbono (CO ₂) global do cenário 2.0C do modelo TEA.....	183
Figura 118: Evolução da produção e do comércio internacional agrícola (AGR) brasileira no cenário 2.0C do modelo TEA	184
Figura 119: Evolução da produção e do comércio internacional da pecuária (CTL) brasileira no cenário 2.0C do modelo TEA	185
Figura 120: Evolução da produção e do comércio internacional de outros animais (OAP) brasileira no cenário 2.0C do modelo TEA	186
Figura 121: Evolução da produção e do comércio internacional da indústria de alimentos sem carne (OFD) no cenário 2.0C do modelo TEA.....	186
Figura 122: Evolução da produção e do comércio internacional da indústria de alimentos com carne (OMT) no cenário 2.0C do modelo TEA	187
Figura 123: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos agrícolas (AGR) no cenário 2.0C do modelo TEA	188
Figura 124: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos da pecuária (CTL) no cenário 2.0C do modelo TEA.....	189
Figura 125: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos de outros animais (OAP) no cenário 2.0C do modelo TEA.....	189
Figura 126: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos da indústria de alimentos sem carne (OFD) no cenário 2.0C do modelo TEA	190
Figura 127: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos da indústria de alimentos com carne (OMT) no cenário 2.0C do modelo TEA	191
Figura 128: Evolução do PIB mundial desagregado para cada região no cenário 1.5C do modelo TEA	192
Figura 129: Evolução da composição do PIB global e do Brasil no cenário 1.5C do modelo TEA	192
Figura 130: Índice de produção setorial global no cenário 1.5C do modelo TEA.....	193

Figura 131: Índice de produção setorial brasileiro no cenário 1.5C do modelo TEA..	194
Figura 132: Composição da produção agropecuária brasileira no cenário 1.5C do modelo TEA	195
Figura 133: Composição da produção industrial brasileira no cenário 1.5C do modelo TEA	196
Figura 134: Geração elétrica global por fonte no cenário 1.5C do modelo TEA.....	197
Figura 135: Geração elétrica brasileira por fonte no cenário 1.5C do modelo TEA....	198
Figura 136: Consumo final de energia global no cenário 1.5C do modelo TEA	199
Figura 137: Consumo final de energia do Brasil no cenário 1.5C do modelo TEA.....	200
Figura 138: Emissões de GEE globais por tipo de gás e origem no cenário 1.5C do modelo TEA	201
Figura 139: Emissões de GEE brasileiras por tipo de gás e origem no cenário 1.5C do modelo TEA	202
Figura 140: Preço de carbono (CO ₂) global do cenário 1.5C do modelo TEA	203
Figura 141: Evolução da produção e do comércio internacional agrícola (AGR) brasileira no cenário 1.5C do modelo TEA	204
Figura 142: Evolução da produção e do comércio internacional da pecuária (CTL) brasileira no cenário 1.5C do modelo TEA	205
Figura 143: Evolução da produção e do comércio internacional de outros animais (OAP) brasileira no cenário 1.5C do modelo TEA	206
Figura 144: Evolução da produção e do comércio internacional da indústria de alimentos sem carne (OFD) no cenário 1.5C do modelo TEA.....	206
Figura 145: Evolução da produção e do comércio internacional da indústria de alimentos com carne (OMT) no cenário 1.5C do modelo TEA	207
Figura 146: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos agrícolas (AGR) no cenário 2.0C do modelo TEA	208
Figura 147: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos da pecuária (CTL) no cenário 1.5C do modelo TEA	209
Figura 148: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos de outros animais (OAP) no cenário 1.5C do modelo TEA.....	209
Figura 149: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos da indústria de alimentos sem carne (OFD) no cenário 1.5C do modelo TEA	210

Figura 150: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos da indústria de alimentos com carne (OMT) no cenário 1.5C do modelo TEA	211
Figura 151: Variações no PIB (%) global dos cenários alternativos em relação ao cenário REF	212
Figura 152: Variações no PIB (%) brasileiro dos cenários alternativos em relação ao cenário REF	213
Figura 153: Variações na produção agropecuária (%) brasileira dos cenários alternativos em relação ao cenário REF	214
Figura 154: Variações na produção industrial (%) brasileira dos cenários alternativos em relação ao cenário REF	215
Figura 155: Variações na produção de transportes (%) brasileira dos cenários alternativos em relação ao cenário REF	217
Figura 156: Variações na produção de serviços (%) brasileira dos cenários alternativos em relação ao cenário REF	218
Figura 157: Geração elétrica global para todos os cenários do modelo TEA	219
Figura 158: Geração elétrica brasileira para todos os cenários do modelo TEA	220
Figura 159: Consumo final de energia global para todos os cenários do modelo TEA	221
Figura 160: Consumo final de energia brasileiro para todos os cenários do modelo TEA	221
Figura 161: Orçamentos de carbono (emissões de CO ₂) do modelo TEA e IAMs selecionados	222
Figura 162: Emissões de GEE globais por tipo de gás e origem para todos os cenários do modelo TEA	223
Figura 163: Emissões de GEE globais do uso do solo por tipo de gás para todos os cenários do modelo TEA	224
Figura 164: Emissões de GEE brasileiras por tipo de gás e origem para todos os cenários do modelo TEA	225
Figura 165: Evolução do preço de carbono global dos cenários climáticos do modelo TEA e preço de carbono global em 2050 do cenário 2.0C de IAMs selecionados	227
Figura 166: Variações na produção (%) dos setores agropecuários brasileiros dos cenários alternativos em relação ao cenário REF	230

Figura 167: Variações na produção (%) dos setores da indústria de alimentos brasileira dos cenários alternativos em relação ao cenário REF	232
Figura 168: Localização das principais indústrias de alimentos de carne e laticínios do mundo	233
Figura 169: Principais destinos das exportações brasileiras de produtos agrícolas e da indústria de alimentos em 2050 do modelo TEA	235
Figura 170: Composição do consumo de alimentos no consumo total dos brasileiros com destaque para a composição do consumo de alimentos sem carne (OFD) e alimentos com carne (OMT) em 2050 para todos os cenários do modelo TEA	238
Figura 171: Variações no consumo total de alimentos (%) da indústria OFD e OMT dos cenários alternativos em relação ao cenário REF	239
Figura 172: Variações no consumo (%) total, de alimentos sem carne (OFD) e de alimentos com carne (OMT) dos cenários alternativos em relação ao cenário REF....	240

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características gerais dos principais IAMs globais.....	25
Tabela 2: Características gerais dos principais CGE globais	55
Tabela 3: Índices de conjuntos da base de dados	70
Tabela 4: Agregação regional do modelo TEA	71
Tabela 5: Agregação setorial do modelo TEA	71
Tabela 6: Fatores de produção do modelo TEA.....	72
Tabela 7: Níveis de atividade do modelo TEA.....	72
Tabela 8: Variáveis endógenas dos setores e atividades do modelo TEA.....	77
Tabela 9: Variáveis de preços de bens e fatores do modelo TEA.....	78
Tabela 10: Parâmetros de taxas de tributos e subsídios do modelo TEA.....	78
Tabela 11: Parâmetros de elasticidades do modelo TEA	79
Tabela 12: Mapeamento genérico para compatibilização do balanço energético no modelo TEA	94
Tabela 13: Lista de correspondência para compatibilização de variáveis do modelo TEA em unidades energéticas	95
Tabela 14: Parâmetros de elasticidades relacionadas à energia do modelo TEA.....	97
Tabela 15: Participação dos insumos na geração elétrica para cada tecnologia do modelo TEA	106
Tabela 16: Taxas máximas de expansão de terra para as regiões do modelo TEA.....	111
Tabela 17: Contabilização das emissões de GEE do modelo TEA	115
Tabela 18: Trajetória de redução na preferência por produtos da indústria de alimentos com carne (OMT)	135
Tabela 19: Taxas de crescimento (%) de exportações e de importações do setor agrícola e da indústria de alimentos brasileira em relação ao ano de 2010 e média anual do período 2011-2050.....	237

1. Introdução

As mudanças climáticas são um dos maiores desafios globais, uma vez que envolvem diversas dimensões, tais como a ciência, a política, a economia e o meio ambiente. A ciência está em desenvolvimento progressivo no que diz respeito aos fenômenos climáticos antigos e recentes, na busca de respostas e caminhos para proteger a vida na Terra. Uma das iniciativas mais significativas neste campo é o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), formado em 1988 por iniciativa da Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). O IPCC não conduz nenhuma pesquisa científica propriamente original, mas tem o propósito de revisar, sintetizar e divulgar o conhecimento científico mais avançado sobre as mudanças climáticas e publica relatórios de avaliação a cada seis anos, em média (IPCC, 2013).

Nas últimas décadas, diversos estudos têm reunido uma grande quantidade de evidências que mostram os efeitos das alterações climáticas sobre os sistemas naturais e a influência humana sobre o sistema climático (IPCC, 2014; IPCC, 2018). O aquecimento do sistema climático é inequívoco e as ligações básicas estabelecidas para essa situação são que a temperatura média global está diretamente relacionada com a concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera da Terra e essa concentração de GEE tem aumentado de forma constante – maior incidência de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera – oriunda, principalmente, da queima de combustíveis fósseis e mudança do uso do solo pelos seres humanos (IPCC, 2014; IPCC, 2018).

A influência da ação humana sobre o clima se dá, principalmente, pela dependência de fontes fósseis de energia, a qual se relaciona aos processos de urbanização, crescimento e desenvolvimento econômico, disponibilidade de recursos, estilo de vida, bem como às decisões dos governos na promoção de novas e limpas tecnologias e do quadro institucional, regulatório, juntamente com a definição de direitos de propriedade (IPCC, 2018). O consenso¹ de que os seres humanos estão

¹ Tecnicamente, um “consenso” é um acordo geral de opinião, mas o método científico nos afasta disto para uma estrutura objetiva. Na ciência, fatos ou observações são explicados por uma hipótese (uma afirmação de uma possível explicação para algum fenômeno natural), que pode então ser testada e retestada até que seja rejeitada (ou refutada). Conforme os cientistas coletam mais observações, se

causando o aquecimento global é compartilhado por 87% ou mais das publicações de cientistas do clima (ORESQUES, 2004; DORAN E ZIMMERMAN, 2009; ANDEREGG, 2010; COOK *et al.*, 2013; COOK *et al.*, 2016; BRAY E VON STORCH, 2016).

De acordo com dados da NASA (2018), 2016 foi o ano mais quente desde 1880, dando continuidade a tendência de longo prazo de aumento das temperaturas globais. Na Figura 1, é possível observar que os 10 anos mais quentes, entre os 138 anos de análise, ocorreram a partir dos anos 2000, com os quatro anos mais quentes sendo os quatro anos mais recentes.

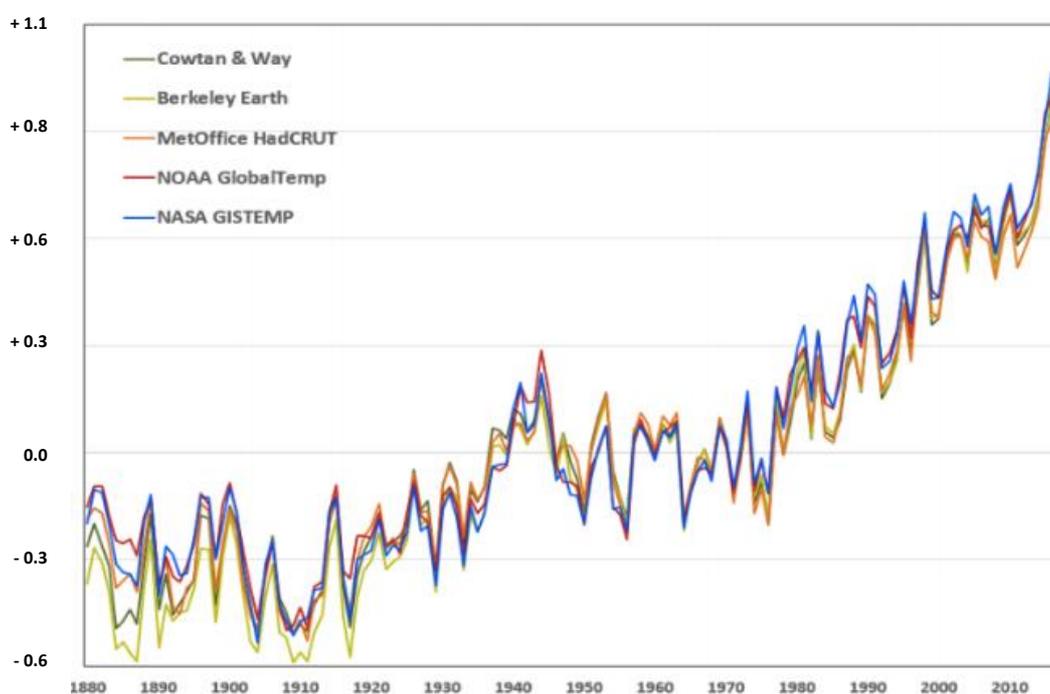


Figura 1: Evolução da temperatura global entre 1880 e 2018 em relação a temperatura média de 1950 (em graus Celsius: °C)

Fonte: adaptação com base em NASA (2018)

Em 2015, na Conferência das Partes da Convenção Quadro das Nações Unidas para Mudanças do Clima, em Paris (COP21), os governos da maior parte dos países do mundo (195 países, cerca de 90-95% das emissões globais de GEE) passaram a reconhecer oficialmente a mudança climática como uma ameaça urgente e potencialmente irreversível para as sociedades humanas e para o planeta (UNFCCC,

constroem explicações e se adicionam detalhes para completar uma teoria científica, um princípio geral cientificamente aceitável ou um conjunto de princípios para explicar os fenômenos.

2016). A partir das chamadas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC, sigla em inglês), comprometeram-se a limitar o aumento da temperatura média global em menos de 2°C em relação aos níveis pré-industriais, e a buscar contribuições mais ambiciosas de longo prazo, incentivando esforços para limitar o aumento da temperatura em até 1,5°C (UNFCCC, 2016). Entretanto, o mundo parece estar travancado em moderadas e fragmentadas ações climáticas devido aos desafios institucionais, políticos e éticos oriundos da necessidade de coordenação, transferências e incentivos internacionais (RIAHI *et al.*, 2011; KOBERLE *et al.*, 2015). O lento progresso nas negociações internacionais tem dado lugar a um ceticismo sobre a possibilidade de uma ação cooperativa global para lidar com as mudanças climáticas (KRIEGLER *et al.*, 2015).

O IPCC é categórico na conclusão do seu último relatório especial (SR15 – IPCC, 2018): se as emissões globais continuarem nos níveis atuais, cerca de 40 GtCO₂eq por ano (WMO, 2018), o aquecimento global antrópico poderá ultrapassar, com alto nível de confiança, 1,5°C por volta de 2040, ocasionando aumentos substanciais em eventos climáticos extremos, elevação do nível do mar, perda de biodiversidade e potenciais impactos na saúde humana, abastecimento de alimentos e de água. A mediana dos cenários com e sem *overshooting*² indica que cerca de 730 GtCO₂eq devem ser sequestrados da atmosfera até o final deste século, de modo que reflorestamento e tecnologias disruptivas, tais como *Carbon Dioxide Removal* (CDR), serão cruciais para garantir emissões negativas. Isso significa que, se o mundo quiser limitar o aquecimento médio global em 1,5°C, há um nível adicional máximo de emissões de GEE que ainda pode entrar na atmosfera até 2100. Os chamados orçamentos de carbono baseiam-se na ideia relativamente simples de que a quantidade de aquecimento da temperatura da superfície global pode ser estimada a partir das emissões totais (cumulativas) de CO₂ (ROGELJ *et al.*, 2015; ROGELJ *et al.*, 2016; VAN VUUREN *et al.*, 2016; VAN DEN BERG *et al.*, 2019).

Trabalhar as melhores maneiras de se lidar com as mudanças climáticas é um dos principais desafios enfrentados pelos formuladores de políticas hoje e será crucial alcançar transformações positivas nas próximas décadas. A pesquisa sobre mudanças climáticas é coordenada pela comunidade científica através de uma ampla variedade de ferramentas, modelos e análises. Cientistas desenvolveram um conjunto de

² Trajetórias que ultrapassam o aumento da temperatura acima de 1,5°C até 2100.

ferramentas conhecidas como modelos de avaliação integrada (*Integrated Assessment Models* – IAMs, sigla em inglês), os quais consideram variáveis físicas, econômicas e sociais. Para a pesquisa climática, especificamente, os IAMs são normalmente usados para projetar crescimento econômico, população, uso de energia, mudanças no uso do solo, futuras emissões de GEE e orçamentos de carbono, de modo a determinar soluções ótimas e impactos sobre o clima, meio ambiente e bem-estar humano e outras espécies, além do custo-benefício³ de opções de políticas que poderiam ser implementadas para resolvê-los.

Diferentemente de modelos puramente climáticos, que se baseiam em princípios físicos para modelar, por exemplo, a maneira como a atmosfera absorve a radiação solar, os IAMs baseiam-se em formulações matemáticas, fundamentadas em teorias econômicas e em evidências a partir de dados históricos, capazes de captar a evolução do comportamento socioeconômico; isto é, escolhas de uso de energia, desenvolvimento tecnológico, mudanças no uso do solo e tendências sociais que causam – ou previnem – emissões de GEE. São modelos integrados porque combinam diferentes áreas de conhecimento⁴, representando a economia global, bem como seus sistemas de energia, terra e também clima, de modo a simular processos interativos entre desenvolvimento econômico e escolhas sociais, bem como entender como eles afetam o mundo natural (IPCC, 2000; DICKINSON, 2007; IIASA, 2018; PBL, 2018).

Esses modelos apresentam uma metodologia capaz de lidar com potenciais conflitos e sinergias de políticas estratégicas, bem como considerar *feedbacks* de diferentes domínios. A avaliação integrada é útil para conduzir pesquisas, dado sua estrutura organizacional. Mais especificamente, a avaliação integrada deve fornecer um quadro coerente para organizar e avaliar o conhecimento sobre as mudanças climáticas, de modo a proporcionar informações aos tomadores de decisão, ajudar na diferenciação entre opções de política, em vez de meramente promover a compreensão por si mesma. Além disso, reúne um conjunto mais amplo de áreas, métodos, graus de certeza, do que normalmente caracterizaria um estudo da mesma questão dentro dos limites de uma única disciplina de pesquisa. Coloca escolas de

³ Por exemplo, eles são usados para estimar o custo social do carbono – o valor monetário do impacto, positivo e negativo, de cada tonelada adicional de CO₂ que é emitida.

⁴ A combinação entre *storylines*, IAMs e modelos climáticos é considerada a melhor prática de pesquisa na área, tendo em vista tratar-se da análise mais completa que é possível se fazer nos dias atuais, com participação de um extenso grupo de especialistas, diferentes grupos de trabalho, requerendo diferentes conhecimentos.

pensamento e métodos em uma perspectiva mais ampla, permitindo consistência na integração, organização e avaliação de informações (IIASA, 2018).

Todos os principais modelos globais de avaliação integrada foram desenvolvidos por países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), de modo que as nações mais desenvolvidas apresentam forte influência sobre a comunidade científica internacional no que diz respeito a modelagem de cenários de mudanças climáticas de longo prazo. Assim, estes grupos respondem por grande parte da contribuição e apoio técnico na promoção de decisões sobre metas globais, o que demonstra a posição sensível de países como o Brasil frente a decisões climáticas globais e a necessidade de tornar a comunidade científica mais diversificada.

Nesse sentido, é relevante mencionar o esforço do Centro de Economia da Energia e Ambiental (CENERGIA) do Programa de Planejamento Energético (PPE), pertencente ao Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), no desenvolvimento de modelos nacionais e globais⁵ voltados para o setor energético e, mais recentemente, uso do solo. O planejamento energético tem por objetivo garantir a continuidade do fornecimento de energia ao menor custo, com menores riscos e com os menores impactos socioeconômicos e ambientais. Desenvolver cenários de oferta e demanda de energia são tarefas que englobam uma grande quantidade de variáveis, as quais descrevem a cadeia energética, desde a extração das fontes energéticas até seu uso final ao longo da produção, transformação, distribuição e armazenamento. A falta de planejamento energético pode acarretar consequências negativas, como escassez ou excesso de capacidade, produção ineficiente, etc.

Modelos de equilíbrio parcial cumprem a função de modelar sistemas específicos, de forma individualizada, pois contam com detalhes tecnológicos e características próprias do setor. Nos últimos 10 anos, o laboratório CENERGIA vem utilizando o modelo MESSAGE (*Model for Energy Supply System Alternatives and their General Environmental Impacts*) adaptado para o Brasil para diversos propósitos, tais como: análise sobre o perfil de desenvolvimento sustentável brasileiro

⁵ Roberto Schaeffer, professor do PPE, coordenador do laboratório CENERGIA e membro da banca examinadora desta tese, foi um dos autores mais influentes no relatório AR5 do IPCC (HUGHES e PETERSON, 2017), contribuindo para colocar o Brasil numa posição mais robusta e adequada em negociações internacionais, o que pode vir a fortalecer nossas prioridades e objetivos frente aos demais países.

(IAEA, 2006); calcular opções de adaptação de menor custo referentes aos impactos de mudanças climáticas globais no sistema elétrico brasileiro (LUCENA *et al.*, 2010); analisar a utilização de veículos elétricos plug-in como forma de maximizar a integração de energias renováveis na matriz elétrica nacional (BORBA *et al.*, 2012); avaliar o futuro papel da captura e armazenamento de carbono (CCS) na geração de energia térmica no Brasil (NOGUEIRA *et al.*, 2014); modelar opções de eficiência energética para avaliar a penetração de fontes de energias renováveis na rede elétrica brasileira (ROCHEDO *et al.*, 2015); estimar o potencial da captura e armazenamento de carbono no Brasil (ROCHEDO *et al.*, 2016); analisar o nexu entre uso do solo e energia no Brasil (KOBBERLE, 2018).

Com o desenvolvimento do modelo COFFEE (*Computable Framework For Energy and the Environment*) (ROCHEDO, 2016), o Brasil passou a ser uma das poucas nações do hemisfério sul com um modelo global de avaliação integrada voltado para o sistema energético e o uso da terra, de maneira integrada e consistente com as questões das mudanças climáticas, que é um fenômeno global e foge do escopo de uma análise nacional apenas. De acordo com Rochedo (2016), o COFFEE é uma versão global do MESSAGE, um modelo de otimização do sistema energético e de uso da terra, o qual apresenta projeções de uso de energia, mudança do uso do solo e emissões globais de GEE compatíveis com os resultados dos principais grupos de modelagem da comunidade científica.

Vale ressaltar, contudo, que por se tratar de um modelo de otimização, sob a perspectiva de mínimo custo, o COFFEE tende a fornecer resultados que refletem a conformação ótima de um sistema energético e de uso do solo em competição e informação perfeita, o que, normalmente, não ocorre na realidade. Assim, além da importância das restrições de forma a aproximar a modelagem das imperfeições de mercado, é relevante a calibração do modelo a partir de uma ferramenta econômica, adicionando maior consistência e confiabilidade no curto e longo prazo, bem como a representação de implicações econômicas adjacentes. Ademais, modelos de equilíbrio parcial, como o MESSAGE, utilizam variáveis macroeconômicas como dados de entrada para projeção de vetores de demanda por serviços energéticos que são exógenos ao modelo. Dessa forma, tais modelos não permitem avaliar os efeitos de políticas energéticas ou climáticas sobre agregados macroeconômicos, o que faz com que seja necessário a interação com outros tipos de modelos.

As principais ferramentas econômicas utilizadas pela comunidade científica são a modelagem macroeconômica, a econométrica e a de equilíbrio geral computável (*Computable General Equilibrium* – CGE). Os modelos macroeconômicos têm a vantagem de analisar um grande número de políticas, tendo em vista que seguem o método da teoria Keynesiana no curto prazo, na qual os resultados das variáveis são determinados pela demanda, diferentemente do longo prazo, em que há domínio da oferta, conforme o modelo Neoclássico de Solow e Swan (ARORA, 2013). Modelos econométricos são essencialmente de natureza estatística, estimados por dados históricos, e especificam múltiplas variáveis macroeconômicas em termos de outras, bem como em termos do erro, para entender quantitativa e qualitativamente o impacto de diferentes eventos ou políticas. Já os modelos CGE permitem traçar os fluxos entre setores dado que são baseados na teoria microeconômica Walrasiana, em que as decisões dos consumidores são orientadas pela teoria da escolha do consumidor e as firmas são maximizadoras de lucros, em que se alcança a situação de equilíbrio e máximo bem-estar social (ARORA, 2013).

Os modelos CGE se tornaram uma ferramenta padrão de análise econômica, dado melhorias na especificação, na disponibilidade de dados, na tecnologia dos computadores, reduzindo custos de análise de políticas e abrindo caminho para o seu uso generalizado por analistas em todo o mundo (LOFGREN *et al.*, 2012). Os modelos Walrasianos são os mais usados e mais amplamente aceitos por modeladores, planejadores e economistas em geral. Entretanto, eles não são aplicados de forma pura e incluem geralmente aspectos estruturais que limitam os pressupostos neoclássicos extremos, os quais são amplamente aceitos. Com isso, os modelos CGE tornam-se poderosos instrumentos para geração e avaliação de políticas.

Modelos econômicos de equilíbrio geral computável, portanto, são úteis para realizar uma análise simultânea de todos os setores da economia, de modo a avaliar a interação entre setores e agentes econômicos, produzindo cenários macroeconômicos através de projeções consistentes de demandas setoriais e de fatores de produção (SHOVEN e WHALLEY, 1984; KYNLAND e PRESCOTT, 1996; BERGMAN, 2005; PALTSEV *et al.*, 2005; FUJIMORI e VAN DER MENSBRUGGHE, 2008; MASUI e MATSUOKA, 2012; CHATEAU *et al.*, 2014; CHEN *et al.*, 2015). Sendo assim, a maioria dos IAMs parte de um modelo de equilíbrio geral ou conta com algum modelo econômico integrado a sua estrutura. No Brasil, embora haja

reconhecido progresso no desenvolvimento de modelos CGE⁶ (GUILHOTO, 1995; HADDAD e DOMINGUES, 2001; DOMINGUES, 2002; FERREIRA-FILHO e HORRIDGE, 2004; GUILHOTO *et al.*, 2012; ALMEIDA, 2003; SANTOS, 2010), ainda não há um que tenha sido construído com abrangência global e em consonância a um IAM, com o intuito de garantir maior consistência na projeção de vetores de demanda por serviços energéticos e avaliar efeitos de políticas climáticas sobre agregados macroeconômicos.

Nesse sentido, esta tese tem dois objetivos: i) desenvolver um modelo global de equilíbrio geral computável, capaz de avaliar as interações entre sistemas socioeconômicos e processos energéticos e ambientais⁷; e ii) simular a metodologia proposta através de um estudo de caso sobre o papel da mudança de dieta global oriunda tanto de alterações no estilo de vida quanto induzida por precificação de emissões de GEE, auferindo impactos econômicos e ambientais globais e no Brasil.

Nessa perspectiva, há um crescente reconhecimento de que mudanças de estilo de vida são essenciais para alcançar vários dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável⁸, não apenas para se adaptar aos impactos das mudanças climáticas, mas também para alterar as estruturas de relações econômicas e sociais, crenças e comportamentos, que contribuem para as mudanças climáticas e para a vulnerabilidade social (IPCC, 2014; FAO, 2017). Destacam-se na literatura científica estudos com foco em mudanças de comportamento pró-meio ambiente relacionados a mobilidade e consumo de energia nas residências (DIETZ *et al.* 2009; GIFFORD *et al.* 2011; VAN SLUISVELD *et al.* 2016; VAN DE VEN *et al.*, 2018), e alguns relacionados a demanda por alimentos (STEHFEST *et al.*, 2009; BAJŽELJ *et al.* 2014; HALLSTRÖM *et al.* 2015). Embora os IAMs possam não ser ideais para representar os potenciais de mitigação oriundos da mudança comportamental, devido a limitações metodológicas, são úteis para analisar a interação da mudança

⁶ Vale destacar o organizado grupo de pesquisa NEREUS (Núcleo de Economia Regional e Urbana) da Universidade de São Paulo (USP) com agenda de pesquisa na área, cujo foco de estudo é no desenvolvimento de modelos CGE para territórios subnacionais no Brasil.

⁷ Com vistas a se transformar, a partir de estudos futuros de integração, no módulo econômico de um modelo de avaliação integrada.

⁸ Trata-se de uma coleção de 17 metas globais para 2030 estabelecidas pela Assembleia Geral das Nações Unidas, cujos temas abrangem questões de desenvolvimento social e econômico, incluindo pobreza, fome, saúde, educação, aquecimento global, igualdade de gênero, água, saneamento, energia, urbanização, meio ambiente e justiça social.

comportamental com outras medidas, como diferentes políticas para alcançar metas climáticas⁹.

Recentemente, nos relatórios publicados pela comissão acadêmica sobre governança global para a saúde, *The Lancet*, revelou-se que a civilização está em risco pelos efeitos adversos do atual sistema de produção de alimentos, tanto em relação à saúde humana quanto aos ecossistemas do planeta (WILLETT *et al.*, 2019), mas também por a dieta moderna apresentar interação de retroalimentação com as mudanças climáticas (SUWINBURN *et al.*, 2019). O reconhecimento da dieta como um poderoso impulsionador de impactos ambientais e sociais, assinala que padrões alimentares devem ser examinados não só pelo seu impacto na saúde, mas também pelos seus impactos no meio ambiente e, em particular, na sua ligação à mudança climática (UNCTAD, 2013; HEDENUS *et al.*, 2014; HADDAD *et al.*, 2015; SUWINBURN *et al.*, 2019). De acordo com GARNETT *et al.* (2014), diretrizes alimentares nacionais que recomendam menor consumo de carne vermelha, particularmente entre os consumidores mais exigentes, podem ajudar a reduzir significativamente as emissões de GEE, principalmente metano (CH₄). Além disso, evidências crescentes sugerem que dietas sustentáveis podem ser consistentes com boa saúde (GARNETT *et al.*, 2014; FAO e FOOD CLIMATE RESEARCH NETWORK, 2016; FAO, 2017; WILLETT *et al.*, 2019).

Conforme a recente ênfase dada à necessidade de mudanças no estilo de vida dos consumidores no contexto de um futuro de baixo carbono (IPCC, 2018), mais especificamente, ao nexo entre alimentação e mudanças climáticas (SUWINBURN *et al.*, 2019), o estudo de caso desta tese trata a mudança de dieta global como uma medida positiva, não normativa, sobre até que ponto tal mudança comportamental pode contribuir para a mitigação de emissões, bem como àquela induzida por influências de custos relativos em cenários climáticos restritivos. Mais especificamente, o estudo de caso busca analisar as consequências econômicas e ambientais, em termos de renda, comércio internacional e emissões, de cenários climáticos com restrições de emissões em comparação a um cenário de redução global no consumo de alimentos com carne.

⁹ Mudanças de estilo de vida podem ser uma alternativa para reduzir a necessidade de penetração de tecnologias disruptivas para garantir emissões negativas, dado que estas apresentam maiores riscos, custos e incertezas de implementação.

Por fim, vale ressaltar que o desenvolvimento de modelos em ambientes interdisciplinares contribui para a obtenção de julgamentos qualitativos e detalhamentos sobre a interação dos componentes dos sistemas modelados, bem como para o reconhecimento e entendimento de incertezas e limitações. Sendo assim, o desenvolvimento de um modelo CGE contribui para aperfeiçoar o conhecimento no que diz respeito a modelagens econômicas voltadas para o planejamento energético, bem como aumentar o leque de opções de estudos sobre mudanças climáticas.

Além deste primeiro capítulo introdutório, esta tese está estruturada de forma a contextualizar a importância de modelos de avaliação integrada no capítulo 2, onde é descrito de que forma são definidas as perspectivas sobre a evolução socioeconômica através da análise de cenários comuns na comunidade científica voltada para pesquisas na área de mudanças climáticas (Seção 2.1.). Além disso, expõem-se os principais grupos de modelagem de avaliação integrada para mudanças climáticas a partir de breves descrições de características-chaves de cada modelo (Seção 2.2.). Destaca-se o detalhamento de modelos de equilíbrio geral computável, foco da presente tese, identificando suas principais características (Seção 2.3.), bem como expondo sua fundamentação teórica (Seção 2.3.1.) e descrevendo brevemente os principais modelos globais de equilíbrio geral para análise das mudanças climáticas (Seção 2.3.2.). O capítulo 3 trata sobre a documentação do arcabouço metodológico de modelagem de equilíbrio geral computável do modelo *Total-Economy Assessment*, onde é descrito as dimensões e estrutura geral do modelo (Seção 3.1.), definição das formas funcionais (Seção 3.2.), o fechamento macroeconômico (Seção 3.3.), o método por trás da dinâmica do modelo e suas premissas para construção de trajetórias futuras (Seção 3.4.), além de detalhar a representação de setores energéticos (Seção 3.5.), agropecuários e uso do solo (Seção 3.6.) e contabilização das emissões de GEE (Seção 3.7.), finalizando com indicações de aplicações e meta-análise com resultados de IAMs selecionados referentes à trajetória de referência (Seção 3.8.). O capítulo 4 trata sobre o estudo de caso referente a mudança de dieta global, onde são descritos os cenários implementados no modelo (Seção 4.1.), bem como seus resultados (Seção 4.2.), finalizando com uma discussão sobre o estudo de caso, indicando limitações que influenciam os resultados (Seção 4.3.). No capítulo 5 retomam-se todas as principais conclusões dos capítulos anteriores, indicando limitações gerais da modelagem, bem como possíveis trabalhos futuros.

2. Avaliação Integrada para Mudanças Climáticas

Os modelos de avaliação integrada (IAMs) são abordagens simplificadas, estilizadas e numéricas para representar sistemas físicos e sociais extremamente complexos (CLARKE *et al.*, 2014). Para a análise das mudanças climáticas, de acordo com SATHAYE e SHUKLA (2013), consideram-se IAMs, geralmente, qualquer modelo que: i) represente explicitamente os *drivers* e processos de mudança nos sistemas globais de energia e uso da terra ligados à economia em geral; (ii) captura processos socioeconômicos, incluindo preferências humanas, e biofísicos; (iii) caracteriza trajetórias de mitigação custo-efetivas sob diferentes pressupostos ou restrições, incluindo metas de estabilização do clima.

Alguns IAMs foram projetados inicialmente para abordar problemas ambientais, baseados, portanto, em modelos climáticos, a fim de representar ecossistemas, atmosfera, oceanos, gelo e terra. Outros têm como base modelos energéticos, combinando oferta e demanda de energia com base em representações detalhadas de diferentes combustíveis e tecnologias. Outros, no entanto, são desenvolvidos a partir de modelos econômicos, sendo a economia usada como base para a tomada de decisão e tendo, geralmente, o maior e mais detalhado módulo. O modelo Energy Technology Assessment (ETA) de Alan Manne (1976) foi um marco importante, tendo em vista ser o primeiro a incorporar um sistema de energia em um modelo de crescimento econômico completo. Nestes, os modelos assumem mercados competitivos em pleno funcionamento¹⁰, tendendo para descrições normativas, cujo foco econômico é minimizar custos agregados para alcançar resultados de mitigação, a menos que tenham restrições específicas para se comportarem de outra maneira.

De acordo com CLARKE *et al.* (2014), os IAMs diferem em termos do grau de detalhamento com o qual eles representam o sistema econômico e o grau de interação dos setores econômicos. Um primeiro grupo é formado por IAMs “simples” e clássicos, tais como o *Dynamic Integrated model of Climate and the Economy* (DICE)

¹⁰ Certas dinâmicas importantes como ciclos econômicos e fenômenos como transações não mercantis, assimetrias de informação e decisões que influenciam o poder de mercado não são efetivamente representadas. Ademais, os modelos não representam estruturalmente muitos fatores sociais e políticos que podem influenciar a maneira como o mundo evolui (por exemplo, choques como a crise do petróleo dos anos 70, crise financeira de 2008, etc.). Em vez disso, as implicações dessas forças devem entrar nos modelos por meio de suposições sobre crescimento econômico e fornecimento de recursos.

de William Nordhaus¹¹ (1992; 2017), o *Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution* (FUND) (TOL, 1997; WALDHOFF *et al.*, 2014) e *Policy Analysis of the Greenhouse Effect* (PAGE) (HOPE *et al.*, 1993), os quais podem comparar os custos e benefícios de evitar diferentes níveis de aquecimento, porém não modelam processos e relações mais detalhados entre economia, energia e clima. Geralmente, IAMs com base em modelos energéticos tendem a se concentrar mais em representações detalhadas do setor (equilíbrio parcial), tomando a atividade econômica como um insumo, que não responde a políticas ou outras mudanças.

Por outro lado, há outro grupo de IAMs mais complexos, que são o foco desta tese¹². Estes analisam com mais detalhe tecnologias de energia, tendências sociais e econômicas relacionadas com emissões de GEE. Modelos de equilíbrio geral, por exemplo, representam interações entre todos os setores, de modo a incluir *feedbacks* e possibilidades de substituição para toda a economia, permitindo melhor explorar e compreender efeitos de propagação de políticas climáticas. A manutenção de uma perspectiva de longo prazo, integrada e muitas vezes global, envolve compensações em termos do detalhe em que os principais processos podem ser representados em IAMs. Diferenças na forma como representam regiões, setores, sistemas e tecnologias influenciam não apenas a maneira como os modelos operam, mas também as informações que podem fornecer (CLARKE *et al.*, 2014). Há modelos que não representam o comportamento de certas dinâmicas importantes do sistema energético, como a operação do setor elétrico para a integração de renováveis como energia solar e eólica ou mudanças tecnológicas induzidas por políticas e decisões de investimento. Outros incluem apenas emissões de CO₂, sem tratar mudanças de uso da terra e suas emissões associadas (CLARKE *et al.*, 2014). Isso significa que cada módulo de um IAM tende a ser simplificado em comparação a um modelo energético puro ou a um modelo climático de última geração, de modo que os IAMs devem se unir aos módulos para explorar melhor como eles interagem.

¹¹ Agraciado com o prêmio Nobel de Economia de 2018 juntamente com Paul Romer (NOBEL PRIZE, 2018).

¹² De acordo com WILSON *et al.* (2017), ambos modelos baseados em processos socioeconômicos e biofísicos e modelos baseados no custo-benefício são referidos na literatura como IAMs. Contudo, modelos com estrutura de custo-benefício são ferramentas muito diferentes que enfrentam um conjunto distinto de desafios de avaliação, pois carecem de uma representação detalhada dos processos biofísicos e socioeconômicos nos sistemas de energia e uso da terra e, portanto, não resolvem os mecanismos causais que direcionam as emissões de GEE (MILLNER e MCDERMOTT, 2016).

Na construção de IAMs para análise de mudanças climáticas tem-se a necessidade de modelar a evolução temporal dos processos e não somente levar em conta um estado final. O desenvolvimento de modelos dinâmicos constitui uma tarefa difícil, pois é preciso um tratamento adequado das expectativas dos agentes econômicos em um processo intertemporal, diferentemente, dos modelos estáticos, os quais os agentes econômicos não utilizam informações sobre o passado ou do futuro para tomar suas decisões no presente. Há diferentes tipos de algoritmos de solução, sendo os mais comuns: o recursivo dinâmico e a otimização intertemporal (BLANCHARD, 1979).

Os modelos recursivos dinâmicos consideram a trajetória da economia como uma sucessão de equilíbrios de curto prazo (míope), onde o resultado de um período depende dos resultados obtidos no período anterior (*backward looking expectations*)¹³. Isto é, após um choque de política, a economia sai do equilíbrio inicial, entra em um período de transição e depois se coloca sobre um novo equilíbrio (HOMMES, 1998; ARORA, 2013). Já os modelos de otimização intertemporal, ou *perfect-foresight*, são aqueles que, a partir de uma função objetivo e de restrições econômicas, energéticas, espaciais, tecnológicas, etc., otimizam ao longo do tempo a oferta e a demanda, de modo que todas as decisões futuras sejam levadas em consideração nas decisões de hoje (*forward-looking expectations*)¹⁴ (MORRIS e SHIN, 2006; BABIKER *et al.*, 2009). Através da competição entre setores, tecnologias e fontes energéticas, com o objetivo de minimizar o custo ou maximizar o lucro do sistema, alcança-se o equilíbrio entre a oferta e a demanda de mercado.

Este segundo capítulo é dividido em três seções. Primeiramente, se descreve a evolução histórica de variáveis chaves na modelagem integrada por meio da análise de cenários ou trajetórias (Seção 2.1.). Em seguida, identificam-se os principais grupos de modelagem de avaliação integrada, descrevendo brevemente seus IAMs (Seção 2.2.). Por fim, destacam-se os principais modelos de equilíbrio geral, tema central desta tese, utilizados tanto como módulo central quanto como módulos integrados a estrutura principal de IAM (Seção 2.3.).

¹³ O valor esperado de uma variável é o mesmo que um valor passado daquela variável específica (ARORA, 2013).

¹⁴ O valor esperado de uma variável pelo agente é igual ao valor esperado previsto pelo modelo (ARORA, 2013).

2.1. Perspectivas sobre a Evolução Socioeconômica: Análise de Cenários

A natureza de longo prazo e as incertezas inerentes às mudanças climáticas e às suas forças motrizes tornam a análise de cenários a ferramenta mais indicada para estudos de potenciais desenvolvimentos futuros (HENRICHS *et al.*, 2010). No contexto desse estudo, o termo cenário descreve um futuro do sistema homem-clima, contando com informações qualitativas e quantitativas. Cenários devem cobrir um amplo leque das possíveis causas de futuras emissões de GEE, considerando o potencial das ações antropogênicas, bem como suas forças motrizes subjacentes. A construção do conjunto de cenários se baseia em uma avaliação extensiva da literatura e em diferentes abordagens para modelagem. Estudos individuais podem projetar cenários feitos sob medida para problemas particulares. No entanto, é importante a avaliação de "cenários comuns", isto é, cenários compartilhados na comunidade científica, com foco nos impactos das mudanças climáticas (VAN VUUREN *et al.*, 2014).

A evolução no desenvolvimento de cenários comuns na comunidade científica voltada para o estudo das mudanças climáticas teve início, em 2000, com a compilação do IPCC acerca de um conjunto de cenários que representavam o potencial de forças motrizes e emissões dentro da literatura científica, contando com ampla participação e *feedbacks* de especialistas, o que foi sumarizado no Relatório Especial sobre Cenários de Emissões (*Special Report on Emissions Scenarios – SRES*) (NAKICENOVIC e SWART, 2000). O desenvolvimento dos cenários seguia uma abordagem sequencial, na qual, inicialmente, eram definidas as condições socioeconômicas para, em seguida, se determinar as emissões de GEE, as quais serviam como dados de entrada para modelos de concentração e forçamento radiativo. Somente no último estágio eram analisados os impactos dos cenários, isto é, seus efeitos sobre os ecossistemas, segurança alimentar, saúde humana e ações de adaptação.

Os cenários do SRES cobriam um amplo leque das possíveis causas de futuras emissões de GEE, considerando o potencial das ações antropogênicas, bem como suas forças motrizes subjacentes. A construção do conjunto de cenários foi baseada em uma avaliação extensiva da literatura e em diferentes abordagens para modelagem (NAKICENOVIC e SWART, 2000). Conforme a Figura 2, cada cenário representava uma interpretação quantitativa específica de um dos quatro *storylines*, os quais

consideram diferentes desenvolvimentos demográficos, tecnológicos e econômicos. Talvez a maior contribuição do esforço de criação dos cenários SRES tenha sido o processo aberto pelo qual foram desenvolvidos os cenários, no qual muitos grupos de modelagem estavam envolvidos, diferentemente de um ou dois modelos utilizados nos relatórios anteriores do IPCC (MOSS *et al.*, 2000).

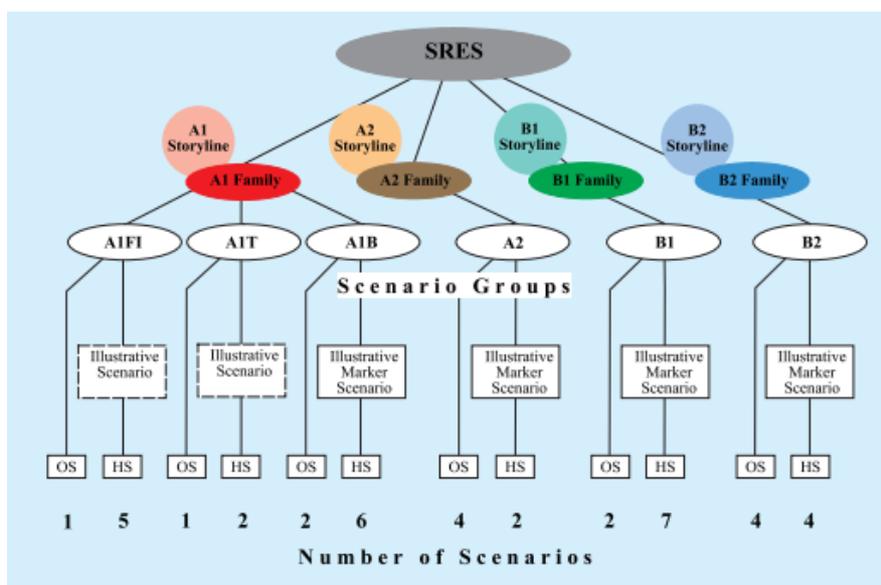


Figura 2: Caracterização dos *storylines* e famílias dos cenários SRES

Fonte: MOSS *et al.* (2000)

Os cenários SRES serviram como guia para diversos cenários de longo prazo, sendo utilizados extensivamente em estudos de mudanças climáticas, incluindo o 4º Relatório de Avaliação (AR4) (IPCC, 2007). Entretanto, com a emergência de novas tecnologias, novos dados socioeconômicos, observações mais precisas sobre fatores ambientais e a necessidade de traduzir os cenários em escalas regionais e nacionais, a comunidade científica identificou a oportunidade de revê-los ou até mesmo substituí-los (VAN VUUREN *et al.*, 2010).

Na verdade, as principais razões para a mudança eram a necessidade de melhorar a colaboração entre os desenvolvedores e os usuários dos cenários, de modo a aperfeiçoar a consistência de seus usos e análises, e o fato de que os cenários SRES não contemplavam análises de políticas climáticas, tais como as metas de emissões do Protocolo de Quioto e demais acordos da UNFCCC (MOSS *et al.*, 2010). Assim, o IPCC decidiu não mais coordenar o processo de desenvolvimento de cenários,

permitindo que diferentes grupos de modelagem da comunidade científica trabalhassem simultaneamente na criação de cenários climáticos de longo prazo.

De acordo com VAN VUUREN *et al.* (2012), o processo consistiu em três fases. Na fase preparatória, primeira do processo de desenvolvimento de cenários pela comunidade científica, foram selecionadas quatro trajetórias existentes na literatura, chamados *Representative Concentration Pathways* (RCP), as quais representam possíveis concentrações atmosféricas de GEE até 2100, ensejando quatro diferentes forçamentos radiativos¹⁵ – mais importante fator para elaboração de cenários de longo prazo para análise das mudanças climáticas (MOSS *et al.*, 2010). Diferente do termo *cenário*, trajetória (*pathway*, em inglês) descreve a evolução de componentes de cenários, tais como concentração atmosférica ou indicadores de desenvolvimento.

Conforme a Figura 3, as quatro trajetórias escolhidas foram: RCP 8,5, o qual representa altas emissões, estabilizando acima de 8,5 W/m² (equivalência de concentração de CO₂ no valor de 1.350 ppm), desenvolvido pelo grupo de modelagem *International Institute for Applied Systems Analysis* (IIASA) (RIAHI *et al.*, 2007; RIAHI *et al.*, 2011); RCP 6,0, alta estabilização em 6,0 W/m² (equivalência de concentração de CO₂ no valor de 850 ppm), desenvolvido pelo grupo de modelagem *National Institute for Environmental Studies* (NIES) (MASUI *et al.*, 2011); RCP 4,5, estabilização intermediária em 4,5 W/m² (equivalência de concentração de CO₂ no valor de 650 ppm), desenvolvido pelo grupo de modelagem *Pacific Northwest National Laboratory's* (PNNL) (CLARKE *et al.*, 2007; THOMSON *et al.*, 2011); e RCP 3,0 (ou RCP 2,6), alta mitigação com estabilização por volta de 2,6 e 3,0 W/m² (equivalência de concentração de CO₂ no valor de 450 ppm), desenvolvido pelo grupo de modelagem *Planbureau voor de Leefomgeving* ou *Netherlands Environmental Assessment Agency* (PBL) (VAN VUUREN *et al.*, 2007; VAN VUUREN *et al.*, 2011).

¹⁵ Perturbação do equilíbrio da energia incidente e emergente do planeta, isto é, mudanças no fluxo de energia causados tanto por causas naturais quanto por ações humanas (IPCC, 2014).

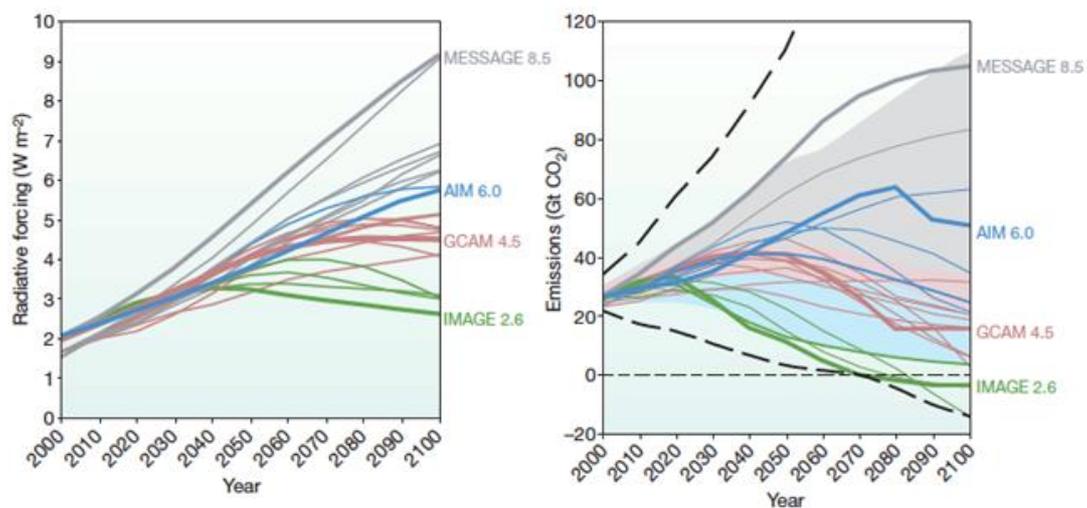


Figura 3: Forçamento radiativo e emissões de GEE dos RCP

Fonte: MOSS *et al.* (2010)

A partir disso, na fase paralela, houve um grande esforço da comunidade científica no desenvolvimento de cenários climáticos utilizando os RCP como referência, porém apresentando disparidades em termos de variáveis chaves, tais como população, crescimento econômico e consumo de energia (VAN VURREN *et al.*, 2012). Sob a ótica da análise integrada, portanto, foram identificadas inconsistências entre algumas premissas socioeconômicas (tais como políticas ambientais, nível de cooperação internacional e orientação política) e as trajetórias descritas pelos RCP. Nesse sentido, foi necessário determinar quais seriam os parâmetros econômicos, tecnológicos, demográficos, políticos e institucionais que poderiam orientar as pesquisas tanto para possíveis ações humanas focadas na tentativa de reduzir ou eliminar as mudanças climáticas e seus impactos (mitigação) quanto acerca dos limites de vulnerabilidades oriundas dos impactos das mudanças climáticas (adaptação) (VAN VUUREN e CARTER, 2014).

Por exemplo, um cenário que considere alta cooperação internacional e orientação política para a sustentabilidade, maior preocupação com o meio ambiente e melhoria da qualidade do ar não seria completamente coerente com um cenário que considera uma alta estabilização do forçamento radioativo (RCP 8,5). O mesmo se poderia dizer da combinação de um cenário de baixo forçamento radioativo (RCP 2,6), o qual seria impossível de ser alcançado sem a cooperação internacional e as

políticas globais de mitigação de GEE, com premissas que favoreçam questões locais e grandes interesses corporativos.

Os principais desafios para a mitigação incluem o uso de energia e da terra, progresso tecnológico e instituições políticas internacionais. No caso dos desafios para a adaptação, fatores institucionais, desigualdade e nível de pobreza futura, bem como a possibilidade de realização ou não de diferentes objetivos de desenvolvimento desempenham um papel crucial. Com o propósito de incluir estas variáveis chaves foram desenvolvidos os *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP), isto é, trajetórias definidas por meio de diferentes narrativas de desenvolvimento de longo prazo, utilizando-se tanto de descrições qualitativas quanto, de modo que possam ser construídos em maior detalhe por diferentes agentes dentro da comunidade científica (O'NEILL, 2011).

Dentro da estrutura conceitual de cenários, os SSP foram construídos para abranger o máximo possível todas as incertezas intrínsecas na evolução socioeconômica, isto é, são trajetórias de referência que descrevem tendências alternativas acerca da evolução da sociedade, economia e ecossistemas na escala de tempo de um século, sem considerar possíveis impactos das mudanças climáticas e na ausência de políticas climáticas (VAN VUUREN e CARTER, 2014; O'NEILL *et al.*, 2014). Além disso, o desenvolvimento de trajetórias socioeconômicas globais de longo prazo leva em consideração a integração e comparabilidade entre os esforços de membros da comunidade científica, bem como fornece informações suficientes tanto a nível agregado quanto desagregado em regiões e setores, além de permitir análises de curto, médio e longo prazos (O'NEILL *et al.*, 2015).

De acordo com KRIEGLER *et al.* (2012), o conjunto de trajetórias deve ser restrito, garantindo maior foco a partir de uma estrutura consistente e, ao mesmo tempo, flexível para facilitar possíveis calibrações. Foram desenvolvidos cinco SSP, ensejando cinco narrativas diferentes, sendo que quatro delas (SSP1, SSP3, SSP4, SSP5) descrevem diferentes combinações de altos e baixos desafios para adaptação e para mitigação, e uma delas (SSP2) descreve desafios moderados de modo a representar um futuro no qual tendências de desenvolvimento não são extremas em nenhuma das dimensões:

- i) SSP1: Sustentabilidade (*Taking the green road*): o mundo muda gradualmente e de forma generalizada em direção a uma trajetória mais

sustentável, enfatizando desenvolvimentos inclusivos que respeitem limites ambientais.

- ii) SSP2: Meio do caminho: o mundo segue um caminho em que as tendências sociais, econômicas e tecnológicas não mudam significativamente, marcado por padrões históricos.
- iii) SSP3: Rivalidade regional (*A rocky road*): um nacionalismo ressurgente, preocupações com competitividade e segurança, bem como conflitos regionais forçam os países a se concentrar cada vez mais nas questões nacionais ou regionais.
- iv) SSP4: Desigualdade (*A road divided*): Investimentos desiguais em capital humano combinados com o aumento de disparidades econômicas e políticas levam a um aumento da desigualdade e da estratificação tanto entre quanto dentro dos países.
- v) SSP5: Desenvolvimento Baseado em Energias Fósseis (*Taking the highway*): impulsionados pelo sucesso econômico das economias industrializadas e emergentes, crescente fé em mercados competitivos, inovação e sociedades participativas produzem um rápido progresso tecnológico e desenvolvimento do capital humano no caminho para o desenvolvimento sustentável.

As narrativas exploram um amplo leque de possíveis trajetórias dentro do contexto das mudanças climáticas e apresentam correlações com diferentes desafios de mitigação e de adaptação. Dessa forma, trajetórias globais agem como um quadro, definindo as condições de contorno, sem ser prescritivas, mas contando com certo grau de flexibilidade. De acordo com O'NEILL *et al.* (2011), os SSP simulam cenários individuais que são representações dos tipos de trajetórias socioeconômicas que poderiam ocupar específicas áreas dentro de todo o espaço, como pode ser observado na Figura 4.



Figura 4: Representação dos SSP

Fonte: O'NEILL *et al.* (2011)

Nos últimos anos, têm sido desenvolvidos cenários para se estabelecer e quantificar as principais variáveis, tais como população e composição educacional (KC e LUTZ, 2017), urbanização (JIANG e O'NEILL, 2015) e projeções econômicas (CUARESMA, 2015; LEIMABCH *et al.*, 2015; DELLINK *et al.*, 2015). Além destas, as narrativas dos SSP incluem descrições de tendências acerca de outras variáveis chaves, tais como globalização, cooperação internacional, intensidade energética, uso do solo, etc.

As projeções econômicas foram desenvolvidas pelo *OECD Environment Directorate*, *OECD Economics Department*, *Wittgenstein Centre for Demography and Global Human Capital* e *Potsdam Institute for Climate Impact Research* baseadas em premissas julgadas consistentes com as narrativas SSP. De acordo com DELLINK *et al.* (2015), o nível de produto mundial bruto (PMB) no final do século varia substancialmente entre os SSP, alcançando US\$ 280 trilhões no SSP3 até mais do que US\$ 1000 trilhões no SSP5, conforme pode ser visualizado na Figura 5. Este padrão é similar para níveis de renda (ou PMB per capita), de modo que o SSP5, com a narrativa focada no desenvolvimento econômico convencional, projeta taxas de crescimento da renda acima de 2% a.a. ao longo do século, levando a um aumento de renda 14 vezes maior em 2100. SSP3 e SSP4, os quais representam trajetórias de

menor cooperação e comércio internacional, ficam no limite inferior, marcando reduções no crescimento global de renda nos valores de 0,5% e 0,75 a.a., respectivamente (CUARESMA, 2015). A queda no crescimento global inicia ainda no começo do século no SSP3, devido a premissas de baixas taxas de crescimento para os *drivers* econômicos, enquanto que a queda é mais gradual no SSP4, o qual segue o padrão de crescimento do SSP2 (LEIMBACH *et al.*, 2015). SSP1 e SSP2 têm taxas de crescimento globais intermediárias, porém SSP1 apresenta maior crescimento nas primeiras décadas, assumindo uma rápida convergência com SSP2. Dadas as altas projeções populacionais no SSP2, o nível de renda diverge mais do que os níveis absolutos de PMB entre SSP1 e SSP2.

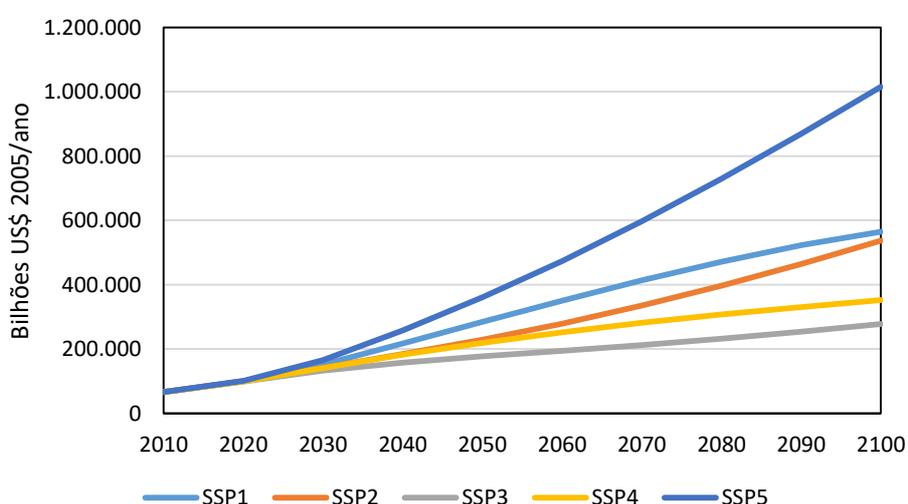


Figura 5: Projeções de PIB mundial para cada SSP

Fonte: elaboração própria a partir de dados de IIASA (2018)

As projeções populacionais e de nível educacional foram desenvolvidas pelo *Wittgenstein Centre for Demography and Global Human Capital* (IIASA, OEAW, WU), definidas num esforço colaborativo com a comunidade internacional de modelos de avaliação integrada. De acordo com KC e LUTZ (2017), em termos do tamanho total da população mundial, as trajetórias resultantes dos cinco SSP ficaram relativamente próximas umas das outras até por volta de 2030 e na metade do século uma visível diferenciação é aparente entre a maior (SSP3) e a menor (SSP1) trajetória, cerca de 1,5 bilhões. A diferença aumenta no final do século, com SSP3 alcançando 12,6 bilhões e SSP1 reduzindo para 6,9 bilhões, o que é inferior aos dias atuais, conforme Figura 6. Em termos de nível educacional, o número absoluto de

pessoas com ensino médio e ensino superior aumenta no decorrer das décadas em todas as trajetórias, reforçando a tendência já pré-programada na estrutura educacional atual, em que quase a totalidade dos jovens apresentam níveis educacionais mais elevados dos que os de gerações passadas. Assim, no SSP1 e SSP5, a proporção global de pessoal com altos níveis educacionais aumenta fortemente e o número de anos médio global de escolaridade do total da população adulta alcança 12 anos já em 2050, o que é o nível atual na Europa (KC e LUTZ, 2017). Para o SSP2, o número de anos médio global de escolaridade alcança 11,2 na metade do século, enquanto que para o SSP3 e SSP4 ligeiramente declina na segunda metade do século, seguindo um menor aumento no futuro próximo devido a premissa de estagnação do aumento de matrículas escolares.

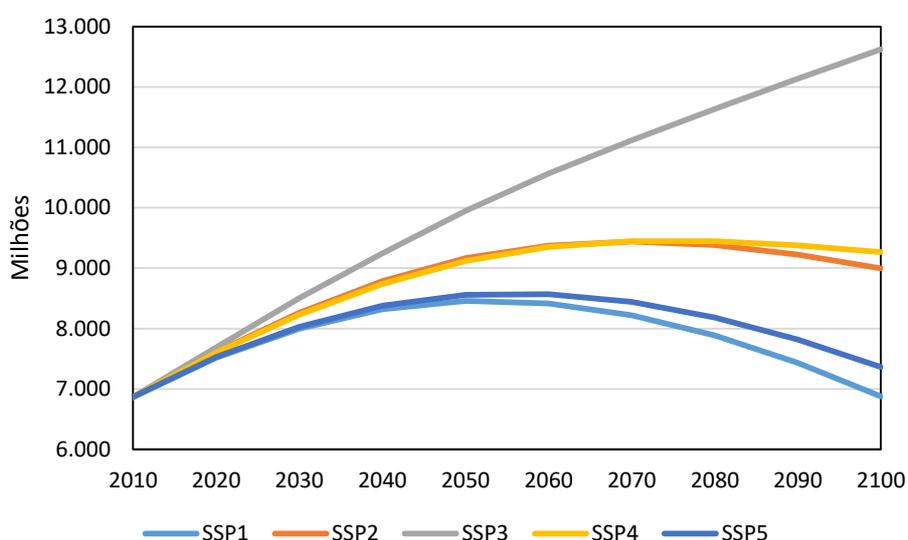


Figura 6: Projeções de população mundial para cada SSP
 Fonte: elaboração própria a partir de dados de IIASA (2018)

Quanto às projeções de níveis globais de urbanização, o estudo foi liderado pelo *National Center for Atmospheric Research* (NCAR). O mundo continua a se urbanizar em cada um dos SSP relativos aos seus níveis atuais de 50,4% urbano, mas os resultados variam amplamente (JIANG e O'NEILL, 2015). Na Figura 7 é possível observar que a urbanização é mais rápida no SSP1, SSP4 e SSP5, alcançando por volta de 92% no final do século. Por outro lado, a urbanização é mais lenta no SSP3, alcançando menos de 60% no final do século, enquanto que a urbanização do SSP2 fica entre estes dois níveis, alcançando 79%.

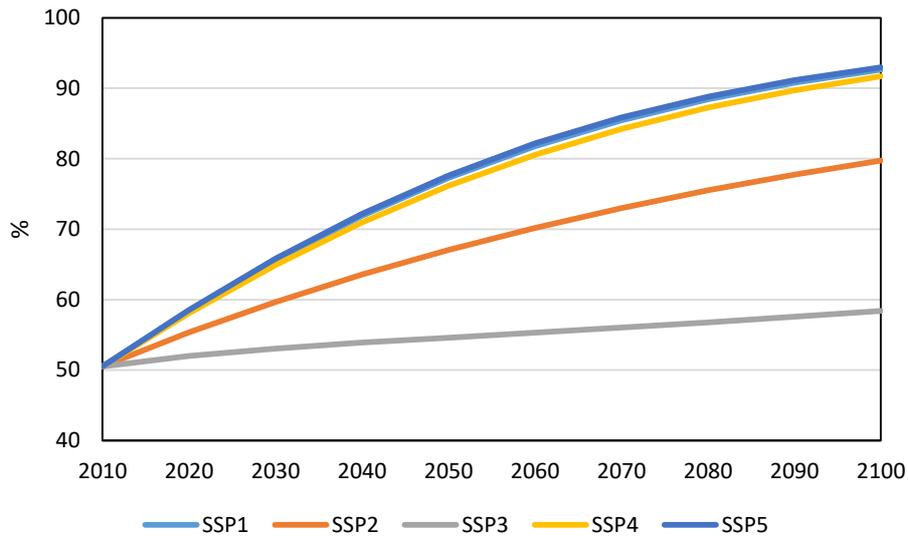


Figura 7: Projeções da porcentagem de urbanização para cada SSP

Fonte: elaboração própria a partir de dados de IIASA (2018)

A importância da quantificação se dá pela utilização de modelos globais de avaliação integrada no estudo de questões ligadas às mudanças climáticas, as quais necessitam do entendimento e representação de aspectos de diferentes disciplinas, uma vez que envolvem diversas dimensões. Assim, resultados de modelos climáticos, energéticos e econômicos, bem como narrativas socioeconômicas e suas variáveis-chaves quantitativas devem ser reunidos para formar o conjunto final de cenários integrados.

2.2. Principais Grupos de Modelagem de Avaliação Integrada para Mudanças Climáticas

Na Tabela 1, é possível visualizar os principais grupos de modelagem de avaliação integrada da comunidade científica sobre mudanças climáticas. Tais IAMs globais estão em posição privilegiada para contribuir com *insights* sobre: (i) efeitos sistêmicos, interações e *trade-offs* entre setores, regiões, objetivos de políticas e metas de sustentabilidade; (ii) consequências a longo prazo das decisões de curto prazo; e (iii) trajetórias para alcançar orçamentos de carbono globais predeterminados (LIU *et al.*, 2015; IYER *et al.*, 2015; VAN VUUREN *et al.*, 2016). É possível observar que há um equilíbrio no uso de algoritmos, os quais levam a soluções que se distinguem na natureza, isto é, uns definem suas expectativas em um processo intertemporal

baseados na otimização do período anterior, enquanto em outros as decisões de hoje levam em consideração expectativas futuras. Nesse sentido, muitos dos IAMs que contam com modelos econômicos como módulo central, com destaque para os modelos de equilíbrio geral computável (CGE), são recursivos dinâmicos, enquanto aqueles que contam com modelos energéticos como módulo central tendem a optar pela otimização intertemporal. Ademais, vale destacar que alguns IAMs apresentam representação detalhada do uso do solo, tais como o IMAGE e COFFEE, outros contam com interações com modelos específicos, como é o caso do MESSAGE com GLOBIOM, IMACLIM com Nexus e do REMIND com o MAgPIE. No que se refere a abrangência espacial e temporal, os IAMs, usualmente, cobrem de 9 a 77 regiões do mundo em projeções, em sua maioria, até 2100.

Tabela 1: Características gerais dos principais IAMs globais

Modelo	Instituição	País/Região	Módulo central	Equilíbrio	Algoritmo de Solução	Dimensão temporal	Dimensão espacial	Sistema Socioeconômico	Sistema Energético	Uso do Solo	Emissões
AIM/CGE	NIES	Japão	Economia	Geral	Problema de complementariedade mista. Recursivo dinâmico.	Ano base: 2005. 1-1 ano até 2100	17 regiões	Representação de toda economia em 19 setores não-energéticos e 19 setores/tecnologias energéticas	Representação detalhada do setor energético, com módulos explícitos de tecnologias no setor elétrico	Função logit multinomial. Terra é categorizada em nove zonas ecológicas	GEE (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, F-gases, HFCs) e não-GEE (SO ₂ , NO _x , NH ₃ , VOC, PM)
COFFEE	CENERGIA-COPPE	Brasil	Energia	Parcial	Otimização intertemporal	Ano base: 2010. 5-5 anos até 2100	18 regiões	População e PIB per capita como <i>drivers</i> para o setor energético e uso do solo	Representação detalhada do setor energético e tecnologias de conversão	Representação detalhada. Terra é categorizada em sete categorias	GEE (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O)
DNE21+	RITE	Japão	Energia	Parcial	Otimização intertemporal	Ano base: 2005. 5-5 anos até 2030 e 10-10 anos até 2050	77 regiões	População e PIB per capita como <i>drivers</i> para o setor energético e uso do solo	Representação detalhada do setor energético e tecnologias de conversão	Representação detalhada. Terra categorizada de acordo com Zonas Agroecológicas Globais (GAEZ, sigla em inglês)	GEE (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFCs, PFC, SF ₆)
GCAM	PNNL	EUA	Energia	Parcial	Recursivo dinâmico	Ano base: 2010. 5-5 anos até 2100	32 regiões	População e PIB per capita como <i>drivers</i> para o setor energético e uso do solo	Representação detalhada do setor energético e tecnologias de conversão	Produção, consumo e preços para mais de 300 sub-regiões em termos de uso da terra	GEE (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, CF ₄ , C ₂ F ₆ , SF ₆ , HFCs) e não-GEE (SO ₂ , BC, OC, CO, VOCs, NO _x , NH ₃)
GEM-E3	ICCS	Grécia / Comissão Europeia	Economia	Geral	Problema de complementariedade mista. Recursivo dinâmico	Ano base: 1985. 5-5 anos até 2100	38 regiões	Representação de toda economia em 15 setores não-energéticos e 16 setores/tecnologias energéticas	Representação detalhada do setor energético, com módulos explícitos de tecnologias no setor elétrico	Sem representação. Setor agricultura engloba toda terra disponível	GEE (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, SF ₆ , HFCs, PFC)

Modelo	Instituição	País/Região	Módulo central	Equilíbrio	Algoritmo de Solução	Dimensão temporal	Dimensão espacial	Sistema Socioeconômico	Sistema Energético	Uso do Solo	Emissões
GIAM	CSIRO/ABARE	Austrália	Economia	Geral	Problema de complementariedade mista. Recursivo dinâmico	Ano base: 2005. 5-5 anos até 2100	13 regiões	Representação de toda economia em 16 setores não-energéticos e 5 setores/tecnologias energéticas	Representação detalhada do setor energético, com módulos explícitos de tecnologias no setor elétrico	Representação detalhada da cadeia logística dos setores agropecuários	GEE (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O)
IGMS	MIT	EUA	Clima	Geral	Recursivo dinâmico	Ano base: 2007. 5-5 anos até 2100	18 regiões	Representação de toda economia em 9 setores não-energéticos e 19 setores/tecnologias energéticas	Representação detalhada do setor energético, com módulos explícitos de tecnologias no setor elétrico	Representação simplificada. Terra é categorizada em 3 tipos: agricultura, pecuária e florestas	GEE (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, CF ₄ , PFCs, SF ₆ , HFCs) e não-GEE (SO ₂ , NMVOCs, BC, CO, NO _x , NH ₃)
IMACLIM	CIREC	França	Economia	Geral	Recursivo dinâmico	Ano base: 2001. 1-1 ano até 2100	12 regiões	Representação de toda economia em 12 setores	Representação detalhada do setor energético, com módulos explícitos de tecnologias no setor elétrico	<i>Link</i> com o modelo Nexus Land-Use	CO ₂ (gases não-CO ₂ não são modelados)
IMAGE	PBL	Holanda	Energia e Uso do Solo	Parcial	Recursivo dinâmico	Ano base: 2005. 1-1 ou 5-5 anos até 2100	26 regiões	<i>Drivers</i> : população; PIB; política e governança; desenvolvimento tecnológico; cultura e estilo de vida; e disponibilidade de recursos naturais	<i>Link</i> com o modelo TIMER. Representação detalhada do setor energético, com módulos explícitos de tecnologias no setor elétrico	Representação detalhada. Cobertura da terra é calculada para alocação do uso, manejo florestal, pecuária, ciclos de carbono e vegetação natural	GEE (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, CF ₄ , PFCs, SF ₆ , HFCs) e não-GEE (SO ₂ , NMVOCs, BC, CO, OC, NO _x , NH ₃)

Modelo	Instituição	País/Região	Módulo central	Equilíbrio	Algoritmo de Solução	Dimensão temporal	Dimensão espacial	Sistema Socioeconômico	Sistema Energético	Uso do Solo	Emissões
MERGE	EPRI	EUA	Economia e Energia	Geral	Otimização intertemporal	Ano base: 2000. 10-10 anos até 2100	9 regiões	População e PIB como <i>drivers</i>	Representação detalhada do setor energético e tecnologias de conversão	Sem representação.	GEE (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, CF ₄ , PFCs, SF ₆ , HFCs)
MESSAGE	IIASA	Áustria	Energia	Parcial	Otimização intertemporal	Ano base: 2005. 10-10 anos até 2100	11 regiões	<i>Link</i> com o modelo macroeconômico MACRO que representa toda a economia e fornece as demandas em serviços energéticos	Representação detalhada do setor energético e tecnologias de conversão	<i>Link</i> com o modelo GLOBIOM que representa a competição entre diferentes atividades baseadas no uso da terra	GEE (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, CF ₄ , PFCs, SF ₆ , HFCs) e <i>link</i> com modelo GAINS que calcula não-GEE
POLES	EU-JRC-IPTS / EDDEN	França / Comissão Europeia	Energia	Parcial	Recursivo dinâmico	Ano base: 2015. 1-1 ano até 2100	57 regiões	População e PIB per capita como <i>drivers</i> para o setor energético e uso do solo	Representação detalhada do setor energético e tecnologias de conversão	Representação detalhada para atividades agropecuárias, florestas, áreas urbanas,	GEE (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, CF ₄ , PFCs, SF ₆ , HFCs)
REMIND	PIK	Alemanha	Energia e Economia	Parcial	Modelo de crescimento ótimo do tipo Ramsey. Otimização intertemporal do bem-estar	Ano base: 2005. 5-5 anos até 2100	11 regiões	População e PIB como <i>drivers</i> para modelar cada região como um agente representativo cuja função de utilidade depende do consumo per capita	Representação detalhada do setor energético e tecnologias de conversão (> 40 tecnologias)	<i>Link</i> com o modelo MAGPIE para interações entre demanda e oferta de bioenergia, bem como uso da terra e preços de GEE	GEE (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, CF ₄ , PFCs, SF ₆ , HFCs) e não-GEE (SO ₂ , NMVOCs, BC, CO, OC, NO _x , NH ₃)
TIAM	UCL	Inglaterra	Energia e Economia	Geral	Otimização linear intertemporal	Ano base: 2005. 5-5 anos até 2070 e 10-10 anos até 2100	16 regiões	<i>Link</i> com o modelo <i>Macro Stand Alone</i> (MSA) fornecendo 42 demandas de serviços de energia para cinco setores de uso final	Representação detalhada do setor energético e tecnologias de conversão	Sem representação do uso do solo	GEE (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O)

Modelo	Instituição	País/Região	Módulo central	Equilíbrio	Algoritmo de Solução	Dimensão temporal	Dimensão espacial	Sistema Socioeconômico	Sistema Energético	Uso do Solo	Emissões
WITCH	FEEM	Itália	Economia e Energia	Geral	Otimização não-linear intertemporal numa estrutura de teoria dos jogos	Ano base: 2005. 5-5 anos até 2035 e 10-10 anos até 2150 ou 2300	14 regiões	População e PIB como <i>drivers</i> para modelar cada região como um agente representativo cuja função de utilidade depende do consumo per capita	Representação detalhada do setor energético e tecnologias de conversão	Representação simplificada com foco apenas em desmatamento	GEE (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, CF ₄ , PFCs, SF ₆ , HFCs) e não-GEE (SO ₂ , NMVOCs, BC, CO, OC, NO _x , NH ₃)

2.2.1. Principais Modelos de Avaliação Integrada para Análise das Mudanças Climáticas

Nas próximas seções são realizadas breves descrições dos principais modelos de avaliação integrada para análise das mudanças climáticas, conforme Tabela 1.

2.2.1.1. Asia-Pacific Integrated Assessment

O *Asia-Pacific Integrated Assessment/Computable General Equilibrium* (AIM/CGE) é um IAM do grupo NIES (*National Institute for Environmental Studies*) do Japão. Conforme representado na Figura 8, trata-se de um modelo de equilíbrio geral recursivo dinâmico que abrange todas as regiões do mundo: 17 regiões e 42 classificações setoriais (FUJIMORI *et al.*, 2012, FUJIMORI *et al.*, 2014, HASEGAWA *et al.*, 2015). Da mesma forma que outros modelos CGE, AIM/CGE lida com toda a produção econômica e comportamentos de consumo, com particular ênfase na representação da energia, agricultura e o uso da terra, a fim de avaliar suas emissões de GEE. Supõe-se que os setores produtivos maximizem os lucros com funções de substituição de elasticidade constante (CES) multi-aninhadas e com cada preço de entrada. Os gastos das famílias sobre cada mercadoria são descritos por uma função de gastos linear. A taxa de poupança é determinada endogenamente para se equilibrar ao investimento. Além disso, agricultura e uso da terra apresentam também alta resolução para lidar adequadamente com a bioenergia e a competição de uso da terra.

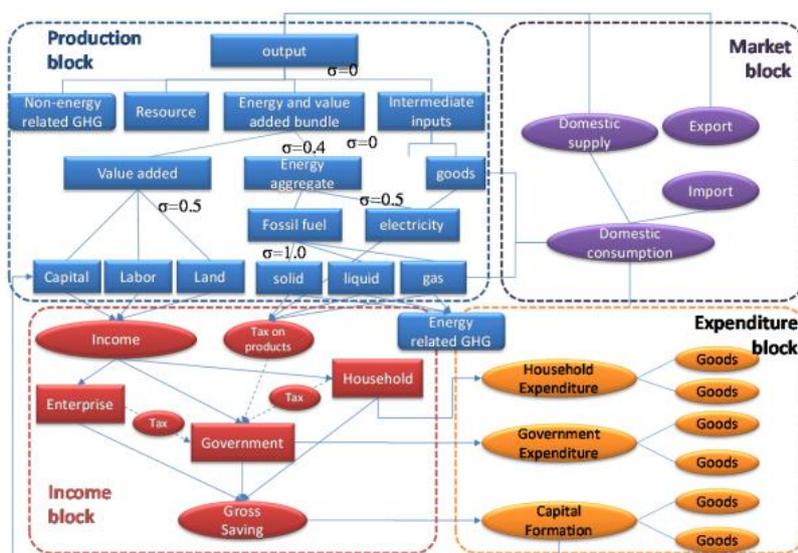


Figura 8: Visão geral da estrutura do modelo AIM/CGE

Fonte: FUJIMORI *et al.* (2012)

2.2.1.2. *Computable Framework For Energy, Land and the Environment*

O *Computable Framework For Energy, Land and the Environment* (COFFEE) é um IAM do grupo Cenergia da COPPE/UFRJ. Conforme representado na Figura 9, trata-se de um modelo de otimização intertemporal do sistema energético e de uso da terra para 18 regiões, dando destaque aos BRICS e outras grandes economias. O modelo minimiza os custos de todo o sistema de energia, incluindo os setores de geração de eletricidade, agricultura, indústria, transporte e construção. A partir dos recursos exclusivos de cada região, o sistema de energia produz toda a energia primária que é transformada em energia secundária e, por conseguinte, em energia final. Todos esses três níveis de energia podem ser importados para outras regiões ou importados de outras regiões, se as restrições e os custos associados a eles forem satisfeitos. Em cada setor, todas as fontes finais de energia são transformadas em serviços de energia, os quais são a demanda exógena que o modelo precisa atender a um custo mínimo. Além do sistema de energia, o modelo conta com a representação do uso do solo, mudança do uso do solo, o setor florestal e agrícola. Dessa forma, o modelo é capaz de explorar as interações entre energia e uso do solo, de modo a fornecer projeções de uso de energia, mudança do uso do solo e emissões globais de GEE, bem como análise quantitativa para apoiar políticas climáticas globais de mitigação (ROCHEDO, 2016).

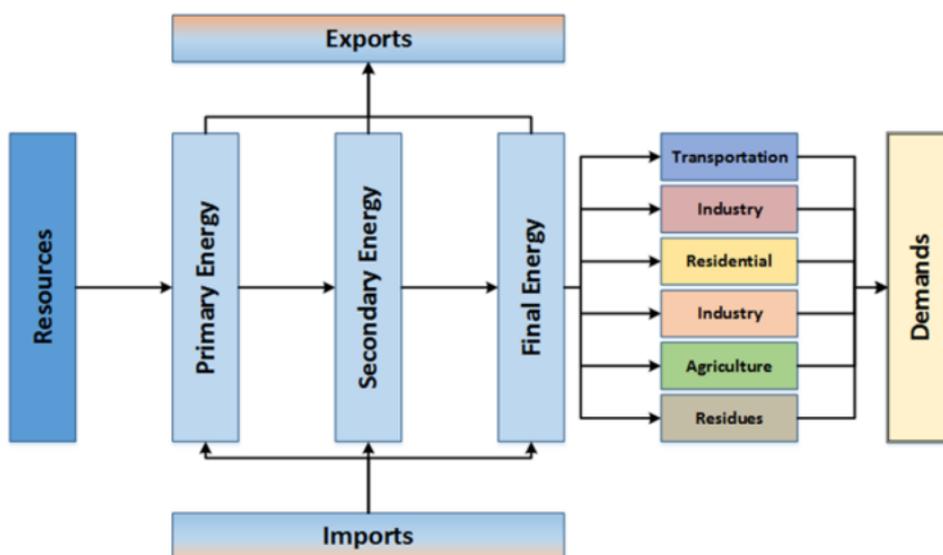


Figura 9: Representação do sistema energético do modelo COFFEE

Fonte: ROCHEDO (2016)

2.2.1.3. RITE Global Model for Energy and Climate Change Assessment

O RITE Global Model for Energy and Climate Change Assessment (DNE21+) é um IAM do grupo RITE (*Research Institute of Innovative Technology for the Earth*) do Japão. Conforme representado na Figura 10, trata-se de um modelo de programação linear intertemporal para avaliar os sistemas globais de energia e as opções de mitigação do aquecimento global (RITE, 2019). Representa sistemas de energia, otimizando via mínimo custo. O modelo representa diferenças regionais e avalia tecnologias detalhadas de redução de emissão de CO₂ relacionadas à energia até 2050. A oferta de energia está fortemente ligada a setores de uso final de energia, incluindo exportação e importação de energia. Os custos tecnológicos e a eficiência energética (vários tipos de tecnologias de geração de energia, refinaria de petróleo, tecnologia de gaseificação de carvão, etc.) e captura, sequestro e armazenamento de CO₂ são explicitamente modelados. Ademais, indústrias intensivas em energia, como aço, cimento, papel e celulose, alumínio, alguns grupos da indústria química, transporte (automóveis) e vários grupos do setor residencial e comercial também são explicitamente representados. A estrutura de avaliação integrada consiste em 3 módulos: um modelo principal de avaliação DNE21 para energia; um modelo de mudança de uso do solo; cenário de emissão de CO₂ não-energético; e um modelo de avaliação de GEE não-CO₂.

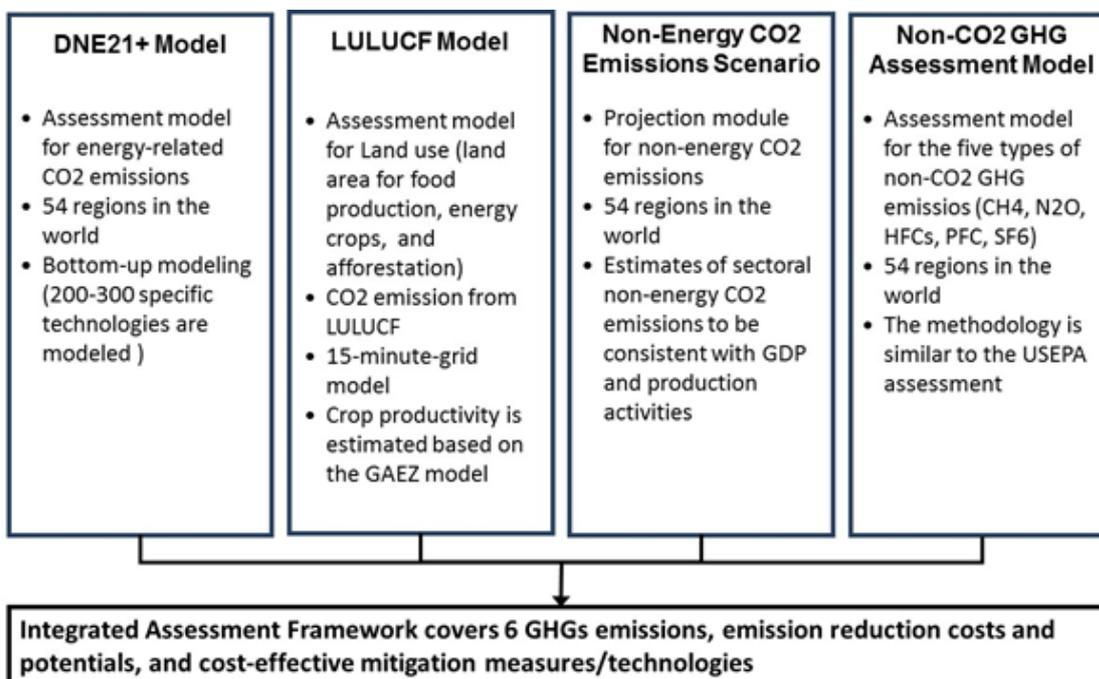


Figura 10: Estrutura do modelo DNE21+

Fonte: RITE (2019)

2.2.1.4. Global Change Assessment Model

O *Global Change Assessment Model* (GCAM) é um IAM do grupo *Joint Global Change Research Institute* (JGCRI) do PNNL (*Pacific Northwest National Laboratory*) dos Estados Unidos. Conforme representado na Figura 11, trata-se de um modelo com ênfase nas interações entre cinco sistemas integrados: energia, água, uso do solo, economia e clima (CALVIN *et al.*, 2018). O GCAM tem um escopo global e é desagregado em 32 regiões econômicas e de energia, 235 regiões de agricultura e de uso da terra e 384 bacias hidrológicas. GCAM é um modelo de equilíbrio de mercado dinâmico-recursivo, de modo que os preços são ajustados para assegurar que as ofertas e demandas de todas as mercadorias sejam equilibradas em cada período. Crescimento populacional e produtividade do trabalho impulsionam os sistemas de energia e uso da terra empregando inúmeras opções tecnológicas para produzir, transformar e fornecer serviços de energia, bem como para produzir produtos agrícolas e florestais e determinar o uso e cobertura da terra. O sistema de energia é representado por fontes de fornecimento, modos de transformação e demandas de serviços de energia, como transporte de passageiros e carga, uso industrial e demandas de serviços residencial e comercial. Agricultura e florestas fornecem informações sobre o uso da terra, cobertura do solo, além de produção de bioenergia, alimentos e produtos florestais. O módulo de água fornece informações sobre retiradas e consumo de água para energia e agricultura. O sistema climático é modelado usando o Hector, um emulador do sistema físico que fornece informações sobre a composição da atmosfera.

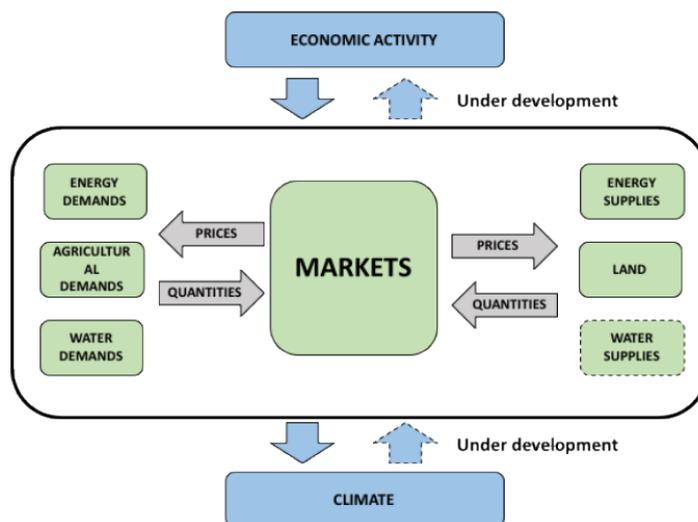


Figura 11: Diagrama conceitual do funcionamento do modelo GCAM

Fonte: CALVIN *et al.* (2018)

2.2.1.5. General Equilibrium Model for Economy – Energy – Environment

O *General Equilibrium Model for Economy – Energy – Environment* (GEM-E3) é um IAM do grupo ICCS/JRC (*Institute of Communication and Computer Systems - National Technical University of Athens / Joint Research Centre*) da Grécia/Comissão Europeia. Conforme representado na Figura 12, trata-se de um modelo de equilíbrio geral computável dinâmico recursivo que cobre as interações entre a economia, o sistema energético e o meio ambiente (CAPROS *et al.*, 2013). Foi especialmente desenhado para avaliar políticas energéticas, climáticas e ambientais. O modelo GEM-E3 é flexível em sua agregação regional e setorial. Tipicamente, representa individualmente os 28 Estados-Membros europeus, bem como países da OCDE e do G20. Dessa forma, GEM-E3 é capaz de avaliar consistentemente os efeitos distributivos e macroeconômicos das políticas para os diversos setores e agentes econômicos em todos os países. Calcula simultaneamente o equilíbrio nos mercados de bens e serviços, bem como nos fatores de produção (trabalho e capital), de modo que os agentes econômicos otimizam suas funções objetivo (bem-estar para as famílias e custo para as empresas) e determina separadamente a oferta ou demanda de mão-de-obra, capital, energia e outros bens. Os preços de mercado garantem um equilíbrio global de forma endógena, dado que as regiões geográficas estão ligadas através do comércio bilateral. Por fim, o modelo permite comparar os efeitos econômicos de vários instrumentos de política climática, tais como impostos, leilões, várias formas de licenças de poluição e políticas de comando e controle no contexto das políticas climáticas e energéticas.

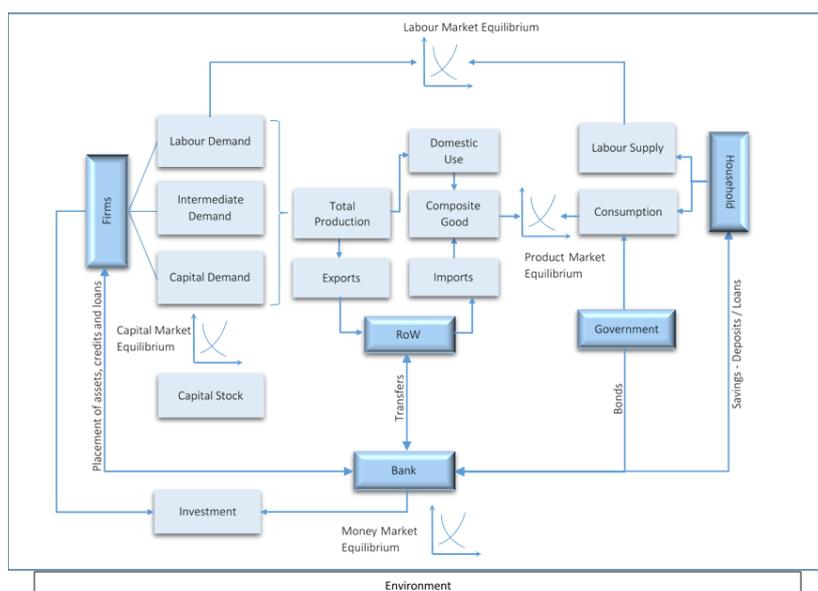


Figura 12: Fluxo circular de funcionamento do modelo GEM-E3

Fonte: CAPROS *et al.* (2013)

2.2.1.6. Global Integrated Assessment Model

O *Global Integrated Assessment Model* (GIAM) é um IAM do grupo CSIRO/ABARE (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation/Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics*) da Austrália. Conforme representado na Figura 13, trata-se de um modelo acoplado por dois módulos: um econômico e outro climático (GUNASEKERA *et al.*, 2008; HARMAN *et al.*, 2008). O módulo econômico do GIAM é uma versão de longo prazo do modelo global de equilíbrio geral GTEM, que permite projetar os principais fatores induzidos pelo homem, que influenciam as condições climáticas, considerando as decisões regionais e globais de produção e consumo e o comércio internacional. O módulo climático do GIAM é um modelo não linear para o CO₂ global, outros gases de efeito estufa e a temperatura global (SCCM). Na estrutura analítica da GIAM, o módulo GTEM projeta as emissões de GEE com base nas atividades econômicas. Essas emissões são então alimentadas no módulo SCCM. O módulo SCCM converte as emissões em níveis de concentração de CO₂ e depois em mudanças de temperatura. O GIAM pode ser utilizado para realizar uma série de análises incluindo impactos climáticos regionais, bem como analisar respostas dos setores agropecuários às mudanças de temperatura, precipitação e produtividade, oriundas das mudanças climáticas. Ademais, a versão atual conta com projeções a partir de um intervalo de valores de parâmetros, a partir de funções de distribuição de probabilidades.

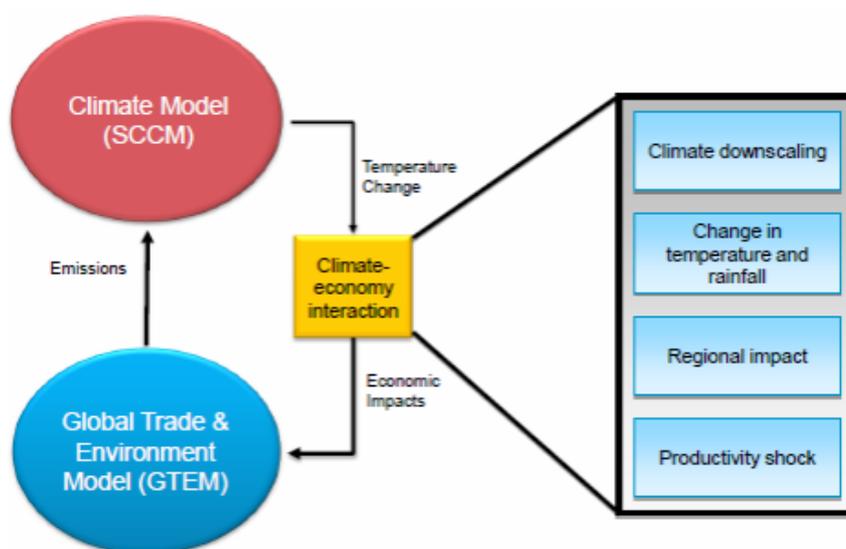


Figura 13: Estrutura do modelo GIAM

Fonte: SCEALY *et al.* (2011)

2.2.1.7. Integrated Global System Modeling

O *Integrated Global System Modeling* (IGMS) é um IAM do grupo MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) dos Estados Unidos. Conforme representado na Figura 14, trata-se de um modelo que analisa as interações entre o sistema climático e a atividade humana, representada pela economia mundial (SOKOLOV *et al.*, 2005). Foi projetado para analisar mudanças globais no meio ambiente que podem resultar de causas antropogênicas, quantificando as incertezas associadas e avaliando o custo-efetividade de políticas ambientais para mitigar o risco climático. Conta com o modelo climático *MIT Earth System Model* (MESM) e o modelo econômico *Economic Projection and Policy Analysis* (EPPA), um modelo de equilíbrio geral computável recursivo dinâmico, multisetorial e multirregional (PALTSEV *et al.*, 2005). O modelo EPPA simula a evolução dos processos econômicos, demográficos e tecnológicos envolvidos em atividades que afetam o meio ambiente global, fornecendo projeções do desenvolvimento econômico mundial e análises de emissões. O resultado dessas atividades antropogênicas em termos de emissões de gases de efeito estufa, poluentes de ar e água e mudanças de uso são introduzidos no modelo MESM, que compreende submodelos de processos físicos, dinâmicos e químicos na atmosfera, terra e sistemas de água doce, oceano e criosfera.

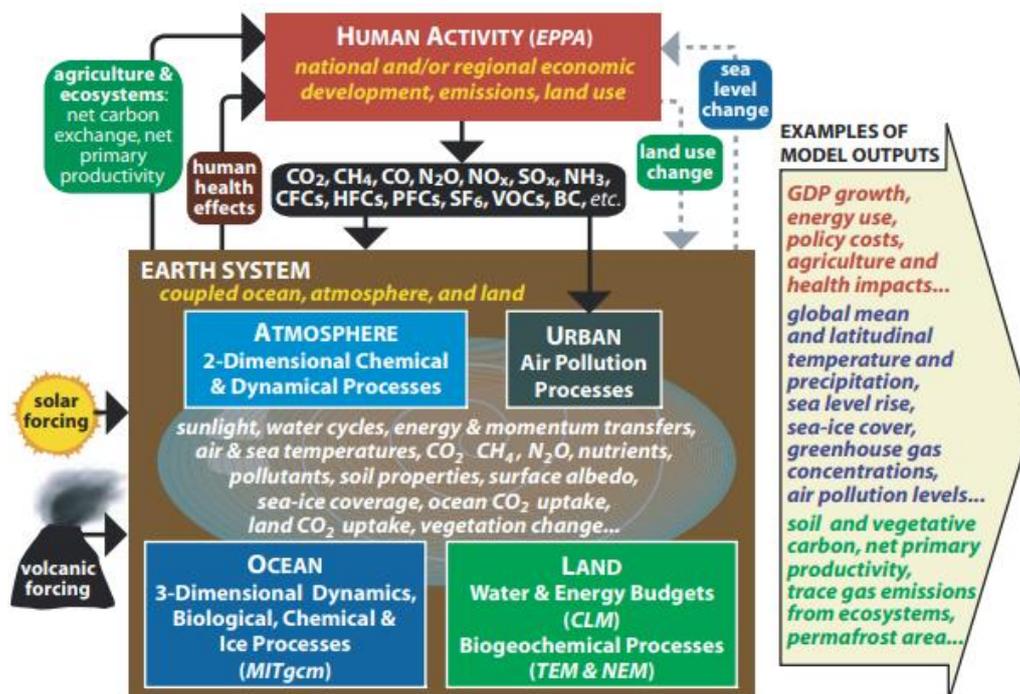


Figura 14: Esquema do funcionamento do modelo IGMS

Fonte: SOKOLOV *et al.* (2005)

2.2.1.8. *Images du Climat*

O *Images du Climat* (IMACLIM) é um IAM do grupo CIRED (*Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement*) da França. Foi construído com o propósito de fazer face ao desafio científico referente às questões que envolvem o desenvolvimento e a preservação do meio ambiente, em particular para avaliar políticas climáticas e energéticas. O modelo está atualmente disponível em uma versão estática e recursiva. Conforme representado na Figura 15, o modelo IMACLIM-R combina uma estrutura de CGE com módulos setoriais *bottom-up* (híbrido) em uma estrutura recursiva dinâmica, multirregional (12 regiões) e multisetorial (12 setores) da economia mundial (CRASSOUS *et al.*, 2006; SASSI *et al.*, 2010). O modelo se baseia no modelo neoclássico, descrevendo os *trade-offs* dos consumidores e dos produtores, e calcula caminhos econômicos de longo prazo, podendo representar importantes mudanças estruturais e técnicas ao longo de um século. Fornece um quadro macroeconômico que analisa as relações entre a economia e os setores de energia. Representa interações entre setores e regiões através do equilíbrio do mercado de bens e simula o impacto econômico das mudanças que ocorrem no setor energético tanto no nível macroeconômico (mudança no bem-estar, ganhos ou perdas de competitividade) quanto no nível microeconômico (peso da energia na estrutura dos custos de produção ou nas despesas das famílias). Ademais, descreve padrões de crescimento considerando imperfeições de mercado, usos parciais de fatores de produção e expectativas imperfeitas.

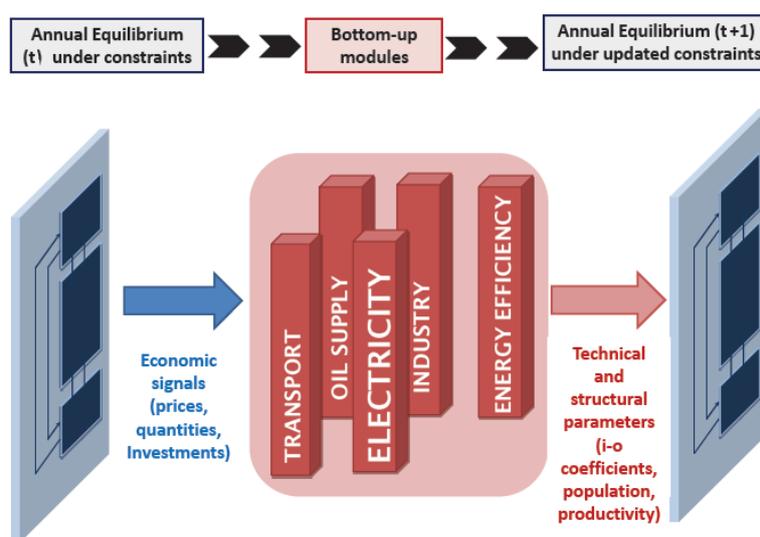


Figura 15: Arquitetura recursiva e modular do modelo IMACLIM-R

Fonte: SASSI *et al.* (2010)

2.2.1.9. Integrated Model to Assess the Global Environment

O *Integrated Model to Assess the Global Environment* (IMAGE) é um IAM do grupo PBL (*Planbureau voor de Leefomgeving*, ou *Netherlands Environmental Assessment Agency*) da Holanda. Conforme representado na Figura 16, a estrutura de modelagem integrada IMAGE consiste em um conjunto de modelos interligados que descrevem os principais elementos da dinâmica de longo prazo acerca dos impactos ambientais globais, tais como poluição do ar, alterações climáticas e alterações no uso do solo (ALCAMO, 1994; BOUWMAN *et al.*, 2006; STEHFEST *et al.*, 2014). O modelo energético global (TIMER) descreve a demanda e produção de energia primária e secundária, bem como as emissões de GEE e poluentes atmosféricos para 26 regiões. Os módulos de terra e clima (IMAGE) descrevem a dinâmica da agricultura e de florestas, bem como as consequentes alterações climáticas (ALCAMO, 1994). Para alimentação e agricultura, utilizam-se projeções feitas pelo modelo de equilíbrio geral computável MAGNET, o qual descreve mudanças na produção e comércio de alimentos para um amplo conjunto de culturas e produtos animais. O *Atmospheric and Ocean System* (AOS) calcula as mudanças na composição atmosférica usando as emissões dos módulos de energia e uso do solo.

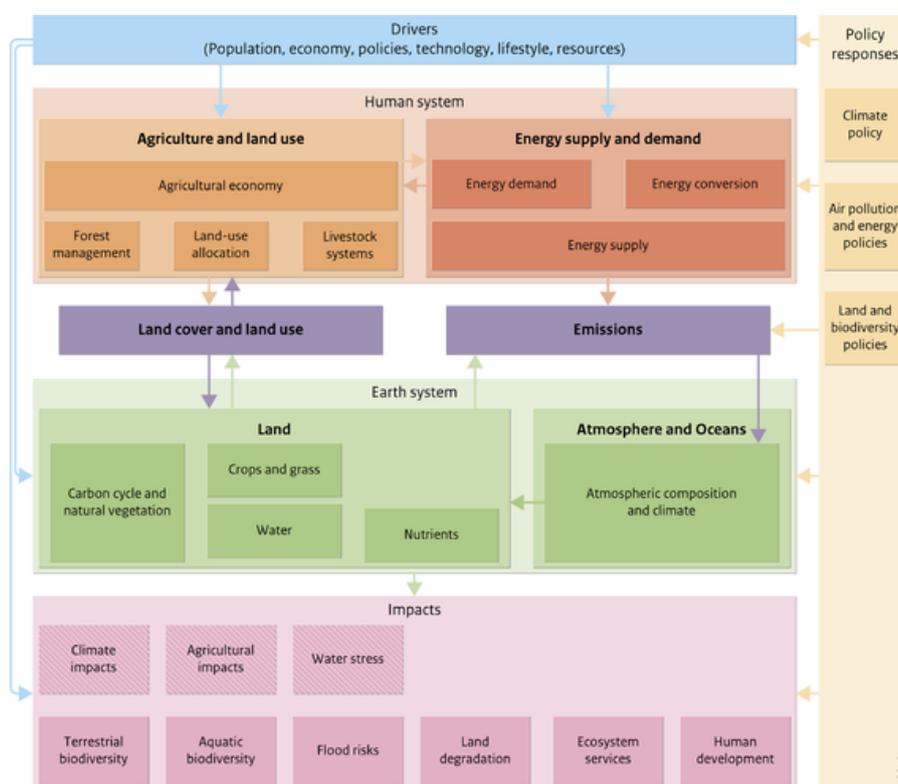


Figura 16: Visão geral do modelo IMAGE

Fonte: STEHFEST *et al.* (2014)

2.2.1.10. Model for Estimating the Regional and Global Effects of GHG Reduction Policies

O Model for Estimating the Regional and Global Effects of GHG Reduction Policies (MERGE) é um IAM do grupo de EPRI (*Electric Power Research Institute*) dos EUA. Conforme representado na Figura 17, trata-se de um modelo intertemporal de equilíbrio geral para estimar os efeitos regionais e globais das reduções de GEE, quantificando formas alternativas de pensar sobre a mudança climática (MANNE e RICHELIS, 2004). Divide o mundo em regiões geopolíticas, cada uma representada por dois submodelos acoplados descrevendo a economia e os setores de energia. O MERGE funciona como um planejador social global com *perfect foresight* e determina o equilíbrio econômico em cada região que maximiza o bem-estar global, definido como uma combinação linear dos atuais e futuros bem-estares regionais (MARCUCCI e TURTON, 2012). A economia doméstica de cada região é vista como um modelo de crescimento econômico ótimo a longo prazo, sendo que as escolhas intertemporais são fortemente influenciadas pela escolha de uma taxa de desconto de "utilidade". A capacidade de resposta dos preços é introduzida através de uma função de produção *top-down*. Além disso, o MERGE inclui os submodelos globais de emissões de GEE e de clima para permitir a análise da efetividade e impactos de políticas climáticas, bem como o papel das tecnologias para atingir metas climáticas.

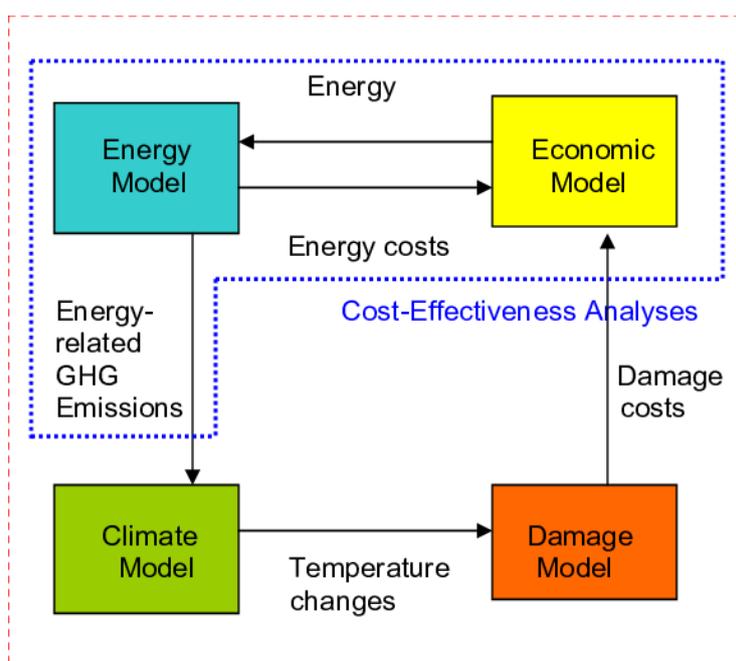


Figura 17: Visão integrada do modelo MERGE

Fonte: MARCUCCI e TURTON (2012)

2.2.1.11. Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts

O *Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts* (MESSAGE) é um IAM do grupo IIASA (*International Institute for Applied System Analysis*) da Áustria. De acordo com MESSNER e STRUBEGGER (1995) e RIAHI *et al.* (2007), trata-se de um modelo de engenharia de energia baseado em uma abordagem de otimização de programação linear (LP) que é usada para o planejamento do sistema de energia de médio a longo prazo e análise de políticas para 11 regiões. Conforme representado na Figura 18, o modelo minimiza os custos totais do sistema de energia e fornece informações sobre a utilização de recursos internos, importações e exportações de energia e fluxos monetários relacionados ao comércio, opções de investimento, etc. Além do sistema energético, o modelo também inclui representações genéricas da agricultura e da silvicultura, o que permite a incorporação de emissões e opções de mitigação para toda a gama de GEE. MESSAGE está ligado a um modelo macroeconômico (MACRO), no qual estoque de capital, mão de obra disponível e insumos de energia determinam a produção total da economia de acordo com uma função de produção CES (MESSNER e SCHRATTENHOLZER, 2000). Além disso, MESSAGE está ligado ao *Global Biosphere Management Model* (GLOBIOM), um modelo de equilíbrio parcial que representa várias atividades baseadas no uso da terra, incluindo setores de agricultura, silvicultura e bioenergia (HAVLÍK *et al.*, 2011).

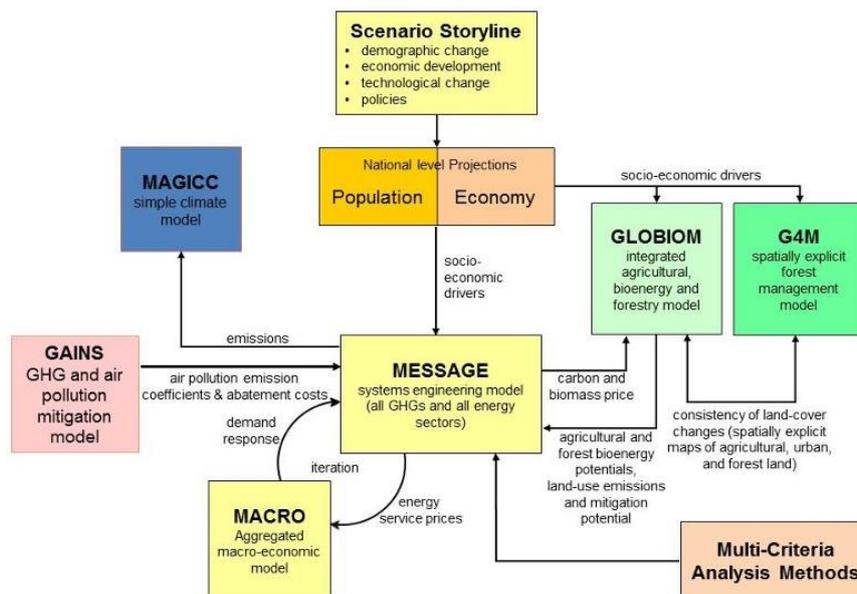


Figura 18: Visão geral da estrutura do modelo MESSAGE

Fonte: IIASA (2018)

2.2.1.12. Prospective Outlook on Long-Term Energy Systems

O *Prospective Outlook on Long-Term Energy Systems* (POLES) é um IAM do grupo JRC (*Joint Research Centre*) da Comissão Europeia. Conforme representado na Figura 19, trata-se de um modelo global de simulação dinâmica recursiva do sistema energético que permite simular uma vasta gama de políticas energéticas, quer do lado da demanda quer da oferta (LEPII, 2006; DESPRÉS *et al.*, 2018). Apresenta uma alta resolução regional e representação setorial, fornecendo simulação de todas as etapas do sistema energético: demanda final de energia, transformação (incluindo geração de energia), comércio, oferta primária, preços internacionais e de usuários finais. Módulos adicionais permitem cobrir as emissões de GEE de fontes industriais, e o setor agricultura e suas emissões derivam de um *soft link* com o modelo GLOBIOM. As decisões econômicas são baseadas em uma antecipação de custos futuros e restrições para o agente, considerando *vintage*, os recursos potenciais e outras interações. O modelo descreve balanços energéticos completos para 57 países e regiões, oferta primária para 80 países e regiões, bem como comércio de *commodities* de energia e rotas comerciais. As variáveis chaves são a população e o crescimento do PIB per capita, de modo que a atividade econômica é derivada pelo modelo a nível setorial, dependendo do crescimento econômico e dos preços da energia.

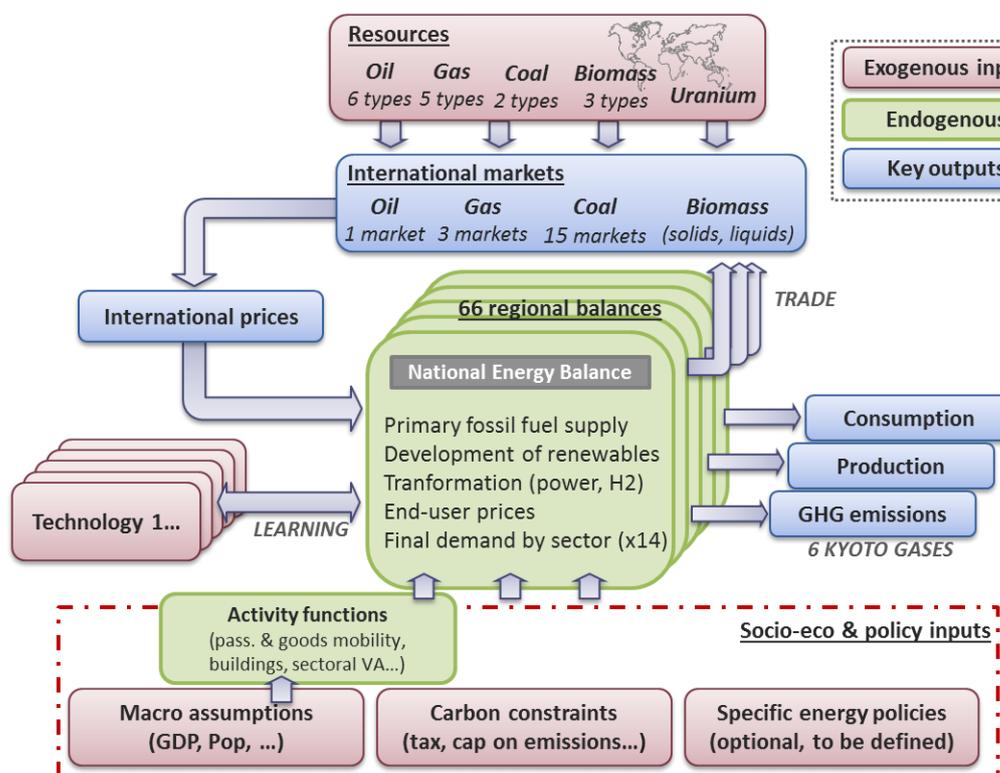


Figura 19: Estrutura do modelo POLES

Fonte: EUROPEAN COMISSION (2019)

2.2.1.13. Regionalized Model of Investment and Technological Development

O *Regionalized Model of Investment and Technological Development* (REMIND) é um IAM do grupo PIK (*Potsdam Institut für Klimafolgenforschung*, ou *Institute for Climate Impact Research*) da Alemanha. Conforme representado na Figura 20, trata-se de um modelo multirregional que acopla um modelo *top-down* de crescimento macroeconômico com um modelo *bottom-up* do sistema energético e um modelo de clima simplificado (LEIMBACH *et al.*, 2010a, LEIMBACH *et al.*, 2010b; LUDERER *et al.*, 2015). O REMIND combina as principais vantagens dos modelos *bottom-up* e *top-down*, ao incorporar a mudança tecnológica no setor energético dentro do ambiente macroeconômico. As dinâmicas econômicas são calculadas através da otimização intertemporal, assumindo uma previsão perfeita por parte dos agentes econômicos (*perfect foresight*). O REMIND também representa as relações comerciais e os movimentos de capitais entre 11 regiões do mundo e também tem uma representação detalhada dos mercados globais de recursos energéticos, como petróleo, carvão e gás. As estimativas de custo de mitigação levam em conta oportunidades e restrições tecnológicas, bem como retornos macroeconômicos e efeitos comerciais. Para obter uma avaliação detalhada das implicações climáticas dos cenários, o modelo é acoplado ao módulo de clima MAGICC (*Model for the Assessment of Greenhouse-Gas Induced Climate Change*) (MEINSHAUSEN *et al.*, 2011).

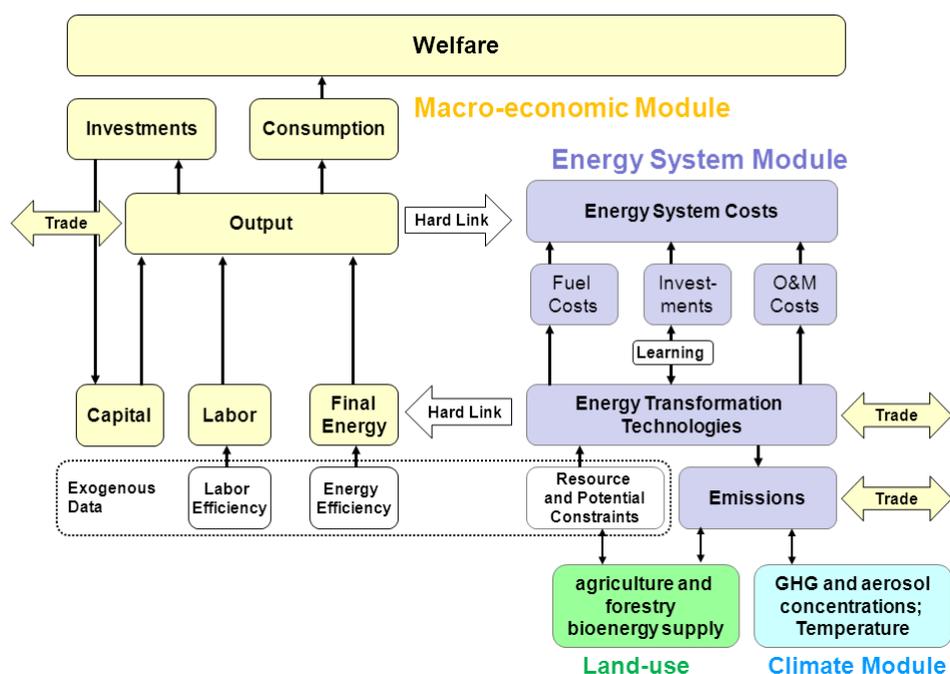


Figura 20: Estrutura geral do modelo REMIND

Fonte: LUDERER *et al.* (2015)

2.2.1.14. TIMES Integrated Assessment Model

O *TIMES Integrated Assessment Model* (TIAM-WORLD) é um IAM do grupo UCL (*University College London*) da Inglaterra¹⁶. Conforme representado na Figura 21, trata-se de um modelo global de equilíbrio parcial multirregional e intertemporal do sistema energia – emissão de GEE, baseado no paradigma TIMES (LOULOU e LABRIET, 2007). Divide o sistema energético mundial em 16 regiões, contando com descrições detalhadas de tecnologias e mercadorias em cada região, logicamente inter-relacionadas por meio de uma cadeia de processos que transformam, transportam, distribuem e convertem energia de recursos primários em serviços energéticos demandados pelos consumidores finais. O TIAM-WORLD é orientado por um conjunto de 42 demandas de serviços energéticos em todos os setores: agricultura, residencial, comercial, industrial e transporte. Cada demanda varia de forma endógena em cenários alternativos, em resposta a mudanças de preços também endógenas. O modelo calcula assim um equilíbrio parcial intertemporal dinâmico nos mercados mundiais de energia e emissões baseado na maximização do excedente total, definido como a soma dos excedentes dos produtores e dos consumidores. Além disso, integra um módulo climático que permite a computação e modelagem de limites de variação de temperatura globalmente relacionados a concentrações, forçamento radiativo e aumento de temperatura.

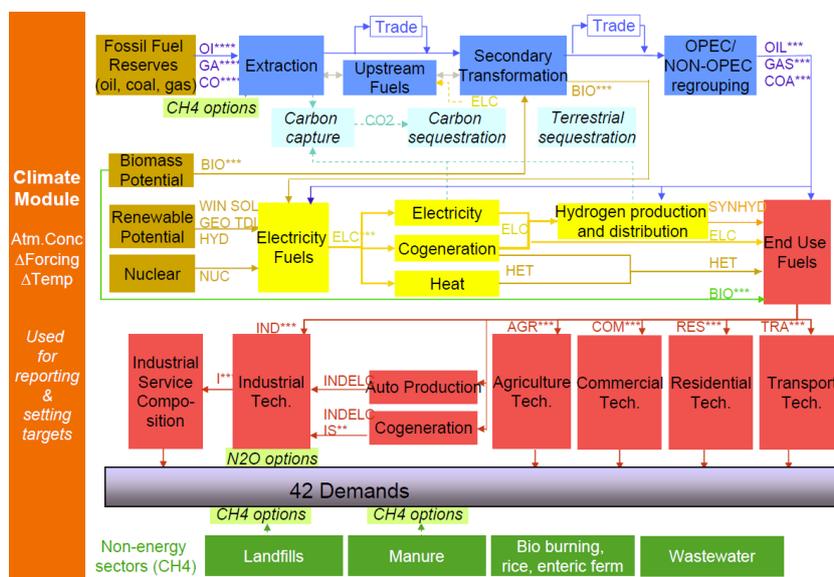


Figura 21: Estrutura simplificada do sistema energético do modelo TIAM-WORLD

Fonte: LOULOU e LABRIET (2007)

¹⁶ Há outros grupos utilizando o modelo TIAM, como o *Energy research Centre of the Netherlands* (ECN), *Energy Technology Systems Analysis Program* (ETSAP).

2.2.1.15. World Induced Technical Change Hybrid

O World Induced Technical Change Hybrid (WITCH) é um IAM do grupo FEEM (Fondazione Eni Enrico Mattei) da Itália. Conforme representado na Figura 22, trata-se de um modelo econômico híbrido *top-down* com maior representação do setor energético (BOSETTI *et al.*, 2006, BOSETTI *et al.*, 2009). Suas principais características são o uso da teoria dos jogos para analisar contextos de política internacional e a representação de mudanças tecnológicas endógenas. Os países do mundo são agrupados em 13 regiões. A inovação se difunde em todas as regiões sob a forma de conhecimento, com importantes repercussões nos investimentos em P&D. WITCH é um modelo de otimização intertemporal no qual a previsão perfeita prevalece sobre o horizonte de tempo de um século. O modelo inclui uma vasta gama de opções de tecnologias energéticas com diferentes pressupostos sobre futuros desenvolvimentos relacionados com o nível de esforço de inovação empreendido pelos países. O WITCH também é acoplado ao modelo GLOBIOM para se analisar o setor de uso da terra, inclui um módulo climático (MAGICC), bem como sobre as emissões de poluentes do ar (TM5-FASST).

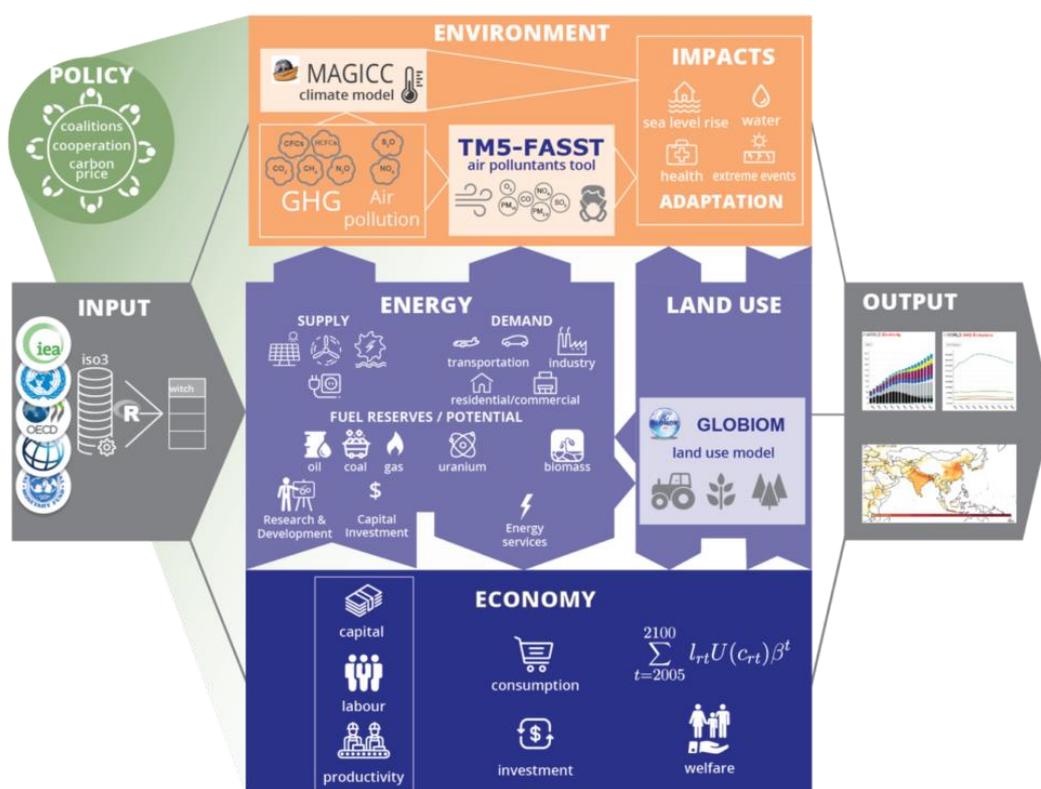


Figura 22: Visão geral do modelo WITCH

Fonte: WITCH (2019)

2.3. Modelos de Equilíbrio Geral Computável

Muitos IAMs partem de um modelo de equilíbrio geral (CGE, sigla em inglês) ou contam com algum modelo econômico integrado a sua estrutura. A modelagem computável de equilíbrio geral combina teoria econômica com dados, trazendo a perspectiva da interação entre diferentes agentes em todos os mercados e respeitando as restrições de recursos totais da economia. Procuram retratar o funcionamento da economia através de uma análise simultânea de todos os seus setores, de modo a capturar relacionamentos e interdependências entre regiões, setores e agentes econômicos, o que permite observar efeitos que, geralmente, não são evidentes a partir da intuição comum. A partir disso, geram evidências para suportar diferentes visões sobre políticas econômicas, bem como avaliar seus custos e benefícios (SHOVEN e WHALLEY, 1984; KYNLAND e PRESCOTT, 1996; BERGMAN, 2005; PALTSEV *et al.*, 2005; FUJIMORI e VAN DER MENSBRUGGHE, 2008; MASUI e MATSUOKA, 2012; CHATEAU *et al.*, 2014; CHEN *et al.*, 2015).

Em geral, modelos CGE são construídos de modo a replicar transações do equilíbrio representativo (*benchmark*) a fim de examinar efeitos advindos de políticas ou eventos sobre regiões, setores, fatores produtivos, agentes econômicos. Partindo de uma observação de equilíbrio de referência, isto é, dados calibrados para um ano base, projetam-se cenários para refletir mudanças estruturais ou conjunturais, a partir de alterações exógenas em variáveis-chaves, de modo a introduzir um desequilíbrio ou choque. O modelo, então, calcula os valores das variáveis endógenas necessários para que a economia volte ao equilíbrio, tornando possível quantificar os impactos econômicos de políticas. Como será melhor detalhado na seção seguinte, modelos CGE possuem fundamentação microeconômica, dado que as decisões dos consumidores são orientadas pela teoria da escolha do consumidor e as firmas são maximizadoras de lucros, alcançando-se a situação de equilíbrio e máximo bem-estar social. Ademais, apresentam também fundamentação macroeconômica, principalmente, no que se refere às restrições de equilíbrio definidas pelas contas nacionais da análise insumo-produto.

Dentre as diversas áreas de utilização pode-se destacar seu uso para a análise de políticas macroeconômicas (fiscais, monetárias e comerciais), políticas setoriais, bem como para questões energéticas, emissões de GEE, degradação do meio ambiente, dentre outras. Os modelos CGE se tornaram uma ferramenta padrão de análise econômica, dado evolução na especificação, na disponibilidade de dados e na tecnologia

de computação, vencendo a restrição de se trabalhar com pequenas dimensões, reduzindo custos de análise de políticas e abrindo caminho para o seu uso generalizado por modeladores, planejadores e economistas em geral em todo o mundo (LOFGREN *et al.*, 2012).

Para esse estudo propõe-se, no Capítulo 3, o primeiro modelo global de equilíbrio geral desenvolvido no Brasil, com foco na análise das mudanças climáticas, de modo a permitir avaliações das interações entre sistemas socioeconômicos, processos energéticos e ambientais, com o intuito de desenvolver cenários de transições energéticas, trajetórias de emissões de GEE, bem como estimar custos e benefícios de políticas de mitigação. Vale ressaltar que se trata de um trabalho em desenvolvimento, com vistas à integração a um IAM, o que exige, além da representação do sistema socioeconômico, adequada representação do sistema energético, bem como do sistema de uso do solo. Trata-se, portanto, de um primeiro estágio no desenvolvimento de uma modelagem integrada consistente economicamente, que pode prover um leque de oportunidades de estudos futuros, bem como um melhor posicionamento do Brasil frente aos demais países em possíveis negociações internacionais¹⁷.

2.3.1. Teoria de Equilíbrio Geral

A modelagem CGE utiliza a teoria microeconômica de equilíbrio geral como ferramenta operacional em análises de orientação empírica sobre questões relacionadas a economias de mercado, como alocação de recursos, fluxos comerciais, mudança tecnológica, distribuição de renda, entre outras. A teoria do equilíbrio geral na economia tem sua origem no trabalho dos economistas clássicos. De acordo com SCHUMPETER (1954), os principais predecessores foram: Richard Cantillon que foi o primeiro a formular o conceito de fluxo circular da renda em 1755¹⁸; François Quesnay que idealizou o fluxo de riquezas entre setores da economia (QUESNAY, 1758); e Achylle-Nicolas Isnard que formulou a lógica do pensamento econômico através de um sistema de equações simultâneas, proporcionando a primeira definição matemática de equilíbrio em 1781¹⁹. A análise dos fenômenos econômicos agregados sob a ótica do equilíbrio de

¹⁷ Vale destacar que países em desenvolvimento, como os BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul), há um movimento no aperfeiçoamento de ferramentas para análise das mudanças climáticas. Além da COPPE no Brasil, ressaltam-se *The Higher School of Economics* (HSE) da Rússia, *The Energy and Resources Institute* (TERI) e *The Public Systems Group of Indian Institute of Management* (PSG-IIM) da Índia, *Tsinghua University* (TU) e *Energy Research Institute* (NDR-ERI) da China.

¹⁸ *Essai sur la Nature du Commerce en Général* em 1775 (SCHUMPETER, 1954).

¹⁹ Publicação anônima de *Traité des Richesses* em 1781 (SCHUMPETER, 1954).

mercado competitivo, formulação matemática do comportamento da produção, do consumo e da formação de preços²⁰, foi constituída pela primeira vez por Leon Walras (WALRAS, 1874).

Entretanto, somente com a Teoria Geral de KEYNES (1936) que a análise do equilíbrio geral foi primeiramente desenvolvida para entender as flutuações macroeconômicas. A modelagem de mercados de bens, financeiros e de trabalho permitiu um tratamento unificado dos efeitos de curto e médio prazo das políticas macroeconômicas sobre a produção, fornecendo uma pedra angular do debate em curso entre diferentes escolas de pensamento macroeconômico. O quadro qualitativo de Keynes desencadeou uma nova geração de ideias e literatura que visava fornecer estrutura e formalidade à análise de equilíbrio geral. HICKS (1936) fez contribuições importantes na especificação do sistema de equações simultâneas para diferentes mercados²¹.

A partir do clássico trabalho de ARROW e DEBREU (1954), os principais resultados do campo foram formalizados, estabelecendo o equilíbrio geral como um campo reconhecido na economia. Assim, o desejo de converter a teoria de equilíbrio geral em ferramentas práticas, visando calcular os impactos de políticas econômicas, motivou a construção de algoritmos para implementar soluções específicas numericamente (HADDAD, 1999). O famoso algoritmo de Herbert Scarf para calcular um equilíbrio geral Walrasiano (SCARF, 1967) foi um importante ponto de partida para o desenvolvimento da modelagem CGE²². Usando o algoritmo, SHOVEN e WHALLEY (1984) provaram a existência e projetaram um procedimento computacional para encontrar um equilíbrio geral com impostos.

2.3.1.1. *Fundamentação Microeconômica*

À nível microeconômico, os resultados da teoria do equilíbrio geral são extraídos da literatura (MAS-COLELL *et al.*, 1995; VARIAN, 1992; HADDAD, 2003) e provas podem ser encontradas em Arrow e Debreu (1954), Debreu (1959) e Arrow e Hahn (1971). Os modelos da tradição Scarf-Shoven-Whalley são firmemente enraizados na

²⁰ Uma das interpretações da origem da economia neoclássica refere-se ao seu conteúdo intelectual poder ser explicado por desenvolvimentos paralelos no campo da Física (CUNHA, 2011).

²¹ Conhecida como a síntese neoclássica, a despeito de sua origem keynesiana.

²² JOHANSEN (1960), em sua dissertação “*A multi-sectoral study of economic growth*”, apresentou um modelo numérico que logo ficou conhecido como modelo MSG, geralmente, reconhecido como o primeiro modelo CGE (BERGMAN, 1990).

teoria econômica neoclássica e, portanto, tomam como válida a existência de uma economia Walrasiana, isto é, dado

- R regiões, $r = 1, \dots, R$, as quais esgotam o espaço da economia;
- Q bens, $q = 1, \dots, Q$, fornecidos por R diferentes regiões, isto é, o total de quantidade de bens é dado por um vetor em IR^{QR} ;
- H consumidores, $h = 1, \dots, H$, distribuídos em R regiões, isto é, o total da população em cada região r é dado por $H^{(r)}$, de modo que $0 < H^{(r)} < H$ e $\sum_{r=1}^R H^{(r)} = H$;
- Cada consumidor h é caracterizado por um conjunto de consumo convexo $X^h \subset IR^{QR}$;
- Supõe-se que as preferências dos consumidores sejam racionais, assumindo hipóteses de completeza²³, reflexividade²⁴, transitividade²⁵, convexidade²⁶ e não-saciedade²⁷;
- J firmas, $j = 1, \dots, J$, distribuídos em R regiões, isto é, o total de firmas em cada região r é dado por $J^{(r)}$, de modo que $0 < J^{(r)} < J$ e $\sum_{r=1}^R J^{(r)} = J$;
- Cada firma j é caracterizada por um conjunto de produção fechado e estritamente convexo contendo zero, $Y^j \subset IR^{QR}$, de modo que as firmas produzem apenas mercadorias relacionadas à sua região específica;
- Assumem-se retornos não crescentes de escala²⁸, impossibilidade de ganhos de especialização, bem como irredutibilidade²⁹ e a não distinção dos bens com relação a qual firma os produz ou quem os consome;
- Cada indivíduo h pode deter uma participação $\theta^{hj} \in [0,1]$ na propriedade das j firmas, onde $\sum_h \theta^{hj} = 1$ para todo j ;

²³ Isso significa que o consumidor é capaz de escolher entre duas cestas de consumo quaisquer dadas (VARIAN, 1992).

²⁴ Isso significa que qualquer cesta de consumo é pelo menos tão boa quanto uma outra idêntica (VARIAN, 1992).

²⁵ Isso significa que se o consumidor acha que a cesta de consumo X é tão boa quanto a cesta de consumo Y e que a cesta de consumo Y é tão boa quanto a cesta de consumo Z, então ele acha que a cesta de consumo X é pelo menos tão boa quanto a cesta de consumo Z. A transitividade é uma hipótese sobre o comportamento de escolha dos consumidores, não uma afirmação lógica pura (VARIAN, 1992).

²⁶ Isso significa que as cestas de consumo médias são preferidas às extremas (VARIAN, 1992).

²⁷ Isso significa que não há uma cesta de consumo melhor que todas as outras para o consumidor (VARIAN, 1992).

²⁸ Isso significa que se a firma dobrar a quantidade de insumos a produção vai também dobrar, ou seja, seu lucro máximo no longo prazo tem de ser igual a zero (VARIAN, 1992).

²⁹ Isso significa que não se pode reduzir as necessidades dos consumidores (VARIAN, 1992).

- Cada consumidor h tem um vetor de dotação inicial de bens $\omega^h \in X^h \subset \mathbb{R}^{QR}$ que, juntamente com as preferências, definem sua demanda de bens;
- A agregação das curvas de demanda dos H consumidores corresponde à demanda do consumidor representativo da economia, a qual é contínua³⁰, não-negativa, homogênea de grau zero e dependente dos preços;
- Os bens da economia são tratados como objetos quantificáveis, e a produção e o consumo são definidos em termos de transformação de bens, isto é, o equilíbrio é modelado em termos de trocas de bens e fatores, sem a necessidade de representar explicitamente o dinheiro como mercadoria³¹.

Uma alocação de (x^*, y^*) e um vetor de preços $p = (p_{11}, \dots, p_{Q1}, \dots, p_{1R}, \dots, p_{QR})$ constituirão um equilíbrio Walrasiano se ajustes em todos os mercados e entre todos os consumidores ocorrem simultaneamente, o que advém de três condições básicas:

- Firmas de cada região r ofertam bens de acordo com a maximização de lucro, auferindo lucros normais (lucro econômico zero): para toda firma j , y^{*j} maximiza os lucros em Y^j , isto é, $p \cdot y^j \leq p \cdot y^{*j}$, para todo $y^j \in Y^j$;
- A demanda do consumidor representativo surge da maximização da utilidade sujeita à restrição orçamentária (despesas dos agentes se ajustam às suas receitas): para todo consumidor h , x^{*h} maximiza o bem-estar em X^h , isto é, $p \cdot x^h \leq p \cdot \omega^h + \sum_j \theta^{hj} \cdot p \cdot y^{*j}$, para todo $x^h \in X^h$; e
- Oferta e demanda se igualam em todos os mercados auferindo preços de mercado (*market clearing*): $\sum_{i=1}^{I(r)} x^{*i} + \sum_{i=I(r)+1}^I x^{*i} = \sum_{i=1}^I \omega_r^i + \sum_{j=1}^{J(r)} y^{*j}$.

Além dessas condições é preciso uma hipótese adicional para garantir as principais propriedades em um modelo de equilíbrio geral com várias regiões:

- O somatório da balança comercial de todas as regiões é igual a 0 (zero).

De acordo com VARIAN (1992), em geral, se houver mercados para Q bens, será preciso encontrar um conjunto de preços em que $Q - 1$ dos mercados estejam em equilíbrio. Então, a lei de Walras implica que o mercado do bem q terá automaticamente a demanda igual à oferta³². Nesse sentido, haverá $Q - 1$ preços

³⁰ Isso significa que pequenas mudanças nos preços deveriam resultar apenas em pequenas variações na demanda agregada. Isso exige que todos os consumidores tenham preferências convexas (VARIAN, 1992).

³¹ Definição realizada para distinguir bens de outros objetos, como os ativos financeiros.

³² Se a demanda de cada bem variar continuamente à medida que os preços variam, haverá sempre um conjunto de preços em que a demanda se iguala à oferta em cada mercado (VARIAN, 1992).

independentes. No modelo de equilíbrio geral, a renda de cada consumidor é apenas o valor da sua dotação aos preços de mercado. Se todos os preços e rendas forem multiplicados por um número positivo t , tanto o conjunto orçamentário quanto a cesta demandada não sofrem alteração. Sendo assim, se $(p_{11}^*, \dots, p_{Q1}^*, \dots, p_{1R}^*, \dots, p_{QR}^*)$ é o conjunto de preços de equilíbrio, então $(tp_{11}^*, \dots, tp_{Q1}^*, \dots, tp_{1R}^*, \dots, tp_{QR}^*)$ também serão preços de equilíbrio para qualquer $t > 0$ (VARIAN, 1992). Isso significa que há liberdade para escolher um dos preços e fixá-lo, igual a uma constante, o que, em geral, convém igualar a 1 (preço numerário). Portanto, a exigência de que a demanda se iguale à oferta em todos os mercados significa que os fluxos econômicos são expressos em preços relativos, isto é, todos os demais preços são sensíveis e podem ser interpretados como medidos em relação ao valor de um bem com preço numerário.

Uma das principais inovações na teoria econômica de equilíbrio geral trata-se da demonstração matemática de que o cálculo do equilíbrio econômico pode ser realizado via sequência de problemas de complementaridade linear (MATHIESEN, 1985). Até então, o método mais utilizado para a solução de equilíbrio era a otimização condicionada, muito útil para problemas simples, mas, geralmente, ineficaz para modelos maiores, em termos de estrutura (mais complexos). A abordagem alternativa, descrita por RUTHERFORD (1995), define o Problema de Complementaridade Mista (*Mixed Complementarity Problem – MCP*), onde o equilíbrio é dado pela solução de um sistema de equações que incorpora, indiretamente, o comportamento eficiente e otimizador dos agentes, tanto firmas quanto consumidores.

2.3.1.2. *Fundamentação Macroeconômica*

Do ponto de vista da macroeconomia, a teoria do equilíbrio geral se utiliza da metodologia da contabilidade social para aplicar o arcabouço Walrasiano (HANSEN, 1936; HICKS, 1937). A metodologia da contabilidade social é fundamentada em matrizes (*Social Accounting Matrix – SAM*) que representam dados sobre os fluxos de todas as transações econômicas que ocorrem dentro na economia (MILLER e BLAIR, 2009). Os números em matrizes SAM representam valores (preço vezes quantidade) de transações econômicas em um determinado momento, dentro de um determinado período de tempo.

De acordo com WING (2004), o ponto de partida conceitual fundamental para um modelo CGE é o fluxo circular da economia (Figura 23). A economia é constituída por

agentes econômicos que se inter-relacionam através de atividades – produção, venda, compra, etc. Os principais agentes são as famílias e as firmas, dado que as famílias vendem às firmas os fatores de produção (terra, trabalho e capital) e as firmas utilizam esses fatores de produção para produzir os bens e serviços dessa economia. Isto é, as firmas pagam aluguel, salário e juros pelo uso dos fatores de produção das famílias, e essas gastam a renda na compra dos bens e serviços produzidos pelas firmas. Além disso, modelos CGE também representam o agente econômico governo, com papel, muitas vezes, passivo de recolhimento de impostos e retorno de receitas em forma de subsídios e transferências.

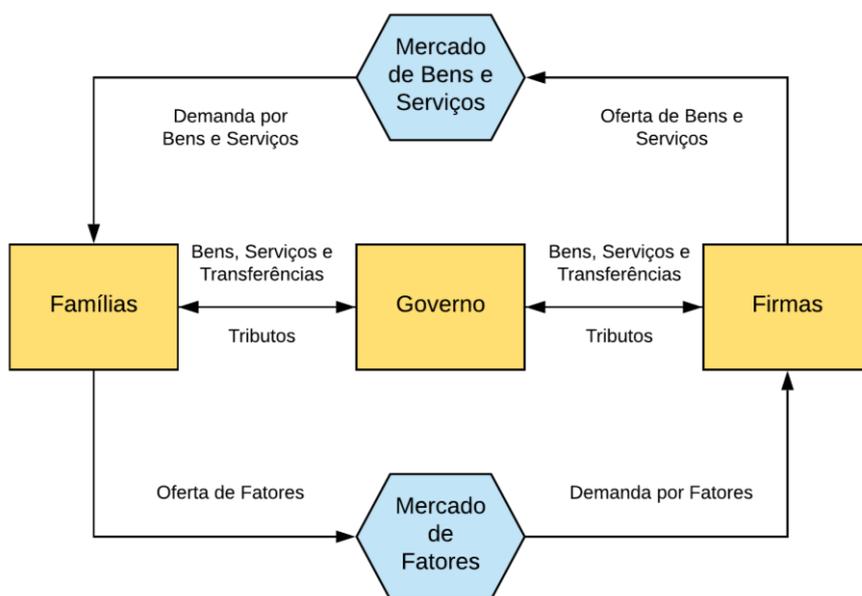


Figura 23: Fluxo circular da economia

Fonte: Elaboração própria

Essas transações ocorrem, respectivamente, nos mercados de fatores de produção e de bens e serviços, onde há mediação do comportamento dos agentes econômicos. A capacidade de ajuste na oferta dos fatores de produção, principalmente, ao que se refere à mobilidade ou não do fator capital, define curto prazo e longo prazo. Em geral, modelos de equilíbrio geral de longo prazo consideram apenas o lado real da economia, de modo que a taxa de juros e o mercado monetário não são explicitamente representados. Contudo, é relevante entender a fundamentação teórica macroeconômica implícita. Nesse sentido, o modelo IS-LM³³ (ver Figura 24) foi concebido a partir da teoria do equilíbrio geral dos mercados, a qual traz a noção de que quando um ou mais

³³ Curva IS: *Investment = Savings* ou Investimento = Poupança. Curva LM: *Liquidity = Money supply* ou Liquidez = Oferta de moeda.

mercados estiverem em desequilíbrio, haverá ajustamento de preços que levará oferta e demanda a se igualarem em todos os mercados. Os resultados da teoria são extraídos da literatura (LOPES e VASCONCELLOS, 2000; DORNBUSH *et al.*, 2009; MANKIW, 2010) baseada no sistema de contas nacionais e na análise insumo-produto (MILLER e BLAIR, 2009; ROUND, 2003; GUILHOTO, 2011).

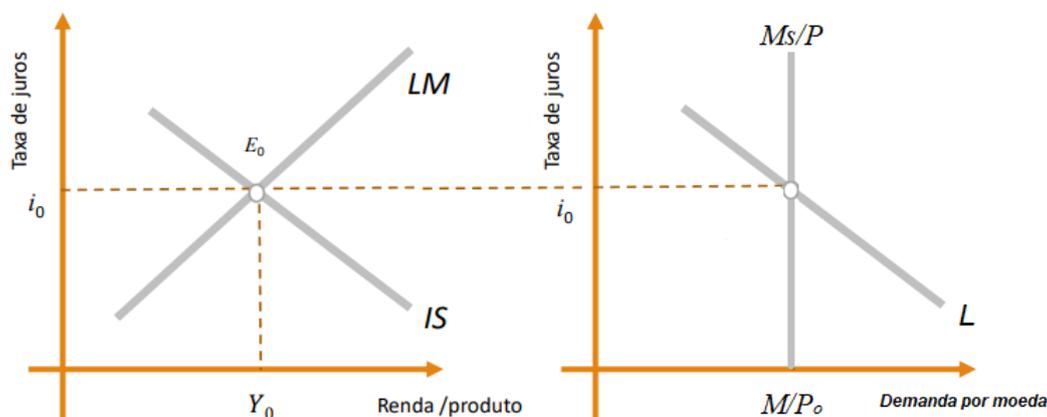


Figura 24: Equilíbrio macroeconômico representado pelo modelo IS-LM

Fonte: Elaboração própria

A demanda por moeda (Md) é medida pelo custo de oportunidade em ter moeda ao invés de outros ativos, de modo que aumenta quanto maior for o nível de renda real (Y) e diminui quanto maior for a taxa de juros (i), de modo que $\frac{Md}{P} = L(Y, i) = kY - hi$, sendo os coeficientes $k > 0$ e $h \geq 0$. Na visão neoclássica da teoria macroeconômica, as decisões de política econômica, tanto monetárias quanto fiscais, são consideradas medidas exógenas determinadas pela autoridade do governo. Em geral, a teoria considera a existência de equilíbrio no mercado monetário, que é dado pela igualdade entre oferta e demanda de moeda (curva LM), isto é, $\frac{Ms}{P} = kY - hi \therefore i = \frac{1}{h} \left(kY - \frac{Ms}{P} \right)$. Vale ressaltar que se subentende a determinação do nível geral de preços ou taxa de juros (i) pela quantidade de moeda em circulação ou oferta de moeda (Ms) definida pela autoridade monetária. Ademais, supõe-se que a inflação esperada é sempre zero, de modo que a taxa de juros real (r) é igual a taxa de juros nominal (i) da economia.

Os agentes representativos têm preferências sobre a alocação de recursos, cujas escolhas ocorrem diante de restrições como renda disponível, disponibilidade física, tecnologia e instituições sociais e políticas. As famílias recebem renda a partir da

dotação de fatores da produção (FT), bem como do recebimento (ou pagamento) de transferências do (ao) governo ($Transf$), e gastam na forma de consumo de bens e serviços (C) e investimentos privados (I) Quanto ao governo, ele recebe como renda as transferências internacionais calculada na forma de saldo da conta corrente do balanço de pagamentos ($M - X$), bem como toda a renda dos impostos (T) cobrados na economia, e é responsável por consumir bens e serviços (G).

De acordo com WING (2004), a teoria do equilíbrio geral resulta na conservação do produto e do valor. A conservação do produto reflete o princípio físico do equilíbrio material, em que a quantidade da dotação de fatores de produção das famílias ou de bens produzidos pelas firmas devem ser completamente absorvidos pelos agentes consumidores. A conservação do valor reflete o princípio contábil do equilíbrio orçamentário, em que, para cada atividade na economia, o valor das despesas deve ser equilibrado pelo valor das receitas. No mercado de bens e serviços, tudo que é produzido (produto agregado - Y) deve ser utilizado de alguma forma (despesa agregada - DA), gerando renda para os fatores de produção (renda agregada - RA).

$$\begin{aligned} C + I &= FT + Transf \\ G &= T + M - X - Transf \\ Y &= DA = RA \\ Y &= C + I + G + (X - M) = FT + T \end{aligned}$$

É importante notar que a combinação da demanda das famílias e do governo (demanda agregada) com a renda das famílias e do governo (renda agregada) determina a identidade macroeconômica básica entre produto e dispêndio. O equilíbrio no mercado de bens e serviços (curva IS) é dado, portanto, por $Y = C + I + G + (X - M)$. Dado que as famílias e o governo esgotam suas rendas na compra de bens e serviços, ou poupam parte dela com o propósito de economizar, então as famílias podem usar sua renda na forma de consumo (C), poupança (S) ou pagamento de imposto (T). Desse modo, a poupança total S_t é determinada pela poupança interna S_i (governo S_g e privada S_p) e pela poupança externa S_x .

$$\begin{aligned} Y &= DA = RA \\ Y &= C + S + T \\ Y &= C + S + G + (X - M) \\ (X - M) &= (T - G) + (S - I) \\ S_x &= M - X \\ S_g &= (T - G) \\ S_p &= (S - I) \\ S_t &= S_i + S_x \end{aligned}$$

Assim, em modelos que usam o arcabouço IS-LM considera-se que o equilíbrio do mercado monetário implica no equilíbrio do mercado de capitais ou de títulos, de modo que a oferta de fundos ou poupança total (S_t) se iguala à demanda de fundos ou investimento (I), auferindo a taxa de juros real ($i = r$) da economia. O equilíbrio geral se dá quando o equilíbrio do mercado de bens e serviços (curva IS) e o equilíbrio do mercado monetário (curva LM) determinam, simultaneamente, o nível de renda (Y) mediado pela taxa de juros ($i = r$). Vale ressaltar que, em modelos CGE, o equilíbrio macroeconômico é definido por uma regra de fechamento, que orienta e é muito importante para explicar efeitos de políticas. Nesse caso, a ocorrência do equilíbrio se dá a partir do equilíbrio do mercado de bens e serviços (curva IS), isto é, considerando apenas os fluxos de ativos reais, seja de poupança ou investimentos, tanto domésticos quanto internacionais (fluxo de capitais), já que moeda e taxa de juros não são explicitamente representadas. Quanto ao mercado de trabalho, pode-se considerar a existência de pleno emprego, quando o investimento é função da poupança, que é fixa e depende somente da renda, ou assumir que há desemprego a partir de regras de rigidez salarial ou de *trade-off* entre lazer e trabalho.

2.3.2. Modelos Globais de Equilíbrio Geral para Análise das Mudanças Climáticas

Além dos IAMs que têm como módulo central modelos de equilíbrio geral (vide Seção 2.2.), tais como AIM/CGE (NIES), GEM-E3 (ICCS/JRC), IMACLIM (CIRED) e MERGE (EPRI), vale destacar outros modelos CGE relevantes utilizados na comunidade científica para a análise das mudanças climáticas. Existem diversos modelos de equilíbrio geral em uso, diferindo em relação ao grau de desagregação em bens e mercados, às questões políticas que podem ser abordadas e ao grau de dificuldade na coleta de dados e na análise dos resultados de equilíbrio. Os modelos tendem a ter um tratamento avançado das questões que estão diretamente relacionadas ao núcleo de suas questões de pesquisa, tais como agricultura, comércio internacional, energia, mudanças climáticas, etc. A integração com outros modelos, em particular modelos de equilíbrio parcial que possuem projeções detalhadas para um setor específico da economia, é bastante comum, mas os estudos, muitas vezes, não são claros o suficiente sobre o que está sendo trocado de informações entre os modelos. O principal algoritmo de solução utilizado pelos modelos CGE trata-se do recursivo dinâmico, que pode ser resolvido sequencialmente, um período de cada vez, assumindo

que o comportamento depende apenas dos estados atuais e passados da economia. A maioria dos modelos CGE são formulados e resolvidos usando a linguagem GAMS e GEMPACK. Ademais, cabe ressaltar que a principal base de dados dos modelos CGE é o *Global Trade Analysis Project* (GTAP), cobrindo entre 8 a 30 regiões do mundo com uma dimensão temporal que varia entre 2030, 2050 e 2100. Na Tabela 2, é possível observar os principais modelos globais de equilíbrio geral para análise das mudanças climáticas.

Tabela 2: Características gerais dos principais CGE globais

Modelo	Instituição	País/Região	Algoritmo de solução	Dimensão temporal	Dimensão espacial	Sistema econômico	Base de dados e Drivers	Emissões	Pesquisas-chave
ADAGE	RIT	Estados Unidos	Problema de complementariedade mista. Recursivo dinâmico.	Ano base: 2010. 5-5 anos até 2050.	3 módulos: Global (8 regiões), Nacional e Regional (EUA)	10 setores: 5 não-energéticos e 5 setores energéticos (setor elétrico com múltiplas tecnologias)	GTAP; IEA-WEO; FAO - População (UN) - PIB (IEA-WEO; IMF no curto-prazo)	GEE (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFCs, PFC, SF ₆)	- Impactos de cenários climáticos - Biocombustíveis - Uso do solo e agricultura - Cenários climáticos
DART	IfW	Alemanha	Problema de complementariedade mista. Recursivo dinâmico.	Ano base: 2010. 5-5 anos até 2050.	12-16 regiões	12 setores: 7 não-energéticos e 5 setores energéticos (setor elétrico com múltiplas tecnologias)	GTAP; IEA-WEO; FAO - População (UN) - PIB (OECD Outlook)	GEE (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, F-gases)	- Biocombustíveis - Renováveis - Uso do solo e agricultura - Políticas energéticas
ENGAGE	UCL	Inglaterra	Problema de complementariedade mista. Recursivo dinâmico.	Ano base: 2007 e 2011. 5-5 anos até 2030.	17 regiões	35 setores: 21 não-energéticos e 13 setores energéticos	GTAP; TIAM-UCL; FAO; IFPRI; EXIOBASE - População e PIB (SSP)	GEE (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O)	- Cenários climáticos - Economia circular
ENVISAGE	World Bank	-	Problema de complementariedade mista. Recursivo dinâmico.	Ano base: 2011. 5-5 anos até 2100.	20-30 regiões	20-30 setores	GTAP; WEC; FAO; IFPRI; USGS - População e PIB (SSP)	GEE (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, CF ₄ , C ₂ F ₆ , SF ₆ , HFCs) e não-GEE (SO ₂ , BC, OC, CO, VOCs, NOx, NH ₃)	- Crescimento, desenvolvimento e distribuição de renda - Políticas de comércio internacional - Mudanças climáticas
ENV-Linkages	OECD	-	Problema de complementariedade mista. Recursivo dinâmico	Ano base: 2011. 5-5 anos até 2050.	15-29 regiões	22-42 setores (setor elétrico com 7 tecnologias)	GTAP; IEA-WEO; IFPRI-IMPACT; FAO; EXIOBASE; EDGAR - População e PIB (ENV-Growth Model, UN e SSP)	GEE (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, SF ₆ , HFCs, PFC) e não-GEE (base de dados EDGAR)	- Políticas energéticas - Cenários climáticos - Cenários IEA-WEO

Modelo	Instituição	País/Região	Algoritmo de solução	Dimensão temporal	Dimensão espacial	Sistema econômico	Base de dados e Drivers	Emissões	Pesquisas-chave
EPPA	MIT	Estados Unidos	Problema de complementariedade mista. Recursivo dinâmico	Ano base: 2007-2015. 5-5 anos até 2100.	18 regiões	33 setores: 11 setores não-energéticos (transporte privado com 3 tecnologias) e 22 setores energéticos (setor elétrico com 11 tecnologias)	GTAP; IEA-WEO; FAO; USGS - População (UN) - PIB (World Bank e IMF no curto-prazo)	GEE (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, SF ₆ , HFCs, PFC) e não-GEE (CO, SO ₂ , VOC, NO _x , BC, OC, NH ₃)	- Cenários climáticos - Políticas energéticas - Setor de transportes - Mudança do uso do solo
GTEM	CSIRO/ABARE	Austrália	Recursivo dinâmico/otimização intertemporal tipo Ramsey	Ano base: 1997. 5-5 anos até 2100	13 regiões	34 setores: 16 setores não-energéticos e 18 setores energéticos (setor elétrico com 13 tecnologias)	GTAP; IEA-WEO; RCP; AgMIP - População (UN) - PIB (World Bank)	GEE (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O)	- Impactos de cenários climáticos - Mudança do uso do solo e agricultura - Impactos de cenários climáticos
ICES	CMCC/FEEM	Itália	Problema de complementariedade mista. Recursivo dinâmico	Ano base: 2007-2011. 5-5 anos até 2050.	22 regiões	23 setores: 15 setores não-energéticos e 8 setores energéticos	GTAP; IMF; IEA-WEO - População UN, SSP - PIB (SPP, ETP, CEPII)	GEE (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, F-gases)	- Políticas de adaptação - Sustentabilidade - Mudança do uso do solo e agricultura
MAGNET	LEI Wageningen UR	Holanda	Problema de complementariedade mista. Recursivo dinâmico	Ano base: 2011. 5-5 anos até 2100	20-30 regiões	20-30 setores	GTAP; IEA-WEO; FAO; ILO; IMAGE - População e PIB (SSPs, USDA, OECD, DG AGRI)	GEE (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, F-gases)	- Segurança alimentar - Biocombustíveis - Cenários climáticos
MIRAGE-e	CEPII	França	Problema de complementariedade mista. Recursivo dinâmico	Ano base: 2004-2011. 5-5 anos até 2100	19 regiões	21 setores: 16 setores não-energéticos e 5 setores energéticos	GTAP; EconMap; IEA-WEO; USDA - População e PIB (EconMap, UN e SSP)	GEE (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, F-gases)	- Políticas de comércio internacional - Cenários climáticos

Modelo	Instituição	País/Região	Algoritmo de solução	Dimensão temporal	Dimensão espacial	Sistema econômico	Base de dados e Drivers	Emissões	Pesquisas-chave
PACE	ZEW	Alemanha	Problema de complementariedade mista. Recursivo dinâmico	Ano base: 2011. 5-5 anos até 2050.	23 regiões	36 setores: 31 setores não-energéticos e 5 setores energéticos	GTAP; IEO; FAO - População (UN) - PIB (IEO)	GEE (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O)	- Políticas energéticas - Cenários climáticos - Políticas ambientais (ALE)

2.3.2.1. Applied Dynamic Analysis of the Global Economy

O *Applied Dynamic Analysis of the Global Economy* (ADAGE) é um modelo do grupo RTI (*Research Triangle Institute*) dos Estados Unidos. Conforme representado na Figura 25, trata-se de um modelo de equilíbrio geral computável dinâmico capaz de examinar diversos tipos de políticas econômicas, energéticas, ambientais, de mitigação de mudanças climáticas e políticas comerciais nos níveis internacional, nacional, regional dos EUA e estadual (ROSS, 2009). O arcabouço de equilíbrio geral de Arrow-Debreu é usado para descrever os comportamentos econômicos desses agentes. O ADAGE possui três módulos distintos: internacional, regional dos EUA e país único. Os dados econômicos advêm dos bancos de dados *Global Trade Analysis Project* (GTAP) e *Economic Impact Analysis for Planning* (IMPLAN), e os dados de energia e várias previsões de crescimento são provenientes da Agência Internacional de Energia (IEA, sigla em inglês). As estimativas de emissões e os custos de redução associados para seis GEE (CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, SF₆) também estão incluídos no modelo. Tópicos de pesquisa chaves: cenários de energia e clima; impactos das mudanças climáticas e política de mitigação; interação entre sistemas econômicos e físicos em nível global; agricultura e mudança no uso da terra.

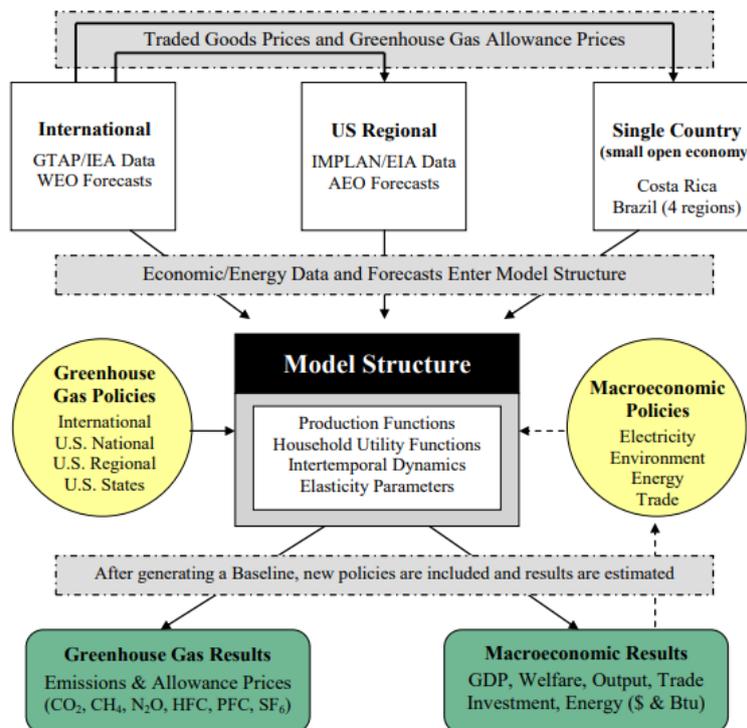


Figura 25: Estrutura do modelo ADAGE

Fonte: ROSS (2009)

2.3.2.2. *Dynamic Applied Regional Trade Model*

O *Dynamic Applied Regional Trade Model* (DART) é um modelo do grupo IfW (*Kiel Institute for the World Economy*) da Alemanha. Trata-se de um modelo de equilíbrio geral dinâmico recursivo, multirregional e multisetorial da economia mundial (KLEPPER *et al.*, 2003). Ele foi projetado para analisar as tendências futuras de longo prazo resultantes das políticas internacionais de clima, energia, agricultura e uso da terra com relação às interações relevantes e efeitos de feedback entre diferentes setores de uma economia. A estrutura econômica e os padrões comerciais específicos de cada região são caracterizados por um sistema de equações não lineares simultâneas. Estes simulam o comportamento dos agentes econômicos (consumidores e produtores) com base na teoria microeconômica, e descrevem restrições de recursos e regras macroeconômicas de fechamento. Os parâmetros do modelo são calibrados para os dados atualizados do GTAP, que incluem comércio bilateral, tecnologias de produção e produção em diferentes setores, bem como dados de comércio de produtos e commodities. Ao simular choques de política, o modelo resolve o equilíbrio em todos os mercados de produtos e fatores para chegar às novas quantidades e preços de equilíbrio. O modelo DART foi aplicado para analisar, entre outras, as políticas climáticas internacionais, políticas ambientais, políticas energéticas e políticas agrícolas. Para aplicar o modelo de maneira flexível a diferentes temas, várias versões do DART foram desenvolvidas, que são personalizadas para tópicos específicos e atualizadas regularmente para os conjuntos de dados mais recentes.

2.3.2.3. *Environmental Global Applied General Equilibrium*

O *Environmental Global Applied General Equilibrium* (ENGAGE) é um modelo do grupo UCL (*University College London*) da Inglaterra. Trata-se de um modelo de equilíbrio geral em constante desenvolvimento com a intenção de incorporar recursos naturais e questões ambientais (UCL, 2019). A técnica de modelagem é baseada no conceito de equilíbrio Walrasiano na teoria microeconômica e usa dados de contas nacionais e um sistema de equações não-lineares para resolver um equilíbrio de linha de base contra o qual choques políticos podem ser implementados. Os dados econômicos advêm dos bancos de dados GTAP. O modelo tem representações flexíveis da oferta de mão-de-obra, previsão de agentes econômicos e um componente ambiental, bem como integração do setor de energia com modelos especializados ricos em tecnologias. Tópicos de pesquisa chave: políticas energéticas; cenários de transição de baixo

carbono; papel de diferentes tecnologias de geração elétrica; políticas climáticas; impactos, adaptação e mitigação das mudanças climáticas; preços do carbono; políticas agrícolas, segurança alimentar, degradação dos solos, bioenergia, irrigação; políticas de economia circular e eficiência de recursos; análise de materiais (siderurgia, minerais, etc.).

2.3.2.4. *Environmental Impact and Sustainability Applied General Equilibrium*

O *Environmental Impact and Sustainability Applied General Equilibrium* (ENVISAGE) é um modelo do Banco Mundial. Trata-se de um modelo de equilíbrio geral, recursivo dinâmico, multisetorial e multirregional (VAN DER MENSBRUGGHE, 2008). Os dados econômicos, de energia e emissões advêm dos bancos de dados GTAP. Pretende ser flexível em termos de suas dimensões, de modo que divide o mundo em 20-30 países e regiões e a produção global em 20-30 setores - com detalhes extensivos para agricultura e alimentos e energia. Seu módulo de emissões e clima liga diretamente as atividades econômicas às mudanças na temperatura média global. O modelo também vincula mudanças na temperatura a impactos em variáveis econômicas, como rendimentos agrícolas ou danos causados pela elevação do nível do mar. As questões-chave analisadas incluem: crescimento, desenvolvimento e distribuição de renda; recursos naturais (uso da terra, água, energias fósseis); a economia da mudança climática; o impacto das mudanças climáticas na economia; a adaptação às mudanças climáticas; e as consequências distributivas da mudança climática.

2.3.2.5. *ENV-Linkages*

O ENV-Linkages é um modelo da OECD (*Organization for Economic Co-Operation and Development*). Conforme representado na Figura 26, trata-se de um modelo de equilíbrio geral recursivo dinâmico que descreve atividades econômicas em diferentes setores e regiões e como elas interagem (CHATEAU *et al.*, 2014). Calibrado para 2011 e roda até 2100 de 5-5 anos. É um modelo econômico global baseado em um conjunto consistente de dados que descrevem o comportamento dos setores de produção e consumidores em diferentes regiões, com foco em energia e comércio internacional. O modelo também vincula a atividade econômica às pressões ambientais, especificamente às emissões de GEE. O modelo projeta atividades econômicas e emissões para analisar

as implicações a médio e longo prazo das mudanças de políticas que exigem realocação significativa entre setores e países, bem como os efeitos colaterais associados. Tópicos-chaves de análise são: custos e eficácia dos mercados de carbono; ligação dos mercados de carbono; políticas de mitigação das mudanças climáticas.

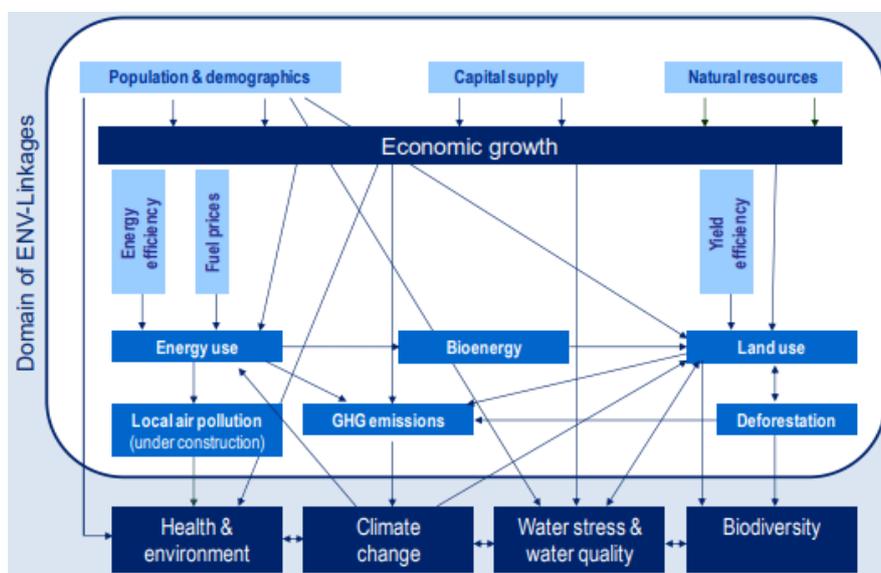


Figura 26: Estrutura do modelo ENV-Linkages

Fonte: OECD (2019)

2.3.2.6. Economic Projection and Policy Analysis

O *Economic Projection and Policy Analysis* (EPPA) é um modelo do grupo MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) dos Estados Unidos. Conforme representado na Figura 27, trata-se de um modelo de equilíbrio geral, multisetorial e multirregional da economia mundial (YANG *et al.*, 1996; PALTSEV *et al.*, 2005; CHEN *et al.*, 2015). Utiliza o conjunto de dados GTAP. Calibrado para 2007-2015 e roda de 2020 até 2100 de 5-5 anos. A especificação econômica padrão de insumos (capital, mão-de-obra, recursos) e produtos (produção bruta de cada setor e produção fornecida a cada setor de demanda final) é projetada em termos físicos de energia, emissões, uso da terra, população, recursos naturais e eficiências (energia produzida/energia utilizada) de tecnologia avançada. Essas contas físicas traduzem contas econômicas em estimativas de esgotamento físico e uso de recursos naturais, eficiências técnicas de processos de conversão de energia e limites de disponibilidade de recursos renováveis, como disponibilidade de terras e número de pessoas com efeito sobre a saúde. EPPA é usado para analisar os processos que produzem emissões de GEE e para avaliar as consequências de políticas, fornecendo estimativas da magnitude e distribuição de seus

custos entre regiões e esclarecendo as maneiras pelas quais as mudanças são mediadas pelo comércio internacional.

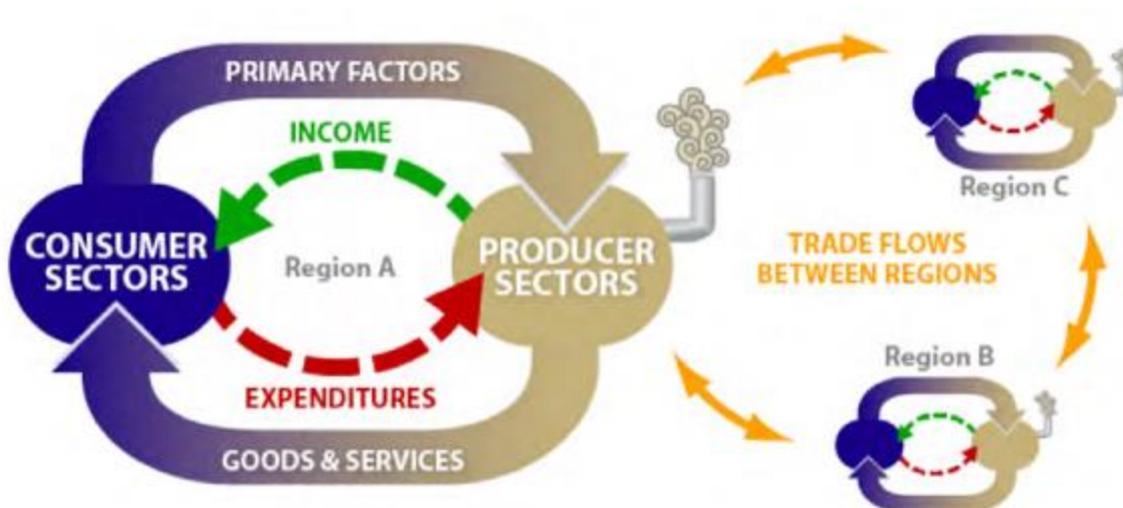


Figura 27: Esquematização do modelo EPPA

Fonte: CHEN *et al.* (2015)

2.3.2.7. *Global Trade and Environment Model*

O *Global Trade and Environment Model* (GTEM) é um modelo do grupo CSIRO/ABARE (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation/ Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics*) da Austrália. Conforme representado na Figura 28, trata-se de um modelo global de equilíbrio geral dinâmico recursivo com uma versão intertemporal (modelo do tipo de Ramsey), impondo um comportamento de otimização intertemporal nas famílias para determinar a alocação ótima de renda entre poupança e consumo, bem como sobre os investimentos (PANT *et al.*, 2002; PANT, 2007; CAI *et al.*, 2015). O GTEM-C também apresenta contabilidade detalhada para emissões globais e fluxos de energia. Os seres humanos produzem GEE pela queima de combustíveis fósseis para gerar energia para uso industrial e residencial; a atividade agrícola e os processos industriais também geram emissões. Isso determina a pegada ambiental das atividades humanas e os governos, portanto, têm um papel na neutralização dos impactos por meio de intervenção política, via imposição de impostos e/ou permissões de emissão. O modelo, portanto, oferece uma estrutura unificada para analisar o nexo energia-carbono-ambiente sendo capaz de analisar as consequências econômicas dos efeitos das mudanças climáticas, principalmente, na agricultura.

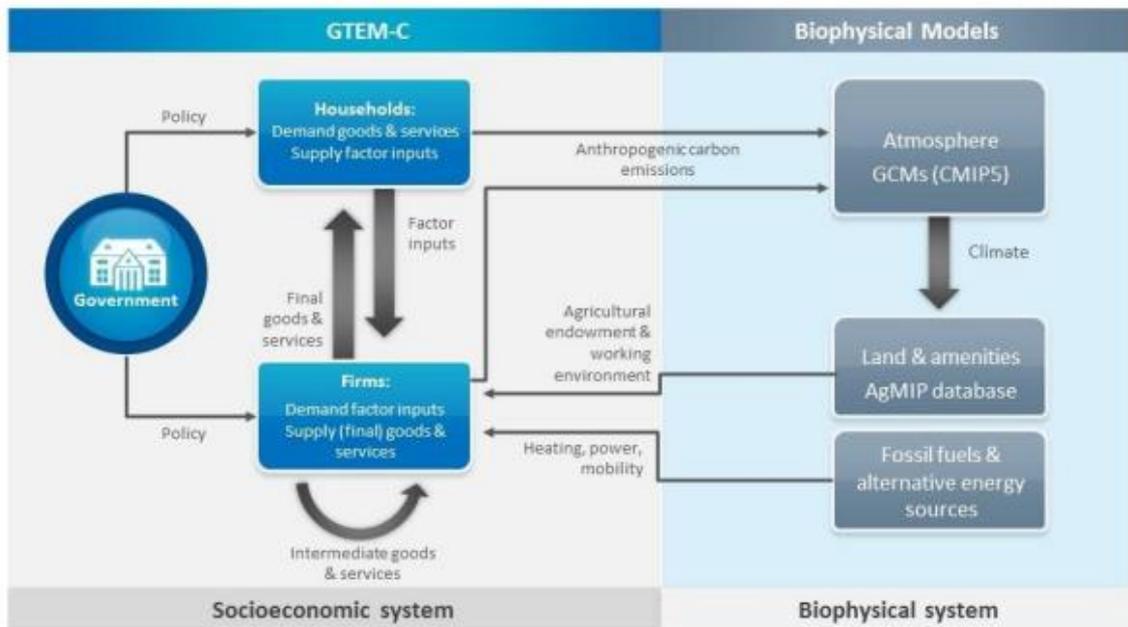


Figura 28: Estrutura do modelo GTEM-C

Fonte: CAI *et al.* (2015)

2.3.2.8. *Intertemporal Computable Equilibrium System*

O *Intertemporal Computable Equilibrium System* (ICES) é um modelo do grupo CMCC/FEEM (*Euro-Mediterranean Center on Climate Change / Fondazione Eni Enrico Mattei Research*) da Itália. Conforme representado na Figura 29, trata-se de um modelo de equilíbrio geral dinâmico recursivo desenvolvido com o principal (mas não exclusivo) propósito de avaliar a implicação final do bem-estar dos impactos das mudanças climáticas nas economias mundiais (FEEM, 2019). A sustentabilidade é um aspecto crucial que prevê a harmonização de diferentes tipos de políticas para buscar o desenvolvimento sustentável, ao mesmo tempo em que protege o meio ambiente e garante o uso responsável dos recursos naturais. Oferece uma avaliação abrangente do bem-estar atual e futura com base em 28 indicadores relacionados com os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). O modelo é flexível em agregação regional e horizonte temporal até 2050. Em cada etapa de otimização, o modelo fornece uma visão dos fluxos econômicos domésticos entre os agentes (firmas, famílias, governo) em cada região e o comércio internacional com o resto do mundo. Além da avaliação de impacto da mudança climática, o modelo pode ser usado para estudar políticas de mitigação e adaptação, bem como diferentes reformas de comércio e políticas públicas.

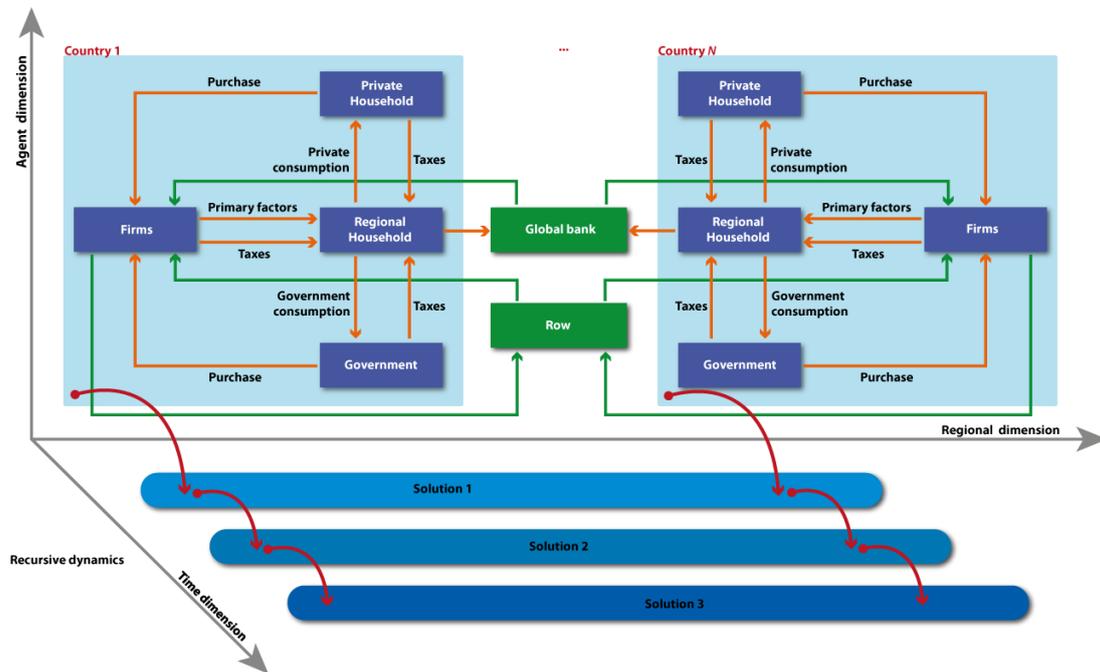


Figura 29: Esquematização do modelo ICES

Fonte: FEEM (2019)

2.3.2.9. Modular Applied General Equilibrium Tool

O *Modular Applied General Equilibrium Tool* (MAGNET) é um modelo do grupo *LEI Wageningen UR* da Holanda. Conforme representado na Figura 30, trata-se de um modelo de equilíbrio geral que tem sido amplamente utilizado para simular os impactos das políticas agrícolas, comerciais, fundiárias e de bioenergia na economia global, com um enfoque particular nos impactos sobre o uso da terra, preços agrícolas, nutrição e segurança alimentar (WOLTJER e KUIPER, 2014). O MAGNET abrange 134 regiões e 63 produtos/setores que, usualmente, são agregados em torno de 20 a 30 regiões/setores. Calibrado para 2011 e roda até 2100 de 5-5 anos. Uma característica especial do MAGNET é o seu *design* modular. A modularidade permite que os modeladores ajustem a estrutura do modelo de acordo com a questão de pesquisa em questão: oferta de terra; alocação da terra entre setores; funções de consumo; dotações móveis e mercados de fatores segmentados; cotas de produção; política agrícola; metas de mistura de biocombustíveis; investimentos; nutrição; e classes de renda. O MAGNET é baseado no modelo LEITAP, contando com o modelo GTAP padrão como o núcleo em torno do qual foi desenvolvido.

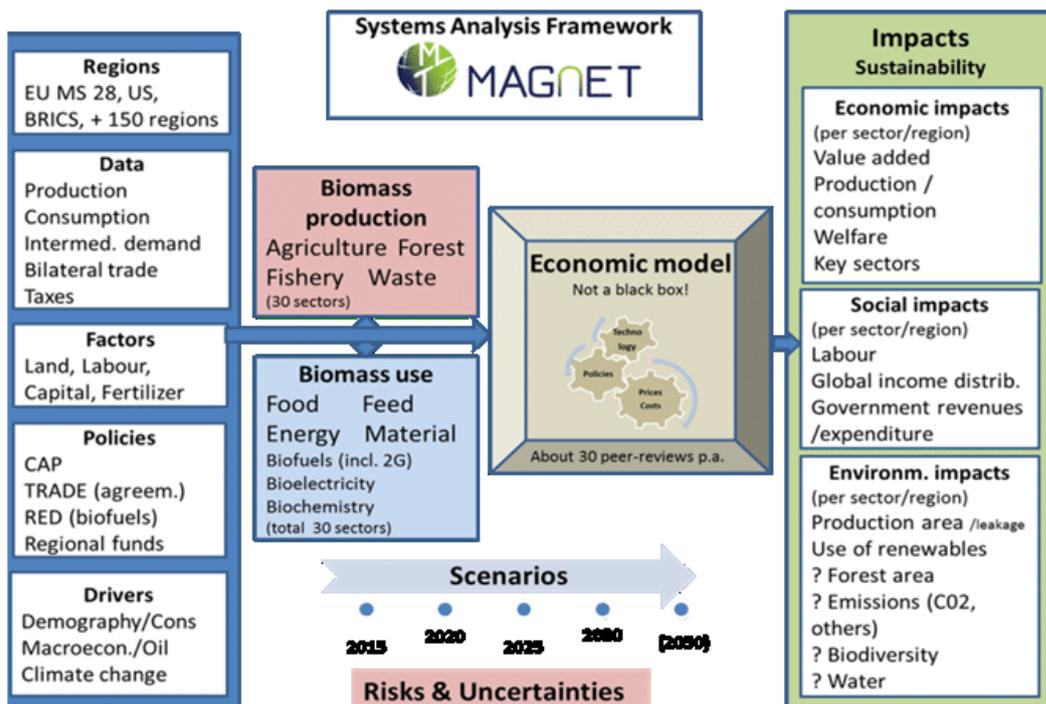


Figura 30: Visão geral do modelo MAGNET

Fonte: MAGNET (2019)

2.3.2.10. Modelling International Relationships in Applied General Equilibrium

O *Modelling International Relationships in Applied General Equilibrium* (MIRAGE-e) é um modelo do grupo CEPII (*Centre d'Etudes Prospectives et d'Informations Internationales*) da França. Conforme representado na Figura 31, trata-se de um modelo de equilíbrio geral multisetorial e multirregional dedicado à análise de políticas comerciais (DECREUX e VALIN, 2007; FONTÁGNE *et al.*, 2013). Abrange *insights* de concorrência imperfeita, diferenciação de produto por qualidade e origem, bem como investimento estrangeiro direto em uma estrutura dinâmica sequencial onde o capital instalado é imóvel. O ajuste inercial vem da realocação do estoque de capital via depreciação e investimento. O MIRAGE conta com uma medida muito detalhada de proteção bilateral e barreiras comerciais graças ao banco de dados do *Market Access Map* (MAcMap). O MIRAGE-e inclui uma descrição mais detalhada do consumo de energia e emissões de CO₂, bem como um cenário de linha de base no horizonte de 2100. Na versão de competição perfeita, cada setor é modelado como uma firma representativa, que combina valor agregado e consumo intermediário. Todos os fatores primários das regiões devem ser totalmente empregados e suas taxas de crescimento são definidas exogenamente. O lado da demanda é modelado através de um consumidor representativo de cada região que maximiza sua função de utilidade intertemporal sob

sua restrição orçamentária. Esse agente único, que inclui famílias e governo, economiza uma parte de sua renda e o restante é gasto em commodities.

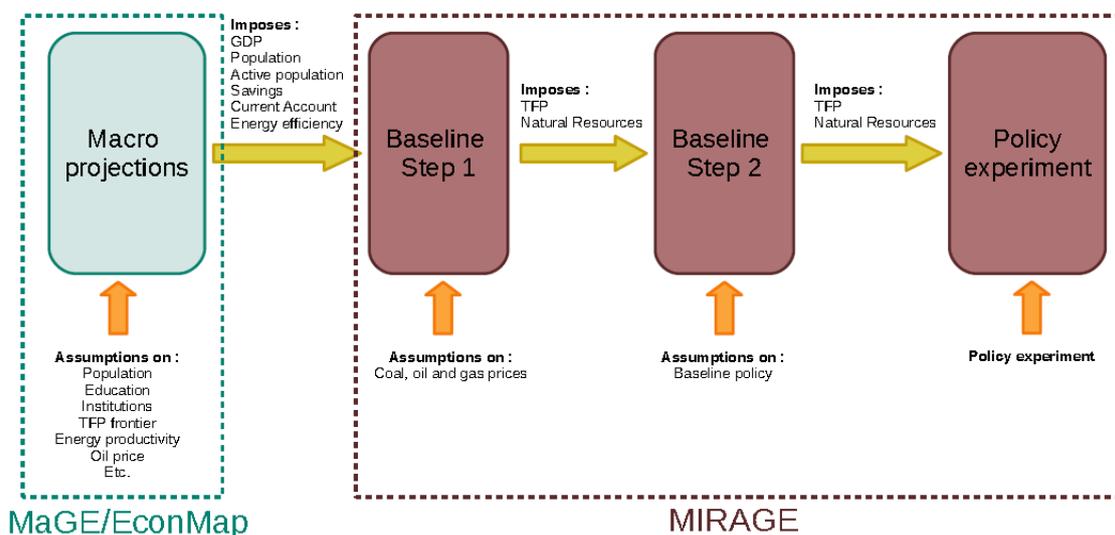


Figura 31: Visão geral do modelo MIRAGE-e

Fonte: MIRAGE (2019)

2.3.2.11. Policy Analysis based on Computable Equilibrium

O *Policy Analysis based on Computable Equilibrium* (PACE) é um modelo do grupo ZEW (*Leibniz Centre for European Economic Research*) da Alemanha. Conforme representado na Figura 32, trata-se de um modelo de equilíbrio geral que integra as áreas de economia, energia e meio ambiente. O núcleo do PACE é uma estrutura CGE multisetorial e multirregional de comércio global e uso de energia designado para avaliar políticas em um mundo que está cada vez mais integrado através do comércio (ZEW, 2019). Seus vários módulos permitem a análise específica de políticas em diferentes níveis regionais e setoriais. Apresenta um módulo que detalha a escolha tecnológica no sistema de energia, com representação das opções tecnológicas de geração de eletricidade. Outros módulos incorporam uma descrição detalhada das imperfeições do mercado de trabalho e da tributação pública para rastrear a interação entre as políticas fiscais e o desemprego involuntário. Mais recentemente, foi acrescentado um módulo de avaliação integrado que vincula uma representação reduzida das relações climáticas com um modelo abrangente multisetorial e multisetorial intertemporal para a economia mundial.

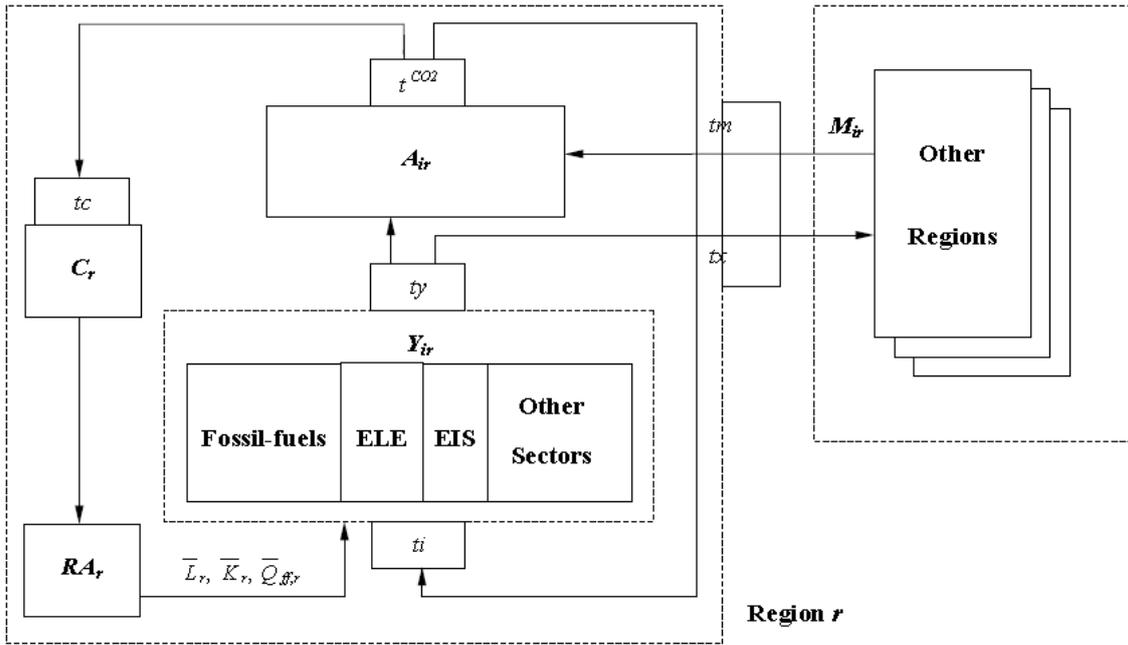


Figura 32: Estrutura esquemática do modelo PACE
 Fonte: ZEW (2019)

3. Proposta de Modelo Global de Equilíbrio Geral Computável: *Total-Economy Assessment* (TEA)

Este capítulo descreve o *Total-Economy Assessment* (TEA), um modelo de equilíbrio geral que visa representar as economias das principais regiões do mundo. Trata-se de um modelo global, dado o interesse da pesquisa ser a análise das mudanças climáticas, com o intuito de ser o módulo econômico de um IAM³⁴, representando avanços no desenvolvimento da análise integrada no Brasil e no posicionamento de países em desenvolvimento sobre questões climáticas. Sua estrutura analítica se baseia no arcabouço Walrasiano de equilíbrio geral e estrutura funcional fundamentada em estruturas aninhadas de elasticidade de substituição constante. Como modelo de referência para sua elaboração, utilizou-se o *Global Trade Analysis Project* (GTAP) (HERTEL, 1997), reconhecido na comunidade científica por fornecer uma documentação de acesso público, constituir uma base de dados em equilíbrio e estabelecer uma estrutura numérica para uso em análises quantitativas, criando uma rede global de pesquisadores interessados no campo de modelagem em equilíbrio geral.

O TEA foi construído no software *General Algebraic Modeling System* (GAMS), idealizado para o desenvolvimento e solução de modelos de otimização: programação linear, não linear e inteira. Esta linguagem foi desenvolvida há mais de 20 anos por Alex Meeraus (BROOKE *et al.*, 1998) e permitiu que não-especialistas em métodos numéricos projetassem e resolvessem modelos Walrasianos³⁵. Na formulação do modelo TEA, utiliza-se a versão mais recente do *GTAPinGAMS*, versão 9.0 (RUTHERFORD, 2000), a qual permite flexibilidade à estrutura original do modelo, de acordo com os objetivos da pesquisa. A base de dados do *GTAP9inGAMS* é composta de dados que refletem as estruturas econômicas de diferentes regiões. Nesse caso, conta com matrizes equilibradas de contabilidade social (SAM, sigla em inglês) de 140 regiões do mundo, incluindo o Brasil, as quais alcançam um nível de desagregação de 57 bens/setores produtivos (AGUIAR *et al.*, 2016).

A construção do modelo TEA teve início com as definições das dimensões básicas da análise: regiões, bens/setores e agentes econômicos representativos (Seção 3.1.). Em

³⁴ Futura integração com o modelo COFFEE (ROCHEDO, 2016).

³⁵ Além do desenvolvimento de computadores mais eficientes, capazes de resolver modelos com um maior número de setores e dar os primeiros passos rumo à modelagem dinâmica, a utilização do GAMS contribuiu muito para a expansão do uso de modelos CGE aplicado para projetos de modelagem de pesquisa econômica e operacional em larga escala (RUTHERFORD, 1999; 2005).

seguida, definem-se as formas funcionais para as funções de produção, transformação e de utilidade, especificando restrições e incluindo escolhas de produtos e insumos para cada atividade (Seção 3.2.). Na Seção 3.3., define-se o fechamento macroeconômico do modelo.

Uma implicação óbvia, para modelos CGE voltados à análise das mudanças climáticas, é que o modelo deve levar em conta a dinâmica temporal, tendo em vista que o horizonte de tempo relevante na análise de políticas climáticas é de várias décadas ou até mesmo um século no futuro (BERGMAN, 2005). Na Seção 3.4., descreve-se como é construída a dinâmica no modelo, considerando a definição de premissas que compatibilizam a base de dados às formas funcionais. O modelo TEA tem um tratamento elaborado em relação a oferta e demanda por energia, bem como flexibilidade quanto as possibilidades de substituir fontes de energia (Seção 3.5.). Em particular, na Seção 3.6., descreve-se a representação de setores agropecuários e do uso do solo. Ademais, a Seção 3.7., representa explicitamente a relação entre o uso de combustíveis fósseis e a evolução de atividades específicas com emissão de GEE.

Por fim, na Seção 3.8., são descritas possíveis aplicações do modelo TEA, bem como são destacados resultados importantes para a análise das mudanças climáticas, realizando uma meta-análise com resultados de IAMs selecionados³⁶ a fim de identificar semelhanças e diferenças em estimativas de consumo de energia, geração elétrica e emissões de GEE.

3.1. Dimensões e Estrutura Geral

A especificação das dimensões do modelo TEA parte da definição do número de regiões ou países, número de bens/setores e fatores, número de agentes econômicos e número de mercados ativos. A Tabela 3 descreve os índices de conjuntos representados no modelo.

³⁶ Projeto CD-Links (Linking Climate and Development Policies – Leveraging International Networks and Knowledge Sharing): <https://www.cd-links.org>.

Tabela 3: Índices de conjuntos da base de dados

Índice	Descrição
r, s	Países e regiões
i, j	Bens e setores
f, ff	Fatores de produção

De fato, um dos objetivos deste estudo é ter uma representação adequada do Brasil em um modelo global de equilíbrio geral. Depois de analisar a distribuição regional da maioria dos IAMs e CGEs, a gama de regiões parece estar entre 8 e 30 regiões, conforme as divisões acordadas pelos vários grupos de modelagem econômica e integrada. Enfatizam-se regiões com relevância energética e ambiental no longo prazo, tais como EUA, União Europeia e Japão, bem como países em desenvolvimento com potencial de crescimento, tais como os BRICS (Brasil, Índia, Rússia, África do Sul e China). Além disso, a motivação por trás da definição das dimensões, leva em consideração a compatibilização com o modelo de avaliação integrada *bottom-up* COFFEE (ROCHEDO, 2016), com o intuito de facilitar a futura integração do módulo econômico. Nesse sentido, o TEA representa a produção e a distribuição de bens e serviços na economia mundial dividida em 18 regiões (Figura 33). Na Tabela 4 é possível observar a descrição da legenda do mapa.

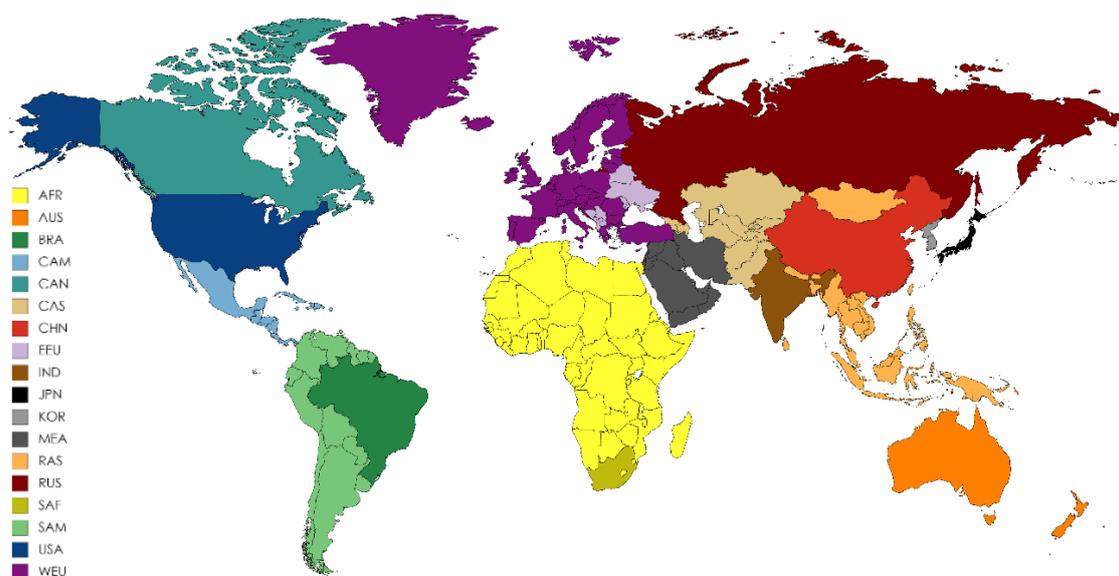


Figura 33: Regiões do modelo TEA

Tabela 4: Agregação regional do modelo TEA

Código	Nome	Código	Nome
AFR	África ^a	JPN	Japão
AUS	Austrália e Nova Zelândia	KOR	Coréia do Sul
BRA	Brasil	MEA	Oriente Médio
CAM	América Central	RAS	Resto da Ásia e Oceania
CAN	Canadá	RUS	Rússia
CAS	Região do Cáspio	SAF	África do Sul
CHN	China	SAM	América do Sul ^b
EEU	Leste Europeu	USA	Estados Unidos
IND	Índia	WEU	Oeste Europeu ^c

Notas: ^a exceto África do Sul; ^b exceto Brasil; ^c inclui União Europeia.

Além de multirregional, o modelo TEA é multisetorial. Dos 57 bens/setores produtivos da base de dados do *GTAPinGAMS*, optou-se por representar a agropecuária por 4 bens/setores, a indústria por 6 bens/setores, o setor energético por 5 bens/setores, o transporte por 3 setores, além de comercial/serviços e o setor residencial. A Tabela 5 apresenta os 20 bens/setores que refletem a estrutura econômica de cada região.

Tabela 5: Agregação setorial do modelo TEA³⁷

Grupos setoriais	Código	Descrição
Agropecuária	AGR	Agricultura e florestas
	CTL	Gado bovino, ovino, caprino e equino
	OAP	Outros animais (suíno, aves; além de leite, ovos, etc.)
	FSH	Pesca
Energia	COL	Carvão
	CRU	Petróleo cru
	ELE	Eletricidade
	GAS	Gás Natural
	OIL	Derivados de petróleo
Indústria	L_S	Ferro e aço
	CRP	Química e petroquímica
	NMM	Minerais não-metálicos (cimento, cal, concreto, etc.)
	OFD	Indústria de alimentos sem carne ^a
	OMT	Indústria de alimentos com carne
Transporte	MAN	Outras indústrias (minério, papel e celulose, etc.)
	OTP	Transporte terrestre (rodoviário, ferroviário, etc.)
	WTP	Transporte aquaviário
Residencial / Serviços	ATP	Transporte aéreo
	SER	Comercial / Serviços
	DWE	Residencial

^a inclui peixes preparados ou conservados.

³⁷ No Anexo I são detalhados os componentes de cada um dos setores do modelo TEA.

Os setores produtivos utilizam fatores primários para a produção de bens e serviços. Pode-se observar na Tabela 6 que os fatores de produção são classificados em fixos ou de mobilidade livre. Os fatores de mobilidade livre são representados pelo trabalho e capital, os quais tem livre movimentação apenas dentro de cada região. Os fatores de produção fixos são representados pela terra e por outros recursos naturais.

Tabela 6: Fatores de produção do modelo TEA

Fatores produtivos	Código	Descrição
Capital	K	Fatores de produção de mobilidade livre ^a
Trabalho	L	
Terra	T	Fatores de produção fixos
Recursos Naturais	R	

^a apenas dentro de dada região.

Cada região é representada por uma estrutura de demanda final, composta por despesas públicas e privadas com bens e serviços. Os agentes econômicos são representados no modelo TEA pelas firmas/setores (ver Tabela 5), pelas famílias (HH_r) ou agentes privados (consumidores representativos) e pelo governo ou setor público ($GOVT_r$) de cada região r (ver Tabela 4). Sendo assim, a Tabela 7 define as variáveis primárias (níveis de atividade) que definem um equilíbrio.

Tabela 7: Níveis de atividade do modelo TEA

Variáveis	Código	Descrição
$Y_{i,r}: Y(i, r)$	$vom(i, r)$	Produção ou oferta total de bens e serviços a preços de mercado
$C_r: Y("c", r)$	$vpm(i, r)$	Consumo privado ou demanda das famílias
$G_r: Y("g", r)$	$vgm(i, r)$	Consumo público ou demanda do governo
$I_r: Y("i", r)$	$vim(r)$	Demanda por investimento
$X_{i,r}: X(i, r)$	$vxm(i, r)$	Exportações
$M_{i,r}: M(i, r)$	$vim(i, r)$	Importações
$YT_{j,r}: YT(j, r)$	$vt(j, r)$	Serviço de transporte internacional
$FT_{f,r}: FT(f, r)$	$evom(f, r)$	Fatores produtivos

Conforme descrito na Seção 2.3., o modelo TEA fundamenta-se na metodologia por trás da análise insumo-produto e contabilidade social. Há três tipos de condição para a consistência da base de dados: o lucro econômico normal ou igual a zero (custo de produção igual à receita), o equilíbrio de mercado (oferta igual à demanda para todos os bens e fatores de produção) e o balanço da renda (renda líquida igual à despesa líquida).

A produção doméstica $vom(i, r)$ é distribuída entre o fluxo bilateral da região r para a região s $vxmd(i, r, s)$, serviços de transporte internacional $vst(j, r)$, demanda das firmas por insumos intermediários domésticos $vdfm(i, j, r)$, demanda doméstica das famílias $vdpm(i, r)$, demanda por investimentos $vdim(i, r)$ e demanda doméstica do governo $vdgm(i, r)$. A identidade contábil na base de dados referente à produção doméstica é apresentada pela equação (1).

$$vom(i, r) = vdpm(i, r) + \sum_j vdfm(i, j, r) + vdgm(i, r) + vdim(i, r) + \sum_s vxmd(i, r, s) + vst(j, r) \quad (1)$$

Bens importados, representados agregadamente por $vim(i, r)$, são utilizados na demanda das firmas por insumos intermediários importados $vifm(i, j, r)$, na demanda internacional das famílias $vipm(i, r)$ e na demanda internacional do governo $vigm(i, r)$. A equação (2) apresenta a identidade contábil desses fluxos.

$$vim(i, r) = vipm(i, r) + \sum_j vifm(i, j, r) + vigm(i, r) \quad (2)$$

Na produção de $Y_{i,r}$ incluem-se insumos intermediários (domésticos e importados), bem como fatores de produção móveis e fixos representados por $vfm(f, i, r)$. A renda dos fatores de produção $evom(f, r)$ é distribuída ao agente representativo, que agrega a renda das famílias e do governo. O equilíbrio nos mercados de fatores é dado por uma identidade que relaciona o valor do pagamento dos fatores com a renda destes fatores (equação 3).

$$\sum_i vfm(f, i, r) = evom(f, r) \quad (3)$$

As condições de equilíbrio entre oferta e demanda nos mercados internacionais, requerem que as exportações $vxm(i, r)$ do bem i sejam iguais às importações do mesmo bem em todos os parceiros comerciais $vxmd(i, s, r)$, como representado na relação (4).

$$vxm(i, r) = \sum_s vxmd(i, r, s) \quad (4)$$

Da mesma forma, condições de equilíbrio aplicam-se também aos serviços de transporte internacionais. A oferta agregada do serviço de transporte j , $vt(j)$, é igual às exportações dos serviços de transporte (relação 5).

$$vt(j) = \sum_r vst(j, r) \quad (5)$$

O equilíbrio entre oferta e demanda no mercado de serviços de transporte se dá pela igualdade entre a oferta de serviços de transporte e as margens do transporte internacional³⁸:

$$vt(j) = \sum_{i,r,s} vtwr(i, j, r, s) \quad (6)$$

Os fluxos R correspondem a receitas fiscais. Os fluxos de impostos consistem de impostos indiretos, tais como na produção e exportação $R^Y(i, r)$, no consumo $R^C(r)$, na demanda do governo $R^G(r)$ e nas importações $R^M(i, r)$. A renda do governo também inclui impostos diretos ao agente representativo $R^{HH}(r)$, bem como transferências líquidas do exterior $vb(r)$. A restrição orçamentária do governo pode ser representada pela equação (7).

$$vgm(r) = \sum_i R^Y(i, r) + R^C(r) + R^G(r) + \sum_i R^M(i, r) + R^{HH}(r) + vb(r) \quad (7)$$

A restrição orçamentária do agente representativo relaciona a renda dos fatores de produção, descontada dos pagamentos de impostos, com as despesas de consumo $vpm(r)$ e investimento $vim(r)$ privado, como na relação (8).

$$\sum_f evom(f, r) - R^{HH}(r) = vpm(r) + vim(r) \quad (8)$$

A produção ocorre sob condições de competição perfeita com retornos constantes de escala, portanto, não há excesso de lucros, e o custo dos insumos deve ser igual ao valor dos produtos. Esta condição aplica-se a cada um dos setores de produção:

$$Y_{i,r}: \sum_i vfm(f, i, r) + \sum_j (vdfm(i, j, r) + vifm(i, j, r)) + R^Y(i, r) = vom(i, r) \quad (9)$$

$$C_r: \sum_i (vdpm(i, r) + vipm(i, r)) + R^C(r) = vpm(r) \quad (10)$$

$$G_r: \sum_i (vdgm(i, r) + vigm(i, r)) + R^G(r) = vgm(r) \quad (11)$$

³⁸ Soma de todas as negociações bilaterais de insumos de serviços de transportes internacional.

$$I_r: \sum_i vdim(i, r) = vim(r) \quad (12)$$

$$M_{i,r}: \sum_s (vxmd(i, r, s) + \sum_j vtwr(i, r, s)) + R^M(i, r) = vim(i, r) \quad (13)$$

$$YT_j: \sum_r vst(j, r) = vt(j) = \sum_{i,r,s} vtwr(i, j, r, s) \quad (14)$$

$$FT_{f,r}: evom(f, r) = \sum_i vfm(f, i, r) \quad (15)$$

3.2. Formas Funcionais

As identidades econômicas apresentadas na Seção 3.1. mostram de que forma as matrizes de contabilidade social da base de dados estão equilibradas, porém não descrevem o comportamento dos agentes econômicos. Para entender o funcionamento do modelo, é preciso descrever como os agentes e setores se comportam. Conforme explicado na Seção 2.3.1., o modelo TEA baseia-se na hipótese de comportamento otimizador dos agentes econômicos, tanto produtores quanto consumidores. Os consumidores buscam a maximização do seu bem-estar sujeitos à restrição orçamentária. Já os setores produtivos combinam insumos intermediários e fatores primários de produção, com vistas em maximizar lucros, dada a tecnologia.

Conforme introduzido na Seção 2.3.1.1., o modelo TEA utiliza o Problema de Complementaridade Mista (*Mixed Complementarity Problem – MCP*) para encontrar soluções de equilíbrio. A partir do algoritmo de solução MCP, o equilíbrio é dado pela solução de um sistema de equações, onde três desigualdades devem ser satisfeitas: lucro máximo (lucro zero³⁹), equilíbrio dos mercados (oferta igual à demanda) e equilíbrio orçamentário (receitas iguais às despesas). A abordagem MCP envolve três conjuntos de variáveis não-negativas: preços, quantidades e níveis de renda. Ademais, a solução de equilíbrio incorpora, indiretamente, o comportamento eficiente e otimizador dos agentes, tanto firmas quanto consumidores⁴⁰. De fato, especifica-se o equilíbrio como a solução para um sistema de equações em que problemas de otimização são convertidos em problemas de equilíbrio na economia (para mais detalhes, ver Anexo II).

³⁹ Lucro econômico é dado pela diferença entre receita total e custo total. A maximização do lucro e, conseqüentemente, o nível ótimo de produção (em mercados competitivos) é dado pela igualdade entre receita marginal e custo marginal, de modo que o lucro econômico seja igual a zero (VARIAN, 1992).

⁴⁰ Os dados requeridos para representação de um modelo incluem elasticidades, parâmetros de participação, dotações iniciais e taxas dos tributos para todos os consumidores e setores produtivos.

Para isso, utiliza-se da linguagem MPSGE (*Mathematical Programming System for General Equilibrium*) que fornece uma representação simplificada de complexos sistemas de desigualdades não-lineares, usualmente encontrados em modelos de equilíbrio geral. O MPSGE é baseado em estruturas aninhadas de funções com elasticidade de substituição constante (*Constant Elasticity of Substitution – CES*), funções Cobb-Douglas e/ou funções Leontief, em que se representa o modelo por meio de blocos de equações de funções de produção, de demanda e restrições específicas. As tecnologias de produção, por exemplo, são representadas por funções CES com diversos níveis de desagregação, através de estruturas aninhadas que permitem apresentar maiores possibilidades de substituição de insumos, principalmente energéticos.

Os valores de elasticidade que alimentam as equações do modelo TEA desempenham um papel crucial no funcionamento do modelo e, conseqüentemente, afetam os resultados de simulações políticas e de choques externos. O grau de resposta dos índices de quantidade aos desvios de preços relativos depende dos valores das elasticidades de substituição e transformação. A utilização do MPSGE torna a estrutura econômica do modelo mais transparente, permitindo a flexibilidade na escolha das elasticidades e, em particular, no que diz respeito aos combustíveis e eletricidade, e aquelas cujas emissões e custos de abatimento são especialmente sensíveis. Na ausência de dados de elasticidade ou informação suficiente para estimá-los, é prática comum na calibração de modelos CGE tomar emprestados valores de elasticidade de dados publicados por outros estudos cujo mesmo foco de pesquisa está sendo modelado. Essa prática é frequentemente complementada com suposições, em que se atribui valores de elasticidade com base em observações das estruturas de produção e consumo e na flexibilidade dos setores em relação a mudanças nos preços relativos.

A Tabela 8 apresenta as variáveis endógenas que representam os setores e atividades. A Tabela 9 apresenta as variáveis endógenas de preços relativos de bens e fatores. Cada preço de equilíbrio está associado a uma condição de equilíbrio de mercado. A Tabela 10 apresenta as taxas de impostos e subsídios. A Tabela 11 apresenta as elasticidades do modelo TEA.

Tabela 8: Variáveis endógenas dos setores e atividades do modelo TEA

Variáveis	Descrição
$w_{j,r}$	Bem-estar - incluindo investimentos
$y_{i,r}$	Oferta total
c_r	Demanda privada
g_r	Demanda do governo
inv_r	Investimentos
$m_{i,r}$	Importações
$A_{i,r}$	Agregação Armington
$vxmdb_{i,s,r}$	Fluxos bilaterais de comércio
$vtwrb_{j,i,s,r}$	Custos de transporte bilateral
$ft_{ind,r}$	Transformação de fator específico terra
yt_j	Serviços de transporte
$c_{e,r}$	Geração elétrica via carvão
$g_{e,r}$	Geração elétrica via gás natural
$o_{e,r}$	Geração elétrica via derivados de petróleo
$n_{e,r}$	Geração elétrica via nuclear
$h_{e,r}$	Geração elétrica via hidroelétricas
$w_{e,r}$	Geração elétrica via eólica
$s_{e,r}$	Geração elétrica via solar
$b_{e,r}$	Geração elétrica via biomassa
$bf_{e,r}$	Produção de biocombustíveis
$htrn_{comb}_r$	Transporte privado das famílias agregado
$htrn_{ice}_r$	Transporte privado das famílias à combustão interna
$htrn_{elec}_r$	Transporte privado das famílias elétrico/híbrido
$carb_{land}_r$	Expansão de terra

Tabela 9: Variáveis de preços de bens e fatores do modelo TEA

Variáveis	Descrição
$py_{j,r}$	Preço de oferta doméstica de bens e serviços, bruto de impostos indiretos à produção
pc_r	Índice de preço do consumo privado
pg_r	Índice de preço da provisão do governo
$pinv_r$	Índice de preço dos investimentos
$pm_{i,r}$	Preço de importação, bruto de impostos às exportações e tarifas às importações
$pa_{i,r}$	Preço da agregação Armington
$pf_{f,r}$	Preço dos fatores produtivos de mobilidade livre
$ps_{f,i,r}$	Preço do fator produtivo específico (fixo) no setor
pt_j	Custo marginal do serviço de transporte internacional
pc_{e_r}	Preço doméstico da geração elétrica via carvão
pg_{e_r}	Preço doméstico da geração elétrica via gás natural
po_{e_r}	Preço doméstico da geração elétrica via derivados de petróleo
pr_{n_r}	Preço doméstico da geração elétrica via nuclear
pr_{h_r}	Preço doméstico da geração elétrica via hidroelétricas
pr_{w_r}	Preço doméstico da geração elétrica via eólica
pr_{s_r}	Preço doméstico da geração elétrica via solar
pr_{b_r}	Preço doméstico da geração elétrica via biomassa
p_{bf_r}	Preço doméstico de biocombustíveis
p_{trn_r}	Preço do transporte privado das famílias (agregado)
$p_{trn_ice_r}$	Preço do transporte privado das famílias à combustão interna
$p_{trn_elec_r}$	Preço do transporte privado das famílias elétrico/híbrido

Tabela 10: Parâmetros de taxas de tributos e subsídios do modelo TEA

Parâmetros	Descrição
rto_j	Impostos domésticos à produção (%)
$rtf_{f,i,r}$	Impostos ao uso de fatores primários na produção (%)
$rtpd_{i,r}$	Imposto ao consumo doméstico dos agentes privados (%)
$rtpi_{i,r}$	Imposto ao consumo importado dos agentes privados (%)
$rtgd_{i,r}$	Imposto ao consumo doméstico do governo (%)
$rtgi_{i,r}$	Imposto ao consumo importado do governo (%)
$rtfd_{i,j,r}$	Imposto ao consumo intermediário doméstico (%)
$rtfi_{i,j,r}$	Imposto ao consumo intermediário importado (%)
$rtxd_{i,r,s}$	Subsídios às exportações (%)
$rtmd_{i,r,s}$	Tarifas de importação (%)

Tabela 11: Parâmetros de elasticidades do modelo TEA⁴¹

Parâmetros	Descrição
<i>esubdj</i>	Elasticidade de substituição entre domésticos e importados
<i>esubva_j</i>	Elasticidade de substituição entre fatores primários
<i>esubm_i</i>	Elasticidade de substituição entre importações de diferentes origens
<i>etrae_f</i>	Elasticidade de transformação
<i>elast_fe_j</i>	Elasticidade de substituição entre valor adicionado e energia
<i>elast_agrie_j</i>	Elasticidade de substituição entre insumos intermediários agropecuários e energia
<i>elast_ele_j</i>	Elasticidade de substituição entre eletricidade e outras fontes de energia
<i>elast_fos_j</i>	Elasticidade de substituição entre fontes de energia fóssil
<i>elast_fin_j</i>	Elasticidade de substituição entre fatores primários fixos e insumos intermediários
<i>elast_fo_j</i>	Elasticidade de substituição entre valor adicionado e outros insumos
<i>elast_ink_j</i>	Elasticidade de substituição entre insumos intermediários e bens de capital
<i>elast_tro_j</i>	Elasticidade de substituição entre serviços de transporte para famílias e outros bens e serviços de consumo privado
<i>elast_trn_j</i>	Elasticidade de substituição entre transporte privado das famílias e outros serviços de transportes para famílias
<i>elast_gse_j</i>	Elasticidade de substituição entre bens e serviços e energia de consumo privado
<i>elast_gsf_j</i>	Elasticidade de substituição entre bens e serviços de consumo privado
<i>elast_foo_j</i>	Elasticidade de substituição entre alimentos de consumo privado
<i>elast_dwe_j</i>	Elasticidade de substituição entre moradia e outros bens e serviços de consumo privado
<i>elast_fe_j</i>	Elasticidade de substituição entre fontes de energia de consumo privado
<i>elast_fuel_j</i>	Elasticidade de substituição entre combustível e outros bens e serviços de consumo privado
<i>elast_tsm_j</i>	Elasticidade entre serviços e manufatura do transporte privado das famílias
<i>elast_gsg_j</i>	Elasticidade entre bens e serviços de consumo público

As definições das formas funcionais para as funções de utilidade, de demanda, de produção e de restrições são descritas seguindo a estrutura do código do modelo. As escolhas se baseiam no pressuposto de que a economia está em equilíbrio, permitindo que as equações do módulo estático do modelo TEA gerem uma observação de equilíbrio do ano base. Isso é estabelecido pelo conjunto de dados de referência do

⁴¹ Elasticidades do setor elétrico e de biocombustíveis são detalhadas na Seção 3.5. Os valores das elasticidades podem ser visualizados no Anexo III.

GTAPinGAMS, que representa um equilíbrio para a economia, de modo que o modelo seja realmente resolvido a partir de dados equilibrados de seus valores de parâmetros, e não vice-versa (SHOVEN e WHALLEY, 1984). Assim, as variáveis de decisão das equações a seguir correspondem aos dados iniciais (ou de *benchmark*), com a letra inicial *d* no lugar da letra *v*.

O modelo TEA utiliza uma estrutura CES aninhada para descrever as preferências dos consumidores. A maximização do bem-estar sujeito à restrição orçamentária é equivalente ao problema de minimização de despesas de dado nível de consumo agregado (problema dual)⁴². Assim, o consumo das famílias é caracterizado pela escolha de bens e serviços a partir da minimização de despesas unitárias, representada pelo problema de otimização da relação (16).

$$\min \sum_s p y_{j,r} (1 + rtpd_{i,r}) ddp_{i,r} + p m_{i,r} (1 + rtpi_{i,r}) dip_{i,r} \quad s. a. \\ H_r(ddp, dip) = C_{i,r} . \quad (16)$$

em que $H_{i,r}$ representa a função de demanda compensada e $C_{i,r}$ representa a função de despesa unitária.

A demanda final no modelo é caracterizada por uma função CES entre bens compostos, formados pela agregação de bens domésticos e importados⁴³. Os bens e serviços domésticos e importados são combinados a partir da elasticidade $esubd_i$. No nível mais alto da árvore tecnológica, o consumo de serviços de transporte é combinado na forma de uma função CES com os demais bens e serviços de consumo privado ($elast_tro$). O consumo de serviços de transporte por parte das famílias apresenta duas formas: transporte próprio (veículos privados)⁴⁴ e compras de serviços de transporte, dada por viagens aéreas (ATP), hidroviárias (WTP) e terrestres (OTP: rodoviárias e ferroviárias). Ambos são combinados a partir da elasticidade ($elast_trn$). Os demais bens e serviços de consumo privado são combinados na forma de uma função CES com bens e serviços ($elast_gsf$), energia ($elast_fe$) e domicílios ($elast_dwe$). Cabe destacar que o ramo de energia, que será melhor detalhado na Seção 3.5., exclui as

⁴² A medida de bem-estar é mensurada em termos de variação equivalente Hicksiana, a qual mede a mudança na renda do consumidor necessária, em cada período do modelo, para que este atinja, após uma mudança em preços relativos, o nível de utilidade inicial.

⁴³ Na Figura 34, a poupança entra diretamente na função utilidade, o que gera uma demanda por poupança e faz com que a decisão entre consumo e investimento se torne endógena. Assim, na mensuração do bem-estar, consideram-se as mudanças no consumo agregado apenas, excluindo a poupança, para evitar dupla contagem ao longo do tempo, uma vez que a poupança é transformada em investimentos, que impactam a produção e o consumo no próximo período.

⁴⁴ Consiste em uso de veículo próprio combinado com gastos de combustíveis, seguros e manutenção.

compras de combustíveis para o transporte privado das famílias, que são tratadas explicitamente no ramo de transporte. A Figura 34 apresenta a árvore tecnológica representando a função utilidade do consumidor no MPSGE.

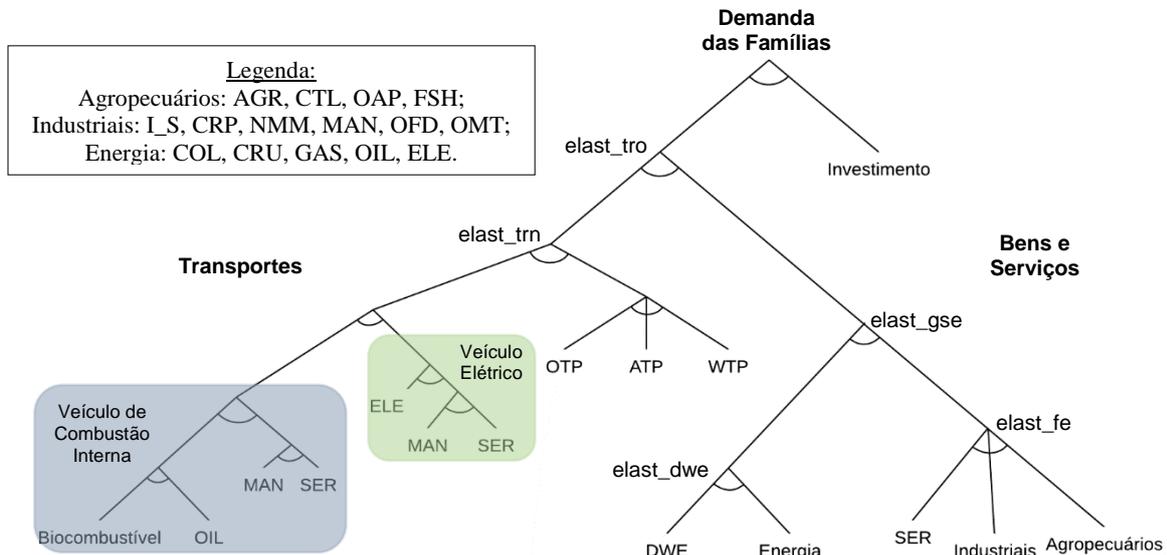


Figura 34: Árvore tecnológica da demanda das famílias do modelo TEA

O consumo do governo (agente público) é representado, no modelo, por uma função CES, entre bens compostos de parcelas domésticas e importadas. Energia e demais bens são substituíveis entre si a partir de uma elasticidade de baixo valor ($elast_gsg$). Além disso, componentes domésticos e importados de cada bem respondem a preços e são substituíveis pela elasticidade de substituição $esubd_i$. A Figura 35 apresenta a árvore tecnológica do MPSGE.

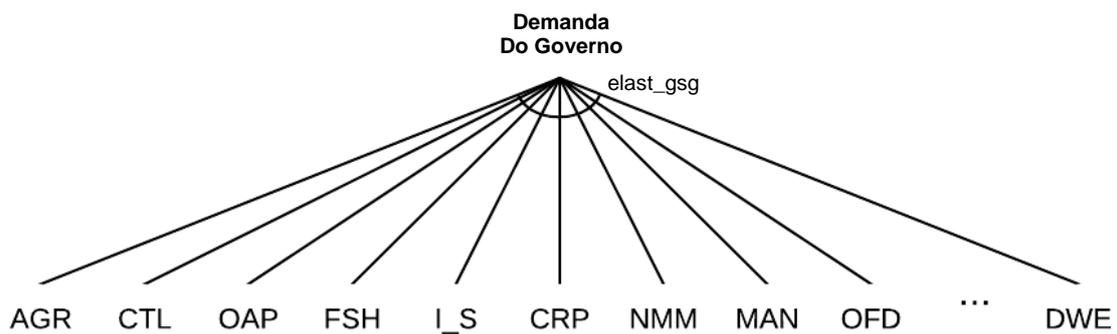


Figura 35: Árvore tecnológica da demanda do governo do modelo TEA

A maximização dos lucros com retornos constantes de escala é equivalente à minimização de custos sujeita a restrições técnicas. Assim, a produção de um setor $Y_{i,r}$

qualquer é caracterizada pela escolha de insumos a partir da minimização de custos unitários, representada pelo problema de otimização da relação (17) abaixo.

$$\begin{aligned}
& \min c_{i,r}^D + c_{i,r}^M + c_{i,r}^{FT} \quad s. a. \\
& c_{i,r}^D = \sum_j p y_{j,r} (1 + r t f_{d_{i,j,r}}) d d f m_{i,r} ; \\
& c_{i,r}^M = \sum_j p m_{j,r} (1 + r t f_{i_{i,j,r}}) d i f m_{i,r} ; \\
& c_{i,r}^{FT} = \sum_j p f_{f,r} + p s_{f,i,r} (1 + r t f_{f,i,r}) d f m_{f,i,r} ; \\
& F_{i,r}(d d f m, d i f m, d f m) = Y_{i,r} .
\end{aligned} \tag{17}$$

em que $c_{i,r}^D$ é o custo unitário das firmas por produtos intermediários domésticos, $c_{i,r}^M$ é o custo unitário das firmas por produtos intermediários internacionais e $c_{i,r}^{FT}$ é o custo unitário das firmas com fatores produtivos.

Este problema de otimização define uma função de produção caracterizada por uma função de elasticidade de substituição constante (CES), em que insumos intermediários e fatores produtivos são considerados complementares perfeitos, combinados a partir de uma função Leontief, em que não podem ser substituídos uns pelos outros. Assim, cada insumo intermediário j nessa função Leontief é uma combinação entre uma parcela doméstica e importada do mesmo bem j , a partir de uma função CES de elasticidade de substituição, representada pelo parâmetro $esubd_i$. Para produção não-agropecuária e não-energética, os insumos das indústrias são aninhados com os insumos agropecuários, de transportes, de serviços e residencial. Como dito anteriormente, o setor de transporte é dividido em transporte privado das famílias e serviços de transporte tanto para os demais setores quanto para as famílias. A produção do setor energético será melhor detalhado na Seção 3.5., bem como do setor agropecuário e a oferta de terra na Seção 3.6. A Figura 36 apresenta a árvore tecnológica do MPSGE.

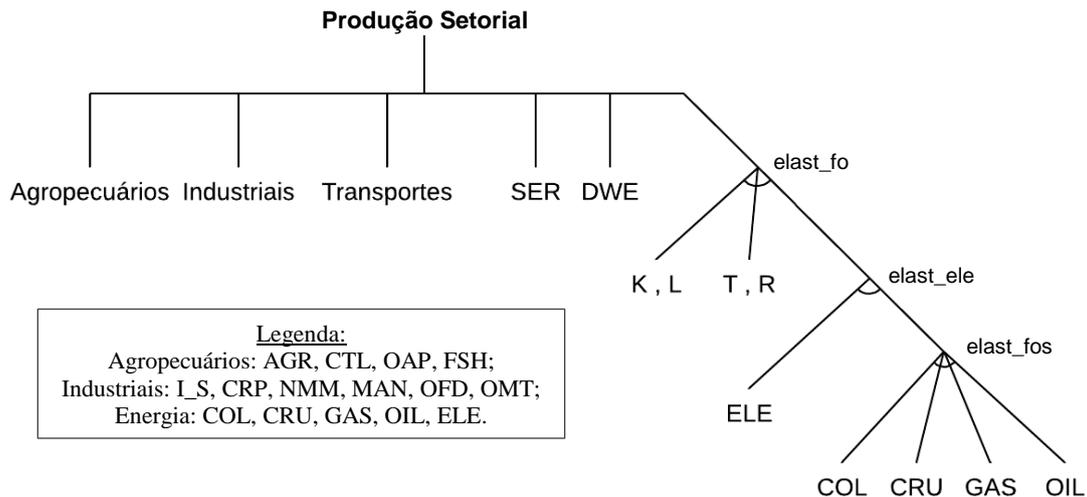


Figura 36: Árvore tecnológica de produção dos setores (exceto agropecuários e energéticos) do modelo TEA

Todos os bens produzidos são comercializados nos mercados mundiais. A representação de comércio na formulação de ARMINGTON (1969)⁴⁵ permite uma representação explícita dos fluxos de comércio bilaterais, de forma que as regiões sejam ao mesmo tempo exportadoras e importadoras de determinado bem. A escolha entre importações de diferentes parceiros comerciais é baseada na pressuposição de que um bem importado de uma região é um substituto imperfeito do mesmo bem, com origem em outras regiões (função Armington $A_{i,r}$). A substituição entre importações de diferentes origens é governada pela elasticidade de substituição denominada de $esubm_i$. Cada bem importado, demandado em uma região, é um agregado de bens importados de diferentes regiões do modelo. Dessa forma, as importações bilaterais são realizadas no modelo, seguindo o problema de otimização descrito em (18).

$$\min \sum_s (1 + rtm_{i,r,s}) (py_{j,r} (1 + rtx_{i,r,s}) dxmd_{i,r,s} + \sum_j pt_j dtwr_{j,i,r,s}) \quad s. a.$$

$$A_{i,r}(dxmd, dtwr) = M_{i,r} . \quad (18)$$

em que $M_{i,r}$ representa a função de agregação das importações bilaterais.

Nesta função de agregação das importações bilaterais $M_{i,r}$, serviços de transporte são adicionados, de forma proporcional, ao valor das importações de diferentes regiões,

⁴⁵ A elasticidade-preço da demanda de todos os países exportadores de um determinado produto, em cada país importador, é dada pela propensão dos consumidores locais a substituí-lo por um produto similar estrangeiro, ou seja, a elasticidade de substituição entre as variedades importadas.

refletindo diferenças, entre países, nas margens de transporte por unidade transportada. Os fluxos comerciais estão sujeitos a impostos de exportações, tarifas de importações e margens de transportes internacionais, explicitamente representadas no modelo TEA. O governo da região exportadora paga os subsídios (ou recebe os impostos), enquanto as tarifas são coletadas pelos governos dos países importadores. Posteriormente, o agregado de importados é combinado com a produção doméstica do mesmo bem, sob a elasticidade $esubd_i$, de forma a criar uma cesta de bens ofertados dentro da região. A Figura 37 apresenta a árvore tecnológica do MPSGE para um bem i qualquer.

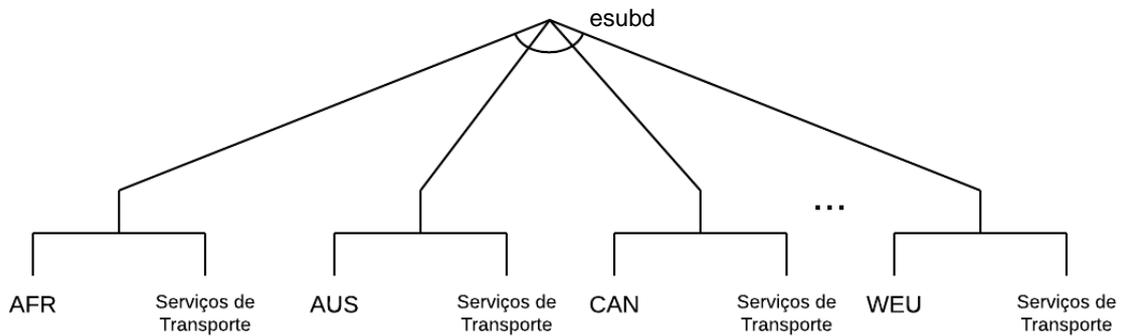


Figura 37: Árvore tecnológica da agregação das importações de um bem i qualquer do modelo TEA

Serviços internacionais de transporte são fornecidos como uma agregação de serviços de transporte exportados pelos diversos países e regiões do modelo. A agregação de serviços de transporte é representada por um problema de minimização, como ilustrado em (19). Utiliza-se uma elasticidade de substituição unitária (função Cobb-Douglas) para substituição entre transporte de diferentes origens. A Figura 38 apresenta a árvore tecnológica do MPSGE.

$$\min \sum_r p y_{i,r} d s t_{i,r} \quad s. a.$$

$$T_i(d s t) = Y T_i . \quad (19)$$

em que T_i representa a função de agregação dos serviços de transportes.

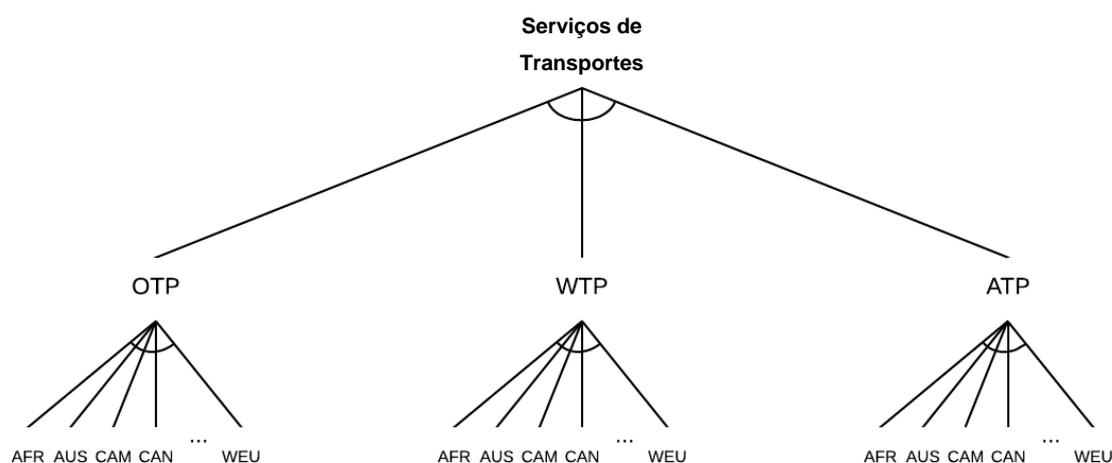


Figura 38: Árvore tecnológica dos serviços de transporte do modelo TEA

3.3. Fechamento Macroeconômico

É necessário estabelecer algumas regras para o modelo TEA fazer o percurso previsto em consonância com a realidade e com o que se deseja focalizar na análise. É no fechamento do modelo que se definem as restrições, impondo-lhes comportamentos exógenos e ajustes⁴⁶, principalmente, ao que se refere à capacidade de ajuste na oferta dos fatores de produção e à escolha de variáveis que definirão o caráter teórico aos resultados (FERREIRA FILHO *et al.*, 2011). Isto significa que não há neutralidade teórica – e, conseqüentemente, empírica – em relação à definição das variáveis exógenas.

O fechamento macroeconômico é muito importante para explicar efeitos de políticas em modelos de equilíbrio geral. Dentro do arcabouço do MPSGE, além dos blocos de produção, também são declarados os blocos de demanda, os quais são importantes para especificar e representar o fluxo circular da economia e definir o fechamento macroeconômico, conforme indicado na Seção 2.3.2.1. No modelo TEA, os blocos de demanda do agente público (governo) e do agente privado representativo (famílias) estão unificados, uma vez que o modelo não visa tratar questões tributárias ou de orçamento público, simplificando a representação das relações diretas entre famílias e governo e reduzindo o tempo de processamento computacional.

No bloco de demanda dos agentes público e privado representativos declara-se que as famílias consomem bens e serviços e recebem como renda a dotação de fatores

⁴⁶ Em termos matemáticos, essa é uma exigência que ocorre quando se tem um sistema de equações cujo número de equações é menor que o de variáveis.

produtivos. Além disso, as famílias são responsáveis pela poupança, que é igualada aos gastos com investimentos privados. Desse modo, a demanda privada agregada (vpm) deve igualar-se à renda dos fatores primários ($evom$) menos a demanda de investimentos ($vdim$). Já o governo recebe como renda as transferências internacionais e as receitas dos impostos, e gasta com bens e serviços para provimento de serviços públicos. Transferências internacionais são consideradas exógenas. Desse modo, a demanda pública agregada (vgm) deve igualar-se a renda das transferências internacionais (vb) mais as receitas dos impostos (R).

O fechamento da demanda dos agentes privados e público determina, portanto, que toda a renda recebida pelas famílias deve ser completamente esgotada pelo consumo privado de bens e serviços e pela poupança das famílias, que é considerada como equivalente à demanda por investimentos; bem como, toda a renda recebida pelo agente público deve ser igual aos gastos do governo. Desse modo, gastos dos agentes privados (vpm) + gastos do governo (vgm) + investimentos ($vdim$) = renda dos fatores ($evom$) + transferências internacionais (vb) + impostos. Como as transferências internacionais são dadas pelo negativo do saldo da conta corrente ($M - X$), o fechamento macroeconômico apenas mostra a identidade de que a demanda agregada da economia deve igualar-se à renda.

$$\begin{aligned}
 vpm + vdim &= evom \\
 vgm &= R + vb \\
 DA &= RA \\
 vpm + vdim + vgm - vb &= evom + R \\
 C + I + G + (X - M) &= FT + T
 \end{aligned}$$

Por fim, cabe destacar que a dotação de fatores de produção é exógena e fixa em um dado período, perfeitamente móvel entre setores (para capital e trabalho) e sem mobilidade entre regiões (para capital, trabalho, terra e outros recursos naturais). Além disso, não há desemprego dos fatores (pressuposição de pleno emprego)⁴⁷, o que significa que os preços dos fatores são flexíveis e a taxa de desemprego observada no *benchmark* pode ser considerada como taxa de desemprego natural, que será a mesma no médio-longo prazo, independente do choque de política implementado. Mesmo com essa visão de pleno emprego, o modelo permite alguma inferência sobre possíveis

⁴⁷ É importante destacar que não existe consenso na modelagem do desemprego em modelos de equilíbrio geral, uma vez que as teorias e formas de representar o desemprego no mercado de trabalho são diversas e geralmente não unânimes na explicação desse fenômeno econômico. Geralmente, as formas de modelagem matemática do desemprego são extremamente simples, porém, sujeitas a muitas dúvidas na interpretação dos resultados do modelo.

mudanças na taxa de desemprego, uma vez que as remunerações dos fatores de produção são passíveis de mudanças. Se, por exemplo, após um choque o modelo indica um aumento na remuneração real dos fatores mão de obra e capital, isso significa claramente um aumento na demanda por esses fatores na economia e, por consequência, uma pressão para a redução do desemprego e da capacidade ociosa.

Ademais, a oferta de bens de capital é fixa em um dado período, uma vez que investimentos não respondem a mudanças em taxas de retorno do capital e a dotação de capital é constante. Pelo lado da demanda, a propensão marginal a poupar é constante e específica a cada região, de acordo com a sua parcela no total do consumo e poupança agregados na base de dados inicial, isto é, considera-se a igualdade econômica entre poupança e investimento. Os fluxos internacionais de capitais, que compensam os desequilíbrios no comércio de bens e serviços (balança comercial) no ano base do modelo, são assumidos exógenos e declinantes com o tempo, reduzindo déficits ou superávits existentes nas transações correntes ao longo do horizonte do modelo. O saldo em conta corrente não é afetado por choques, ou seja, a taxa de câmbio real entre os países se ajusta para acomodar mudanças em exportações e importações. Por fim, os gastos do governo podem se ajustar a mudanças em preços dos bens e na arrecadação de impostos, que por sua vez responde a mudanças no nível de atividade e consumo na mesma proporção que o consumo das famílias. Para evitar descolamentos ao longo do tempo da atividade pública em relação à atividade privada (aumento ou redução da participação do Estado na economia), impõe-se como regra que a variação nos gastos do governo deve ser igual à variação nos gastos das famílias a cada período.

Assim, descritas as principais relações matemáticas que refletem os diversos processos de otimização que ocorrem no modelo TEA, o MPSGE transforma essas informações em equações algébricas que são processadas no software GAMS. Valores de parâmetros são calculados usando o método de calibração que se baseia no pressuposto de que a economia está em equilíbrio, isto é, ao alimentar o modelo com a base de dados do *GTAPinGAMS*, as equações do módulo estático do modelo TEA geram uma observação de equilíbrio do ano base. Todos os valores de parâmetros e variáveis são obtidos a partir da base de dados e, uma vez em equilíbrio, são dados em termos de valores (preço vezes quantidade). Assim, unidades são escolhidas para bens, de modo que seja possível separar observações de preço e de quantidade, isto é, bens passam a ter um preço de unidade no ano base (HARBERGER, 1962).

Ademais, uma verificação de replicação deve ser realizada com o intuito de identificar possíveis falhas de precisão causadas por formas funcionais inconsistentes com a base de dados, possivelmente devido a valores de elasticidade inviáveis ou desagregação inadequada de setores e regiões. A verificação de replicação não falha se os dados iniciais da matriz de insumo-produto estiverem em equilíbrio, o que é basicamente o caso quando, após o modelo ter sido alimentado com dados, cada valor de quantidade gerado no modelo reproduz seu valor correspondente na base de dados do *GTAPinGAMS*. Desta forma, espera-se que a solução de *benchmark* represente o estado da economia como na matriz de insumo-produto inicial, de modo que qualquer alteração em variáveis ou parâmetros exógenos deve gerar um novo conjunto de dados a partir de uma nova condição de equilíbrio.

3.4. Dinâmica e Premissas para Construção de Trajetórias

A solução de equilíbrio de referência (*benchmark*) fornece não apenas a solução do módulo estático, mas também o conjunto de dados de equilíbrio no ano base do modelo, que serve como ponto de partida para uma próxima solução de equilíbrio dentro do horizonte de análise, a partir de alterações em parâmetros que capturem premissas sobre a evolução temporal da economia. Um aspecto importante na caracterização dos modelos de equilíbrio geral são as pressuposições a respeito da capacidade do modelo de captar a dinâmica da economia no tempo. A construção de modelos dinâmicos constitui uma tarefa difícil, pois necessitam de um tratamento adequado das expectativas dos agentes econômicos em um processo intertemporal (PALTSEV, 1999).

O modelo TEA é um modelo que se utiliza do algoritmo recursivo dinâmico para realizar simulações, de modo que considera a trajetória da economia como uma sucessão de equilíbrios de médio prazo, ou para um dado ponto no tempo⁴⁸. Tendo em vista o foco de pesquisa priorizar o nexos entre economia, energia e mudanças climáticas, o modelo considera um horizonte de simulação de longo prazo, partindo de 2011 (ano base) e simulando a produção e alocação de bens e serviços na economia global a cada intervalo de 5 anos até o ano 2050⁴⁹. Os resultados de um período dependem dos resultados obtidos no período anterior, bem como os utiliza como valores

⁴⁸ Expectativas míopes, pois investimento é uma variável exógena.

⁴⁹ É possível estender o horizonte de análise até 2100, porém é necessário aprimorar a representação de tecnologias disruptivas no modelo, tais como *Carbon Dioxide Removal* (CDR), o que deve ser o foco de trabalhos futuros.

de referência para o processo de otimização no próximo período. Portanto, em cada período o modelo possui um processo estático de solução, na medida em que os agentes não se preocupam com valores ou tendências futuras esperadas para as demais variáveis para além do período de 5 anos em resolução. Além disso, é preciso fazer suposições, por várias décadas no futuro, sobre a taxa de crescimento econômico, a taxa de preferência temporal, a taxa de crescimento da população, depreciação, etc. Todas essas suposições acabam, muitas vezes, gerando o risco de afastamento a modelagem da realidade. Contudo, os formuladores de políticas ainda precisam tomar suas decisões e os cientistas e economistas precisam fornecer respostas sobre o futuro (PALTSEV, 1999).

Enquanto os parâmetros de *benchmark* e as elasticidades são mantidas constantes, a calibração dinâmica também envolve a atualização de alguns valores de variáveis exógenas que estabelecem uma solução de benchmark e incluem novos valores exógenos de variáveis e parâmetros. As variáveis exógenas e processos mais influentes nas trajetórias do modelo TEA incluem: a taxa de crescimento econômico e populacional; o crescimento da força de trabalho; a produtividade dos fatores de produção; o acúmulo de capital; a disponibilidade futura de tecnologias alternativas; a eficiência energética e a evolução na intensidade do uso de energia; e mudanças estruturais no consumo.

A evolução do modelo TEA ao longo do tempo é fundamentada a partir de trajetórias de referência, conforme descritas na Seção 2.1., que descrevem tendências alternativas acerca da evolução da sociedade, economia e ecossistemas na escala de tempo de um século, sem considerar possíveis impactos das mudanças climáticas e na ausência de políticas climáticas (VAN VUUREN e CARTER, 2014; O'NEILL *et al.*, 2014). A partir de dados quantitativos dos chamados *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP), mais especificamente, do SSP2 – Meio do Caminho, o modelo é guiado em termos de projeções econômicas (CUARESMA, 2015; LEIMABCH *et al.*, 2015; DELLINK *et al.*, 2015) e projeções populacionais (KC e LUTZ, 2017).

Cabe ressaltar que o SSP2, representa um mundo que segue um caminho no qual as tendências sociais, econômicas e tecnológicas não mudam marcadamente dos padrões históricos, de acordo com O'NEILL *et al.* (2015):

- i) Desenvolvimento e crescimento econômico continuam desiguais, com alguns países apresentando relativo bom progresso enquanto outros ficam aquém das expectativas;
- ii) A maioria das economias são politicamente estáveis;

- iii) Os mercados globalmente conectados funcionam de forma imperfeita;
- iv) As instituições globais e nacionais trabalham em direção de alcançar os objetivos de desenvolvimento sustentável, incluindo melhores condições de vida e acesso à educação, água potável e cuidados com a saúde, porém têm um lento progresso na sua realização;
- v) O desenvolvimento tecnológico prossegue em ritmo acelerado, mas sem avanços fundamentais;
- vi) Sistemas ambientais sofrem com a degradação, embora haja algumas melhorias e a intensidade total de recursos e usos de energia se reduz;
- vii) Apesar da dependência de combustíveis fósseis diminuir lentamente, não há relutância em usar recursos fósseis não convencionais;
- viii) O crescimento da população global é moderado e níveis declinantes são observados na segunda metade do século, como consequência da conclusão da transição demográfica;
- ix) Investimentos em educação não são altos o suficiente para acelerar a transição para baixas taxas de fertilidade nos países de baixa renda;
- x) Persistem desigualdades de renda, dando continuidade à estratificação social e à limitada coesão social, o que mantém os desafios de se reduzir a vulnerabilidade às mudanças sociais e ambientais, restringindo avanços significativos no desenvolvimento sustentável;
- xi) Meio ambiente segue em tendência de degradação, enfrentando desafios moderados para mitigação e adaptação, mas com heterogeneidades significativas entre os países e dentro deles.

No que diz respeito aos fatores de produção, o modelo considera apenas um único tipo genérico de trabalho, cuja oferta ou crescimento da força de trabalho é definida exogenamente a partir do crescimento da população (KC e LUTZ, 2017). Tanto a produtividade do trabalho quanto a do capital são definidas endogenamente, assumindo que a evolução da produtividade total dos fatores reproduzirá níveis de Produto Interno Bruto (PIB) nas regiões do modelo em concordância com as taxas de crescimento econômico (DELLINK *et al.*, 2015). O fator terra é específico aos setores agropecuários e à produção de biocombustíveis e sua produtividade cresce exogenamente no valor de 1% a.a. (RAY *et al.*, 2013).

Em modelos recursivos dinâmicos, poupança e investimento são baseados apenas em variáveis do período corrente, diferente dos modelos de otimização intertemporal, em que as decisões de poupança e investimentos consideram todas as condições econômicas futuras, dadas como conhecidas pelos agentes⁵⁰. No modelo TEA, um bloco de produção do MPSGE produz um nível agregado de investimentos igual ao nível de poupança determinado pela função de bem-estar/utilidade das famílias (agente privado representativo). A acumulação de capital é contabilizada, portanto, a partir da geração de novo capital a partir da maturação do investimento realizado no período anterior (o que assume implicitamente um período de cinco anos de “gestação” do investimento), que é agregado no estoque de capital já existente (descontada a depreciação) de cada região. A propensão marginal a poupar é mantida constante ao longo do tempo, evitando assim choques relacionados aos ciclos econômicos.

Mudanças tecnológicas são fundamentais nos debates de políticas climáticas, uma vez que diversas fontes de energia são conhecidas, porém nem todas são utilizadas atualmente, apesar de apresentar potencial competitivo no futuro. Tecnologias como eólica, solar e biomassa, devem apresentar maior penetração na matriz energética quando a oferta de recursos energéticos convencionais, baseados em combustíveis fósseis, tornar-se mais escassa e/ou mais cara, ou quando políticas públicas incentivarem as suas expansões. No modelo TEA, a disponibilidade futura de tecnologias alternativas é representada pelo parâmetro *e_trend* que reflete a penetração de tecnologias alternativas do modelo COFFEE (ver mais detalhes na Seção 3.5).

Reduções no uso de energia por unidade de produto ao longo do tempo também são caracterizados por mudanças tecnológicas e sua representação trata-se de uma prática recorrente na modelagem de equilíbrio geral, seja com relação a evolução do PIB ou considerando uma taxa padrão de crescimento. No modelo TEA, tal mudança é representada pelo parâmetro não induzido por preços chamado AEEI (*Autonomous Energy Efficiency Improvement Index*) que cresce exogeneamente a taxa padrão de 1% a.a. Trata-se da hipótese de que há mudanças tecnológicas na demanda por energia, dado uma redução na quantidade de energia por unidade de PIB à medida que aumenta o PIB per capita de cada região.

Outro aspecto importante da dinâmica das economias é o padrão de mudança no consumo ao longo do tempo. Como a função de consumo CES, utilizada no modelo

⁵⁰ Expectativas adaptativas (*forward-looking*), pois considera-se informação perfeita sobre o futuro da economia.

TEA, é homogênea de grau um, a parcela do gasto com cada bem no consumo total permanece constante, independente das mudanças na renda. Apesar de não ser consistente com tendências de longo-prazo, a propriedade de homogeneidade das funções CES é conveniente no modelo por simplificar a solução no MPSGE. Para superar os limites dos retornos constantes de escala no consumo, adota-se uma abordagem que torna as parcelas de participação de bens e serviços no consumo dependentes da mudança na renda entre períodos⁵¹. De acordo com LAHIRI, BABIKER e ECKAUS (2000), há uma forte evidência empírica de redução de participação de alimentos e produtos básicos e, simultâneo, aumento da participação de serviços nos gastos dos consumidores à medida que a renda per capita cresce. No modelo TEA modificações estruturais na demanda de longo prazo foram realizadas para caracterizar essa redução na participação dos alimentos nos gastos totais das famílias à medida que a renda per capita média da população aumenta em uma determinada região. Isso evita que a produção de alimentos cresça na mesma proporção que o crescimento do PIB. Correlacionando PIB per capita e participações da demanda de produtos agropecuários e da indústria de alimentos por região foram estimadas curvas que guiam, em função de mudanças na renda per capita entre períodos do modelo, a demanda das famílias por alimentos (para mais detalhes ver Anexo IV).

3.5. Energia

A origem comum de modelos CGE destinados à análise das mudanças climáticas são os modelos *bottom-up* para avaliação de tecnologias e planejamento energético, cuja principal característica é o rico detalhamento de tecnologias de extração, conversão e transporte de energia. Por outro lado, tais modelos energéticos devem ser integrados a modelos de equilíbrio geral, a fim de que os processos de setores não-energéticos sejam também modelados. Nesse sentido, modelos CGE destinados a elucidar políticas de mudanças climáticas precisam ter um tratamento elaborado dos processos energéticos, principalmente, aos que se referem a combustíveis fósseis. Isso tem certas implicações para a especificação de funções de produção, bem como para a divisão de setores produtivos no modelo.

O modelo TEA trata a produção e o consumo de energia em unidades energéticas. No procedimento de calibração, os dados equilibrados de *benchmark* em valores

⁵¹ Isto mantém a homogeneidade dentro de um período consistente com retornos constantes e capta a evolução do consumo em função da renda ao longo do tempo.

monetários são traduzidos em exajoules (EJ) a partir da compatibilização com bases de dados de energia. Para o consumo de energia, valores monetários foram transformados em unidades energéticas a partir da base de dados referente ao balanço global de energia da IEA-WEO (IEA, 2011). Para produção de energia primária e geração de eletricidade foram utilizados dados do modelo COFFEE (ROCHEDO, 2016). A Tabela 12 apresenta um mapeamento genérico do balanço de energia do ano base realizado para cada região do modelo e a forma como foram convertidas variáveis do modelo TEA (valores monetários) em unidades de energia pode ser visualizada na Tabela 13.

Tabela 12: Mapeamento genérico para compatibilização do balanço energético no modelo TEA

	COL	CRU	GAS	OIL	Biomassa	ELE	
Oferta de energia primária	1				1		
COL						3	
GAS							
OIL				2			
Nuclear							
Hidro							
Eólica							
Solar							
Biomassa							
Oferta de energia secundária				4		4	
GAS			5				
OIL			5				
Consumo do setor energético			6				
AGR	7		7				
CTL							
OAP							
FSH							
I_S							
CRP							
NMM							
MAN							
OFD							
OMT							
ATP							
WTP							
OTP							
SER							
DWE							
NEU ^a	8			8			
Consumo final	9			9			

^a Non-energy use: uso não energético.

Legenda: IEA-WEO COFFEE TEA

Tabela 13: Lista de correspondência para compatibilização de variáveis do modelo TEA em unidades energéticas

	Equações	Descrição
1	$p_enecoeff(r, ene) = p_energy(r, ene)/vom(ene, r)$ $p_eneout(ene, r, t) = enecoeff(r, ene) \cdot vom_l(ene, r)$	<p>O parâmetro $p_enecoeff$ converte o valor monetário da produção (vom) de cada setor energético (ene) para cada região (r) em unidades energéticas do ano base. O parâmetro p_energy corresponde à base de dados de oferta de energia primária. A variável p_eneout calcula a oferta de energia primária em unidades energéticas a partir da evolução da produção (vom_l).</p>
2	$s_enecoeff(r, oil) = s_energy(r, oil)/vom(oil, r)$ $s_eneout(oil, r, t) = enecoeff(r, oil) \cdot vom_l(oil, r)$	<p>O parâmetro $s_enecoeff$ converte o valor monetário da produção (vom) de derivados de petróleo (oil) para cada região (r) em unidades energéticas do ano base. O parâmetro s_energy corresponde aos dados de oferta de energia secundária. A variável s_eneout calcula a oferta de derivados de petróleo em unidades energéticas a partir da evolução da produção do setor (vom_l).</p>
3	$s_enecoeff(r, ee) = s_energy(r, ee)/vom(ee, r)$ $s_eneout(ee, r, t) = enecoeff(r, ee) \cdot vom_l(ee, r)$	<p>O parâmetro $s_enecoeff$ converte o valor monetário da produção (vom) de cada tecnologia do setor elétrico (ee) para cada região (r) em unidades energéticas do ano base. O parâmetro s_energy corresponde aos dados de oferta de energia secundária. A variável s_eneout calcula a geração elétrica em unidades energéticas a partir da evolução da produção do setor (vom_l).</p>
4	$s_eneout(tot, r, t) = s_eneout(oil, r, t) + \sum_{ee} s_eneout(ee, r, t)$	<p>A variável $se_ene(tot, r, t)$ calcula a evolução da oferta total de energia secundária.</p>
5	$c_enecoeff(r, ene, ene_) = c_energy(r, ene, ene_)/vafm(ene, ene_ , r)$ $enecons_en(r, ene, ene_ , t) = c_enecoeff(r, ene, ene_) \cdot vafm_l(ene, ene_ , r)$	<p>O parâmetro $c_enecoeff$ converte o valor monetário do consumo ($vafm$) de cada setor energético (ene) para cada região (r) em unidades energéticas do ano base. O parâmetro c_energy corresponde à base de dados de consumo final e energético de energia. A variável $enecons_en$ calcula o consumo de energia em unidades energéticas a partir da evolução da produção ($vafm_l$).</p>

	Equações	Descrição
6	$enecons_en(r, tot, ene, t) = \sum_{ene} enecons_en(r, ene, ene, t)$	<p>A variável $enecons_en(r, tot, ene, t)$ calcula a evolução do consumo de energia pelos setores energéticos ($ene_$).</p>
7	$c_enecoeff(r, j, ene) = c_energy(r, j, ene)/vafm(j, ene, r)$ $enecons(r, j, ene, t) = c_enecoeff(r, j, ene) \cdot vafm_l(j, ene, r)$	<p>O parâmetro $c_enecoeff$ converte o valor monetário do consumo ($vafm$) de cada setor não-energético (j) para cada região (r) em unidades energéticas do ano base. O parâmetro c_energy corresponde à base de dados de consumo final e energético de energia. A variável $enecons$ calcula o consumo de energia final em unidades energéticas a partir da evolução da produção ($vafm_l$).</p>
8	$c_enecoeff(r, i_s, col) = c_energy(r, col, i_s)/vafm(col, i_s, r)$ $enecons_neu(r, i_s, col, t) = c_enecoeff(r, col, i_s) \cdot vafm(col, i_s, r)$ $c_enecoeff(r, crp, gas) = c_energy(r, gas, crp)/vafm(gas, crp, r)$ $enecons_neu(r, crp, gas, t) = c_enecoeff(r, gas, crp) \cdot vafm(gas, crp, r)$ $c_enecoeff(r, crp, oil) = c_energy(r, oil, crp)/vafm(oil, crp, r)$ $enecons_neu(r, crp, oil, t) = c_enecoeff(r, oil, crp) \cdot vafm(oil, crp, r)$ $enecons_neu(r, tot, ene, t) = \sum_j enecons_neu(r, j, ene, t)$	<p>O parâmetro $c_enecoeff$ converte o valor monetário do consumo ($vafm$) dos setores industriais i_s e crp das fontes col, gas e oil para cada região (r) em unidades energéticas do ano base. O parâmetro c_energy corresponde à base de dados de consumo final e energético de energia. A variável $enecons_neu$ calcula o consumo de energia de uso não-energético em unidades energéticas a partir da evolução da produção ($vafm_l$).</p>
9	$enecons_f(r, tot, ene, t) = \sum_j enecons(r, j, ene, t) + enecons_neu(r, tot, ene, t)$	<p>A variável $enecons_f(r, tot, ene, t)$ calcula a evolução do consumo final de energia para todos os setores não-energéticos, incluindo uso não-energético.</p>

O modelo TEA trata em detalhe setores produtivos energointensivos, de modo que representa explicitamente os setores de extração de energia primária (carvão – COL; gás natural – GAS; petróleo cru – CRU), bem como os setores de produção de energia secundária (derivados de petróleo – OIL; setor elétrico – ELE) e setores de alto consumo de energia final na indústria (ferro e aço – I_S; química – CRP; minerais não-metálicos – NMM; outras manufaturas – MAN) e no transporte (terrestre – OTP; aéreo – ATP; hidroviário – WTP). A Tabela 14 apresenta as elasticidades relacionadas à energia do modelo TEA⁵².

Tabela 14: Parâmetros de elasticidades relacionadas à energia do modelo TEA

Parâmetros	Descrição
<i>elast_fele_j</i>	Elasticidade de substituição entre valor adicionado e eletricidade
<i>elast_ele_j</i>	Elasticidade de substituição entre eletricidade e outras fontes de energia
<i>elast_en_j</i>	Elasticidade de substituição entre fontes de energia
<i>elast_fcru_j</i>	Elasticidade de substituição entre valor adicionado e petróleo cru
<i>elast_trne_j</i>	Elasticidade de substituição entre transporte privado a combustão e elétrico
<i>elast_boil_j</i>	Elasticidade de substituição entre biocombustíveis e derivados de petróleo
<i>elast_efos_j</i>	Elasticidade de substituição entre diferentes tecnologias de geração fóssil
<i>elast_ffos_j</i>	Elasticidade de substituição entre fator fixo e valor adicionado
<i>nsigma_j</i>	Elasticidade de substituição entre nuclear e outros recursos
<i>hsigma_j</i>	Elasticidade de substituição entre hidroelétrica e outros recursos
<i>ssigma_j</i>	Elasticidade de substituição entre solar e outros recursos
<i>wsigma_j</i>	Elasticidade de substituição entre eólica e outros recursos
<i>bsigma_j</i>	Elasticidade de substituição entre biomassa e outros recursos

Diversos blocos de produção dos setores de produção energia são construídos, cada qual com sua árvore tecnológica própria. Esses setores servem como insumo para produção de bens e serviços da economia e são combinados com outros fatores produtivos e outros insumos intermediários. Os setores primários de energia (COL, CRU e GAS) possuem uma estrutura similar ao dos outros setores de insumos intermediários, conforme Figura 39, combinando fatores produtivos, entre eles os

⁵² Para mais detalhes ver Anexo III.

recursos fósseis R , com eletricidade com uma função CES a partir da elasticidade $elast_fele_j$. Ademais, a eletricidade é combinada com o agregado energético a partir da elasticidade $elast_ele_j$. A substituição entre os diferentes insumos energéticos (COL, CRU, GAS e OIL) é dada pela elasticidade $elast_en_j$. Cabe ressaltar que para cada fonte energética, insumos domésticos e importados são substituídos a partir da elasticidade $esubd_i$.

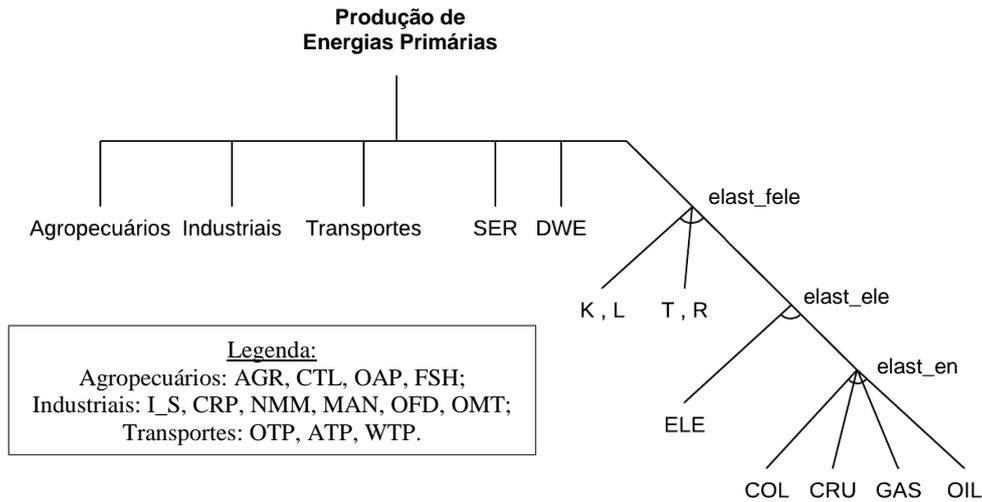


Figura 39: Árvore tecnológica para produção de energias primárias do modelo TEA

O setor de derivados de petróleo (OIL) é único por considerar o petróleo cru (CRU) como um insumo para a geração de produtos, que entra na função como um insumo intermediário complementar, e não como parte da demanda por energia, conforme Figura 40. O insumo petróleo cru (CRU) é combinado os fatores produtivos a partir de uma função CES guiada pela elasticidade $elast_fcru_j$. Os demais insumos energéticos (COL, GAS e OIL) são substituídos pela elasticidade $elast_en_j$. Essa estrutura tem por objetivo representar a principal fonte energética utilizada no mundo de forma mais apropriada.

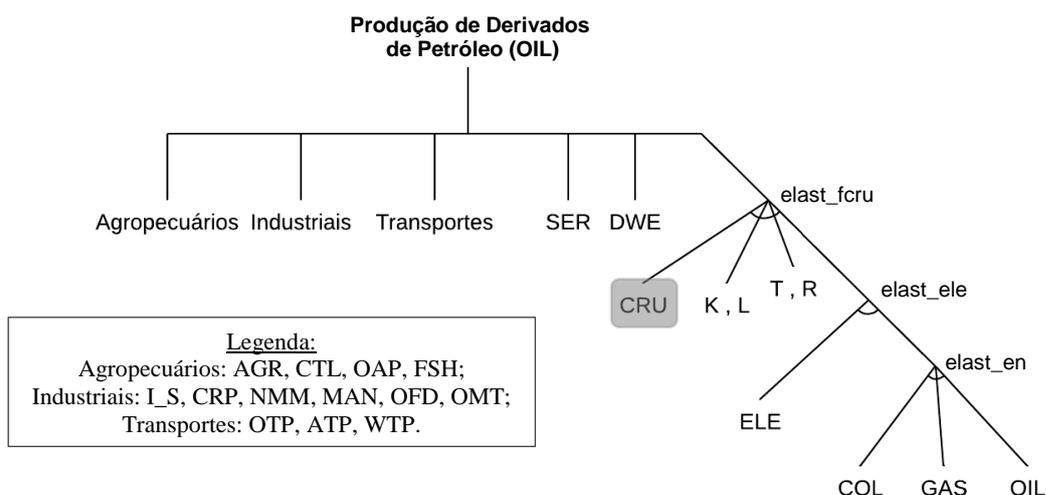


Figura 40: Árvore tecnológica para produção de derivados de petróleo do modelo TEA

A resposta de longo prazo a medidas de políticas climáticas que afetam o setor de transporte provavelmente incluirá ajustes e substituições tanto do lado da oferta quanto do lado da demanda. Conforme descrito na Seção 3.2., o modelo TEA considera a desagregação do setor de transporte em duas atividades: serviços de transporte e a representação explícita do transporte privado das famílias para permitir análises específicas sobre mobilidade. A maior parte da energia consumida nesses setores é proveniente do setor de derivados de petróleo (OIL), porém o modelo TEA ainda conta com dois substitutos para combustíveis fósseis no transporte privado das famílias incluem biocombustíveis e veículos elétricos.

No topo da árvore tecnológica do setor de transporte privado das famílias combinam-se as tecnologias de veículo a combustão interna e veículos elétricos/híbridos a partir de uma função CES guiada pela elasticidade $elast_{trne}_j$, conforme Figura 41. A utilização de veículos elétricos/híbridos consiste em gastos com eletricidade (ELE) combinado com o uso do veículo próprio (MAN) e gastos com serviços de manutenção, seguro, etc. (SER)⁵³, os quais são combinados por uma função CES cuja elasticidade é $elast_{fuel}_j$. Considerou-se um *mark-up* de 15% para veículos elétricos/híbridos em relação aos veículos convencionais, bem como uma taxa de penetração orientada pelo *Global EV Outlook 2018* (IEA, 2018). De forma semelhante,

⁵³ A participação das despesas com manutenção e uso de carros no consumo das famílias foi estimada, assumindo uma despesa média de 5% do valor do carro por ano em serviços. O valor do carro é representado pela participação de veículos motorizados (e suas partes) no consumo final mais as despesas em produtos manufaturados pelas famílias, em cada região.

a utilização de veículos a combustão interna também depende de insumos energéticos, além do próprio veículo e seus serviços. As opções de combustível, nesse caso, tratam-se de derivados de petróleo (OIL) e biocombustíveis, as quais são substituídas a partir da elasticidade $elast_boil_j$. Cabe ressaltar que foi considerado um aumento gradual na substituição de derivados de petróleo por biocombustíveis, a partir de uma parametrização da elasticidade $elast_boil_j$, considerando uma perspectiva de aumento da frota de veículos usando biocombustíveis⁵⁴.

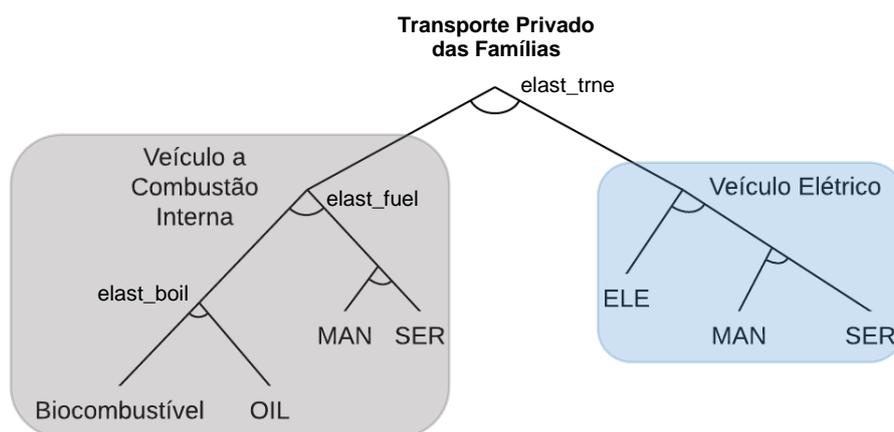


Figura 41: Árvore tecnológica do transporte privado das famílias do modelo TEA

Ao que se refere a representação do setor elétrico, o modelo TEA representa o setor a partir de oito tecnologias. Parte da resposta do setor elétrico a medidas de políticas climáticas está na mudança do *mix* de diferentes tecnologias usadas na produção de energia⁵⁵. No modelo TEA, há cinco opções tecnológicas (Nuclear, Hidro, Eólica, Solar e Biomassa) que produzem energia elétrica que podem substituir às fósseis (COL, GAS, OIL). Os atributos específicos dessas tecnologias são determinados pelos parâmetros das funções CES aninhadas. A abordagem básica é similar à especificação dos outros setores da economia, conforme a Figura 42.

⁵⁴ Seja via mandatos ao redor do mundo ou por mudanças comportamentais na escolha de combustíveis em veículos *flex-fuel*.

⁵⁵ A fim de melhor capturar essas possibilidades de substituição, as restrições tecnológicas do setor elétrico, ou de todo o setor de energia, são às vezes representadas a partir da integração com modelos energéticos, e não por uma função de produção padrão, o que deve ser tópico para trabalhos futuros.

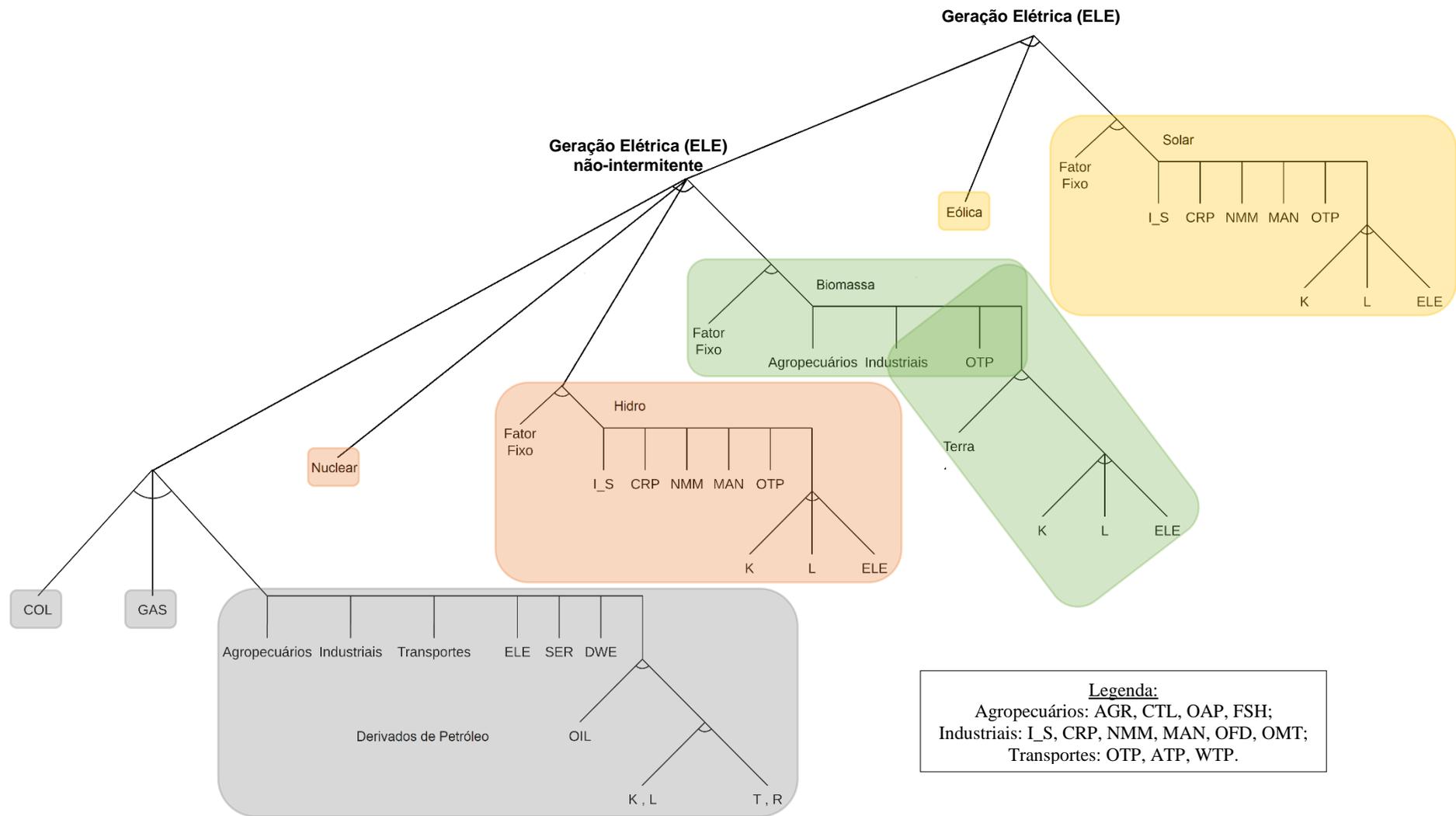


Figura 42: Árvore tecnológica para geração elétrica do modelo TEA

Os níveis do topo da árvore tecnológica permitem o tratamento das diferentes tecnologias de geração, dentre as quais combinam-se tecnologias intermitentes (Eólica e Solar) com as demais (COL, GAS, OIL, Nuclear, Hidro e Biomassa). As elasticidades $w\sigma$ e $s\sigma$, neste caso, permitem a representação de substituição limitada entre energia solar e eólica e demais recursos, uma vez que são fontes intermitentes. Ainda, as elasticidades permitem uma penetração gradual quando os preços de outras fontes de energia se elevam continuamente e seus recursos têm dotações de fatores fixos específicas às regiões, de forma a capturar a potencial participação das energias eólica e solar na matriz energética.

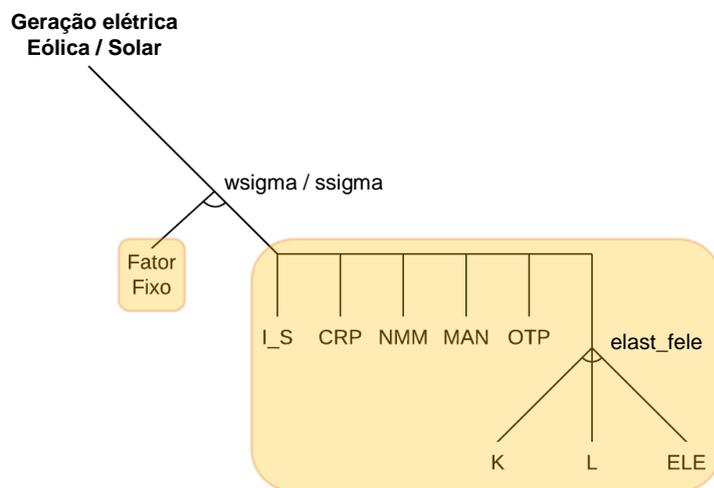


Figura 43: Árvore tecnológica para geração elétrica eólica e solar do modelo TEA

A geração de eletricidade via combustíveis fósseis é representada pela combinação de três tecnologias (COL, GAS e OIL) sob uma função CES guiada pela elasticidade $elast_{efos_j}$, conforme Figura 44. Para cada uma das tecnologias são combinados insumos intermediários, fator fixo específico e valor adicionado por uma função Leontief. A elasticidade $elast_{ffos_j}$ controla a substituição entre o fator fixo específico e o valor adicionado.

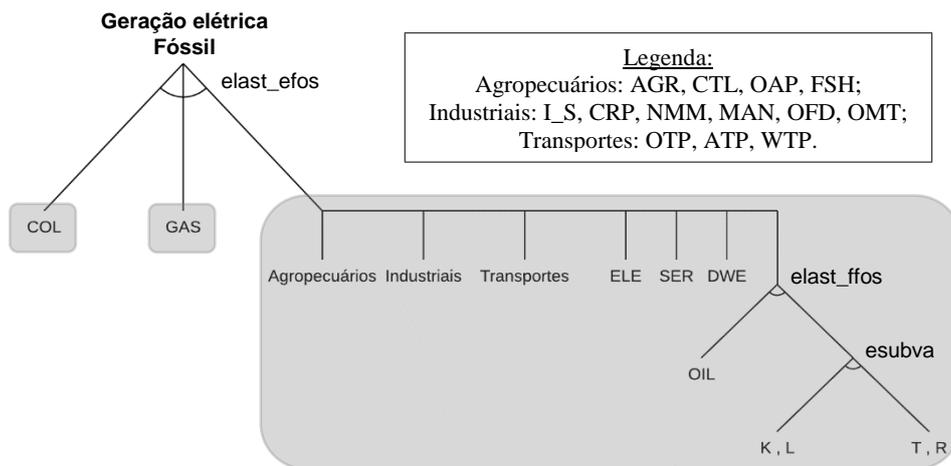


Figura 44: Árvore tecnológica para geração elétrica fóssil do modelo TEA

As fontes de energia hidráulica, nuclear e biomassa produzem substitutos perfeitos para eletricidade de origem fóssil, o que significa uma combinação por meio de elasticidade infinita. Na Figura 45, é possível observar que possuem estruturas mais simples, com enfoque nos recursos mais relevantes, de modo que seus recursos também têm dotações de fatores fixos específicas às regiões, que permitem representar o controle do ritmo de entrada e os limites regionais de capacidade de expansão dessas tecnologias. A substituição entre o fator fixo específico de cada tecnologia e demais insumos é guiada por elasticidades ($n\sigma$ e $h\sigma$) parametrizadas por dados do modelo COFFEE (ROCHEDO, 2016). Capital, trabalho e eletricidade são, portanto, combinados com uma elasticidade de substituição igual a 1 (função Cobb-Douglas). Cabe ressaltar que a produção de eletricidade a partir da biomassa apresenta uma estrutura de árvore tecnológica semelhante (ver Figura 46), sendo o diferencial dado pela utilização do fator produtivo terra que é combinado com os demais insumos, inclusive fator fixo específico, a partir da elasticidade $elast_{fin_j}$.

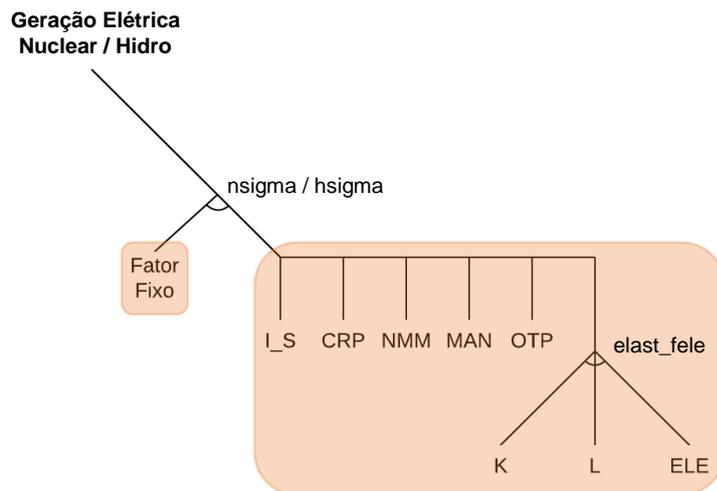


Figura 45: Árvore tecnológica para geração elétrica nuclear e hidro do modelo TEA

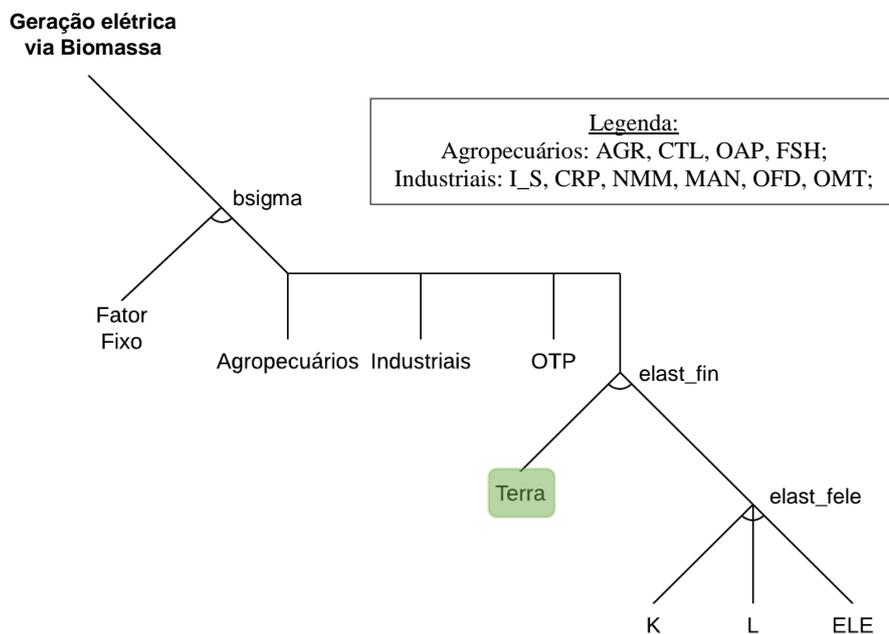


Figura 46: Árvore tecnológica para geração elétrica a partir de biomassa do modelo TEA

A penetração das tecnologias eólica, solar e biomassa segue a metodologia de MORRIS *et al.* (2014). Quando a demanda pela tecnologia aumenta com o tempo, o investimento para operar a tecnologia aumenta, assim como o fornecimento de fator específico, que pode eventualmente se tornar não limitante para a operação. Como na representação das tecnologias convencionais, a habilidade de substituição entre os insumos em resposta a mudanças nos preços relativos é controlada pelas elasticidades de substituição. Assim, para a representação dessas tecnologias, foram considerados dados exógenos, oriundos do modelo COFFEE (ROCHEDO, 2016), referentes à

participação dos fatores de produção (capital, trabalho, serviços, recursos, combustível e terra⁵⁶) e à participação da geração das tecnologias na matriz elétrica de cada região. A Figura 47 apresenta os dados regionais de participação das tecnologias na geração elétrica no ano base e a Tabela 15 a participação dos insumos na geração elétrica para cada tecnologia.

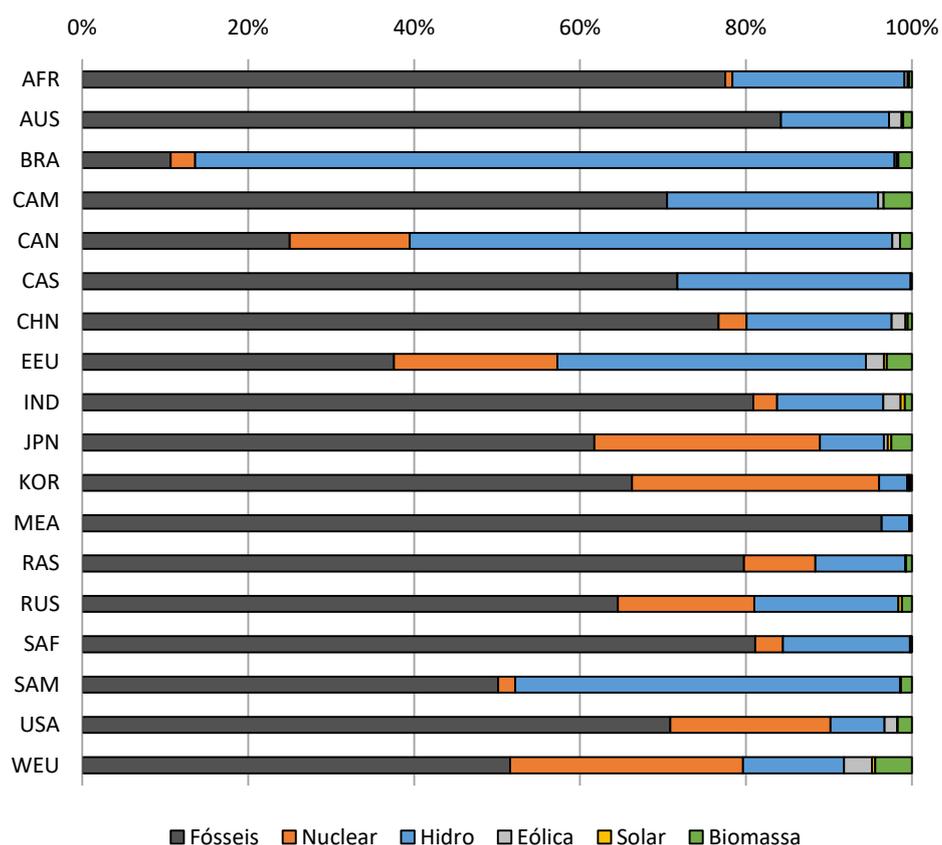


Figura 47: Participação das tecnologias de geração elétrica do modelo TEA (ano base: 2011)

Fonte: ROCHEDO (2016)

⁵⁶ Setores que utilizam recursos renováveis, como terra, competem pela disponibilidade de fluxos de serviços prestados por eles.

Tabela 15: Participação dos insumos na geração elétrica para cada tecnologia do modelo TEA

	Capital	Trabalho	Terra	Recursos	Serviços	Outros
Nuclear	46 - 55%	10 - 30%	-	10 - 15%	2 - 10%	2 - 10%
Hidro	40 - 60%	5 - 20%	-	30%	3 - 9%	2 - 7%
Eólica	66%	9%	5%	-	-	20%
Solar	89%	4%	-	-	-	7%
Biomassa	52%	13%	19%	-	-	16%

Fonte: MORRIS *et al.* (2014)

Os fatores fixos são específicos e baseiam-se em tendências de penetração de cada tecnologia. As taxas de penetração observadas para estas tecnologias em geral mostram uma penetração gradual (JACOBY *et al.*, 2004). O modelo TEA permite replicar tal comportamento atribuindo uma quantidade pequena de recurso fixo cuja dotação cresce de acordo com as tendências regionais de capacidade de expansão do modelo COFFEE (ROCHEDO, 2016). A capacidade de expansão é controlada por três fatores: quantidade de fator fixo, capacidade de substituir outros insumos por esse fator fixo e “curvas de aprendizado” de custos para cada tecnologia. Como o produto aumenta ao longo do tempo, a dotação do fator fixo cresce, reduzindo a limitação na capacidade de expansão. A intuição por trás dessa especificação é de que a nova indústria possui recursos escassos de engenharia, *know-how*, *expertise* e materiais específicos ou customizados para construir plantas geradoras de energia alternativa. Assim, as firmas com capacidade gerarão retorno desde que haja demanda para expansão de capacidade, ganhando experiência e expandindo a dotação do fator fixo dessas tecnologias para períodos futuros.

Por fim, a produção de biocombustível também é considerada uma tecnologia alternativa. A produção de biocombustível combina insumos intermediários com o fator fixo a partir da elasticidade $bsigma_j$, a qual apresenta valor diferenciado para o Brasil em relação ao resto do mundo. Esta elasticidade permite representar uma penetração gradual quando os preços de derivados de petróleo (OIL) se elevam continuamente. Os insumos intermediários são considerados complementares perfeitos na produção de biocombustíveis, combinados por uma função Leontief, conforme Figura 48. Os valores adicionados são combinados com eletricidade a partir de uma função CES guiada pela elasticidade $elast_{fele_j}$. Destaca-se que o fator produtivo terra é considerado um recurso específico renovável e substituível pela elasticidade $elast_{fin_j}$, a qual também apresenta valor diferenciado para o Brasil em relação ao resto do mundo.

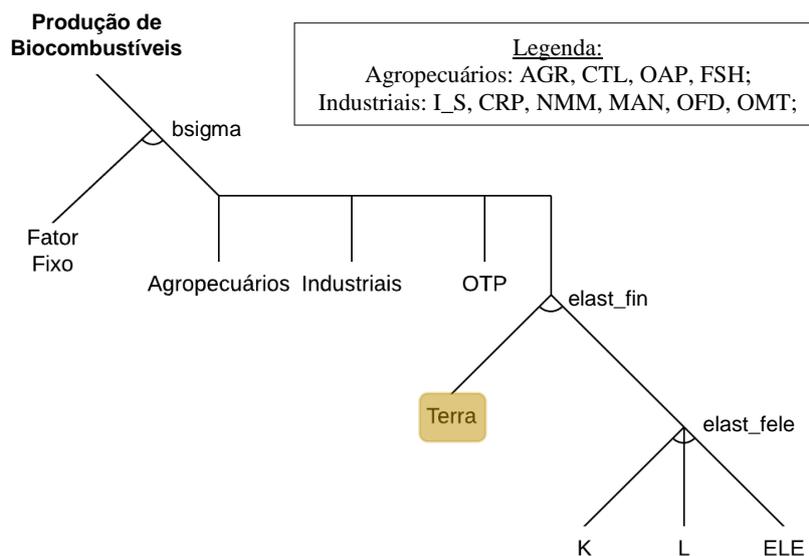


Figura 48: Árvore tecnológica para produção de biocombustível do modelo TEA

Todos esses fenômenos, aliados às possíveis políticas a serem simuladas, tais como impostos e subsídios ao uso de energia, controle nas emissões de GEE e imposição de mandatos de percentuais mínimos de misturas de combustíveis, determinam a evolução das economias e alteram a competitividade e participação das diferentes tecnologias ao longo do tempo e entre cenários alternativos. O desenvolvimento ou declínio de uma tecnologia em particular é determinado de forma endógena, de acordo com a competitividade relativa.

3.6. Agropecuária e Uso do Solo

Entender como o uso da terra muda com o tempo não é apenas uma preocupação para análises agrícolas, mas também se destaca nas discussões sobre mudanças climáticas. A maioria dos modelos CGE não considera possíveis mudanças na quantidade total de terras agrícolas. No modelo padrão, a terra é um fator primário de produção e a quantidade de terra é expressa como o valor agregado da terra a preços constantes do *benchmark*, isto é, trata-se de uma variável exógena. No modelo TEA, contudo, a quantidade do fator produtivo terra é transformada em variável endógena, a partir de uma curva de oferta de terra. As curvas de oferta de terra também servem para traduzir informações biofísicas sobre a produtividade da terra para cada região.

A oferta de terra agrícola depende, geralmente, da sua disponibilidade biofísica (área potencial de terra arável), fatores institucionais (política agrícola e urbana, política

ambiental) e do seu preço. De acordo com EICKHOUT *et al.* (2008), renda da terra e seu rendimento estão relacionados, de modo que rendimentos crescentes resultam em rendas de terra mais baixas e vice-versa. Do ponto de vista econômico, a oferta de terras agrícola é uma função do preço da terra. Nesse sentido, optou-se por um modelo recíproco⁵⁷ para representar a relação entre o preço médio da terra e a sua expansão, conforme a Figura 49 e Equação 20.

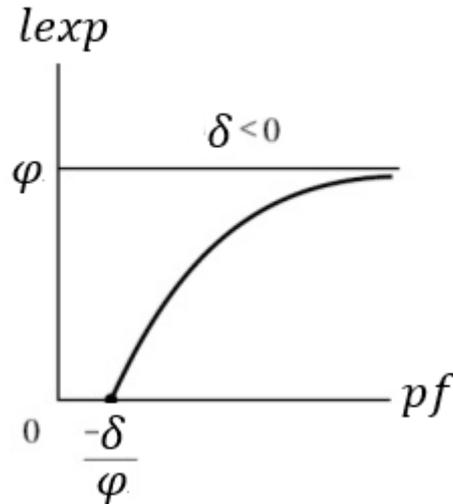


Figura 49: Modelo da curva de oferta de terra do modelo TEA

$$lexp_r = \varphi_r + \delta_r \cdot \frac{1}{pf_r} \quad (20)$$

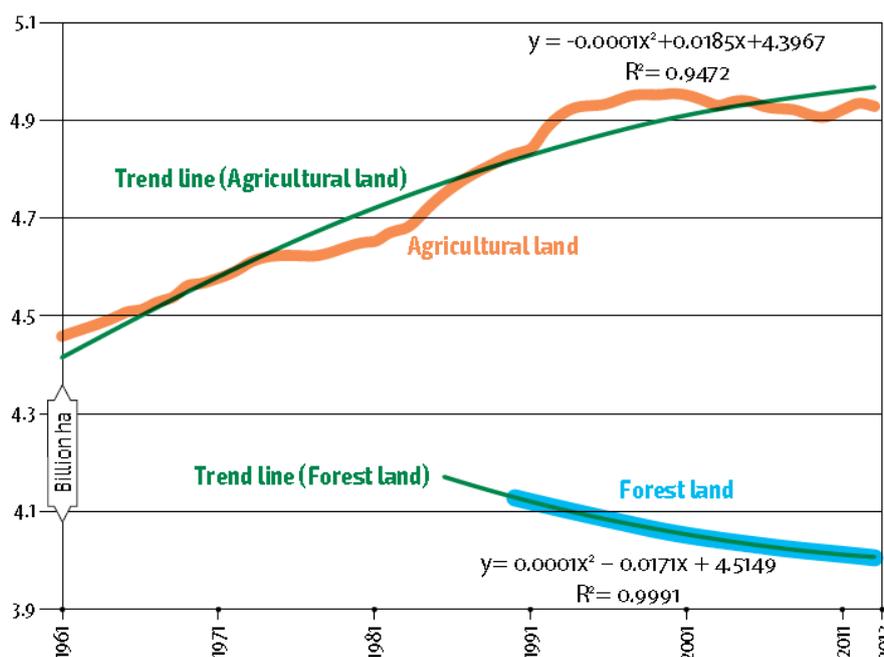
onde $lexp_r$ representa a expansão da terra e pf_r representa o preço da terra.

O modelo recíproco indica que quando o preço da terra pf_r aumenta indefinidamente, o termo $\delta_r \cdot \frac{1}{pf_r}$ tende a zero e a expansão da terra $lexp_r$, portanto, aproxima-se de um valor limite ou assintótico φ_r . Isto é, se houver uma grande lacuna entre a terra agrícola potencialmente disponível e a terra usada nos setores agropecuários, um aumento na demanda por terras agrícolas levará a conversão da terra potencialmente disponível em terras produtivas, bem como num aumento modesto no seu preço para compensar o custo para a agricultura de a tornar produtiva. Por outro lado, uma vez que quase todas as terras agrícolas estão em uso, um aumento na

⁵⁷ Há outros métodos referentes a especificação da oferta de terra em modelos de equilíbrio geral computável, como em VAN MEIJL *et al.* (2006), WOLTJER e KUIPER (2014), FARIA e HADDAD (2019).

demanda por terra levará a grandes aumentos no seu preço, de modo que a conversão de terras será limitada e, portanto, a elasticidade-preço de oferta de terra se tornará baixa. Considerando que o ponto inicial, para qualquer região r é $(X, Y) = (pf_r, lexp_r) = (1, 0)$, dado que, no *benchmark* do modelo de equilíbrio geral, os preços de todos os bens, serviços e fatores de produção são iguais a 1 e a expansão da terra é zero, é possível estimar o valor de δ_r para todas as regiões do modelo. O valor de φ_r é estimado para cada região a partir da diferença entre a quantidade de *benchmark* do modelo TEA e a máxima expansão possível até 2050, de acordo com dados da literatura.

A expansão das terras agropecuárias continua a ser o principal motor do desmatamento. Estima-se que cerca de 80% do desmatamento em todo o mundo se dá pela expansão da agropecuária, sendo a agropecuária comercial a principal responsável pelo desmatamento na América Latina, por exemplo, respondendo por cerca de dois terços da área total desmatada (FAO, 2017). Ademais, a alimentação animal também tem um significativo impacto ambiental, dado que boa parte das terras agrícolas são usadas para produzir alimento para alimentar animais para consumo humano (FOLEY *et al.*, 2011; STOLL-KLEEMANN e O'RIORDAN, 2015; TIRADO *et al.*, 2018). Conforme ALEXANDRATOS e BRUINSMA (2012), nos últimos 50 anos, a expansão global de terras agrícolas apresentou crescimento, se estabilizando em cerca de 4,9 bilhões de hectares (ha) nos últimos anos; por outro lado, as perdas florestais foram cerca de 100 milhões de ha nos últimos 30 anos (ver Figura 50).



Legenda: *Agricultural land*: terras agropecuárias; *Forest land*: terras ocupadas com florestas

Figura 50: Tendências de uso da terra global para agropecuária e floresta em bilhões de ha (1961-2013)

Fonte: FAO (2017)

Projeções de expansão da terra agrícola indicam um aumento mundial médio de cerca de 8% até 2050, sendo que países em desenvolvimento é que devem liderar a expansão com cerca de 11%, em média, de acordo com ALEXANDRATOS e BRUINSMA (2012). SMITH *et al.* (2010) mostra projeções de vários estudos indicando aumentos entre 90 a 470 milhões de ha entre 2005 e 2050, provenientes de múltiplas fontes, como aumento da população, mudanças na dieta, políticas de agricultura e conservação, melhoria tecnológica, e assim por diante. Desse modo é possível inferir que a expansão de terra nas diferentes regiões do mundo deve ficar entre 8% e 25% até 2050 (SMITH *et al.*, 2010; ALEXANDRATOS e BRUINSMA, 2012; LOBELL *et al.*, 2013; SCHMITZ *et al.*, 2014). A calibragem das curvas regionais do modelo TEA conta com projeções de uso da terra da FAO e dados regionais de área por hectare (ha) do modelo COFFEE (ROCHEDO, 2016). A Tabela 16 apresenta a máxima expansão de terra para cada região do modelo TEA.

Tabela 16: Taxas máximas de expansão de terra para as regiões do modelo TEA

Regiões	Taxa de expansão até 2050
AFR	20%
AUS	3%
BRA	25%
CAM	6%
CAN	3%
CAS	6%
CHN	3%
EEU	1%
IND	3%
JPN	1%
KOR	3%
MEA	3%
RAS	25%
RUS	10%
SAF	6%
SAM	25%
USA	1%
WEU	3%
Média global	8,08%

Dessa forma, criou-se uma restrição no modelo TEA, conforme Equação 21, em que a oferta de terra é guiada pela curva de oferta e controlada pela máxima expansão de terra por região.

$$lsup(r) = e = \max\left(1, \left(\frac{evom("lnd", r) + lexp(r)}{evom("lnd", r)}\right)\right) \quad (21)$$

onde $lsup(r)$ representa a oferta de terra e $evom("lnd", r)$ é a dotação inicial de terra (*benchmark*).

Ademais, é necessária uma representação dos mercados agropecuários e fundiário no modelo econômico. Conforme descrito na Seção 3.2., alguns componentes (capital e trabalho) do valor adicionado podem ser substituídos, porém terra e recursos naturais são considerados fatores fixos específicos de produção e, no modelo TEA, são ofertados por meio de uma função de elasticidade de transformação constante (CET). Tal função aloca terra e recursos naturais nos mercados setoriais via a elasticidade de transformação $etraef$. A oferta desses fatores específicos de produção pode ser especificada a partir do problema de otimização, apresentado em (22).

$$\max \sum_j dfm_{f,j,s} ps_{f,j,s} \quad s. a.$$

$$FT_{f,r}(dfm) = evom_{f,r} . \quad (22)$$

em que $FT_{f,r}$ representa a função CET.

A produção de produtos agropecuários (AGR, CTL, OAP e FSH) é representada por um bloco de produção do MPSGE cujo topo da árvore tecnológica combina, a partir de uma função Leontief, insumos intermediários não-energéticos e o conjunto formado por valor adicionado e insumos energéticos. Os fatores produtivos são combinados com insumos energéticos por uma função CES guiada pela elasticidade $elast_{fe_j}$. A estrutura aninhada desse setor indica a possibilidade de substituição de terra, insumo específico para a agricultura (AGR) e pecuária (CTL e OAP), por capital, trabalho e energia, conforme Figura 51. Eletricidade é substituída por demais insumos energéticos a partir da elasticidade $elast_{ele_j}$.

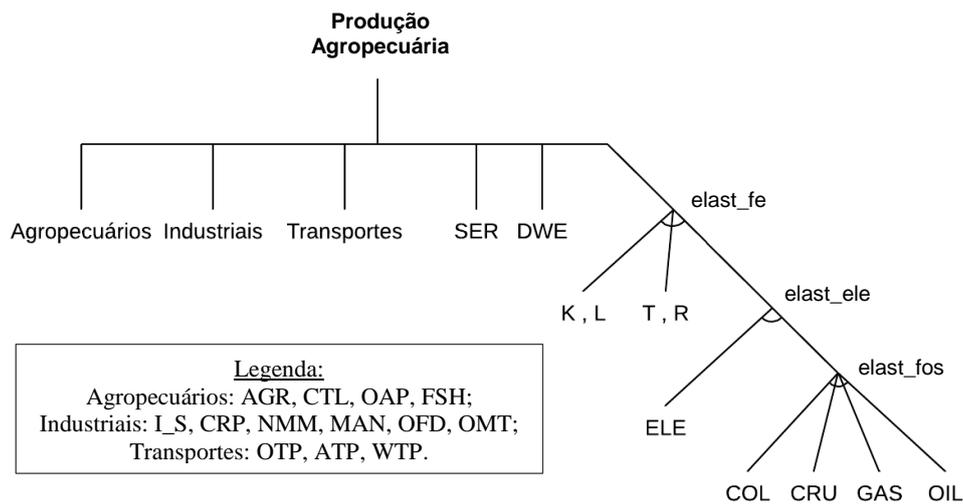


Figura 51: Árvore tecnológica para produção de setores agropecuários do modelo TEA

O modelo TEA tem como principal característica a capacidade de rastrear relacionamentos e interdependências entre regiões, setores e agentes econômicos, de modo que grande parte da produção agropecuária deve ser utilizada como insumo pela indústria de alimentos, representada pelos setores da indústria de alimentos sem carne (OFD) e com carne (OMT). No capítulo 4, serão analisadas essas interações sob a ótica do estudo de caso sobre mudança de dieta global.

3.7. Emissões de Gases de Efeito Estufa

Em grande medida, modelos de equilíbrio geral com viés ambiental são projetados para elucidar aspectos das mudanças climáticas. A modelagem econômica para análise das mudanças climáticas envolve um tratamento elaborado no que diz respeito à representação de processos e contabilização das externalidades negativas associadas a atividades produtivas específicas e ao uso de energia em escala global. O dano ambiental não depende do fluxo de emissões, mas sim do estoque acumulado, o qual se acumula gradualmente na atmosfera, ensejando um considerável atraso entre a atual emissão de GEE e o impacto resultante sobre o meio ambiente (BERGMAN, 1990). Este é um dos motivos pelo qual o modelo TEA é um modelo dinâmico com horizonte de tempo de várias décadas (podendo ser rodado para um século, inclusive, em estudos futuros).

Reduções significativas de emissões de GEE podem ser provocadas pela redução do consumo de combustíveis fósseis ou por mudanças na composição do consumo de combustíveis fósseis na economia. Em modelos CGE, presume-se que a atividade de abatimento dependa de incentivos econômicos, de modo que a redução ocorra sempre que o custo marginal de abatimento (redução de emissões) for menor ou igual ao custo de emissões marginais pelas firmas ou famílias. O custo marginal de emissão, por sua vez, pode ser determinado por tributos sobre as emissões ou pelo preço das licenças de emissão⁵⁸, sendo os dois instrumentos análogos dentro do arcabouço do modelo. Na criação de cenários alternativos do modelo TEA, quando da imposição de uma política qualquer de precificação do carbono (taxação das emissões ou mercado de permissões de emissões), a emissão de GEE no meio ambiente é considerada como um insumo no processo de produção, de forma que o agente econômico necessita comprar permissões, ou pagar a taxa do carbono, para cada unidade de emissão gerada no uso de energia ou no seu processo produtivo.

No modelo TEA, as emissões de GEE tratadas são dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O). Além da importância de contabilizar emissões de CO₂ oriundas da queima de fontes energéticas, tem sido cada vez mais relevante a análise das externalidades negativas do setor agropecuário e florestas (*Agriculture*,

⁵⁸ Do ponto de vista institucional, supõe-se que há firmas especializadas que fornecem serviços de abatimento àquelas obrigadas a cumprir com as restrições de emissões desenvolvidas em cenários climáticos.

Forestry and Other Land Use – AFOLU)⁵⁹. As emissões de CO₂ desse setor são geradas pela prática de queimadas na derrubada de florestas para expansão de terra, muitas vezes, para pastagem, plantações e especulação de terra (ZALLES *et al.*, 2019). Além disso, a agropecuária contribui com a maior parcela das emissões globais de CH₄, produzida pela fermentação entérica durante os processos digestivos dos animais ruminantes e pelo cultivo de arroz, e de N₂O, que se originam principalmente da aplicação de fertilizantes nitrogenados na agricultura, mas também pelo manejo de dejetos animais.

As fontes de emissão de GEE do modelo TEA são classificadas em dois grupos: i) um está relacionado à queima de combustíveis fósseis, de modo que a emissão é proporcional ao consumo de energia, como no setor de transportes e indústrias; e ii) o outro está relacionado ao nível de atividade, como emissões do setor energético, da indústria de processo e do setor agropecuário. Foram elaborados parâmetros para representar fatores de emissão de CO₂ médios para cada uma das fontes energéticas de acordo com IPCC (2006; 2014). Para emissões de CO₂ oriundas de mudança do uso do solo, fatores de emissão regionais foram estimados baseados em dados do modelo COFFEE (ROCHEDO, 2016). A contabilização de emissões de processo na indústria e das emissões de CH₄ e de N₂O de setores energéticos⁶⁰ e agropecuários também são calibrados a partir de dados do modelo COFFEE (ROCHEDO, 2016). Ademais, emissões de gases não-CO₂ são transformadas em CO₂ equivalente a partir do método GWP₁₀₀ (*100-year time horizon Global Warming Potential*)⁶¹ sem *feedback* de mudança do clima. Na Tabela 17 é possível observar as equações que contabilizam as emissões de GEE.

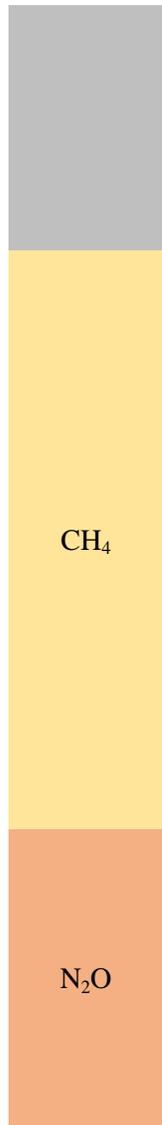
⁵⁹ De acordo com FAO (2017), as emissões do setor AFOLU representam cerca de 21% do total das emissões globais de GEE.

⁶⁰ Emissões de CH₄ e N₂O do setor energético têm relação com a produção e refino de petróleo, transporte de gás natural, bem como produção de carvão.

⁶¹ Seguindo a prática da comunidade científica, os GWPs são usados como índice para converter as emissões de GEE em unidades comuns de emissões equivalentes de CO₂. De acordo com IPCC (2014), os GWPs de 100 anos sem *feedback* de mudanças do clima para o CH₄ é 28 e o N₂O é 265 vezes mais potente que o CO₂.

Tabela 17: Contabilização das emissões de GEE do modelo TEA

Gases	Setores	Equação	Descrição
CO ₂	Setores não-energéticos	$co2_f(r, ene, j, t) = enecons(r, ene, j, t) \cdot co2coef(ene)$	O parâmetro <i>co2coef</i> converte o valor energético da variável <i>enecons</i> para cada região (<i>r</i>), fonte energética (<i>ene</i>) e setor (<i>j</i>) em toneladas de emissões de CO ₂ equivalente. A variável <i>co2_f</i> calcula as emissões de setores não-energéticos a partir da evolução do consumo de energia final (<i>enecons</i>).
	Setores energéticos	$co2_en(r, ene, ene_t) = enecons_en(r, ene, ene_t) \cdot co2coef(ene)$	O parâmetro <i>co2coef</i> converte o valor energético da variável <i>enecons_en</i> para cada região (<i>r</i>), fonte energética (<i>ene</i>) e setor energético (<i>ene_</i>) em toneladas de emissões de CO ₂ equivalente. A variável <i>co2_en</i> calcula as emissões de setores energéticos a partir da evolução dos seus consumos de energia (<i>enecons_en</i>).
	Indústria de processo	$co2_p(r, "i_s", t) = emiss_co2_p(r, "i_s") \cdot co2_p_trend(r, t)$ $co2_p(r, "crp", t) = emiss_co2_p(r, "crp") \cdot co2_p_trend(r, t)$ $co2_p(r, "nmm", t) = emiss_co2_p(r, "nmm") \cdot co2_p_trend(r, t)$	O parâmetro <i>emiss_co2_p</i> representa as emissões de processo para as indústrias de ferro e aço, química e cimento (<i>i_s</i> , <i>crp</i> e <i>nmm</i>) do ano base. O parâmetro <i>co2_p_trend</i> corresponde as tendências de emissões de processo pela indústria do modelo COFFEE. A variável <i>co2_p</i> calcula as emissões de processo para cada setor industrial.
	Mudança no uso do solo	$co2_l(r, "luc", t) = (lnd_e(r, t) - lnd_e(r, t - 1)) \cdot co2_lcoef(r)$	O parâmetro <i>co2_lcoef</i> converte o valor monetário da terra convertida pelo desmatamento para cada região (<i>r</i>) em toneladas de emissões de CO ₂ equivalente. A variável <i>lnd_e</i> representa a expansão da terra. A variável <i>co2_l</i> calcula as emissões de mudança no uso do solo a partir da evolução da expansão de terra (<i>lnd_e</i>).



Total

$$co2_e(r, t) = \sum_{ene, j} co2_f(r, ene, j, t) + \sum_{ene, ene_} co2_en(r, ene, ene_ , t) + \sum_{ene, j} co2_f(r, ene, j, t) + \sum_j co2_p(r, j, t) + co2_l(r, "luc", t)$$

A variável $co2_e$ calcula a evolução das emissões totais de CO₂ para cada região.

Setor energético

$$ch4_en(r, t) = ch4_en_ref(r, t)$$

A variável $ch4_en$ representa a evolução das emissões de metano do setor energético dado pela modelo COFFEE ($ch4_en_ref$).

Setor agropecuário

$$ch4_l(r, "agr", t) = emiss_ch4_l(r, "agr") \cdot ch4_l_trend(r, t)$$

$$ch4_l(r, "ctl", t) = emiss_ch4_l(r, "ctl") \cdot ch4_l_trend(r, t)$$

$$ch4_l(r, "oap", t) = emiss_ch4_l(r, "oap") \cdot ch4_l_trend(r, t)$$

O parâmetro $emiss_ch4_l$ representa as emissões de metano para os setores agropecuários (agr, ctl e oap) do ano base. O parâmetro $ch4_l_trend$ corresponde as tendências de emissões de metano do setor agropecuário do modelo COFFEE. A variável $ch4_l$ calcula as emissões de metano para cada setor agropecuário.

CH₄

Mudança no uso do solo

$$ch4_l(r, "luc", t) = ch4_l_ref(r, "luc", t)$$

A variável $ch4_l$ representa a evolução das emissões de metano do setor energético dado pela modelo COFFEE ($ch4_l_ref$).

Total

$$ch4_e(r, t) = ch4_en(r, t) + \sum_j ch4_l(r, j, t) + ch4_l(r, "luc", t)$$

A variável $ch4_e$ calcula a evolução das emissões totais de CH₄ para cada região (em CO₂ equivalente).

Setor energético

$$n2o_en(r, t) = n2o_en_ref(r, t)$$

A variável $n2o_en$ representa a evolução das emissões de metano do setor energético dado pela modelo COFFEE ($n2o_en_ref$).

Setor agropecuário

$$n2o_l(r, "agr", t) = emiss_n2o_l(r, "agr") \cdot n2o_l_trend(r, t)$$

$$n2o_l(r, "ctl", t) = emiss_n2o_l(r, "ctl") \cdot n2o_l_trend(r, t)$$

$$n2o_l(r, "oap", t) = emiss_n2o_l(r, "oap") \cdot n2o_l_trend(r, t)$$

O parâmetro $emiss_n2o_l$ representa as emissões de metano para os setores agropecuários (agr, ctl e oap) do ano base. O parâmetro $n2o_l_trend$ corresponde as tendências de emissões de metano do setor agropecuário do modelo COFFEE. A variável $n2o_l$ calcula as

N₂O

	Mudança no uso do solo	$n2o_l(r, "luc", t) = n2o_l_ref(r, "luc", t)$	emissões de metano para cada setor agropecuário. A variável $n2o_l$ representa a evolução das emissões de metano do setor energético dado pela modelo COFFEE ($n2o_l_ref$).
	Total	$n2o_e(r, t) = n2o_en(r, t) + \sum_j n2o_{l(r,j,t)} + n2o_l(r, "luc", t)$	A variável $n2o_e$ calcula a evolução das emissões totais de N ₄₂ O para cada região (em CO ₂ equivalente).
GEE	Total	$ghg_e(r, t) = co2_e(r, t) + ch4_e(r, t) + n2o_e(r, t)$	A variável ghg_e calcula a evolução das emissões totais de GEE para cada região (em CO ₂ equivalente).

Cabe ressaltar que as emissões dos GEE, que são estimadas a partir de tendências do modelo COFFEE, são parametrizadas pela evolução da atividade produtiva de cada setor para cada cenário alternativo proposto. Ademais, o modelo TEA foi construído de forma que permita a incorporação de diversos tipos de políticas de controle de emissões de GEE, sendo estas setoriais, regionais ou globais. Além de permitir a inclusão de impostos e subsídios à produção e ao consumo ou fixar alíquotas de impostos para representar o conteúdo de carbono para diferentes tipos de combustíveis e atividades emissoras, o modelo TEA permite também aplicar restrições quantitativas nas emissões.

3.8. Aplicação e Meta-análise para o Cenário de Referência

Não há uma única maneira de aplicar um modelo a um problema de pesquisa. De acordo com RUTHERFORD (2000), modelos CGE são abrangentes no que diz respeito à capacidade de análises de políticas econômicas, por fornecerem uma estrutura consistente para harmonizar teoria e um grande número de dados e características estruturais requeridas para uma boa análise quantitativa. Além disso, são flexíveis em relação a liberdade de representar instrumentos de políticas dentro do contexto de pesquisa, seja a partir de adaptações no núcleo do modelo ou a partir da criação de novos instrumentos que melhor capturem questões específicas. Como consequência, forçam o pesquisador a raciocinar através da intuição econômica por trás do modelo, desenvolvendo a compreensão de aspectos relevantes, bem como explicitando pressuposições. Nesse sentido, a análise de comparação de resultados de linha de base (cenário de referência) com outros modelos, sob o mesmo foco de pesquisa, trata-se de uma etapa importante na validação das estratégias e práticas adotadas no modelo TEA.

As figuras a seguir foram elaboradas com base nos resultados dos cenários de referência do modelo TEA e de IAMs selecionados, participantes do projeto CD-Links (*Linking Climate and Development Policies – Leveraging International Networks and Knowledge Sharing*). Uma breve descrição dos IAMs selecionados pode ser observada na Seção 2.2. Na Figura 52, podemos observar que o modelo TEA apresenta, no ano base, um consumo final de energia global relativamente abaixo dos IAMs selecionados, cerca de 300 EJ comparado com os 346 EJ da média dos modelos, porém é possível observar também que há diferenças de ano base quando comparamos os IAMs. Essa diferença pode ser explicada pela contabilização do consumo de petróleo cru e/ou derivados de petróleo, ao que se refere ao transporte internacional.

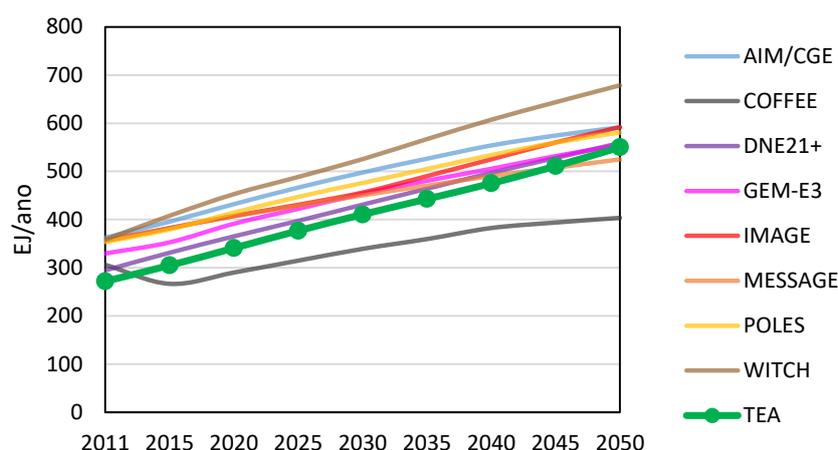


Figura 52: Consumo final de energia global para modelos selecionados

No conjunto formado pela Figura 53 é possível identificar os resultados de consumo final de energia por fonte energética. Observa-se que os resultados do modelo TEA estão próximos da média dos resultados dos IAMs selecionados para cada uma das fontes energéticas de consumo final, exceto para derivados de petróleo (TEA não contabiliza o consumo final de energia do transporte marítimo e aéreo internacional). Para o consumo final de carvão, os resultados do TEA partem de 41 EJ e alcançam 67 EJ em 2050 e estão bem alinhados com a média dos IAMs selecionados, exceto COFFEE, que partem de 37 EJ e alcançam 52 EJ ao final do período. O consumo de gás natural parte, no TEA, de 70 EJ, o limite superior dentre os IAMs selecionados, e alcança 115 EJ, próximo da média dos modelos (105 EJ). Quanto ao consumo de biocombustíveis, o modelo TEA apresenta um crescimento mais elevado par ao final do período de análise, alcançando 19 EJ e ficando um pouco acima da média dos modelos (12 EJ). O consumo de eletricidade do TEA e dos IAMs selecionados estão bastante semelhantes até a metade do período de análise, quando o TEA apresenta crescimento inferior. Por fim, em relação ao consumo final de biomassa é possível observar que o TEA apresenta valores de ano base inferiores aos dos IAMs e uma trajetória de crescimento superior a dos IAMs⁶².

⁶² O aprimoramento da compatibilização da base de dados referente ao consumo final de biomassa será realizado em trabalhos futuros.

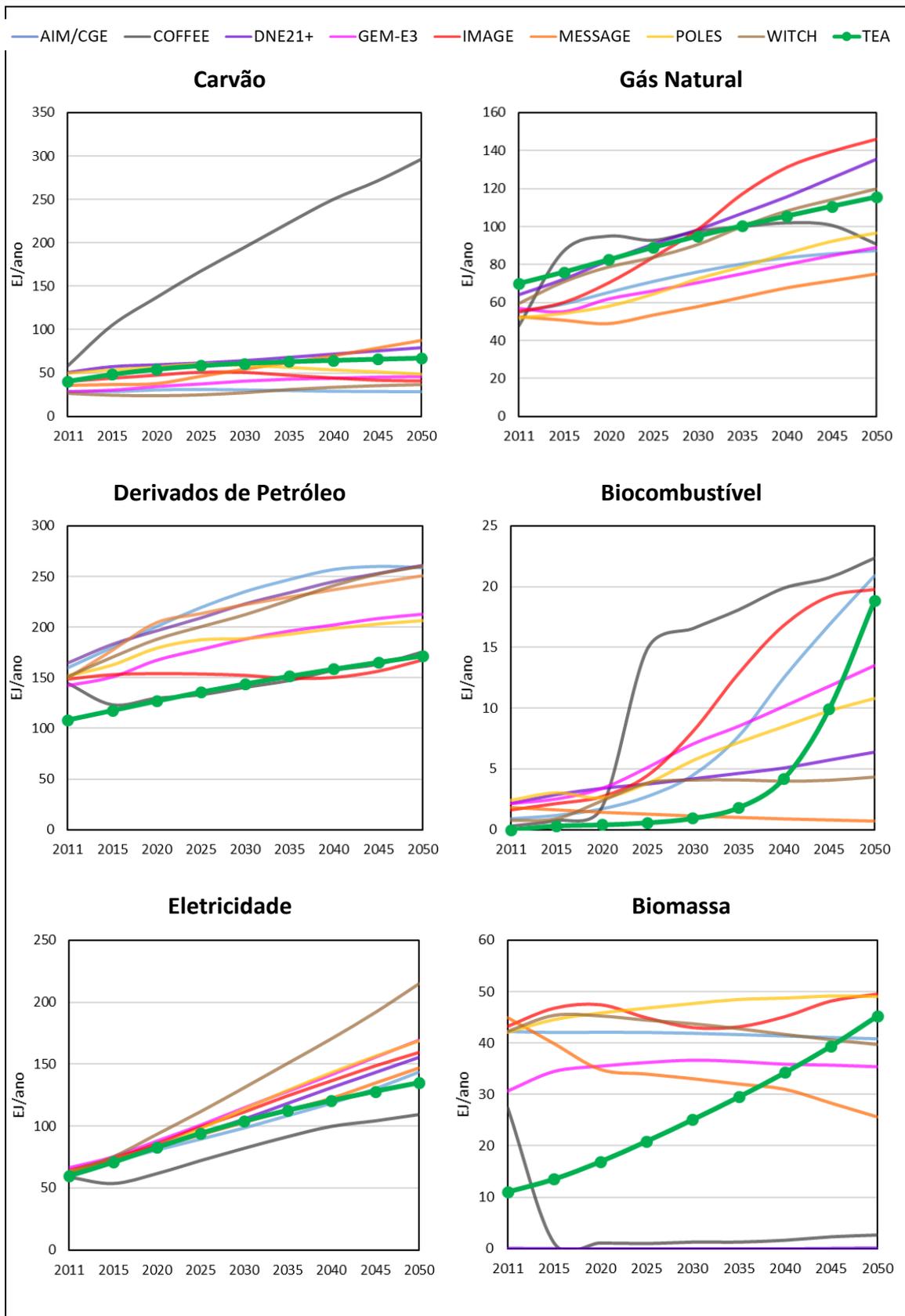


Figura 53: Consumo final de energia global por fonte energética para modelos selecionados

No que tange à geração elétrica global, a Figura 54 mostra que os resultados do TEA estão próximos à média dos resultados dos IAMs selecionados. O modelo TEA parte de 68 EJ e alcança 175 EJ em 2050, já a média dos modelos parte de 75 EJ e alcança 179 EJ.

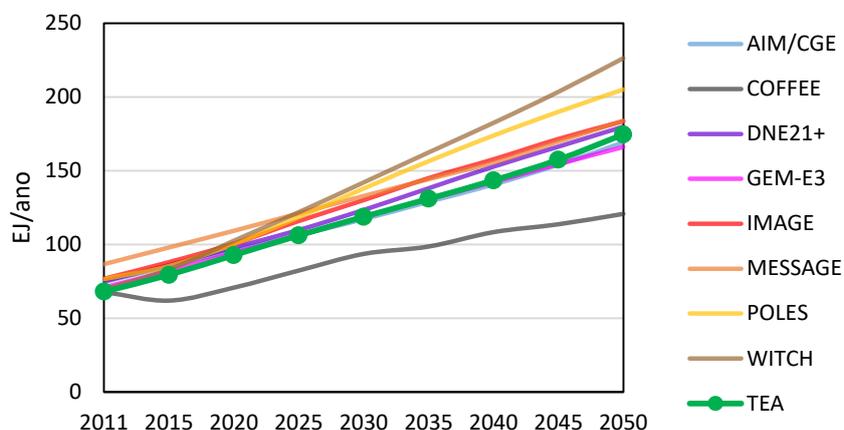
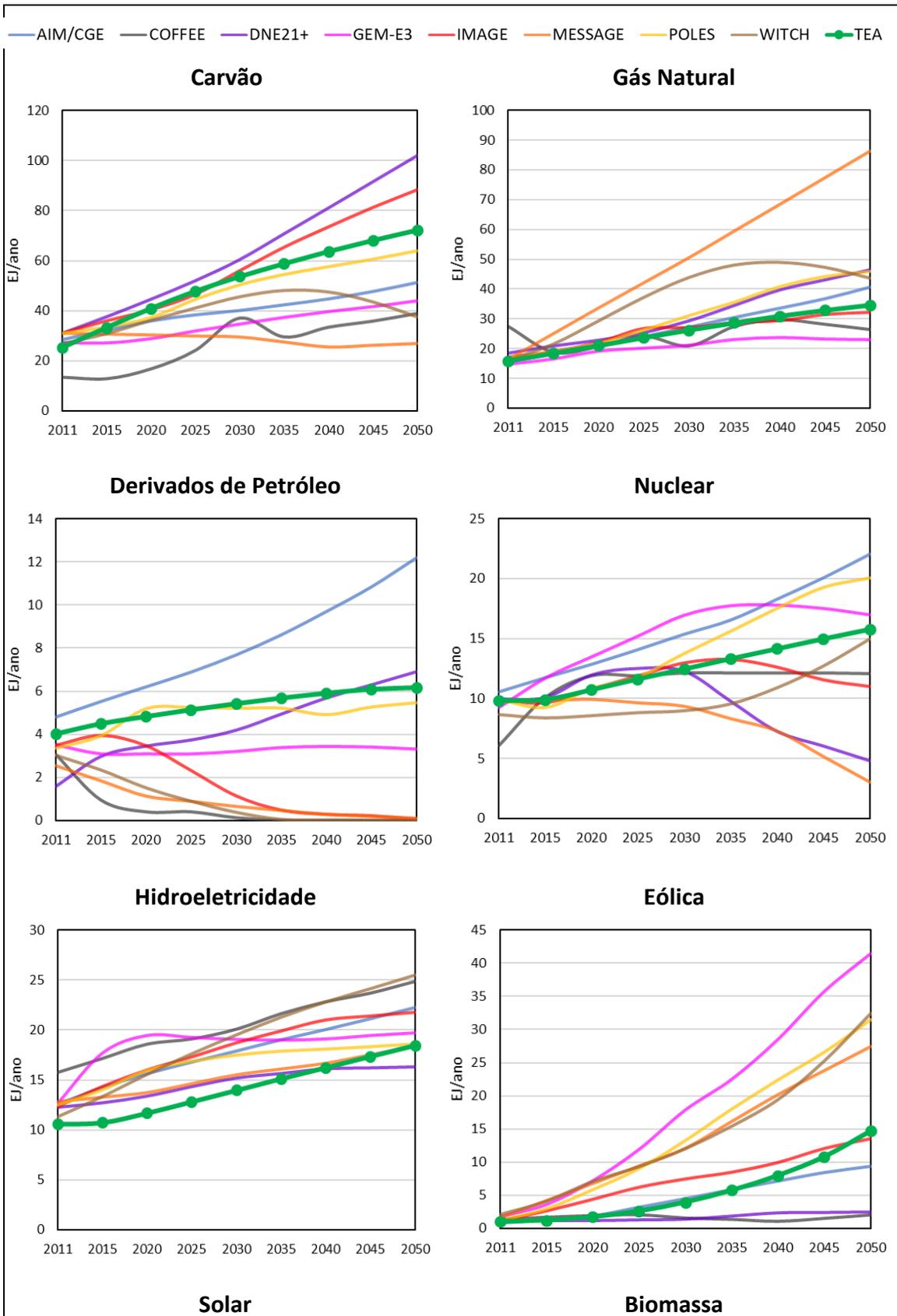


Figura 54: Geração elétrica global para modelos selecionados

Para uma análise da geração elétrica a partir de cada tecnologia, visualizar o conjunto de Figura 55. É possível observar que os resultados do TEA, para cada uma das tecnologias de geração elétrica, estão bem comparáveis com os resultados médios dos IAMs selecionados. Para a geração elétrica via carvão, o modelo TEA parte de valores semelhantes à média dos IAMs (25 EJ) e alcança 72 EJ, ficando um pouco abaixo da média (57 EJ). A geração elétrica via gás natural do TEA apresenta uma trajetória muito semelhante à média dos resultados dos modelos, partindo de 16 EJ no ano base e alcançando 35 EJ em 2050. Derivados de petróleo tendem a não serem mais utilizados para geração elétrica no futuro e o modelo TEA apresenta um crescimento modesto durante o período de análise. Quanto a geração elétrica via nuclear, o modelo TEA apresenta leve crescimento, se assemelhando a média dos modelos, partindo de 11 EJ e alcançando 18 EJ. Diferenças mais significativas podem ser observadas na geração elétrica via hidroeletricidade, em que se parte de valores de ano base inferiores aos IAMs, mas sua trajetória segue em linha com a maioria dos modelos. A geração elétrica das tecnologias alternativas (eólica, solar e biomassa) do modelo TEA apresenta trajetórias um pouco abaixo da média dos IAMs selecionados, alcançando um total de 27 EJ em 2050 (somatório de eólica, solar e biomassa) em comparação com 39 EJ dos modelos.



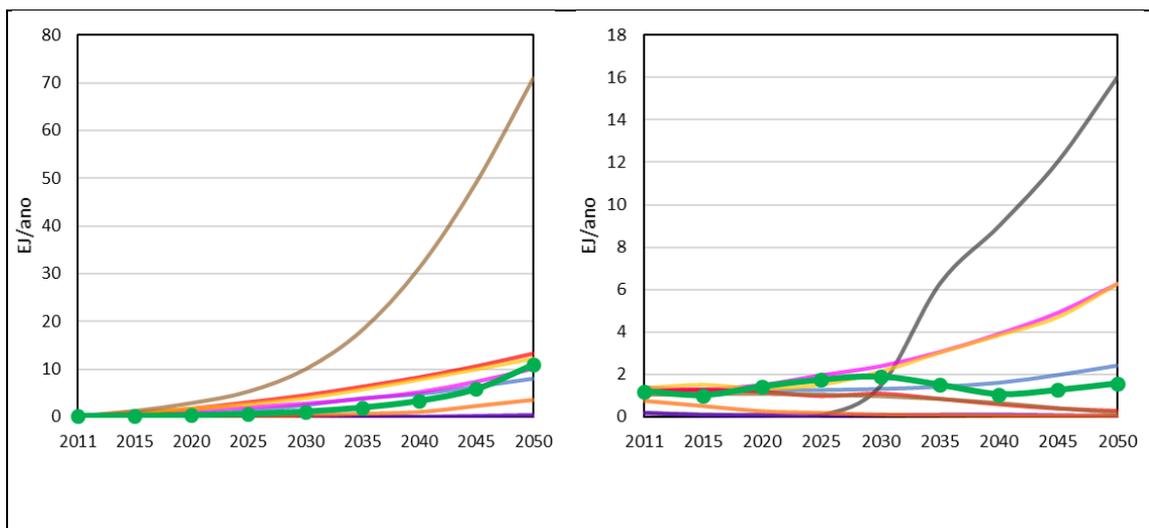


Figura 55: Geração elétrica global por fonte energética para modelos selecionados

Por fim, é importante realizar uma análise comparativa de resultados no que se refere a emissões de GEE. O conjunto de Figura 56 apresenta as emissões desagregadas por gás. Quanto às emissões de CO₂, é possível observar que a trajetória dos resultados do modelo TEA se assemelham a média dos resultados dos modelos, partindo de 35 GtCO₂e e alcançando 53 GtCO₂e. Quanto às emissões de CH₄ e N₂O, o modelo TEA apresenta resultados muito semelhantes ao do modelo COFFEE, tendo em vista que se utiliza de dados desse modelo para contabilizar emissões. No que se refere às emissões global de GEE, o modelo TEA apresenta um crescimento não tão elevado em comparação aos IAMs selecionados, o que se deve em parte às tendências decrescentes das emissões de CH₄ e N₂O, mas também das emissões de CO₂ da indústria de processo ambos da base de dados do modelo COFFEE.

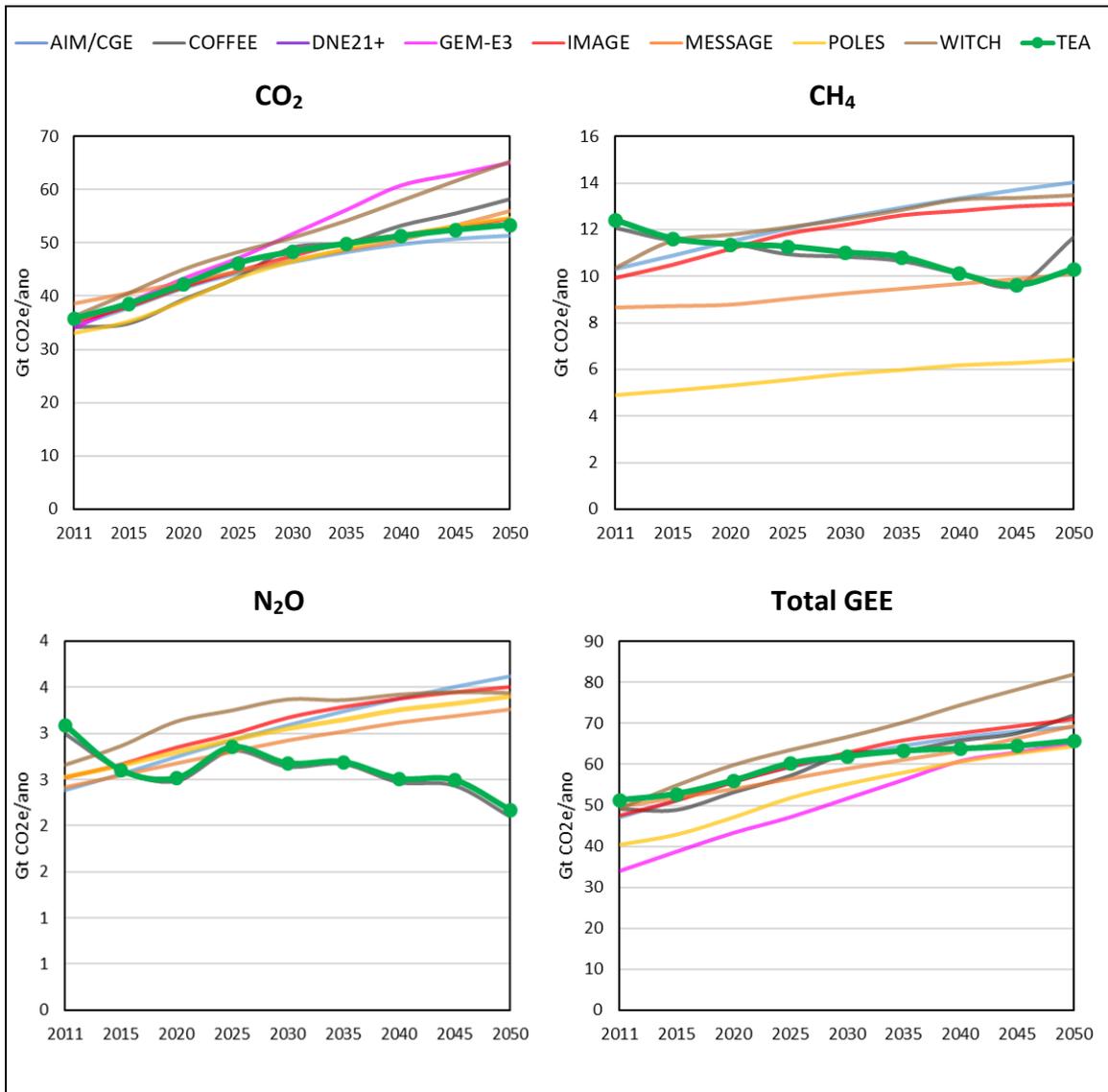


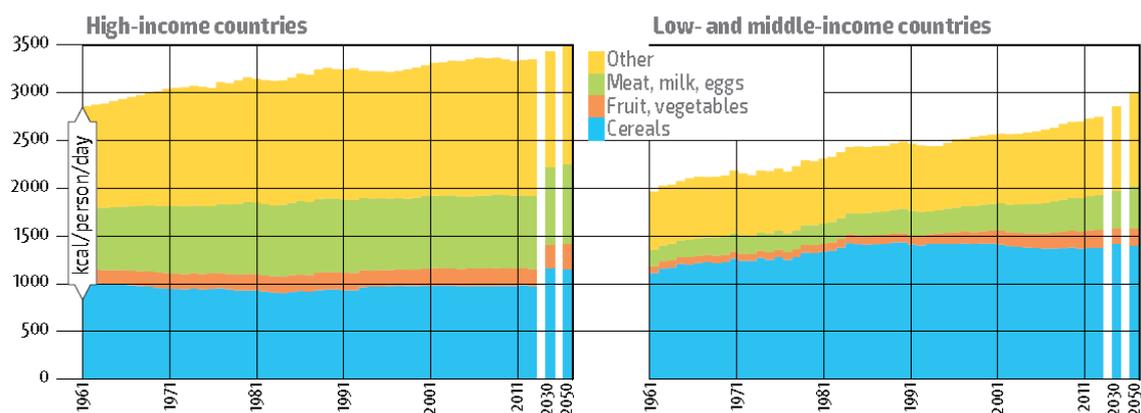
Figura 56: Emissões de GEE globais para modelos selecionados

4. Estudo de Caso: o Papel da Mudança de Dieta Global

Ao longo do último século, grandes progressos foram alcançados em todo o mundo para melhorar o bem-estar social, graças a saltos tecnológicos, à rápida urbanização e às inovações nos sistemas de produção. De acordo com FAO (2017), a agropecuária conseguiu responder, até agora, ao aumento da demanda de alimentos dado o crescimento populacional, alcançando um suprimento de alimentos mais de três vezes superior ao da década de 1960. Muito disso é explicado pela Revolução Verde que aumentou a produtividade e expandiu o uso da terra, água e outros recursos naturais para fins agrícolas (EVENSON e GOLLIN, 2003). Com a industrialização, a globalização e o aumento da distância física entre a fazenda e o prato de comida através da crescente urbanização, as cadeias de suprimento ganham um papel importante no atendimento da demanda de alimentos, o que contribui para o aumento do consumo de alimentos processados, embalados e preparados, inclusive nas comunidades rurais (FAO, 2017).

De acordo com SANS e COMBRIS (2015), no espaço de algumas décadas, isto é, em um ritmo muito mais rápido do que em países desenvolvidos no século XX, a estrutura alimentar de muitos países emergentes, principalmente da Ásia e da América Latina, mudou radicalmente. À medida que esses países se modernizam, a renda aumenta e as populações gozam um melhor acesso físico e econômico de alimentos ricos em proteínas e energia, ensejando uma mudança na dieta global até então baseada em cereais para uma com maior consumo de proteína animal e alimentos processados (SMIL, 2014; WELLESLEY *et al.*, 2015; WILLETT *et al.*, 2019; SUWINBURN *et al.*, 2019).

Nos últimos 50 anos, a tendência de longo prazo nos padrões alimentares mostra que, tanto em termos de calorias quanto de proteínas *per capita*, a disponibilidade e a diversidade de alimentos consumidos aumentaram. Na Figura 57, destaca-se a redução da parcela de calorias diárias consumidas de cereais tanto em países de alta renda (35% para 29%) quanto de média e baixa renda (56% para 50%), mas também o forte aumento projetado na demanda por carne e produtos lácteos em países de baixa e média renda (ALEXANDRATOS e BRUINSMA, 2012; FAO, 2017).

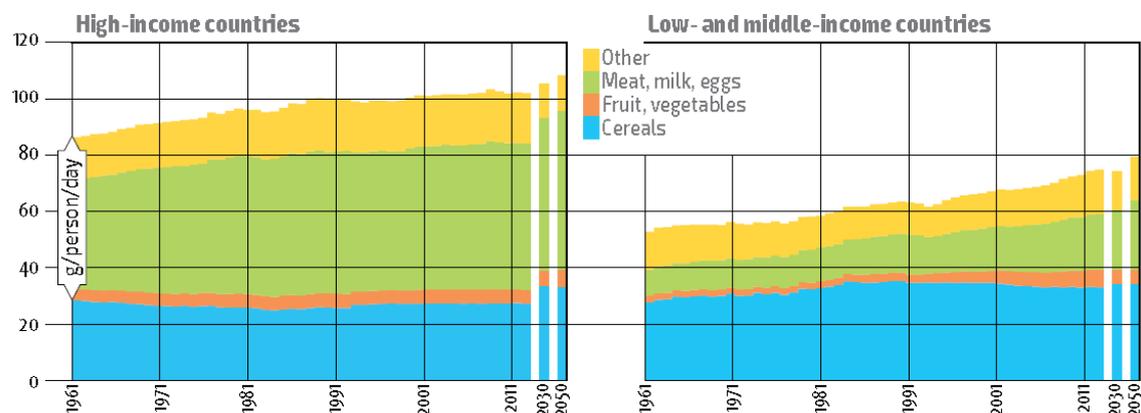


Legenda: *High-income countries*: países de alta renda; *Low- and middle-income countries*: países de baixa-média renda; *Other*: Outros; *Meat, milk, eggs*: Carne, leite, ovos; *Fruit, vegetables*: Frutas, vegetais; *Cereals*: cereais; *kcal/person/day*: kcal/per capita/dia.

Figura 57: Consumo de calorias *per capita* por fonte (1961–2050)

Fonte: FAO (2017)

Na Figura 58, é possível observar que, de 1961 a 2011, a ingestão diária de proteína, particularmente de carne, ovos e laticínios, aumentou tanto em países de alta renda (de 39g para 52g per capita: 33% de aumento) quanto de baixa renda (de 9g para 20g per capita: 116% de aumento).



Legenda: *High-income countries*: países de alta renda; *Low- and middle-income countries*: países de baixa-média renda; *Other*: Outros; *Meat, milk, eggs*: Carne, leite, ovos; *Fruit, vegetables*: Frutas, vegetais; *Cereals*: cereais; *g/person/day*: g/per capita/dia.

Figura 58: Consumo de proteína *per capita* por fonte (1961-2011)

Fonte: FAO (2017)

A evolução do sistema de produção de alimentos, portanto, está associada às mudanças nas preferências alimentares, dando origem, em geral, a um padrão de consumo excessivo, em especial, no que se refere ao consumo de alimentos de origem animal (EDJABOU e SMED, 2013; SMIL, 2014; DE BOER *et al.*, 2014;

HALLSTRÖM *et al.*, 2014; FAO, 2017). Sendo uma componente chave da atual transição dietética mundial, a carne vermelha tem um status especial⁶³ em muitas sociedades, é um dos produtos alimentícios mais populares e, geralmente, é percebida como um alimento saudável (VERBEKE *et al.*, 2010; VANHONACKER *et al.*, 2013; APOSTOLIDIS e MCLEAY, 2016). De fato, trata-se de uma fonte importante de proteínas e certos nutrientes essenciais, incluindo ferro, vitaminas do complexo B, zinco e vitamina A, muitos dos quais são difíceis de obter em quantidades adequadas a partir de alimentos de origem vegetal⁶⁴ (WHO, 2016; FAO, 1994). Ao mesmo tempo, seu consumo em excesso, tanto carne vermelha quanto processada, acaba por prover mais nutrientes do que precisamos, tais como a gordura saturada, grande causadora de doenças cardíacas (WESTHOEK *et al.*, 2014; IMAMURA *et al.*, 2015; SPRINGMANN *et al.*, 2016). Assim, a carne fornece um pacote concentrado de nutrientes "positivos" e "negativos", de modo que, ao abordar padrões alimentares, os riscos e os benefícios à saúde oriundos de alimentos de origem animal precisam ser equilibrados (GARNETT *et al.*, 2014).

As perspectivas para o futuro são incertas, pois as atuais dietas, práticas agropecuárias e tecnologias de produção e suprimento vem sendo criticadas⁶⁵ por razões éticas, ambientais e sociais (YADAVALLI e JONES, 2014; HALLSTRÖM *et al.*, 2014; APOSTOLIDIS e MCLEAY, 2016; FAO, 2017). O progresso do setor agropecuário mundial parece não ter sido suficiente para erradicar a fome, dado que o sistema de produção e distribuição de alimentos não fornece uma nutrição acessível e adequada a toda a população mundial (GARNETT *et al.*, 2014; VALIN *et al.*, 2014; WELLESLEY *et al.*, 2015; FAO, 2017). Cerca de metade da população mundial hoje apresenta problemas nutricionais, o que perpassa fome e deficiências, principalmente, de micronutrientes⁶⁶ chegando até a prevalência do sobrepeso e da obesidade (GARNETT

⁶³ De acordo com SMIL (2017), em 2015, o rebanho de gado global contava com cerca de 1,5 bilhão de cabeças, o que implica num total de cerca de 600 milhões de toneladas. No mesmo ano, a população mundial tinha cerca de 7,4 bilhões de pessoas, o que implicava cerca de 370 milhões de toneladas. Isso significa que a biomassa mundial de gado é hoje em dia pelo menos 60% maior do que a antropomassa. A população e o rebanho de gado mundiais respondem juntos por cerca de 1 bilhão de toneladas, ocupando grande parte da terra disponível e deixando muito pouco espaço para as demais espécies de fauna e flora se desenvolverem (SMIL, 2017).

⁶⁴ A vitamina B12, por exemplo, é encontrada apenas em alimentos de origem animal (WHO, 2016).

⁶⁵ De acordo com FAO (2017), são necessários sistemas inovadores que protejam e aprimorem a base de recursos naturais, enquanto aumentam a produtividade, o que engendrará um processo de transformação para abordagens "holísticas", tais como agroecologia, agrofloresta e agricultura de conservação.

⁶⁶ Vitaminas e minerais são micronutrientes, pois o corpo necessita e absorve pequenas quantidades (miligramas); são fundamentais para as funções metabólicas e são representados por. Por outro lado,

et al., 2014). O alto consumo de carne vermelha e processada, gordura, sal e açúcar, o baixo consumo de frutas, vegetais e fibras combinados com um estilo de vida sedentário são importantes fatores de risco relacionados à dieta e à saúde mundial (LIM *et al.*, 2012; SPRINGMANN *et al.*, 2016).

Recentemente, no relatório publicado pela comissão acadêmica sobre governança global para a saúde, *The Lancet*, revelou-se que a civilização está em risco pelos efeitos adversos do atual sistema de produção de alimentos, tanto em relação à saúde humana quanto aos ecossistemas do planeta (WILLETT *et al.*, 2019). A dieta moderna ocidental, além de estar tornando um grande número de pessoas obesas e, ao mesmo tempo, desnutridas⁶⁷, apresenta interação de retroalimentação com as mudanças climáticas (ver Figura 59). Há um reconhecimento da dieta como um poderoso desencadeador de impactos ambientais (TIRADO *et al.*, 2018; SUWINBURN *et al.*, 2019).

carboidratos, proteínas e gorduras são exigidos em maior quantidade pelo corpo e fazem parte da classe dos macronutrientes.

⁶⁷ De acordo como SUWINBURN *et al.* (2019), estima-se 11 milhões de mortes por ano por cânceres evitáveis, doenças cardíacas e derrames oriundos da obesidade e da diabetes, o que significa que dietas não saudáveis representam um risco maior de morbidade e mortalidade do que AIDS e o uso de álcool, drogas e tabaco juntos. Ademais, atualmente, cerca de 800 milhões de pessoas estão cronicamente desnutridas e 2 bilhões sofrem de deficiências de micronutrientes, ao mesmo tempo que 2 bilhões estão acima do peso ou são obesos. Nos países mais pobres, é possível encontrar obesidade e desnutrição dentro da mesma família, dado o elevado consumo de alimentos processados, que contém altos valores calóricos, mas poucos nutrientes.

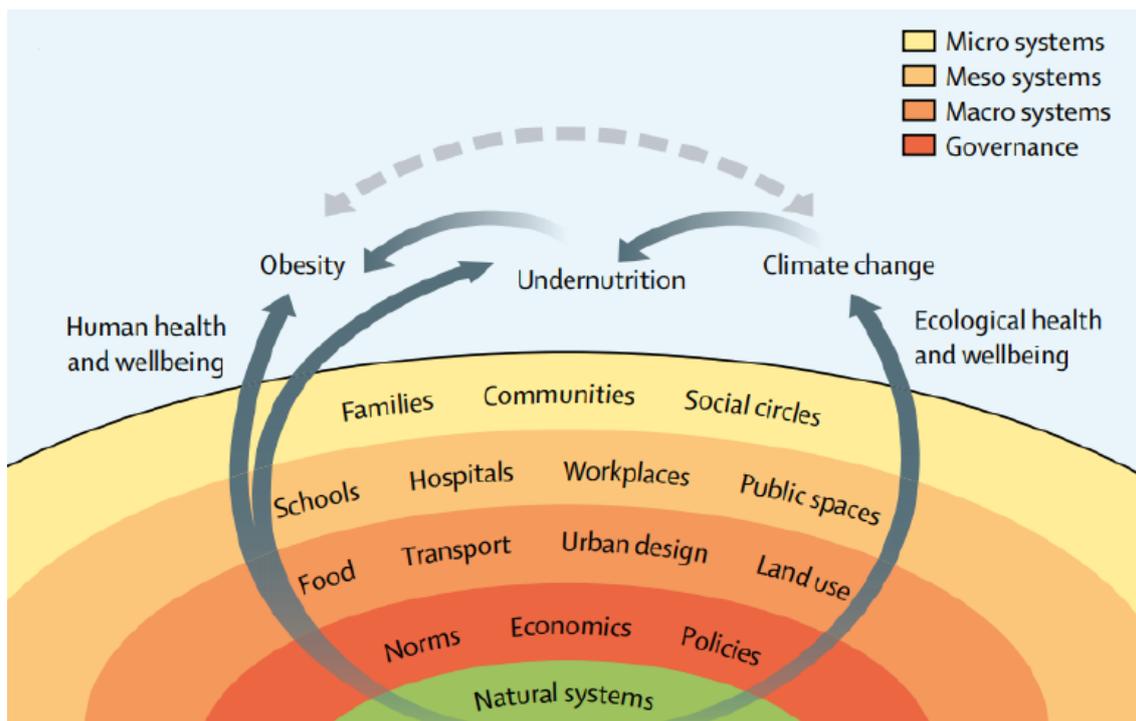


Figura 59: Visão sindêmica global das relações entre dieta e mudanças climáticas

Fonte: SUWINBURN *et al.* (2019)

De acordo com POORE e NEMECEK (2018), o atual sistema de produção e distribuição de alimentos gera cerca de 13,7 bilhões de toneladas de CO₂eq (diretas e indiretas), cerca de 26% do total das emissões globais de GEE. Além disso, 25% dos produtores rurais mundiais contribuem, em média, com 53% do impacto ambiental de cada produto do setor agropecuário⁶⁸ (POORE e NEMECEK, 2018). Nesse sentido, embora a pecuária mundial converta cerca de 2,7 bilhões de toneladas de pasto⁶⁹ em proteína alimentar a cada ano, os impactos ambientais dessa conversão são notáveis sob métodos tradicionais de produção praticados hoje (SMIL, 2014; GARNETT *et al.*, 2014; WESTHOEK *et al.*, 2014; POORE e NEMECEK, 2018). Numa análise mais detalhada, POORE e NEMECEK (2018) mostram que para a produção de alimento de origem animal (carne, peixes, ovos e laticínios) são ocupadas cerca de 83% das terras agrícolas do mundo, contribuindo entre 56% e 58% do total das diferentes emissões do sistema de produção de alimentos. A partir disso, identificam cinco principais razões

⁶⁸ Considera-se a extração de recursos necessários para produzir insumos para a produção agrícola, o impacto inicial de escolha pelos agricultores e termina na loja de varejo, o ponto de escolha para os consumidores. Os estágios pós-varejo (cozimento e perdas do consumidor) não foram considerados devido à alta variabilidade e baixa disponibilidade de dados (POORE e NEMECEK, 2018).

⁶⁹ Dos quais 65% crescem em terras impróprias para agricultura (MOTTET *et al.*, 2017).

biofísicas dos potenciais impactos ambientais, em termos de GEE, oriundos do consumo de proteína de origem animal (POORE e NEMECEK, 2018):

- i) As emissões da produção de ração para animais normalmente excedem as emissões do cultivo de proteína vegetal para humanos;
- ii) Cerca de 67% do desmatamento para expansão da agropecuária global é dirigido pela demanda de alimentos, principalmente soja, milho e pastagens⁷⁰;
- iii) Os animais criam emissões adicionais de fermentação entérica, estrume e aquicultura⁷¹;
- iv) As emissões do processamento de alimento de origem animal, particularmente as emissões dos efluentes dos matadouros, são maiores do que as emissões de processamento para a maioria dos outros produtos alimentícios;
- v) O desperdício é alto para produtos frescos de origem animal, os quais são propensos a rápida decomposição.

Todas essas razões sugerem que as diferenças de impacto em termos de emissões de GEE entre os alimentos oriundos de proteínas animal e vegetal se manterão no futuro, a menos que avanços tecnológicos e possíveis mudanças nas práticas agropecuárias se dirijam vigorosamente aos produtos de origem animal (HEDENUS *et al.*, 2014; FAO, 2017; POORE e NEMECEK, 2018). De fato, alimentar mais de 7 bilhões de pessoas já está degradando os ecossistemas terrestres e aquáticos, esgotando os recursos hídricos e impulsionando as mudanças climáticas, o que ameaça a capacidade da agropecuária e do setor de alimentos de continuar com essas tendências a longo prazo (GODFRAY *et al.*, 2010; FOLEY *et al.*, 2011; VALIN *et al.*, 2014; FAO, 2017; TIRADO *et al.*, 2018). Nesse sentido, os consumidores podem ter um papel relevante para reduzir impactos ambientais, em uma escala talvez jamais alcançável pelos produtores (BERNERS-LEE *et al.*, 2012; HEDENUS *et al.*, 2014; WESTHOEK *et al.*, 2014; POORE e NEMECEK, 2018).

Neste quarto capítulo, é analisada uma aplicação do modelo TEA, onde se verifica o exercício de simulação do modelo a partir da implementação e análise de resultados

⁷⁰ O manejo melhorado da pastagem pode temporariamente sequestrar carbono, mas reduz as emissões de ruminantes até um máximo de 22%, com maior sequestro exigindo cada vez mais terra (POORE e NEMECEK, 2018).

⁷¹ Somente para essas emissões, os valores do décimo percentil de emissões de GEE são de 0,4 a 15 kg de CO₂eq por 100 g de proteína animal (POORE e NEMECEK, 2018).

de cenários alternativos comparados à trajetória referencial, descrita no Capítulo 3. Além da contextualização da crescente discussão acerca da relevância de uma mudança de dieta global para o atingimento de metas climáticas, na Seção 4.1., são descritos os cenários implementados no modelo, com destaque para as principais diferenças metodológicas, sendo um dos cenários construído sob a ideia de uma mudança comportamental (choque de quantidade) e outros cenários construído sob a lógica de preços ou custos relativos (choque de preço). Na Seção 4.2., são analisados os resultados de cada cenário individualmente e, na Seção 4.3., expõe-se uma discussão a respeito do tema a partir da comparação de resultados dos cenários implementados no modelo, indicando, inclusive, suas principais limitações.

4.1. Procedimento de Análise

A modelagem para mudanças climáticas, usualmente, se utiliza da análise de cenários como principal instrumento, conforme descrito na Seção 2.1., tendo em vista a natureza de longo prazo, as diferentes causas de emissões de GEE e suas incertezas subjacentes. A construção de cenários climáticos, portanto, deve se basear na avaliação da literatura científica especializada, como forma de fundamentar possíveis descrições qualitativas e quantitativas do futuro, bem como auxiliar no processo de tomada de decisão. O procedimento de análise do estudo de caso consiste na projeção e comparação de diferentes cenários. O cenário de referência, já descrito no Capítulo 3, serve de base de comparação para os demais cenários projetados. Para além do cenário de referência, foram construídos cenários alternativos que incorporam mudanças no padrão de consumo de alimentos, bem como restrições de emissões de GEE globais. De fato, os cenários alternativos podem ser divididos segundo a existência ou não de limites globais de emissões de GEE para evitar aumentos da temperatura média global⁷². A Figura 60 apresenta o conjunto de cenários alternativos considerados para avaliações econômicas, energéticas e ambientais, bem como para o estudo de caso sobre mudança de dieta global e seus impactos no Brasil.

⁷² Orçamentos de carbono compatíveis com o horizonte de 2100, limitados até 2050 dado o período de análise desta tese.

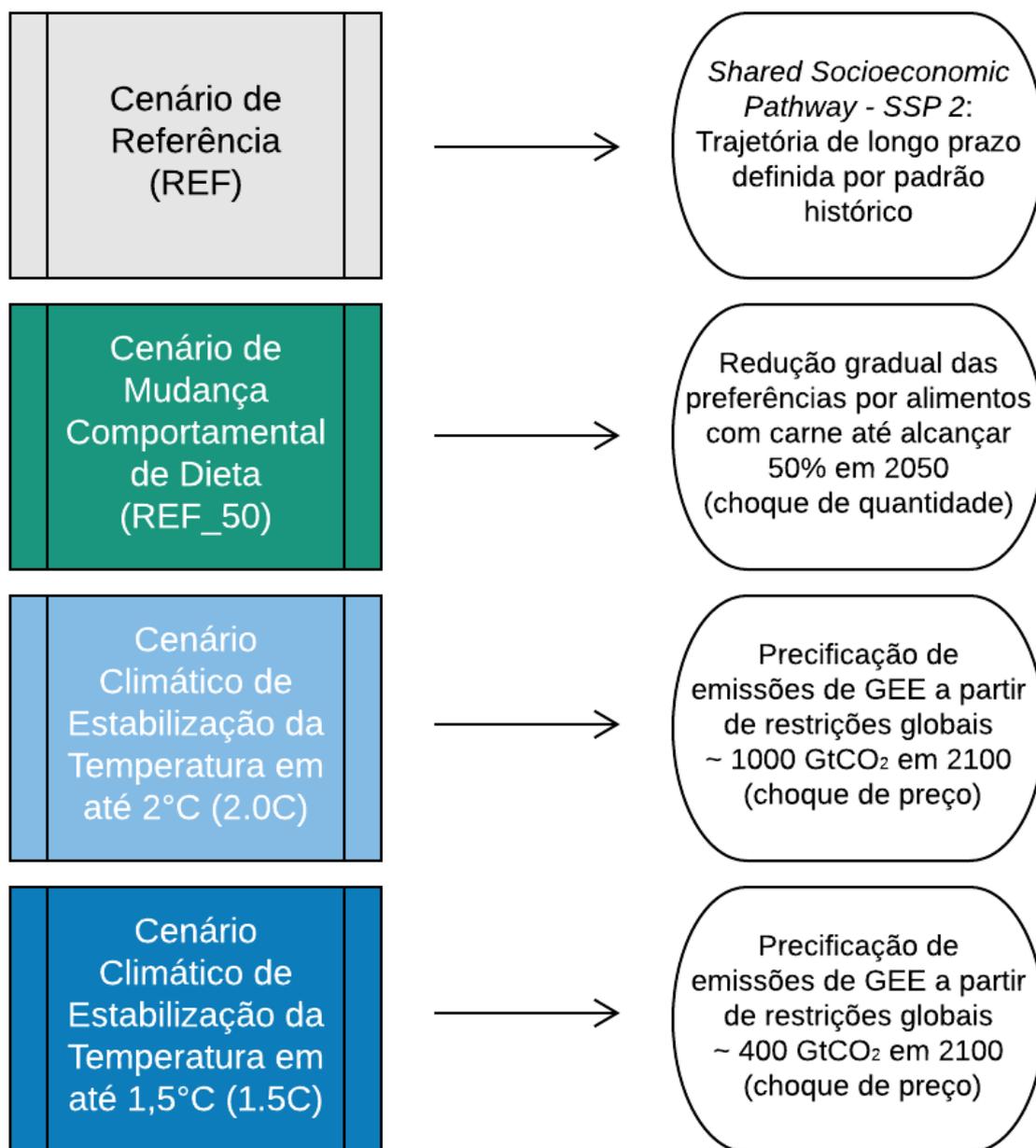


Figura 60: Cenários implementados no modelo TEA

4.1.1. Cenário Referência (REF)

No Capítulo 3, onde se documenta o modelo TEA, de fato, se descreve também como se construiu o cenário referência, aquele que projeta o futuro de forma tendencial e, muitas vezes, com maior probabilidade de ocorrência.

Partindo de bases de dados relacionadas à estrutura econômica (GTAP; OCDE), produção e consumo de energia (IEA-WEO; modelo COFFEE), agropecuária e uso do solo (FAO), emissões (IPCC e modelo COFFEE), a trajetória escolhida para guiar o cenário de referência (REF) do modelo TEA foi o SSP2 – Meio do Caminho. Para este cenário, o mundo segue tendências sociais, econômicas e tecnológicas que não mudam

marcadamente do padrão histórico, desconsiderando, ademais, possíveis impactos das mudanças climáticas e ausência de políticas climáticas (VAN VUUREN e CARTER, 2014; O'NEILL *et al.*, 2014; O'NEILL, 2015). Além de outras premissas descritas na Seção 3.4., os principais *drivers* para guiar as simulações do cenário referência são projeções econômicas e projeções populacionais. Nesse cenário, portanto, PIB e população de cada região do modelo TEA foram direcionados para acompanhar suas taxas de crescimento definidas na trajetória do SSP2 (CUARESMA, 2015; LEIMBACH *et al.*, 2015; DELLINK *et al.*, 2015; KC e LUTZ, 2017). Assim, o crescimento da demanda de bens e serviços produzidos por cada setor ocorre a partir da evolução da renda e da produtividade dos fatores.

4.1.2. Cenário de Mudança Comportamental de Dieta (REF_50)

O cenário de mudança comportamental de dieta trata-se de uma variante do cenário de referência, portanto, sem restrições de emissões, mas com a incorporação de mudanças nas preferências alimentares dos agentes econômicos. A ideia por trás desse cenário é analisar qual é o papel mitigatório de mudanças comportamentais não induzidas por preços relativos. No caso, foi desenvolvido um cenário, considerando apenas mudanças na dieta⁷³, no sentido de que a escolha pessoal sobre a quantidade consumida de determinados alimentos pode desempenhar uma importante função na sustentabilidade econômica, ambiental e social.

De acordo com a base de dados do GTAP, os agentes econômicos podem demandar alimentos de três grandes setores: i) setor agropecuário, representado pelos setores agrícola (AGR), pecuária (CTL), outros animais (OAP) e pesca (FSH); ii) setor industrial, representado pelas indústrias de alimentos sem carne (OFD) e com carne (OMT); e iii) setor de serviços (SER). Assim como os setores agropecuários não ofertam apenas alimentos, mas também madeira, animais vivos, etc., o mesmo ocorre com o setor de serviços, de modo que não foi possível desagregar apenas a oferta de alimentos desses setores⁷⁴. Na Figura 61 é possível observar um exemplo de perfil da demanda, no caso das famílias brasileiras, por produtos de setores fornecedores de alimentos.

⁷³ Redução do consumo de energia, mobilidade sustentável, entre outras mudanças comportamentais devem ser problemas de pesquisa para estudos futuros.

⁷⁴ Trata-se de uma limitação da modelagem.

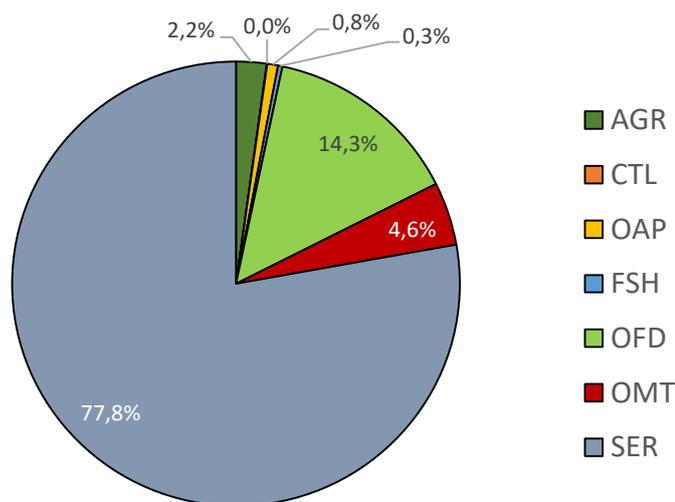


Figura 61: Perfil da demanda das famílias brasileiras por setores selecionados no ano base

Parte da demanda dos agentes econômicos dos setores agropecuários referente a alimentos pode ser interpretada como de alimentos *in natura*, cuja origem é direta com o produtor rural, não passando por intermediários. Da mesma forma, parte da demanda do setor de serviços referente à alimentação pode ser interpretada como ocorrendo em restaurantes, hotéis, escolas, hospitais e demais serviços envolvendo alimentação. Os únicos setores que, a partir da agregação da base de dados, produzem apenas alimentos são os setores da indústria de alimentos OFD e OMT, cuja demanda pode ser interpretada como ocorrendo em residências e supermercados por produtos preparados, embalados e/ou processados.

Sendo assim, o método de construção desse cenário parte da suposição de uma redução no consumo de alimentos de origem animal, em particular, redução no consumo de carne. Para modelar essa mudança comportamental, foi necessário definir uma trajetória de redução gradual na preferência de consumidores, de forma homogênea a todas as regiões do modelo, por produtos da indústria de alimentos com carne (OMT). A fim de captar toda a cadeia de produção e consumo de produtos do setor OMT, foi considerada a redução na preferência tanto das famílias quanto de setores intermediários que utilizam tais produtos como insumo. A Tabela 18 mostra a trajetória de redução na preferência por alimentos da indústria OMT, alcançando, ao final do período de análise, uma redução de 50%, comparado às preferências do cenário de referência. Tal redução de 50% dá nome à abreviação do cenário de mudança comportamental de dieta (REF_50).

Tabela 18: Trajetória de redução na preferência por produtos da indústria de alimentos com carne (OMT)

Período	Redução nas preferências por OMT
2015-2020	7%
2020-2025	14%
2025-2030	21%
2030-2035	29%
2035-2040	36%
2040-2045	43%
2045-2050	50%

A história, porém, sugere que mudanças no comportamento relacionadas à dieta são lentas, dado que escolhas são influenciadas pela cultura, disponibilidade, preço, gosto, conhecimento nutricional, conveniência, etc. Embora os consumidores possam fazer a diferença modificando suas dietas⁷⁵ (TILMAN e CLARK, 2017; GODFRAY *et al.*, 2017; WILLETT *et al.*, 2019), não parecem ser capazes de reorientar todo sistema de produção de alimentos por conta própria, de modo que pressupõe-se esforços coordenados da sociedade civil, organizações de saúde e governos na busca, idealmente, de um acordo global. O cenário REF_50 trata-se de um cenário teórico, cuja viabilidade depende de grandes esforços relacionados a mudança comportamental, condicionada a premissas culturais e aceitabilidade social, bem como de condições que garantam o bem-estar da população em termos de segurança alimentar, sem risco de fome ou desnutrição.

Vale destacar que a redução gradual da preferência por produtos do setor OMT foi compensada por uma maior preferência por produtos da indústria de alimentos sem carne (setor OFD). O aumento não foi proporcional, dado a necessidade de se incorporar um volume maior de alimentos de origem vegetal para atingir uma quantidade equivalente de proteína ingerida com o consumo de alimentos de origem animal, em especial carnes. Assim, a fim de assegurar níveis saudáveis de consumo de proteína no cenário REF_50, foi aplicado um fator de correção médio no valor de 0,75 (WHO, 2016). Isto significa que 1 unidade de OFD representa cerca de 0,75 unidades de OMT em termos de proteína, ou seja, cada unidade de OMT retirada da preferência do consumidor foi substituída por 1,33 unidades de OFD, compensando o diferencial de proteína entre produtos dos setores OFD e OMT (WHO, 2016). Vale ressaltar que o

⁷⁵ No Anexo V encontra-se a dieta de referência sugerida pelo *The Lancet*.

objetivo da criação deste cenário não é verificar apenas reduções nas emissões de GEE, para isso poderia ter sido criado um cenário mais extremo, tal como considerar que a população mundial se torne gradualmente vegana. Contudo, não está comprovado que uma dieta vegana é a opção mais saudável e uma redução de 50% do consumo de carne tem sido indicada pela comissão acadêmica sobre governança global para a saúde, conhecida como *The Lancet* (TIRADO *et al.*, 2018; WILLET *et al.*, 2019).

A Figura 62 mostra a variação na demanda de produtos dos setores OFD e OMT entre o ano base e o final do período de análise a partir da metodologia proposta. Ressalta-se ainda que foi considerada a premissa de que a demanda total por produtos dos setores OFD, OMT e SER não se altera em relação ao cenário REF, de modo que além de variações na demanda dos setores industriais, há também ajustes na demanda do setor de serviços. Esses cálculos asseguram consistência na calibragem das funções de utilidade e de produção no cenário REF_50, dado que o bem-estar total dos consumidores se iguala aos gastos com os diferentes bens e serviços, e a soma dos insumos se iguala ao valor da produção dos setores intermediários.

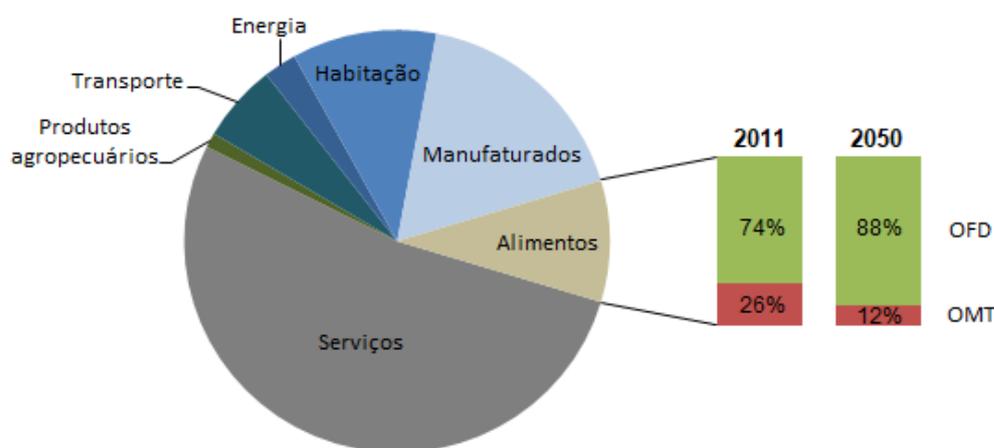


Figura 62: Mudança de dieta via redução das preferências de produtos do setor OMT

4.1.3. Cenários Climáticos de Estabilização da Temperatura Média Global (2.0C e 1.5C)

Na Seção 2.3.1., foi descrita a fundamentação microeconômica da teoria do equilíbrio geral, em que o mecanismo de mercado, representado pelas condições de concorrência perfeita, equaliza os preços dos bens e serviços aos seus custos marginais, sendo capaz, portanto, de alcançar alocações eficientes. Contudo, cabe ressaltar que se

houver a existência de externalidades, o mercado não apresentará necessariamente uma provisão de recursos eficiente (MAS-COLELL *et al.*, 1995; VARIAN, 1992). A principal característica das externalidades é que há bens com os quais as pessoas se importam e que não são comercializados nos mercados. Na análise das mudanças climáticas, talvez o principal bem que não é comercializado nos mercados, mas que as pessoas se importam (ou deveriam se importar mais), trata-se das emissões de GEE.

Segundo a ótica econômica, externalidades podem ser interpretadas como falhas de mercado que ocorrem quando a atividade de um agente econômico causa uma alteração de bem-estar em outro agente e tal variação não é compensada, isto é, o preço de mercado não captura todos os custos e benefícios da transação. Pode ser interpretada também como um efeito de propagação associado à produção ou ao consumo, que se estende a um terceiro de forma negativa, incorrendo em custos, ou positiva, proporcionando benefícios. Na presença de externalidades, sejam elas positivas ou negativas, verifica-se um descolamento entre custos/benefícios sociais e privados, prevalecendo custos/benefícios sociais mais altos em relação aos custos/benefícios privados (MAS-COLELL *et al.*, 1995; VARIAN, 1992).

Nos cenários REF e REF_50, todas as interações entre consumidores e produtores davam-se por meio do mecanismo de mercado, de modo que tudo o que os agentes econômicos precisavam conhecer eram os preços de bens e serviços e suas próprias possibilidades de consumo ou de produção. No que tange aos cenários climáticos, além dos preços de bens e serviços tradicionais da estrutura econômica do modelo TEA, consumidores e produtores passam a tomar conhecimento do custo (ou preço) de emissões de GEE. Grande parte da “internalização” dessa externalidade negativa no modelo TEA se dá pela identidade entre o preço de carbono (CO₂) e o custo social do carbono (COASE, 1960), isto é, o dano ambiental impellido à sociedade oriundo da emissão de uma unidade adicional na atmosfera.

Para esse estudo, a precificação de carbono é determinada pelas restrições globais de emissões, também conhecidas como orçamentos de carbono. Orçamentos de carbono são entendidos como os limites máximos de emissão de CO₂ para evitar o aquecimento da temperatura média da superfície global (ROGELJ *et al.*, 2015; ROGELJ *et al.*, 2016; VAN VUUREN *et al.*, 2016; VAN DEN BERG *et al.*, 2019). Isso significa que, se o mundo quiser evitar o aquecimento médio global em 2°C ou 1,5°C, há um nível adicional máximo de emissões que ainda pode entrar na atmosfera. As Figura 63 e Figura 64 mostram estimativas de orçamentos de carbono de IAMs selecionados para

um aquecimento médio global de até 2°C e de até 1,5°C em 2100, em relação a níveis pré-industriais. As restrições de emissões de CO₂ globais são, em média, cerca de 1.000 GtCO₂ para até 2°C e cerca de 400 GtCO₂ para até 1,5°C. No modelo TEA, o orçamento de carbono do cenário 2.0C é de 1.360 GtCO₂ até 2050, enquanto que para o cenário 1.5C é de 1.100 GtCO₂ até 2050.

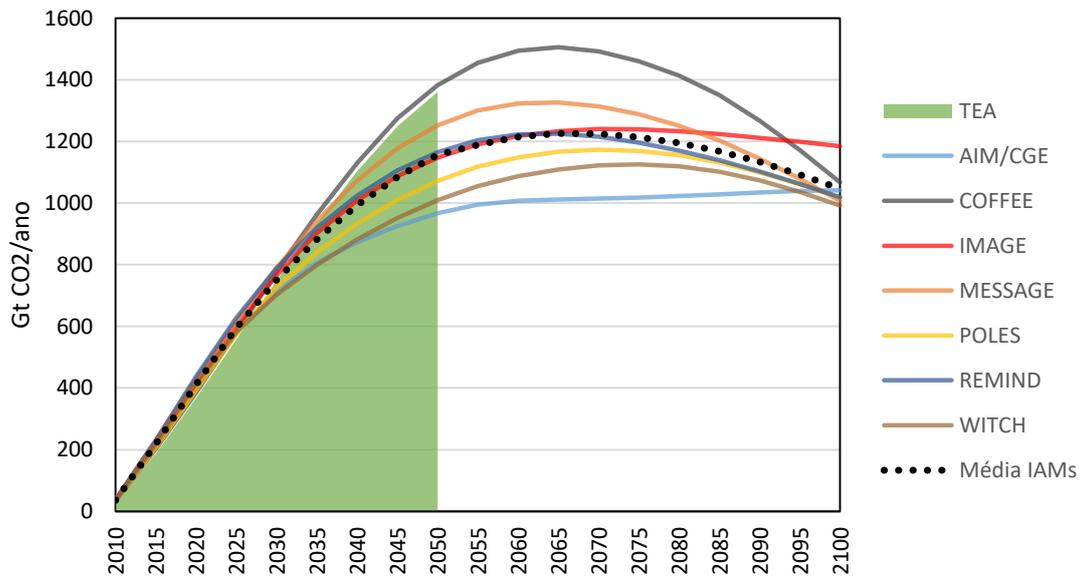


Figura 63: Orçamentos de carbono de IAMs selecionados para aquecimento global de até 2°C em 2100

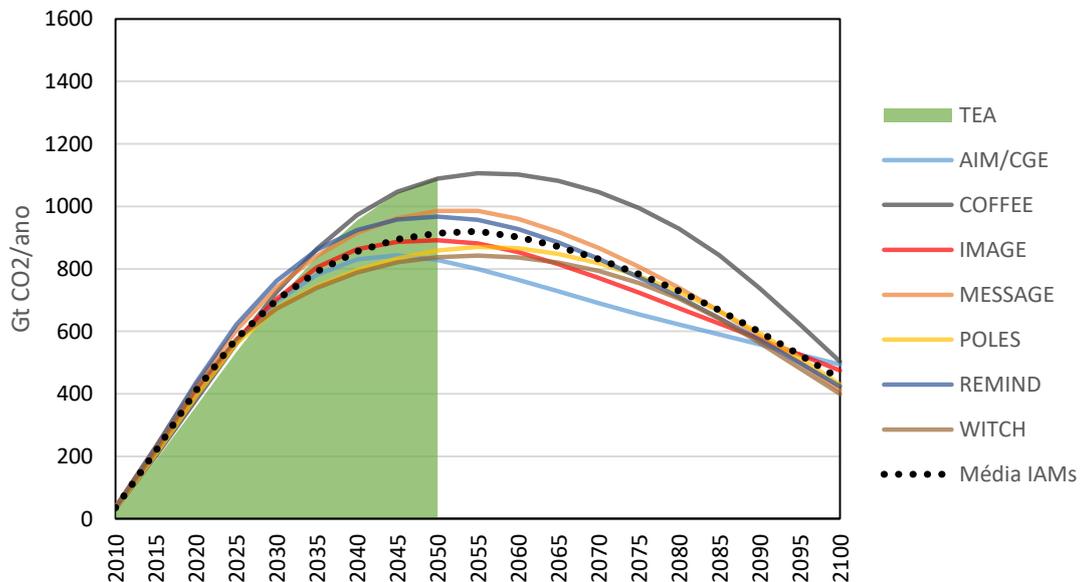


Figura 64: Orçamentos de carbono de IAMs selecionados para aquecimento global de até 1,5°C em 2100

O método por trás da precificação de carbono parte da definição de orçamentos de carbono, dada a relação complementar entre a emissão via queima de combustíveis fósseis e a quantidade física de permissões ou créditos de emissões associadas às atividades emissoras. Assim, o modelo TEA permite o comércio setorial e internacional de créditos (ou permissões) de emissões que são contabilizados juntamente com os outros fluxos de comércio. Isso significa que, nos cenários climáticos, para cada árvore tecnológica cuja produção e/ou consumo gera emissões de GEE, adicionam-se créditos de emissões como um novo insumo. Créditos de emissões e insumos intermediários de origem fóssil são, usualmente, combinados a partir de uma função Leontief, cuja elasticidade de substituição é zero, a fim de refletir o volume específico de emissões associado à produção setorial⁷⁶ (ver Figura 65). Incorporam-se créditos de carbono tanto para setores produtivos quanto para consumidores, de modo a captar todos os processos emissores de GEE da economia. Pelo lado da produção podem-se citar os setores energéticos, industriais (emissão de processo, inclusive), bem como serviços de transporte. Pelo lado dos consumidores, podem-se citar emissões oriundas do consumo das famílias e do governo, com destaque para uso de transporte privado.

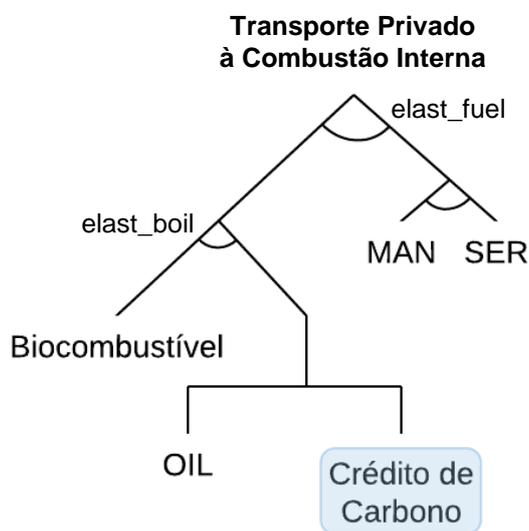


Figura 65: Árvore tecnológica de demanda de transporte privado à combustão interna nos cenários climáticos do modelo TEA

Desse modo, são simulados dois cenários climáticos, 2.0C e 1.5C, em que a quantidade de permissões atua como restrição no modelo TEA, de modo a

⁷⁶ Elasticidades de substituição diferentes de zero são consideradas quando existem possibilidades de redução de emissões devido ao emprego de tecnologias mais limpas.

estabelecerem um preço de carbono global de equilíbrio. Cabe ressaltar que toda a receita da precificação de carbono retorna para o agente representativo (famílias e governo), o que equivale a uma reciclagem da receita na forma de uma transferência tipo *lump sum* para a sociedade⁷⁷. Ademais, o comércio internacional de permissões entra como parte da balança comercial e está sujeito as premissas de fechamento macroeconômico, conforme descrito na Seção 3.3. Assim, possíveis superávits associados a vendas líquidas de permissões entram na economia exportadora e são automaticamente considerados na restrição orçamentária do agente representativo. Ademais, em cenários mais restritivos, como o 1.5C, a quantidade de permissões comercializadas tende a ser menor, comparada ao cenário 2.0C, tornando o custo social do carbono mais elevado.

No caso de emissões de outros gases que não estão relacionadas à queima de combustíveis fósseis, como emissões de CH₄ e N₂O de setores agropecuários, não são considerados créditos de emissões, mas sim uma política de impostos diferenciados incidindo sobre o fator produtivo capital de cada setor. Entende-se que há limitados incentivos para a mitigação de emissões para esses setores, de modo que um produto com maior intensidade de emissões, por exemplo, tende a continuar sendo produzido no lugar de outro equivalente em termos nutricionais, simplesmente, por apresentar menores custos. Ademais, considera-se que o capital empregado na produção desses setores representa seus principais insumos, isto é, no caso do setor CTL, por exemplo, o gado é representado pelo fator capital, o qual recebe uma taxa extra, em virtude de suas emissões associadas. O imposto, nesse caso, é resultado da multiplicação do preço global de carbono pelo GWP₁₀₀ de cada gás (IPCC, 2014).

Por fim, a avaliação de uma política climática ampla e rigorosa é importante para a análise do papel da mudança de dieta na sustentabilidade ambiental, tanto pela ótica comportamental (cenário REF_50) quanto pela ótica econômica de preços relativos (cenários 2.0C e 1.5C). A precificação de emissões de GEE influenciam na evolução das economias de cada região do modelo TEA, impactando a competitividade dos setores e a participação de diferentes tecnologias ao longo do tempo.

⁷⁷ Aquelas que podem ser utilizadas de forma discricionária pelo agente representativo, isto é, desvinculada de qualquer objetivo específico.

4.2. Resultados

Nesta seção são expostos os resultados de todos os cenários implementados no modelo TEA. A análise atém-se aos resultados globais e, especificamente, da região brasileira (BRA) no que diz respeito a evolução do PIB, da produção setorial, da geração de eletricidade, do consumo final de energia, das emissões de GEE e do preço de carbono de cada um dos cenários alternativos. No que tange à análise do estudo de caso, detalham-se também variáveis-chaves referentes à produção e consumo de alimentos no Brasil, o que compreende indicadores sobre a evolução da cadeia produtiva de alimentos, da demanda das famílias e setores intermediários, bem como sobre comércio internacional.

4.2.1. Cenário Referência (REF)

Nesta seção são apresentados os resultados do cenário referência (REF). A começar por indicadores econômicos, a Figura 66 mostra a evolução do PIB para todas as regiões do modelo TEA. Conforme descrito na seção 3.4., o PIB é tratado como uma variável exógena no cenário REF, oriundo da trajetória do SSP2 – Meio do caminho (CUARESMA, 2015; LEIMBACH *et al.*, 2015; DELLINK *et al.*, 2015). É possível observar que as regiões que apresentam maior participação no PIB global são: o Oeste Europeu (WEU), que inclui a União Europeia, respondendo por cerca de 20% do PIB global em 2050; seguido da China (CHN), que alcança cerca de 19% do PIB global; e os Estados Unidos (USA) que atinge a marca de 15% do PIB global ao final do período. Contudo, em termos de taxa média de crescimento anual, destaca-se o crescimento da Índia (IND) com cerca de 4,4% a.a., bem como da região africana (AFR), exceto África do Sul, com crescimento médio de 4% a.a. De acordo com essa trajetória, o PIB brasileiro (BRA) representa cerca de 3,2% do PIB global em 2050, o que significa um crescimento médio de 2,2% a.a. O PIB global alcança o valor de US\$ 217 trilhões em 2050, enquanto que o PIB brasileiro alcança o valor de US\$ 7 trilhões.

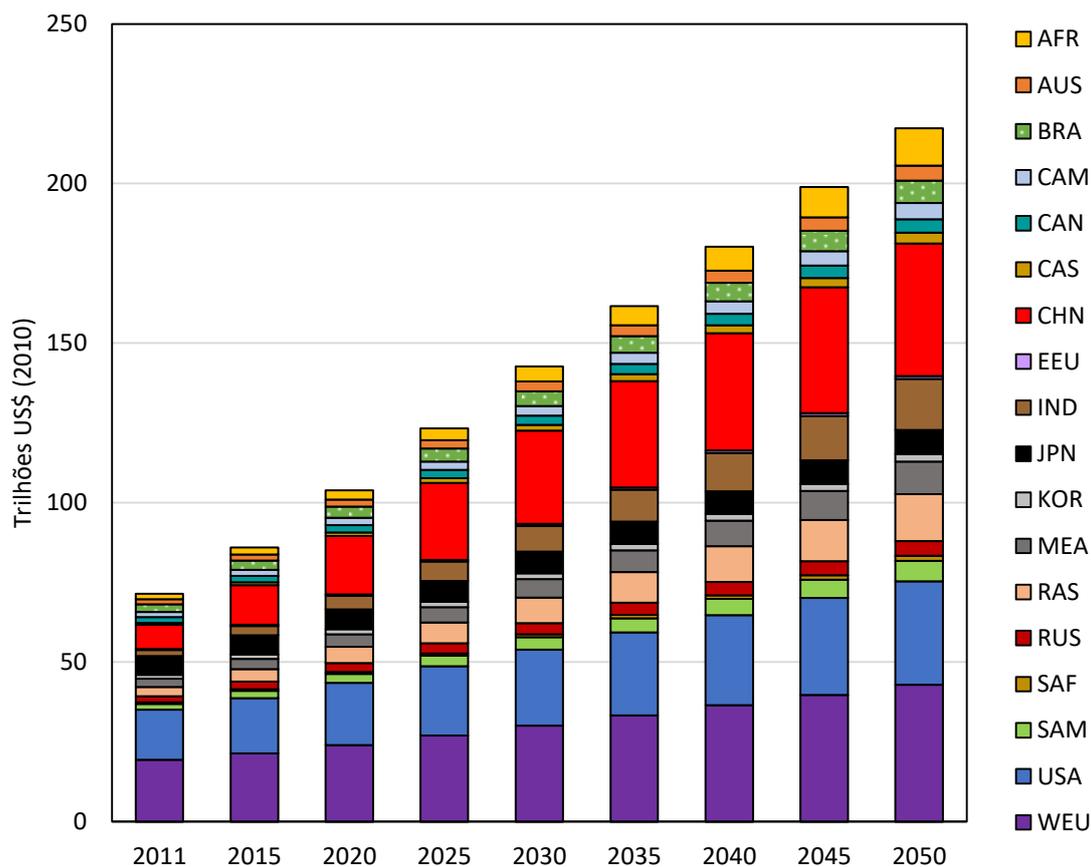


Figura 66: Evolução do PIB global desagregado para cada região no cenário REF do modelo TEA

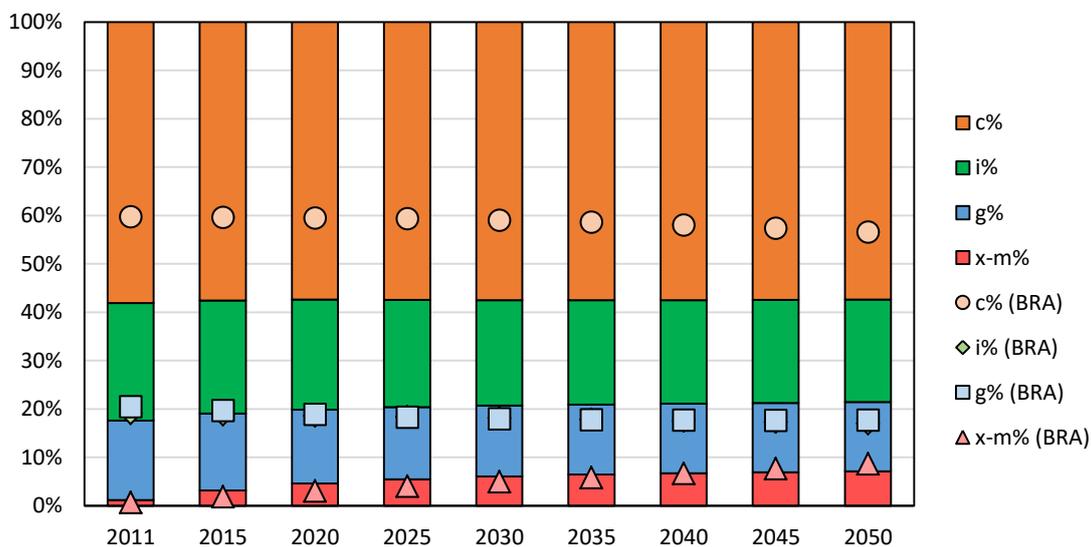


Figura 67: Evolução da composição do PIB global e do Brasil no cenário REF do modelo TEA

Quanto à composição do PIB global, podemos observar nas colunas da Figura 67 que o consumo das famílias responde em média por 58% do PIB global. Investimento e consumo do governo respondem por cerca de 22% e 15%, respectivamente, enquanto

que a balança comercial representa em média cerca de 5% do PIB global. No que se refere à composição do PIB brasileiro (marcadores), há leve diferença em relação a representação do consumo das famílias no PIB, em média 59%, porém vale destacar o maior peso do consumo do governo no PIB brasileiro em relação à média global que, embora em queda, apresenta uma média de cerca de 18%. O investimento nacional representa cerca de 15% do PIB, abaixo, portanto da média global. A balança comercial segue a tendência de crescimento da participação do PIB global, alcançando cerca de 9% do PIB brasileiro em 2050, representando em média 5% durante o período de 2011 a 2050.

Nos gráficos a seguir, participações e índices de produção se referem a quantidades, não valores monetários que são influenciados por preços de mercado. Conforme a Figura 68, a produção global é liderada pelos setores industriais e de serviços que contribuem em média com cerca de 48% e 43%, respectivamente, do total produzido no mundo. A produção agropecuária responde em média por 3% do total global, sendo cerca de um terço dessa produção se realizando na China (CHN) e na Índia (IND). Transportes respondem por em média cerca de 6% da produção global.

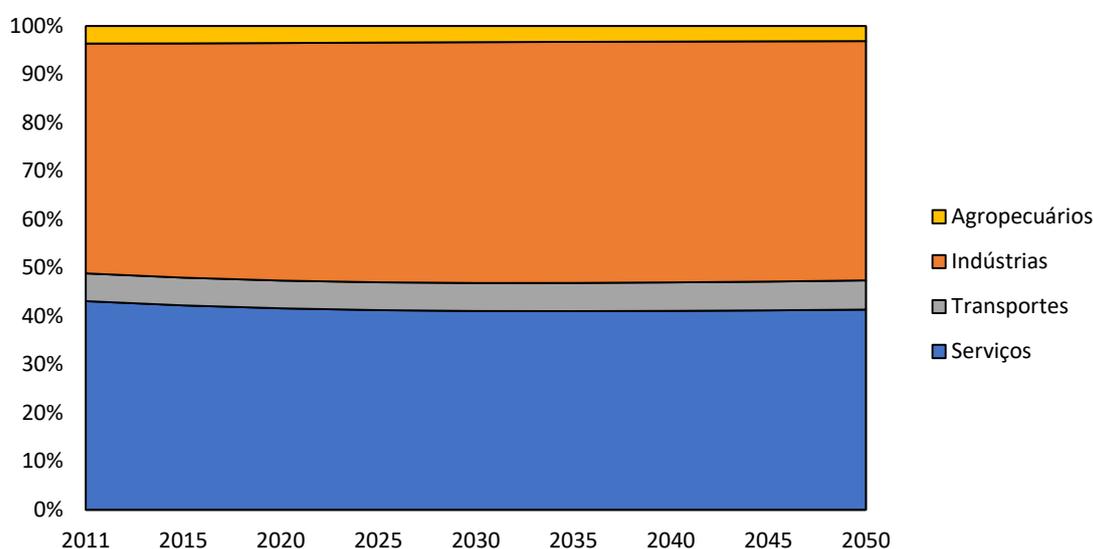


Figura 68: Composição da produção setorial global no cenário REF do modelo TEA

Em termos de crescimento setorial, a Figura 69 mostra que setores industriais e transportes apresentam um índice semelhante, alcançando um crescimento de 3,5x em 2050 em relação ao ano base 2011. Serviços também apresentam crescimento,

alcançando em 2050 cerca de 3,3x a produção do ano base. A produção agropecuária apresenta o menor índice, alcançando em 2050 cerca de 2,8x a produção do ano base.

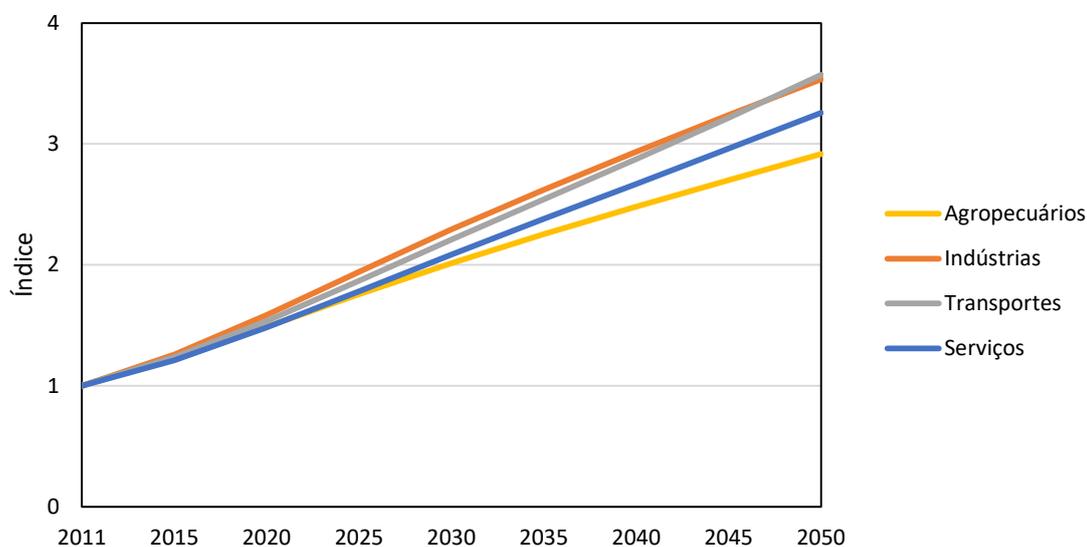


Figura 69: Índices de produção setorial globais no cenário REF do modelo TEA

No que se refere ao crescimento dos setores produtivos brasileiros, a Figura 70 mostra que a produção agropecuária é que mais cresce na economia brasileira, alcançando em 2050 cerca de 3x a produção do ano base e, portanto, acima do crescimento médio global. O setor de serviços no Brasil também tem crescimento destacado, alcançando em 2050 cerca de 2,5x a produção do ano base, seguido pelo setor de transportes com cerca de 2,3x. Destaca-se o crescimento da indústria nacional ficar abaixo da média global, alcançando em 2050 apenas 1,9x a produção do ano base.

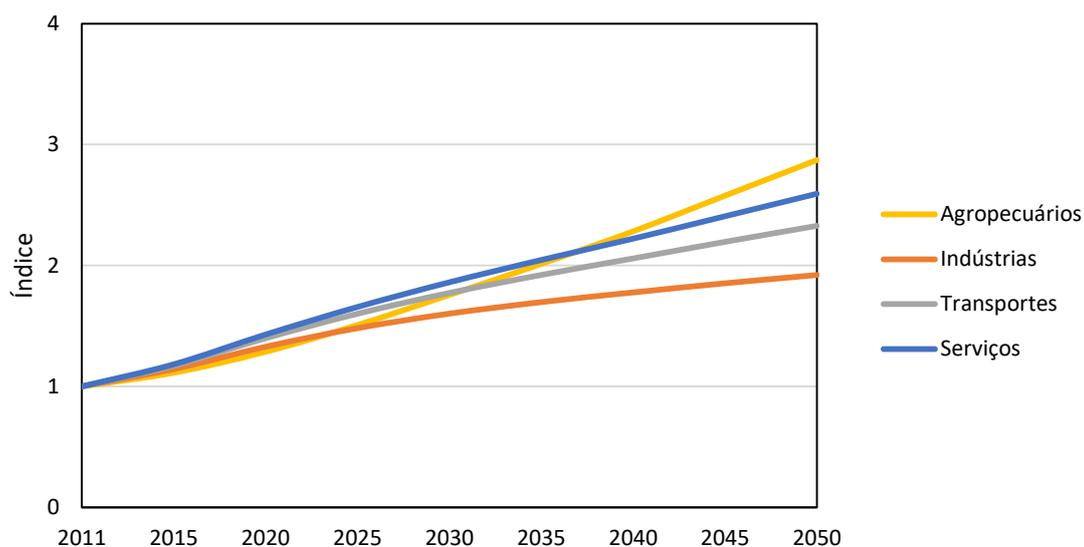


Figura 70: Índices de produção setorial brasileiros no cenário REF do modelo TEA

A composição da produção agropecuária brasileira pode ser visualizada na Figura 71. É possível observar a alta representatividade da agricultura (AGR) brasileira, que responde por cerca de 65% no ano base, mas em 2050 representa cerca de 78% do total da produção agropecuária. A produção animal, representada pela pecuária (CTL) e outros animais (OAP), representa cerca de 34% no ano base, mas, durante o período, reduz sua participação alcançando em 2050 cerca de 21% da produção agropecuária brasileira, devido ao crescimento do setor agrícola. O setor de pesca (FSH) mantém uma representação média de cerca de 1,5% do total da produção agropecuária.

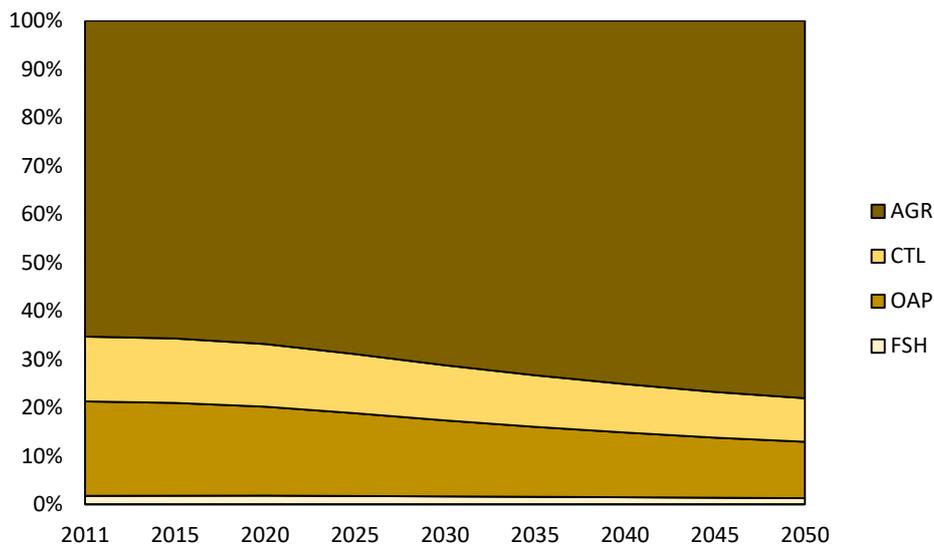


Figura 71: Composição da produção agropecuária brasileira no cenário REF do modelo TEA

Dentre os setores industriais brasileiros, destaca-se a representação do setor de manufaturados (MAN), definido por um agregado das indústrias de minério, automobilística, construção civil, papel e celulose, etc., em média cerca de 60% do total da produção industrial, conforme a Figura 72. A indústria de alimentos, representada pela indústria de alimentos sem carne (OFD) e com carne (OMT), responde em média por cerca de 20% da produção industrial, com destaque para OFD que responde por cerca de $\frac{3}{4}$ da produção de alimentos nacional. O setor químico (CRP) representa em média cerca de 15% da produção industrial. Os setores industriais de ferro e aço (I_S) e mineral não-metálico (NMM) representam em média cerca de 4% e 2,3%, respectivamente, da produção industrial nacional.

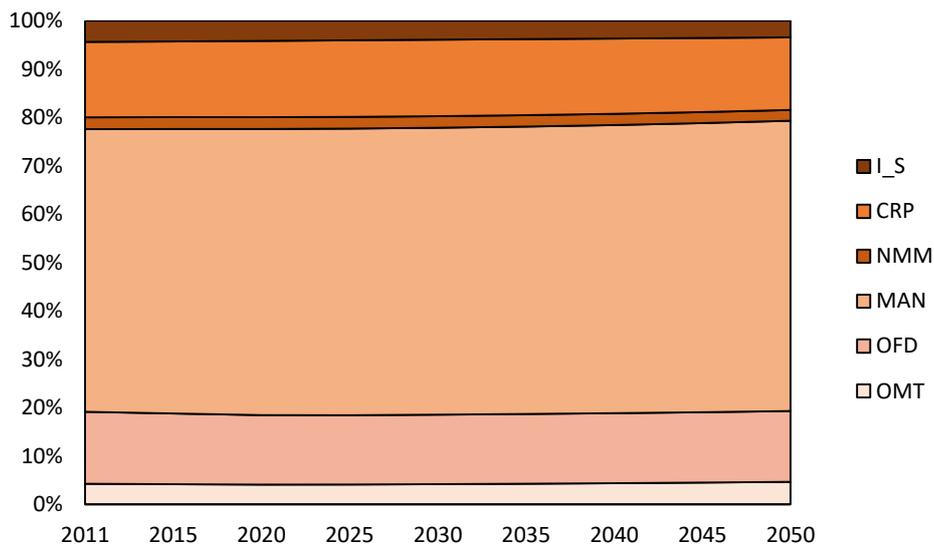


Figura 72: Composição da produção industrial brasileira no cenário REF do modelo TEA

Quanto aos setores de transportes, a Figura 73 mostra a predominância do setor de transportes terrestres (OTP), definido por um agregado entre transporte rodoviário e ferroviário, em média cerca de 80% da produção. Os setores de transporte aéreo (ATP) e hidroviário (WTP) respondem por cerca de 12% e 8%, respectivamente, do total da produção de transportes nacional.

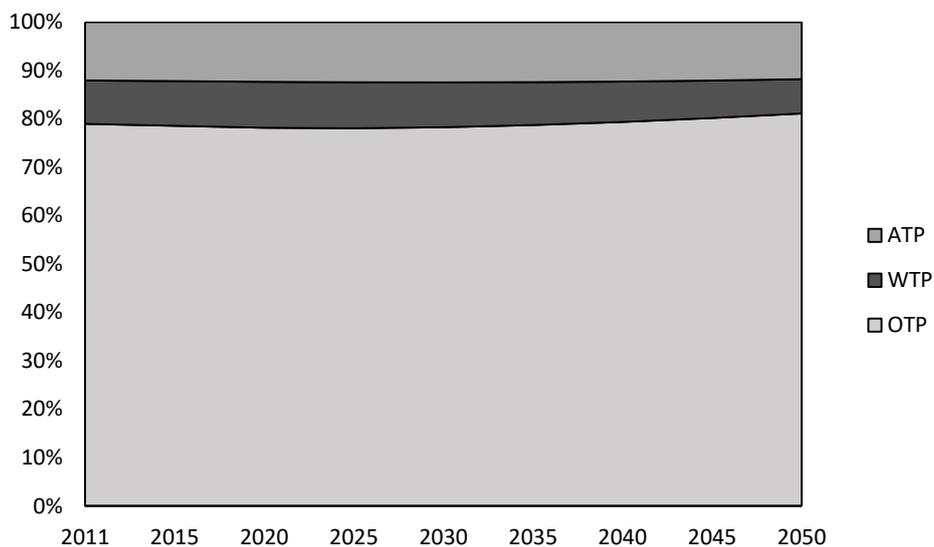


Figura 73: Composição da produção de transportes brasileira no cenário REF do modelo TEA

Dentre a produção dos setores energéticos, destaca-se a importância de se analisar a geração elétrica projetada no modelo TEA, tendo em vista contar com maior número

de tecnologias alternativas às fósseis e, portanto, maior possibilidade de mitigação de emissões. Quanto a geração de eletricidade global, a Figura 74 mostra que o carvão é a fonte energética mais utilizada no mundo, respondendo por cerca de 37% da geração no ano base e alcançando em 2050 cerca de 72 EJ, próximo ao total da geração elétrica global do ano base. A segunda fonte mais utilizada na geração elétrica global é o gás natural que representa em média cerca de 22% da geração elétrica mundial. Derivados de petróleo também são utilizados para geração elétrica, porém com representatividade inferior às demais fontes fósseis, cerca de 5%. Hidro e nuclear juntas representam em média cerca de 30% da geração elétrica do ano base e, embora apresentem crescimento, perdem um pouco de representatividade para tecnologias alternativas no final do período. Eólica e solar são as tecnologias que apresentam maior crescimento médio anual com cerca de 6% e 9% a.a., respectivamente, alcançando juntas, em 2050, cerca de 26 EJ, o que significa 14% da geração elétrica global. A geração elétrica via biomassa cresce em torno de 0,5% a.a. no período.

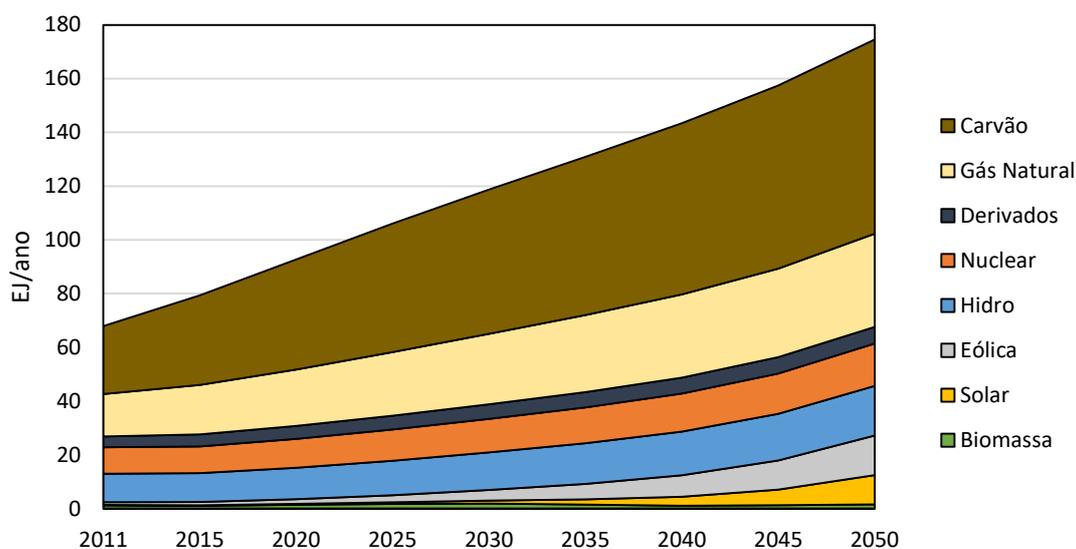


Figura 74: Geração elétrica global por fonte no cenário REF do modelo TEA

A geração elétrica brasileira é considerada uma das mais menos carbono intensivas do mundo, de acordo com a Figura 75. Cerca de 85% do total gerado de eletricidade no Brasil no ano base é oriundo de hidroelétricas, respondendo por cerca de 1,4 EJ em 2011 e crescendo para 1,6 EJ em 2050. No cenário REF, as fontes fósseis ganham representatividade na geração elétrica brasileira, crescendo em média 1,6% a.a. Destaca-se a geração elétrica via biomassa com crescimento médio de 6% a.a.,

alcançando em 2050 a representação de 18% do total gerado. Eólica e solar também apresentam crescimentos de 3,1% e 2,8% a.a., contribuindo para a geração elétrica nacional em cerca de 1% e 0,5% em 2050.

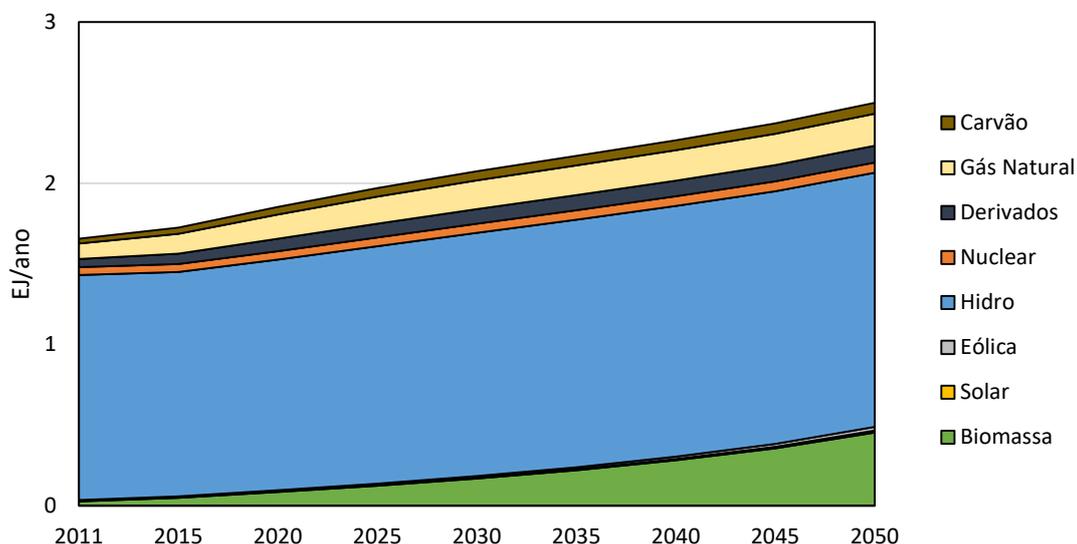


Figura 75: Geração elétrica brasileira por fonte no cenário REF do modelo TEA

O consumo final de energia no mundo é representado pelo uso majoritário de energias fósseis (carvão, gás natural e derivados de petróleo), representando cerca de 75% do total consumido no ano base e 64% em 2050, de acordo com a Figura 76. A redução da participação de energias fósseis no consumo final é explicada por um maior consumo de eletricidade, cujo consumo cresce em média cerca de 1,7% a.a., representando em 2050 cerca de 25% do total consumido. Destaca-se o crescimento do consumo de biocombustíveis no mundo, com um crescimento médio de 9,7% a.a. O consumo final de biomassa representa em média cerca de 8% do total consumido em 2050.

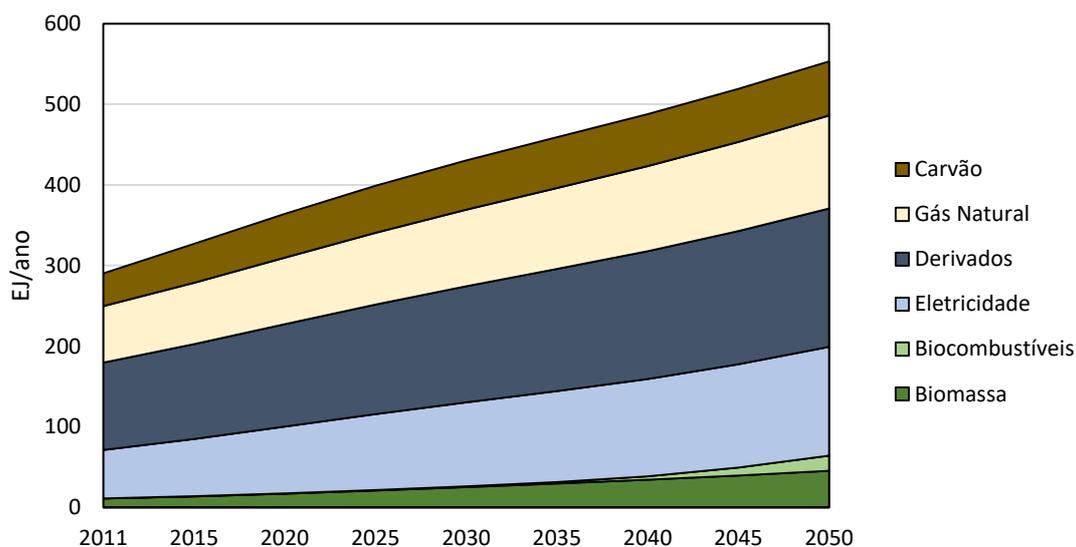


Figura 76: Consumo final de energia global no cenário REF do modelo TEA

No Brasil, o consumo final de energia fóssil também tem alta representatividade, cerca de 58% no ano base, sendo 45% referente à derivados de petróleo, conforme a Figura 77. Em 2050, a representação de fósseis se reduz para 50% em virtude do maior consumo de eletricidade, em média cerca de 23% do consumo total, e do consumo de biocombustível que apresenta crescimento de 5,8% a.a., representando em 2050 cerca de 10% do total de energia consumida no país. O consumo final de biomassa representa em média cerca de 18% do total de energia consumida.

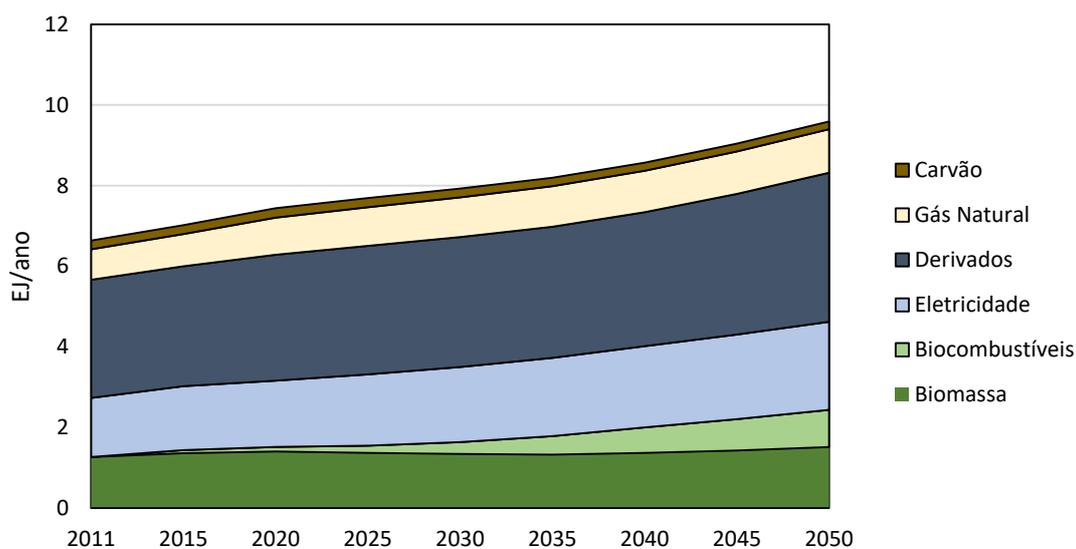


Figura 77: Consumo final de energia do Brasil no cenário REF do modelo TEA

No que tange as emissões globais de GEE, destacam-se as emissões de CO₂ referentes à queima de combustíveis fósseis, as quais respondem por cerca de 58% das emissões de GEE do ano base, cerca de 29 GtCO₂eq, conforme Figura 78. Sua representação aumenta no decorrer do tempo, alcançando cerca de 80%, sendo 54% referente à queima de carvão, a qual apresenta um crescimento médio de 1,3% a.a. As emissões de CO₂ da indústria de processo representam em média cerca de 3% do total de emissões globais de GEE. As emissões de CO₂ oriundas da mudança do uso do solo apresentam queda de 5,3% a.a., da mesma forma que as emissões de CH₄ e N₂O com quedas de 1,4% e 0,6% a.a., respectivamente. As emissões de CH₄ e N₂O oriundas da energia respondem juntas em média por cerca de 13% do total de emissões de GEE mundiais.

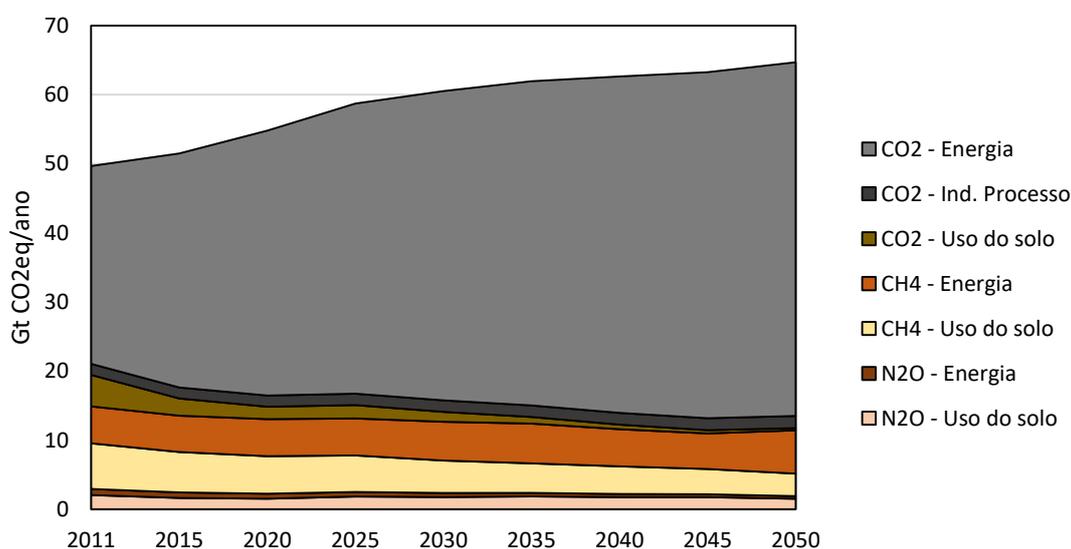


Figura 78: Emissões de GEE globais por tipo de gás e origem no cenário REF do modelo TEA

No Brasil, as emissões oriundas da mudança do uso do solo têm maior representatividade, cerca de 80% no ano base, sendo mais de 50% referente a emissões de CO₂, em sua maioria ocasionada por queimadas, conforme Figura 79. Estas emissões de CO₂ apresentam uma queda em média de 4% a.a., destacando-se apenas um crescimento no período de 2020-2025 oriundo da intensificação da agropecuária. As emissões de CH₄ oriundas do uso do solo referem-se basicamente às emissões oriundas da fermentação entérica de animais ruminantes que, no Brasil, respondem por cerca de 22% das emissões do ano base e 42% das emissões em 2050. As emissões de CH₄ oriundas da energia apresentam crescimento médio de 3,4% a.a. Já as emissões de CO₂

oriundas da queima de combustíveis fósseis apresentam crescimento médio de 0,5% a.a., representando cerca de 23% do total de emissões de GEE brasileiras em 2050. Cabe ressaltar também o crescimento médio de 1,3% a.a. das emissões de N₂O oriundas do uso do solo, que representam basicamente o uso de fertilizantes na agricultura, alcançando cerca de 17% do total de emissões de GEE em 2050.

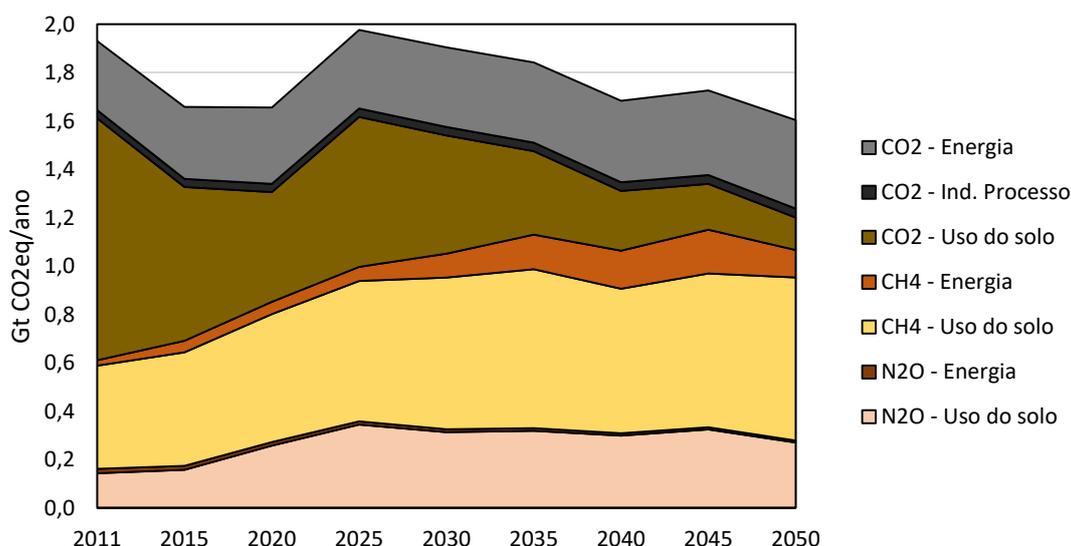


Figura 79: Emissões de GEE brasileiras por tipo de gás e origem no cenário REF do modelo TEA

Grande parte das emissões de GEE brasileiras têm origem no uso do solo e, portanto, os setores agropecuários devem ter uma preocupação quanto aos *trade-offs* que envolvem a produção, principalmente, quando se refere à nobre atividade de produzir alimentos. Para os gráficos a seguir, a produção total brasileira é representada pela cor cinza, onde se destacam as exportações (cinza hachurado em vermelho). A diferença entre a produção total e as exportações representa a produção para uso doméstico. A oferta total é representada pelo somatório da produção total, exportações inclusive, e as importações (azul). De acordo com a Figura 80, o setor agrícola (AGR) brasileiro apresenta um índice de crescimento que alcança em 2050 3,4x a produção do ano base, o que significa um crescimento médio de cerca de 2,5% a.a. As exportações de produtos agrícolas respondem por cerca de 20% da produção do ano base, mas, durante o período de análise, apresentam um crescimento em médio de 4,5% a.a., de modo que cerca de 55% da produção nacional é exportada ao final do período. As importações apresentam um crescimento superior a produção doméstica, alcançando em 2050 um índice de 2,2x a importação do ano base.

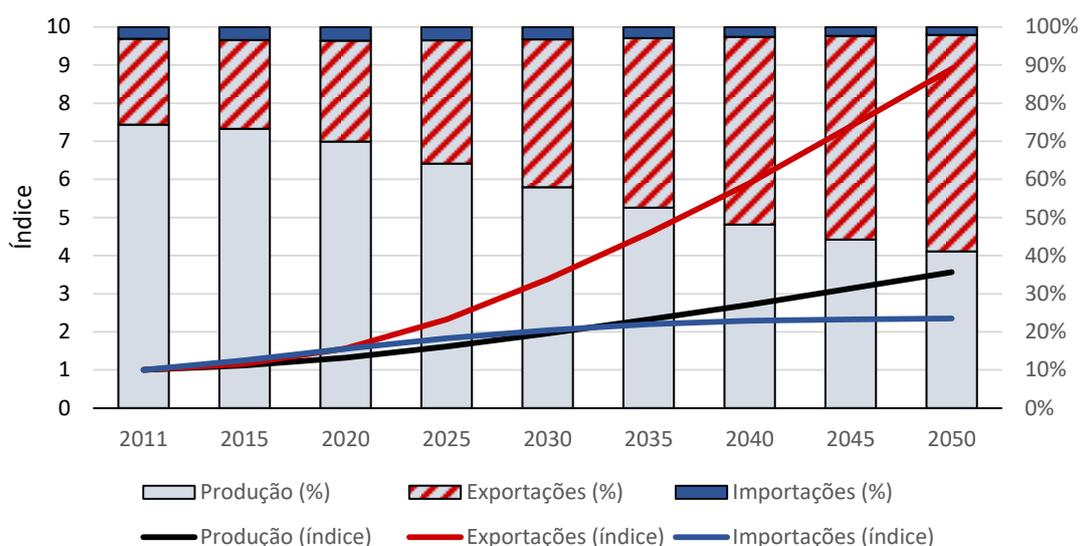


Figura 80: Evolução da produção e do comércio internacional agrícola (AGR) brasileiro no cenário REF do modelo TEA

A produção da pecuária (CTL) brasileira apresenta um crescimento médio de 1,4% a.a., alcançando em 2050 um índice de 1,9x a produção do ano base, conforme a

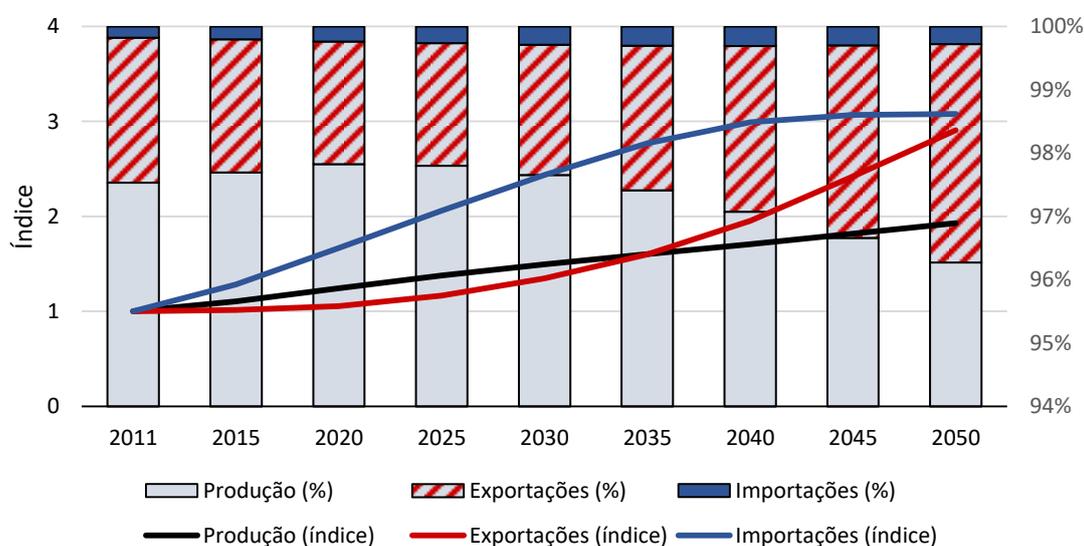


Figura 81. Em média, cerca de 97% da produção da pecuária nacional é usada para abastecer o país, restando cerca de 3% que é exportado⁷⁸. Mesmo representando pouco relacionado a oferta total, vale dizer que o comércio internacional de CTL apresenta um crescimento superior a produção, de modo que, no decorrer do período,

⁷⁸ Vale ressaltar que o setor de pecuária de corte (CTL) representa a produção de animais vivos, o que explica a reduzida exportação do setor.

aumenta a demanda externa por produtos da pecuária nacional, mas também a demanda nacional por produtos estrangeiros.

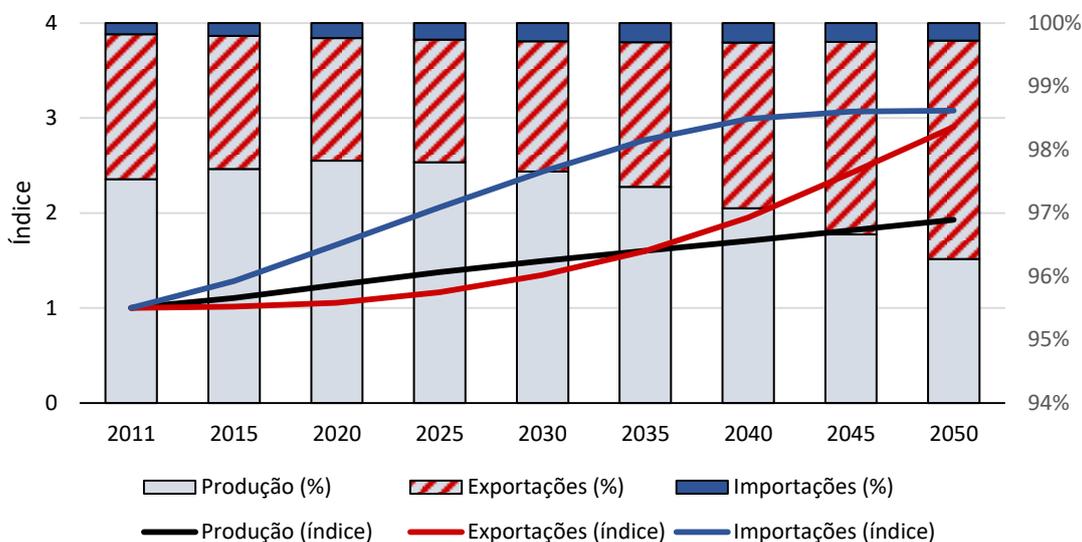


Figura 81: Evolução da produção e do comércio internacional da pecuária (CTL) brasileira no cenário REF do modelo TEA

De acordo com a Figura 82, pode-se observar que a produção de outros animais (OAP) nacional apresenta crescimento, alcançando em 2050 um índice de 1,7x a produção do ano base, representando cerca de 97% da produção nacional. As exportações de outros animais representam cerca de 3% do total da produção nacional e apresentam um crescimento médio de 2,5% a.a. As importações de OAP alcançam em 2050 um índice de 1,7x a produção do ano base, representando menos de 0,5% do total ofertado domesticamente.

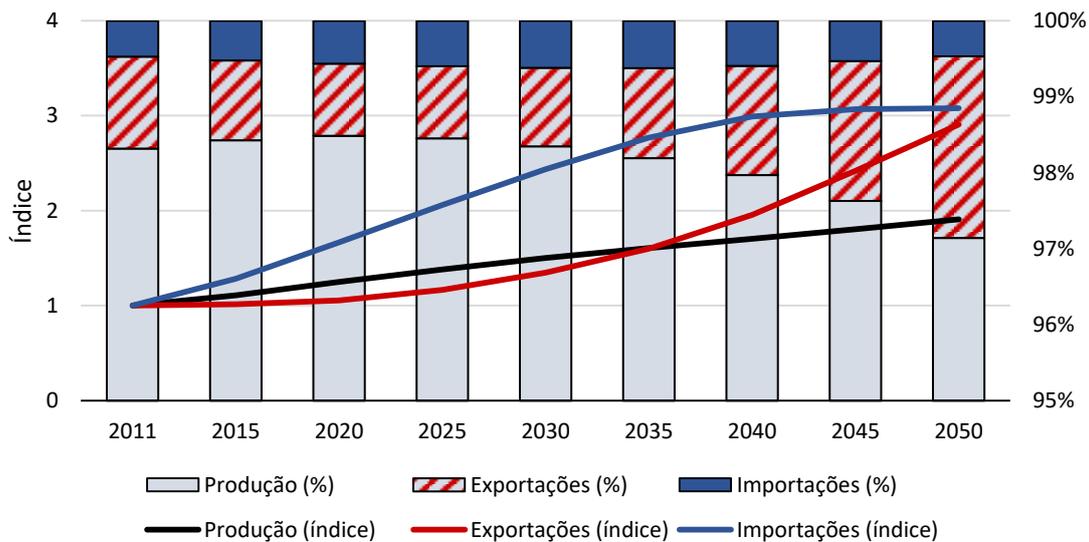


Figura 82: Evolução da produção e do comércio internacional de outros animais (OAP) brasileira no cenário REF do modelo TEA

No que tange a produção da indústria de alimentos nacional, a Figura 83 mostra que a produção de alimentos sem carne (OFD) apresenta um crescimento médio de 1,3% a.a., alcançando em 2050 um índice de 1,8x a produção do ano base. Em média, cerca de 80% da produção de alimentos se destina ao mercado doméstico, mas no decorrer do período há um crescimento das importações em cerca de 2,7% a.a. As exportações, em média, representam cerca de 12% da produção nacional, com um crescimento semelhante a produção nacional de cerca de 1,1% a.a.

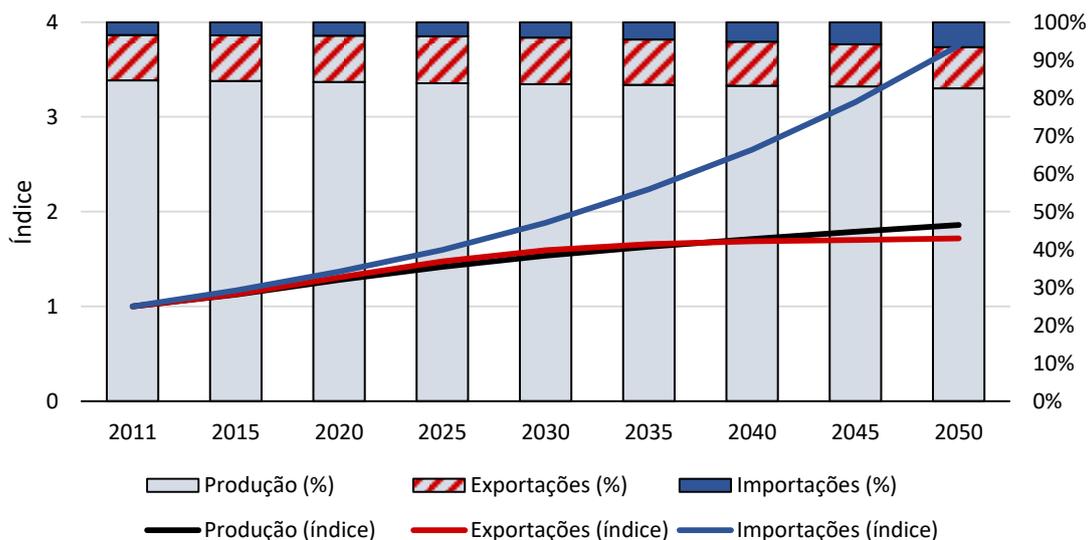


Figura 83: Evolução da produção e do comércio internacional da indústria de alimentos sem carne (OFD) brasileira no cenário REF do modelo TEA

De acordo com a Figura 84, a produção da indústria de alimentos com carne (OMT) nacional apresenta um crescimento médio de 1,8% a.a., alcançando em 2050 um índice de 2x a produção do ano base. Cerca de 80%, em média, da produção nacional é destinada ao mercado doméstico, mas vale ressaltar o crescimento médio de 1,8% a.a. das exportações durante o período. As importações representam menos de 1% do total da oferta doméstica de OMT.

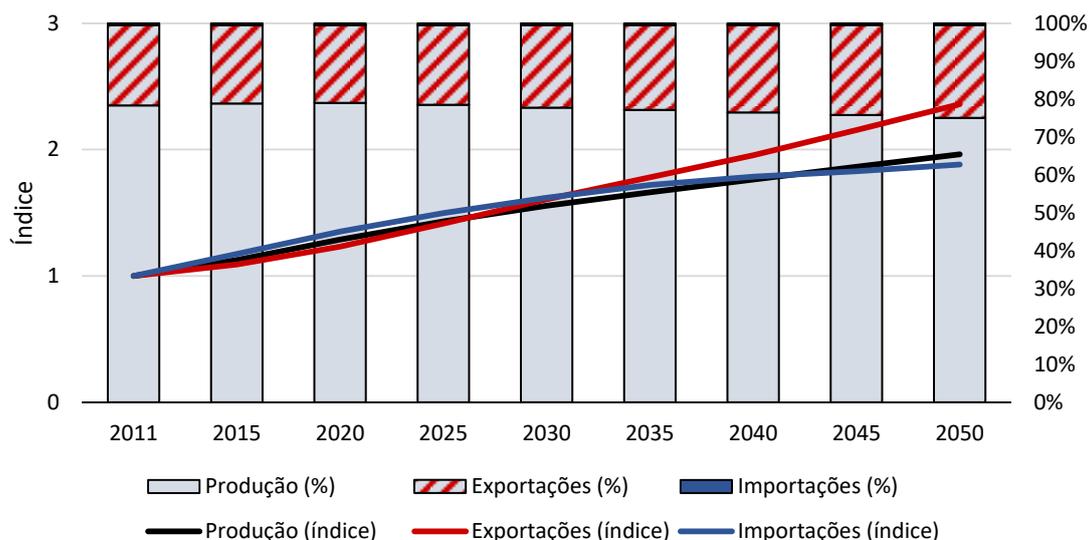


Figura 84: Evolução da produção e do comércio internacional da indústria de alimentos com carne (OMT) no cenário REF do modelo TEA

A demanda brasileira por produtos agropecuários e por produtos da indústria de alimentos pode ser observada nas Figura 85 a Figura 89. Observa-se que a demanda por produtos agrícolas (AGR) de setores intermediários é superior à demanda das famílias, conforme a Figura 85, o que é explicado pelas famílias, geralmente, consumirem alimentos no final da cadeia industrial. O mesmo é observado para produtos da pecuária (CTL) e outros animais, conforme as Figura 86 e Figura 87. Setores da indústria de alimentos são os maiores demandantes da produção agropecuária, além do setor de serviços.

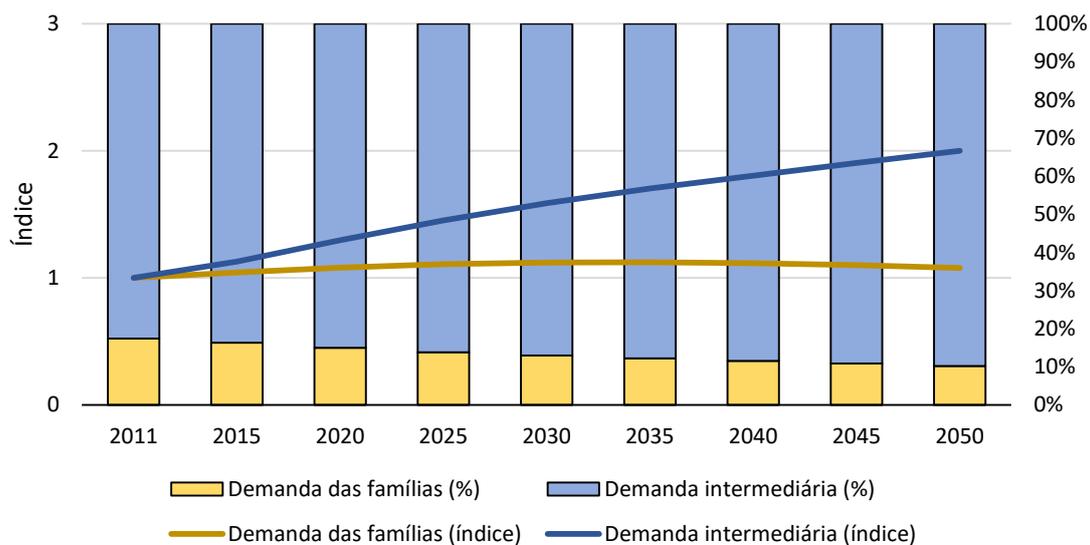


Figura 85: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos agrícolas (AGR) no cenário REF do modelo TEA

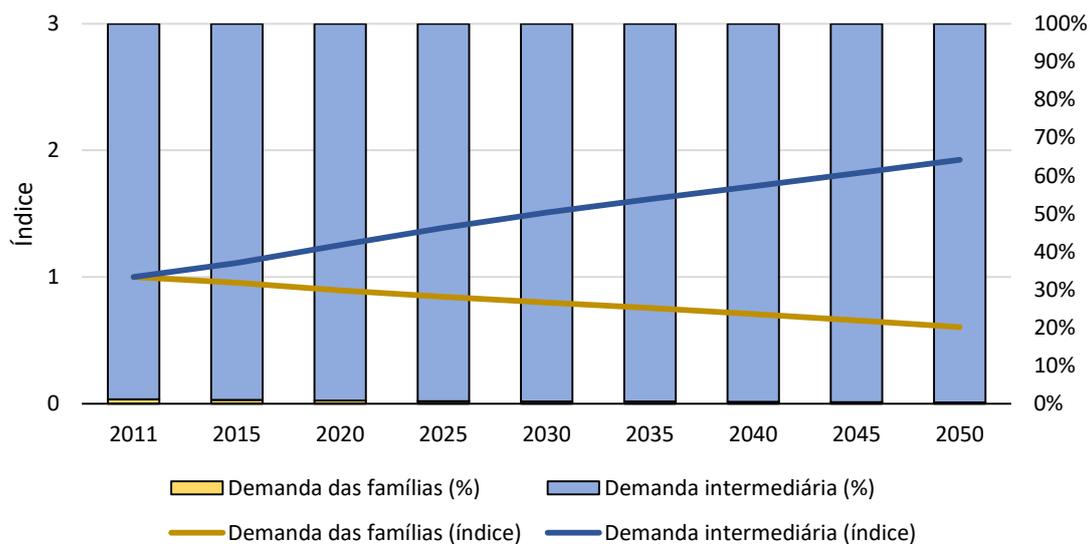


Figura 86: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos da pecuária (CTL) no cenário REF do modelo TEA

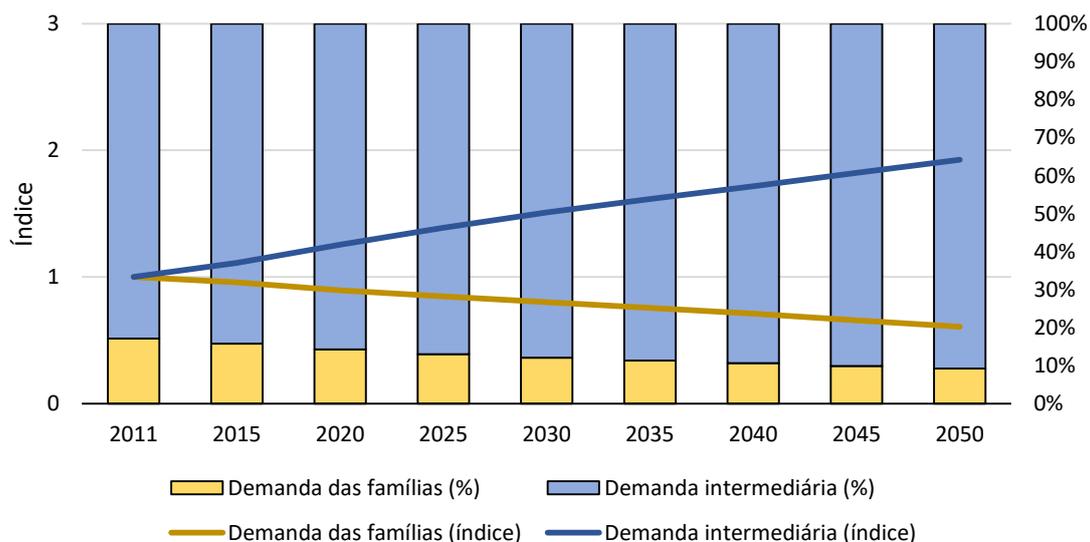


Figura 87: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos de outros animais (OAP) no cenário REF do modelo TEA

No que se refere à demanda por produtos da indústria de alimentos brasileira, a participação das famílias se eleva para em média 55% para alimentos sem carne (OFD) e 70% para alimentos com carne (OMT). A Figura 88 mostra que a demanda das famílias por alimentos sem carne apresenta um crescimento médio de 1,2% a.a., alcançando em 2050 um índice de 1,8x a demanda do ano base. Já a demanda intermediária apresenta um crescimento médio de 1,5% a.a. durante o período, alcançando em 2050 um índice de 2,1x a demanda do ano base.

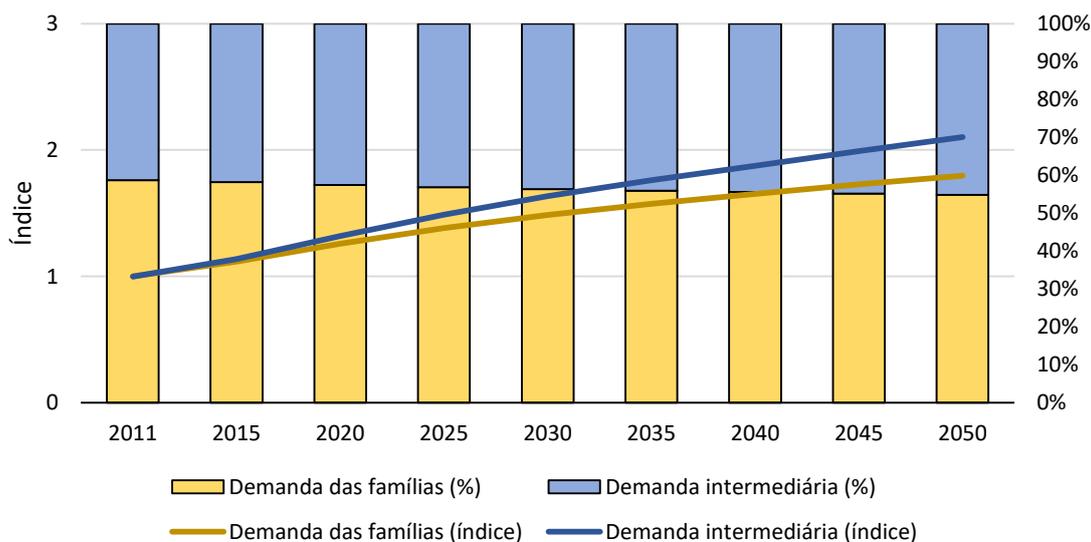


Figura 88: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários por produtos da indústria de alimentos sem carne (OFD) no cenário REF do modelo TEA

De acordo com a Figura 89, a demanda das famílias por alimentos com carne cresce em média no período cerca de 1,3% a.a., alcançando em 2050 um índice de 1,9x a demanda do ano base. No que se refere à demanda intermediária, o índice de crescimento é cerca de 2,2x a demanda do ano base, o que significa um crescimento médio de 1,6% a.a.

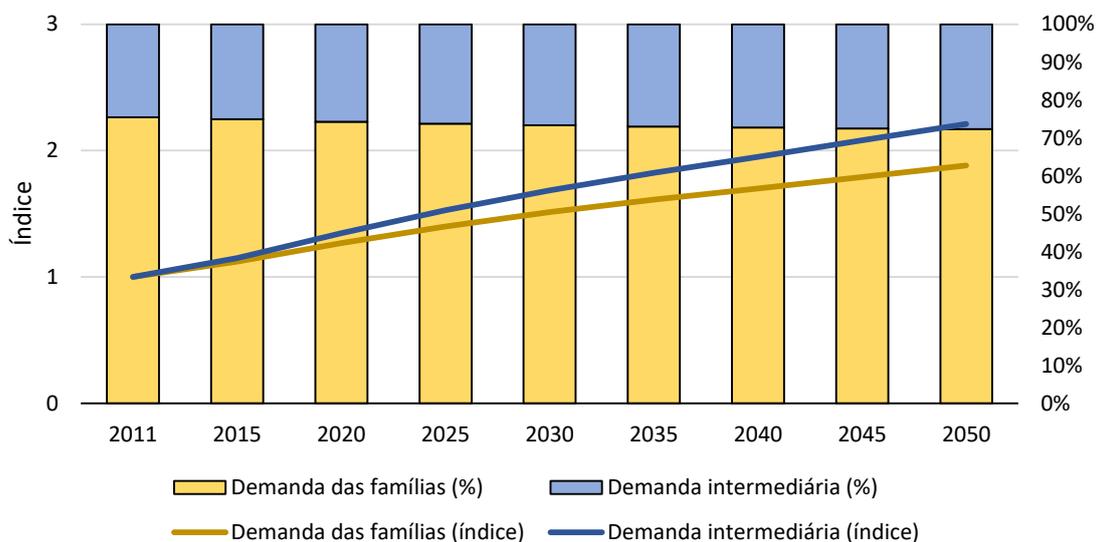


Figura 89: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários por produtos da indústria de alimentos com carne (OMT) no cenário REF do modelo TEA

4.2.2. Cenário de Mudança Comportamental de Dieta (REF_50)

Nesta seção são apresentados os resultados do cenário de mudança comportamental de dieta (REF_50), cujo foco de análise se dará naqueles indicadores que devem ser mais impactados pela incorporação de mudanças nas preferências alimentares dos agentes econômicos. Trata-se, portanto, de um choque comportamental via quantidade e não preços relativos. No que se refere aos indicadores econômicos, ressalta-se que o cenário REF_50 não apresenta mudanças quanto ao PIB das regiões do modelo e, portanto, são idênticos ao cenário REF.

Nos gráficos a seguir, participações e índices de produção se referem a quantidades, não a valores monetários que são influenciados por preços de mercado. Quanto à produção setorial, a Figura 90 mostra que a produção agropecuária global apresenta um índice inferior aos demais setores, porém um crescimento médio de 2,2% a.a., alcançando em 2050 um índice de 2,9x a produção do ano base. Setores industriais e transportes apresentam um índice semelhante, alcançando um crescimento de 3,5x em 2050 em relação ao ano base. Serviços também apresentam crescimento, alcançando em 2050 cerca de 3,3x a produção do ano base.

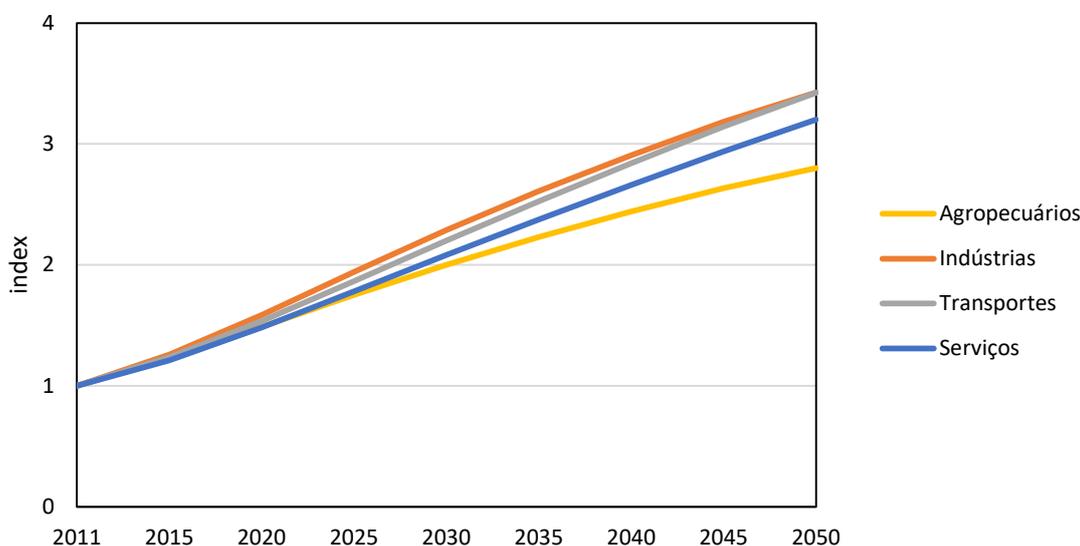


Figura 90: Índice de produção setorial global no cenário REF_50 do modelo TEA

Quanto a produção setorial nacional, conforme a Figura 91, os setores agropecuários se destacam na economia brasileira e apresentam um crescimento de 2,1% a.a., alcançando em 2050 um índice de 2,8x a produção do ano base, levemente abaixo do crescimento médio global. O setor de serviços no Brasil também tem

representatividade, alcançando em 2050 cerca de 2,6x a produção do ano base, seguido pelo setor de transportes com cerca de 2,3x. O crescimento da indústria nacional fica abaixo da média global, alcançando em 2050 apenas 1,9x a produção do ano base, o que significa cerca de 1,3% a.a.

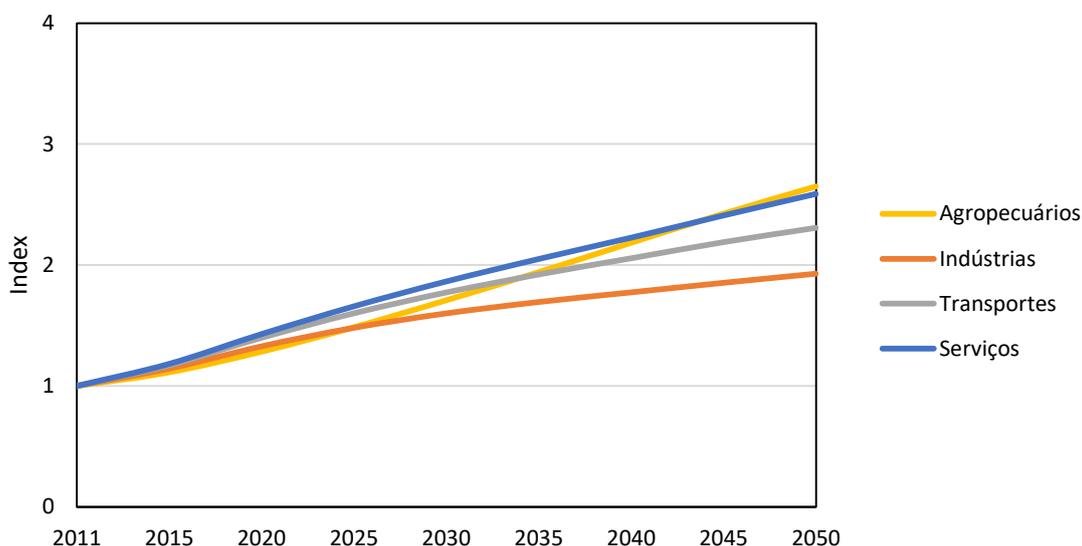


Figura 91: Índice de produção setorial brasileiro no cenário REF_50 do modelo TEA

A composição da produção agropecuária brasileira pode ser visualizada na Figura 92. É possível observar a elevada representação da agricultura (AGR) brasileira, que responde por cerca de 65% no ano base, mas em 2050 representa cerca de 82% do total da produção agropecuária. A produção animal, representada pela pecuária (CTL) e outros animais (OAP), representa cerca de 34% no ano base, mas, no decorrer do período reduz participação, alcançando em 2050 cerca de 16% da produção agropecuária brasileira. O setor de pesca (FSH) mantém uma representação média de cerca de 1,5% do total da produção agropecuária.

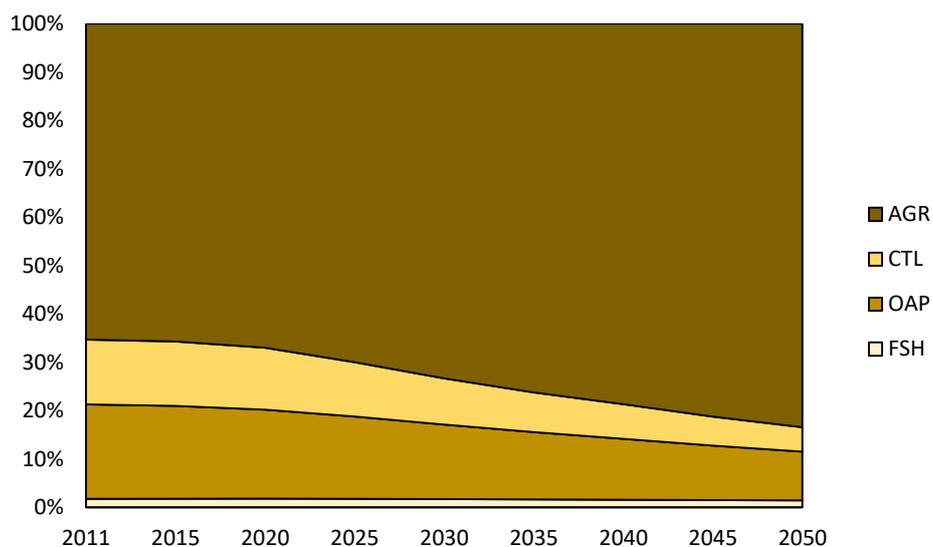


Figura 92: Composição da produção agropecuária brasileira no cenário REF_50 do modelo TEA

Dentre os setores industriais brasileiros, destaca-se a representação do setor de manufaturados (MAN) em média cerca de 60% do total da produção industrial, conforme a Figura 93. A indústria de alimentos, representada pela indústria de alimentos sem carne (OFD) e com carne (OMT), responde em média por cerca de 20% da produção industrial, com destaque para OFD que responde por cerca de 86% da produção de alimentos nacional, enquanto que OMT por 14%. O setor químico (CRP) representa em média cerca de 15% da produção industrial. Os setores industriais de ferro e aço (I_S) e mineral não-metálico (NMM) representam em média cerca de 4% e 2,3%, respectivamente, da produção industrial nacional.

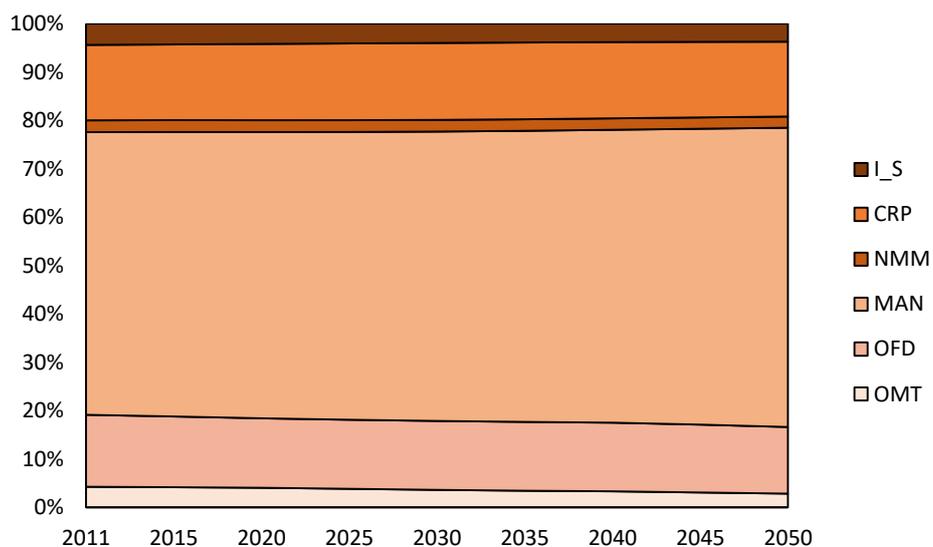


Figura 93: Composição da produção industrial brasileira no cenário REF_50 do modelo TEA

No que se refere à geração elétrica e consumo final de energia, não há diferenças significativas nos resultados do cenário REF_50 em relação ao cenário REF tanto globais quanto nacionais. Contudo, no que se refere às emissões de GEE, é possível observar na Figura 94 que as emissões de CO₂ oriundas da mudança do uso do solo apresentam queda de 5,3% a.a. As emissões de CH₄ apresentam uma queda média de 1,8% a.a., reduzindo sua participação no total de emissões globais de GEE para cerca de 4,3%. Da mesma forma, as emissões de N₂O apresentam queda média de cerca de 0,8% a.a. Isto significa que as emissões de CH₄. Para as demais emissões globais não foram identificadas mudanças em relação às do cenário REF.

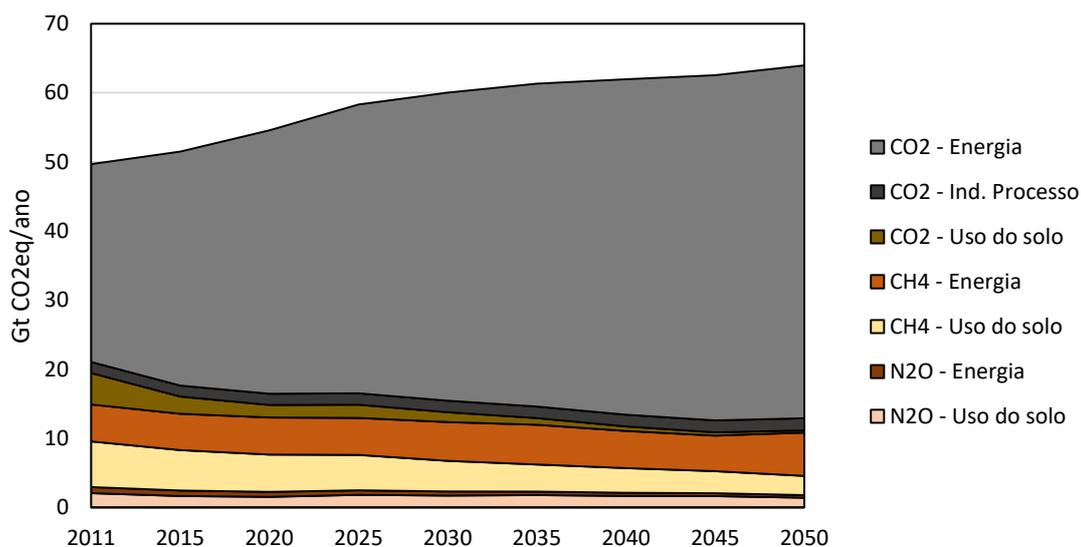


Figura 94: Emissões de GEE globais por tipo de gás e origem no cenário REF_50 do modelo TEA

No Brasil, as emissões de CO₂ oriundas da mudança do uso do solo apresentam uma queda média de 4% a.a., representando cerca de 10% das emissões de GEE brasileiras em 2050, conforme a Figura 95. As emissões de CH₄, em geral, oriundas da fermentação entérica de animais ruminantes apresentam crescimento modesto de 0,3% a.a. durante o período, representando menos de 37% das emissões totais em 2050. As emissões de N₂O oriundas do uso do solo também apresentam um crescimento médio modesto de 0,8% a.a., o que representa cerca de 15% das emissões totais em 2050. No que tange as demais emissões, não foram identificadas mudanças significativas em relação às do cenário REF.

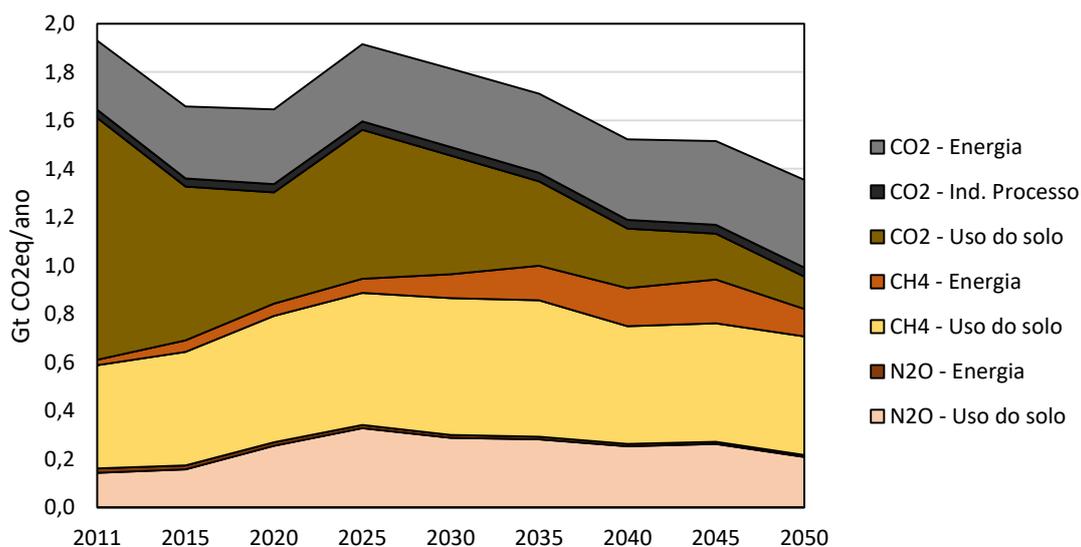


Figura 95: Emissões de GEE brasileiras por tipo de gás e origem no cenário REF_50 do modelo TEA

O baixo crescimento das emissões de CH₄ e N₂O pode ser explicado pela análise mais detalhada sobre os setores agropecuários brasileiros. Nas figuras seguintes, a produção total brasileira é representada pela cor cinza, onde se destacam as exportações (cinza hachurado em vermelho). A diferença entre a produção total e as exportações representa a produção para uso doméstico. A oferta total é representada pelo somatório da produção total, exportações inclusive, e as importações (azul). De acordo com a Figura 96, o setor agrícola (AGR) brasileiro apresenta um índice de crescimento que alcança em 2050 3,6x a produção do ano base, o que significa um crescimento médio de cerca de 2,6% a.a. As exportações de produtos agrícolas respondem por cerca de 20% da produção do ano base, mas, durante o período de análise, apresentam um crescimento em médio de 4,6% a.a., de modo que cerca de 60% da produção nacional é exportada ao final do período. As importações apresentam um crescimento superior a produção doméstica, alcançando em 2050 um índice de 2,3x a importação do ano base.

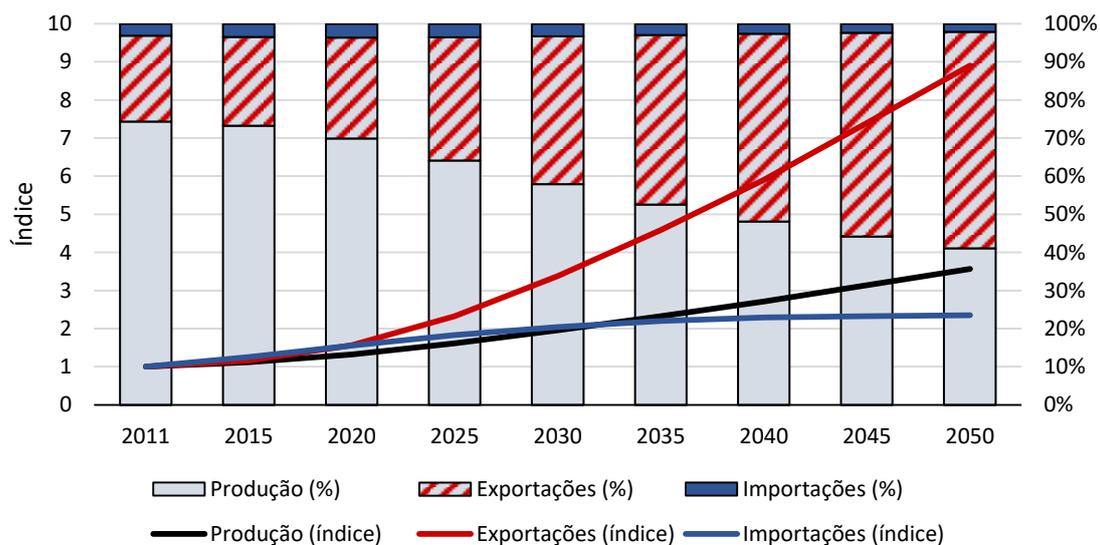


Figura 96: Evolução da produção e do comércio internacional agrícola (AGR) brasileira no cenário REF_50 do modelo TEA

A produção da pecuária (CTL) brasileira apresenta um crescimento médio modesto de 0,5% a.a., alcançando em 2050 um índice de 1,3x a produção do ano base, conforme a Figura 97. Cresce a demanda externa de produtos da pecuária em média 1,1% a.a., o que representa cerca de 3% de exportação da produção nacional em 2050. Ademais, as importações também apresentam crescimento, mas o índice mostra uma leve queda ao final do período, representando um crescimento médio de 1,4% a.a. no período de análise.

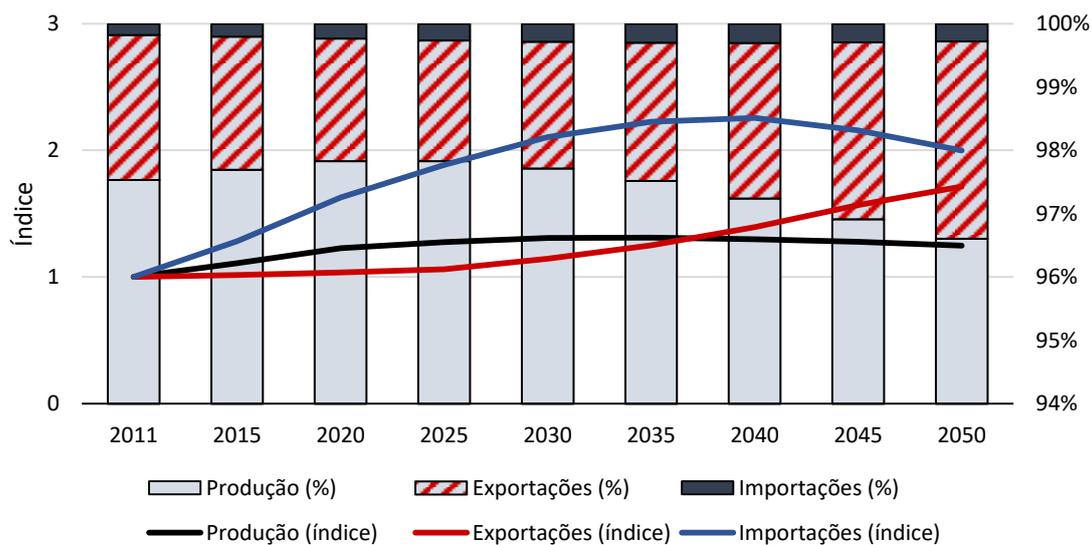


Figura 97: Evolução da produção e do comércio internacional da pecuária (CTL) brasileira no cenário REF_50 do modelo TEA

De acordo com a Figura 98, pode-se observar que a produção de outros animais (OAP) nacional apresenta um crescimento modesto, alcançando em 2050 um índice de 1,5x a produção do ano base, representando cerca de 97% da produção nacional. As exportações de outros animais representam cerca de 3% do total da produção nacional e apresentam um crescimento médio de 2,1% a.a. As importações de OAP alcançam em 2050 um índice de 1,6x a produção do ano base, representando menos de 0,5% do total ofertado domesticamente.

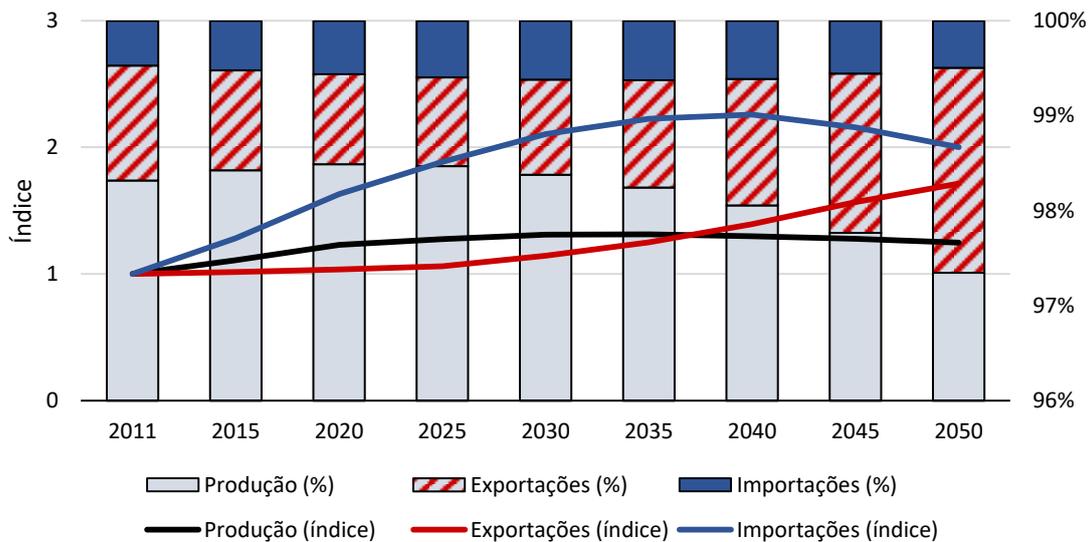


Figura 98: Evolução da produção e do comércio internacional de outros animais (OAP) brasileira no cenário REF_50 do modelo TEA

No que se refere a produção da indústria de alimentos nacional, a Figura 99 mostra que a produção de alimentos sem carne (OFD) apresenta um crescimento médio de 1,5% a.a., alcançando em 2050 um índice de 2,1x a produção do ano base. Em média, cerca de 80% da produção de alimentos se destina ao mercado doméstico, mas no decorrer do período há um crescimento das importações em cerca de 3,1% a.a. As exportações, em média, representam cerca de 12% da produção nacional, com um crescimento abaixo da produção nacional de cerca de 1,3% a.a.

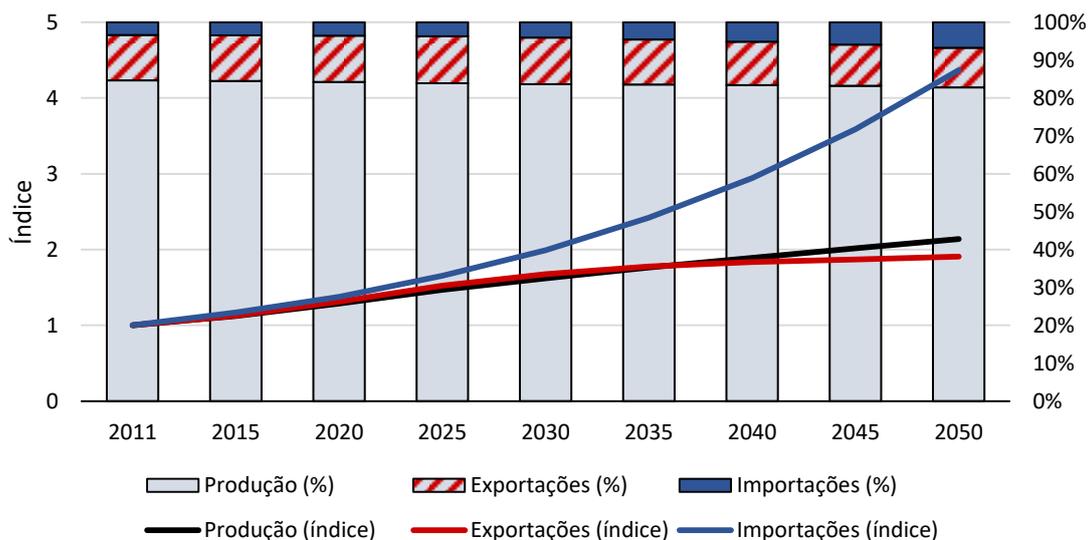


Figura 99: Evolução da produção e do comércio internacional da indústria de alimentos sem carne (OFD) no cenário REF_50 do modelo TEA

De acordo com a Figura 100, a produção da indústria de alimentos com carne (OMT) nacional apresenta um crescimento médio modesto durante o período de 0,3% a.a., alcançando em 2050 um índice de 1,2x a produção do ano base. Cerca de 80%, em média, da produção nacional é destinada ao mercado doméstico, mas vale ressaltar o crescimento médio de apenas 0,5% a.a. das exportações durante o período. As importações representam menos de 1% do total da oferta doméstica de OMT.

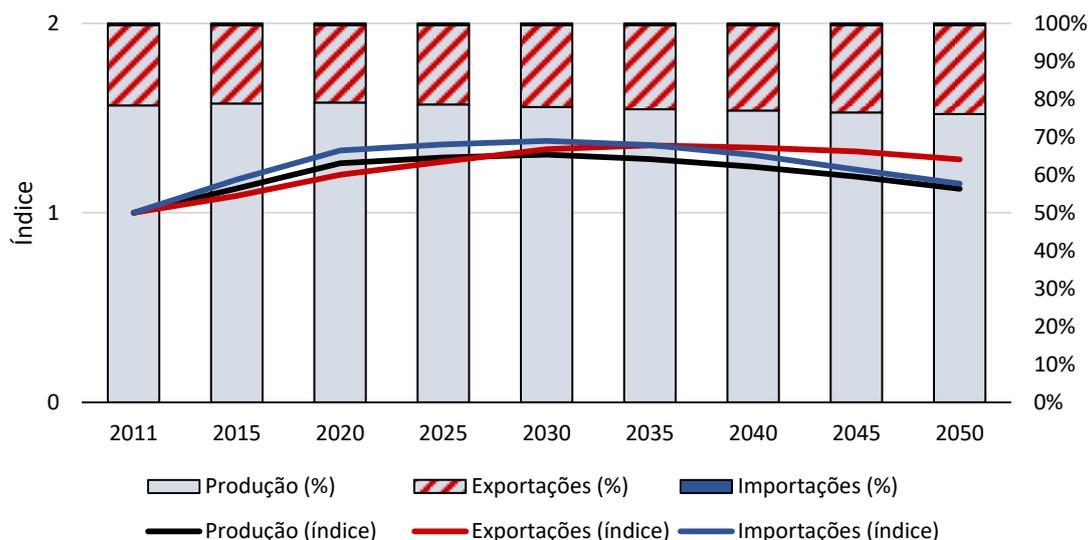


Figura 100: Evolução da produção e do comércio internacional da indústria de alimentos com carne (OMT) no cenário REF_50 do modelo TEA

Com relação à demanda brasileira por produtos agropecuários, pode-se observar na Figura 101 que a demanda por produtos agrícolas (AGR) de setores intermediários apresenta um crescimento médio de 1,6% a.a., alcançando o índice de 2,2x a demanda do ano base. No que se refere a demanda das famílias, há um crescimento modesto de 0,1% a.a., alcançando um índice de 1,1x a demanda do ano base. Setores intermediários respondem em média por cerca de 90% da demanda total de produtos agrícolas.

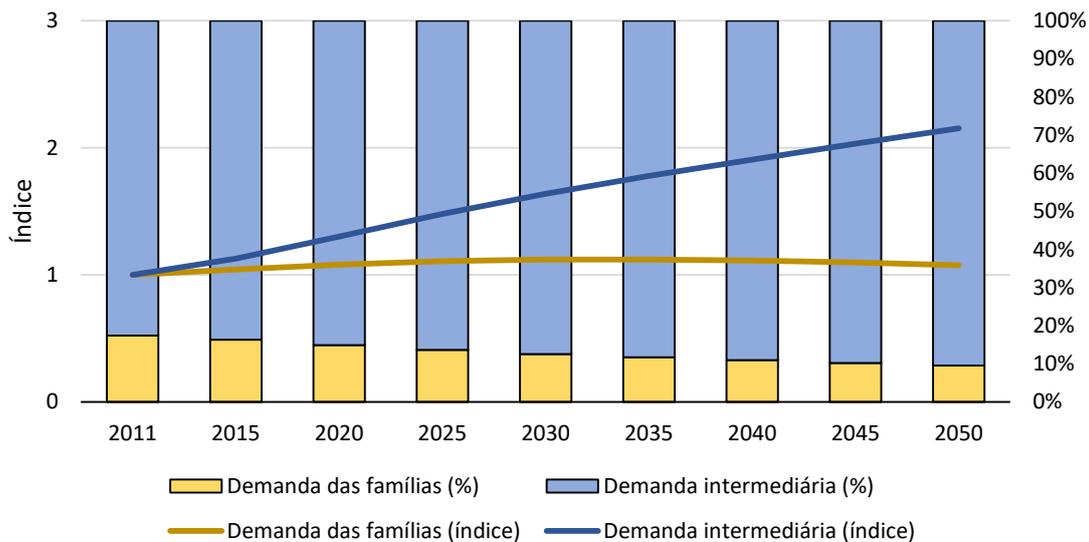


Figura 101: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos agrícolas (AGR) no cenário REF_50 do modelo TEA

Quanto a demanda brasileira por produtos da pecuária (CTL) e outros animais (OAP), de acordo com as Figura 102 e Figura 103, é possível observar um crescimento modesto da demanda de setores intermediários de cerca de 0,5% e 1% a.a., representando em média quase a totalidade da demanda de produtos de CTL e cerca de 90% dos produtos de OAP. A demanda das famílias por produtos de OAP apresenta uma queda média de 0,2% a.a.

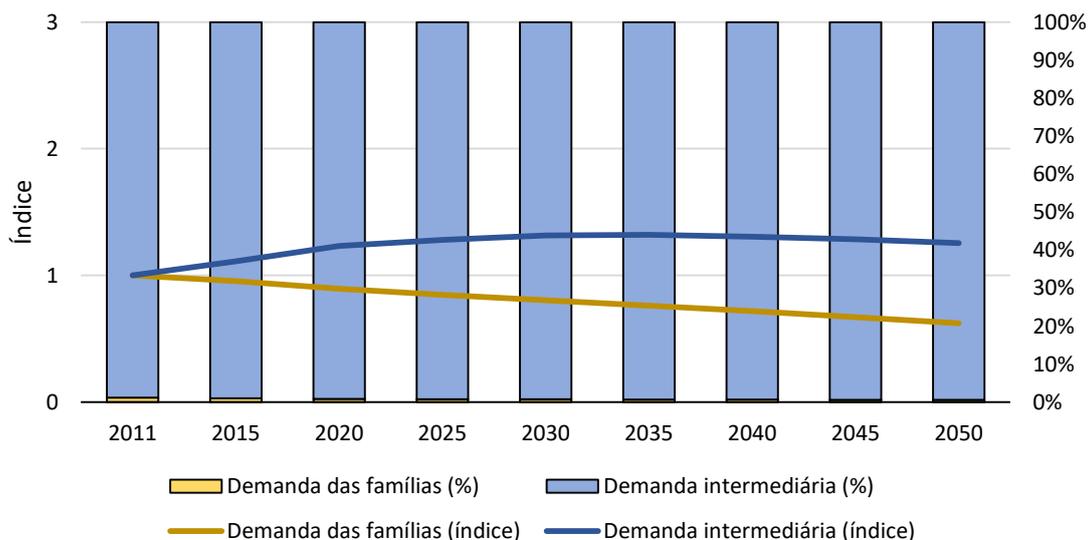


Figura 102: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos da pecuária (CTL) no cenário REF_50 do modelo TEA

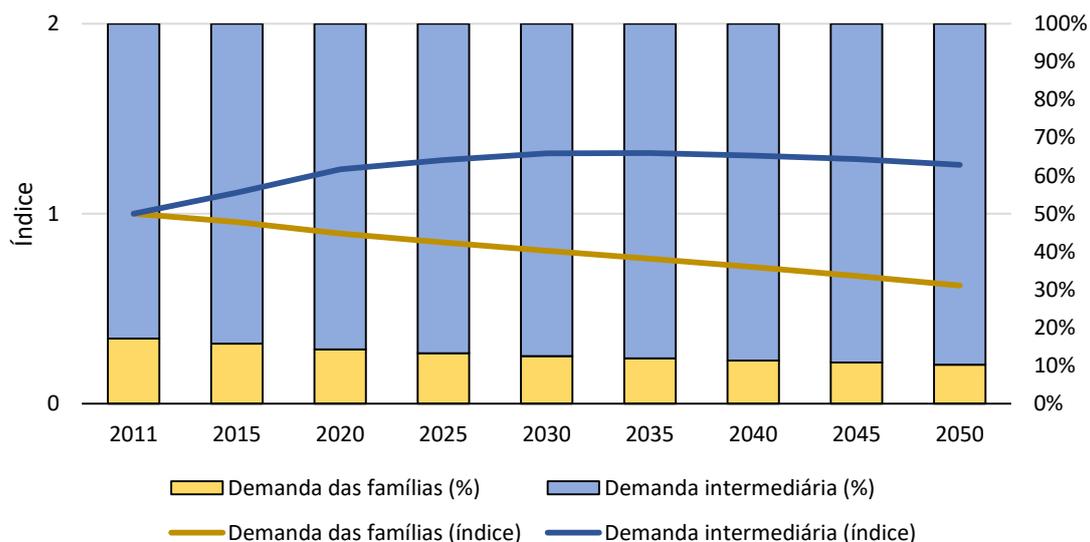


Figura 103: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários por produtos de outros animais (OAP) no cenário REF_50 do modelo TEA

Com relação à demanda brasileira por produtos da indústria de alimentos, a Figura 104 mostra que a demanda de setores intermediários por alimentos sem carne (OFD) apresenta um crescimento médio de 1,8% a.a., alcançando um índice de 2,4x a demanda do ano base. Quanto a demanda das famílias por alimentos sem carne, há um crescimento médio de 1,5% a.a., alcançando um índice de 2,1x a demanda do ano base. A participação das famílias na demanda por alimentos sem carne se mantém em média 55%, enquanto que a demanda de setores intermediários responde por 45%.

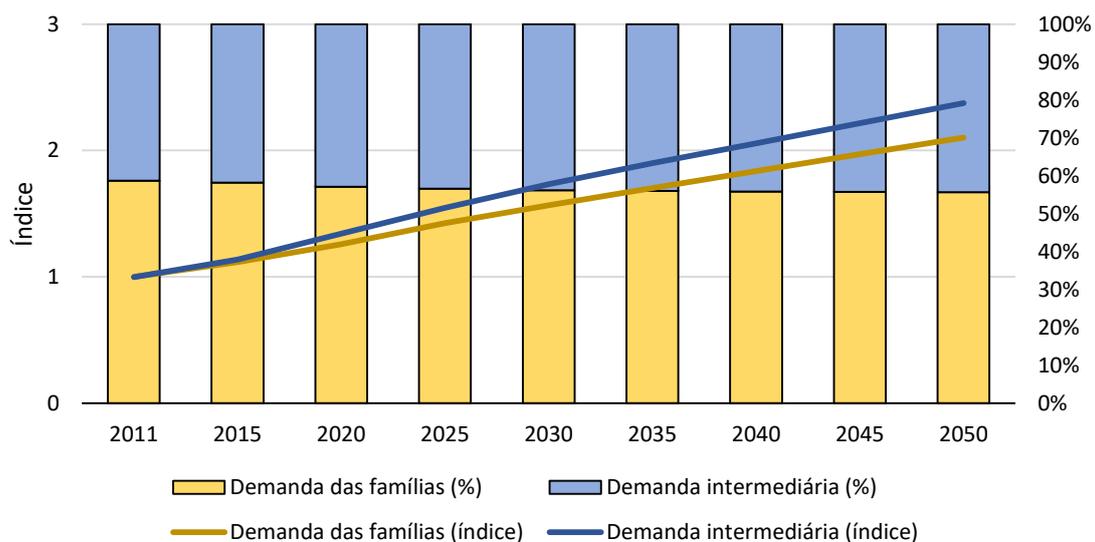


Figura 104: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos da indústria de alimentos sem carne (OFD) no cenário REF_50 do modelo TEA

De acordo com a Figura 105, a demanda das famílias por alimentos com carne apresenta um crescimento modesto de 0,3% a.a., alcançando um índice 1,2x a demanda do ano base. No que diz respeito a demanda de setores intermediários, há uma queda média de 0,2% a.a., alcançando um índice abaixo de 1 em 2050 no valor de 0,9x, o que significa uma demanda por OMT menor que a do ano base. A participação da demanda das famílias por alimentos com carne representa em média cerca de 80%, enquanto que a demanda intermediária responde por 20% do total demandado.

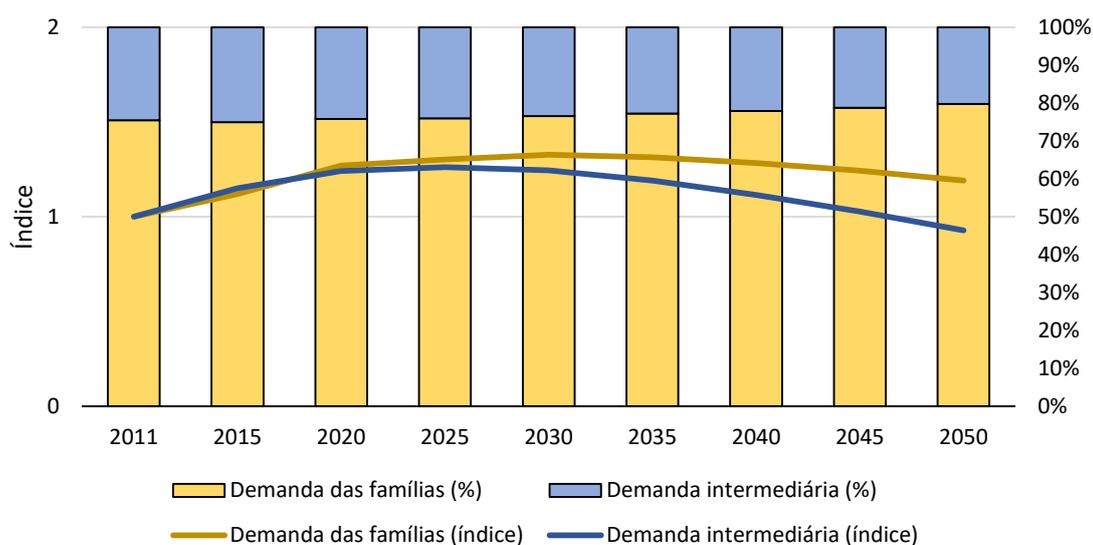


Figura 105: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos da indústria de alimentos com carne (OMT) no cenário REF_50 do modelo TEA

4.2.3. Cenário Climático de Estabilização da Temperatura Média Global em até 2°C (2.0C)

Nesta seção são apresentados os resultados do cenário climático de estabilização da temperatura média global em até 2°C (2.0C), em que se analisam os impactos da criação de um mercado de carbono para emissões de CO₂ e impostos diferenciados para CH₄ e N₂O na agropecuária. A começar por indicadores econômicos, a Figura 106 mostra a evolução do PIB para todas as regiões do modelo TEA, de modo que é possível observar que os países de maior participação no PIB global seguem sendo o Oeste Europeu (WEU), a China (CHN) e os Estados Unidos (USA). Em termos de taxa média de crescimento anual, destaca-se o crescimento da Índia (IND) com cerca de 4,4% a.a., bem como da região africana (AFR), exceto África do Sul, com crescimento

médio de 4% a.a. De acordo com essa trajetória, o PIB brasileiro (BRA) representará cerca de 2,1% do PIB global em 2050, o que significa um crescimento médio de 2,2% a.a. O PIB global alcança a marca de 211 trilhões de US\$ em 2050, enquanto que o PIB brasileiro alcança 6,8 trilhões de US\$ em 2050.

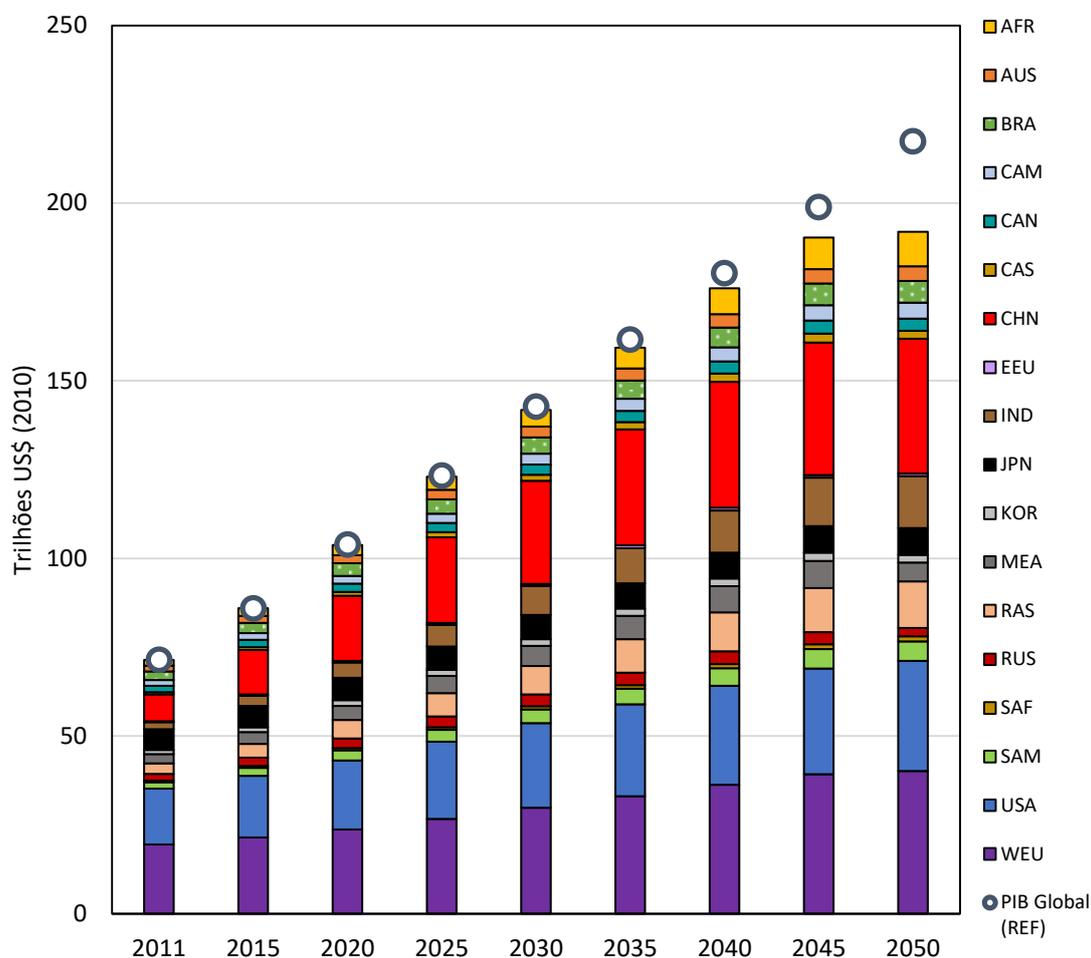


Figura 106: Evolução do PIB mundial desagregado para cada região no cenário 2.0C do modelo TEA

No que se refere a evolução da composição do PIB global e nacional, não foram identificadas mudanças significativas em relação ao cenário REF. Da mesma forma, não foram identificadas alterações na composição da produção setorial global. Nas figuras seguintes, participações e índices de produção se referem a quantidades, não valores monetários que são influenciados por preços de mercado. Em termos de crescimento setorial, a Figura 107 mostra que setores industriais e transportes apresentam um índice semelhante, alcançando um crescimento de 3,4x em 2050 em relação ao ano base. Serviços também apresentam crescimento, alcançando em 2050 cerca de 3,2x a

produção do ano base. A produção agropecuária apresenta o menor índice, alcançando em 2050 cerca de 2,8x a produção do ano base.

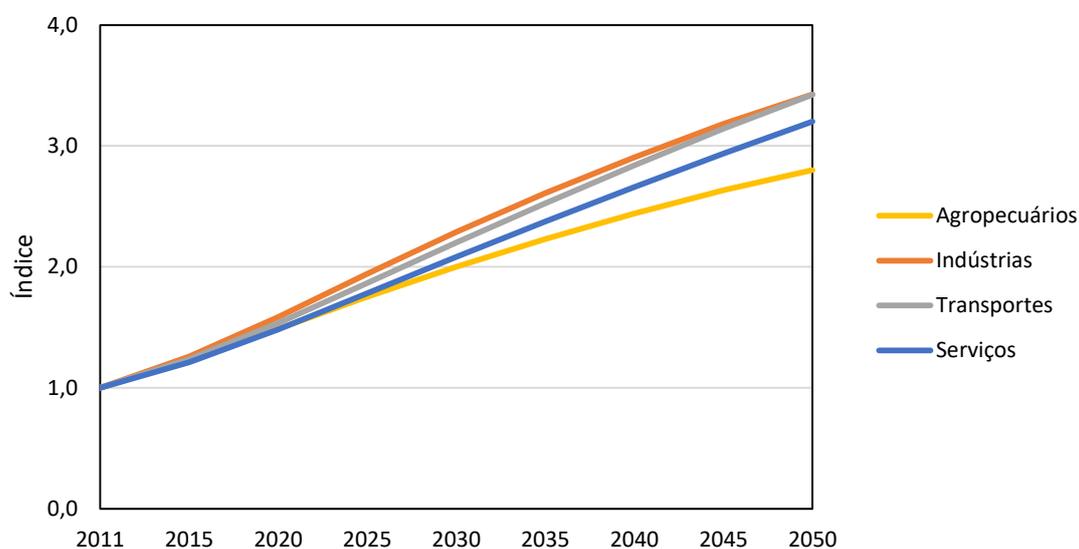


Figura 107: Índice de produção setorial global no cenário 2.0C do modelo TEA

No que se refere ao crescimento dos setores produtivos brasileiros, a Figura 108 mostra que o setor de serviços e a produção agropecuária se destacam na economia brasileira. O setor de serviços no Brasil representa cerca de 52% da produção total nacional, alcançando em 2050 cerca de 2,6x a produção do ano base, o que significa um crescimento médio de 2% a.a. A produção agropecuária alcança em 2050 cerca de 2,6x a produção do ano base e, portanto, levemente abaixo do crescimento médio global. O setor de transportes também apresenta crescimento, alcançando em 2050 cerca de 2,3x a produção do ano base. Destaca-se o crescimento da indústria nacional que fica abaixo da média global, alcançando em 2050 apenas 1,9x a produção do ano base, o que significa um crescimento de 1,3% a.a.

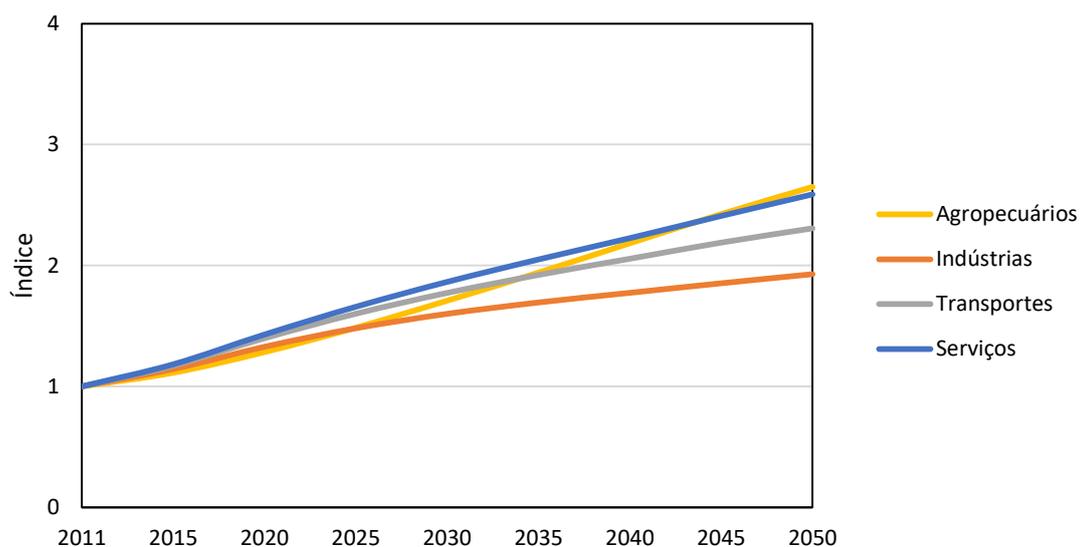


Figura 108: Índice de produção setorial brasileiro no cenário 2.0C do modelo TEA

A composição da produção agropecuária brasileira pode ser visualizada na Figura 109. É possível observar a alta representatividade da agricultura (AGR) brasileira, que responde por cerca de 65% no ano base, mas em 2050 representa cerca de 83% do total da produção agropecuária. A produção animal, representada pela pecuária (CTL) e outros animais (OAP), representa cerca de 34% no ano base, mas, durante o período, reduz sua participação alcançando em 2050 cerca de 15% da produção agropecuária brasileira. O setor de pesca (FSH) mantém uma representação média de cerca de 1,5% do total da produção agropecuária.

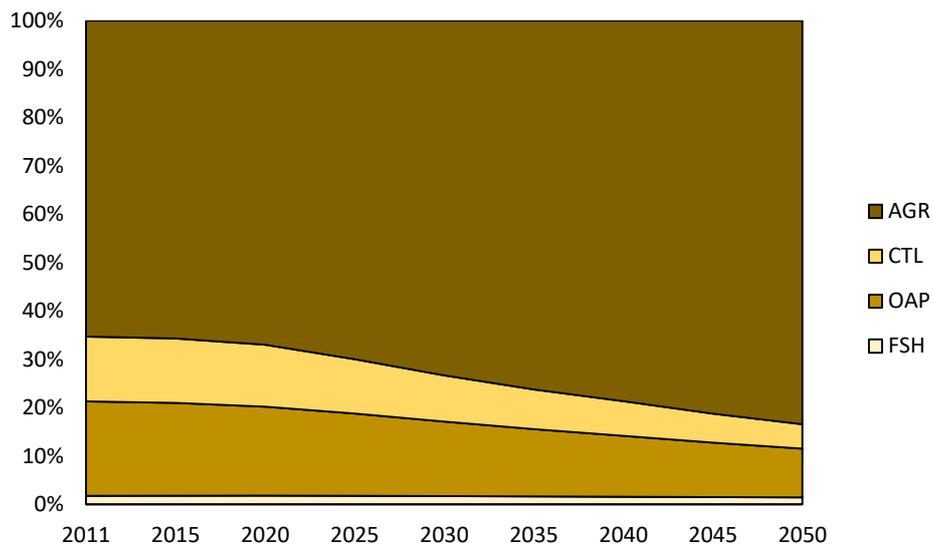


Figura 109: Composição da produção agropecuária brasileira no cenário 2.0C do modelo TEA

Dentre os setores industriais brasileiros, destaca-se a representação do setor de manufaturados (MAN), definido por um agregado das indústrias de minério, automobilística, construção civil, papel e celulose, etc., em média cerca de 60% do total da produção industrial, conforme a Figura 110. A indústria de alimentos, representada pela indústria de alimentos sem carne (OFD) e com carne (OMT), responde em média por cerca de 17% da produção industrial, com destaque para OFD que responde por cerca de 83% da produção de alimentos nacional. O setor químico (CRP) representa em média cerca de 15% da produção industrial. Os setores industriais de ferro e aço (I_S) e mineral não-metálico (NMM) representam em média cerca de 3,7% e 2,3%, respectivamente, da produção industrial nacional.

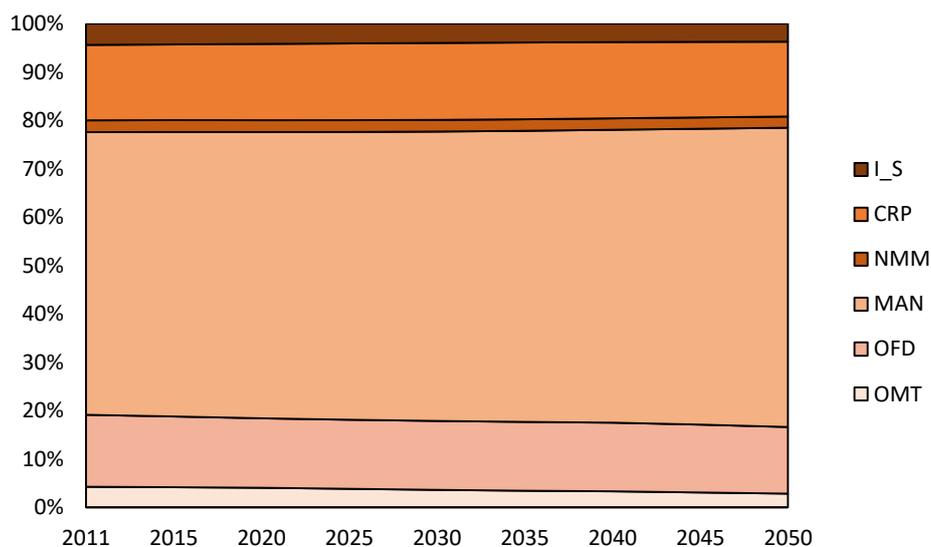


Figura 110: Composição da produção industrial brasileira no cenário 2.0C do modelo TEA

Quanto a geração de eletricidade global, a Figura 111 mostra uma maior penetração de tecnologias renováveis, bem como menor dependência de combustíveis fósseis. A geração elétrica via carvão apresenta uma queda média no período de 1,7% a.a., alcançando em 2050 11 EJ e deixando de ser a principal fonte energética para geração elétrica. As fontes fósseis, em geral, perdem participação na geração elétrica mundial, pois representam no ano base cerca de 66% do total, enquanto que em 2050 não chegam a 25%. Hidro e nuclear juntas representam em média cerca de 30% da geração elétrica do ano base e, embora apresentem crescimento, perdem um pouco de representatividade para tecnologias alternativas no final do período. A principal fonte energética para geração elétrica passa a ser a energia eólica, com um crescimento médio de cerca de 6,8% a.a., representando cerca de 21% do total de eletricidade global. Além da eólica, cabe ressaltar o alto crescimento da fonte solar de em média 9,5% a.a., representando cerca de 12% do total em 2050. A geração elétrica via biomassa cresce em torno de 5% a.a. no período.

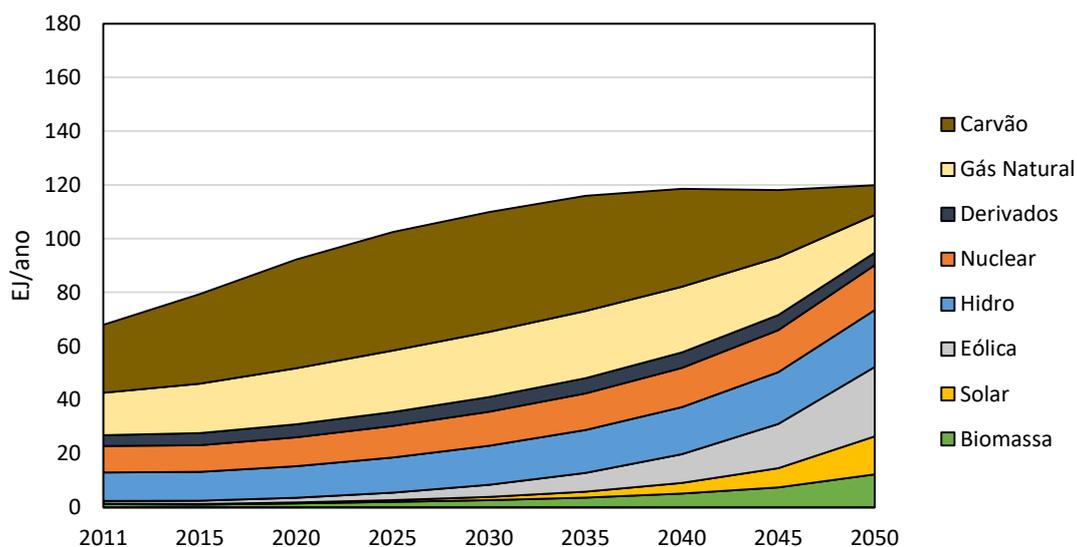


Figura 111: Geração elétrica global por fonte no cenário 2.0C do modelo TEA

A geração elétrica brasileira que já era considerada uma das mais limpas do mundo, passa a ser menos carbono intensiva ainda de acordo com a Figura 112. Cerca de 85% do total gerado de eletricidade no Brasil no ano base é oriundo de hidroelétricas, respondendo por cerca de 1,4 EJ em 2011 e crescendo para 1,7 EJ em 2050. No cenário 2.0C, as fontes fósseis perdem representatividade na geração elétrica brasileira, crescendo em média apenas 0,2% a.a. Destaca-se a geração elétrica via biomassa com crescimento médio de 6,3% a.a., alcançando em 2050 a representação de 20% do total gerado. Eólica e solar também apresentam crescimentos de 3,8% e 3,5% a.a., contribuindo para a geração elétrica nacional em cerca de 1,2% e 0,7% em 2050.

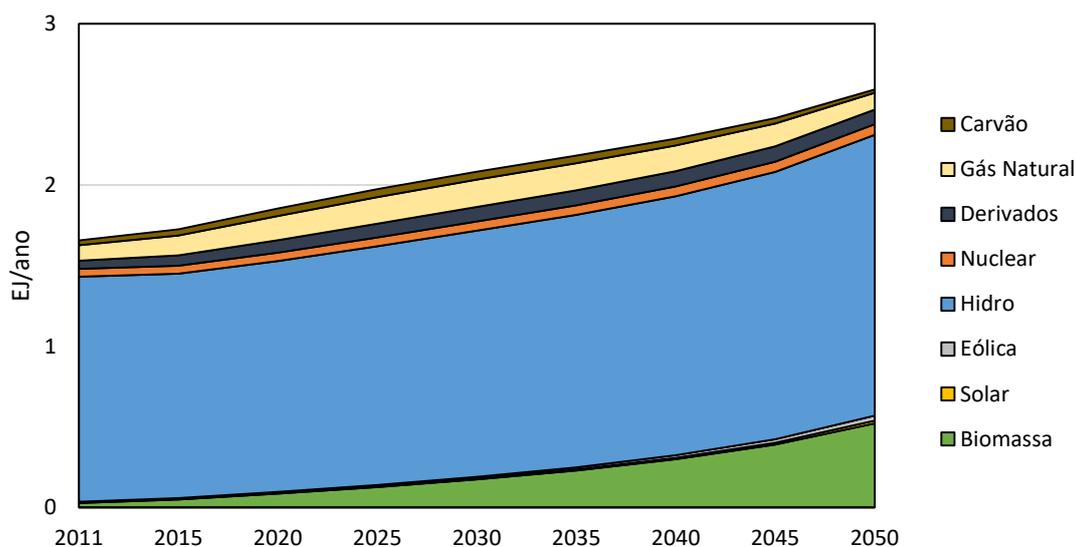


Figura 112: Geração elétrica brasileira por fonte no cenário 2.0C do modelo TEA

O consumo final de energia no mundo é representado com uso majoritário de energias fósseis (carvão, gás natural e derivados de petróleo), representando cerca de 75% do total consumido no ano base e 60% em 2050, de acordo com a Figura 113. A redução da participação de energias fósseis no consumo final é explicada pela redução da atividade produtiva. O consumo de eletricidade cresce em média cerca de 0,7% a.a., representando em 2050 cerca de 23% do total consumido. Destaca-se o crescimento do consumo de biocombustíveis no mundo, com um crescimento médio de 9,6% a.a. O consumo final de biomassa representa em média cerca de 12% do total consumido em 2050.

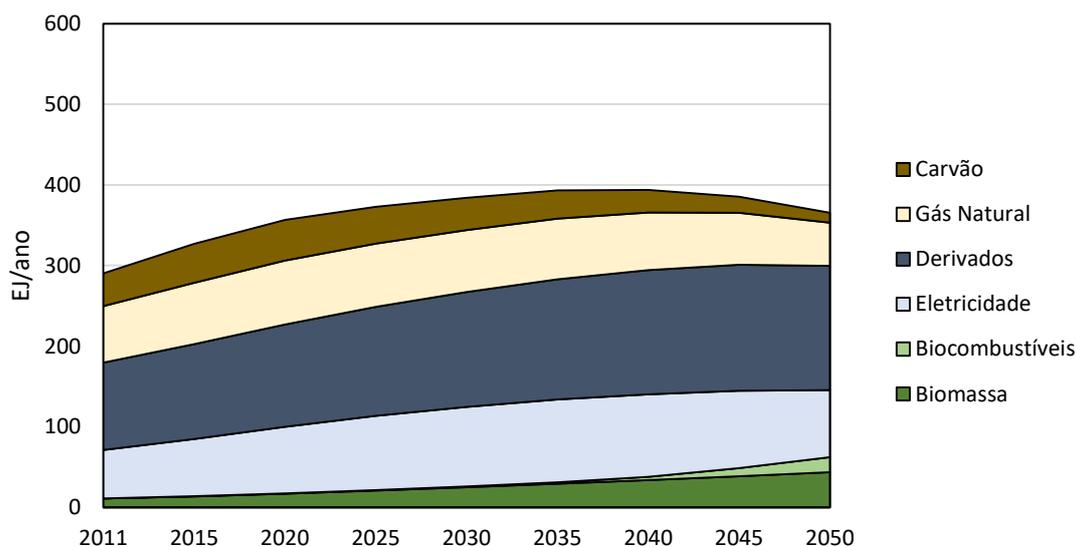


Figura 113: Consumo final de energia global no cenário 2.0C do modelo TEA

De acordo com Figura 114, no Brasil, o consumo final de energia fóssil também tem queda na representatividade, com cerca de 58% no ano base, cai para 42% em 2050. Consumo de gás natural cai em média cerca de 3% a.a., enquanto que o de carvão cerca de 3,3% a.a. O consumo de derivados de petróleo não apresenta crescimento nem queda no período, representando cerca de 40% do consumo total em 2050. O consumo de eletricidade cresce em média 0,8% a.a., representando cerca de 29% do consumo total em 2050. Destaca-se o crescimento médio de 5,8% a.a. do consumo de biocombustíveis, representando em 2050 cerca de 12% do total de energia consumida no país. O consumo final de biomassa representa em média cerca de 17% do total de energia consumida.

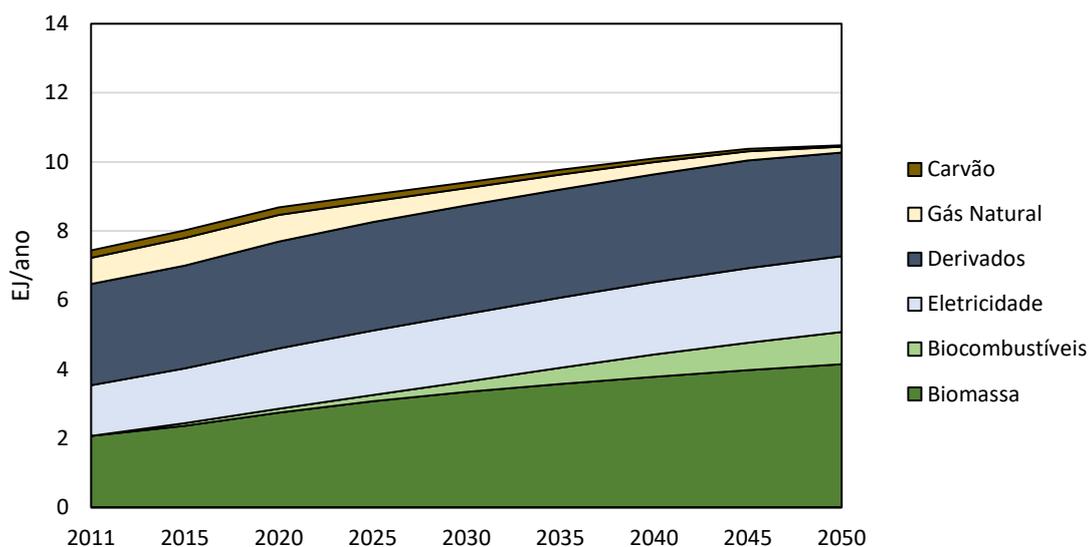


Figura 114: Consumo final de energia do Brasil no cenário 2.0C do modelo TEA

No que tange as emissões globais de GEE, destaca-se a queda das emissões de CO₂ referentes à queima de combustíveis fósseis, as quais respondem por cerca de 58% das emissões de GEE do ano base, cerca de 29 GtCO₂eq, e alcançando cerca de 19 GtCO₂eq em 2050, conforme Figura 115. As emissões oriundas da queima de carvão apresentam uma queda média no período de 2,6% a.a., enquanto que as emissões oriundas da queima de gás natural apresentam queda média de 0,6% a.a. As emissões de CO₂ da indústria de processo se mantém estáveis no período representando em média cerca de 2 GtCO₂eq. As emissões de CO₂ oriundas da mudança do uso do solo apresentam queda de 5,4% a.a., da mesma forma que as emissões de CH₄ e N₂O com quedas de 1,8% e 0,8% a.a., respectivamente. As emissões de CH₄ e N₂O oriundas da energia respondem juntas em média por cerca de 12% do total de emissões de GEE mundiais em 2050 e apresentam quedas de 1% e 1,75 a.a., respectivamente, no período.

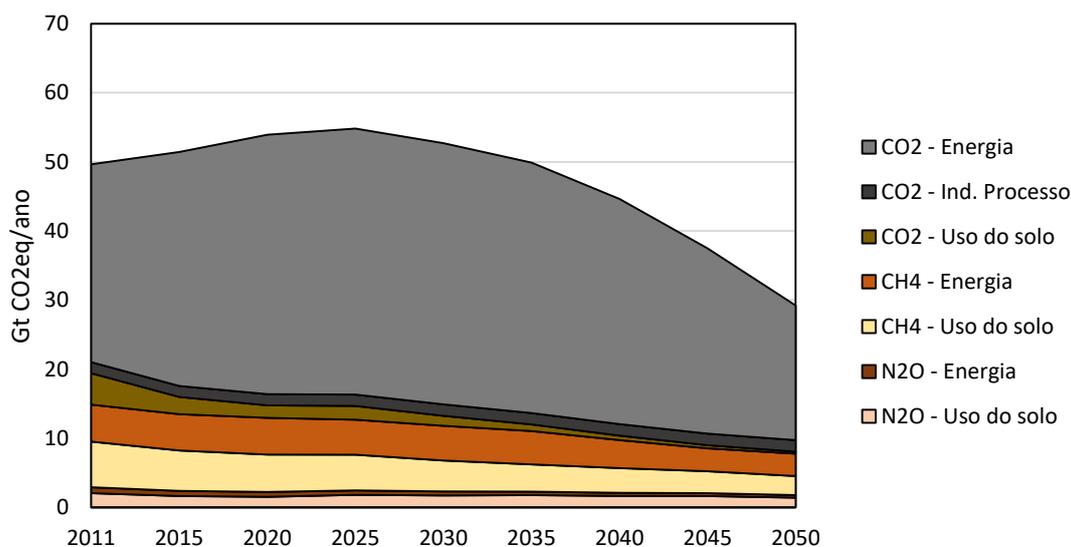


Figura 115: Emissões de GEE globais por tipo de gás e origem no cenário 2.0C do modelo TEA

No Brasil, conforme a Figura 116, as emissões de CO₂ oriundas da mudança do uso do solo apresentam uma queda em média de 1,3% a.a., com destaque para um crescimento no período 2020-2025 referente a intensificação da agropecuária. As emissões de CH₄ oriundas da fermentação entérica de animais ruminantes que, no Brasil, respondem por cerca de 22% das emissões do ano base, passam a responder por 39% das emissões em 2050. As emissões de CH₄ oriundas da energia apresentam crescimento médio de 1,9% a.a. Já as emissões de CO₂ oriundas da queima de combustíveis fósseis apresentam uma queda média de 1,6% a.a., representando cerca de 22% do total de emissões de GEE brasileiras em 2050. Cabe ressaltar também o crescimento modesto de 0,4% a.a. das emissões de N₂O oriundas do uso do solo, que representam basicamente o uso de fertilizantes na agricultura, alcançando cerca de 17% do total de emissões de GEE em 2050.

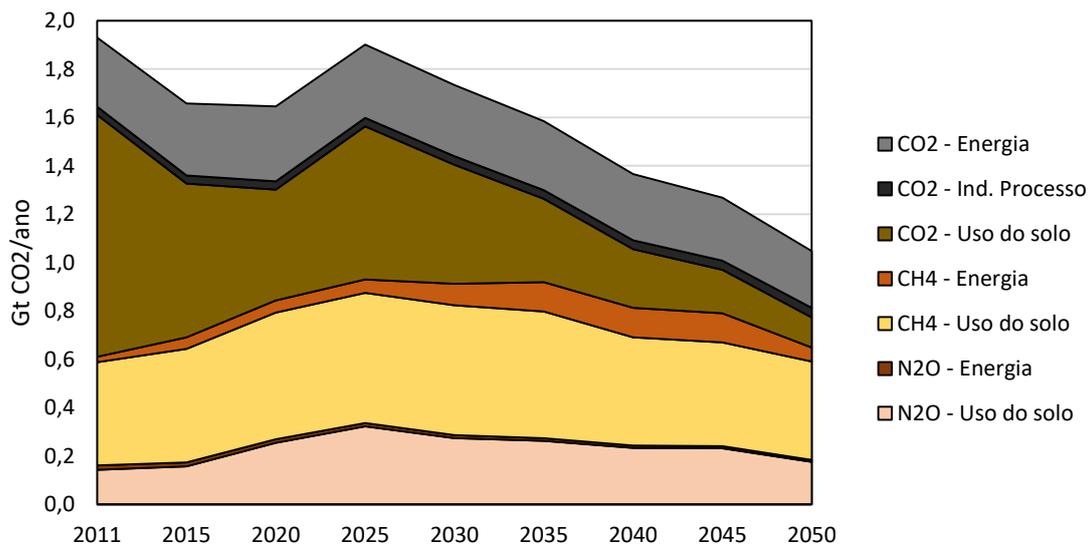


Figura 116: Emissões de GEE brasileiras por tipo de gás e origem no cenário 2.0C do modelo TEA

A evolução do preço de carbono global auferido no modelo TEA referente ao cenário 2.0C pode ser observado na Figura 117. Nota-se que o custo social evolui de maneira mais significativa ao final do período quando as emissões se tornam mais restritivas, neste caso alcançando cerca de 1.360 GtCO₂ em 2050, frente a necessária restrição de 1.000 GtCO₂ em 2100 para evitar um aquecimento médio da temperatura global de até 2°C. Em 2050, o valor de US\$ 280 fica abaixo da média dos modelos analisados no relatório AR5 (IPCC, 2018), mas dentro da faixa de preço disponível entre US\$ 162 e US\$ 505 por tonelada de CO₂.

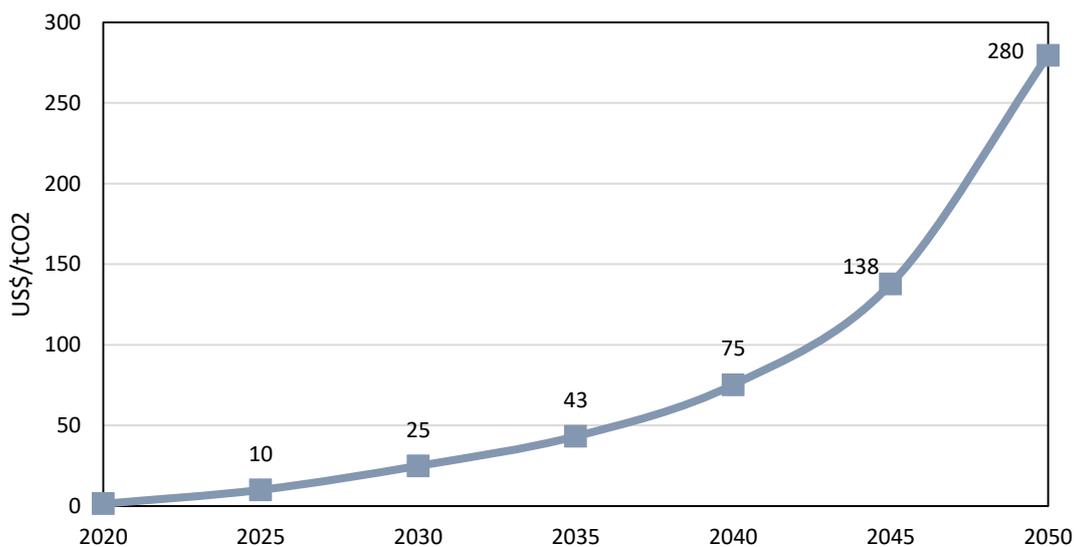


Figura 117: Preço de carbono (CO₂) global do cenário 2.0C do modelo TEA

Grande parte das emissões de GEE brasileiras tem origem no uso do solo e, portanto, os setores agropecuários devem ser impactados pela criação de um mercado de carbono com impostos diferenciados para gases não-CO₂. As próximas figuras mostram os resultados da produção agropecuária e da indústria de alimentos considerando a internalização de custos sociais de emissões de GEE. Novamente, a produção total brasileira é representada pela cor cinza, onde se destacam as exportações (cinza hachurado em vermelho). A diferença entre a produção total e as exportações representa a produção para uso doméstico. A oferta total é representada pelo somatório da produção total, exportações inclusive, e as importações (azul). De acordo com a Figura 118, o setor agrícola (AGR) brasileiro apresenta um índice de crescimento que alcança em 2050 3,4x a produção do ano base, o que significa um crescimento médio de cerca de 2,5% a.a. As exportações de produtos agrícolas respondem por cerca de 20% da produção do ano base, mas, durante o período de análise, apresentam um crescimento em médio de 4,5% a.a., de modo que cerca de 60% da produção nacional é exportada ao final do período. As importações apresentam um crescimento inferior a produção doméstica, alcançando em 2050 um índice de 1,9x a importação do ano base.

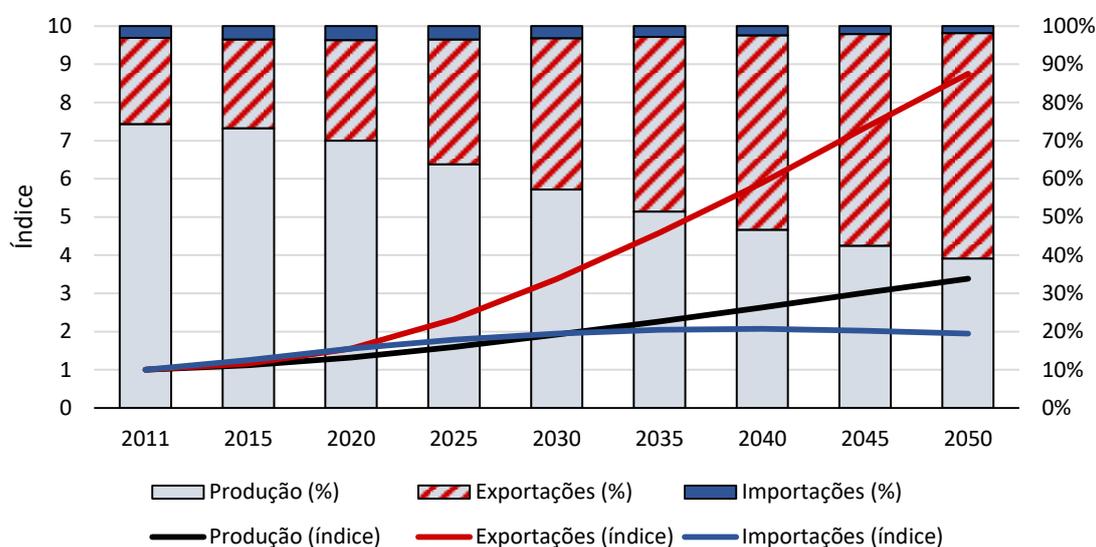


Figura 118: Evolução da produção e do comércio internacional agrícola (AGR) brasileira no cenário 2.0C do modelo TEA

A produção da pecuária (CTL) brasileira apresenta em 2050 um índice de 1x a produção do ano base, o que significa que em média a produção se mantém estável, conforme a Figura 119. As exportações de produtos de CTL, embora representem

menos de 1% da produção, apresentam um índice em 2050 de 0,2x as exportações do ano base, o que representa uma queda média de 3,5% a.a. no período. Também com pouca representação, vale destacar o alto crescimento das importações que alcançam um índice de 15,6x as importações do ano base, o que significa um crescimento de 5,8% a.a.

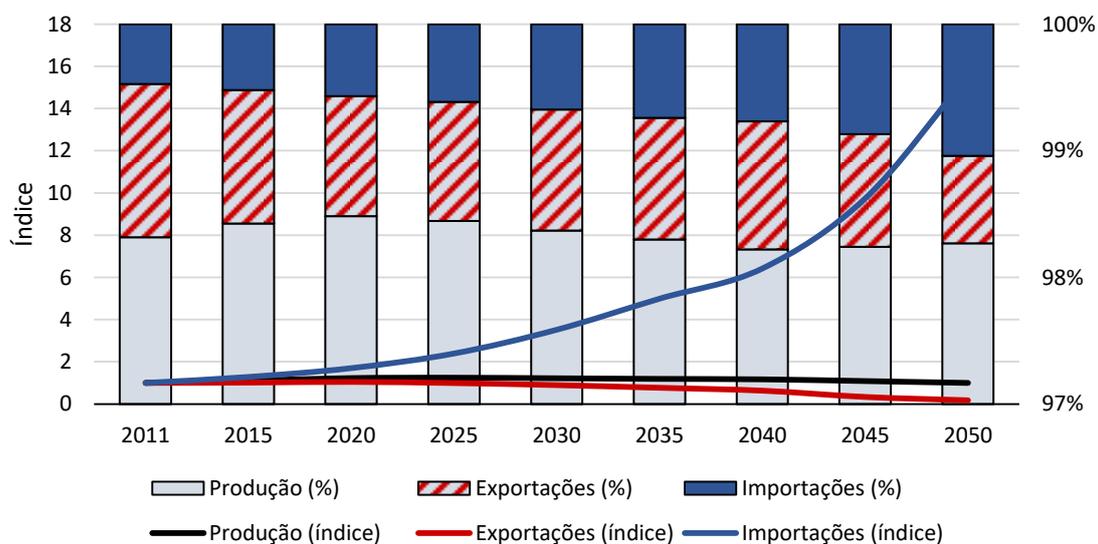


Figura 119: Evolução da produção e do comércio internacional da pecuária (CTL) brasileira no cenário 2.0C do modelo TEA

De acordo com a Figura 120, pode-se observar que a produção de outros animais (OAP) nacional apresenta crescimento, alcançando em 2050 um índice de 1,4x a produção do ano base, representando quase a totalidade da produção nacional. As exportações de outros animais, embora representem menos de 1% da produção nacional, apresentam uma queda média de 0,5% a.a., alcançando um índice de 0,8x as exportações do ano base. As importações de OAP alcançam em 2050 um índice de 3x a importação do ano base, o que significa um crescimento médio de 2,3% a.a., embora representando menos de 0,5% do total ofertado domesticamente.

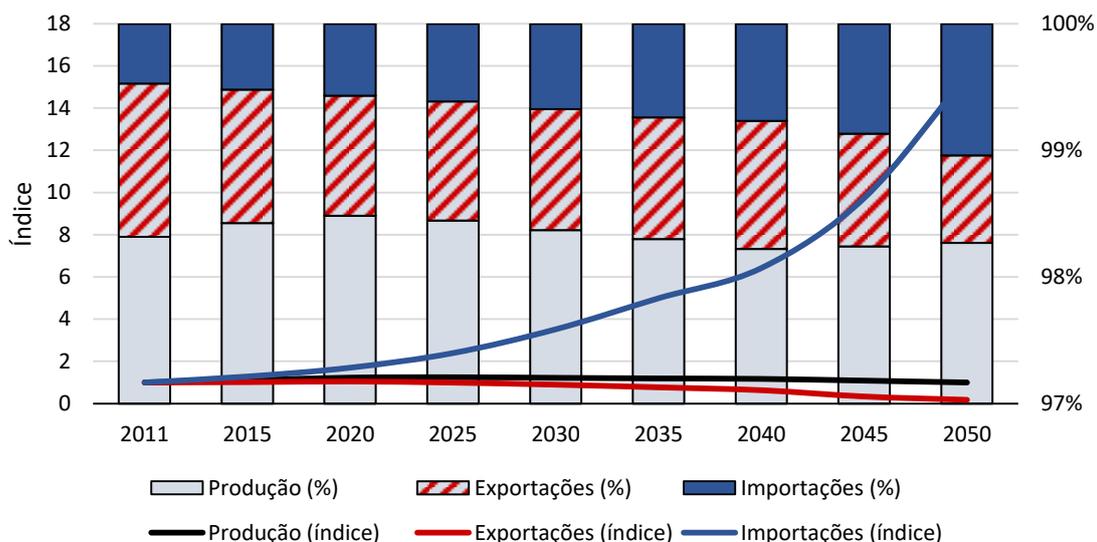


Figura 120: Evolução da produção e do comércio internacional de outros animais (OAP) brasileira no cenário 2.0C do modelo TEA

No que tange a produção da indústria de alimentos nacional, a Figura 121 mostra que a produção de alimentos sem carne (OFD) apresenta um crescimento médio de 1,1% a.a., alcançando em 2050 um índice de 1,7x a produção do ano base. Em média, cerca de 90% da produção de alimentos se destina ao mercado doméstico, mas no decorrer do período há um crescimento das importações em cerca de 2,7% a.a. As exportações, em média, representam cerca de 11% da produção nacional, com um crescimento levemente abaixo da produção nacional com cerca de 0,8% a.a.

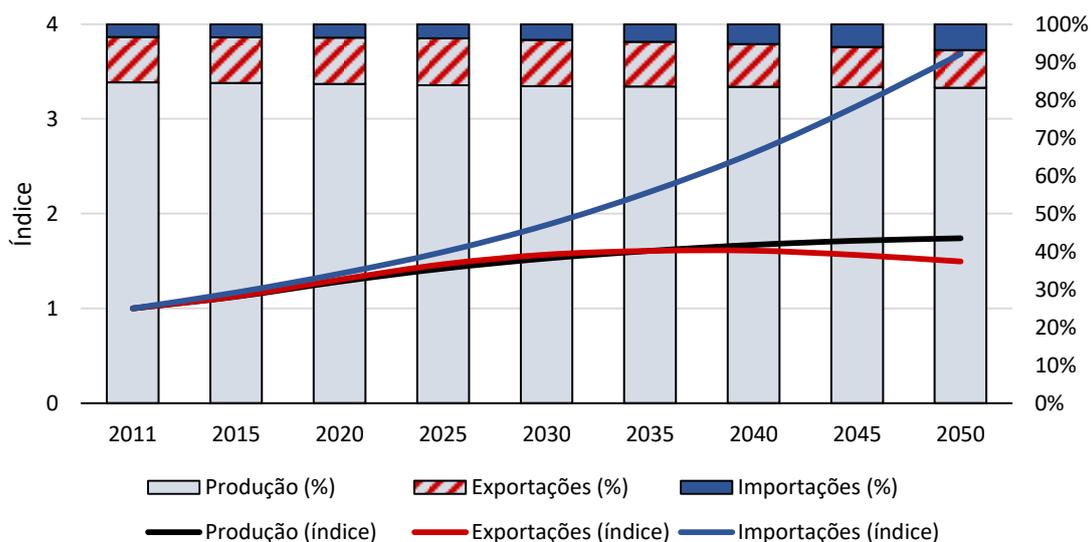


Figura 121: Evolução da produção e do comércio internacional da indústria de alimentos sem carne (OFD) no cenário 2.0C do modelo TEA

De acordo com a Figura 122, a produção da indústria de alimentos com carne (OMT) nacional apresenta um crescimento médio modesto de 0,8% a.a., alcançando em 2050 um índice em 2050 de 1,3x a produção do ano base. As exportações de OMT apresentam em 2050 um índice de 0,2x as exportações do ano base, o que significa uma queda média de 3,7% a.a. no período. Por outro lado, as importações apresentam um índice em 2050 de 7,1x as importações do ano base, o que significa um crescimento médio de cerca de 4,1% a.a., representando cerca de 2,8% da oferta total em 2050.

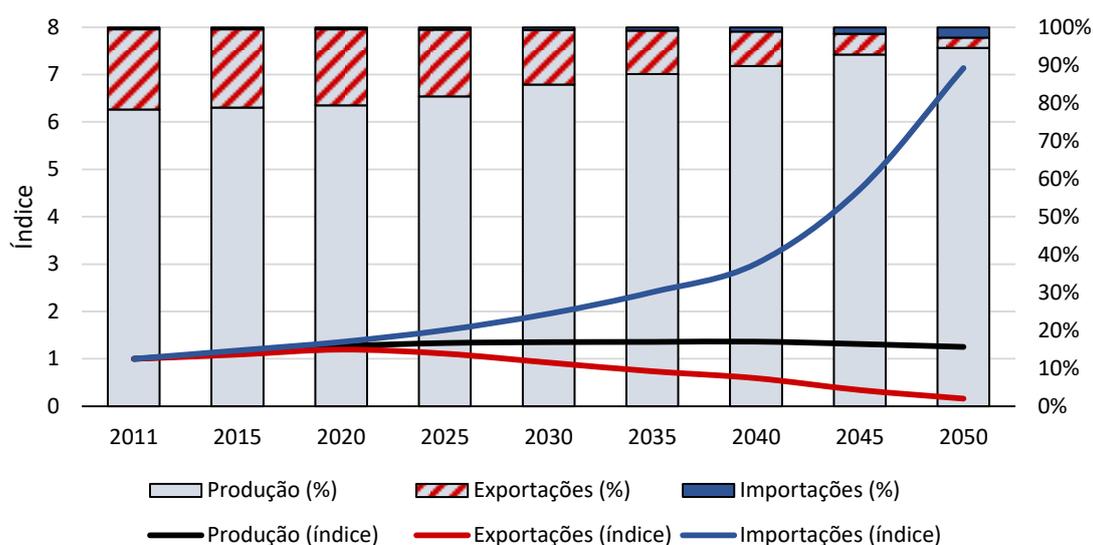


Figura 122: Evolução da produção e do comércio internacional da indústria de alimentos com carne (OMT) no cenário 2.0C do modelo TEA

A demanda brasileira por produtos agropecuários e por produtos da indústria de alimentos pode ser observada nas Figura 123 a Figura 127. Com relação à demanda por produtos agropecuários, pode-se observar na Figura 123 que a demanda por produtos agrícolas (AGR) de setores intermediários apresenta um crescimento médio de 1,3% a.a., alcançando o índice de 1,9x a demanda do ano base. No que se refere a demanda das famílias, há um crescimento modesto de 0,1% a.a., alcançando um índice de 1,1x a demanda do ano base. Setores intermediários respondem em média por cerca de 90% da demanda total de produtos agrícolas.

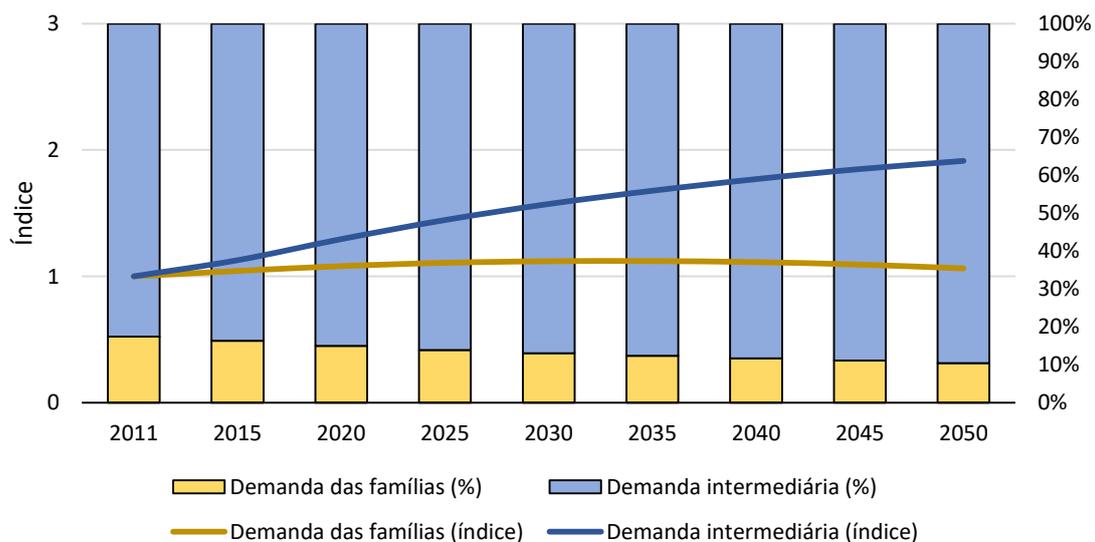


Figura 123: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos agrícolas (AGR) no cenário 2.0C do modelo TEA

Quanto a demanda brasileira por produtos da pecuária (CTL) e outros animais (OAP), de acordo com as Figura 124 e Figura 125, é possível observar uma queda crescimento modesto no decorrer do período, porém alcança 2050 com índices de 1x e 1,5x a demanda respectiva do ano base, o que significa um crescimento médio de 0,1% e 0,8% a.a., respectivamente, no período. A demanda intermediária responde por quase a totalidade da demanda de produtos de CTL e cerca de 90% dos produtos de OAP. A demanda das famílias por produtos de OAP apresenta uma queda média de 0,5% a.a.

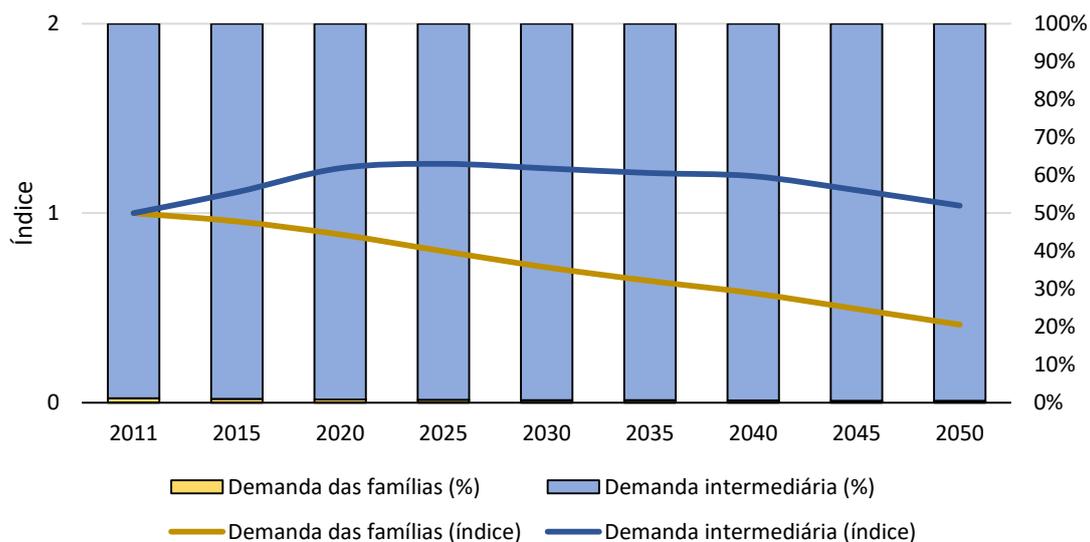


Figura 124: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos da pecuária (CTL) no cenário 2.0C do modelo TEA

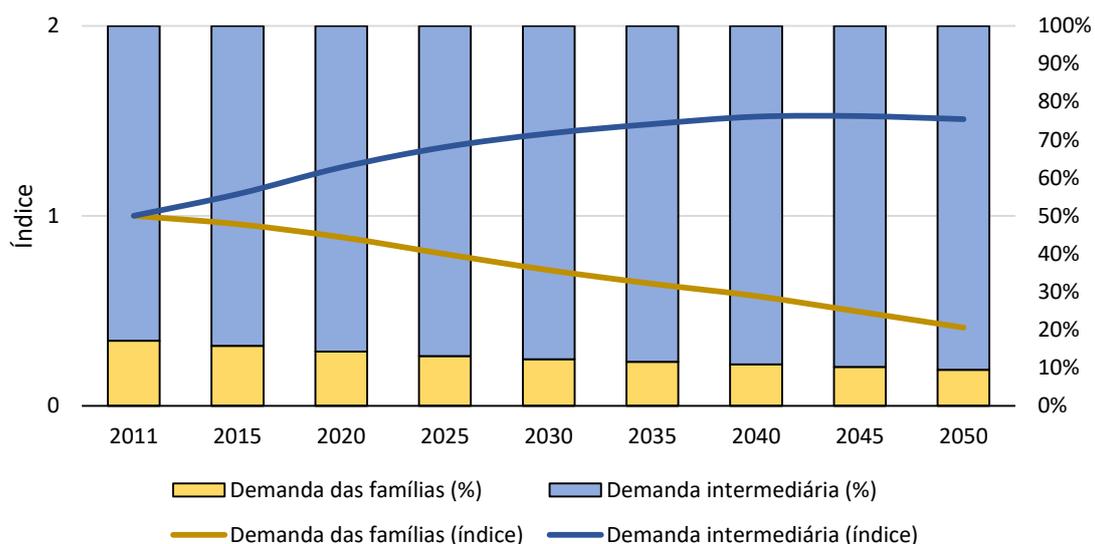


Figura 125: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos de outros animais (OAP) no cenário 2.0C do modelo TEA

Com relação à demanda brasileira por produtos da indústria de alimentos, a Figura 126 mostra que a demanda de setores intermediários por alimentos sem carne (OFD) apresenta um crescimento médio de 1,4% a.a., alcançando em 2050 um índice de 2x a demanda do ano base. Quanto a demanda das famílias por alimentos sem carne, há um crescimento médio de 1,1% a.a., alcançando em 2050 um índice de 1,7x a demanda do ano base. A participação das famílias na demanda por alimentos sem carne se mantém em média 55%, enquanto que a demanda de setores intermediários responde por 45%.

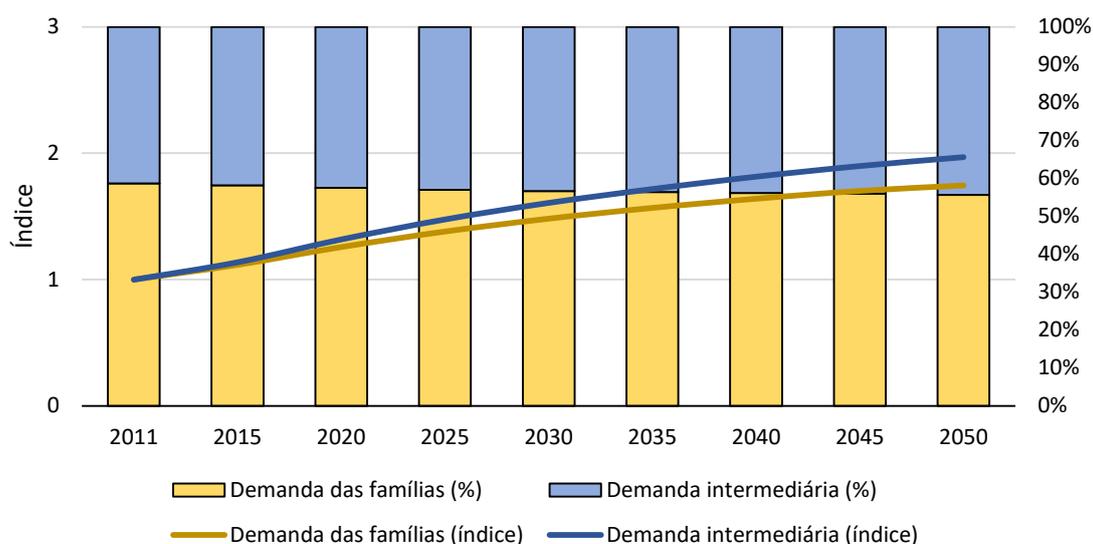


Figura 126: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos da indústria de alimentos sem carne (OFD) no cenário 2.0C do modelo TEA

De acordo com a Figura 127, a demanda das famílias por alimentos com carne apresenta um crescimento de 1,1% a.a., alcançando em 2050 um índice 1,5x a demanda do ano base. No que diz respeito a demanda de setores intermediários, há um crescimento médio de 1,3% a.a., alcançando um índice em 2050 de 1,9x a demanda do ano base. Esses crescimentos na demanda doméstica se devem em parte pela redução das exportações de OMT. A participação da demanda das famílias por alimentos com carne representa em média cerca de 80% no ano base, mas perde participação no decorrer do tempo com o aumento da participação da demanda intermediária, alcançando em 2050 cerca de 70% do total demandado.

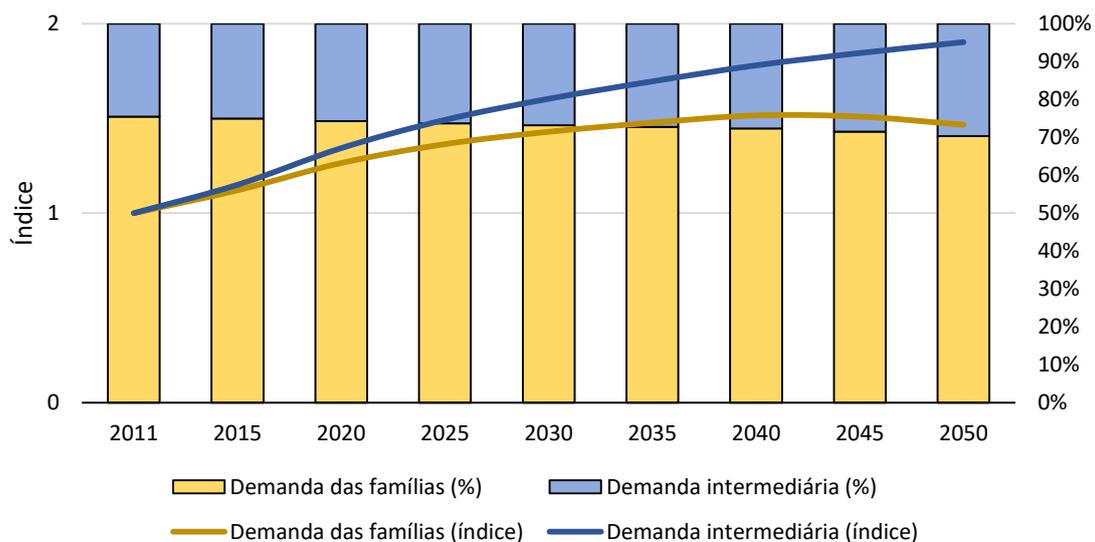


Figura 127: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos da indústria de alimentos com carne (OMT) no cenário 2.0C do modelo TEA

4.2.4. Cenário Climático de Estabilização da Temperatura Média Global em até 1,5°C (1.5C)

Nesta seção são apresentados os resultados do cenário climático de estabilização da temperatura média global em até 1,5°C (1.5C), em que se analisam os impactos da criação de um mercado de carbono para emissões de CO₂ e impostos diferenciados para CH₄ e N₂O na agropecuária. A começar por indicadores econômicos, a Figura 128 mostra a evolução do PIB para todas as regiões do modelo TEA, sendo possível observar que as regiões que apresentam maior participação no PIB global são o Oeste Europeu (WEU), a China (CHN) e os Estados Unidos (USA). Em termos de taxa média de crescimento anual, destaca-se o crescimento da Índia (IND) com cerca de 4,3% a.a., bem como da região africana (AFR), exceto África do Sul, com crescimento médio de 3,6% a.a. De acordo com essa trajetória, o PIB brasileiro (BRA) representará cerca de 3,2% do PIB global em 2050, o que significa um crescimento médio de 1,9% a.a. O PIB global alcança a marca de 192 trilhões de US\$ em 2050, enquanto que o PIB brasileiro alcança 6 trilhões de US\$ em 2050.

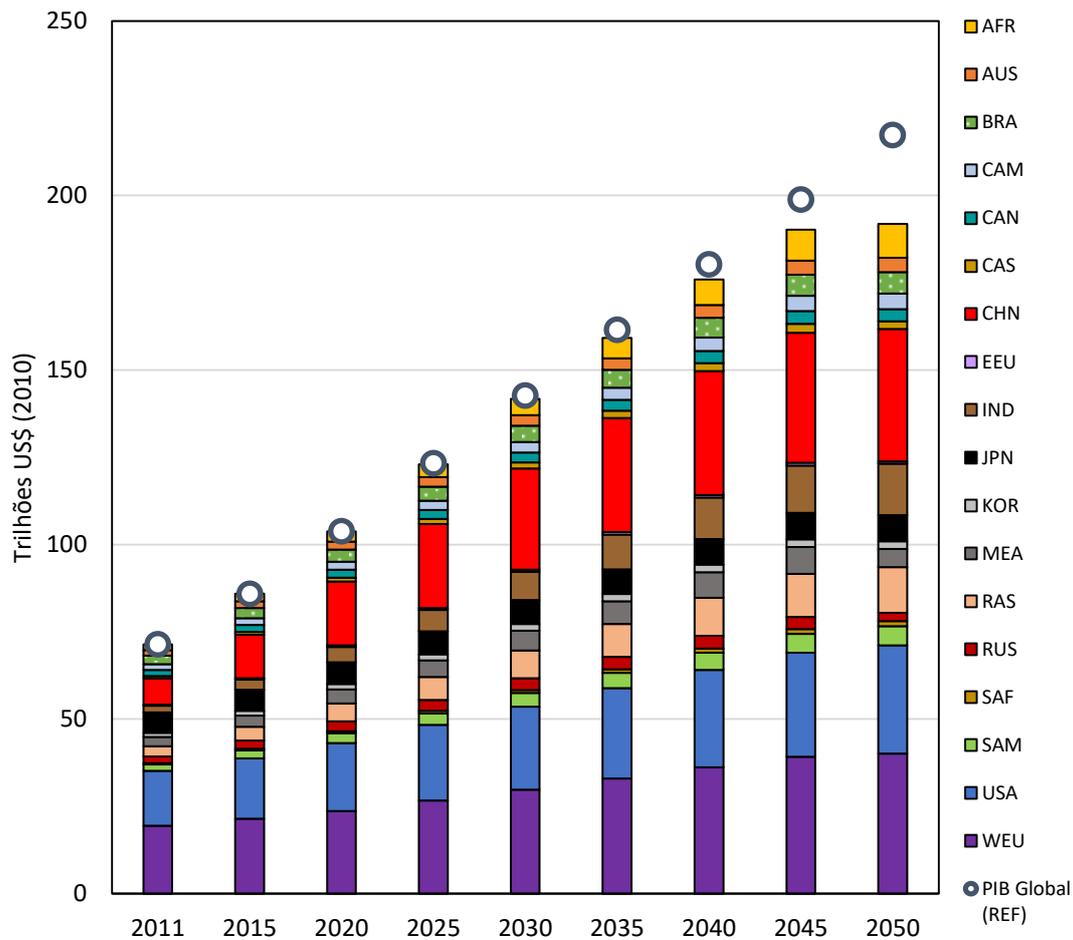


Figura 128: Evolução do PIB mundial desagregado para cada região no cenário 1.5C do modelo TEA

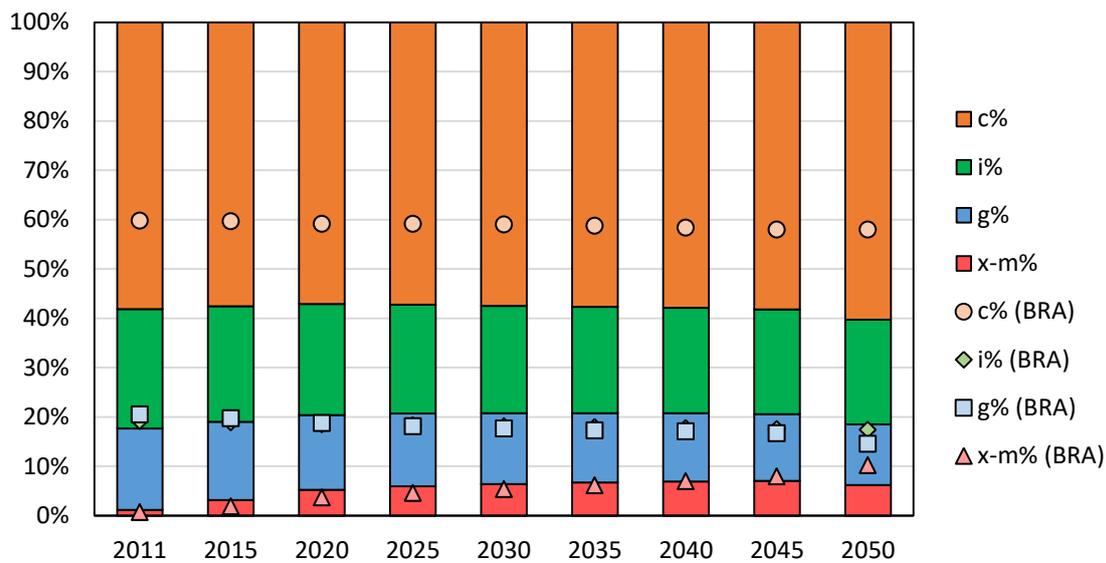


Figura 129: Evolução da composição do PIB global e do Brasil no cenário 1.5C do modelo TEA

Quanto a composição do PIB global, podemos observar nas colunas da Figura 129 que o consumo das famílias responde em média por 58% do PIB global. Investimento responde por cerca de 22%, enquanto o consumo do governo perde participação durante o período, saindo de 16% no ano base para 12% em 2050. A balança comercial, por outro lado, aumenta sua participação no PIB global, partindo de 1% no ano base, alcança cerca de 6% em 2050. No que se refere a composição do PIB brasileiro (marcadores), há leve diferença em relação a representação do consumo das famílias no PIB, em média 59%, porém vale destacar o maior peso do consumo do governo no PIB brasileiro em relação à média global que, embora em queda, apresenta uma média de cerca de 18%. O investimento nacional representa cerca de 18% do PIB, abaixo, portanto da média global. A balança comercial segue a tendência de crescimento da participação do PIB global, alcançando cerca de 10% do PIB brasileiro em 2050.

Nas figuras seguintes, participações e índices de produção se referem a quantidades, não valores monetários que são influenciados por preços de mercado. Em termos de crescimento setorial, a Figura 130 mostra que setores industriais e transportes apresentam um índice semelhante, alcançando um crescimento durante o período e estabilização em 2050 com índices de 3,2x e 3x, respectivamente, em relação ao ano base. Serviços também apresentam crescimento, alcançando em 2050 cerca de 3x a produção do ano base. A produção agropecuária apresenta o menor índice, alcançando em 2050 cerca de 2,6x a produção do ano base.

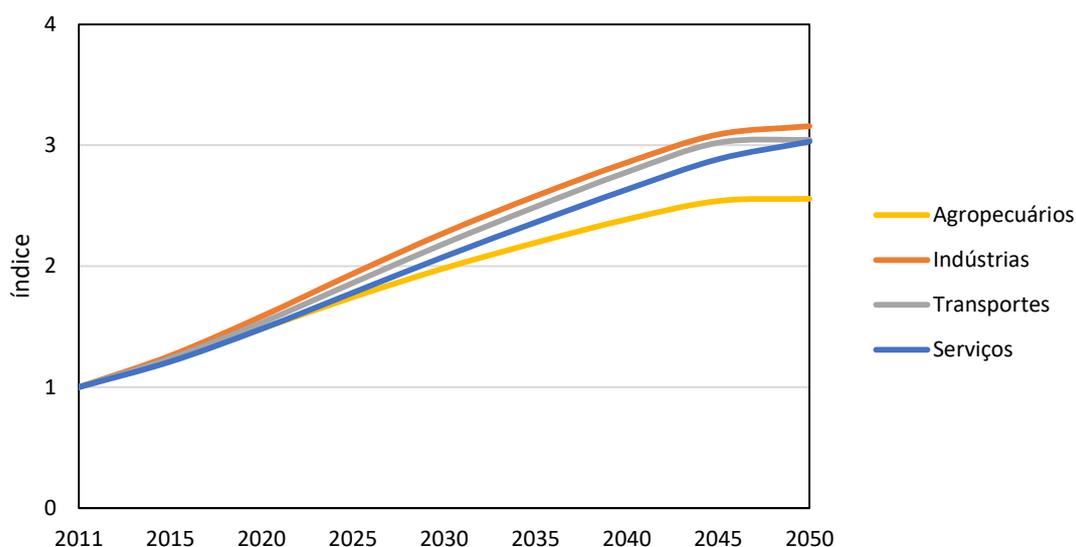


Figura 130: Índice de produção setorial global no cenário 1.5C do modelo TEA

No que se refere ao crescimento dos setores produtivos brasileiros, a Figura 131 mostra que o setor de serviços orienta a economia brasileira, representando cerca de 52% da produção total nacional em 2050, alcançando cerca de 2,5x a produção do ano base, o que significa um crescimento médio de cerca de 2% a.a. A produção agropecuária aparece logo em seguida, alcançando em 2050 cerca de 2,3x a produção do ano base e, portanto, levemente abaixo do crescimento médio global. O setor de transportes também apresenta crescimento, alcançando em 2050 cerca de 2,2x a produção do ano base. Destaca-se o crescimento da indústria nacional com um índice em 2050 de 2x a produção do ano base, o que significa um crescimento de 1,4% a.a.

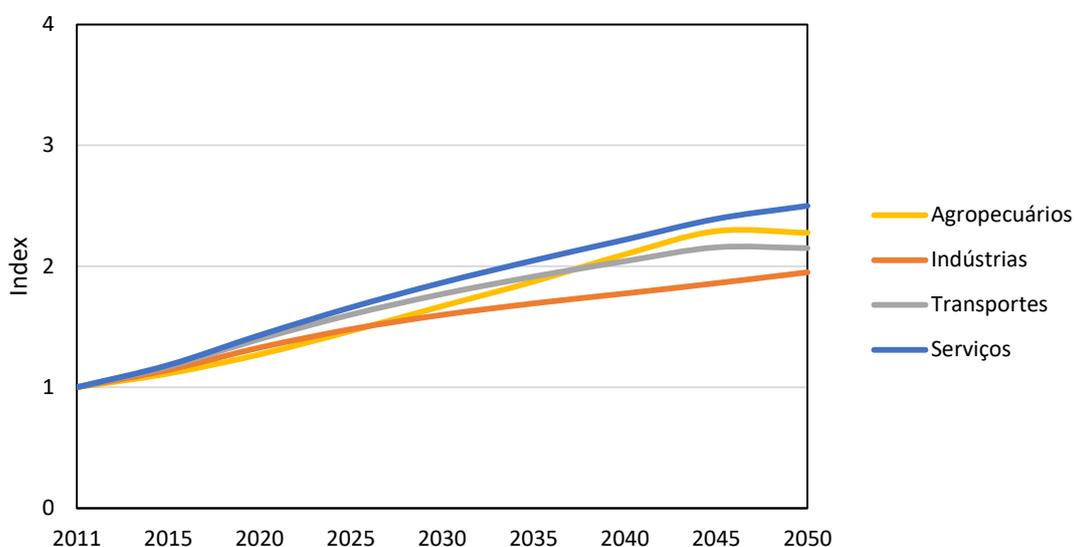


Figura 131: Índice de produção setorial brasileiro no cenário 1.5C do modelo TEA

A composição da produção agropecuária brasileira pode ser visualizada na Figura 132. É possível observar a alta representatividade da agricultura (AGR) brasileira, que responde por cerca de 65% no ano base, mas em 2050 representa cerca de 87% do total da produção agropecuária. A produção animal, representada pela pecuária (CTL) e outros animais (OAP), representa cerca de 34% no ano base, mas, durante o período, reduz sua participação alcançando em 2050 cerca de 11% da produção agropecuária brasileira. O setor de pesca (FSH) mantém uma representação média de cerca de 1,6% do total da produção agropecuária.

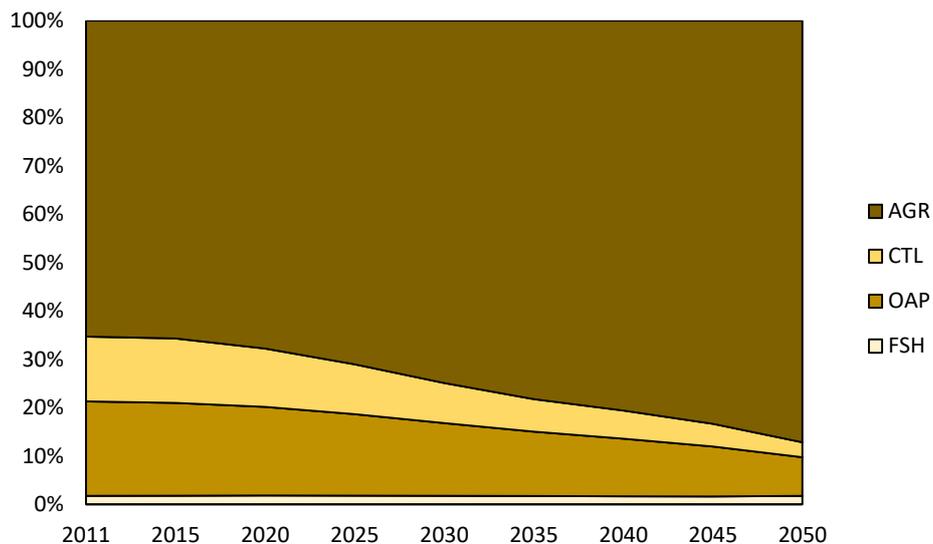


Figura 132: Composição da produção agropecuária brasileira no cenário 1.5C do modelo TEA

Dentre os setores industriais brasileiros, destaca-se a representação do setor de manufaturados (MAN), definido por um agregado das indústrias de minério, automobilística, construção civil, papel e celulose, etc., em média cerca de 62% do total da produção industrial, conforme a Figura 133. A indústria de alimentos, representada pela indústria de alimentos sem carne (OFD) e com carne (OMT), responde em média por cerca de 17% da produção industrial, com uma queda de participação em 2050, alcançando cerca de 13%, destaque para OFD que responde por cerca de 87% da produção de alimentos nacional. O setor químico (CRP) representa em média cerca de 17% da produção industrial. Os setores industriais de ferro e aço (I_S) e mineral não-metálico (NMM) representam em média cerca de 4,2% e 2,3%, respectivamente, da produção industrial nacional.

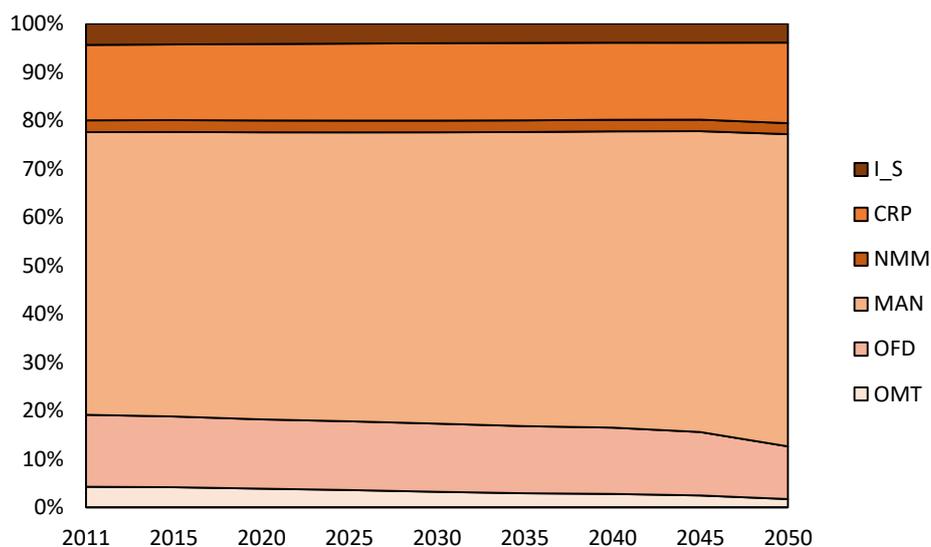


Figura 133: Composição da produção industrial brasileira no cenário 1.5C do modelo TEA

Quanto a geração de eletricidade global, a Figura 134 mostra uma maior penetração de tecnologias renováveis, bem como menor dependência de combustíveis fósseis. A geração elétrica via carvão apresenta uma queda média no período de 13% a.a., zerando a sua geração em 2050. As fontes fósseis, em geral, perdem participação na geração elétrica mundial, pois representam no ano base cerca de 66% do total, enquanto que em 2050 não chegam a 1%. Hidro e nuclear juntas representam em média cerca de 30% da geração elétrica do ano base e alcançam uma participação de 34% em 2050. A principal fonte energética para geração elétrica passa a ser a energia eólica, com um crescimento médio de cerca de 7,7% a.a., representando cerca de 33% do total de eletricidade global. Além da eólica, cabe ressaltar o alto crescimento da fonte solar de em média 10,4% a.a., representando cerca de 17% do total em 2050. A geração elétrica via biomassa cresce em torno de 6% a.a. no período.

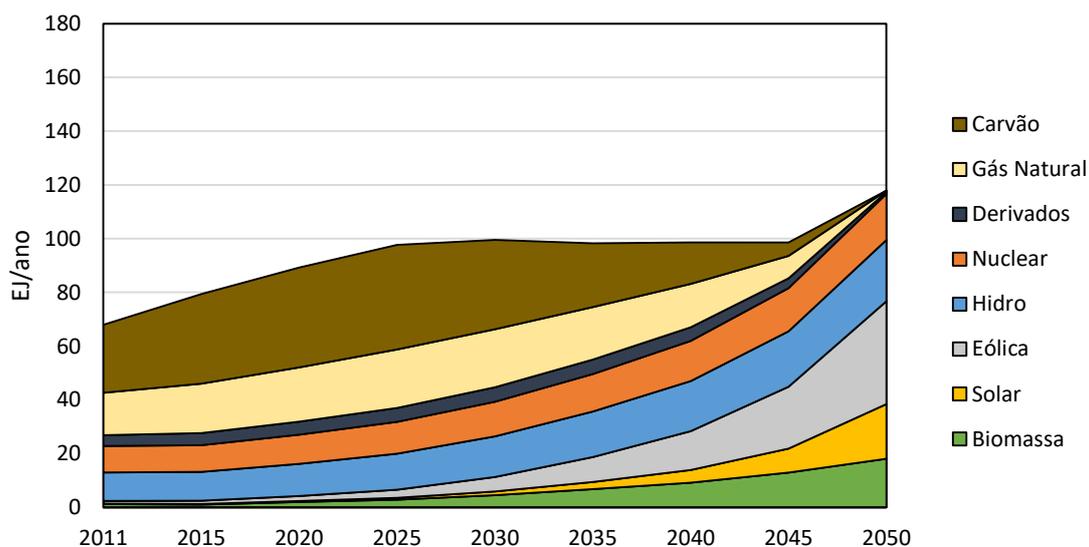


Figura 134: Geração elétrica global por fonte no cenário 1.5C do modelo TEA

A geração elétrica brasileira se torna cada vez menos carbono intensiva, de acordo com a Figura 135. Cerca de 85% do total gerado de eletricidade no Brasil no ano base é oriundo de hidroelétricas, respondendo por cerca de 1,4 EJ em 2011 e crescendo para 2,1 EJ em 2050. No cenário 1.5C, as fontes fósseis perdem sua representatividade na geração elétrica brasileira, zerando suas gerações em 2050. Destaca-se a geração elétrica via biomassa com crescimento médio de 6,8% a.a., alcançando em 2050 a representação de 23% do total gerado. Eólica e solar também apresentam crescimento de 5,3% a.a., contribuindo para a geração elétrica nacional em cerca de 2,2% e 1,3% em 2050.

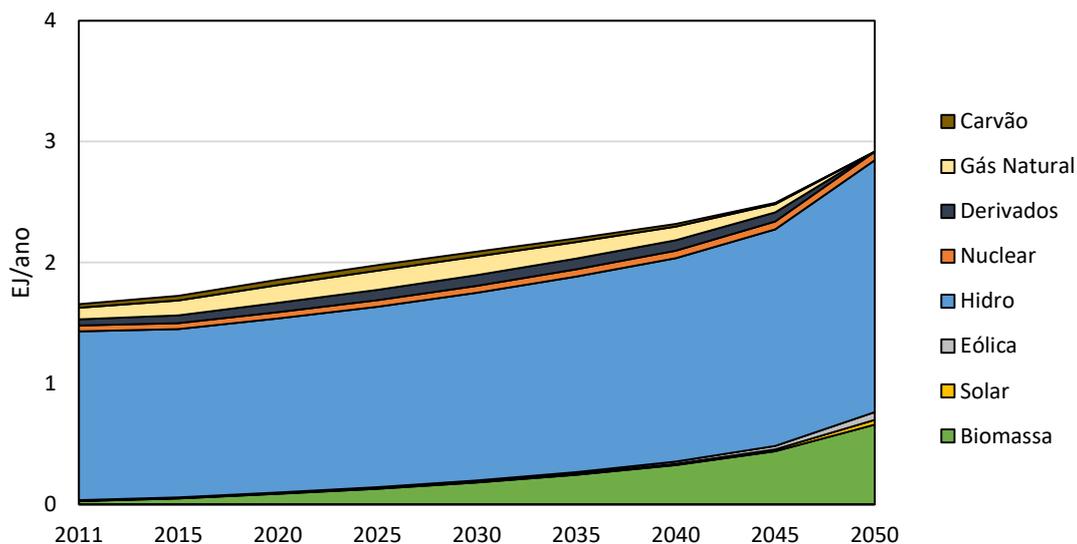


Figura 135: Geração elétrica brasileira por fonte no cenário 1.5C do modelo TEA

O consumo final de energia no mundo é representado com uso majoritário de energias fósseis (carvão, gás natural e derivados de petróleo), representando cerca de 75% do total consumido no ano base e 49% em 2050, de acordo com a Figura 136. A redução da participação de energias fósseis no consumo final é explicada pela redução da atividade produtiva do meio para o final do período. O consumo de eletricidade cresce até metade do período e depois apresenta queda, resultando num crescimento médio de cerca de 0,04% a.a., representando em 2050 cerca de 26% do total consumido. Destaca-se o crescimento do consumo de biocombustíveis no mundo, com um crescimento médio de 10% a.a. O consumo final de biomassa representa em média cerca de 16% do total consumido em 2050.

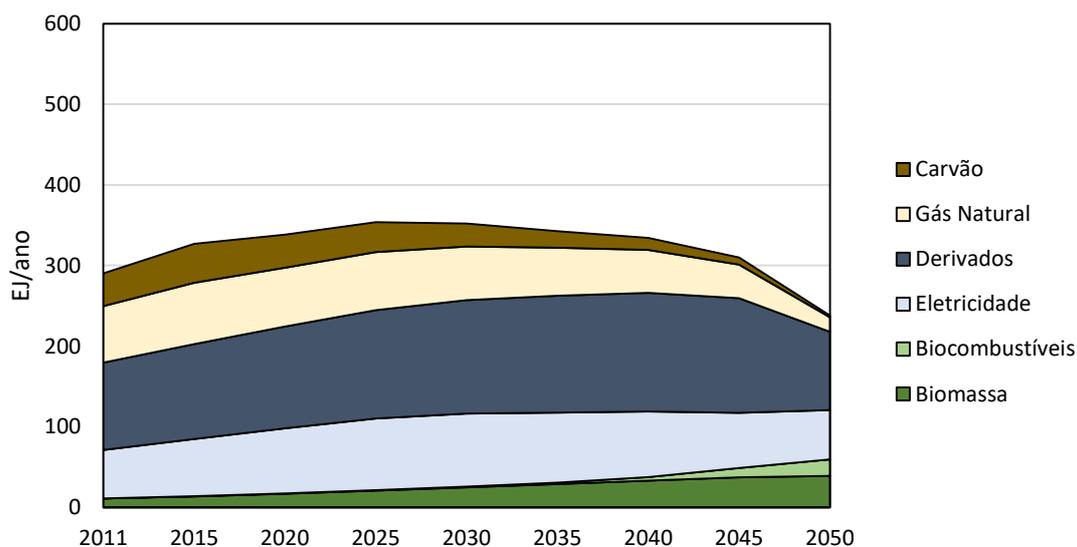


Figura 136: Consumo final de energia global no cenário 1.5C do modelo TEA

De acordo com Figura 137, no Brasil, o consumo final de energia fóssil também tem forte queda na representatividade, com cerca de 58% no ano base, cai para 31% em 2050. Consumo de gás natural cai em média cerca de 6,3% a.a., enquanto que o de carvão cerca de 7% a.a. O consumo de derivados de petróleo apresenta queda no período de 1,1% a.a., representando cerca de 31% do consumo total em 2050. O consumo de eletricidade cresce em média 0,5% a.a., representando cerca de 34% do consumo total em 2050. Destaca-se o crescimento médio de 5,8% a.a. do consumo de biocombustíveis, representando em 2050 cerca de 17% do total de energia consumida no país. O consumo final de biomassa representa em média cerca de 18% do total de energia consumida.

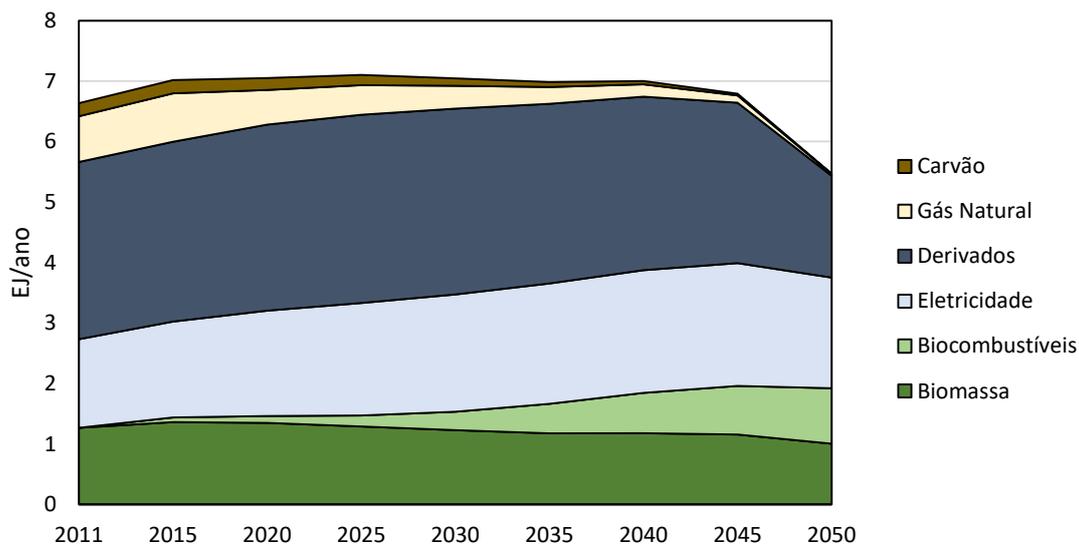


Figura 137: Consumo final de energia do Brasil no cenário 1.5C do modelo TEA

No que tange as emissões globais de GEE, destaca-se a queda das emissões de CO₂ referentes à queima de combustíveis fósseis, as quais respondem por cerca de 58% das emissões de GEE do ano base, cerca de 29 GtCO₂eq, e alcançando cerca de 6 GtCO₂eq em 2050, conforme a Figura 138. As emissões oriundas da queima de carvão apresentam uma queda média no período de 8,3% a.a., enquanto que as emissões oriundas da queima de gás natural apresentam queda média de 4,8% a.a. As emissões de CO₂ da indústria de processo apresentam leve queda de 0,2% a.a. As emissões de CO₂ oriundas da mudança do uso do solo apresentam queda de 5,5% a.a., da mesma forma que as emissões de CH₄ e N₂O com quedas de 2,2% e 1% a.a., respectivamente. As emissões de CH₄ e N₂O oriundas da energia respondem juntas em média por cerca de 12% do total de emissões de GEE mundiais em 2050 e apresentam quedas de 2,7% e 1,7% a.a., respectivamente, no período.

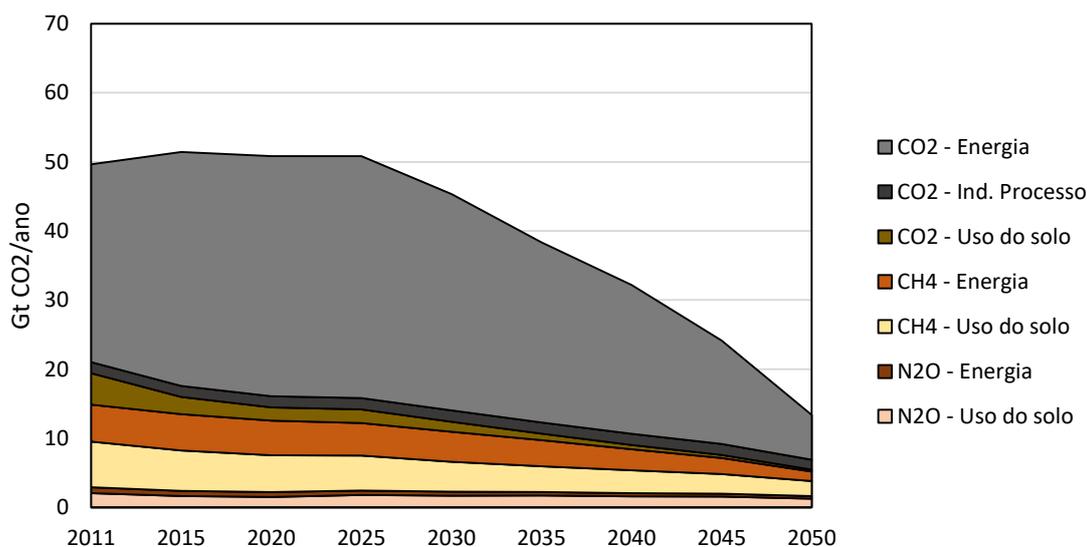


Figura 138: Emissões de GEE globais por tipo de gás e origem no cenário 1.5C do modelo TEA

De acordo com a Figura 139, no Brasil, as emissões de CO₂ oriundas da mudança do uso do solo apresentam uma queda em média de 2,1% a.a., destacando-se um crescimento no período entre 2020-2025 referente a intensificação da agropecuária. As emissões de CH₄ oriundas da fermentação entérica de animais ruminantes que, no Brasil, apresentam queda de 1,1% a.a., alcançando a marca de 0,2 GtCO₂eq em 2050. As emissões de CH₄ oriundas da energia apresentam queda média de 0,8% a.a. Já as emissões de CO₂ oriundas da queima de combustíveis fósseis apresentam uma queda média de 2,2% a.a., representando cerca de 16% do total de emissões de GEE brasileiras em 2050. Cabe ressaltar também a queda modesta de 0,4% a.a. das emissões de N₂O oriundas do uso do solo, que representam cerca de 19% do total de emissões de GEE em 2050.

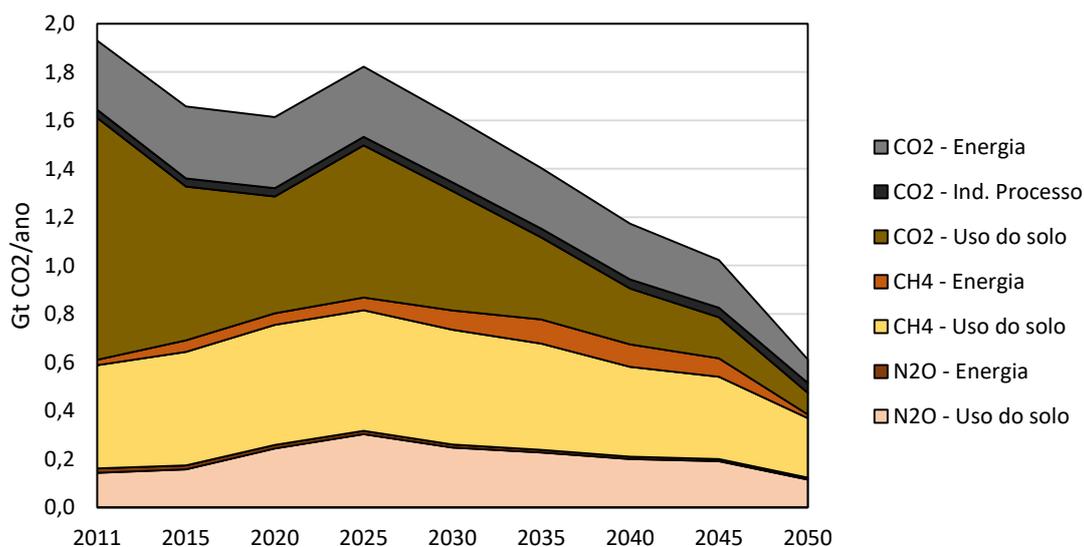


Figura 139: Emissões de GEE brasileiras por tipo de gás e origem no cenário 1.5C do modelo TEA

A evolução do preço de carbono global auferido no modelo TEA referente ao cenário 1.5C pode ser observado na Figura 140. Nota-se que o custo social evolui de maneira mais significativa ao final do período quando as emissões de GEE se tornam mais restritivas, neste caso alcançando cerca de 1.100 GtCO₂ em 2050, frente a necessária restrição de 400 GtCO₂ em 2100 para evitar um aquecimento médio da temperatura global de até 1,5°C. O alto crescimento do preço de carbono é responsável pelas grandes transições dos resultados relacionados, principalmente, à geração e consumo final de energia no final do período de análise. Além disso, cabe ressaltar que emissões crescimento exponencial do preço de carbono, principalmente, no final do período se dá pelas limitadas opções tecnológicas do modelo TEA, o qual não conta com a representação de tecnologias disruptivas que garantem emissões negativas, tais como de remoção de dióxido de carbono (CDR, sigla em inglês).

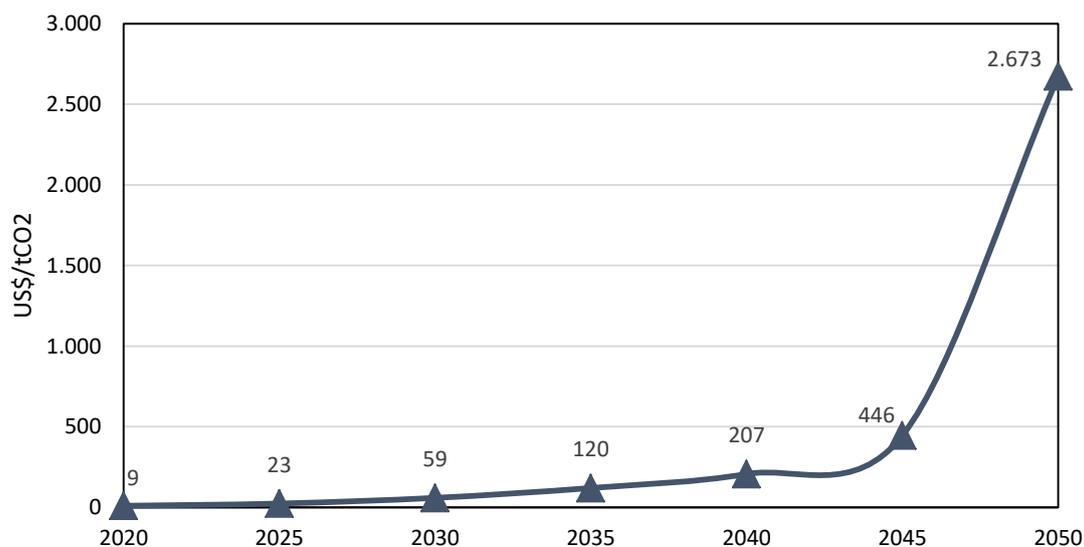


Figura 140: Preço de carbono (CO2) global do cenário 1.5C do modelo TEA

Grande parte das emissões de GEE brasileiras tem origem no uso do solo e, portanto, os setores agropecuários devem ser impactados pela criação de um mercado de carbono com impostos diferenciados para gases não-CO2. As próximas figuras mostram os resultados da produção agropecuária e da indústria de alimentos considerando a internalização de custos sociais de emissões de GEE. Novamente, a produção total brasileira é representada pela cor cinza, onde se destacam as exportações (cinza hachurado em vermelho). A diferença entre a produção total e as exportações representa a produção para uso doméstico. A oferta total é representada pelo somatório da produção total, exportações inclusive, e as importações (azul). De acordo com a Figura 141, o setor agrícola (AGR) brasileiro apresenta um índice de crescimento que alcança em 2050 3x a produção do ano base, o que significa um crescimento médio de cerca de 2,3% a.a. As exportações de produtos agrícolas respondem por cerca de 20% da produção do ano base, mas, durante o período de análise, apresentam um crescimento em médio de 4,3% a.a., de modo que cerca de 61% da produção nacional é exportada ao final do período. As importações apresentam um crescimento inferior a produção doméstica, alcançando em 2050 um índice de 1,5x a importação do ano base.

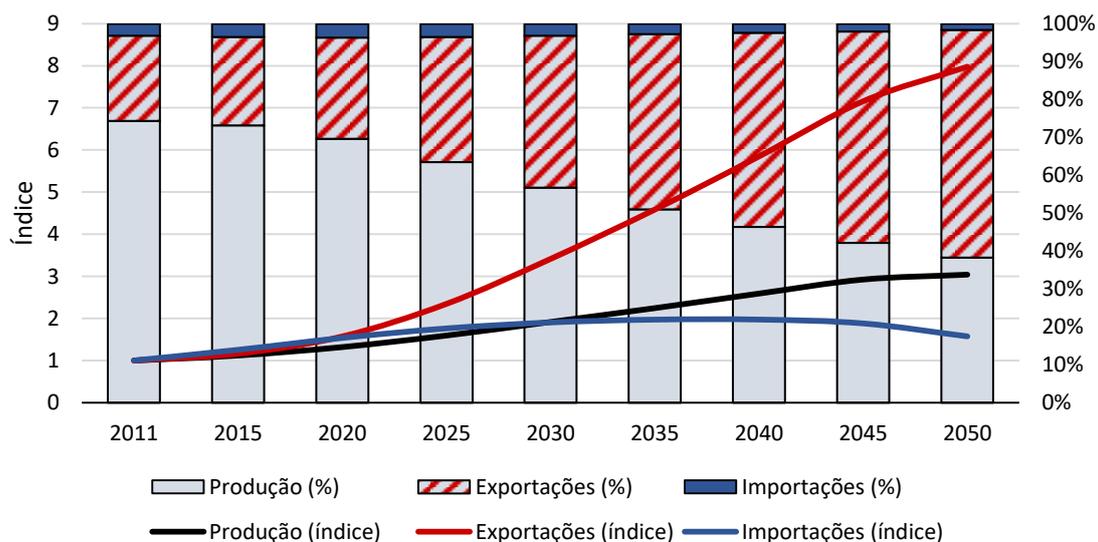


Figura 141: Evolução da produção e do comércio internacional agrícola (AGR) brasileira no cenário 1.5C do modelo TEA

A produção da pecuária (CTL) brasileira apresenta em 2050 um índice de 0,5x a produção do ano base, o que significa que em média a produção cai cerca de 1,3% a.a., conforme a Figura 142. As exportações de produtos de CTL, embora representem menos de 1% da produção, zeram em 2050, o que representa uma queda média de 11% a.a. no período. Também com pouca representação, vale destacar o alto crescimento das importações que alcançam em 2050 um índice de 100x as importações do ano base, o que significa um crescimento de 9,9% a.a., representando cerca de 30% da oferta total.

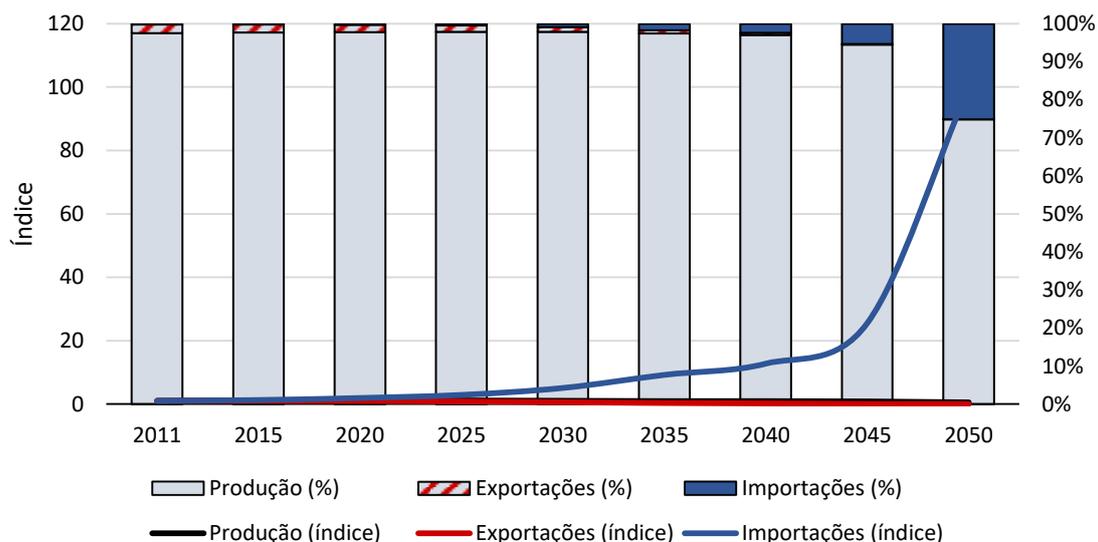


Figura 142: Evolução da produção e do comércio internacional da pecuária (CTL) brasileira no cenário 1.5C do modelo TEA

De acordo com a Figura 143, pode-se observar que a produção de outros animais (OAP) nacional apresenta queda, alcançando em 2050 um índice de 0,9x a produção do ano base, representando cerca de 94% da oferta total. As exportações de outros animais, embora representem menos de 1% da produção nacional, apresentam uma queda média de 6,5% a.a., zerando as exportações em 2050. As importações de OAP alcançam em 2050 um índice de 12,4x a importação do ano base, o que significa um crescimento médio de 5,3% a.a., representando cerca de 6% do total ofertado.

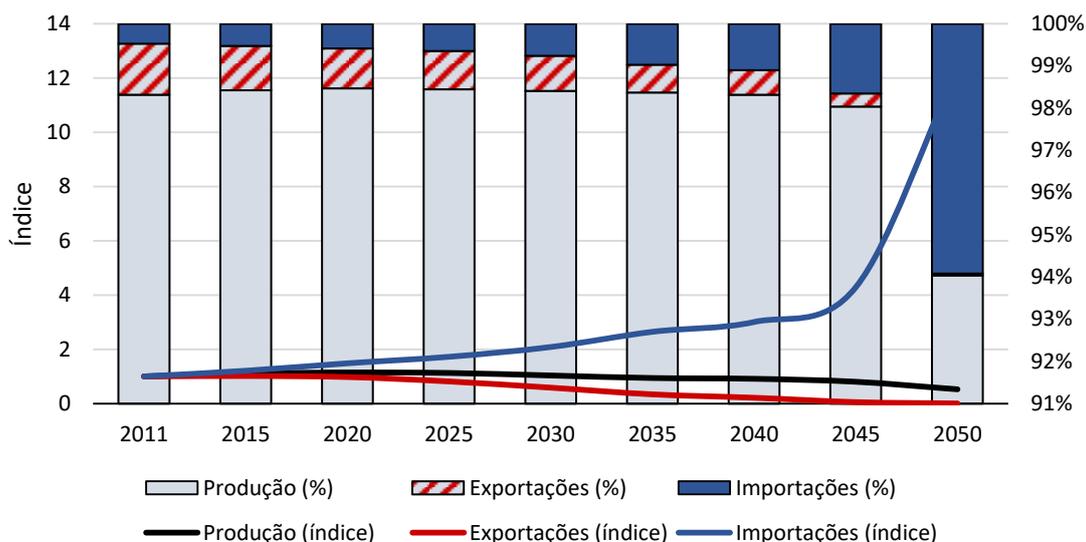


Figura 143: Evolução da produção e do comércio internacional de outros animais (OAP) brasileira no cenário 1.5C do modelo TEA

No que tange a produção da indústria de alimentos nacional, a Figura 144 mostra que a produção de alimentos sem carne (OFD) apresenta um crescimento médio de 0,7% a.a., alcançando em 2050 um índice de 1,4x a produção do ano base. Em média, cerca de 90% da produção de alimentos se destina ao mercado doméstico, mas no decorrer do período há um crescimento das importações em cerca de 2,8% a.a. As exportações apresentam queda de 12% a.a. no período, representando em 2050 cerca de 0,1% da produção nacional.

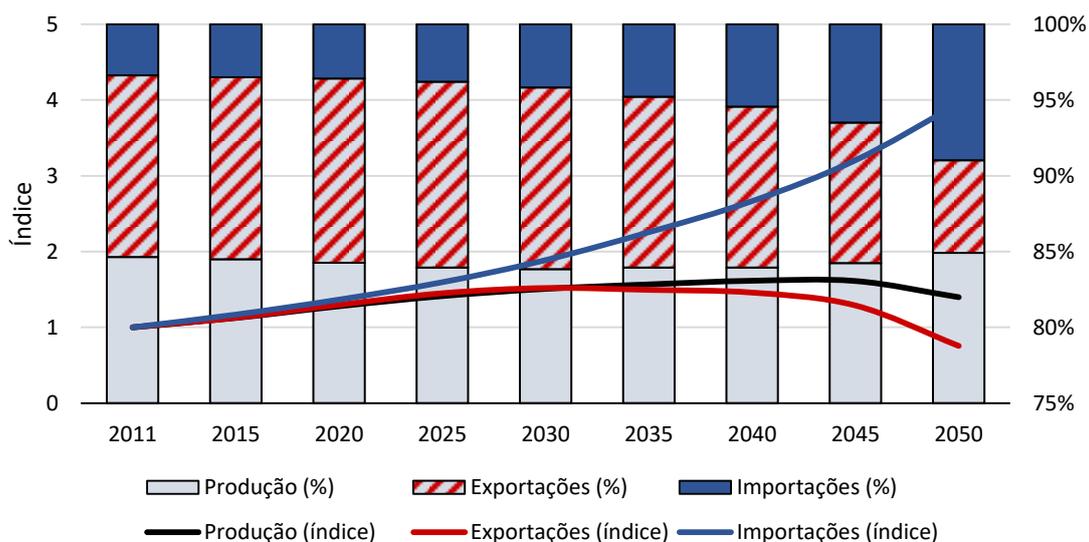


Figura 144: Evolução da produção e do comércio internacional da indústria de alimentos sem carne (OFD) no cenário 1.5C do modelo TEA

De acordo com a Figura 145, a produção da indústria de alimentos com carne (OMT) nacional apresenta um crescimento médio modesto de 0,7% a.a., alcançando em 2050 um índice em 2050 de 0,8x a produção do ano base. As exportações de OMT zeram em 2050, o que significa uma queda média de 12% a.a. no período. Por outro lado, as importações apresentam um índice em 2050 de 50x as importações do ano base, o que significa um crescimento médio de cerca de 8,3% a.a., representando cerca de 29% da oferta total em 2050.

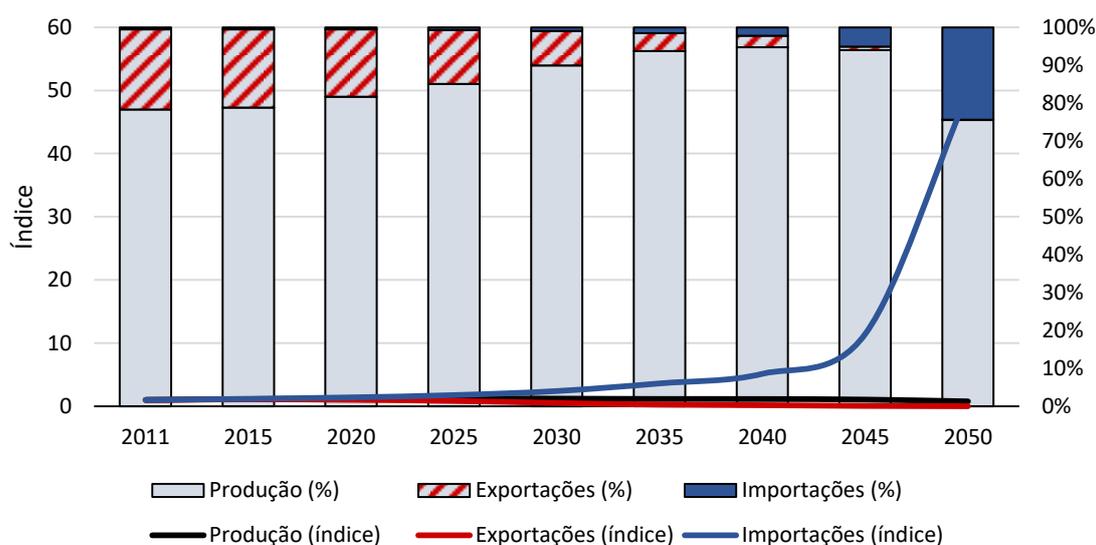


Figura 145: Evolução da produção e do comércio internacional da indústria de alimentos com carne (OMT) no cenário 1.5C do modelo TEA

A demanda brasileira por produtos agropecuários e por produtos da indústria de alimentos pode ser observada nas Figura 146 a Figura 150. Com relação à demanda por produtos agropecuários, pode-se observar na Figura 146 que a demanda por produtos agrícolas (AGR) de setores intermediários apresenta um crescimento médio de 1,1% a.a., alcançando em 2050 um índice de 1,7x a demanda do ano base. No que se refere a demanda das famílias, há uma queda modesta de 0,1% a.a., alcançando um índice de 0,9x a demanda do ano base. Setores intermediários respondem em média por cerca de 90% da demanda total de produtos agrícolas.

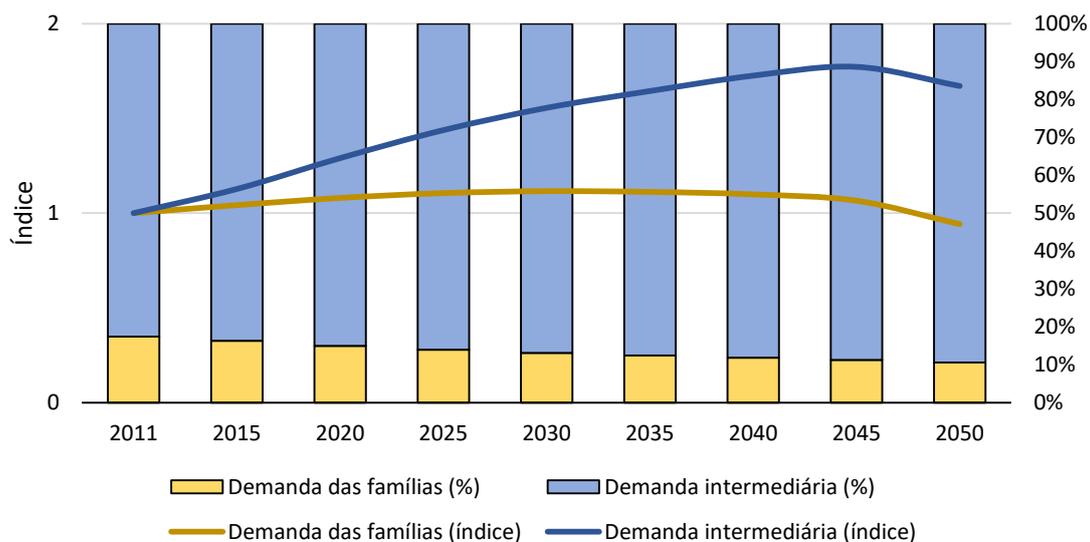


Figura 146: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos agrícolas (AGR) no cenário 2.0C do modelo TEA

Quanto a demanda por produtos da pecuária (CTL) e outros animais (OAP) brasileiros, de acordo com as Figura 147 e Figura 148, é possível observar uma queda de 1,1% a.a. para produtos de CTL e um crescimento modesto de 0,1% a.a. para produtos de OAP no decorrer do período, alcançando em 2050 índices de 0,6x e 1,1x a demanda intermediária respectiva do ano base. A demanda intermediária responde por quase a totalidade da demanda de produtos de CTL e cerca de 90% dos produtos de OAP. A demanda das famílias por produtos de OAP apresenta uma queda média de 1,5% a.a.

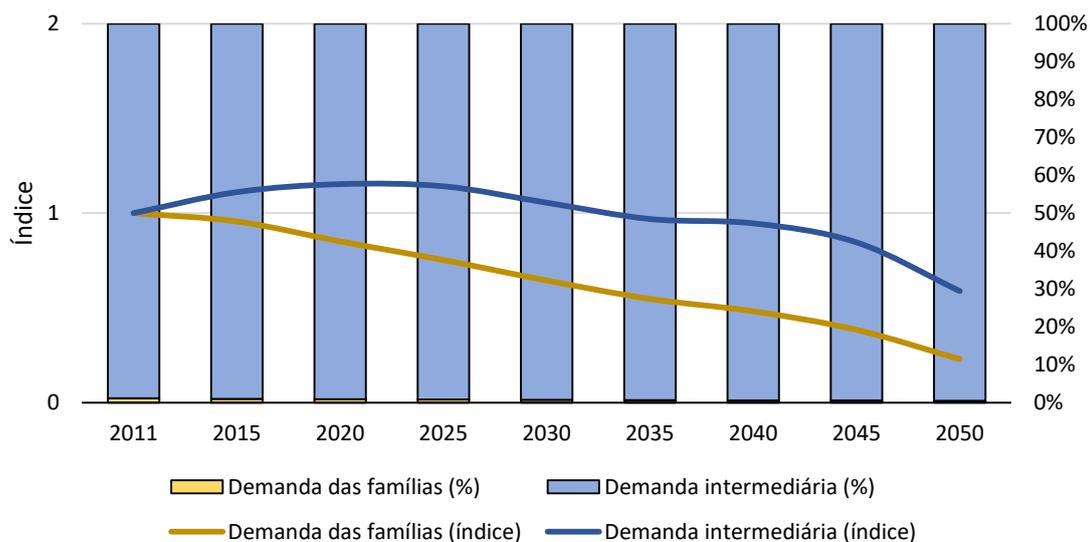


Figura 147: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos da pecuária (CTL) no cenário 1.5C do modelo TEA

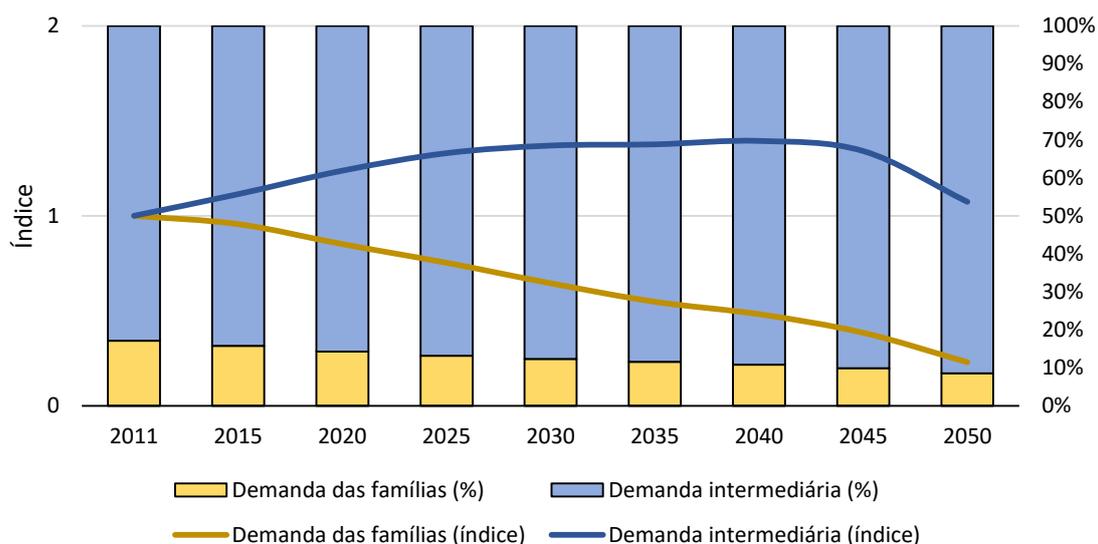


Figura 148: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos de outros animais (OAP) no cenário 1.5C do modelo TEA

Com relação à demanda brasileira por produtos da indústria de alimentos, a Figura 149 mostra que a demanda de setores intermediários por alimentos sem carne (OFD) apresenta um crescimento modesto de 0,7% a.a., alcançando em 2050 um índice de 1,7x a demanda do ano base. Quanto a demanda das famílias por alimentos sem carne, há um crescimento médio de 0,8% a.a., alcançando em 2050 um índice de 1,5x a demanda do ano base. A participação das famílias na demanda por alimentos sem carne se mantém em média 55%, enquanto que a demanda de setores intermediários responde por 45%.

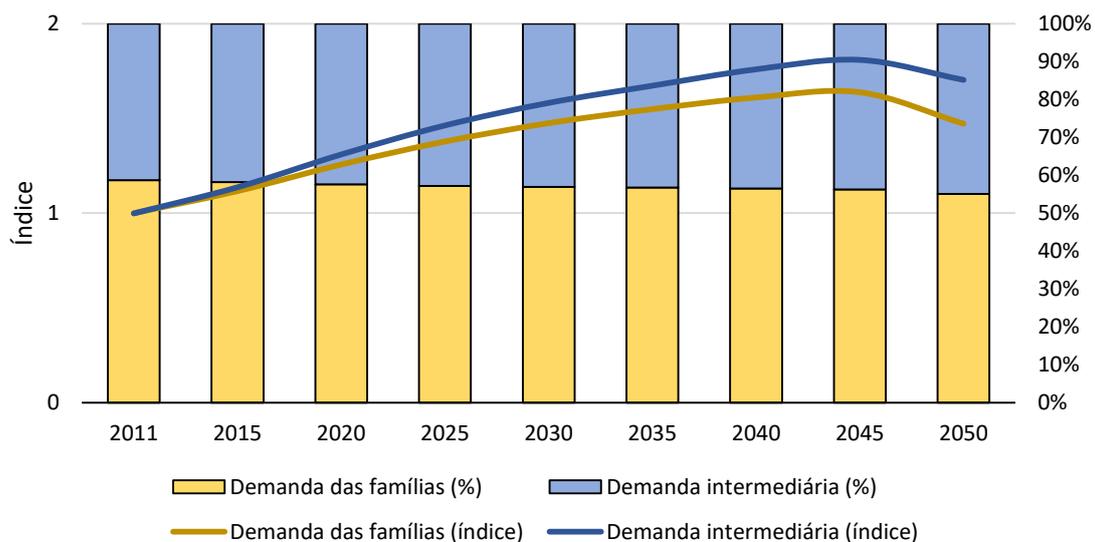


Figura 149: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos da indústria de alimentos sem carne (OFD) no cenário 1.5C do modelo TEA

De acordo com a Figura 150, a demanda das famílias por alimentos com carne apresenta uma queda modesta de 0,2% a.a., alcançando em 2050 um índice 0,9x a demanda do ano base. No que diz respeito a demanda de setores intermediários, há um crescimento médio de 1,1% a.a., alcançando um índice em 2050 de 1,7x a demanda do ano base. A participação da demanda das famílias por alimentos com carne representa em média cerca de 80% no ano base, mas perde participação no decorrer do tempo com o aumento da participação da demanda intermediária, alcançando em 2050 cerca de 60% do total demandado.

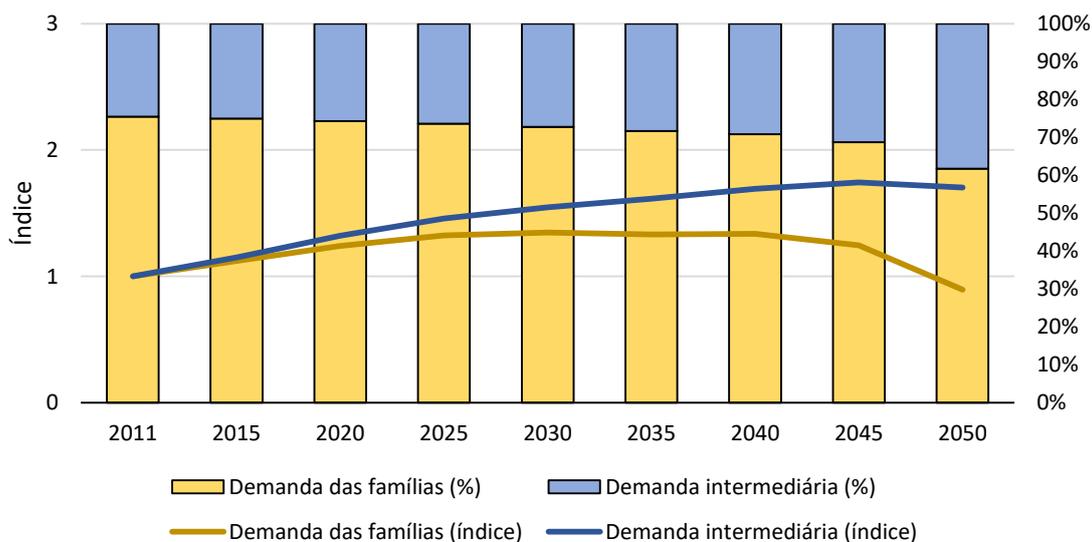


Figura 150: Evolução da demanda das famílias e de setores intermediários brasileiros por produtos da indústria de alimentos com carne (OMT) no cenário 1.5C do modelo TEA

4.3. Discussão

Nesta seção são discutidos os resultados do modelo TEA. A comparação dos resultados de cada cenário contribui para o entendimento dos seus impactos econômicos e ambientais. Detalha-se como o modelo responde aos choques de quantidade, oriundos do cenário de mudança comportamental da dieta global (REF_50), bem como aos choques de preços relativos dos cenários climáticos de estabilização da temperatura média global em até 2°C e até 1,5°C (2.0C e 1.5C, respectivamente). A análise se dá por indicadores econômicos, energéticos e ambientais, evidenciando a capacidade do modelo TEA em representar a substituição entre fontes energéticas e entre produtos de acordo com a intensidade de emissões de GEE. Em particular para o Brasil, destaca-se a análise detalhada dos efeitos econômicos e sociais oriundos de uma mudança comportamental da dieta global, bem como da mudança de dieta induzida por cenários climáticos restritivos de emissões globais.

A análise parte da comparação das evoluções dos PIB nos cenários implementados no modelo TEA. A Figura 151 apresenta as variações no PIB global nos diferentes cenários em relação ao cenário REF. O cenário REF_50 tem os mesmos níveis de PIB regionais que o cenário REF, ambos baseados nas trajetórias SSP2. Quanto aos cenários climáticos 2.0C e 1.5C, é possível observar impactos no PIB global. Essas perdas representam uma forma de estimar os custos agregados de se

perseguir metas de redução em emissões de GEE, ou seja, da transição para uma economia de baixo carbono. Essas perdas não significam que o crescimento do PIB se torna negativo, mas sim, que o PIB cresce a uma taxa menor que no cenário REF de ausência de políticas climáticas. Ademais, pode-se atribuir tais reduções na taxa de crescimento do PIB aos aumentos em custo de produção associados à precificação de emissões em todas as atividades que emitem GEE, à necessidade de redução no consumo de energia e de aumento na eficiência no uso da mesma, bem como à necessidade de investimentos em capital, trabalho e outros insumos na substituição de insumos e fontes de energia fósseis por insumos e fontes de energia menos intensivas em carbono ou renováveis. É importante ressaltar que não são considerados nesta análise os custos decorrentes dos impactos das mudanças climáticas caso ações para reduzir emissões não sejam adotadas. Portanto, não há como afirmar que os custos totais para a economia são maiores em cenários de mitigação, sendo cenários de adaptação um tema a ser perseguido em estudos futuros.

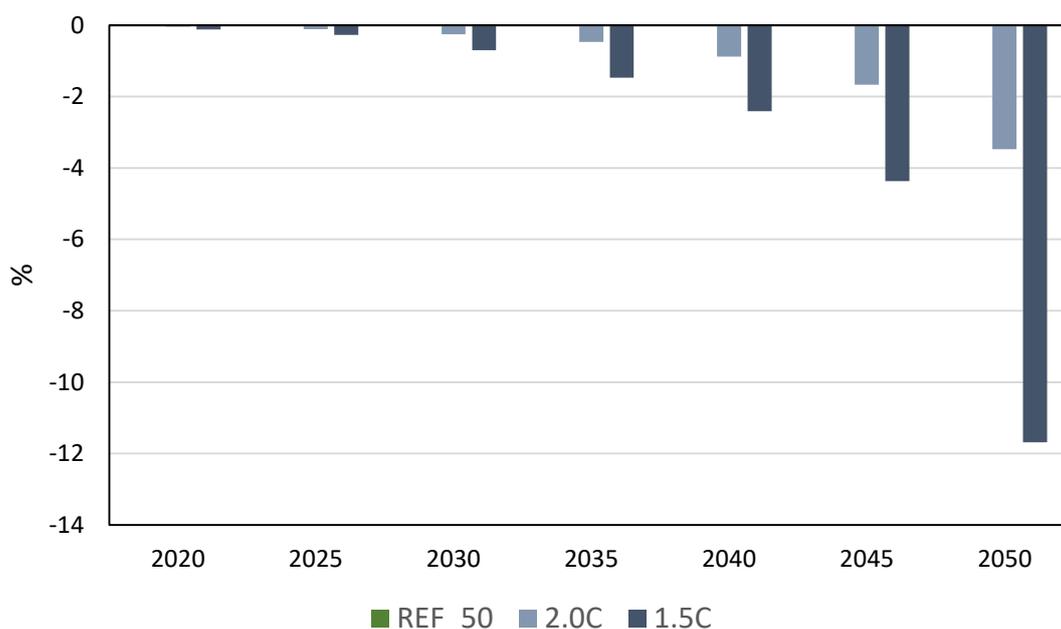


Figura 151: Variações no PIB (%) global dos cenários alternativos em relação ao cenário REF

O cenário climático 2.0C indica impactos modestos sobre o PIB global nos anos iniciais, queda de cerca de 0,03% e 0,15% em 2020 e 2030, respectivamente. Alcança em 2050 uma queda de 3,48%, o que significa que, durante o período, o PIB global apresentou um crescimento médio de 2,23% a.a., inferior ao crescimento médio do

cenário REF de 2,3% a.a. No cenário climático 1.5C, as perdas em PIB crescem acentuadamente com o tempo, considerando as hipóteses adotadas de incremento nos cortes em emissões. Os impactos iniciais são modestos, partindo de queda de 0,12% e 0,7% em 2020 e 2030, alcançando 11,68% em 2050, o que significa um crescimento médio do PIB global de 2,04% a.a.

No que se refere aos impactos sobre o PIB brasileiro, de acordo com a Figura 152, os cenários climáticos representam crescimentos modestos nos anos iniciais, cerca de 0,7% em 2020 para ambos os cenários e 0,4% em 2030 para o cenário 2.0C. Para o cenário 1.5C, a partir de 2030 a tendência de queda se inicia com 0,02%, alcançando em 2050 uma queda de cerca de 13%, o que significa um crescimento médio no período de 1,85% a.a. Para o cenário 2.0C, a trajetória de queda só tem início em 2040 com 0,2%, alcançando em 2050 cerca de 2,2%, o que significa um crescimento médio do PIB brasileiro de 2,1% a.a. Nota-se que a economia nacional é beneficiada pela precificação de emissões nos anos iniciais da análise, o que indica maior capacidade de amortecer custos comparado à média mundial, bem como maiores vantagens competitivas em relação a outras regiões no que se refere à intensidade de emissões.

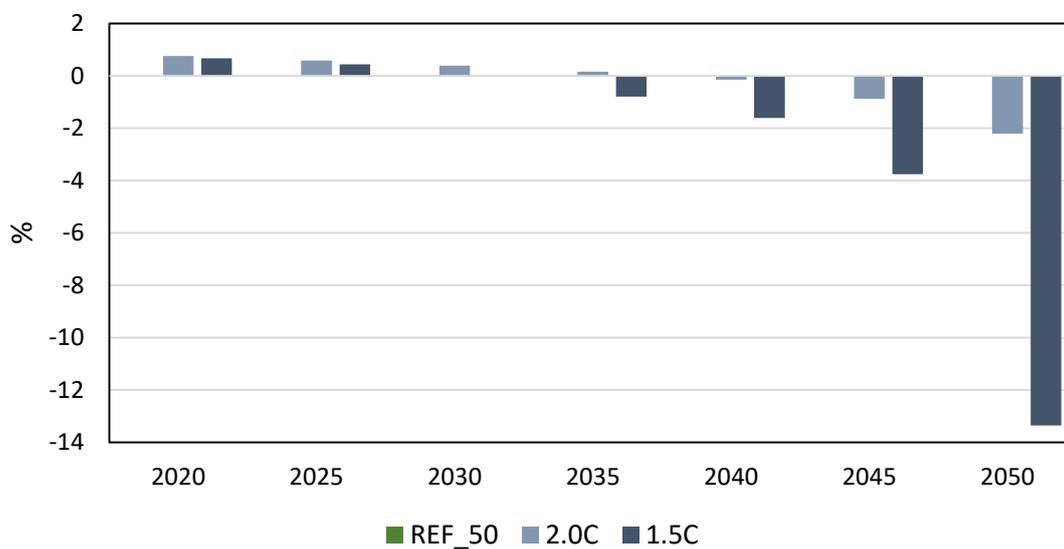


Figura 152: Variações no PIB (%) brasileiro dos cenários alternativos em relação ao cenário REF

As Figura 153 a Figura 156 apresentam as mudanças percentuais na produção brasileira dos setores, de forma agregada, projetadas pelo modelo TEA para todos os cenários alternativos. As mudanças percentuais são calculadas em relação à produção observada no cenário de referência (REF). A Figura 153 mostra os impactos na

produção dos setores agropecuários brasileiros, os quais, geralmente, experimentam quedas na produção em relação ao cenário REF quando da implementação de políticas climáticas em países desenvolvidos e em alguns países em desenvolvimento. No decorrer dessa seção será realizada uma análise mais detalhada desses setores, mas é possível observar que os impactos do cenário REF_50 são modestos comparados aos dos cenários climáticos. No cenário REF_50, alcança-se em 2050 uma queda de 1,2% em relação ao cenário REF, o que significa um crescimento médio no período de 2,15% a.a. Para o cenário 2.0C, a queda na produção de produtos agropecuários no início do período é modesta, cerca de 0,2% em 2020, porém cresce no decorrer do período, alcançando uma queda de 7,7% em relação ao cenário REF, o que significa um crescimento médio no período de 2% a.a. Os impactos do cenário 1.5C são mais elevados em virtude da necessidade de mitigar emissões para não elevação média da temperatura global, o que significa quedas de 1,2% em 2020, alcançando 21% em 2050 comparado com REF. A taxa média de crescimento dos setores agropecuários no cenário 1.5C é de 1,69% a.a. Esses resultados sobre a trajetória de crescimento médio indicam um efeito relativamente pequeno sobre os setores agropecuários, apesar do setor agropecuário brasileiro ser um dos mais afetados negativamente, em termos relativos, nos cenários alternativos analisados.

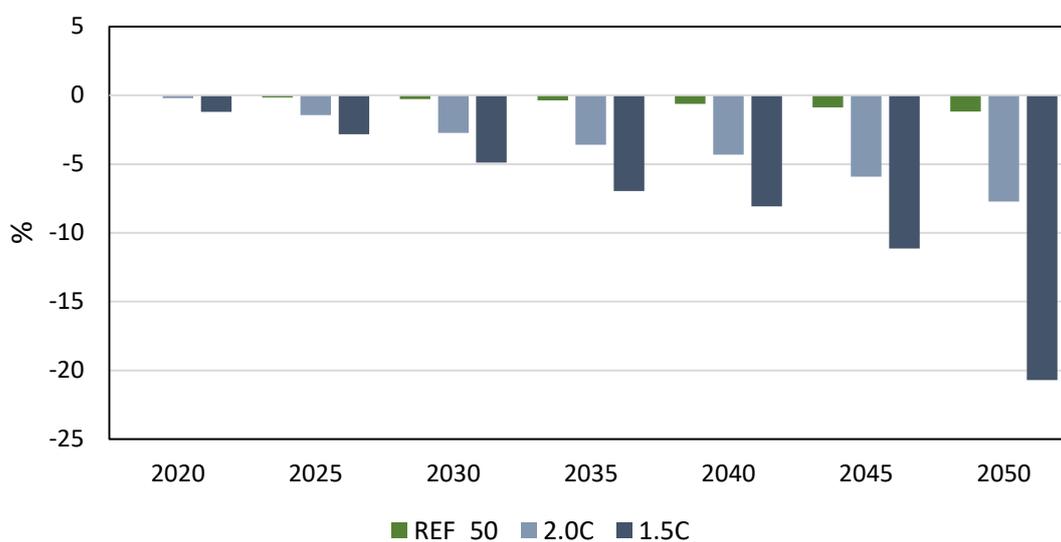


Figura 153: Variações na produção agropecuária (%) brasileira dos cenários alternativos em relação ao cenário REF

A Figura 154 mostra os impactos na produção dos setores industriais brasileiros. É possível observar que, no cenário REF_50, os setores industriais apresentam crescimento em relação ao cenário REF. Grande parte disso se deve ao crescimento da indústria de alimentos sem carne (OFD), que cresce no período em média cerca de 1,54% a.a., devido a mudança comportamental de dieta. Nos cenários climáticos, os setores industriais brasileiros apresentam comportamento de queda no período inicial de análise, culminando num crescimento ao final do período em relação ao cenário REF. No cenário 2.0C, há quedas modestas no início do período da ordem de 0,1 a 0,3%, alcançando em 2050 um crescimento de 0,4% em relação ao cenário REF, o que significa um crescimento médio no período de 1,3% a.a. No cenário 1.5C, ocorre o mesmo comportamento, mas com quedas levemente maiores do que no cenário 2.0C, alcançando em 2040 e 2050 crescimento de 0,4% e 1,9%, respectivamente, em relação ao cenário REF, o que significa um crescimento médio no período de 1,33% a.a.

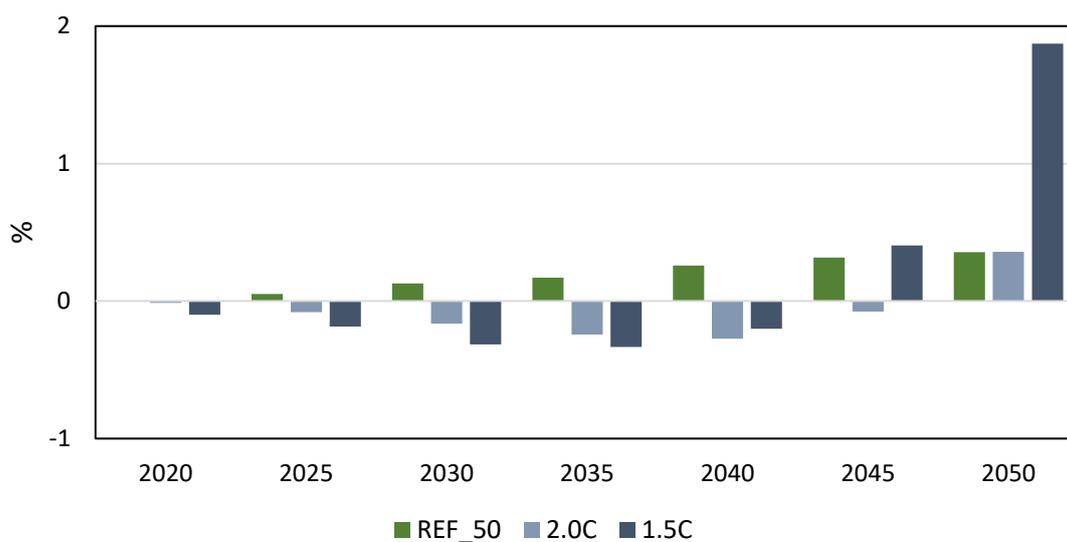


Figura 154: Variações na produção industrial (%) brasileira dos cenários alternativos em relação ao cenário REF

Tal comportamento dos setores industriais pode ser justificado a partir da metodologia por trás da criação dos cenários climáticos, os quais permitem o comércio de permissões de emissão entre setores e entre regiões, isto é, auferindo um preço global de carbono. As mudanças em produção diante das políticas revelam que os cortes em emissões mudam a competitividade relativa de um setor em relação aos demais, levando à realocação de fatores produtivos em direção aos setores com maior capacidade de

reduzir emissões e/ou consumo de energia fóssil, bem como afetam a competitividade relativa nos mercados internacionais, tanto por conta de diferenças na matriz energética quanto no conteúdo de carbono associado ao valor de cada bem. Sendo assim, os cenários climáticos provocam mudanças em custos relativos que podem ser mais favoráveis ou prejudiciais em alguns setores ou países.

No caso brasileiro, os resultados do cenário 2.0C e 1.5C no final do período de análise indicam que os setores industriais se tornam menos penalizados, relativamente a outros setores, diante de elevadas taxas aplicadas sobre as emissões de gases não-CO₂ na agropecuária e poucas opções de mitigação em outros setores (transportes e serviços). A possibilidade de comercializar emissões é aproveitada pelos setores industriais, grandes compradores de permissões, que se tornam atrativos para fatores produtivos (capital e trabalho), diante do fechamento de plano emprego assumido no modelo TEA, e crescem nos cenários climáticos 2.0C e 1.5C em média cerca de 1,3% a.a. e 1,33% a.a., respectivamente (superior ao crescimento médio de 1,29% a.a. do cenário REF)..

O setor de transporte brasileiro é afetado negativamente nos cenários climáticos, conforme a Figura 155. No cenário 2.0C, as quedas na produção ocorrem somente no final do período vão de 0,1% em 2040 até 0,9% em 2050 comparado com o cenário REF, o que significa um crescimento médio no período de 1,72% a.a. No cenário 1.5C, as quedas na produção vão de 0,1% em 2030, passando por 0,8% em 2040 e alcançando 7,6% em 2050 comparado com o cenário REF, o que significa um crescimento médio no período de 1,57% a.a. No cenário REF_50, a produção dos setores de transportes apresenta um crescimento médio no período de 1,75% a.a.

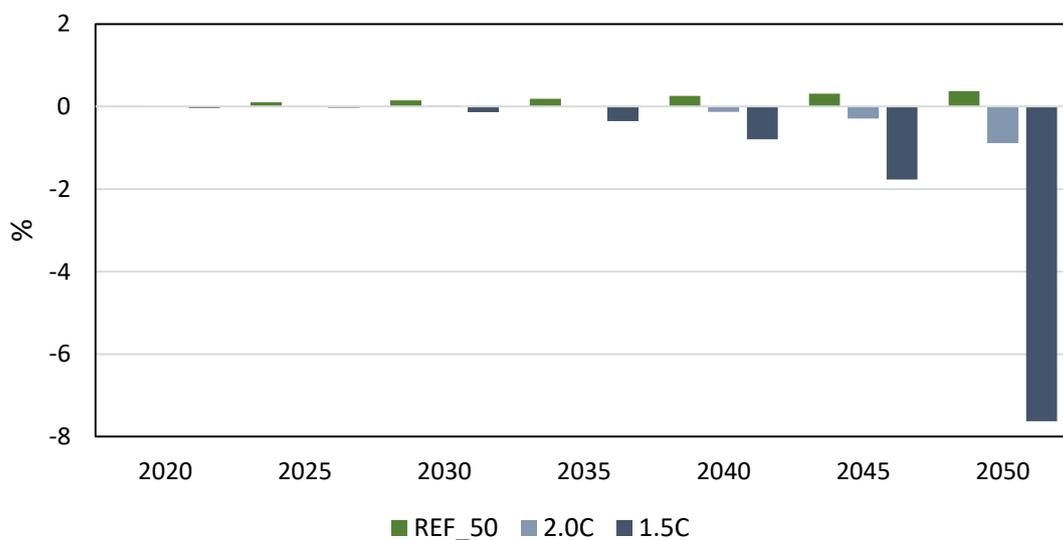


Figura 155: Variações na produção de transportes (%) brasileira dos cenários alternativos em relação ao cenário REF

A Figura 156 mostra as variações na produção do setor de serviços, onde é possível observar um comportamento semelhante, mas contrário, à produção industrial. Nos anos iniciais dos cenários climáticos, o setor de serviços é beneficiado pela comercialização de permissões de emissões, de modo a atrair fatores produtivos, gerando crescimento levemente superior ao cenário REF. Ao final do período, contudo, apresenta quedas, chegando a 3,6% no cenário 1.5C em 2050 comparado ao cenário REF. As taxas de crescimento médio no período para os cenários 2.0C e 1.5C são 1,96% a.a. e 1,89% a.a., respectivamente.

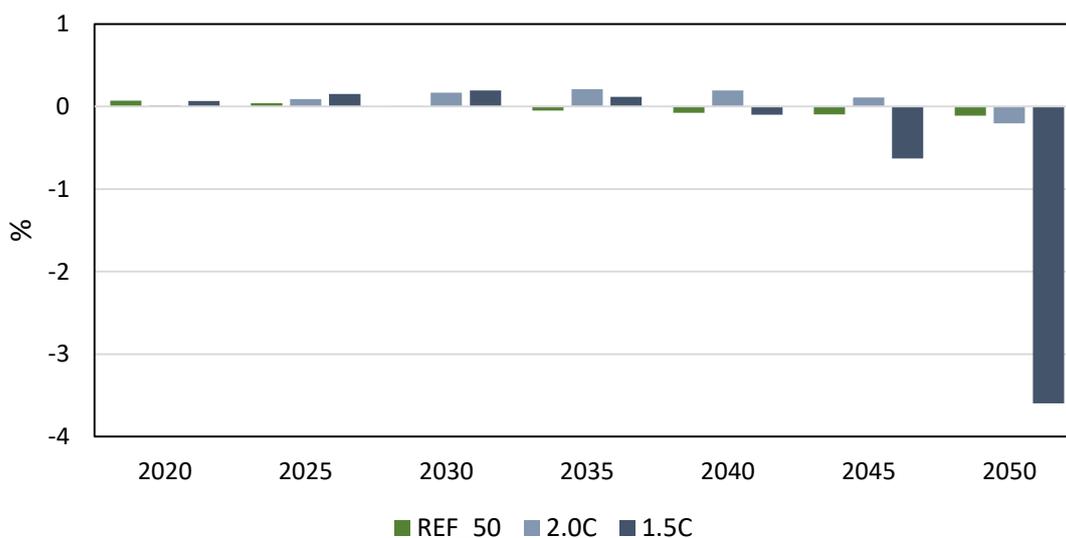


Figura 156: Variações na produção de serviços (%) brasileira dos cenários alternativos em relação ao cenário REF

No que tange à análise da geração elétrica e do consumo final de energia globais e nacionais, os resultados indicam como o modelo TEA responde às diferentes trajetórias dos cenários implementados, alterando o *mix* de fontes de energia. Em relação à geração elétrica global, a Figura 157 mostra sua evolução para todos os cenários. É possível observar a penetração de tecnologias menos carbono intensivas no lugar de fontes fósseis, com destaque para eólica, solar e biomassa, o que mostra que o modelo TEA tem capacidade de substituição entre as fontes de energia para geração elétrica de acordo com a intensidade de emissões. Ademais, os resultados mostram uma gradual redução da geração elétrica no decorrer do período nos cenários climáticos, comparados aos cenários REF e REF_50. A precificação de carbono no modelo reduz a produção de energia elétrica no mundo, como consequência da redução na demanda total por energia. Ressaltam-se o crescimento das tecnologias renováveis, tais como a eólica com crescimento médio no período de 6,8% a.a. no cenário 2.0C e 7,7% a.a. no cenário 1.5C, além de solar com 9,5% a.a. e 10,4% a.a., respectivamente⁷⁹. Vale destacar que a maior penetração no cenário 1.5C em relação ao cenário 2.0C é explicada pela maior necessidade de reduzir as emissões, o que significa maiores impactos em função de um

⁷⁹ A critério de comparação, no modelo COFFEE, as tecnologias eólica, solar e biomassa também despontam como as que mais penetram na matriz elétrica mundial, pois se tornam cada vez mais baratas no longo prazo (ROCHEDO, 2016). A tecnologia eólica apresenta um crescimento médio no período de 6,3% a.a. num cenário de estabilização da temperatura média em até 2°C e 8,2% a.a. num cenário de estabilização da temperatura média em até 1,5°C. Quanto a tecnologia solar, o modelo COFFEE projeta um crescimento médio de 4,7% a.a. no cenário 2°C e 9,2% a.a. no cenário 1,5°C.

preço global de carbono superior. No cenário 1.5C, as fontes fósseis respondem apenas por 1% da geração elétrica em 2050 e são substituídas por tecnologias menos carbono intensivas que se tornam cada vez mais baratas no longo prazo.

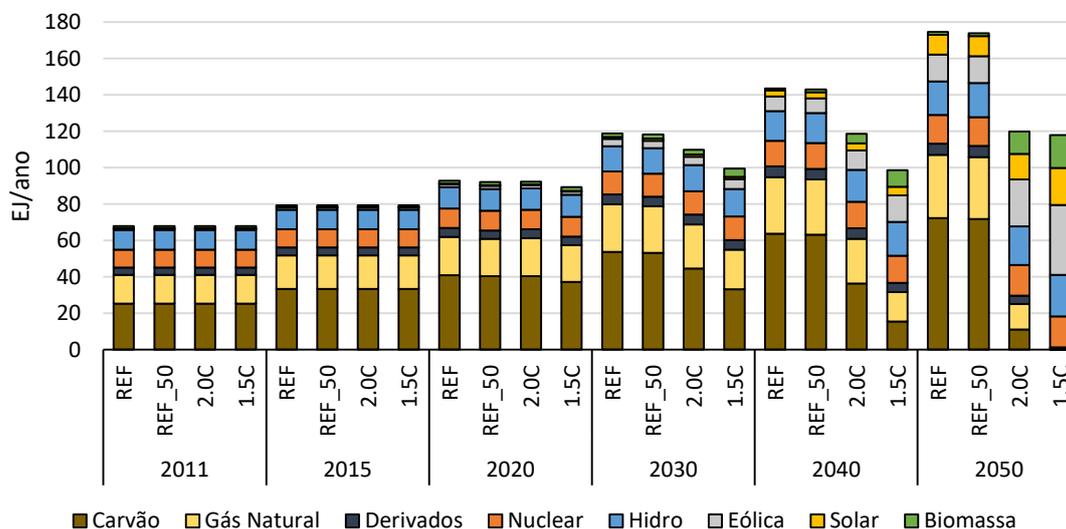


Figura 157: Geração elétrica global para todos os cenários do modelo TEA

A Figura 158 mostra a evolução da geração elétrica brasileira para todos os cenários, onde é possível observar a predominância de fontes menos intensivas em carbono, mesmo nos cenários REF e REF_50. Nos cenários climáticos, se observa a intensificação de tecnologias de base, como hidroelétricas, em conjunto com eólica, solar e, principalmente, biomassa. A geração elétrica via tecnologia nuclear se mantém estável no período, apresentando um crescimento significativo apenas em 2050 no cenário 1.5C. A produção de eletricidade apresenta crescimento no período de 2011 a 2050, de modo que a queda no PIB nacional não reduz a geração elétrica. Destaca-se que no Brasil, a taxa de crescimento médio no período da geração elétrica via biomassa alcança cerca de 6,3% a.a. para ambos cenários climáticos⁸⁰. Em 2050, o Brasil alcança uma matriz elétrica sem uso de fontes fósseis no cenário 1.5C, dado que estas se tornam muito caras com a precificação de carbono, perdendo participação para outras tecnologias, principalmente biomassa e hidroelétricas⁸¹.

⁸⁰ De acordo com ROCHEDO (2016), a penetração da geração elétrica via biomassa entre 2010 e 2050 apresenta um crescimento médio de cerca de 4,4% a.a. para ambos cenários climáticos.

⁸¹ Vale ressaltar que a expansão da geração hidroelétrica em 2050 no cenário 1.5C fica acima do potencial indicado por EPE (2019), o que indica pressão sobre o potencial ainda inexplorado, principalmente, na região amazônica, em cenários de metas climáticas ambiciosas.

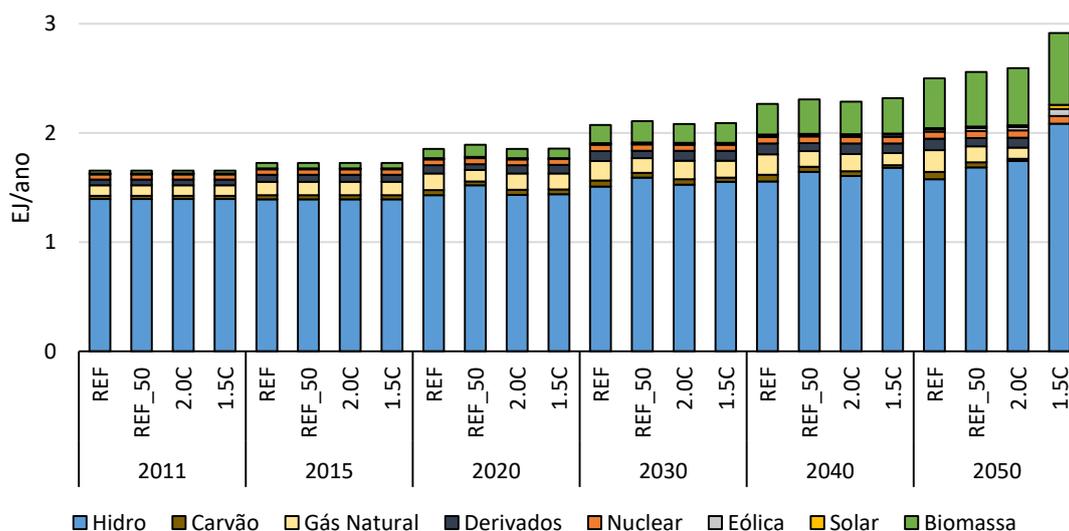


Figura 158: Geração elétrica brasileira para todos os cenários do modelo TEA

O consumo final de energia global é apresentado na Figura 159 para todos os cenários. É possível observar que não há diferenças entre consumo final de energia dos cenários REF e REF_50, porém estes comparados com os cenários climáticos apresentam variações relevantes. Além da redução do consumo de energias fósseis, principalmente carvão e gás natural, observa-se uma gradual redução no consumo de energia no decorrer do tempo nos cenários climáticos. A demanda total por energia se reduz nos cenários climáticos em virtude da menor atividade econômica, bem como de melhorias na eficiência energética. O consumo de derivados de petróleo apresenta poucas variações no período por apresentar um *lock-in* estrutural, no sentido da dificuldade de substituir determinados usos por outras fontes energéticas. Destaca-se a queda no consumo final de energia total no fim do período de análise nos cenários climáticos, o que se deve, principalmente, à queda na atividade produtiva global, mas também à ganhos autônomos de eficiência no uso de fontes energéticas pelos setores e agentes econômicos.

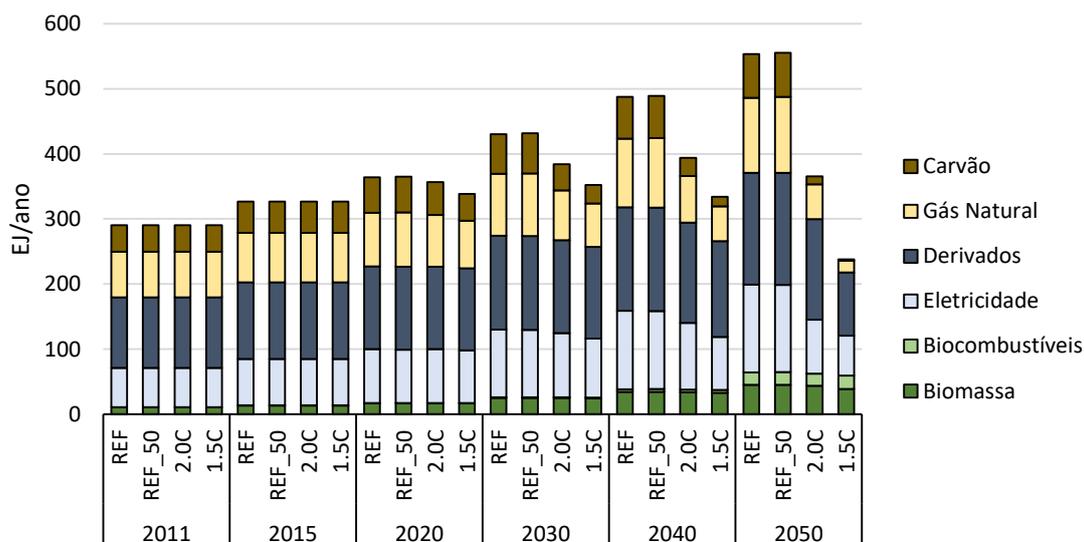


Figura 159: Consumo final de energia global para todos os cenários do modelo TEA

No Brasil, o consumo final de energia segue as tendências globais, conforme pode ser observado na Figura 160. O consumo de eletricidade apresenta crescimento médio no período de cerca de 1% a.a. para todos os cenários. Destaca-se o baixo consumo de fontes fósseis, como carvão e gás natural, comparado à média mundial. Cabe ressaltar o crescimento médio do consumo de biocombustíveis próximo a 5,8% a.a. no período, sendo uma das regiões mais contribuidoras na substituição de derivados de petróleo no setor de transportes.

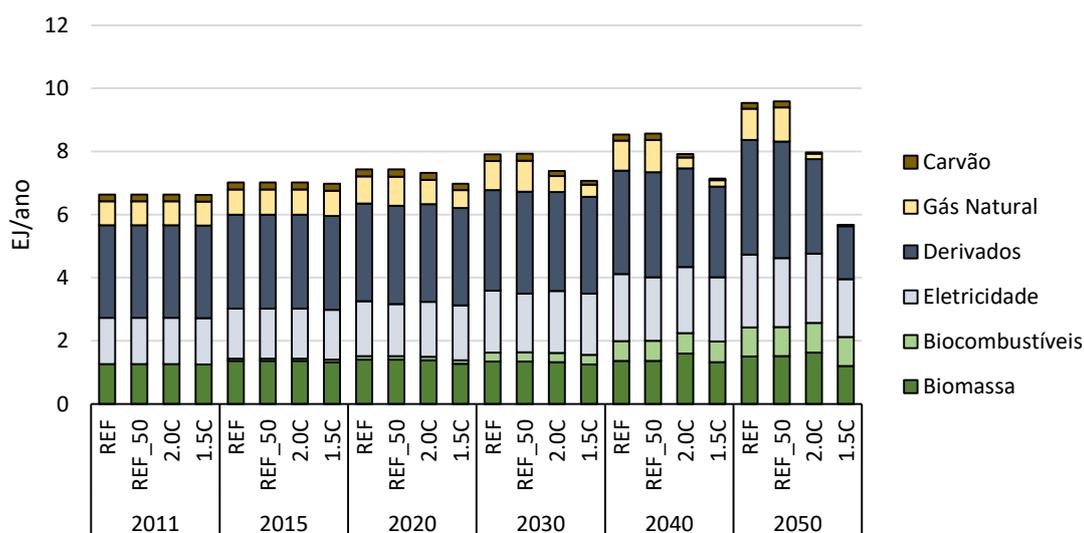


Figura 160: Consumo final de energia brasileiro para todos os cenários do modelo TEA

Os impactos dos cenários são, muitas vezes, melhor compreendidos quando se observam os impactos ambientais, isto é, como eles alteram a trajetória de emissões de GEE comparados ao cenário referência. Na Figura 161, é possível observar de que forma as emissões globais de CO₂ do modelo TEA evoluem nos cenários climáticos, comparados com os orçamentos de carbono de IAMs selecionados. Tanto no cenário 2.0C quanto no cenário 1.5C, o modelo TEA apresenta projeções de emissões de CO₂ que se posicionam como a envoltória superior em comparação às projeções dos demais modelos integrados, alcançando 1.360 GtCO₂ no cenário 2.0C e 1.100 GtCO₂ no cenário 1.5C. Isso se justifica por ser um modelo que conta com uma gama ainda inferior de tecnologias e opções de mitigação em relação aos demais modelos. Destaca-se que o modelo TEA apresenta tendências muito semelhantes ao modelo COFFEE, dado a compatibilização da base de dados de emissões.

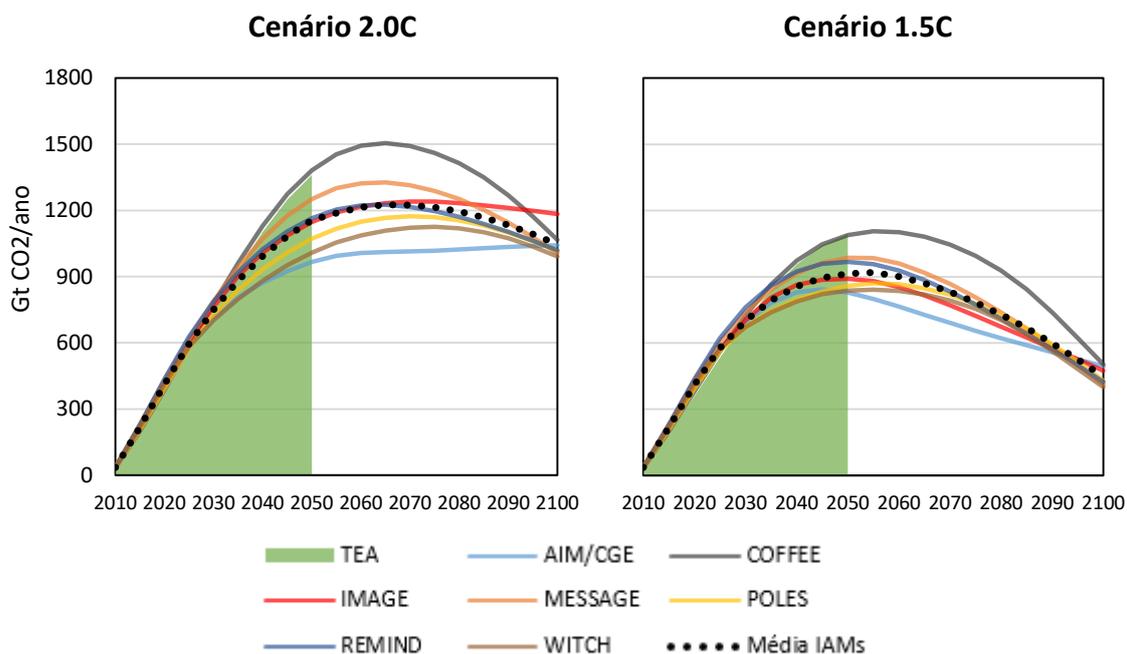


Figura 161: Orçamentos de carbono (emissões de CO₂) do modelo TEA e IAMs selecionados

A Figura 162 apresenta a evolução das emissões globais de GEE do modelo TEA, onde é possível observar as fortes reduções das emissões oriundas da queima de combustíveis fósseis (CO₂ – Energia), uma queda média no período de 0,8% a.a. no cenário 2.0C e cerca de 3% a.a. no cenário 1.5C, alcançando em 2050. Aquelas oriundas do uso do solo também apresentam queda, seja por mudança/desmatamento (CO₂ – Uso do Solo), ou emissões de gases não-CO₂ agropecuárias (CH₄ e N₂O – Uso do Solo). Vale ressaltar que, considerando que o comércio de permissões de emissões pode se dar

tanto entre setores quanto entre regiões, países desenvolvidos que apresentam elevadas emissões no cenário REF, tendem a se beneficiar nos cenários 2.0C e 1.5C, o que significa que são capazes de comprar créditos de outras regiões do mundo, aliviando suas necessidades de reduzir emissões.

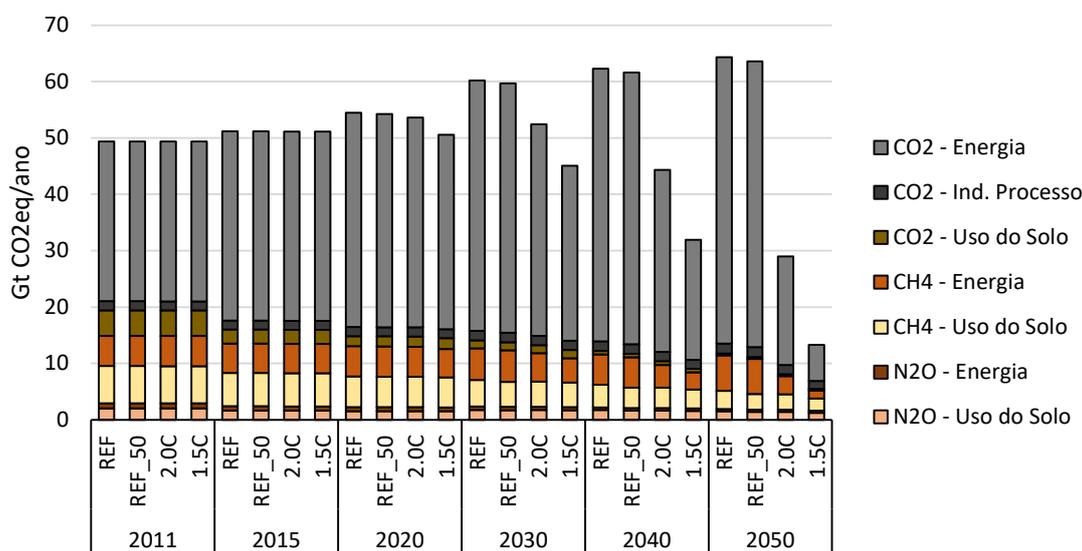


Figura 162: Emissões de GEE globais por tipo de gás e origem para todos os cenários do modelo TEA

No que tange às emissões oriundas do uso do solo, é possível observar na Figura 163 uma redução gradual para todos os tipos de gases e para todos os cenários. No cenário REF, a redução gradual das emissões de CO₂ é resultado da variação da oferta de terra endógena ao modelo TEA, enquanto que a redução gradual nas emissões de CH₄ e N₂O é oriunda de premissas sobre mudança do uso do solo do modelo COFFEE (ROCHEDO, 2016), tais como produtividade do solo e intensificação da pecuária. No cenário REF_50, em virtude da mudança comportamental na dieta, alcançam-se graduais reduções nas emissões de CH₄, partindo de 1% em 2025, passando por 8% em 2035 e chegando a 15% em 2050 comparado às do cenário REF; o mesmo vale para as emissões de N₂O que partem de quedas de 2% em 2030, passando por 5% em 2040 e alcançando 9% em 2050. Nos cenários climáticos, é possível observar os impactos da precificação de emissões nos setores agropecuários. No caso do cenário 2.0C, as emissões de CH₄ partem de reduções na ordem de 2% em 2025, passando por 8% em 2035 e chegando a 15% em 2050 comparado às do cenário REF; já para N₂O parte de quedas de 2% em 2030, passando por 6% em 2040 e alcançando 8% em 2050. Para o cenário 1.5C, as emissões de CH₄ partem de reduções na ordem de 4% em 2025,

passando por 13% em 2035 e chegando a 33% em 2050 comparado às do cenário REF; já para N₂O, parte de quedas de 4% em 2030, passando por 9% em 2040 e alcançando 18% em 2050.

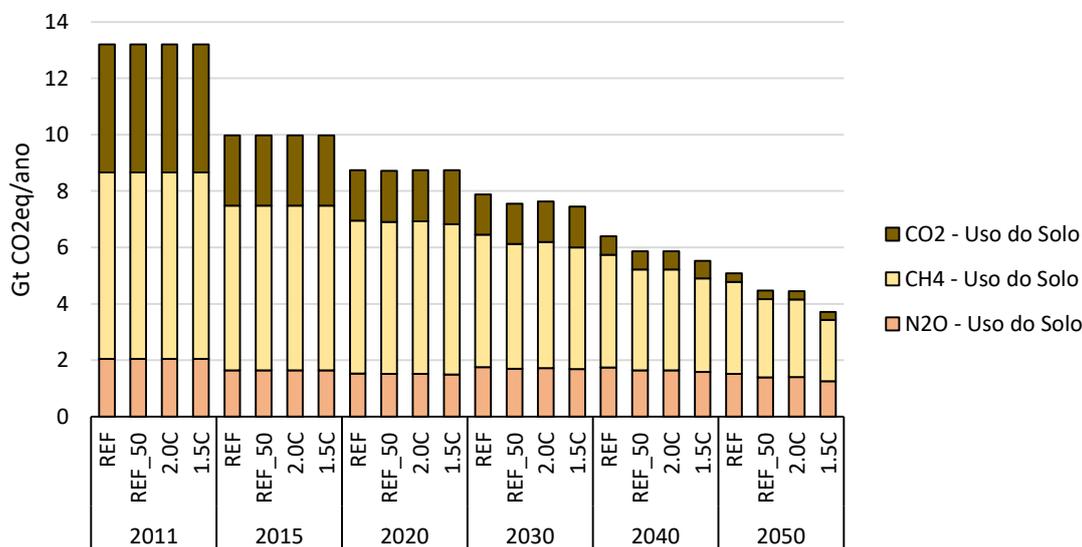


Figura 163: Emissões de GEE globais do uso do solo por tipo de gás para todos os cenários do modelo TEA

Ressalta-se que os impactos, em termos de redução de emissões de CH₄ e N₂O do uso do solo, são muito semelhantes entre os cenários REF_50 e 2.0C, o que permite inferir que o valor da precificação de emissões de CH₄ oriundos da agropecuária no cenário 2.0C pode ser interpretado como uma aproximação do quanto a economia global pode evitar em termos de custo caso a sociedade altere a sua maneira de se alimentar, isto é, a evolução do preço de carbono do cenário 2.0C (ver Figura 165), multiplicado pelo GWP₁₀₀ de CH₄, dá uma ideia do quanto seria necessário penalizar o consumo de carnes para que os consumidores sejam forçados a reduzir gradualmente sua preferência por alimentos com carne até alcançar uma queda de aproximadamente 50% em 2050. A precificação de emissões de GEE, através da cobrança de impostos diferenciados para emissões de gases não-CO₂, tende a aumentar os custos de produção para os agricultores, limitando também a expansão da terra, principalmente para a pecuária, de modo que sejam necessário mudanças nos sistemas de produção para reduzir a intensidade de emissões de GEE. Ainda nessa seção serão discutidos os impactos econômicos e sociais sobre a produção agropecuária e da indústria de alimentos no Brasil.

No que se refere às emissões de GEE brasileiras, a Figura 164 mostra a evolução por tipo de gás e origem para todos os cenários. É possível observar que as emissões oriundas do uso do solo têm grande participação no total emitido pelo país. A redução gradual das emissões de CO₂ é resultado da variação da oferta de terra no Brasil, endógena ao modelo TEA. É possível identificar diferenças de impactos, em termos de emissões de GEE, referentes à mudança comportamental de dieta global e da precificação das emissões de GEE de setores agropecuários. No cenário REF_50, as emissões de CH₄ apresentam redução, partindo de 1,3% em 2020, passando por 14% em 2035 e alcançando uma queda de 28% em 2050 comparado às do cenário REF; já para N₂O, parte de quedas de 1% em 2020, passando por 11% em 2040 e alcançando 23% em 2050. No cenário 2.0C, as emissões de CH₄ apresentam redução levemente mais acentuada, partindo de 1% em 2020, passando por 20% em 2035 e alcançando cerca de 40% em 2050 comparado às do cenário REF; já para N₂O, parte de quedas de 1% em 2020, passando por 17% em 2040 e alcançando 35% em 2050. Já para o cenário 1.5C, as reduções nas emissões de CH₄ e N₂O são ainda mais acentuadas comparadas às do cenário REF, alcançando-se em 2050 reduções de cerca de 63% e 57%, respectivamente para cada gás.

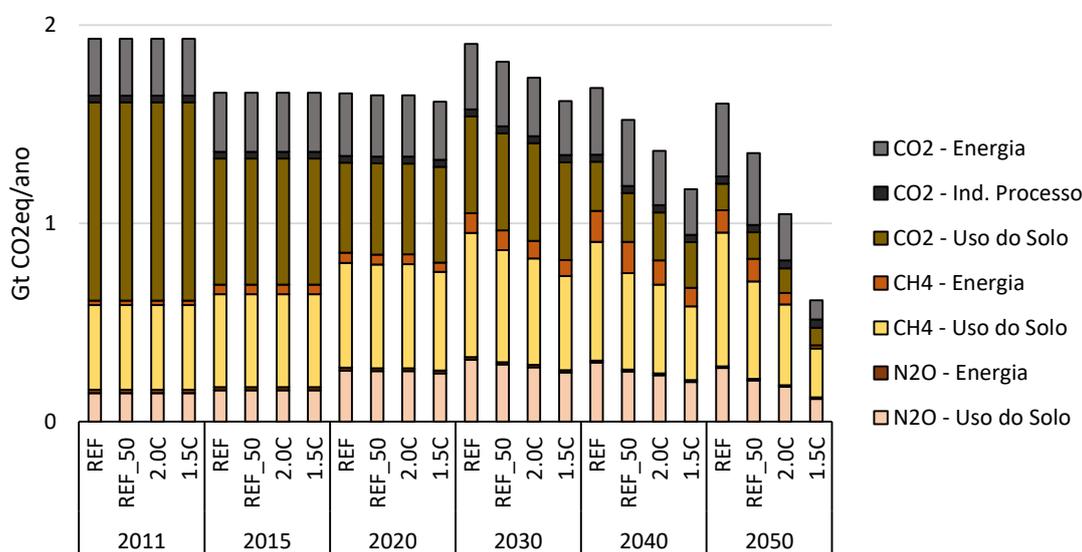


Figura 164: Emissões de GEE brasileiras por tipo de gás e origem para todos os cenários do modelo TEA

Uma mudança de dieta global, representada pelo cenário REF_50, resulta numa inversão de tendência na evolução das emissões brasileiras de CH₄ – Uso do Solo, o que significa um crescimento médio no período de apenas 0,3% a.a., inferior a 0,98% a.a. do

cenário REF. Para os cenários climáticos, as emissões de CH₄ apresentam quedas médias no período de 0,1% a.a., no cenário 2.0C, e 1,1% a.a. no cenário 1.5C. Portanto, é possível notar que os cenários de mudança de preços relativos (2.0C e 1.5C) apresentam impactos no Brasil, em termos de redução de emissões, superiores ao cenário de mudança comportamental (REF_50).

Por trás dessas reduções nas emissões de GEE nos cenários climáticos está o custo social de carbono ou preço global de emissões auferido para cada um dos cenários climáticos. Conforme a Figura 165, é possível observar a evolução do preço global de carbono do modelo TEA e o preço global de carbono (CO₂) do cenário 2.0C de IAMs selecionados. Nota-se que a evolução do preço global de emissões do modelo TEA no cenário 2.0C se posiciona próximo a média dos preços de carbono dos demais modelos, alcançando em 2050 o valor de US\$ 280 por tonelada de CO₂. No cenário 1.5C, o modelo TEA atinge um nível cerca de 10x superior ao do cenário 2.0C em 2050, o que pode ser justificado pela carência de opções de mitigação, tal como tecnologias disruptivas de remoção de dióxido de carbono (CDR, sigla em inglês). Isso indica que desenvolvimentos futuros do modelo TEA devem focar na representação de tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS, sigla em inglês). A maioria dos IAMs conta com a representação e dependem dessas tecnologias para rodar cenários climáticos mais restritivos. A bioenergia com CCS (BECCS), por exemplo, é considerada uma tecnologia essencial na maioria dos cenários para limitar o aquecimento global, porém são tecnologias ainda não comerciais e, portanto, não tão fáceis de se implementar rapidamente e em larga escala (ANDERSON e PETERS, 2016; MINX *et al.*, 2018; FAJARDY *et al.*, 2019).

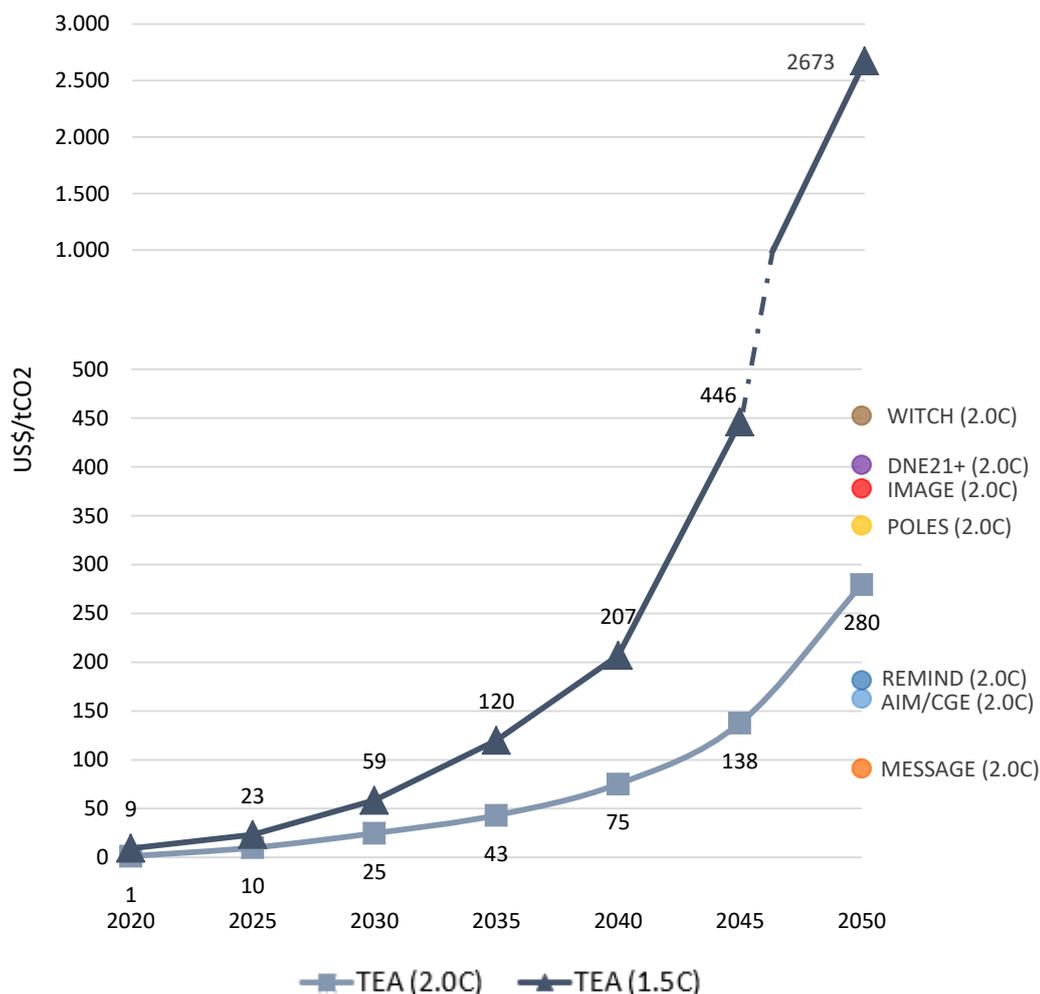


Figura 165: Evolução do preço de carbono global dos cenários climáticos do modelo TEA e preço de carbono global em 2050 do cenário 2.0C de IAMs selecionados

Entretanto, a aplicação de um preço global de emissões entre regiões e setores, sem acompanhamento de políticas setoriais e sociais, pode resultar em efeitos desiguais, principalmente, sobre a competitividade agropecuária de determinadas regiões e a disponibilidade de alimentos no mundo (FRANK *et al.*, 2017; HOSEGAWA *et al.*, 2018). É importante ressaltar que agricultura, mudanças climáticas e bem-estar humano apresentam diversos nexos, a começar pelo setor ser um dos mais vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas⁸² e, ao mesmo tempo, ter grande contribuição para as mudanças climáticas (IPCC, 2014; FAO, 2017). Além disso, a disputa pelo uso da terra tende a se intensificar em cenários climáticos mais restritivos, dado a necessidade de se reflorestar e usar biomassa para produzir energia, substituindo as emissões de fontes

⁸² Alterações na temperatura, precipitação, infestação de pragas e ocorrência de eventos extremos, o que pode afetar significativamente a produtividade agropecuária (FRANK *et al.*, 2017; BHATTACHARYA, 2019).

fósseis, o que pode afetar o fornecimento de alimentos para uma população global cada vez maior e, possivelmente, com mais poder aquisitivo e maiores necessidades dietéticas.

A globalização conecta pessoas, bens e serviços ao redor do mundo, o que significa que o alto consumo de alimentos em países desenvolvidos tende a não só aumentar a pressão sobre o uso da terra destas regiões, mas também de regiões geograficamente distantes (FAO, 2004). Embora os países em desenvolvimento respondam por cerca de 40% das emissões globais de CO₂, eles emitem mais da metade de N₂O e quase 70% das emissões globais de CH₄, sendo a maior parte destas relacionadas à agropecuária que, muitas vezes, produz culturas agrícolas e pecuária de corte com baixa produtividade e sem preocupação ambiental no que tange a intensidade de emissões (MCMICHEL *et al.*, 2007; FAO, 2017). A América do Sul, por exemplo, é uma área particularmente importante no que diz respeito a pecuária e terras cultivadas usadas para consumo em outros países.

Historicamente, o Brasil é um dos maiores produtores agrícolas do mundo e boa parte de sua área agropecuária é usada para produzir *commodities* cujo consumo se dá fora do país (TIRADO *et al.*, 2018). Atualmente, cerca de 34% do território brasileiro é ocupado por terras agropecuárias (IBGE, 2016), muito próximo da média mundial de cerca de 37%, conforme FAO (2017). De acordo com MAPA (2017), a produção agropecuária brasileira apresentou um crescimento médio de cerca de 3,8% a.a., entre 1991 e 2017, sendo que a produção de grãos cresceu 312%, culminando na safra recorde em 2016/2017, fornecendo para mais de 150 países (EMBRAPA, 2018). No mesmo período, a área fundiária cresceu 61%, alcançando, atualmente, cerca de 295 milhões de hectares dedicados à lavoura e às pastagens⁸³, o que significa a 3ª maior área de produção agropecuária do mundo. Esses dados mostram importantes avanços na produtividade da agropecuária nacional, o que torna o Brasil hoje o 4º maior produtor de alimentos, ficando atrás apenas da China, dos Estados Unidos e da Índia (FAO, 2017). Contudo, cabe ressaltar que essa evolução da produtividade resulta em aumentos de faturamento e lucros, o que acaba incentivando agricultores e pecuaristas a expandir suas terras, pressionando cada vez mais áreas protegidas⁸⁴, que ocupam cerca de 25%

⁸³ Inclusive campos naturais utilizados como pasto no Pampa, no Rio Grande do Sul, e no Pantanal, no Mato Grosso do Sul.

⁸⁴ Terras indígenas e unidades de conservação, representadas pelas Áreas de Preservação Permanente (APP) e Reservas Legais (RL).

do território brasileiro (IBGE, 2016) e são muito relevantes para a preservação da região de maior biodiversidade de espécies animais e vegetais do mundo.

Sendo assim, a análise dos impactos econômicos sobre setores-chaves na produção de alimentos no Brasil se torna um exercício fundamental para entender de que forma é possível desenvolver o país de maneira menos intensiva em emissões. Detalhando os resultados dos setores agropecuários e da indústria de alimentos brasileiros é possível avaliar os impactos de uma mudança comportamental de dieta global (REF_50), bem como de que forma a precificação de emissões de GEE (cenários 2.0C e 1.5C) induz alterações na forma como os brasileiros se alimentam.

Na Figura 166, é possível observar as variações na produção dos setores agropecuários brasileiros dos cenários alternativos em relação ao cenário REF. No cenário de mudança comportamental da dieta global (REF_50), o setor agrícola (AGR) brasileiro é beneficiado, apresentando crescimento em relação ao cenário REF, partindo de 0,5% em 2020, passando por 2,3% em 2030 e chegando a 3,9% em 2050, o que significa um crescimento médio no período de 2,63% a.a. frente a 2,55% a.a. do cenário REF. Por outro lado, os setores da pecuária (CTL) e outros animais (OAP) apresentam quedas graduais, alcançando cerca de 34% e 10%, respectivamente, em 2050 comparado a produção do cenário REF, representando um crescimento médio no período de 0,47% a.a. e 0,89% a.a., frente a 1,35% a.a. e 1,11% a.a., respectivamente, do cenário REF. Isso mostra que uma mudança de dieta global, no sentido de reduzir a preferência por alimentos com carne, afeta negativamente a produção de CTL e OAP no Brasil, uma das principais regiões consumidoras e exportadoras de carne, junto com Estados Unidos, Canadá, União Europeia, Argentina e Nova Zelândia, de acordo com GRAIN e IATP (2018).

Ainda na Figura 166, nos cenários climáticos, onde a precificação de emissões de GEE são internalizados na atividade econômica, é possível observar impactos sobre os setores agropecuários nacionais. No cenário 2.0C, o setor agrícola (AGR) apresenta crescimento modesto até 2040, quando apresenta queda de 1,4% em 2050, o que significa um crescimento médio no período de 2,52% a.a., levemente abaixo de 2,55% a.a. do cenário REF. Em contrapartida, os setores da pecuária (CTL) e outros animais (OAP) apresentam quedas graduais, alcançando cerca de 48% e 20%, respectivamente, em 2050 comparado a produção do cenário REF, representando uma estagnação do setor CTL com queda média no período de 0,003% a.a. e um crescimento médio de 0,64% a.a. para OAP. Já no cenário 1.5C, o setor agrícola apresenta crescimento

modesto até 2030, quando inicia uma queda, culminando em 11% em 2050, o que significa um crescimento médio no período de 2,29% a.a. Os setores da pecuária e outros animais apresentam quedas acentuadas, alcançando cerca de 72% e 45%, respectivamente, em 2050 comparado à produção do cenário REF, representando uma queda média no período de 1,3% a.a. para CTL e 0,15% a.a. para OAP. Nota-se que a precificação de emissões de GEE penaliza os setores agropecuários, grandes emissores de CH₄ e N₂O, implicando em fortes reduções na pecuária de corte, representada pelos setores CTL e OAP.

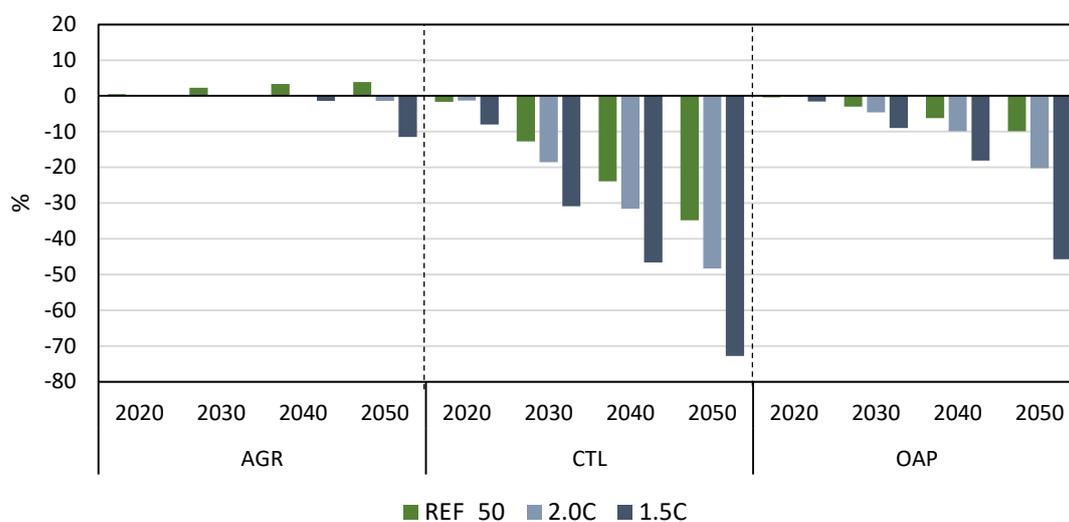


Figura 166: Variações na produção (%) dos setores agropecuários brasileiros dos cenários alternativos em relação ao cenário REF

Assim, um mundo onde as pessoas estariam dispostas a mudar seu estilo de vida, principalmente, no que se refere a reduzir o consumo de alimentos com carne, tende a impactar a produção de setores agropecuários brasileiros, porém menos do que nos cenários climáticos que consideram a precificação de emissões de GEE. Em 2050, a produção de CTL no cenário REF_50 representa cerca de 65% da produção, no mesmo ano, do cenário REF, porém mais do que o dobro da produção em 2050 do cenário 1.5C e 26% a mais do que no cenário 2.0C. Nota-se a necessidade de políticas climáticas para transições justas, de modo a atenuar efeitos adversos sobre importantes setores econômicos.

No que se refere às variações na produção da indústria de alimentos brasileira, a Figura 167 mostra que no cenário REF_50 a produção de alimentos sem carne (OFD) apresenta crescimento, partindo de 0,7% em 2020, passando por 5,6% em 2030 e

chegando em 2050 com 14,6% a mais que no cenário REF, o que significa um crescimento médio no período de 1,54% a.a., frente a 1,26% a.a. do cenário REF. A produção de alimentos com carne (OMT), por outro lado, apresenta queda alcançando em 2050 cerca de 43% a menos que a do cenário REF, representando um crescimento médio no período de apenas 0,3% a.a., bem abaixo de 1,47% a.a. do cenário REF. Nota-se, portanto, como uma menor preferência mundial por alimentos com carne beneficia o setor da indústria nacional de alimentos sem carne, em detrimento de fortes quedas na indústria nacional de carne, uma das maiores do mundo, segundo GRAIN e IATP (2018).

Ainda na Figura 167, é possível observar os impactos dos cenários climáticos sobre a indústria de alimento nacional. No cenário 2.0C, a produção de OFD apresenta queda, partindo de 0,1% em 2020 e alcançando 5,6% em 2050 comparado ao cenário REF, o que significa um crescimento médio no período de 1,14% a.a., abaixo de 1,26% a.a. do cenário REF. A produção de OMT também apresenta quedas em relação ao cenário REF, alcançando em 2050 cerca de 38%, o que representa um crescimento médio no período de apenas 0,46% a.a., abaixo de 1,47% a.a. do cenário REF, mas superior ao do cenário REF_50. Já no cenário 1.5C, a produção de OFD apresenta queda alcançando 24% em 2050 em relação ao cenário REF, representando um crescimento modesto no período de apenas 0,69% a.a. A produção nacional de OMT, no cenário 1.5C, apresenta queda mais acentuada, alcançando 63% em 2050 comparado ao cenário REF, representando uma queda média no período de 0,54% a.a.

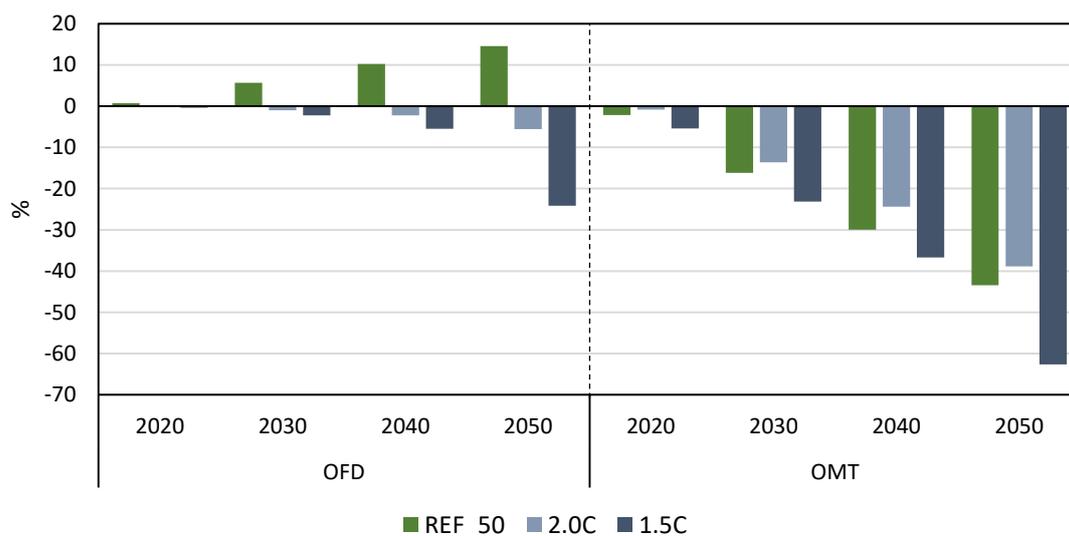


Figura 167: Variações na produção (%) dos setores da indústria de alimentos brasileira dos cenários alternativos em relação ao cenário REF

Novamente, considerando um mundo onde as pessoas estariam dispostas a reduzir o consumo de alimentos com carne, representado pelo cenário REF_50, a indústria de alimentos nacional poderia ser menos impactada, desde que o crescimento da indústria de alimentos sem carne (OFD) resulte num valor de mercado superior ao da queda estimada na indústria com carne (OMT). Destaca-se que a redução da indústria nacional de carne no cenário REF_50 é superior ao do cenário 2.0C, o que mostra que os efeitos secundários da precificação emissões de GEE nos setores agropecuários são amortecidos ao longo do sistema de produção de alimentos. Em 2050, a produção de OMT no cenário REF_50 representa um pouco mais da metade da produção, no mesmo ano, do cenário REF, porém 7% a menos do que no cenário 2.0C e 50% a mais do que a produção em 2050 do cenário 1.5C. Na Figura 168, é possível observar a localização das maiores empresas da indústria de alimentos de carne, as quais devem ser as mais impactadas no futuro, tanto por possíveis mudanças comportamentais na dieta mundial quanto devido a metas climáticas que podem ser alcançadas via precificação de carbono.

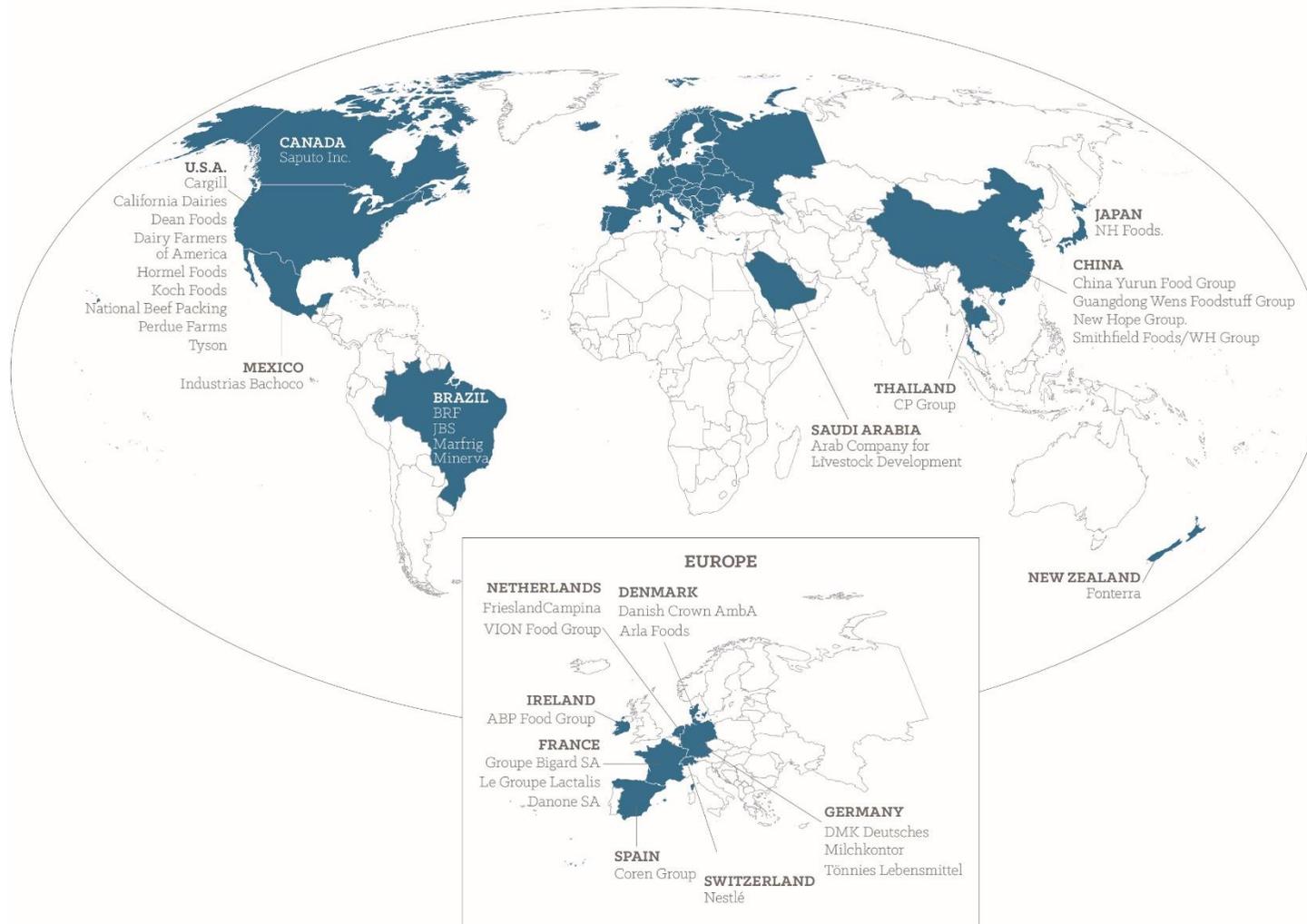


Figura 168: Localização das principais indústrias de alimentos de carne e laticínios do mundo

Fonte: GRAIN e IATP (2018)

Dado que o Brasil é um importante produtor de alimentos, não só para consumo doméstico, mas também para o resto do mundo, é importante avaliar os impactos também sobre o comércio internacional dos produtos agropecuários e da indústria de alimentos. Na Figura 169, é possível observar para onde se destinam as exportações brasileiras de *commodities* agrícolas (AGR) e produtos da indústria de alimentos, com e sem carne (OFD e OMT, respectivamente). Dentre os parceiros comerciais brasileiros de produtos agrícolas, destaca-se alta representatividade da China (CHN) em relação às demais regiões, cabendo citar ainda países do sudeste asiático (RAS), bem como países da Europa (WEU) e os Estados Unidos (USA). Quanto às exportações da indústria nacional de alimentos sem carne, destacam-se a China e os países do sudeste asiático, como os principais demandantes de alimentos sem carne brasileiros, seguidos de países da África (exceto África do Sul), Índia (IND), Oriente Médio (MEA), países da Europa (WEU), bem como América do Sul (SAM), Estados Unidos (USA), Rússia (RUS) e Coreia do Sul (KOR). Em relação às exportações de carne brasileira, destaca-se a China (CHN) como o maior demandante, seguido do Oriente Médio (MEA), além de países da América do Sul (SAM), países da Europa (WEU), do sudeste asiático (RAS), da África (AFR), Rússia (RUS) e Japão (JPN).

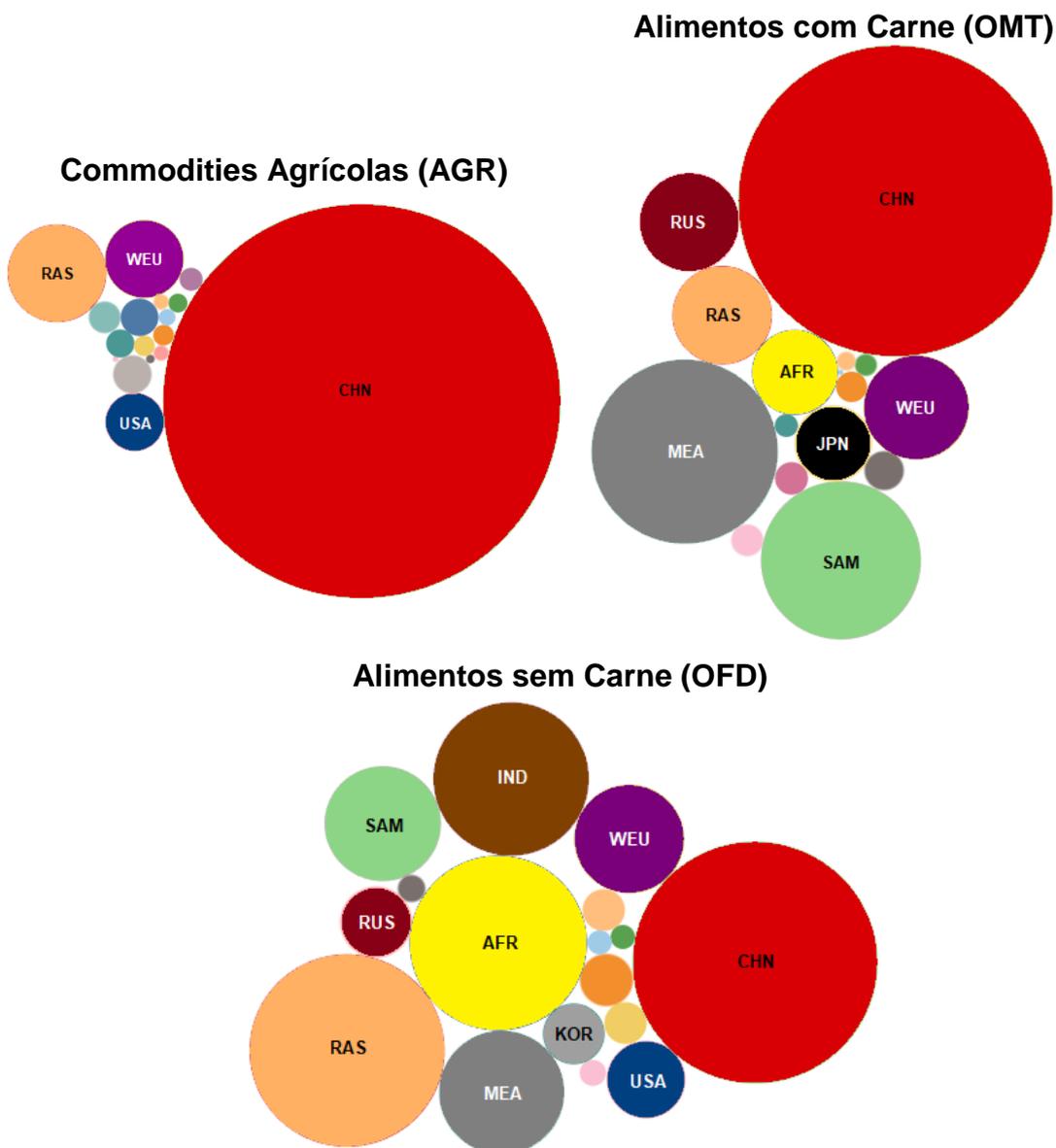


Figura 169: Principais destinos das exportações brasileiras de produtos agrícolas e da indústria de alimentos em 2050 do modelo TEA

A Tabela 19 apresenta a evolução das exportações e das importações de produtos agrícolas e de produtos da indústria de alimentos nacional, indicando, inclusive, as taxas de crescimento médio anual do período entre 2011 e 2050. Não foram incluídos os setores da pecuária de corte e outros animais (CTL e OAP), pois estes apresentam pouca representatividade no comércio internacional: cerca de 97% da produção se destina ao mercado doméstico e há pouca demanda externa por produtos desses setores. Vale ressaltar que, embora a pouca representação, nota-se uma inversão no comércio internacional desses setores, crescimento das importações e quedas nas exportações, principalmente, nos cenários climáticos, conforme observado nas Seções 4.3.3. e 4.3.4.

Isso indica que há outras regiões no mundo com uma produção menos intensiva em emissões, principalmente metano (CH₄), que ganham em competitividade em relação à produção nacional.

Para o setor agrícola (AGR), é possível observar que as exportações apresentam crescimento no período de análise, de modo que os 4,56% a.a. e os 4,53% a.a. dos cenários REF_50 e 2.0C, respectivamente, são maiores que 4,52% a.a. do cenário REF. As importações também crescem no período de análise, mas somente o cenário REF_50 apresenta importações maiores que o cenário REF. No que se refere às exportações de alimentos nacionais, observa-se crescimento médio das exportações de OFD em todos os cenários, exceto para o cenário 1.5C que apresenta pequena queda de 0,57% a.a. As importações de OFD, embora representem menos de 3% da oferta total doméstica brasileira, crescem em todos os cenários, com destaque para o cenário REF_50. Exportações de carne nacional apresentam crescimento apenas nos cenários REF e REF_50, 1,77% a.a. e 0,51% a.a., respectivamente, enquanto que, nos cenários climáticos, destaca-se a queda média de cerca de 12% a.a. no cenário 1.5C, representando o fim das exportações de carne nacional para o resto do mundo. As importações de carne apresentam crescimentos acentuados nos cenários climáticos, alcançando 8,3% a.a. no cenário 1.5C, o que significa cerca de 20% da oferta total doméstica brasileira. Nota-se, portanto, que nos cenários climáticos há uma inversão de tendências no comércio internacional de alimentos com carne (OMT), tendo em vista que a pecuária de corte e outros animais, representada pelos setores CTL e OAP, é impactada negativamente pela precificação de emissões. De acordo com a Figura 169, países como a China (CHN) e da região do Oriente Médio (MEA) devem ser os mais afetados com as reduções das exportações nacionais de alimentos com carne.

Tabela 19: Taxas de crescimento (%) de exportações e de importações do setor agrícola e da indústria de alimentos brasileira em relação ao ano de 2010 e média anual do período 2011-2050

		Exportações					Importações				
		2020	2030	2040	2050	% a.a.	2020	2030	2040	2050	% a.a.
AGR	REF	1,55	3,33	5,79	8,73	4,52	1,55	1,99	2,18	2,18	1,60
	REF_50	1,56	3,38	5,91	8,90	4,56	1,55	2,04	2,29	2,35	1,76
	2.0C	1,55	3,38	5,90	8,75	4,53	1,55	1,95	2,07	1,95	1,37
	1.5C	1,57	3,41	5,85	7,98	4,33	1,54	1,90	1,97	1,57	0,93
OFD	REF	1,30	1,59	1,69	1,72	1,11	1,37	1,88	2,65	3,75	2,74
	REF_50	1,31	1,68	1,83	1,91	1,33	1,38	1,99	2,94	4,37	3,05
	2.0C	1,30	1,57	1,61	1,50	0,82	1,37	1,88	2,64	3,68	2,70
	1.5C	1,30	1,52	1,46	0,75	-0,57	1,37	1,89	2,67	3,95	2,84
OMT	REF	1,23	1,61	1,96	2,36	1,77	1,35	1,62	1,79	1,88	1,30
	REF_50	1,20	1,34	1,34	1,28	0,51	1,33	1,38	1,31	1,15	0,29
	2.0C	1,20	0,92	0,59	0,16	-3,67	1,36	1,95	3,01	7,14	4,09
	1.5C	1,01	0,52	0,17	0,00	-11,94	1,40	2,40	5,13	49,70	8,30

Além da avaliação sobre a produção e o comércio internacional, uma análise mais detalhada sobre a evolução da demanda de alimentos das famílias brasileiras é fundamental para o entendimento dos impactos sociais dos cenários. Analisando a composição do consumo dos brasileiros, o consumo de alimentos, representado por OFD e OMT, representa cerca de 10% do consumo total até 2020. A partir de 2020, quando começam as mudanças comportamentais na dieta global e a precificação de carbono passa a incidir sobre a atividade econômica, é possível observar na Figura 170 uma redução gradual da participação de alimentos dentro da cesta de consumo dos brasileiros, tendo em vista que o modelo TEA considera uma redução na participação de alimentos e, simultâneo, aumento na participação de serviços à medida que a renda per capita aumenta (LAHIRI, BABIKER e ECKAUS, 2000), conforme descrito na Seção 3.4. No cenário REF_50, nota-se que o consumo de alimentos sem carne (OFD) é sempre superior ao do cenário REF e, em contrapartida, o consumo de alimentos com carne é sempre inferior. Ademais, a participação total de alimentos, representados por OFD e OMT, evolui de forma a superar a participação do consumo total de alimentos do cenário REF em 2050, composto cerca de 85% por alimentos sem carne e 15% por alimentos com carne. Nos cenários climáticos, ocorre o contrário, isto é, se reduz a participação de alimentos na cesta de consumo média do brasileiro. Em 2050, no cenário 2.0C, cerca de 7,3% da cesta de consumo é dedicada a alimentação de OFD e OMT, sendo que 79% se refere a alimentos sem carne e 21% a alimentos com carne. No cenário 1.5C, embora a alimentação do brasileiro seja formada por cerca de 84% de

alimentos sem carne e 16% de alimentos com carne em 2050, o que reduz a intensidade de carbono da dieta média nacional, apenas 6,1% da cesta de consumo total são produtos da indústria de alimentos OFD e OMT.

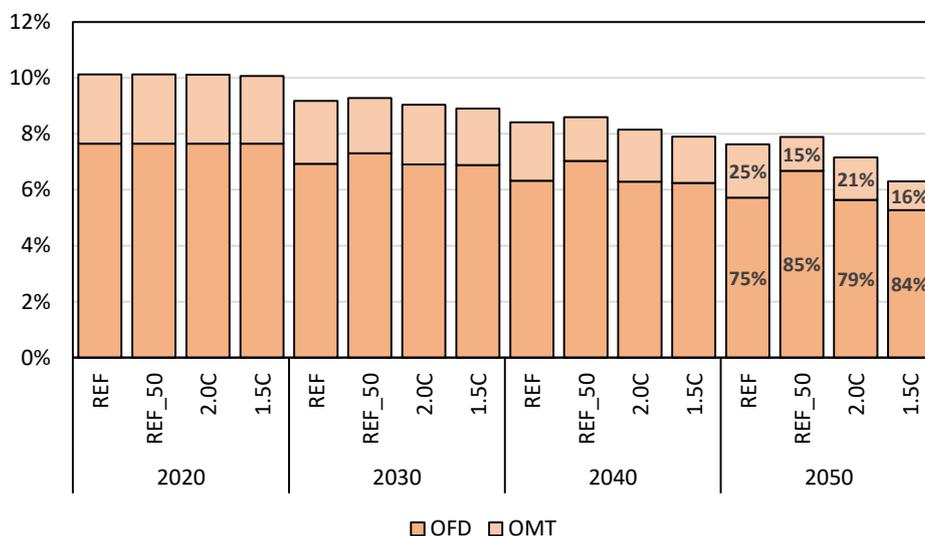


Figura 170: Composição do consumo de alimentos no consumo total dos brasileiros com destaque para a composição do consumo de alimentos sem carne (OFD) e alimentos com carne (OMT) em 2050 para todos os cenários do modelo TEA

A redução na participação de alimentos na cesta de consumo dos brasileiros pode ser melhor interpretada a partir da Figura 171 que apresenta as variações no consumo total de alimentos, representado pelo somatório entre OFD e OMT. Nota-se que, no cenário REF_50, o consumo total de alimentos evolui de forma a superar em cerca de 4% o consumo total de alimentos do cenário REF em 2050. Isso indica que o cenário de mudança comportamental de dieta reduz a intensidade de carbono na dieta média dos brasileiros, a partir da substituição de alimentos com carne por alimentos sem carne, mantendo uma ingestão saudável de proteínas⁸⁵. Em contrapartida, nos cenários climáticos, a evolução do consumo total de alimentos é de queda, o que caracteriza os efeitos adversos da precificação de emissões sobre o consumo de alimentos no Brasil. No cenário 2.0C, a redução no consumo de alimentos alcança 8% em 2050 comparado ao do cenário REF. No cenário 1.5C, alcança-se uma redução de 27% na quantidade consumida de alimentos comparada a do cenário REF, indicando uma intensificação do

⁸⁵ No cenário REF_50, supõe-se uma compensação de 1,33 unidades de OFD para cada unidade de OMT, conforme Seção 4.1.2.

risco de fome e desnutrição, principalmente, para as classes mais pobres⁸⁶. Esse resultado mostra também as dificuldades de se lidar com diferentes Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) que podem ser, muitas vezes, conflitantes.

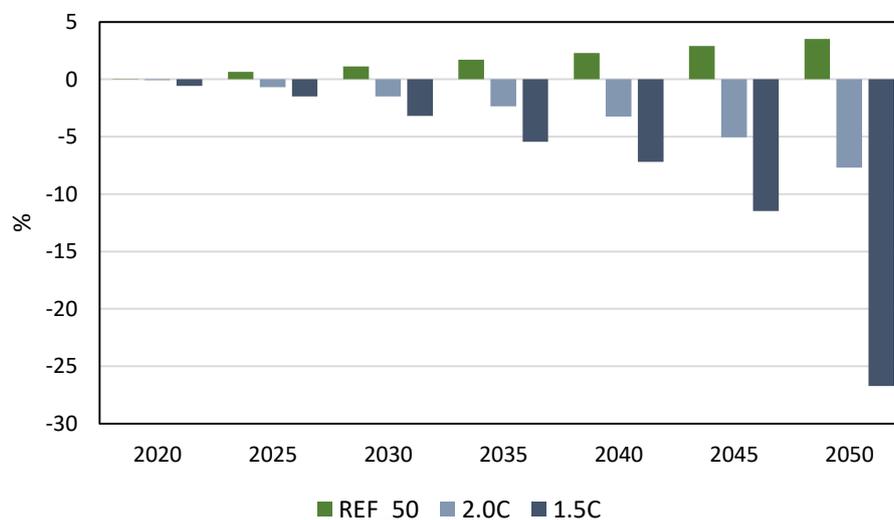


Figura 171: Variações no consumo total de alimentos (%) da indústria OFD e OMT dos cenários alternativos em relação ao cenário REF

A Figura 172 mostra as variações no consumo total dos brasileiros dos cenários alternativos em relação ao consumo do cenário REF, com destaque para o consumo de alimentos sem carne (OFD) e de alimentos com carne (OMT). No cenário REF_50, nota-se que a redução gradual nas preferências de alimentos com carne (OMT) em 50% até 2050, comparado às do cenário REF, resulta numa redução de consumo dos brasileiros em cerca de 37% e consequente aumento do consumo de alimentos sem carne de 17% em relação ao do cenário REF. Isso significa um crescimento médio no período de 1,53% a.a., frente a 1,20% a.a. do cenário REF, no consumo de OFD, e um crescimento modesto no período de apenas 0,36% a.a., comparado ao crescimento médio de 1,30% a.a. no cenário REF, no consumo de OMT. Nos cenários climáticos, é possível observar com mais clareza os impactos negativos da precificação de emissões na economia. No cenário 2.0C, o consumo de OFD apresenta queda significativa apenas em 2050, cerca de 3% em relação a do cenário REF, significando um crescimento

⁸⁶ Vale ressaltar que os consumidores representativos no modelo TEA, além de consumirem alimentos, embora pouco, diretamente dos setores produtivos agropecuários (AGR, CTL, OAP, FSH), também consomem a partir do setor de serviços (SER), isto é, em restaurantes, hotéis, escolas, hospitais, etc., Contudo, neste estudo não foi desagregado o consumo de alimentos dentro do setor de serviços, o que deve ser realizado em trabalhos futuros.

médio no período de 1,2% a.a. O consumo de OMT, contudo, apresenta queda durante todo o período, com destaque para 2050 alcançando 22% e representando um crescimento modesto no período de apenas 0,78% a.a. Alterações nos preços relativos dos alimentos são mais intensos no cenário 1.5C, dado que o consumo de OFD apresenta queda a partir de 2030, alcançando em 2050 um volume cerca de 18% menor do que no cenário REF, o que significa um crescimento modesto de 0,79% a.a.. Já o consumo de OMT apresenta queda durante todo o período, alcançando em 2050 cerca de 53% comparado ao cenário REF, representado uma queda média no período de 0,23% a.a.

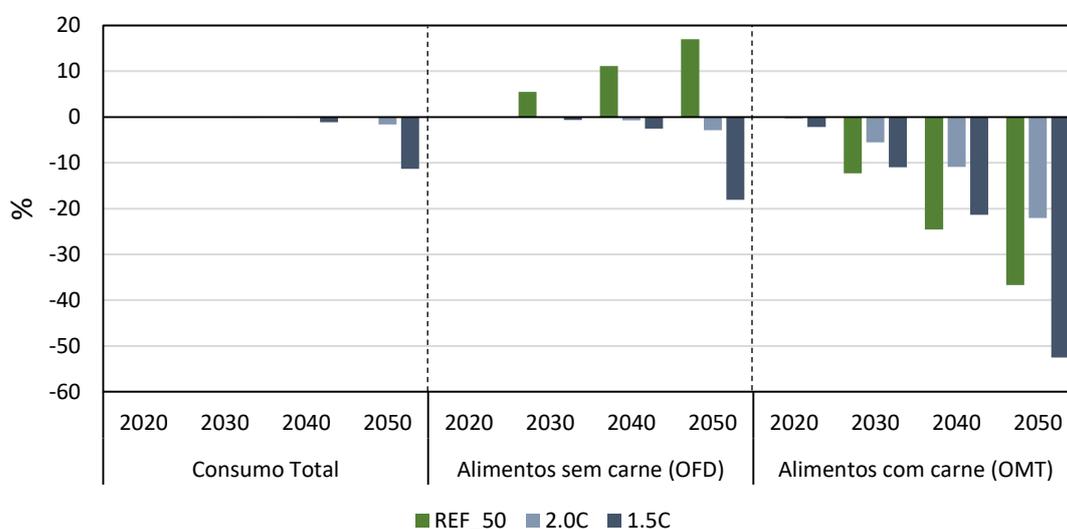


Figura 172: Variações no consumo (%) total, de alimentos sem carne (OFD) e de alimentos com carne (OMT) dos cenários alternativos em relação ao cenário REF

Comparando as variações no consumo de alimentos sem carne (OFD) com as de alimentos com carne (OMT), é possível notar que, nos cenários climáticos, as reduções no consumo são mais intensas para OMT, dado sua maior intensidade de emissões e, portanto, maior impacto da precificação de emissões. A partir de 2030, é possível observar que, além do efeito substituição entre OMT e OFD, nos cenários climáticos, o efeito renda passa a contribuir para a redução do consumo de alimentos seja com ou sem carne, tendo em vista que o consumo total apresentar queda, chegando em 2050 a cerca de 12% comparado ao do cenário REF. Isso mostra que a partir da evolução do preço de emissões na economia, o modelo TEA responde aos choques indicando retração da atividade econômica e, conseqüentemente, redução na renda e consumo dos

consumidores. No cenário de mudança comportamental de dieta (REF_50), observa-se que o consumo total se mantém estável comparado ao do cenário REF.

A elevação dos preços dos alimentos nos cenários climáticos, portanto, resulta na diminuição da quantidade consumida de alimentos, o que pode colocar mais brasileiros em risco de fome e desnutrição do que em um futuro sem precificação de emissões, principalmente, nos setores agropecuários. Os impactos dos preços e consequente declínio do consumo tendem a ser mais fortes nos produtos de origem animal do que para produtos agrícolas, pois estes apresentam uma intensidade comparativamente maior de emissões de GEE. Geograficamente, as mudanças nos preços dos alimentos seriam menos impactadas em regiões caracterizadas por sistemas eficientes, em termos econômicos e ambientais, de produção agropecuária. Embora mudanças nos fluxos de comércio internacional pudessem ajudar a realocar alimentos das regiões com produção menos intensiva em emissões para regiões com déficits de alimentos, de modo a atenuar variações nos preços e a segurança alimentar, os efeitos adversos desse esforço de mitigação tendem a permanecer. A maior parte do aumento projetado na produção e consumo global de carne deve ocorrer nos países em desenvolvimento (FAO, 2017), onde a produção agropecuária é, muitas vezes, o principal setor da economia, porém apresenta, em geral, métodos tradicionais intensivos em GEE que podem sofrer crescente perda de competitividade a partir de políticas de mitigação aplicadas ao setor. Vale destacar também que a produção agropecuária é fonte primária de renda para muitas pessoas em países em desenvolvimento, o que pode exacerbar a pobreza rural (HOSEGAWA *et al.*, 2018).

Políticas de mitigação devem, portanto, ser planejadas e elaboradas com cuidado para minimizar *trade-offs* relacionados à segurança alimentar e meios de subsistência de agricultores, tais como incentivos a produções agropecuárias mais eficientes, resilientes e menos carbono intensivas via reciclagem de receitas da precificação de emissões e políticas sociais complementares que neutralizem os efeitos adversos de possíveis precificações de emissões, principalmente, em regiões mais vulneráveis (HOSEGAWA *et al.*, 2018). Entretanto, é reconhecida a dificuldade de se regular o setor agropecuário via precificação de emissões, haja vista limitadas opções de mitigação (DANIEL e ABIGAIL, 2003; TIETENBERG, 2013). Nesse sentido, tais oportunidades dentro do setor agropecuário ainda podem ser úteis para minimizar impactos sociais e econômicos negativos de políticas mitigatórias voltadas para metas climáticas ambiciosas, desde que não resultem na elevação dos preços dos alimentos. No setor agrícola, sistemas de

cultivo florestal, tais como a agricultura sintrópica⁸⁷ (PASINI, 2017), podem ser incentivados para restaurar florestas naturais, contribuindo para o sequestro de carbono da atmosfera (LEWIS *et al.*, 2019). Em relação à pecuária, há estudos que mostram que o Brasil ainda está longe de atingir o potencial produtivo (DA SILVA, RUVIARO e FERREIRA FILHO, 2017; SILVA *et al.*, 2017; BOGAERTS *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2018), embora conte com métodos promissores para regenerar pastagens, aumentar a produção agrícola e mitigar emissões, tal como o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta⁸⁸ (BALBINO, BARCELLOS e STONE, 2011; GIL, SIEBOLD e BERGER, 2015; GIL *et al.*, 2016).

Embora ações pelo lado dos produtores sejam vitais para solucionar problemas ambientais oriundos do setor, seus incentivos em reduzir impactos são limitados, especialmente, por questões econômicas. Por exemplo, um produto com maior impacto ambiental deve continuar sendo produzido no lugar de outro equivalente em termos nutricionais, simplesmente, por apresentar menores custos (POORE e NEMECEK, 2018). Sendo assim, mesmo com avanços nas práticas de cultivo e nas tecnologias para produção agropecuária, os ganhos de eficiência auferidos pelo setor durante o último século tendem a ser difíceis de se repetir sem gerar mais impactos sociais e ecológicos.

Nesse sentido, a escolha alimentar é um poderoso elo entre a sustentabilidade ambiental, econômica e social, reconhecida, inclusive, como um dos principais impulsionadores de ações climáticas (STEHFEST *et al.*, 2009; SUWINBURN *et al.*, 2019). Os resultados do modelo TEA indicam que o custo de oportunidade de não se realizar uma de uma mudança da dieta global, representado pelo cenário REF_50, pode alcançar cerca de US\$ 1,3 trilhões no período entre 2020 e 2050, considerando uma taxa de desconto de 10% a.a.⁸⁹. Isso significa cerca de 2% do PIB global de 2017, o que representa praticamente o PIB da Austrália e mais da metade do PIB nacional deste mesmo ano (WORLD BANK, 2018). Embora resulte em penalizações aos setores de

⁸⁷ Prática, usualmente, utilizada por agricultores de subsistência, ainda raramente em grandes escalas, que trabalha com a recuperação pelo uso do solo, estabelecendo áreas produtivas de culturas que se beneficiam da floresta (sombra, nitrogênio, etc.), sendo, portanto, independentes de insumos externos (PASINI, 2017). As próprias árvores fornecem combustível, madeira, frutas ou nozes. Além disso, ofertam serviços ecossistêmicos, com destaque para a formação de solo, a regulação de microclimas e o favorecimento do ciclo da água.

⁸⁸ Sistema de produção que integra atividades agrícolas, pecuárias e florestais, realizadas na mesma área, em cultivo consorciado, em sucessão ou em rotação, e busca efeitos sinérgicos entre os componentes da agropecuária e da sustentabilidade ambiental (BALBINO, BARCELLOS e STONE, 2011).

⁸⁹ Valor presente do custo anual de emissões de CH₄ Do setor agropecuário no cenário 2.0C, tendo em vista que as reduções das emissões a partir da introdução da precificação de emissões de GEE alcançam níveis semelhantes ao do cenário de mudança comportamental de dieta global (REF_50).

produção de origem animal, apresenta resultados que corroboram o relevante papel da redução do consumo de carne para mitigação de emissões de GEE, dado a redução das emissões de CH₄ em 13 GtCO₂eq no período de 2011 a 2050, comparado à projeção tendencial, o que representa cerca de um terço das atuais emissões globais de GEE.

Sendo uma das principais regiões consumidoras e exportadoras de carne, o Brasil apresenta uma inversão de tendências a partir da mudança de dieta global. Os setores da pecuária de corte são impactados negativamente, embora menos do que a partir da precificação de emissões nos cenários climáticos. Por outro lado, a indústria de carne nacional é mais impactada pela mudança de dieta global do que por aumentos dos custos oriundos da precificação de emissões de GEE, o que indica que o sistema de produção de alimentos nacional apresenta certa capacidade de amortecer a elevação de custos de insumos oriundos, principalmente, de setores agropecuários. Vale destacar, contudo, que a mudança de dieta global contribui não só com a redução das emissões de CH₄ nacionais, cerca de 4 GtCO₂eq, comparado à projeção tendencial⁹⁰, mas também indica outros benefícios⁹¹ para a saúde dos brasileiros a partir de uma dieta com menor consumo de carne (WILLETT *et al.*, 2019; SUWINBURN *et al.*, 2019).

Por fim, é importante mencionar as limitações que podem influenciar diretamente os resultados do estudo de caso e, portanto, a simulação do modelo TEA. Tratam-se, em geral, daquelas relacionadas ao aperfeiçoamento da compatibilização de base de dados, bem como métodos de representação de processos relevantes para a análise das mudanças climáticas. A compatibilização da base de dados referente ao consumo de energia e, principalmente, às emissões de GEE pode ser aprimorada, considerando, inclusive, métodos mais elaborados de quantificação de emissões específicas de atividades sem queima de combustíveis fósseis, como a fermentação entérica no setor agropecuário (HYMAN *et al.*, 2003), bem como diferentes tempos de vida para GEE na atmosfera, usando *Global Temperature Change Potential* (GTP) ou novas métricas de GWP (BOUCHER *et al.*, 2009; PETERS *et al.*, 2011; ALLEN *et al.*, 2018). Além disso, o modelo TEA considera os benefícios oriundos de mitigação de emissões de GEE em cenários climáticos, por exemplo, como apenas melhorias na qualidade ambiental, sem contar com mecanismos de *feedback*, isto é, sem quantificar benefícios ambientais em

⁹⁰ Isso equivale a compensar as emissões brasileiras por cerca dois anos, baseado nas atuais emissões anuais nacionais, cerca de 2 GtCO₂eq.

⁹¹ Os impactos econômicos dos benefícios para a saúde, a partir de uma redução do consumo de carne não foram considerados nesta tese, mas tratam-se de um relevante estudo a ser realizado no futuro.

unidades monetárias, seja sobre a produtividade dos fatores ou na utilidade do consumidor representativo.

No que tange à representação energética do modelo TEA, ressalta-se que a modelagem apresenta simplificações na depleção de recursos fósseis, cuja definição destes se dá a partir da base de dados do GTAP, sem contar com atualizações de reservas. Ademais, não conta com a devida elevação de custos de extração e produção de energias primárias e geração de rendas de alocação, a partir da escassez e esgotamento dos recursos naturais (HOTELLING, 1931; DEVARAJAN e FISHER, 1981). Os setores de energia primária fósseis compreendem agregações de diferentes tecnologias (convencionais, sintéticas, betuminoso, etc.) que podem ser melhor exploradas em trabalhos futuros. Conforme comentado anteriormente, o setor energético do modelo TEA também não conta com a explícita representação de importantes tecnologias disruptivas para mitigação de GEE, tais como gaseificação de carvão, gás natural de ciclo combinado, bem como gás natural, carvão e biomassa com captura e armazenamento de carbono.

No que se refere às limitações do estudo de caso sobre mudança de dieta, ressalta-se que no cenário de mudança comportamental de dieta foi criado um cenário baseado numa proposição positiva de redução do consumo de alimentos com carne de forma homogênea para todas as regiões do modelo, o que pode resultar em efeitos adversos para regiões que já sofrem com insegurança alimentar. Em estudos futuros, o cenário de mudança de dieta pode ser adaptado considerando diferenciações na redução da preferência de carne para regiões com alto, médio e baixo consumo de alimentos com carne. Outra limitação trata-se da não incorporação de opções de mitigação na pecuária ou em sistemas integrados (lavoura-pecuária-floresta), associadas ao acúmulo de carbono no solo e menor necessidade de insumos emissores por conta de boas práticas e técnicas de manejo (ou pela própria integração), uma vez que ainda há incertezas sobre o potencial e custos associados dessas medidas⁹². Ademais, não foi possível decompor o setor AGR em agricultura e floresta, o que possibilitaria uma análise mais apropriada do uso da terra. Ainda, a redução das preferências de alimentos com carne dos consumidores referente ao setor de serviços não foi considerada, de modo que a mudança de dieta comportamental responde apenas ao consumo de alimentos em

⁹² Isso significa que, em havendo potencial razoável de emprego dessas tecnologias e custos de mitigação compatíveis com os níveis de precificação de carbono observados no modelo, os cenários implementados poderiam indicar menores quedas na produção dos setores CTL, OAP e OMT.

residências, não contando com restaurantes, hotéis, escolas, hospitais, etc. Além disso, embora o modelo TEA conte com ajustes estruturais na demanda de alimentos ao longo do tempo (entre períodos de solução), relacionados com o crescimento da renda *per capita*, quando se utilizam funções aninhadas por elasticidades constantes (CES), estas apresentam retornos constantes de escala, sugerindo uma elasticidade-renda da demanda unitária para cada período de solução, o que significa que uma mudança na renda em um dado período provoca o mesmo impacto percentual no consumo de todos os bens, sendo que possíveis substituições entre bens são oriundas apenas de mudanças nos preços relativos dos mesmos. Em trabalhos futuros, deve-se aprimorar a modelagem a partir da adoção de uma função de utilidade do tipo Stone-Geary (GEARY, 1950; STONE, 1954), cujas funções de demanda resultantes são lineares em relação aos preços e ao orçamento dos consumidores (Sistema Linear de Gastos ou *Linear Expenditure System* – LES), considerando um consumo mínimo de subsistência, independente de preços.

Ademais, o modelo TEA proporciona a realização de leque de estudos voltados para choques de demanda, de caráter comportamental, via alterações no estilo de vida relacionados à mobilidade e consumo de energia em residências, por exemplo. Tais estudos podem contribuir para estimação de indicadores que podem ser úteis na análise dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS). Por outro lado, é possível também realizar estudos sobre os impactos de diferentes políticas climáticas, a partir de diversos instrumentos econômicos, tais como mercado de carbono, *cap-and-trade*, etc., bem como políticas comerciais e tarifárias. Por fim, vale ressaltar que o desenvolvimento do modelo TEA num programa de pós-graduação em planejamento energético resulta num avanço no que diz respeito a capacidade de responder questões científicas de caráter econômico, não apenas técnico, tais como estimar impactos macroeconômicos, sobre renda, emprego, etc., de políticas energéticas e climáticas.

5. Considerações Finais

Esta tese teve como objetivos o desenvolvimento e documentação do *Total-Economy Assessment* (TEA), um modelo global de equilíbrio geral construído no Brasil, em consonância a um modelo de avaliação integrada, de modo a permitir avaliações das interações entre sistemas socioeconômicos, processos energéticos e ambientais, com o intuito de desenvolver cenários de transições energéticas, trajetórias de emissões de GEE, bem como estimar custos e benefícios de políticas de mitigação. Ademais, buscou-se simular a metodologia proposta através da análise de um estudo de caso acerca do papel da mudança de dieta global oriunda tanto de alterações no estilo de vida quanto induzida por precificação de emissões de GEE, auferindo impactos econômicos e ambientais globais e no Brasil. Vale ressaltar que se trata de um trabalho em desenvolvimento, com vistas à integração ao modelo de avaliação integrada COFFEE, sendo um primeiro estágio na construção de uma modelagem integrada consistente economicamente, que pode prover um leque de oportunidades de estudos futuros, bem como um melhor posicionamento do Brasil frente aos demais países em possíveis negociações internacionais.

A urgência de transformações positivas relacionadas às melhores práticas de se lidar com as mudanças climáticas passa pelo progresso científico em desenvolver pesquisas e uma ampla variedade de ferramentas, modelos e análises sobre a evolução das trajetórias futuras do planeta. Os exercícios de modelagem de avaliação integrada (IAM) têm-se mostrado como os mais adequados, uma vez que combinam modelos de diferentes áreas do conhecimento para representar sistemas socioeconômicos e naturais, bem como suas interações. São capazes de analisar respostas de mitigação de diferentes tecnologias, fluxos energéticos, tendências sociais e econômicas relacionadas a emissões de GEE. A manutenção de uma perspectiva de longo prazo, integrada e, muitas vezes, global, envolve compensações em termos do detalhe em que os principais processos podem ser representados. O que mais diferencia os principais IAMs voltados para a análise das mudanças climáticas são a representação dos módulos, a definição das dimensões regionais e setoriais e a metodologia de análise de cada modelo.

É usual a utilização de modelos energéticos, os quais se baseiam em detalhadas representações detalhadas de tecnologias, pois este representa a principal fonte de emissões de GEE, a partir da queima de combustíveis fósseis. Contudo, há ferramentas

melhores para representação das implicações econômicas adjacentes. Modelos econômicos, em especial modelos de equilíbrio geral computável, tendem a ser menos detalhados quando se trata de representar setores, porém são capazes de realizar uma análise simultânea das interações entre regiões, setores e agentes econômicos.

O modelo *Total-Economy Assessment* (TEA) foi construído fundamentado na teoria microeconômica Walrasiana de equilíbrio geral aplicada à metodologia da contabilidade social, considerando apenas os fluxos reais de todas as transações econômicas. Trata-se de um modelo global de equilíbrio geral computável, dinâmico recursivo, multirregional e multisetorial que rastreia a produção e distribuição de bens e serviços, fluxos energéticos e a relação entre o uso de combustíveis fósseis e a evolução de atividades específicas com emissões de GEE. O Brasil é uma das 18 regiões do mundo representadas no modelo, que possui uma desagregação de 20 setores. O modelo TEA tem um tratamento elaborado em relação a oferta e demanda de energia, bem como flexibilidade quanto às possibilidades de substituição entre fontes energéticas, principalmente, no setor elétrico. Além do setor energético, o TEA explicitamente representa o sistema de produção de alimentos e uso do solo, o que conta com os setores agrícola, pecuária de corte e indústria alimentícia. Além disso, conta com premissas e suposições, tais como crescimento econômico e populacional, evolução da eficiência energética, mudança tecnológica e no consumo, que compatibilizam a base de dados às formas funcionais, de modo a reduzir o risco de afastamento da realidade. O modelo leva em conta a dinâmica temporal do período compreendido entre 2011 (ano base) e 2050, dentro do horizonte de tempo relevante na análise de políticas climáticas que é de várias décadas ou até mesmo um século no futuro.

Um desafio para modelos complexos é a avaliação de seu desempenho. A realização de uma meta-análise mostrou que o modelo TEA é capaz de fornecer estimativas sobre consumo de energia, geração elétrica e emissões de GEE em consonância aos resultados de IAMs selecionados, em especial, o modelo COFFEE. Vale ressaltar que a meta-análise não nos informa qual modelo é mais confiável ou tem melhor representação, mas fornece alguns *insights* sobre as trajetórias que a comunidade científica idealiza sobre o futuro. Nesse sentido, a aplicação e simulação do modelo, através da análise do estudo de caso, busca inferir sobre a capacidade do TEA em responder a diferentes cenários. A natureza de longo prazo e as incertezas inerentes às mudanças climáticas e às suas forças motrizes tornam a análise de cenários a ferramenta mais indicada para estudos de potenciais desenvolvimentos de trajetórias futuras.

A construção dos cenários deste estudo se baseou em uma avaliação extensiva da literatura e em diferentes abordagens para modelagem, ressaltando a crescente discussão acerca da relevância de mudanças de estilo de vida, em especial, da dieta global para o atingimento de metas climáticas. O cenário de mudança comportamental da dieta global (REF_50) representa a gradual redução das preferências dos consumidores por alimentos com carne alcançando até 50% em 2050, as quais são compensadas ou substituídas por aumentos nas preferências por alimentos sem carne. Este cenário foi implementado considerando um choque de quantidade, de modo que a redução do consumo de carne está ligada a uma dieta equilibrada e saudável, tomando o cuidado de reconhecer a carne como uma fonte importante de proteína e de um pacote de nutrientes essenciais, mas também negativos se ingeridos em excesso. Ademais, pressupõem-se esforços coordenados da sociedade civil, organizações de saúde e governos na busca de mudanças comportamentais relacionadas à dieta, com vistas a um movimento ou, idealmente, um acordo global.

Os outros dois cenários alternativos representam o futuro no que se refere à estabilização da temperatura média global em até 2°C e 1,5°C em 2100 (2.0C e 1.5C, respectivamente). Foram implementados no modelo a partir de orçamentos de carbono estimados pela comunidade científica e contam com a precificação de emissões de GEE na economia, a partir da identidade entre o preço e o custo social do carbono. Além das emissões oriundas da queima de combustíveis fósseis, foram precificadas as emissões dos gases metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) oriundos das atividades de setores agropecuários, já que estes apresentam limitados incentivos econômicos para mitigar emissões. O método por trás da precificação se dá pela relação complementar entre a emissão e a quantidade física de permissões ou créditos de carbono associadas às atividades emissoras, as quais podem ser comercializadas entre regiões e setores. Ressalta-se que a precificação de gases não-CO₂ de setores agropecuários não envolve créditos de carbono e se dá via cobrança de impostos diferenciados, baseados no potencial de aquecimento global (GWP₁₀₀), incidentes sobre o fator capital de cada setor. Os cenários climáticos tratam-se de choques de preços relativos, considerando uma política ampla e rigorosa sob a ótica econômica da sustentabilidade ambiental.

A partir da criação e implementação dos cenários alternativos do modelo TEA foi possível realizar a análise dos resultados auferidos, simulando, portanto, a metodologia proposta. A análise de resultados foca nos impactos econômicos, energéticos e ambientais de cada cenário, bem como na comparação destes com o cenário de

referência, evidenciando a capacidade do modelo TEA em representar a substituição entre fontes energéticas e entre produtos de acordo com a intensidade de emissões de GEE. Em particular para o Brasil, destaca-se a análise detalhada dos efeitos econômicos e sociais de uma mudança comportamental da dieta global (cenário REF_50), bem como da mudança de dieta induzida por cenários restritivos de emissões globais (2.0C e 1.5C).

Os principais resultados deste estudo estão relacionados à análise ambiental e econômica de uma mudança comportamental da dieta global *versus* uma precificação de emissões de GEE. Observou-se que a evolução das emissões de CH₄ e N₂O de uso do solo do cenário de mudança comportamental de dieta global segue em *pari passu* a do cenário 2.0C, o que indica que a economia global pode evitar custos sociais dessas emissões em cerca de US\$ 1,3 trilhões no período de 2011 a 2050, caso a sociedade altere seu padrão de consumo alimentar, indicada no cenário REF_50. Ao se tornar mais acessível, a carne apresenta um elevado custo implícito devido a problemas ambientais, sociais (incluindo a saúde humana) e de bem-estar animal que ainda são sub-regulados (GODFRAY *et al.*, 2018). Embora resulte em penalizações aos setores de produção de origem animal, a mudança de dieta global do cenário REF_50 apresentou resultados que corroboram o relevante papel da redução do consumo de carne para mitigação de emissões de GEE, reduzindo as emissões globais de CH₄ em 13 GtCO₂eq no período de 2011 a 2050, comparado ao cenário de referência, o que representa cerca de um terço das atuais emissões globais de GEE.

No Brasil, as emissões oriundas do uso do solo apresentam grande representatividade no total emitido pelo país, de modo que tanto a precificação de emissões quanto uma mudança de dieta global resultam numa inversão de tendência não só nas emissões, mas também nas trajetórias dos setores produtivos. Em um mundo onde a sociedade esteja disposta a adotar estilos de vida de baixo impacto ambiental, principalmente, no que se refere a reduzir o consumo de carne, contribuindo para a mitigação de emissões e possíveis melhorias na saúde, tanto o setor agrícola quanto a indústria nacional de alimentos sem carne seriam beneficiadas em detrimento de quedas na produção, principalmente, da pecuária de corte e da indústria de alimentos com carne. Nos cenários climáticos, a precificação de emissões de GEE impacta negativamente tanto os setores produtivos quanto o consumo de alimentos dos brasileiros, levando a um aumento, inclusive, das importações de carne. Observou-se que a elevação dos preços e a redução da renda nos cenários climáticos resultaram na

diminuição da quantidade consumida de alimentos, o que pode colocar mais brasileiros em risco de insegurança alimentar e desnutrição do que num futuro sem precificação de emissões.

Em termos de PIB, o cenário de mudança de dieta global não apresentou alterações, tendo em vista que segue as mesmas premissas do cenário de referência. Os resultados dos cenários climáticos, por outro lado, apresentam quedas no PIB mundial em resposta aos custos agregados de se perseguir metas de redução em emissões de GEE. Por trás disso, está a substituição de fontes de energia de acordo com a intensidade de emissões, indicando que o modelo TEA responde bem às diferentes trajetórias dos cenários climáticos. Numa transição para uma economia de baixo carbono, a evolução do consumo de energia é marcada pela redução de carvão e gás natural, bem como pelo *lock-in* estrutural do consumo de derivados de petróleo, enquanto se destacam a penetração de tecnologias menos carbono intensivas, tais como eólica, solar e biomassa, tanto para geração elétrica quanto para biocombustíveis, principalmente no Brasil. Vale ressaltar, contudo, que as perdas não significam que o crescimento do PIB se torna negativo, mas sim, que o PIB cresce a uma taxa menor do que no cenário de referência, sem a existência de precificação de emissões. Vale ressaltar que não foram considerados custos de impacto, nem custos de adaptação.

A agropecuária tem extrema importância num futuro de baixo carbono, de modo que precisa ser parte integrante de qualquer estratégia global para estabilizar o clima. Políticas de mitigação e instrumentos econômicos, como a precificação de emissões, contudo, devem ser planejados e elaborados com diligência⁹³, com o intuito de minimizar *trade-offs* relacionados à competitividade agropecuária, à segurança alimentar e aos meios de subsistência de produtores rurais, principalmente, em países em desenvolvimento. Nesse sentido, há oportunidades dentro do setor agropecuário, principalmente aquelas relacionadas à regeneração de florestas naturais, tais como a agricultura sintrópica e sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta, que podem ser úteis para minimizar efeitos adversos, sociais e econômicos, de políticas mitigatórias voltadas para metas climáticas ambiciosas. Entretanto, é reconhecida a dificuldade de se regular, na prática, o setor agropecuário via precificação de emissões, devido suas limitadas opções de mitigação, que, inclusive, apresentam baixos incentivos no que se

⁹³ Por exemplo, considerando políticas setoriais e sociais complementares, a partir da reciclagem direcionada das receitas do preço de carbono e/ou investimentos adicionais no setor agropecuário, desencorajando a produção intensiva em emissões ao mesmo tempo em que não penaliza sistemas de produção eficientes.

refere à redução de impactos ambientais sem repassar possíveis custos aos preços dos alimentos. Os últimos ganhos de eficiência auferidos pelo setor tendem a ser difíceis de se repetir sem gerar mais impactos sociais e, até mesmo, ecológicos.

Os consumidores, por outro lado, podem ter um papel essencial na redução de impactos ambientais a partir de uma mudança de estilo de vida, em uma escala talvez jamais alcançável pelos produtores. A atual dieta moderna e consequente sistema de produção e distribuição de alimentos apresentam interações de retroalimentação com as mudanças climáticas. Isto aponta para a necessidade de uma mudança de paradigma no que diz respeito a noção de mudança de dieta, reconhecendo as escolhas alimentares como um importante elo entre a sustentabilidade ambiental, econômica e social, e um poderoso impulsionador de ações climáticas positivas. Os resultados desta tese, portanto, contribuem para uma melhor compreensão das trajetórias futuras de diferentes cenários, em especial, as consequências econômicas e ambientais do consumo de carne, o que pode contribuir para a tomada de decisão de agentes econômicos, sejam escolhas individuais dos consumidores ou para possíveis políticas regulatórias que incentivem a mudança de dieta da sociedade.

Por fim, ressalta-se que exercícios de modelagem de equilíbrio geral são construídos a partir da teoria econômica para a representação e entendimento dos impactos de políticas na alocação de recursos e preços relativos de bens e fatores produtivos. Como tal, estimativas de custos dos cenários implementados devem ser consideradas com cautela e senso crítico quanto à capacidade de serem extrapolados para eventos reais da economia. A utilização dos resultados do modelo para recomendações de políticas deve basear-se nas direções dos resultados observados e magnitudes relativas, bem como no entendimento dos mecanismos e pressuposições do modelo que geram os resultados observados. Como destacado por WEYANT (2001), os principais fatores que afetam os resultados são: a definição do cenário de referência e projeção de emissões na ausência de políticas e medidas de controle; como foram construídos os cenários alternativos; a representação das possibilidades de substituição nos processos produtivos e no consumo; as pressuposições sobre custos e penetração de tecnologias não-convencionais. Esses fatores indicam a necessidade de análises de sensibilidade nos estudos de equilíbrio geral aplicados às mudanças climáticas, o que não foi possível realizar no âmbito desse estudo.

Embora parâmetros individuais do modelo possam ser estimados estatisticamente ou informados pela literatura científica, os dados necessários para estimar todo o

conjunto de parâmetros do modelo TEA, como um sistema completo, existem por completo. Mesmo onde é possível estimar parâmetros, em geral, existem diversos métodos que podem se ajustar bem aos dados históricos, porém suas implicações nas projeções podem apresentar diferenças significativas. Nesse sentido, é importante priorizar estudos futuros com foco em análises de sensibilidade como forma de identificar e ajustar variáveis-chaves nas projeções do modelo TEA. Mesmo que exista incerteza em torno dos valores de parâmetros do modelo TEA, a modelagem de equilíbrio geral permite concluir sobre direções e magnitudes relativas aos choques exógenos, bem como através da comparação consistente de resultados de cenários alternativos realizada no Capítulo 4.

Estudos futuros podem focar em projetar outras narrativas SSP, como forma de estimar parâmetros e indicadores econômicos, bem como simular diferentes trajetórias futuras. Ademais, além de possibilitar a análise de mudanças comportamentais, o modelo TEA pode ser útil para analisar questões que envolvem financiamento numa transição para uma economia de baixo carbono. Nessa perspectiva, vale ressaltar a prioridade em melhor representar tecnologias disruptivas, principalmente aquelas relacionadas ao sequestro de carbono da atmosfera, dado seu essencial papel em cenários climáticos restritivos, principalmente, a partir de 2050.

As limitações da modelagem residem nas suas próprias vantagens, uma vez que uma futura comunicação entre modelos de diferentes áreas do conhecimento, ensejando uma avaliação integrada consistente, deve contribuir para melhorar a representação de setores, principalmente energéticos e de transportes, bem como o comportamento por trás das escolhas de agentes econômicos do modelo TEA. A futura interação entre os modelos TEA e o COFFEE será útil para calibração de ambos, de modo que informações sobre crescimento econômico e demandas energéticas devem ser interpretadas e absorvidas pelo modelo COFFEE, que por sua vez deve retornar ao TEA informações como: dados sobre capacidade de geração e oferta de energia, e de uso da terra, bem como correções nas trajetórias de desenvolvimento setorial na economia com base em restrições energéticas, espaciais e tecnológicas. Apesar de ser a principal finalidade dos IAMs na análise das mudanças climáticas, a integração entre modelos não tem um paradigma ou caminho teórico universalmente desenvolvido ou aceito na comunidade científica, representando um tema de pesquisa complexo e, ao mesmo tempo, prioritário.

Referências

- AGUIAR, A., NARAYANAN, B., MCDOUGALL, R., 2016. "An Overview of the GTAP 9 Data Base". **Journal of Global Economic Analysis**, v. 42, n. 1, pp. 181-208.
- ALCAMO, J., 1994. "IMAGE 2.0: Integrated modelling of global climate change". **Kluwer Academic publishers**, Dordrecht, the Netherlands.
- ALEXANDRATOS, N., BRUINSMA, J., 2012. "World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision". **ESA Working paper**. v. 12, n. 3. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.
- ALLEN, M. R., SHINE, K. P., FUGLESTVEDT, J. S., MILLAR, R. J., CAIN, M., FRAME, D. J., MACEY, A. H., 2018. "A solution to the misrepresentations of CO₂-equivalent emissions of short-lived climate pollutants under ambitious mitigation". **npj Climate and Atmospheric Science**, v. 1, n. 1, p. 16.
- ALMEIDA, E., 2003. **Um modelo de equilíbrio geral aplicado espacial para o planejamento e análise de políticas de transporte**. Tese de doutorado em Teoria Econômica. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- ANDEREGG, W. R. L., 2010. "Expert Credibility in Climate Change". **Proceedings of the National Academy of Sciences**. v. 107, n. 27 (June), pp. 12107-12109.
- ANDERSON, K., PETERS, G., 2016. "The trouble with negative emissions". **Science**, v. 354, n. 6309, pp. 182-183.
- APOSTOLIDIS, C., MCLEAY, F., 2016. "Should we stop meating like this? Reducing meat consumption through substitution". **Food Policy**, v. 65, pp. 74-89.
- ARMINGTON, P., 1969, "A Theory of Demand for Products Distinguished by Place of Production". **International Monetary Fund Staff Papers**, v. 16, n. 1, pp. 159-78.
- ARORA, V., 2013. "An evaluation of macroeconomic models for use at EIA". **US Energy Information Administration**. Washington, DC, USA.
- ARROW, K., HAHN, F., 1971. "General Competitive Analysis". **Holden-Day Inc.**, San Francisco.
- ARROW, K., DEBREU, G., 1954. "The existence of an equilibrium for a competitive economy". **Econometrica**, v. 22, n. 3, pp. 265-290.
- BABIKER, M., GURGEL, A., PALTSEV, S., REILLY, J., 2009. "Forward-looking versus recursive-dynamic modeling in climate policy analysis: A comparison". **Economic Modelling**, v. 26, n. 6, pp. 1341-1354.
- BALBINO, L., BARCELLOS, A., STONE, L., 2011. Marco referencial: integração lavoura-pecuária-floresta. **Embrapa Cerrados-Livro científico (ALICE)**.

- BHATTACHARYA, A., 2019. Global Climate Change and Its Impact on Agriculture. In: **Changing Climate and Resource Use Efficiency in Plants**. Academic Press. p. 1-50.
- BERGMAN, L., 1990. "The Development of Computable General Equilibrium Modeling". In Bergman, L., Jorgenson, D. W., Zalai, E., 1990. **General Equilibrium Modeling and Economic Policy Analysis**. Cambridge and Oxford: Basil Blackwell
- BERGMAN, L., 2005. "CGE modeling of environmental policy and resource management". **Handbook of environmental economics**, v. 3, pp. 1273-1306.
- BERNERS-LEE, M., HOLOHAN, C., CAMMACK, H., HEWITT, C. N., 2012. "The relative greenhouse gas impacts of realistic dietary choices". **Energy Policy**, v. 43, pp. 184-190.
- BLANCHARD, O., 1979. "Backward and forward solutions for economies with rational expectations". **The American Economic Review**, v. 69, n. 2, pp. 114-118.
- BOGAERTS, M., CIRHIGIRI, L., ROBINSON, I., RODKIN, M., HAJJAR, R., JUNIOR, C. C., NEWTON, P., 2017. "Climate change mitigation through intensified pasture management: Estimating greenhouse gas emissions on cattle farms in the Brazilian Amazon". **Journal of cleaner production**, v. 162, pp. 1539-1550.
- BORBA, B., LUCENA, A., RATHMANN, R., COSTA, I., NOGUEIRA, L., ROCHEDO, P., CASTELO BRANCO, D., JÚNIOR, M., SZKLO, A., SCHAEFFER, R., 2012. "Energy-related climate change mitigation in Brazil: Potential, abatement costs and associated policies". **Energy Policy**, v. 49, pp. 430-441.
- BOUCHER, O., FRIEDLINGSTEIN, P., COLLINS, B., SHINE, K. P., 2009. "The indirect global warming potential and global temperature change potential due to methane oxidation". **Environmental Research Letters**, v. 4, n. 4.
- BOUWMAN, A., KRAM, T., GOLDEWIJK, K., 2006. **Integrated Modelling of Global Environmental Change - An Overview of IMAGE 2.4**. Netherlands Environmental Assessment Agency (MNP), Bilthoven, The Netherlands.
- BAJŽELJ, B., RICHARDS, K. S., ALLWOOD, J. M., SMITH, P., DENNIS, J. S., CURMI, E., GILLIGAN, C. A., 2014. "Importance of food-demand management for climate mitigation". **Nature Climate Change**, v. 4, n. 10, p. 924.
- BRAY, D., VON STORCH, H., 2016. **The Bray and von Storch 5th International Survey of Climate Scientists 2015/2016**. Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Zentrum für Material-und Küstenforschung Gmb.
- BROOKE, A., KENDRICK, D., MEERAUS, A., RAMAN, R., 1998. "GAMS: a user's guide". **GAMS Development Corporation**, 262 p., Disponível em: <http://www.gams.com/>.
- CAI, Y., NEWTH, D., FINNIGAN, J., GUNASEKERA, D., 2015. "A hybrid energy-economy model for global integrated assessment of climate change, carbon mitigation and energy transformation". **Applied energy**, v. 148, pp. 381-395.

CALVIN, K., PATEL, P., CLARKE, L., ASRAR, G., BOND-LAMBERTY, B., DI VITTORIO, A., EDMONDS, J., HARTIN, C., HEJAZI, M., IYER, G., KYLE, P., KIM, S., LINK, R., MCJEON, H., SMITH, S. J., WALDHOFF, S., WISE, M., 2018. "GCAM v5.1: Representing the linkages between energy, water, land, climate, and economic systems". **Geoscientific Model Development**. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/gmd-2018-214>

CAPROS, P., VAN REGEMORTER, D., PAROUSSOS, L., FRAGKIADAKIS, C., TSANI, S., CHARALAMPIDIS, I., REVESZ, T., 2013. "GEM-E3 Model Documentation". **JRC Scientific and Policy Reports**. v. 26034.

CHATEAU, J., DELLINK, R., LANZI, E., 2014. "An Overview of the OECD ENV-Linkages Model: Version 3". **OECD Environmental Working Paper**. n. 65

CHEN, Y., PALTSEV, S., REILLY, J., MORRIS, J., BABIKER, M., 2015. "The MIT EPPA6 model: Economic growth, energy use, and food consumption". **MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change**.

CLARKE, L.E., EDMONDS, J.A., JACOBY, H.D., PITCHER, H., REILLY, J.M., RICHELIS, R., 2007. "Scenarios of Greenhouse Gas Emissions and Atmospheric Concentrations". **Sub-report 2.1a of Synthesis and Assessment Product 2.1**, Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research, Washington DC.

CLARKE, L., JIANG, K., AKIMOTO, K., BABIKER, M., BLANFORD, G., FISHER-VANDEN, K., ... MCCOLLUM, D., 2014. "Assessing Transformation Pathways". **Working Group III contribution to the IPCC 5th Assessment Report, Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change**, Chapter 6. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.

COASE, R., 1960. "The problem of social cost". In **Classic papers in natural resource economics**. Palgrave Macmillan, London.

COOK, J., NUCCITELLI, D., GREEN, S. A., RICHARDSON, M., WINKLER, B., PAINTING, R., WAY, R., JACOBS, P., SKUCE, A., 2013. "Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature". **Environmental research letters**, v. 8, n. 2.

COOK, J., ORESKES, N., DORAN, P. T., ANDEREGG, W. R., VERHEGGEN, B., MAIBACH, E. W., CARLTON, J., LEWANDOWSKY, S., SKUCE, A., GREEN, S., 2016. "Consensus on consensus: a synthesis of consensus estimates on human-caused global warming". **Environmental Research Letters**. v. 11, n. 4.

CRASSOUS, R., HOURCADE, J.-C., SASSI, O., 2006, "Endogenous structural change and climate targets: modeling experiments with Imaclim-R". Special Issue on the Innovation Modeling Comparison Project, **Energy Journal**. pp. 259-276.

CUARESMA, J., 2015. "Income projections for climate change research: A framework based on human capital dynamics". **Global Environmental Change**, v. 42, pp. 226-236.

CUNHA, B., 2011. **Origem e Evolução da Racionalidade Econômica: uma visão metodológica**. Trabalho de conclusão. Faculdade de Ciências Econômicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, RS, Brasil.

DANIEL, D., ABIGAÏL, F., 2003. "Non-CO2 greenhouse gas emissions from agriculture: analysing the room for manoeuvre for mitigation, in case of carbon pricing". In: **Reshaping Agriculture's Contributions to Society: 25th International Conference of Agricultural Economists**, Durban, South Africa, 16-22 August 2003. IAAE. s.l. : s.n., 8 p. International Conference of Agricultural Economists. 25, Durban, Afrique du Sud, 16 August 2003/22 August 2003.

DE BOER, J., SCHÖSLER, H., AIKING, H., 2014. "“Meatless days” or “less but better”? Exploring strategies to adapt Western meat consumption to health and sustainability challenges". **Appetite**, v. 76 (May), pp. 120–128.

DEBREU, G., 1959. **Theory of Value**. Wiley, New York.

DECREUX, Y., VALIN, H., 2007. "MIRAGE: Updated Version of the Model for Trade Policy Analysis Focus on Agriculture and Dynamics". **CEPII Working Paper**. n. 15.

DELLINK, R., CHATEAU, J., LANZI, E., MAGNE, B., 2015. "Long-term economic growth projections in the Shared Socioeconomic Pathways". **Global Environmental Change**. v 42, pp. 200-214.

DESPRÉS, J., KERAMIDAS, K., SCHMITZ, A., KITOUS, A., SCHADE, B., 2018. "POLES-JRC model documentation – 2018 update". **Publications Office of the European Union**. EUR 29454 EN. Luxembourg, JRC113757.

DEVARAJAN, S., FISHER, A. C, 1981. "Hotelling's" economics of exhaustible resources": Fifty years later". **Journal of Economic Literature**. v. 19, n. 1, pp. 65-73.

DICKINSON. T., 2007. **The compendium of adaptation models for climate change**. 1 ed. Environment Canada, Toronto, Ontario, Canada.

DIETZ, T., GARDNER, GT., GILLIGAN, J., STERN, PC., VANDENBERGH, MP., 2009. "Household actions can provide a behavioral wedge to rapidly reduce US carbon emissions". **Proceedings of the National Academy of Sciences**. v. 106, n. 44, pp. 18452–18456.

DOMINGUES, 2002. **Dimensão regional e setorial da integração brasileira na Área de Livre Comércio das Américas**. Tese de Doutorado em Teoria Econômica. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

DORAN, P. T., ZIMMERMAN, M. K., 2009. "Examining the Scientific Consensus on Climate Change". **Eos Transactions American Geophysical Union**. v. 90, n. 3, p. 22.

DORNBUSH, R.; FISCHER, S. E STARTZ, R., 2009. **Macroeconomia**. 10 ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil.

EDJABOU, L. D., SMED, S., 2013. "The effect of using consumption taxes on foods to promote climate friendly diets–The case of Denmark". **Food Policy**. v. 39, pp. 84-96.

EICKHOUT B., VAN MEIJL H, TABEAU A., STEHFEST E., 2008, “The impact of environmental and climate constraints on global food supply”. **Economic Analysis of Land Use in Global Climate Change Policy**. v. 14, p. 206.

EMBRAPA, 2018. **Visão 2030: O futuro da agricultura brasileira**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Brasília, Distrito Federal, p. 212.

EPE, 2019. **Generation Capacity Expansion**. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Disponível em: <http://www.epe.gov.br/en/areas-of-expertise/electricity/generation-capacity-expansion/source>.

EUROPEAN COMMISSION, 2019. “The European Commission's science and knowledge service”. **EU Science HUB**. Disponível em: <https://ec.europa.eu/jrc/en/poles/model>

EVENSON, R. E., GOLLIN, D., 2003. “Assessing the impact of the Green Revolution, 1960 to 2000”. **Science**. v. 300, n. 5620, pp. 758-762.

FAO, 1994. **Definition and Classification of Commodities**. Retrieved March 1, 2017, from <http://www.fao.org/waicent/faoinfo/economic/faodef/faodefe.htm>

FAO, 2004. “Globalization of food systems in developing countries: impact on food security and nutrition”. **Food and Nutrition Paper**. Food and Agriculture Organization of The United Nations. n 83. Rome.

FAO, 2017. **The future of food and agriculture. Trends and challenges**. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, 2017.

FAO e Food Climate Research Network, 2016. **Plates, pyramids, planet. Developments in national healthy and sustainable dietary guidelines: A state of play assessment**. Rome, FAO and the Environmental Change Institute & The Oxford Martin Programme on the Future of Food, The University of Oxford

FAJARDY, M., KÖBERLE, A., MAC DOWELL, N., FANTUZZI, A., 2019. “BECCS deployment: a reality check”. **Grantham Institute Briefing paper**. n. 28. Imperial College London

FARIA, W. R., HADDAD, E. A., 2019. “Modelagem do uso da Terra e Efeitos de Mudanças na Produtividade Agrícola entre 2008 e 2015”. **Estudos Econômicos**, v. 49, n. 1, pp. 65-103.

FEEM, 2019. **ICES (Inter-temporal Computable Equilibrium System)**. Disponível em: <http://www.icesmodel.feem.it/>

FERREIRA-FILHO e HORRIDGE, 2004. “Economic integration, poverty and regional inequality in Brazil”. In: **Seventh Annual Conference on Global Economic Analysis**, Washington

FERREIRA FILHO, J. B. D. S., MACIENTE, A. N., OLIVEIRA, C. W. D. A., COELHO, D. S. C., GUSSO, D. A., BAHIA, L. D., 2011. “Impactos da mudança de planos de investimento ao fim de 2008: um exercício de equilíbrio econômico geral”. **Texto para Discussão**, n. 1671. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.

FOLEY, J. A., RAMANKUTTY, N., BRAUMAN, K. A., CASSIDY, E. S., GERBER, J. S., JOHNSTON, M., ... BALZER, C., 2011. "Solutions for a cultivated planet". **Nature**, v. 478, n. 7369, p. 337.

FONTAGNÉ, L., FOURÉ, J., RAMOS, M. P., 2013. "MIRAGE-e: A General Equilibrium Long-term Path of the World Economy". **Working Papers**, n. 39 (Dec). CEPII research center.

FRANK, S., HAVLIK, P., VALIN, H., WOLLENBERG, E., HASEGAWA, T., OBERSTEINER, M., 2017. "Carbon prices, climate change mitigation & food security: How to avoid trade-offs?" **CCAFS Info Note**. Wageningen, Netherlands: CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS).

FUJIMORI, S., MASUI, T., & MATSUOKA, Y., 2012. "AIM/CGE [basic] manual". **Discussion paper series**, n. 1, Center for Social and Environmental Systems Research, National Institute Environmental Studies. Disponível em: <http://www.nies.go.jp/social/dp/pdf/2012-01.pdf>

FUJIMORI S., MASUI T., MATSUOKA Y., 2014. "Development of a global computable general equilibrium model coupled with detailed energy end-use technology". **Applied Energy**, v. 128, n. 1, pp. 296-306, Disponível em: (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914004371>)

GARNETT, T., APPLEBY, M. C., BALMFORD, A., BATEMAN, I. J., BENTON, T. G., BLOOMER, P., ... & HERRERO, M. T., 2014. "What is a sustainable healthy diet? A Discussion Paper". **Food Climate Research Network**. April, 2014.

GEARY, R., 1950. "A note on 'A constant-utility index of the cost of living'". **The Review of Economic Studies**, v. 18, n. 1, pp. 65-66.

GIFFORD, R., KORMOS, C., MCINTYRE, A., 2011. "Behavioral dimensions of climate change: drivers, responses, barriers, and interventions". **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 2, n. 6, pp. 801-827.

GIL, J., SIEBOLD, M., & BERGER, T., 2015. "Adoption and development of integrated crop-livestock-forestry systems in Mato Grosso, Brazil". **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 199, pp. 394-406.

GIL, J. D. B., GARRETT, R., & BERGER, T., 2016. "Determinants of crop-livestock integration in Brazil: Evidence from the household and regional levels". **Land Use Policy**, v. 59, pp. 557-568.

GODFRAY, H. C. J., BEDDINGTON, J. R., CRUTE, I. R., HADDAD, L., LAWRENCE, D., MUIR, J. F., ... TOULMIN, C., 2010. "Food security: the challenge of feeding 9 billion people". **Science**, v. 327, n. 5967, pp. 812-818.

GRAIN e IATP, 2018. **Emissions impossible: How big meat and dairy are heating up the planet**. Institute for Agriculture and Trade Policy.

GUILHOTO, 1995. **Um modelo de equilíbrio geral para planejamento e análise de políticas agrícolas na economia brasileira**. Tese de Livre Docência. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

GUILHOTO, J., 2011. “Input-Output Analysis: Theory and Foundations”. **MPRA Paper**, v. 5, n. 32566. Munich Personal RePEc Archive. August.

GUILHOTO, J. J. M., HASEGAWA, M., LOPES, R. L., 2012. “A estrutura teórica do modelo inter-regional para a economia brasileira – MIBRA”. **Encontro Brasileiro de Estudos Regionais e Urbanos**, São Paulo

GUNASEKERA, D., FORD, M., HEYHOE, E., GURNEY, A., AHAMMAD, H., PHIPPS, S., HARMAN, I., FINNIGAN, J., BREDE, M., 2008. “Global integrated assessment model: a new analytical tool for assessing climate change risks and policies”. **Australian Commodities**, v. 15, n. 1, pp. 195-216.

HADDAD, E., 1999. **Regional inequality and structural changes: lessons from the Brazilian experience**. Routledge.

HADDAD, E., DOMINGUES, E., 2001. “Um modelo aplicado de equilíbrio geral para a economia brasileira: projeções setoriais para 1999-2004”. **Estudos econômicos**, v. 31, n. 1.

HADDAD, E., HEWINGS, G., 2003. “Interregional Computable General Equilibrium Models: A Survey on Specification and Implementation Issues”. **TD Nereus**, v. 5. São Paulo.

HADDAD, L. J., HAWKES, C., ACHADI, E., AHUJA, A., AG BENDECH, M., BHATIA, K., ... FANZO, J., 2015. **Global Nutrition Report 2015: Actions and accountability to advance nutrition and sustainable development**. Intl Food Policy Res Inst.

HALLSTRÖM, E., RÖÖS, E., BÖRJESSON, P., 2014. “Sustainable meat consumption: a quantitative analysis of nutritional intake, greenhouse gas emissions and land use from a Swedish perspective”. **Food Policy**, v. 47, pp. 81–90.

HANSEN, A., 1936. “Mr. Keynes on underemployment equilibrium”. **Journal of Political Economy**, v. 44, pp. 667–686.

HARBERGER, A., 1962. “The incidence of the corporation income tax”. **Journal of Political Economy**, v. 70, n. 3, pp. 215-240.

HARMAN, I. N., FORD, M., JAKEMAN, G., PHIPPS, S. J., BREDE, M., FINNIGAN, J. J., GUNASEKERA, D., AHAMMAD, H., 2008. “Assessment of future global scenarios for the Garnaut Climate Change Review: An application of the GIAM framework”, **CSIRO-ABARE Technical Report**.

HASEGAWA T., FUJIMORI S., SHIN Y., TAKAHASHI K., MASUI T., TANAKA A., 2014. “Climate change impact and adaptation assessment on food consumption utilizing a new scenario framework”. **Environmental Science and Technology**, v. 48, pp. 438-445, Disponível em: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es4034149>

HASEGAWA, T., FUJIMORI, S., HAVLÍK, P., VALIN, H., BODIRSKY, B. L., DOELMAN, J. C., ... MASON-D’CROZ, D., 2018. “Risk of increased food insecurity under stringent global climate change mitigation policy”. **Nature Climate Change**, v. 8, n. 8, p. 699.

HAVLÍK, P., SCHNEIDER, A., SCHMID, E., BOTTCHEER, H., FRITZ, S., SKALSKY, R., AOKI, K., DE CARA, S., KINDERMANN, G., KRAXNER, F., LEDUC, S., MCCALLUM, I., MOSNIER, A., SAUER, T., OBERSTEINER, M., 2011. "Global Land-use implications of first and second generation biofuel targets". **Energy Policy**, v. 39, pp. 5690-5702.

HEDENUS, F., WIRSENIUS, S., JOHANSSON, D., 2014. "The importance of reduced meat and dairy consumption for meeting stringent climate change targets". **Climatic Change**, v. 124, n. 1-2, p. 79.

HENRICHES, T., ZUREK, M., EICKHOUT, B., KOK, K., RAUDSEPP-HEARNE, C., RIBEIRO, T., VAN VUURREN, D.P., VOLKERY, A., 2010. "Scenario development and analysis for forward looking ecosystem assessments". In: Ash, N. (Ed.), **Ecosystems and Human Wellbeing a Manual for Assessment Practitioners**. Island Press, Washington DC.

HERTEL, T., 1997. **Global trade analysis: modeling and applications**. Cambridge University Press, Cambridge and New York, 1997.

HICKS, J., 1936. "Mr. Keynes and the Classics. A Suggested Interpretation". **Econometrica**. v. 5, pp. 147-159.

HOMMES, C., 1998. "On the consistency of backward-looking expectations: The case of the cobweb". **Journal of Economic Behavior & Organization**, v. 33, n. 3-4, pp. 333-362.

HOPE, C., ANDERSON, J., WENMAN, P., 1993. "Policy analysis of the greenhouse effect: An application of the PAGE model". **Energy Policy**. v. 21, n. 3 (March), pp. 327-338.

HOTELLING, H., 1931. "The economics of exhaustible resources". **Journal of political Economy**, v. 39, n. 2, pp. 137-175.

HUGHES, H. R., PATERSON, M., 2017. "Narrowing the climate field: The symbolic power of authors in the IPCC's assessment of mitigation". **Review of Policy Research**, v. 34, n. 6, pp. 744-766.

HYMAN, R. C., REILLY, J. M., BABIKER, M. H., DE MASIN, A., JACOBY, H. D., 2003. "Modeling non-CO2 greenhouse gas abatement". **Environmental Modeling & Assessment**, v. 8, n. 3, pp. 175-186.

IAEA, 2006. **Brazil: a country profile on sustainable energy development**. International Atomic Energy Agency. Vienna: The Agency, 2006. ISBN 92-0-104906-4

IBGE, 2016. **Mudanças na Cobertura e Uso da Terra 2000 - 2010 - 2012 - 2014**. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/recursosnaturais/usodaterra/default.shtm>.

IEA, 2011. **World Energy Outlook 2011**. International Energy Agency, Paris, France

IIASA, 2018. **International Institute for Applied System Analysis**. Available at: <http://www.iiasa.ac.at>.

IMAMURA, F., MICHA, R., KHATIBZADEH, S., FAHIMI, S., SHI, P., POWLES, J. & MOZAFFARIAN, D., 2015. “Dietary quality among men and women in 187 countries in 1990 and 2010: A systematic assessment”. **The Lancet Global Health**, v. 3, n. 3, pp. e132–e142.

IPCC, 2000. “Special Report on Emission Scenarios”. **Special Report of IPCC Working Group III**, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.

IPCC, 2006. “IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories”. **National Greenhouse Gas Inventories Programme**, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Nगरा T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan

IPCC, 2007. “Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies”. **IPCC Expert Meeting Report**. pp. 19–21 September, 2007. Noordwijkerhout, The Netherlands Supporting.

IPCC, 2013. “What is the IPCC?”. **IPCC Factsheet**. Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC, 2014. “Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III”. **Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

IPCC, 2018. “Global warming of 1.5°C”. **IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty** [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. In Press.

IYER, G., CLARKE, L., EDMONDS, J., HULTMAN, N., MCJEON, H., 2015. “Long-term payoffs of near-term low-carbon deployment policies”. **Energy Policy**, v. 86, pp. 493-505.

JACOBY, H. D.; REILLY, J. M.; MCFARLAND, J. R.; PALTSEV, S., 2004. “Technology and technical change in the MIT EPPA Model”. **MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change**. Cambridge, 2004. Report, n. 111. Disponível em: http://globalchange.mit.edu/pubs/abstract.php?publication_id=683

JIANG, L., O’NEILL, B., 2015. “Global urbanization projections for the Shared Socioeconomic Pathways”. **Global Environmental Change**. v. 42, pp. 193-199.

JOHANSEN, L., 1960. **A Multi-sectoral Study of Economic Growth**. Amsterdam: North-Holland.

KC, S., LUTZ, W., 2017. “The human core of the shared socioeconomic pathways: Population scenarios by age, sex and level of education for all countries to 2100”. **Global Environmental Change**, v. 42, pp. 181-192.

KEYNES, J. M., 1936. **The General Theory of Employment, Interest and Money**. New York: Harcourt

KLEPPER, G., PETERSON, S., SPRINGER, K., 2003. “DART97: a description of the multi-regional, multi-sectoral trade model for the analysis of climate policies”. **Kiel Working Papers**. n. 1149. Kiel Institute for the World Economy (IfW).

KOBERLE, A., SZKLO, A., LUCENA, A., PORTUGAL-PEREIRA, J., ROCHEDO, P., SCHAEFFER, R., 2015. “Beyond the Numbers: Understanding the Transformation Induced by INDCs”. **IDDRI-MILES Project Consortium**, Paris, France.

KOBERLE, A. 2018. **Implementation of land use in an energy system model to study the long-term impacts of bioenergy in Brazil and its sensitivity to the choice of agricultural greenhouse gas emission factors**. Tese (doutorado) – Programa de Planejamento Energético, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

KRIEGLER, E., O’NEILL, B., HALLEGATTE, S., KRAM, T., LEMPERS, R., MOSS, R., WILBANKS, T., 2012. “The need for and use of socio-economic scenarios for climate change analysis: A new approach based on shared socio-economic pathways”. **Global Environmental Change**. v. 22, pp. 807–822.

KRIEGLER, E., RIAHI, K., BAUER, N., SCHWANITZ, V., PETERMANN, N., BOSETTI, V., MARCUCCI, A., OTTO, S., PAROUSSOS, L., RAO, S., CURRÁS, T., ASHINA, S., BOLLEN, J., EOM, J., CHERIF, M., LONGDEN, T., KITOUS, A., MEJEAN, A., SANO, F., SCHAEFFER, M., 2015, “Making or breaking climate targets: The AMPERE study on staged accession scenarios for climate policy”. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 90, pp. 24–44.

KYNLAND, F., PRESCOTT, E., 1996. “The Computational Experiment: An Econometric Tool”. **Journal of Economic Perspectives**. v. 10, n. 1, pp. 69-85.

LAHIRI, S., BABIKER, M., ECKAUS, R., 2000. “The effects of changing consumption patterns on the costs of emission restrictions”. **MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change**. Report n. 64. Cambridge, 2000. Disponível em: http://globalchange.mit.edu/pubs/abstract.php?publication_id=636

LEIMBACH, M., BAUER, N., BAUMSTARK, L., LUEKEN, M., EDENHOFER, O., 2010a. “Technological Change and International Trade-insights from ReMIND-R”. **The Energy Journal**, v. 31, n. 2, pp. 109–136.

LEIMBACH, M., BAUER, N., BAUMSTARK, L., EDENHOFER, O. 2010b. “Mitigation Costs in a Globalized World: Climate Policy Analysis with REMIND-R”. **Environmental Modeling and Assessment**. v. 15, n. 3, pp. 155–173.

LEIMBACH, M., KRIEGLER, E., ROMING, N., SCHWANITZ, J., 2015. “Future growth patterns of world regions – A GDP scenario approach”. **Global Environmental Change**. v. 42, pp. 215-225.

LEPPI, 2006. "The POLES model: POLES State of the Art". **Laboratoire d'Economie de la Production et de l'Intégration Internationale**. CNRS Grenoble. http://lepii.upmf-grenoble.fr/IMG/pdf/POLES12p_Jan06.pdf.

LEWIS, S. L., WHEELER, C. E., MITCHARD, E. T., KOCH, A., 2019. "Restoring natural forests is the best way to remove atmospheric carbon". **Nature**, v. 568, pp. 25-28.

LIM, S., VOS, T., FLAXMAN, A., AMANN, M., 2012. "A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990-2010: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010". **The Lancet**, v. 380, n. 9859, pp. 2224-2260.

LIU, J., MOONEY, H., HULL, V., DAVIS, S. J., GASKELL, J., HERTEL, T., ... LI, S., 2015. "Systems integration for global sustainability". **Science**, v. 347, n. 6225.

LOBELL, D., BALDOS, U., HERTEL, T., 2013. "Climate Adaptation as Mitigation: The Case of Agricultural Investments." **Environmental Research Letters**, v. 8, n. 1.

LOFGREN, H., HARRIS, R. L., ROBINSON, S., 2002. **A standard computable general equilibrium (CGE) model in GAMS**. Intl Food Policy Res Inst. vol. 5.

LOULOU, R., LABRIET, M., 2007. "ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model Part I: Model structure". **Computational Management Science**. v. 5, n. 1 (Feb), pp. 7-40.

LUCENA, A., SCHAEFFER, R., SZKLO, A., 2010. "Least-cost adaptation options for global climate change impacts on the Brazilian electric power system". **Global Environmental Change**, v. 20, p. 342-350.

LUCENA, A., CLARKE, L., SCHAEFFER, R., SZKLO, A., ROCHEDO, P., NOGUEIRA, L., DAENZER, K., GURGEL, A., KITOUS, A., KOBER, T., 2016. "Climate Policy Scenarios In Brazil: A multi-model comparison for energy". **Energy Economics**, v. 56, p. 564-574.

LUDERER, G., LEIMBACH, M., BAUER, N., KRIEGLER, E., ABOUMAHBOUB, T., ARROYO-CURRAS, T., BAUMSTARK, L., LAVINIA, BERTRAM, C., GIANNOUSAKIS, A., HILAIRE, J., KLEIN, D., MOURATIADOU, I., PIETZCKER, R., PIONTEK, F., ROMING, N., SCHULTES, A., SCHWANITZ, V., STREGLER, J., 2015. Description of the REMIND Model (Version 1.6). **SSRN**.

MAGNET, 2019. **MAGNET (Modular Applied GeNeral Equilibrium Tool)**. Disponível em: <https://www.magnet-model.org/>

MANKIW, N., 2010. **Macroeconomia**. 7a ed. LTC, Rio de Janeiro.

MANNE, A., 1976. "ETA: A Model for Energy Technology Assessment," **Bell Journal of Economics**, v. 7, n. 2, 1976, pp. 379-406

MANNE, A., RICHELIS, R., 2004. **MERGE: An Integrated Assessment Model for Global Climate Change**. June. <http://web.stanford.edu/group/MERGE/GERAD1.pdf>.

- MAPA, 2017. “Projeções do agronegócio: Brasil 2016/17 a 2026/27: Projeções de longo prazo”. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. Brasília, Distrito Federal, MAPA/SPA, p. 103.
- MARCUCCI, A., TURTON, H., 2012. “The MERGE-ETL Model: Model Documentation”. **Laboratory for Energy System Analysis**. Paul Scherrer Institute. Energy Economics Group.
- MAS-COLELL, A., WHINSTON, M., GREEN, J., 1995. **Microeconomic Theory**. Oxford University Press, New York.
- MASUI, T., MATSUMOTO, K., HIJIOKA, Y., KINOSHITA, T., NOZAWA, T., ISHIWATARI, S., KATO, E., SHUKLA, P.R., YAMAGATA, Y., KAINUMA, M., 2011, "A emission pathway to stabilize at 6 W/m² of radiative forcing", **Climatic Change**, pp. 109-177.
- MATHIESEN, L., 1985. “Computation of economic equilibrium by a sequence of linear complementarity problems”. **Mathematical Programming Study**, Heidelberg, v. 23, p. 144-162.
- MCMICHAEL, A. J., POWLES, J. W., BUTLER, C. D., UAUY, R., 2007. “Food, livestock production, energy, climate change, and health”. **The Lancet**, v. 370, n. 9594, pp. 1253-1263.
- MEINSHAUSEN, M., RAPER, S., WIGLEY, T., 2011. “Emulating coupled atmosphere-ocean and carbon cycle models with a simpler model, MAGICC6 – Part 1: Model description and calibration”. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 11, n. 4, pp. 1417-1456.
- MESSNER, S., STRUBEGGER, M., 1995. “User's Guide for MESSAGE IIP”. **IIASA Working Paper**. WP-95-69, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.
- MESSNER, S., SCHRATTENHOLZER, L., 2000. “MESSAGE-MACRO: linking an energy supply model with a macroeconomic module and solving it iteratively”, **Energy**, v. 25, pp. 267-282.
- MILLER, R., BLAIR, P., 2009. **Input-output analysis: foundations and extensions**. Cambridge university press.
- MIRAGE, 2019. **MIRAGE Wiki: Structure overview**. Disponível em: http://wiki.mirage-model.eu/doku.php?id=structure_overview
- MILLNER, A., MCDERMOTT, T., 2016. “Model confirmation in climate economics”. **Proceedings of the National Academy of Sciences**. v. 113, n. 31, pp. 8675-8680.
- MINX, J. C., LAMB, W. F., CALLAGHAN, M. W., FUSS, S., HILAIRE, J., CREUTZIG, F., ..., KHANNA, T., 2018. “Negative emissions—Part 1: Research landscape and synthesis”. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 6, 063001.
- MORRIS, S., SHIN, H., 2006. “Inertia of forward-looking expectations”. **American Economic Review**, v. 96, n. 2, pp. 152-157.

MORRIS, J., REILY, J., CHEN, Y.-H., 2014. "Advanced Technologies in Energy-Economy Models for Climate Change Assessment". **MIT JPSPGC** forthcoming report, 29 p.

MOSS R. H., EDMONDS, J. A., HIBBARD, K. A., MANNING, M. R., ROSE, S. K., VAN VUUREN, D. P., CARTER, T. R., EMORI, S., KAINUMA, M., KRAM, T., MEEHL, G. A., MITCHELL, J. F., NAKICENOVIC, N., RIAHI, K., SMITH, S. J., STOUFFER, R. J., THOMSON, A. M., WEYANT, J. P., WILBANKS, T. J., 2010. "The next generation of scenarios for climate change research and assessment". **Nature**, v. 463, pp. 747-756.

MOTTET, A., DE HAAN, C., FALCUCCI, A., TEMPIO, G., OPIO, C., GERBER, P., 2017. "Livestock: On our plates or eating at our table? A new analysis of the feed/food debate". **Global Food Security**, v. 14, pp. 1-8.

NAKICENOVIC, N., SWART, R., 2000. **Special Report on Emissions Scenarios (SRES)**. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

NASA, 2018. **Scientific consensus: Earth's climate is warming**. Disponível em <https://climate.nasa.gov/scientific-consensus/#>*

NOBEL PRIZE, 2018. **The Nobel Prize. Prizes in Economic Sciences**. Disponível em: https://www.nobelprize.org/prizes/lists/all-prizes-in-economic-sciences?utm_source=lasindias.info%2Fblog

NOGUEIRA, L., LUCENA, A. F. P., RATHMANN, R., ROCHEDO, P. R. R., SKZLO, A., SCHAEFFER, R., 2014. "Will thermal power plants with CCS play a role in Brazil's future electric power generation?" **International Journal of Greenhouse Gas Control**. V. 24 (May), pp. 115-123.

NOGUEIRA DE OLIVEIRA, L., ROCHEDO, P., PORTUGAL-PEREIRA, J., HOFFMANN, B., ARAGÃO, R., MILANI, R., LUCENA, A., SZKLO, A., SCHAEFFER, R., 2016. "Critical Technologies for Sustainable Energy Development in Brazil: Technological Foresight Based on Scenario Modelling". **Journal of Cleaner Production**, v. 130, p. 12-24, 2016.

NORDHAUS, William D. 1992. "The DICE model: Background and Structure," **Cowles Foundation Discussion Paper** , n. 1009 (Feb), Disponível em: <http://cowles.yale.edu/publications/cfdp>.

NORDHAUS, W., 2017. "Evolution of Assessments of the Economics of Global Warming: Changes in the DICE Model, 1992–2017," **NBER Working Paper**. n. 23319, April.

OECD, 2019. **ENV-Linkages model. Environmental-economic modelling**. Disponível em: <http://www.oecd.org/environment/indicators-modelling-outlooks/modelling.htm>

O'NEILL, B., 2011. "Update on the 'New Scenario Process'". **WCRP/CLIVAR Working Group on Coupled Modeling**, NCAR, EUA.

O'NEILL, B., KRIEGLER, E., RIAHI, K., EBI, K., HALLEGATTE, S., CARTER, T., MATHUR, R., VAN VUUREN, D., 2014. "A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways". **Climatic Change**. v. 122, pp. 387–400.

O'NEILL, B., KRIEGLER, E., EBI, K., KEMP-BENEDICT, E., RIAHI, K., ROTHMAN, D., VAN RUIJVEN, B., VAN VUUREN, D., BIRKMANN, J., KOK, K., LEVY, M., SOLECKIM, W., 2015. "The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century". **Global Environmental Change**. v. 42, pp. 169-180.

PALTSEV, S., 1999. "Moving from Static to Dynamic General Equilibrium Economic Models (Notes for a beginner in MPSGE)". **Joint Program on the Science and Policy of Global Change**. Massachusetts Institute of Technology.

PALTSEV, S., REILLY, J. M., JACOBY, H. D., ECKAUS, R. S., MCFARLAND, J. R., SAROFIM, M. C., ASADOORIAN, M., BABIKER, M. H., 2005. "The MIT emissions prediction and policy analysis (EPPA) model: version 4". **MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change**.

PANT, H., TULPULÉ, V., FISHER, B. S. 2002. "The Global Trade and Environment Model: A Projection of Non-Steady State Data Using Intertemporal GTEM". Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics. In: **Fifth Annual Conference on Global Economic Analysis**, Grand Hotel, Taipei, Taiwan, 5-7 June 2002

PANT, H., 2007. "GTEM: global trade and environment model". **Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics**. Canberra.

PASINI, F., 2017. **A Agricultura Sintrópica de Ernst Götsch: história, fundamentos e seu nicho no universo da Agricultura Sustentável**. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Conservação. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 104 f. Rio de Janeiro, 2017.

PBL, 2018. **Netherlands Environmental Assessment Agency**. Available at: <http://www.pbl.nl/em>.

PETERS, G. P., AAMAAS, B., BERNTSEN, T., & FUGLESTVEDT, J. S., 2011. "The integrated global temperature change potential (iGTP) and relationships between emission metrics". **Environmental Research Letters**, v. 6, n. 4.

POORE, J., NEMECEK, T., 2018. "Reducing food's environmental impacts through producers and consumers". **Science**, v. 360, n. 6392, pp. 987-992.

QUESNAY, F., 1758. "Tableau Économique des Physiocrates". **Préface de Michel Lutfalla** (Calmann-Lévy, 1969)

RAY, D. K., MUELLER, N. D., WEST, P. C., FOLEY, J. A., 2013. "Yield trends are insufficient to double global production by 2050". **Plos One**, v. 8, n. 6, e66428.

RIAHI, K., GRUBLER, A., NAKICENOVIC, N., 2007, "Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization", **Technological Forecasting and Social Change**, v. 74, n. 7, pp. 887–935.

RIAHI, K., KREY, V., RAO, S., CHIRKOV, V., FISCHER, G., KOLP, P., KINDERMANN, G., NAKICENOVIC, N., RAFAI, P., 2011, "RCP-8.5: exploring the consequence of high emission trajectories", **Climatic Change**, v. 109, pp. 33-57.

RITE, 2019. **RITE Global model for Energy and Climate Change Assessment: DNE21+**. Disponível em: <https://www.rite.or.jp/system/en/global-warming-ouyou/modeltodata/overviewdne21/>

ROCHEDO, P., SZKLO, A., LUCENA, A., SCHAEFFER, R., 2015. "How a very detailed representation of energy efficiency options in the objective-function of MESSAGEBrazil (MSB8000) can affect the penetration of renewables (VRE) into the Brazilian power grid". In: **Integrated Assessment Modelling Conference**, Potsdam, Germany.

ROCHEDO, P. 2016. **Development of a global integrated energy model to evaluate the Brazilian role in climate change mitigation scenarios**. Tese (Doutorado) – Programa de Planejamento Energético, UFRJ/ COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ROGELJ, J., REISINGER, A., MCCOLLUM, D. L., KNUTTI, R., RIAHI, K., & MEINSHAUSEN, M., 2015. "Mitigation choices impact carbon budget size compatible with low temperature goals". **Environmental Research Letters**, v. 10, n. 7.

ROGELJ, J., DEN ELZEN, M., HÖHNE, N., FRANSEN, T., FEKETE, H., WINKLER, H., SCHAEFFER, R., SHA, F., RIAHI, K., MEINSHAUSEN, M., 2016. "Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2°C". **Nature**, v. 534, n. 7609, p. 631.

ROSS, M., 2009. "Documentation of the Applied Dynamic Analysis of the Global Economy (ADAGE) Model". **Working Paper** n. 1 (Apr). RTI International's* Technology, Energy and the Environment Program

ROUND, J., 2003. "Social accounting matrices and SAM-based multiplier analysis". **The impact of economic policies on poverty and income distribution: Evaluation techniques and tools**, v. 14, pp. 261-276.

RUTHERFORD, T. F., 1995. "Extension of GAMS for complementarity problems arising in applied economic analysis". **Journal of Economic Dynamics and Control**, Amsterdam, v. 19, n. 8, p. 1299-1324.

RUTHERFORD, T. F., 1999. "Applied general equilibrium modeling with MPSGE as a GAMS subsystem: an overview of the modeling framework and syntax". **Computational Economics**, v. 14, n.1, p. 1-46, 1999.

RUTHERFORD, T., 2000. "Getting Started with CGE Modeling". **Lecture Notes for Economics**, n. 8433. University of Colorado

RUTHERFORD, T. F., 2005. **GTAP6inGAMS: The dataset and static model**. 42 p., 2005, mimeo. (<http://www.mpsge.org/gtap6/gtap6gams.pdf>)

SANTOS, 2010. **Política energética e desigualdades regionais na economia brasileira**. Tese de Doutorado em Teoria Econômica. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

SANS, P., COMBRIS, P., 2015. "World meat consumption patterns: An overview of the last fifty years (1961–2011)". **Meat Science**, v. 109, pp. 106–111.

SASSI, O., CRASSOUS, R., HOURCADE, J.-C., GITZ, V., WAISMAN, H., GUIVARCH, C., 2010. "Imaclim-R : a modelling framework to simulate sustainable development pathways", **International Journal of Global Environmental Issues**. v. 10, n. 1-2, pp. 5-24.

SATHAYE, J., SHUKLA, P., 2013. "Methods and Models for Costing Carbon Mitigation". **Annual Review of Environment and Resources**. v. 38, n. 1, pp. 137-168.

SCARF, H., 1967. "On the Computation of Equilibrium Prices". In Feliner, W.J. (ed), **Ten Economic Studies in the Tradition of Irving Fisher**. New York: John Wiley & Sons.

SCEALY, R., NEWTH, D., GUNASEKERA, D., & FINNIGAN, J.J., 2011. "Potential effects of variation in agriculture sector response to climate change: an integrated assessment". In: **14th Annual Conference on Global Economic Analysis**. 16-18 June 2011, Ca' Foscari University of Venice, San Globbe Campus, Italy

SCHMITZ, C., VAN MEIJL, H., KYLE, P., NELSON, G. FUJIMORI, S., GURGEL, A., HAVLIK, P., 2014. "Land-Use Change Trajectories up to 2050: Insights from a Global Agro-Economic Model Comparison." **Agricultural Economics**. v. 45, n. 1, pp. 69–84.

SCHUMPETER, J., 1954. **History of Economic Analysis**. Oxford University Press, 1981), p. 222

SHOVEN, J. B., WHALLEY, J., 1984. "Applied general-equilibrium models of taxation and international trade: an introduction and survey". **Journal of Economic Literature**, v. 22, n. 3, p. 1007-1051.

da SILVA, J. G., RUVIARO, C. F., & DE SOUZA FERREIRA FILHO, J. B., 2017. "Livestock intensification as a climate policy: Lessons from the Brazilian case". **Land Use Policy**, v. 62, pp. 232-245.

SILVA, R., BARIONI, L. G., HALL, J. J., MORETTI, A. C., VELOSO, R. F., ALEXANDER, P., ... MORAN, D., 2017. "Sustainable intensification of Brazilian livestock production through optimized pasture restoration". **Agricultural systems**, v. 153, pp. 201-211.

SILVA, R. D. O., BARIONI, L. G., PELLEGRINO, G. Q., MORAN, D., 2018. "The role of agricultural intensification in Brazil's Nationally Determined Contribution on emissions mitigation". **Agricultural Systems**, v. 161, pp. 102-112.

SMIL, V., 2014. "Eating meat: Constants and changes". **Global Food Security**. Article in press.

SMIL, V. 2017. "Planet of the cows". **IEEE Spectrum** April, n. 24

SMITH, P., GREGORY, P., VAN VUUREN, D., ROUNSEVELL, M., OBERSTEINER, M., HAVLI, P., WOODS, J., STEHFEST, E., BELLARBY, J., 2010. "Competition for Land," 2941–57. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 365, n. 1554, pp. 2941-2957.

SOKOLOV, A.P., SCHLOSSER, C., DUTKIEWICZ, S., PALTSEV, S., KICKLIGHTER, D.W., JACOBY, H.D., PRINN, R.G., FOREST, C.E., REILLY, J.M., WANG, C., FELZER, B., SAROFIM, M.C., SCOTT, J., STONE, P.H., MELILLO, J.M., COHEN, J., 2005. "The MIT Integrated Global System Model (IGSM) Version 2: Model Description and Baseline Evaluation". **Joint Program Report Series Report**, v. 124, p. 40. Disponível em: <http://globalchange.mit.edu/publication/14579>

SPRINGMANN, M., GODFRAY, H. C. J., RAYNER, M., SCARBOROUGH, P., 2016. "Analysis and valuation of the health and climate change cobenefits of dietary change". **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 113 n. 15, pp. 4146-4151

STEHFEST, E., BOUWMAN, L., VAN VUUREN, D. P., DEN ELZEN, M. G., EICKHOUT, B., KABAT, P., 2009. "Climate benefits of changing diet". **Climatic change**, v. 95, n. 1-2, pp. 83-102.

STEHFEST, E., VAN VUUREN, D., KRAM, T., BOUWMAN, L., ALKEMADE, R., BAKKENES, M., BIEMANS, H., BOUWMAN, A., DEN ELZEN, M., JANSE, J., LUCAS, P., VAN MINNEN, J., MÜLLER, M., PRINS, A., 2014. **Integrated Assessment of Global Environmental Change with IMAGE 3.0. Model description and policy applications**. The Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.

STOLL-KLEEMANN, S., O'RIORDAN, T., 2015. "The sustainability challenges of our meat and dairy diets". **Environment: Science and Policy for Sustainable Development**, v. 57, n. 3, pp. 34-48.

STONE, R., 1954. "Linear expenditure systems and demand analysis: an application to the pattern of British demand". **The Economic Journal**, v. 64, n. 255, pp. 511-527.

SWINBURN, B. A., KRAAK, V. I., ALLENDER, S., ATKINS, V. J., BAKER, P. I., BOGARD, J. R., ... EZZATI, M., 2019. "The global syndemic of obesity, undernutrition, and climate change: The Lancet Commission report". **The Lancet**, v. 393, n. 10173, pp. 791-846.

TEIXEIRA, E., PEREIRA, M., GURGEL, A., 2013. **Projeto de Análise de Equilíbrio Geral da Economia Brasileira**. 200p. Campo Grande, MS: Editora Life. ISBN 978-85-8150-123-9.

TIETENBERG, T., 2013. "Reflections – Carbon Pricing in Practice". **Review of Environmental Economics and Policy**, v. 7, n. 2, pp. 313–329.

TILMAN, D., & CLARK, M., 2014. "Global diets link environmental sustainability and human health". **Nature**, v. 515, n. 7528, p. 518.

TIRADO, R., THOMPSON, K.F., MILLER, K.A., JOHNSTON, P., 2018. “Less is more: Reducing meat and dairy for a healthier life and planet”. **Greenpeace Research Laboratories Technical Report** (Review) 03-2018. ISBN: 978-1-9999978-1-6. 86 pp.

TOL, R., 1997. “On the Optimal Control of Carbon Dioxide Emissions -- An Application of FUND”, **Environmental Modelling and Assessment**, v. 2, pp. 151-163.

THOMSON, A.M., CALVIN, K.V., SMITH, S.J., KYLE, G.P., VOLKE, A., PATEL, P., DELGADO-ARIAS, S., BOND-LAMBERTY, B., WISE, M.A., CLARKE, L.E., EDMONDS, J.A., 2011, "RCP4.5: A Pathway for Stabilization of Radiative Forcing by 2100", **Climatic Change**, v. 109, n. 1-2, p. 77.

UCL, 2019. **ENGAGE CGE-UCL model**. UCL Energy Institute Models. Disponible en: <https://www.ucl.ac.uk/energy-models/models/cge-ucl>

UNCTAD, 2013. “Wake up before it is too late: Make agriculture truly sustainable now for food security in a changing climate”. **Trade and Environment Review**. United Nations Conference on Trade and Development.

UNFCCC, 2016. **Report of the Conference of the Parties on its twenty-first session, held in Paris from 30 November to 13 December 2015 – Addendum** – Part two: Action taken by the Conference of the Parties at its twenty-first session. United Nations Framework Convention on Climate Change. Paris.

VALIN, H., SANDS, R., VAN DER MENSBRUGGHE, D., NELSON, G., AHAMMAD, H., BLANC, E., BODIRSKY, B., FUJIMORI, S., HASEGAWA, T., HAVLIK, P., HEYHOE, E., KYLE, P., MASON-D’CROZ, D., PALTSEV, S., ROLINSKI, S., TABEAU, A., VAN MEIJL, H., VON LAMPE, M., WILLENBOCKE, D., 2014. “The future of food demand: understanding differences in global economic models”. **Agricultural Economics**, v. 45, pp. 1–17.

VAN DEN BERG, N. J., VAN SOEST, H. L., HOF, A. F., DEN ELZEN, M. G., VAN VUUREN, D. P., CHEN, W., DROUET, L., EMMERLING, J., FUJIMORI, S., HOHNE, N., KÖBERLE, MCCOLLUM, D., SCHAEFFER, R., SHEKHAR, S., VISHWANATHN, S., VRONTISI, Z., BLOK, K., 2019. “Implications of various effort-sharing approaches for national carbon budgets and emission pathways”. **Climatic Change**, pp. 1-18.

VAN DER MENSBRUGGHE, D., 2008. “The Environmental Impact and Sustainability Applied General Equilibrium (ENVISAGE) Model”. **The World Bank**.

VAN DE VEN, D. J., GONZÁLEZ-EGUINO, M., & ARTO, I., 2018. “The potential of behavioural change for climate change mitigation: a case study for the European Union”. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 23, n. 6, pp. 853-886.

VAN MEIJL, H.; VAN RHEENEN, T.; TABEAU, A.; EICKHOUT, B. “The impact of different policy environments on agricultural land use in Europe”. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 114, p. 21-38, 2006.

VAN SLUISVELD, M. A., MARTÍNEZ, S. H., DAI O GLOU, V., VAN VUUREN, D. P., 2016. “Exploring the implications of lifestyle change in 2 C mitigation scenarios

using the IMAGE integrated assessment model”. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 102, pp. 309-319.

VAN VUUREN, D.P., DEN ELZEN, M.G.J., LUCAS, P.L., EICKHOUT, B., STRENGERS, B.J., VAN RUIJVEN, B., WONINK, S., VAN HOUDT, R., 2007, "Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs", **Climatic Change**, v. 81, pp. 119–159.

VAN VUUREN, D.P., SMITH, S.J., RIAHI, K., 2010. “Downscaling socioeconomic and emissions scenarios for global environmental change research: a review”. **WIREs Climate Change**, v. 1, n.3.

VAN VUUREN, D.P., STEHFEST, E., DEN ELZEN, M.G.J., DEETMAN, S., HOF, A., ISAAC, M., KLEIN GOLDEWIJK, K., KRAM, T., MENDOZA BELTRAN, A., OOSTENRIJK, R., VAN VLIET, J., VAN RUIJVEN, B., 2011, "RCP2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature change below 2 degrees", **Climatic Change**, v. 109, n. 1-2, p. 95.

VAN VUUREN, D., RIAHI, K., MOSS, R., EDMONDS, J., THOMSON, A., NAKICENOVIC, N., KRAM, T., BERKHOUT, F., SWART, R., JANETOS, A., ROSE, S., ARNELL, N., 2012. “A proposal for a new scenario framework to support research and assessment in different climate research communities”. **Global Environmental Change**. v. 22, pp. 21–35.

VAN VUUREN, D., CARTER, T. 2014. “Climate and socio-economic scenarios for climate change research and assessment: reconciling the new with the old”. **Climatic Change**. v. 122, n. 3, pp 415–429.

VAN VUUREN, D. P., VAN SOEST, H., RIAHI, K., CLARKE, L., KREY, V., KRIEGLER, E., ROGELJ, J., SCHAEFFER, M., TAVONI, M., 2016. “Carbon budgets and energy transition pathways”. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 7.

VANHONACKER, F., VAN LOO, E. J., GELLYNCK, X., VERBEKE, W., 2013. “Flemish consumer attitudes towards more sustainable food choices”. **Appetite**, v. 62, pp. 7-16.

VARIAN, H., 1992. **Microeconomic Analysis**. W. W. Norton & Company, New York. Third edition

VERBEKE, W., PÉREZ-CUETO, F. J., de BARCELLOS, M. D., KRYSTALLIS, A., & GRUNERT, K. G., 2010. “European citizen and consumer attitudes and preferences regarding beef and pork”. **Meat science**, v. 84, n. 2, pp. 284-292.

LOPES, L., VASCONCELLOS, M., 2000. **Manual de macroeconomia: basico e intermediario**. Ed. Atlas.

YADAVALLI, A., JONES, K., 2014. “Does media influence consumer demand? The case of lean finely textured beef in the United States”. **Food Policy**, v. 49, pp. 219–227.

WALDHOFF, S., ANTHOFF, D., ROSE, S., TOL, R., 2014. “The Marginal Damage Costs of Different Greenhouse Gases: An Application of FUND”. **Economics: The Open-Access, Open Assessment E-Journal**, v. 8, n. 31.

- WALRAS, L., 1874. **Elements of Pure Economics, or the Theory of Social Wealth**. 1899, 4th ed.; 1926, rev ed., 1954, Engl. Transl.
- WELLESLEY, L., HAPPER, C., FROGGATTET, A., 2015. “Changing Climate, Changing Diets. Pathways to Lower Meat Consumption”. **Chatham House Report**. The Royal Institute of International Affairs.
- WESTHOEK, H., LESSCHEN, J. P., ROOD, T., WAGNER, S., DE MARCO, A., MURPHY-BOKERN, D., ... OENEMA, O., 2014. “Food choices, health and environment: effects of cutting Europe's meat and dairy intake”. **Global Environmental Change**, v. 26, pp. 196-205.
- WEYANT, J., 2001. “Economic Models: how they work & why their results differ”. In: M. CLAUSSEN (Ed.). **Climate change: science, strategies and solutions**. Washington: Pew Center for Global Climate Change. p. 193-208.
- WHO, 2016. “Healthy diet”. **Fact sheet** No. 394 World Health Organization. Available at www.who.int/mediacentre/factsheets/fs394
- WILLETT, W., ROCKSTRÖM, J., LOKEN, B., SPRINGMANN, M., LANG, T., VERMEULEN, S., ... JONELL, M., 2019. “Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems”. **The Lancet**, v. 393, n. 10170, pp. 447-492.
- WILSON, C., KRIEGLER, E., VAN VUUREN, D. P., GUIVARCH, C., FRAME, D., KREY, V., ... THOMPSON, E. L., 2017. “Evaluating Process-Based Integrated Assessment Models of Climate Change Mitigation”. **IIASA Working Paper**, n. 7. IIASA, Laxenburg, Austria.
- WING, I., 2004. “Computable General Equilibrium Models and Their Use in Economy-Wide Policy Analysis”, **Technical Report 6, Joint Program on the Science and Policy of Global Change**, MIT, Cambridge, MA, USA.
- WITCH, 2019. **The WITCH model: Evaluating Climate Change Impacts and Solutions**. Disponível em: <https://www.witchmodel.org/>
- WMO, 2018. “WMO Greenhouse Gas Bulletin (GHG Bulletin) - The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2017”. **World Meteorological Organization (WMO)**. N. 14 (Nov). ISSN 2078-0796
- WOLTJER, G.B., KUIPER, M.H., 2014. “The MAGNET Model: Module description”. **LEI Report**, n. 57. 146 pp.; 18 fig.; 45 tab.; 39 ref. Wageningen, LEI Wageningen UR (University & Research centre),
- WORLD BANK, 2019. “GDP (current US\$)”. World Bank national accounts data, and OECD National Accounts data files. **The World Bank**. Disponível em: <https://data.worldbank.org>
- ZALLES, V., HANSEN, M. C., POTAPOV, P. V., STEHMAN, S. V., TYUKAVINA, A., PICKENS, A., ... JOHN, N., 2019. “Near doubling of Brazil’s intensive row crop area since 2000”. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 116, n. 2, pp. 428-435.

ZEW, 2019. “Policy Analysis based on Computable Equilibrium. Integrating Innovation Into Computable General Equilibrium Models”. **Leibniz Centre for European Economic Research**. Disponível em: <https://www.zew.de/en/forschung/integrating-innovation-into-computable-general-equilibrium-models/?cHash=d1daf8be8c43678f08f0c1233af1f407>

Anexo I – Detalhamento dos Setores do Modelo TEA

Código	Descrição	Detalhamento
AGR	Agricultura e florestas	Culturas agrícolas e hortaliças em geral: arroz, trigo, grãos de cereais, sementes oleaginosas, cana de açúcar, fibras vegetais; florestas
CTL	Pecuária de corte	Gado bovino, ovino, caprino e equino
OAP	Outros produtos de origem animal	Suínos, aves e outros animais vivos; ovos, mel natural; produtos comestíveis de origem animal, couros, peles e pelos, crus, ceras de insetos; leite de vaca; lã, seda e outras matérias animais matérias-primas para têxteis
FSH	Pesca	Atividades relacionadas à pesca e aquicultura
COL	Carvão	Mineração e aglomeração de carvão, linhito e turfa
CRU	Petróleo cru	Extração de petróleo bruto, atividades de serviços relacionados à extração de petróleo
ELE	Eletricidade	Produção e transmissão de eletricidade
GAS	Gás natural	Extração de gás natural, atividades de serviços relacionados à extração de gás; distribuição de combustíveis gasosos através da rede elétrica; fornecimento de vapor e água quente
OIL	Derivados de petróleo	Produtos refinados de petróleo, processamento de combustível nuclear, produtos de forno de coque
I_S	Ferro e aço	Produção básica e fundição de ferro e aço
CRP	Química e petroquímica	Produtos químicos básicos, outros produtos químicos, produtos de borracha e plásticos
NMM	Minerais não-metálicos	Cimento, gesso, cal, cascalho, concreto
OFD	Indústria de alimentos sem carne	Legumes preparados e conservados. Sucos de frutas e de legumes. Frutos e grãos preparados e conservados. Arroz, farinhas, açúcares e xaropes de açúcar. Preparações utilizadas na alimentação animal. Peixes. Produtos de padaria, cacau, chocolate e confeitaria de açúcar. Macarrão, cuscuz e produtos farináceos similares. Óleos vegetais. Derivados de leite. Bebidas e tabaco.
OMT	Indústria de alimentos com carne	Carne fresca ou refrigerada e miudezas comestíveis de gado, ovelhas, cabras, cavalos, jumentos, mulas e gorduras ou gorduras cruas de qualquer animal ou ave. Outra carne: carne de porco e miudezas. Conservas e preparações à base de carne, miudezas ou sangue. Farinhas de carne ou miudezas não comestíveis. Torresmos.

MAN	Outras indústrias	Mineração de minérios metálicos, urânio, pedras preciosas, outras indústrias extrativas; têxteis e vestuário; madeira e produtos de madeira e cortiça, com exceção dos móveis; produtos de papel, inclui edição, impressão e reprodução de suportes gravados; minerais não ferrosos, produção e fundição de cobre, alumínio, zinco, chumbo, ouro e prata; produtos metálicos, chapa; motor para veículos e peças automóveis: automóveis, caminhões, reboques e semirreboques, outros; equipamentos eletrônicos; outras máquinas e equipamentos; construção civil, edifício de fábricas, de casas, escritórios e estradas; outras indústrias transformadoras, inclui reciclagem
OTP	Transporte terrestre	Rodoviário, ferroviário; oleodutos, atividades auxiliares de transporte; agências de viagem
WTP	Transporte aquaviário	Hidroviário, aquaviário e marítimo
ATP	Transporte aéreo	Aviões, helicópteros, etc.
SER	Serviços e comercial	Coleta, purificação e distribuição de água; comércio, todas as vendas no varejo; hotéis e restaurantes; reparações de veículos motorizados e bens pessoais e domésticos; correios e telecomunicações; intermediação financeira, inclui atividades auxiliares, seguros, financiamento de pensões; serviços comerciais, imobiliário, arrendamento e atividades empresariais; serviços recreativos, atividades culturais e esportivas, outras atividades de serviços; domicílios particulares com empregados; serviços de administração pública e defesa; segurança social obrigatória, educação, saúde e assistência social, esgoto e coleta de lixo, saneamento e atividades similares, atividades das organizações associativas
DWE	Residencial	Propriedade das habitações (rendas imputadas das casas ocupadas pelos proprietários)

Anexo II – Problema de Complementaridade Mista e MPSGE

Este anexo é baseado em Teixeira, Pereira e Gurgel (2013). De acordo com Rutherford (1995), o Problema de Complementaridade Mista (MCP) é definido como:

Dada uma função $f: R^n \rightarrow R^n$
 encontre $z \in R^n$
 tal que $f(z) \geq 0$, $z \geq 0$ e $z^T f(z) = 0$. (23)

Trata-se, portanto, de um problema de complementaridade, pois z e $f(z)$ formam um par complementar, ou seja, z está associado a uma certa condição. Além disso, é um problema misto, pois a solução é um misto de igualdades e desigualdades.

Como uma ilustração de um modelo econômico simples, considere uma economia hipotética que consiste de dois agentes econômicos: consumidores e produtores. Os consumidores possuem uma dotação inicial dos fatores trabalho (L) e capital (K). Por simplicidade, existe apenas um agente representativo consumidor nessa economia. A renda do consumidor é originada da venda de seus fatores de produção, e é utilizada para o consumo de bens finais na economia. Existem dois bens, X e Y, na economia. O consumidor obtém um nível de utilidade a partir do consumo desses bens. Os produtores são representados através de empresas que compram as dotações iniciais dos consumidores para utilizá-las como insumos na produção dos bens finais. Os setores de produção X e Y são caracterizados, respectivamente, pelas tecnologias de produção X e Y disponíveis. R é a renda do consumidor. Então, a esta economia simples possui dois setores (X e Y), dois fatores (L e K, que possuem oferta inelástica), e um consumidor representativo (função de utilidade W):

$$X = X(L_X, K_X) \tag{24}$$

$$Y = Y(L_Y, K_Y) \tag{25}$$

$$L^* = L_X + L_Y \tag{26}$$

$$K^* = K_X + K_Y \tag{27}$$

$$W = W(X^*, Y^*) \tag{28}$$

$$R = wL^* + rK^* = p_X X + p_Y Y \tag{29}$$

Esse sistema de equações poderia ser resolvido como um problema de otimização condicionada para consumidores, do tipo:

$$\begin{aligned} &\text{Maximizar } W = W(X^*, Y^*) \text{ sujeito a} \\ &X = X(L_X, K_X) \\ &Y = Y(L_Y, K_Y) \\ &L^* = L_X + L_Y \end{aligned} \tag{30}$$

$$\begin{aligned}
K^* &= K_X + K_Y \\
p_X X + p_Y Y &\leq wL^* + rK^* \\
L_X \geq 0, L_Y \geq 0, K_X \geq 0, K_Y \geq 0, p_X \geq 0, p_Y \geq 0, w \geq 0, r \geq 0
\end{aligned}$$

ou um problema de otimização condicionada para firmas, do tipo:

$$\begin{aligned}
&\text{Maximizar } p_X X - (wL_X + rK_X) = \pi \text{ sujeito a} \\
&G(L_X, K_X) \geq X \\
&L_X \geq 0, K_X \geq 0, p_X \geq 0, w \geq 0, r \geq 0
\end{aligned} \tag{31}$$

$$\begin{aligned}
&\text{Maximizar } p_Y Y - (wL_Y + rK_Y) = \pi \text{ sujeito a} \\
&G(L_Y, K_Y) \geq Y \\
&L_Y \geq 0, K_Y \geq 0, p_Y \geq 0, w \geq 0, r \geq 0
\end{aligned}$$

O equilíbrio nesses casos é definido como um conjunto de preços e alocação de fatores para os dois setores, dados pelos pontos ótimos, conhecidos como Taxa Marginal de Substituição (TMS) e Taxa Marginal de Substituição Técnica (TMST):

$$TMS = \frac{\frac{\partial W(X,Y)}{\partial X}}{\frac{\partial W(X,Y)}{\partial Y}} = \frac{p_X}{p_Y} \tag{32}$$

e

$$TMST_{X,Y} = \frac{\frac{\partial G(K,L)}{\partial K}}{\frac{\partial G(K,L)}{\partial L}} = \frac{r}{w} \tag{33}$$

Contudo, se aumentarmos a complexidade do problema, considerando, por exemplo, diversos tipos de setores, consumidores e/ou várias regiões, tal método torna-se inviável na definição do que deve ser maximizado.

Sendo assim, o MCP se fundamenta a partir do problema dual de minimização de gastos ou despesas para consumidores e de minimização de custos para firmas, isto é:

$$\begin{aligned}
&\text{Minimizar } p_X X + p_Y Y = E \text{ sujeito a} \\
&W(X^*, Y^*) \geq 1 \\
&p_X \geq 0, p_Y \geq 0
\end{aligned} \tag{34}$$

e

$$\begin{aligned}
&\text{Minimizar } wL^* + rK^* = C \text{ sujeito a} \\
&G(L_Y, K_Y) = 1 \\
&w \geq 0, r \geq 0
\end{aligned} \tag{35}$$

A solução do problema de minimização de gasto ou despesa para consumidores é a função de demanda compensada de cada bem ($p_X H(p_X, p_Y)$ e $p_Y H(p_X, p_Y)$) e a função de despesa unitária ($E(p_X, p_Y)$). Já a solução do problema de minimização de custo para firmas é a função de demanda compensada de cada fator ($rZ(r, w)$ e $wZ(r, w)$) e função de custo unitário ($C_{X,Y}(r, w)$):

$$E(p_X, p_Y) \equiv p_X H(p_X, p_Y) + p_Y H(p_X, p_Y) \quad (36)$$

e

$$C_{X,Y}(r, w) \equiv rZ(r, w) + wZ(r, w) \quad (37)$$

Então, especifica-se o equilíbrio como a solução para um sistema de 9 equações e 9 incógnitas. O problema de otimização é, dessa forma, convertido em um problema de equilíbrio na economia:

$$\text{Lucro zero para X} \quad p_X = C_X(w, r) \quad (38)$$

$$\text{Lucro zero para Y} \quad p_Y = C_Y(w, r) \quad (39)$$

$$\text{“Lucro” zero para W} \quad p_W = E(p_X, p_Y) \quad (40)$$

$$\text{Oferta = demanda para X} \quad X = E_{p_X}(p_X, p_Y) \cdot W \quad (41)$$

$$\text{Oferta = demanda para Y} \quad Y = E_{p_Y}(p_X, p_Y) \cdot W \quad (42)$$

$$\text{Oferta = demanda para W} \quad W = R/p_W \quad (43)$$

$$\text{Oferta = demanda para L} \quad L^* = C_{XW} \cdot X + C_{YW} \cdot Y \quad (44)$$

$$\text{Oferta = demanda para K} \quad K^* = C_{XR} \cdot X + C_{YR} \cdot Y \quad (45)$$

$$\text{Renda} \quad R = wL^* + rK^* \quad (46)$$

O MPSGE permite que o pesquisador escreva o problema representado pelas equações de (24) a (29) e então este converte o problema no sistema de equações de (38) a (46), checando automaticamente todas as condições de equilíbrio dos mercados, isto é, condição de lucro zero (ou custo unitário igual ao preço do bem), condição de equilíbrio nos mercados (oferta igual a demanda) e condição de balanço da renda (despesas iguais às receitas). Um conjunto de três variáveis não negativas deve ser determinado na solução de um problema em MCP: preços, quantidades (níveis de atividades em MPSGE) e níveis de renda.

A condição de lucro zero requer que qualquer atividade em operação deve obter lucro zero, ou seja, o valor dos insumos deve ser igual ao valor da produção. A variável associada com essa condição é o nível de atividade X ou Y para os setores de produção com retornos constantes de escala. Isto significa que se, por exemplo, $X > 0$ (uma quantidade positiva de X é produzida), o lucro econômico deve ser igual a zero, ou o lucro é negativo e $X = 0$ (não ocorre a produção nesse caso). A condição de equilíbrio de mercado requer que qualquer bem com preço positivo deve ter um balanço entre

oferta e demanda e qualquer bem com oferta em excesso deve ter um preço igual a zero. O vetor de preços p (que inclui os preços dos bens finais, intermediários e dos fatores de produção) é a variável associada. Por fim, a condição de balanço da renda requer que, para cada agente (incluindo entidades do governo), o valor da renda deve ser igual ao valor das dotações dos fatores e das receitas dos impostos: Renda = dotações + receitas dos impostos. Assim, o MPSGE resolve essas nove equações para descobrir as nove incógnitas: X, Y, W, p_X, p_Y, w, r e R .

Deve-se ressaltar que o MPSGE é uma ferramenta para a formulação, não para a solução de problemas de complementariedade. Para implementar o programa MPSGE devem ser utilizados *solvers* para solução de MCP. O *software* GAMS possui dois *solvers* para MCP: MILES e PATH. Geralmente o último é recomendado para implementação de modelos escritos em MPSGE por ser mais eficiente.

Anexo III – Elasticidades do Modelo TEA

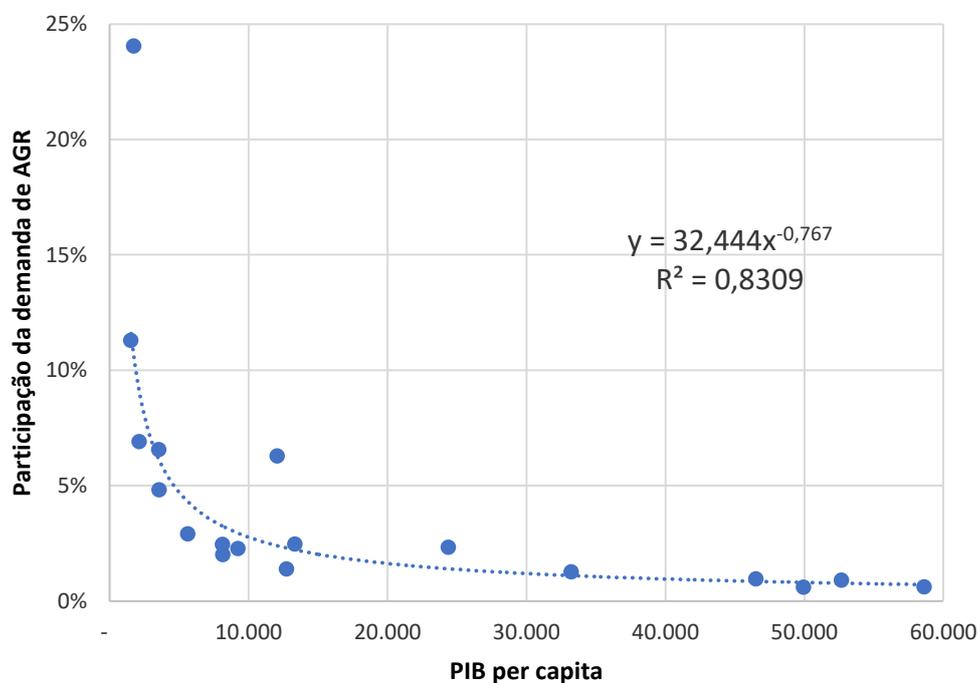
Valores são baseados na literatura científica, onde destacam-se as bases de dados do GTAP, do modelo EPPA, além de parametrizações a partir de dados do modelo COFFEE.

Parâmetros	Descrição	Valor
		Geral = 3
$esubd_j$	Elasticidade de substituição entre domésticos e importados	GAS = 3 COL = 1,5 OIL = 1,5 ELE = 2
$esubva_j$	Elasticidade de substituição entre fatores primários	1
		Geral = 5 CRU = 12
$esubm_i$	Elasticidade de substituição entre importações de diferentes origens	GAS = 5 COL = 2,5 OIL = 2,5 ELE = 0,5
$etraef$	Elasticidade de transformação	0
$elast_fej$	Elasticidade de substituição entre valor adicionado e energia	Geral = 0,8 Agropecuários = 0,5
$elast_agrie_j$	Elasticidade de substituição entre insumos intermediários agropecuários e energia	0,6
$elast_elej$	Elasticidade de substituição entre eletricidade e outras fontes de energia	1
$elast_fos_j$	Elasticidade de substituição entre fontes de energia fóssil	1
$elast_fin_j$	Elasticidade de substituição entre fatores primários fixos e insumos intermediários	Geral = 0,3 Energia = 0,5
$elast_foj$	Elasticidade de substituição entre valor adicionado e outros	Geral = 0,7 ELE = 0,1
$elast_ink_j$	Elasticidade de substituição entre insumos intermediários e bens de capital	1
$elast_troj$	Elasticidade de substituição entre serviços de transporte para famílias e outros bens e serviços de consumo privado	0,5
$elast_trnj$	Elasticidade de substituição entre transporte privado das famílias e outros serviços de transportes para famílias	0,2
$elast_gse_j$	Elasticidade de substituição entre bens e serviços e energia de consumo privado	0,25
$elast_gsf_j$	Elasticidade de substituição entre bens e serviços de consumo privado	0,35
$elast_foo_j$	Elasticidade de substituição entre alimentos de consumo privado	0,5

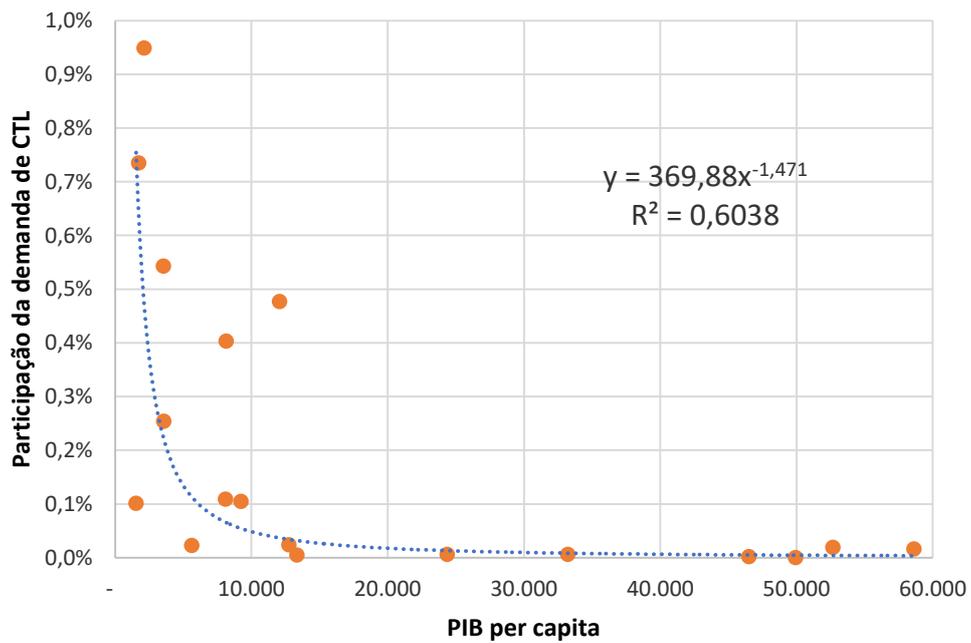
<i>elast_dwe_j</i>	Elasticidade de substituição entre moradia e outros bens e serviços de consumo privado	0,3
<i>elast_fe_j</i>	Elasticidade de substituição entre fontes de energia de consumo privado	1,5
<i>elast_fuel_j</i>	Elasticidade de substituição entre combustível e outros bens e serviços de consumo privado	1
<i>elast_tsm_j</i>	Elasticidade entre serviços e manufatura do transporte privado das famílias	1
<i>elast_gsg_j</i>	Elasticidade entre bens e serviços de consumo público	0,5
<i>elast_fele_j</i>	Elasticidade de substituição entre valor adicionado e eletricidade	Geral =0,5 ELE = 1
<i>elast_ele_j</i>	Elasticidade de substituição entre eletricidade e outras fontes de energia	1
<i>elast_en_j</i>	Elasticidade de substituição entre fontes de energia	1
<i>elast_fcru_j</i>	Elasticidade de substituição entre valor adicionado e petróleo cru	0,5
<i>elast_trne_j</i>	Elasticidade de substituição entre transporte privado a combustão e elétrico	5
<i>elast_boil_j</i>	Elasticidade de substituição entre biocombustíveis e derivados de petróleo	1
<i>elast_efos_j</i>	Elasticidade de substituição entre diferentes tecnologias de geração fóssil	1,5
<i>elast_ffos_j</i>	Elasticidade de substituição entre fator fixo e valor adicionado	0,1
<i>nsigma_j</i>	Elasticidade de substituição entre nuclear e outros recursos	
<i>hsigma_j</i>	Elasticidade de substituição entre hidroelétrica e outros recursos	
<i>ssigma_j</i>	Elasticidade de substituição entre solar e outros recursos	0,3
<i>wsigma_j</i>	Elasticidade de substituição entre eólica e outros recursos	0,3
<i>bsigma_j</i>	Elasticidade de substituição entre biomassa e outros recursos	0,3

Anexo IV – Mudança Estrutural no Consumo de Alimentos do Modelo TEA

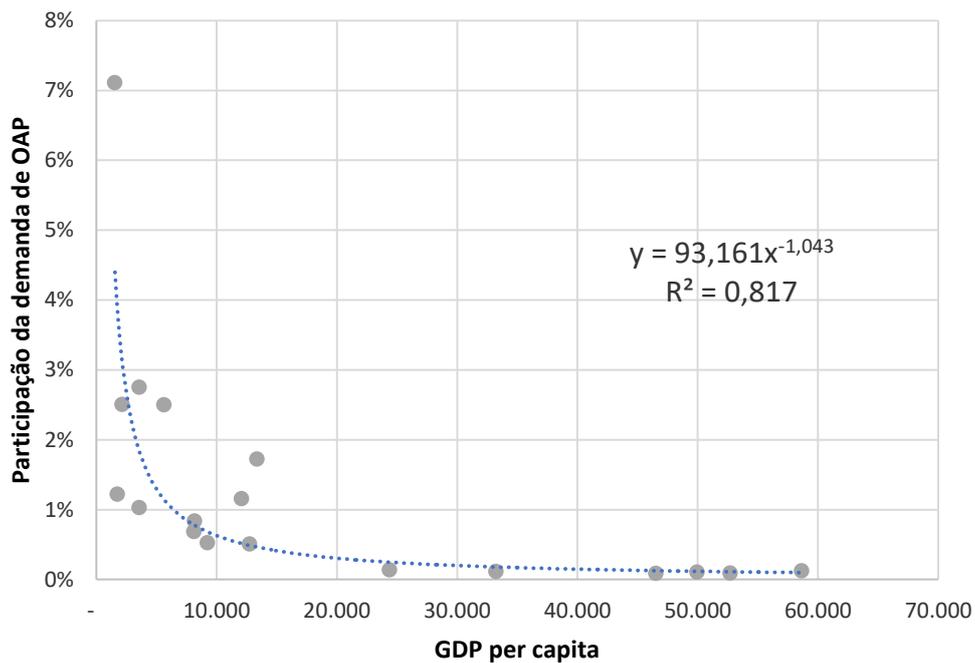
O crescimento da demanda de bens e serviços produzidos por cada setor ocorre à medida que a renda per capita aumenta. Foram consideradas mudanças estruturais na demanda de longo prazo para atenuar o consumo de alimentos, seguindo as curvas estimadas que correlacionam PIB per capita e a participação da demanda de produtos agropecuários. Cada ponto nas figuras representa uma região do modelo TEA. As figuras abaixo apresentam as curvas estimadas para a demanda final de produtos agropecuários e da indústria de alimentos das famílias.



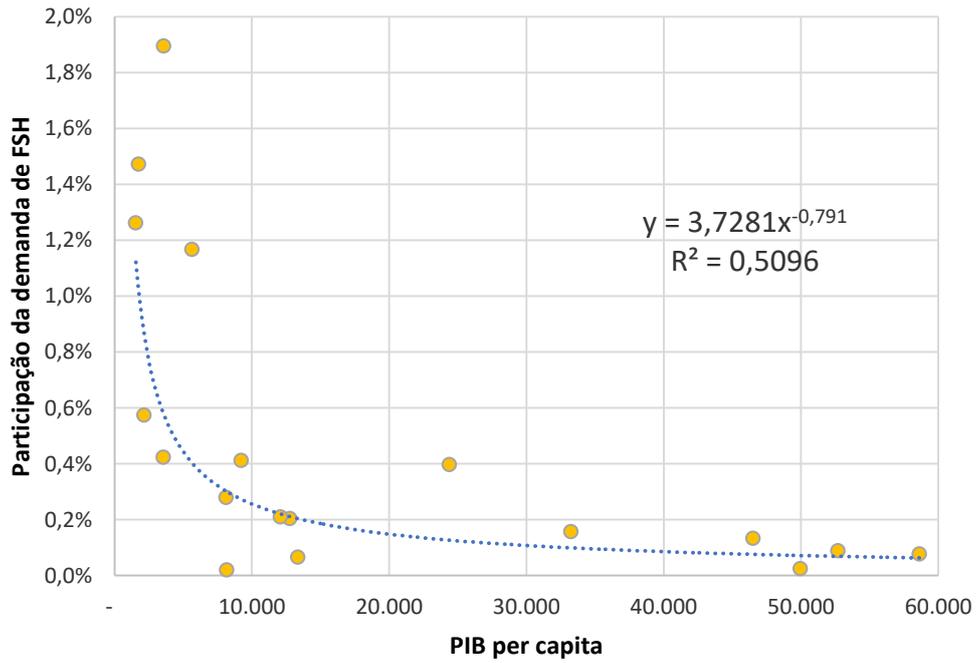
Curva da demanda final de produtos agrícolas (ARG)



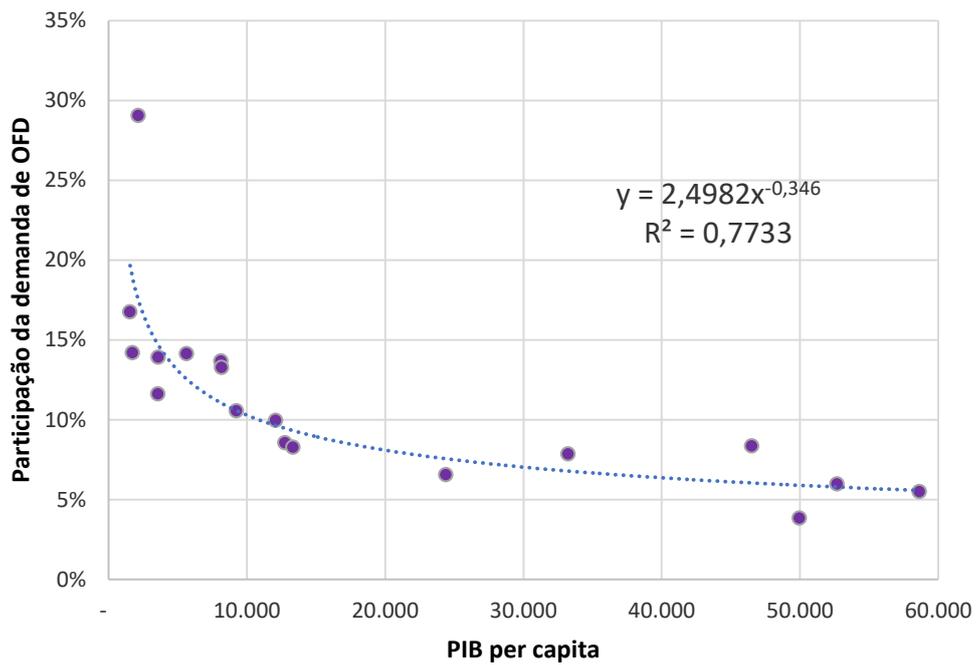
Curva da demanda final de produtos da pecuária (CTL)



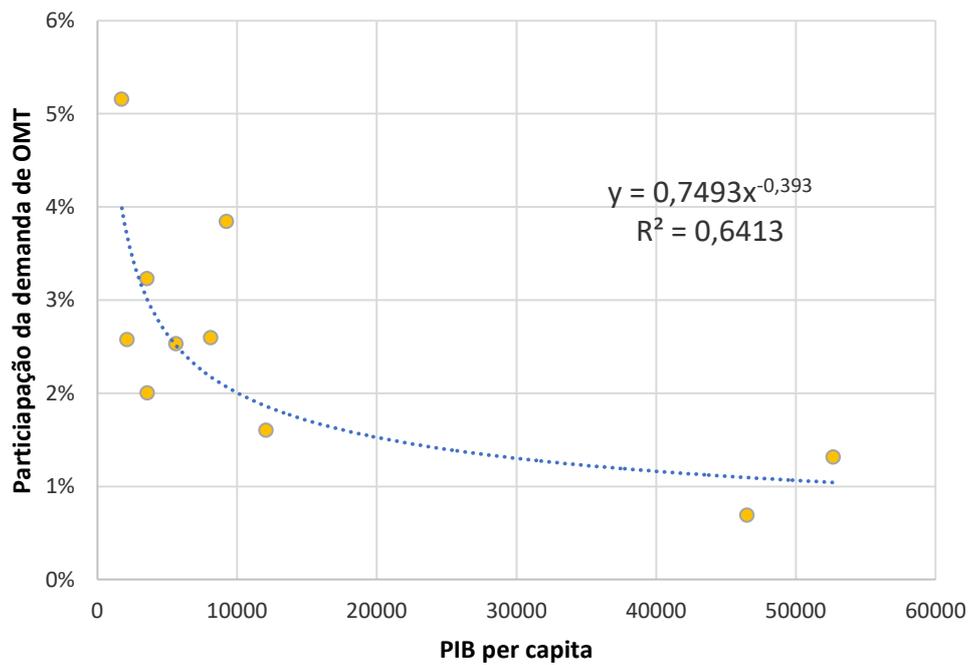
Curva da demanda final de produtos de outros animais (OAP)



Curva da demanda final de produtos da pesca (FSH)



Curva da demanda final de produtos da indústria de alimentos sem carne (OFD)



Curva da demanda final de produtos da indústria de alimentos com carne (OMT)

Anexo V – Nova Dieta de Referência (The Lancet)

De acordo com *The Lancet*, a proposta de uma nova dieta de referência (*flexitarian diet*), que pode ajudar a reverter e minimizar danos ambientais futuros, ao mesmo tempo em que aborda requisitos nutricionais, representa uma ingestão de 2500 kcal por dia e é composta de:

	Macronutrientes gramas por dia (variação possível)	Calorias kcal por dia
 Grãos integrais Arroz, trigo, milho e outros	232	811
 Tubérculos ou vegetais ricos em amido Batatas e mandioca	50 (0-100)	39
 Vegetais Todos os vegetais	300 (200-600)	78
 Frutas Todas as frutas	200 (100-300)	126
 Laticínios Leite integral ou equivalentes	250 (0-500)	153
 Fontes de proteína Carne de gado, cordeiro e porco	14 (0-28)	30
 Frango e outras aves	29 (0-58)	62
 Ovos	13 (0-25)	19
 Peixe	28 (0-100)	40
 Legumes	75 (0-100)	284
 Nozes	50 (0-75)	291
 Gorduras Óleos insaturados	40 (20-80)	354
 Óleos saturados	11.8 (0-11.8)	96
 Açúcares Todos os açúcares	31 (0-31)	120

Fonte: adaptado de WILLETT *et al.* (2019)