

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS E VALORAÇÃO DOS
DANOS SOCIOECONÔMICOS CAUSADOS PARA
AS COMUNIDADES ATINGIDAS PELO ROMPIMENTO
DA BARRAGEM DE FUNDÃO**

**Impactos do Rompimento da Barragem
de Fundão sobre a Renda Agregada de
Minas Gerais e Espírito Santo: Análise
de Determinantes e Canais a partir
do Modelo de Equilíbrio Geral**



DEZEMBRO DE 2020

Dados internacionais de Catalogação na Publicação
Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas/FGV

Fundação Getulio Vargas

Impactos do Rompimento da Barragem de Fundão sobre a Renda Agregada de Minas Gerais e Espírito Santo: Análise de Determinantes e Canais a partir do Modelo de Equilíbrio Geral / Fundação Getulio Vargas – Rio de Janeiro; São Paulo: FGV, 2020.

132 p.

Em colaboração com: Ana Carolina Tereza Ramos de Oliveira dos Santos, André Portela Fernandes de Souza, Guillermo Roberto Tomás Málaga Butrón, Lucas Gerez Foratto, Reynaldo Fernandes, Ronan Cunha.

Acima do título: Projeto Rio Doce.

Inclui bibliografia.

1. Projeto Rio Doce. 2. Fundão, Barragem de (MG), 3. Barragens e açudes – Aspectos ambientais. 4. Desastres ambientais – Doce, Rio, Bacia (MG e ES). 5. Equilíbrio econômico. I. Título.

CDD – 627.8

EQUIPE TÉCNICA

Ana Carolina Tereza Ramos de Oliveira dos Santos

André Portela Fernandes de Souza

Guillermo Roberto Tomás Málaga Butrón

Lucas Gerez Foratto

Reynaldo Fernandes

Ronan Cunha

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Número de rompimentos de barragens de rejeitos por ano	17
Figura 2 — Histograma da quantidade de material vazado (mi m^3)	18
Figura 3 — Equilíbrio no mercado de capital físico	33
Figura 4 — Equilíbrio no mercado de capital natura	34
Figura 5 — Equilíbrio no mercado de trabalho	36
Figura 6 — Equilíbrio no mercado de bens	37
Figura 7 — Choque negativo em <i>NM</i> no mercado de bens	38
Figura 8 — Choque negativo em <i>NM</i> no mercado de capital natural	39
Figura 9 — Choque negativo em <i>NM</i> no mercado de capital físico	40
Figura 10 — Choque negativo em <i>NM</i> no mercado de trabalho	41
Figura 11 — Cálculo do λ fixo utilizado	47
Figura 12 — Evolução temporal de <i>YMtYGt</i>	49
Figura 13 — Produtividades Totais dos setores M e G	50
Figura 14 — Comparação entre os índices de produtividade do setor M <i>IAM</i> e de preço internacional do minério de ferro <i>IPF</i>	53
Figura 15 — Taxas de separação e de encontro em MG e ES	54
Figura 16 — Evolução das produtividades iniciais e finais do setor extrativo (M) e demais setores (G)	58
Figura 17 — Evolução do estoque de capital físico do setor extrativo (M) e demais setores (G)	58
Figura 18 — Análise do ajustamento do modelo	61
Figura 19 — Terras do setor extrativo: observado vs contrafactual	64
Figura 20 — Mercado de trabalho: observado vs contrafactual	66
Figura 21 — Produtividade etapa 3: observado vs contrafactual	70
Figura 22 — Dinâmica das variáveis exógenas e suas trajetórias contrafactuais – Cenário 1	71
Figura 23 — Dinâmica das variáveis exógenas e suas trajetórias contrafactuais – Cenário 2	71
Figura 24 — Decomposição dos impactos por canal	82
Figura 25 — Dinâmica do PIB na decomposição dos impactos por setor	84
Figura 26 — Decomposição dos impactos por fatores	85
Figura 27 — Dinâmica do PIB na decomposição dos impactos por fator	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Variáveis endógenas, exógenas e parâmetros.....	30
Tabela 2 — Resumo dos trabalhos que embasaram a escolha da elasticidade de substituição entre o setor extrativo e demais setores no modelo	51
Tabela 3 — Erro Quadrático Médio para diferentes valores de ρ	53
Tabela 4 — Lista da parâmetros e variáveis exógenas	59
Tabela 5 — Indicador de ajustamento do modelo – Pseudo- R^2 (%).....	62
Tabela 6 — Mensuração do impacto no PIB (em R\$ bilhões de 2016) pela ótica da produção: Cenário 1	73
Tabela 7 — Mensuração do impacto no PIB (R\$ bilhões de 2016) pela ótica da renda: Cenário 1	75
Tabela 8 — Mensuração do impacto no emprego e desemprego: Cenário 1	76
Tabela 9 — Mensuração do impacto no PIB (em R\$ bilhões de 2016) pela ótica da produção: Cenário 2	78
Tabela 10 — Mensuração do impacto no PIB (em R\$ bilhões de 2016) pela ótica da renda: Cenário 2	79
Tabela 11 — Mensuração do impacto no emprego e desemprego: Cenário 2	80

SUMÁRIO

SUMÁRIO EXECUTIVO	7
1 INTRODUÇÃO.....	13
2 REVISÃO DA LITERATURA DOS IMPACTOS DE DESASTRES COM FOCO EM MODELOS DE EQUILÍBRIO GERAL COMPUTÁVEIS.....	17
2.1 Rompimento de barragens	17
2.2 Economia do desastre	18
2.3 Impactos econômicos de desastres no mundo	19
2.4 Modelos de equilíbrio geral na avaliação de desastres.....	21
3 MODELO MACROECONÔMICO	24
3.1 Mercado de bens finais e setores intermediários	24
3.2 Mercado de trabalho.....	25
3.3 Estoque de capital físico	27
3.4 Caracterização do equilíbrio de curto prazo.....	28
3.5 Caracterização do equilíbrio de longo prazo.....	29
4 ANÁLISE DOS EQUILÍBRIOS NOS MERCADOS DE PRODUTOS E FATORES ..	32
5 ESTÁTICA COMPARATIVA DE UM CHOQUE NO ESTOQUE DE RECURSOS NATURAIS DO SETOR EXTRATIVO <i>NM</i>.....	38
6 ESTRATÉGIA DE PARAMETRIZAÇÃO	42
7 ANÁLISE DO AJUSTAMENTO DO MODELO	60
8 CONSTRUÇÃO DAS VARIÁVEIS CONTRAFACTUAIS	63
9 MENSURAÇÃO DO IMPACTO DO ROMPIMENTO NA ECONOMIA	72
10 DECOMPOSIÇÃO DO IMPACTO.....	81
11 DISCUSSÃO SOBRE O FECHAMENTO DA MINERADORA SAMARCO S.A. ..	87
12 CONCLUSÃO	88
REFERÊNCIAS	90
APÊNDICE A.....	95
APÊNDICE B.....	99
APÊNDICE C.....	110
APÊNDICE D.....	113
APÊNDICE E.....	117
APÊNDICE F	118
APÊNDICE G	119
APÊNDICE H.....	121
APÊNDICE I	124
APÊNDICE J	128

SUMÁRIO EXECUTIVO

Este estudo analisa os impactos macroeconômicos do rompimento da Barragem de Fundão nas economias dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo conjuntamente. Trata-se de um complemento e aprofundamento do Relatório 4 apresentado no Escopo de Trabalho (EDT 2) pela Fundação Getulio Vargas (2019) intitulado “Impacto do Rompimento da Barragem de Fundão sobre a Renda Agregada de Minas Gerais e Espírito Santo”. Naquele estudo estimou-se empiricamente o impacto sobre o Produto Interno Bruto de Minas Gerais e Espírito Santo. O presente estudo estende a análise para os seguintes resultados: (i) impactos sobre os produtos de dois setores produtivos – setor extrativo e demais setores, separadamente; (ii) impactos sobre a distribuição funcional da renda: renda dos recursos naturais, renda do capital e renda do trabalho; (iii) impactos sobre o mercado de trabalho: salários, empregos setoriais e taxa de desemprego; (iv) impactos devidos à destruição dos recursos naturais, à destruição do capital físico, à disrupção do mercado de trabalho e à queda da produtividade total dos fatores de produção; e (v) impacto devido à parada da produção da Samarco Mineração S.A.

Para atingir tal objetivo, desenvolve-se um Modelo de Equilíbrio Geral (MEG) simplificado. Modelos de Equilíbrio Geral são comumente utilizados na literatura para analisar impactos de desastres na economia (Selcuk & Yeldan, 2001; Rose & Liao, 2005; Bosello, Nicholls, Richards, & Roson, 2012; Santos & Haddad, 2014). Analisa-se o impacto nas economias dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo conjuntamente, devido ao fato de ambos possuírem regiões diretamente atingidas pelo desastre bem como pelo fato de serem economias fortemente interligadas economicamente (Fundação Getulio Vargas, 2019). Desagrega-se a produção em dois setores: o setor extrativo, por sua grande importância para os dois estados e por ser o setor originário do desastre; e os demais setores. A produção de cada setor depende de três fatores de produção: capital físico, capital humano e recursos naturais. Inclui-se os recursos naturais separadamente devido ao grande desastre ambiental causado pelo rompimento, presente nos estudos do Instituto Lactec (2019), da Agência Nacional de Águas (2016) e do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (2015). Supõe-se que os recursos naturais são específicos de cada setor enquanto capital e trabalho são fatores que podem fluir entre os dois setores.

Modela-se o mercado de trabalho com base nos modelos de busca de emprego por setores (Diamond, 1984; Mortensen, 1986; Pissarides, 1986). Assim, permite-se

presumir que o desastre possa afetar distintamente os empregos setoriais, os salários setoriais e o desemprego.

Considera-se que o desastre é um choque negativo não esperado que afeta diretamente parte dos recursos naturais, parte do capital físico, o funcionamento do mercado de trabalho (taxas de encontro e de separação de emprego) e as produtividades totais dos fatores.

Esta abordagem permite estimar o impacto do rompimento da Barragem de Fundão comparando-se dois cenários. O cenário realizado e o cenário contrafactual de trajetória da economia que ocorreria na ausência do desastre. A base para os exercícios contrafactuais neste trabalho é o estudo da Fundação Getulio Vargas (2020) intitulado “Impacto do Rompimento da Barragem de Fundão sobre a renda Agregada nos Estados e Sub-Regiões de Minas Gerais e Espírito Santo”. Seus resultados mostram que o impacto total no PIB agregado de Minas Gerais e Espírito Santo é de perda de valor de produção de R\$ 136,28 bilhões¹ de 2015 até 2017. Identifica-se que o impacto cresce ano a ano, R\$ 35,39 bilhões em 2015, R\$ 40,12 em 2016 e R\$ 60,77 bilhões em 2017.

Os impactos no PIB são calculados pelas óticas do produto e da renda. Pela ótica do produto, é possível analisar como o desastre impactou o PIB de cada setor das regiões atingidas. Por sua vez, a ótica da renda permite mensurar os impactos na distribuição funcional da renda, ou seja, sobre as massas de rendimentos dos fatores de produção: a remuneração dos detentores dos recursos naturais (e.g., proprietários de terra, proprietários de minas), do capital físico (e.g., empresários, contas-próprias) e, por fim, o valor da massa salarial que remunera os trabalhadores, detentores do fator trabalho.

Os resultados sobre o PIB estão resumidos na Tabela 1 a seguir. No acumulado dos três anos após o rompimento, o setor extrativo deixou de produzir R\$ 8,05 bilhões, o que corresponde a 6,33% dos PIBs contrafactuais do setor. Por sua vez, os demais setores acumularam uma perda de R\$ 128,23 bilhões, o que corresponde a 6,34% dos seus PIBs contrafactuais. Do total de perdas de R\$ 136,28 bilhões, 94,09% são devidas aos demais setores.

A Tabela 1 também apresenta os impactos sob a ótica da renda. Do total de perda acumulada de R\$ 136,28 bilhões, R\$ 62,84 bilhões correspondem a perdas de massa salarial, R\$ 63,72 bilhões são perdas de renda do capital e R\$ 9,72 bilhões são perdas de renda dos recursos naturais. Elas correspondem a 46%, 47% e 7% do total da perda, respectivamente. Nota-se que a perda acumulada do setor extrativo de R\$ 8,06 bilhões está associada em grande medida à perda da renda dos recursos naturais (R\$ 5,88

¹ Valores reais de 2016.

bilhões). Por sua vez, a perda acumulada de R\$ 128,23 bilhões dos demais setores está mais fortemente associada às perdas de massa salarial (R\$ 61,55 bilhões) e de renda do capital (R\$ 62,83 bilhões).

Por fim, a Tabela 1 apresenta os impactos sobre resultados do mercado de trabalho. Encontra-se que houve um aumento do desemprego total e uma redução dos salários médios pagos ao trabalhador, em ambos os setores, sendo que para o setor extrativo, a queda foi proporcionalmente menor do que para os demais setores da economia. O desemprego aumentou em aproximadamente 3,5 pontos percentuais em cada ano, atingindo 14,43% em 2017, enquanto que se o rompimento não tivesse acontecido a taxa de desemprego teria sido de 10,93%. Essa diferença corresponde a um aumento do número de desempregados de cerca de 400 mil trabalhadores. Os dois setores sofreram perda de emprego.

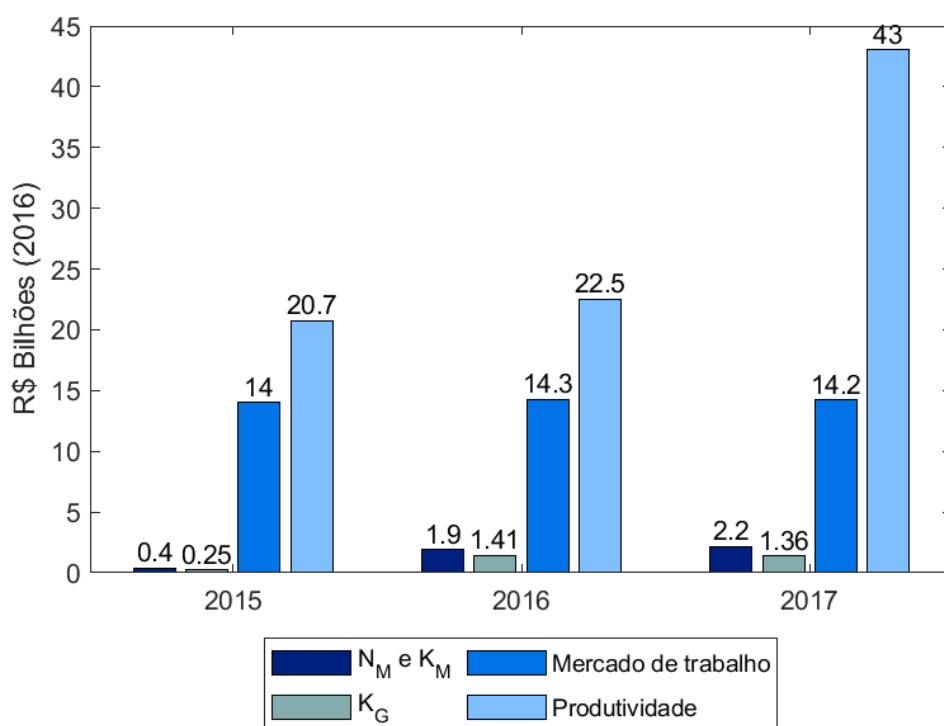
Tabela 1 — Mensuração do impacto do rompimento da Barragem de Fundão nas economias de Minas Gerais e Espírito Santo

PIB pela ótica da produção							
Ano	2015			2016			Acumulado
Sectores	Sector extrativo	Demais sectores	Total	Sector extrativo	Demais sectores	Total	Sector extrativo Demais sectores Total
Impacto no PIB (R\$ bi)	-1,93	-33,46	-35,39	-2,44	-37,69	-40,12	-8,05 -128,23 -136,28
% do Impacto	5,45	94,55	100	6,07	93,93	100	5,91 94,09 100
% do PIBCF	-4,16	-4,92	-4,87	-6,48	-5,74	-5,78	-6,33 -6,34 -6,34
PIB pela ótica da renda							
Ano	2015			2016			Acumulado
Sectores	Sector Extrativo	Demais sectores	Total	Sector Extrativo	Demais sectores	Total	Sector Extrativo Demais sectores Total
Impacto da renda dos fatores	-1,41	-1	-2,41	-1,78	-1,13	-2,91	-5,88 -3,85 -9,72
Recursos naturais	-0,21	-16,4	-16,61	-0,27	-18,47	-18,74	-0,89 -62,83 -63,72
Capital físico	-0,31	-16,06	-16,37	-0,39	-18,09	-18,48	-1,29 -61,55 -62,84
Capital humano	-1,93	-33,46	-35,39	-2,44	-37,69	-40,12	-8,06 -128,23 -136,28
Impacto total (R\$ bi)							
Mercado de trabalho							
Ano	2015			2016			2017
Número de trabalhadores	Desastre	Contrafactual		Desastre	Contrafactual		Desastre Contrafactual
	12,86	9,17		13,93	10,21		14,37 10,87
	1,46	1,04		1,59	1,16		1,64 1,24
	1,27	1,34		1,04	1,11		1,11 1,15
	85,86	89,49		85,03	88,68		84,52 87,97
Salário Relativo (M/G)	1,54	1,52		1,55	1,52		1,59 1,6

Fonte: Elaboração própria (2020).
Observação: PIBCF significa PIB contrafactual. Os impactos estão em valores reais de 2016.

O presente estudo também apresenta exercícios de decomposição sobre as importâncias relativas de alguns canais ou mecanismos através dos quais os impactos se deram. As simulações mostram que o impacto nas produtividades totais dos fatores dos setores e no mercado de trabalho foi responsável por mais de 90% de redução do PIB dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo. A Figura 1 a seguir apresenta os resultados das simulações. A alteração nas produtividades devido ao rompimento representa uma perda no PIB de R\$ 20,7 bilhões em 2015, R\$ 22,5 bilhões em 2016 e R\$ 43 bilhões em 2017. Em termos relativos, 58,61%, 56,11% e 70,82% do impacto de cada ano, respectivamente. A parcela devida às perturbações no mercado de trabalho são, em 2015, R\$ 14 bilhões (39,57% do impacto), em 2016, de R\$ 14,27 bilhões (35,59% do impacto) e R\$ 14,20 bilhões (23,37% do impacto), em 2017.

Figura 1 — Decomposição dos impactos por canal



Fonte: Elaboração própria (2020).

Por fim, através de dois cenários, discute-se o impacto da parada da atividade da Samarco Mineração S.A. entre 2015 e 2017, vista a sua importância para as economias de Mariana (MG) e região até os municípios de Anchieta (ES), onde é feito parte do processo de pelotagem e exportação do minério de ferro. Decompõe-se o efeito do desastre entre impacto do rompimento da barragem e da parada da produção da empresa. Em um dos cenários, modela-se a parada da Samarco como uma diminuição

proporcional dos estoques de recursos naturais e de capital físico utilizados. Estima-se que, se a empresa não tivesse parado, a perda no PIB seria R\$ 4,48 bilhões menor. Desse modo, o custo econômico da parada da atividade da empresa é de 3,29% do total do impacto na economia, e de 55,65% do total da perda no setor extrativo.

1 INTRODUÇÃO

A Fundação Getulio Vargas (2019) desenvolveu um estudo que estima o impacto do rompimento da Barragem de Fundão pertencente à Mineradora Samarco S.A. no PIB de Minas Gerais e Espírito Santo. O presente estudo visa estender e detalhar melhor o impacto na economia desses estados de forma a entender como o rompimento afetou os setores diretamente ligados à mineração e o contágio para outros setores que não fazem parte da sua cadeia produtiva.

Para atingir tal objetivo, desenvolve-se um Modelo de Equilíbrio Geral (MEG) de dois setores. Modelos de Equilíbrio Geral são comumente utilizados na literatura para analisar impactos de desastres na economia. Por exemplo, Selcuk e Yeldan (2001) medem as consequências do terremoto de 1999 na Turquia; Santos e Haddad (2014) analisam o impacto das enchentes no estado de São Paulo entre 2008 a 2012; Simonato et al. (2018) também avaliam o impacto do rompimento da Barragem de Fundão através de MEG, porém nosso estudo se diferencia na abordagem para o desenvolvimento do modelo que inclui, dentre outros, abertura regional, comercial e setorial, desagregação dos fatores de produção e dimensões econômicas analisadas. No nosso trabalho o foco são as economias dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo e desagrega-se a produção em dois setores: indústria extrativa devido à grande importância desse setor para os dois estados e por ser a origem do desastre, já que esse setor inclui mineração; o segundo é um setor mais agregado e inclui todos os outros setores exceto o extrativo. A escolha pela análise conjunta das economias de Minas Gerais e Espírito Santo se justifica pela intensa interação econômica existente entre esses dois estados, o que é descrito detalhadamente no estudo da Fundação Getulio Vargas (2019). Além disso, a produção depende de três insumos: capital físico, capital humano e recursos naturais. Opta-se por essa abordagem devido ao grande desastre ambiental causado pelo rompimento, presente nos estudos do Instituto Lactec (2019), da Agência Nacional de Águas (2016) e do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (2015).

Através dessa abordagem, esse estudo simula o impacto do rompimento da Barragem de Fundão nos PIBs total e setoriais calculados pela ótica do produto e pela ótica da renda. Pela primeira, é possível analisar como o desastre impactou o fluxo produtivo das regiões atingidas, enquanto a segunda ótica permite mensurar qual o efeito na massa de rendimentos dos fatores de produção. Dito de outra forma, o PIB pela ótica da renda mostra como a produção do período está sendo distribuída. Ela mostra o valor que remunera os detentores dos recursos naturais (proprietários de terra, por exemplo),

os do capital físico (empresários e investidores, por exemplo) e, principalmente, o valor da massa salarial que remunera os trabalhadores. Essa abordagem permite mensurar o impacto em cada massa de rendimentos dos fatores de produção.

Esse estudo também modela o mercado de trabalho, tendo como base os modelos de busca de emprego (Diamond, 1984; Mortensen, 1986; Pissarides, 1986). Assim, permite-se que o rompimento da barragem possa afetar a massa salarial de Minas Gerais e Espírito Santo através da variação da quantidade de empregos na região, mas também através do salário médio pago para os trabalhadores. Mensura-se também o impacto na taxa de desemprego da economia devido ao desastre.

A base para os exercícios contrafactuais neste trabalho é o estudo da Fundação Getúlio Vargas (2020). Seus resultados mostram que impacto total no PIB de Minas Gerais e Espírito Santo é de R\$ 136,28 bilhões² de 2015 até 2017. Identifica-se que o impacto vem crescendo ano a ano, sendo R\$ 35,39 bilhões em 2015, R\$ 40,12 em 2016 e R\$ 60,77 bilhões em 2017. Os resultados do presente estudo mostram que o impacto do rompimento da barragem foi desigual entre os setores econômicos e entre agentes econômicos. Dentre o setor extrativo e os demais setores da economia, esse último foi o mais afetado, aproximadamente 94,09% do impacto total. No acumulado, isso representa R\$ 128,23 bilhões. Já o setor extrativo perdeu R\$ 8,05 bilhões (5,01% da perda). Em termos relativos ao PIB, ambos foram afetados de forma semelhante: setor extrativo perdeu 6,33% do seu PIB, em média, e os demais setores perderam 6,34% do seu PIB, em média dos três anos.

Com relação à análise do PIB sobre a ótica da renda, os resultados mostram que a massa salarial do trabalho e a massa de renda do capital físico foram substancialmente afetados. Juntos, as perdas representam 93,19% do impacto total, sendo 46,93% para o rendimento do capital físico, que afeta diretamente o retorno do investimento na região, e 46,26% para massa salarial do trabalhador. Abrindo por setor, o setor não extrativo perdeu R\$ 16,39 bilhões de rendimento do capital físico e R\$ 16,06 bilhões de massa salarial. Estes valores para o setor extrativo foram bem menores: R\$ 310 milhões para os rendimentos do trabalhador e R\$ 210 milhões para o rendimento do capital físico.

Para entender o impacto no mercado de trabalho em maiores detalhes, se decompôs a variação do emprego e os salários médios. Encontra-se que houve um aumento do desemprego total da economia e uma redução dos salários médios pagos ao trabalhador, em ambos os setores, sendo que para o setor extrativo, a queda foi

² Valores reais de 2016.

proporcionalmente menor do que para os demais setores da economia. O desemprego aumentou em aproximadamente 4 pontos percentuais em cada ano atingindo 14,43% em 2017, enquanto que se o rompimento não tivesse acontecido teria sido 10,93%.

Além disso, entende-se que a perda no PIB se deu através da perturbação da estrutura produtiva dos estados. Por exemplo, a destruição de capital físico e recursos naturais, e a alteração de parâmetros importantes no mercado de trabalho, tais como a alteração das probabilidades de encontrar e perder emprego e a alteração na produtividade nos dois setores. Por isso, decompõe-se a perda no PIB dos estados entre o que foi devido às alterações em cada um desses componentes da estrutura produtiva.

As simulações mostram que o impacto nas produtividades dos setores e no mercado de trabalho foi responsável por mais de 90% de redução no PIB dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo. Especificamente, a alteração nas produtividades devido ao rompimento representa uma perda no PIB de R\$ 20,7 bilhões em 2015, R\$ 22,5 bilhões em 2016 e R\$ 43 bilhões em 2017. Em termos relativos, 58,61%, 56,11% e 70,82% do impacto de cada ano, respectivamente. A parcela devida às perturbações no mercado de trabalho são, em 2015, R\$ 14 bilhões (39,57% do impacto), em 2016, de R\$ 14,27 bilhões (35,59% do impacto) e R\$ 14,20 bilhões (23,37% do impacto), em 2017. É importante notar que, relativamente, o impacto na produtividade dos estados vem aumentando substancialmente ano a ano, podendo implicar em um período maior de reparação para que a economia possa retomar níveis pré-desastre.

Por fim, através de dois cenários, discute-se o impacto da parada da atividade da Samarco Mineração S.A. entre 2015 e 2017, tendo em vista a sua importância para as economias de Mariana (MG) e região até os municípios de Anchieta (ES), onde é feita parte do processo de pelotagem e exportação do minério de ferro. Pretende-se, assim, decompor o efeito do desastre entre impacto do rompimento da barragem e da consequente restrição imposta à empresa. Esse estudo mostra que, no cenário em que a Samarco pode ser representada por toda a variação na terra causada pelo desastre no setor extrativo, se a empresa não tivesse parado, a perda no PIB seria de R\$ 3,96 bilhões menor, no acumulado dos três anos. No segundo cenário, no qual a empresa representa toda a variação no uso do recurso natural e no capital físico do mesmo setor causada pelo desastre, a perda no PIB seria de R\$ 4,48 bilhões menor. Desse modo, o custo econômico da parada da atividade da empresa é de 2,9% a 3,29% do total do impacto na economia, mas de 49,19% a 55,65% do total da perda no setor extrativo.

Após esta introdução, faz-se uma breve revisão da literatura sobre o uso de modelos de equilíbrio geral em estudos de desastres, na Seção 2. A Seção 3 apresenta o modelo

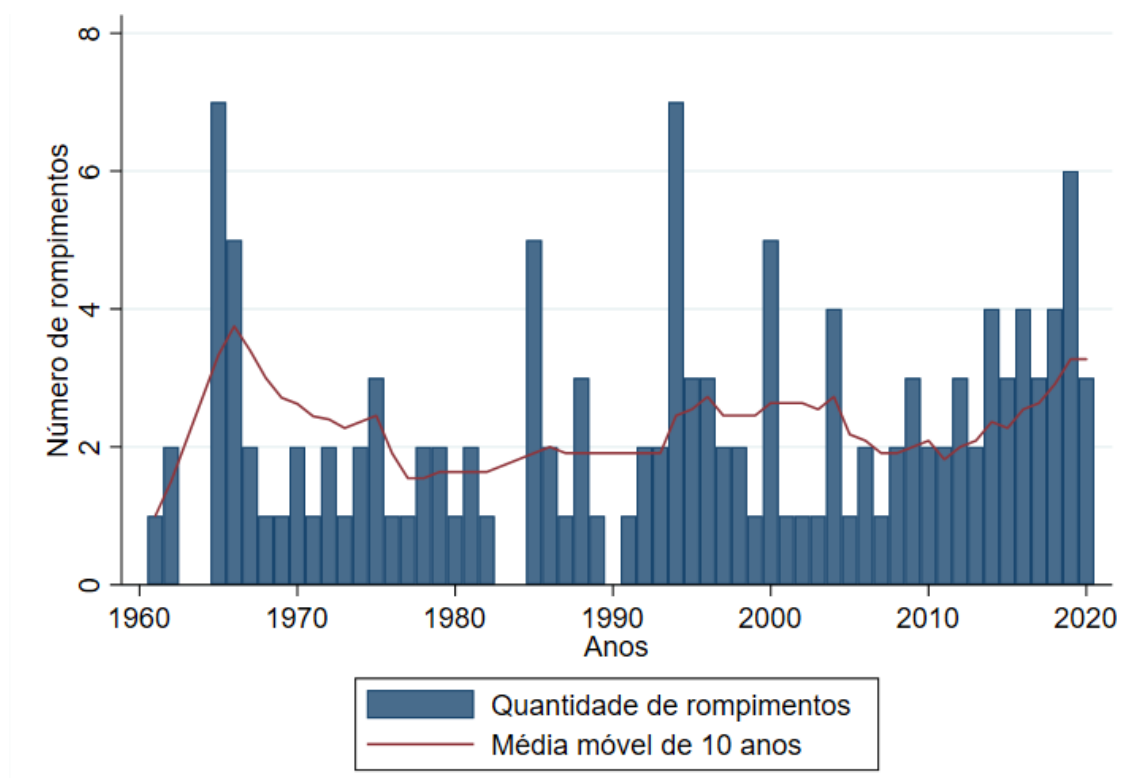
de equilíbrio geral setorial e sua estrutura. Apresenta-se o desenvolvimento do mercado de bens finais e intermediários, a estrutura do mercado de trabalho em cada setor e a dinâmica do acúmulo do estoque de capital físico. Ao final dessa seção, apresenta-se a caracterização do equilíbrio estacionário. A Seção 4 analisa o equilíbrio em cada um dos mercados que compõem o modelo. Na Seção 5, faz-se uma estática comparativa de um choque no estoque de recursos naturais do setor extrativo para esclarecer os canais por onde o choque se propaga para os demais setores da economia, remunerações dos fatores de produção e preços dos bens intermediários. A Seção 6 mostra as estratégias de parametrização do modelo. Na Seção 7, mostra-se a capacidade do modelo desenvolvido de explicar a dinâmica da economia dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo antes do rompimento da Barragem de Fundão. Na Seção 8, discute-se a construção dos cenários contrafactuais: como a economia teria evoluído caso o desastre não tivesse ocorrido. A Seção 9 contém os resultados dos impactos do rompimento da Barragem de Fundão no PIB do setor extrativo e demais setores da economia, tanto pela ótica da produção, quanto pela ótica da renda. Nessa seção, apresenta-se também os impactos no estoque de capital humano dos setores, taxa de desemprego da economia, dentre outras variáveis macroeconômicas. Na Seção 10, apresenta-se a decomposição do impacto devido às alterações no mercado de trabalho, produtividade e destruição de recursos naturais e capital físico. Na Seção 11, discute-se o impacto da restrição à produção imposta à Samarco Mineração S.A. Por fim, a última seção conclui esse estudo.

2 REVISÃO DA LITERATURA DOS IMPACTOS DE DESASTRES COM FOCO EM MODELOS DE EQUILÍBRIO GERAL COMPUTÁVEIS

2.1 Rompimento de barragens

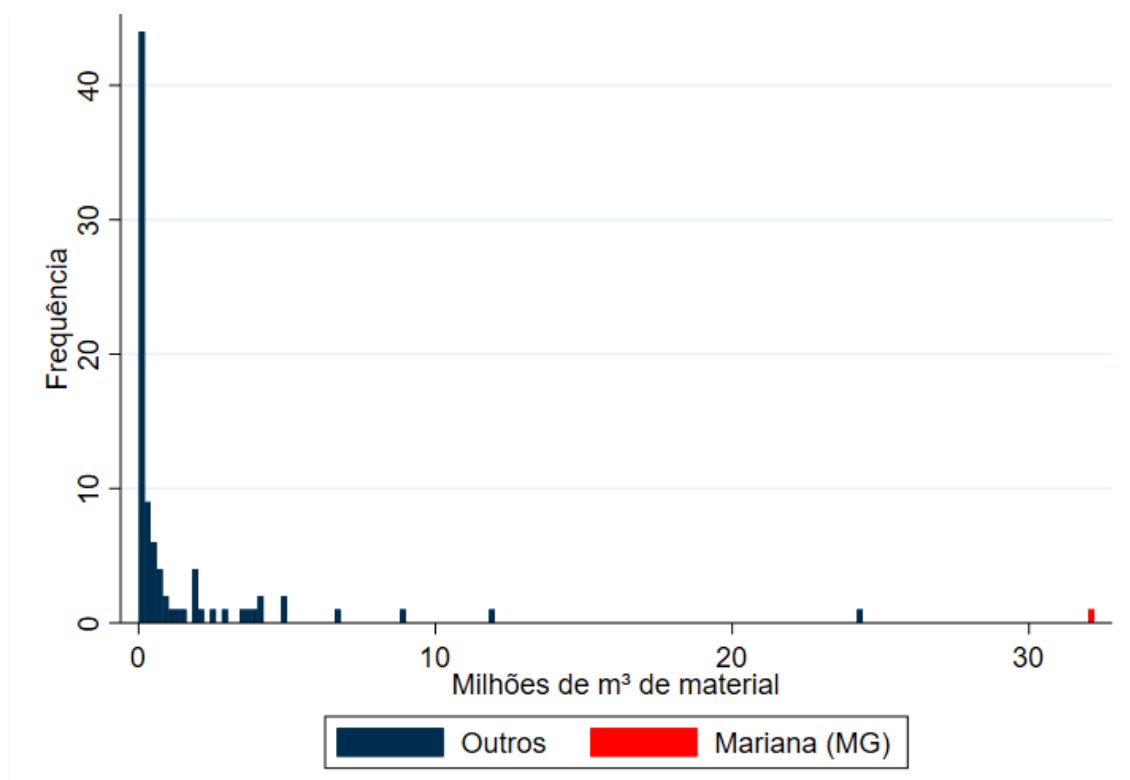
Desastres como os de Mariana e Brumadinho são usuais, mas em geral são de escala muito menor. Nos últimos dez anos houve uma média de três rompimentos de barragens de rejeitos de exploração de minerais acontecendo por ano no mundo, segundo dados da Wise Uranium Project (2020). A distribuição dos rompimentos em cada ano é apresentada na Figura 1³ e a distribuição da quantidade rejeitos vazados na Figura 2. No Brasil, a maior parte desses desastres está entre os maiores em termos de volume de material derramado. Além disso, a maior parte dos colapsos acontece quando os preços dos minérios estão baixos. Esses indicadores básicos sinalizam que se trata de uma tecnologia extremamente arriscada para o meio ambiente e para as pessoas que habitam nos locais onde a exploração acontece.

Figura 1 — Número de rompimentos de barragens de rejeitos por ano



Fonte: Elaboração Própria (2020) a partir de dados da Wise Uranium Project (2020).

³ Para anos anteriores a 1972 foi utilizada uma janela crescente para o cálculo da média.

Figura 2 — Histograma da quantidade de material vazado (mi m^3)

Fonte: Elaboração Própria (2020) a partir de dados Wise Uranium Project (2020).

2.2 Economia do desastre

Faz-se aqui uma breve revisão da literatura sobre a economia de desastres naturais. Uma revisão extensa pode se encontrar em Cavallo e Noy (2011) e, mais recentemente, em Botzen et al. (2020). Os trabalhos internacionais sobre os efeitos econômicos de desastres têm-se desenvolvido em duas frentes. Na primeira, temos os modelos econométricos quase experimentais, como o modelo de controle sintético desenvolvido pela Fundação Getúlio Vargas (2019), que captura a magnitude dos impactos no sistema econômico em variáveis como PIB, produção e emprego. Esses resultados devem ser entendidos como evidência da intensidade, tempo e até abrangência regional dos impactos.

A segunda frente, porém, busca entender as condições econômicas que levam a esses resultados, sendo necessários modelos econômicos que considerem a ação dos agentes econômicos envolvidos, permitindo simular políticas mitigadoras. Quando acontece um desastre, o primeiro impacto é conhecido na literatura como impacto direto ou dano. O dano é causado pela destruição de vidas e de ativos produtivos. Apesar da maior parte do dano ser causado por forças físicas, hoje existe um consenso, como discutiremos a seguir, de que esses danos podem ser mitigados por instituições e

medidas preventivas. Assim, por exemplo, furacões com a mesma força atingem e afetam de maneira diferente uma região economicamente mais desenvolvida do que outra menos desenvolvida. Os efeitos secundários também se apresentam de maneira diferente para desastres de intensidade similar. Os efeitos secundários nada mais são do que a maneira como se dissemina o dano através da economia. As economias diferem em sua resiliência. As metodologias a seguir capturam o dano e os efeitos da disseminação para outros setores. Do ponto de vista das metodologias utilizadas, elas são de quatro tipos: (i) modelos com coeficientes fixos de insumo-produto, que usam matrizes de contabilidade social; (ii) modelos de equilíbrio geral computável; (iii) modelos de crescimento; (iv) modelos integrados de avaliação, que incorporam o meio ambiente e recursos naturais aos modelos de equilíbrio geral.

Provavelmente as matrizes de insumo-produto estão desde o início da literatura internacional de desastres naturais. Porém, a pouca flexibilidade de substituir insumos tende a exagerar os efeitos secundários. Por outro lado, introduzem o conceito de inoperância setorial, que é o principal elemento transmissor do impacto econômico. Já os modelos de equilíbrio geral levam em consideração a possibilidade de substituir insumos em algum grau, portanto, podem dar uma medida mais razoável da resposta do sistema econômico. Os modelos de crescimento são muito importantes para captar a dimensão temporal do desastre, mas, em geral, limitados a apenas um setor agregado. O tipo de questão que se responde é se os efeitos afetam apenas o nível de produção ou a taxa de crescimento. A questão é importante pois muitas vezes os desastres têm consequências ao longo de décadas e não apenas em uns poucos anos. Muitas vezes, a recuperação é uma oportunidade de levar a uma situação melhor do que se tinha antes do desastre, reconstruindo a infraestrutura com mais tecnologia incorporada, levando à maior produtividade. Por último, os modelos integrados se beneficiam de uma literatura com contribuições sólidas de modelos amplamente reconhecidos por cientistas do meio ambiente (Nordhaus, 1991). Isso faz com que se possa responder perguntas, por exemplo, sob o aumento gradual dos danos e efeitos secundários de furacões, elevação do nível do oceano e qualidade do ar. Resumiremos em detalhe as conclusões analíticas desses enfoques, mas antes revisamos alguns resultados empíricos.

2.3 Impactos econômicos de desastres no mundo

Há um número crescente de organizações que coletam e organizam bases de dados internacionais de desastres, por exemplo, a EM-DAT, mantida pelo Centro de Pesquisa de Epidemiologia e Desastres da Universidade de Lovaina e a NatCatSERVICE,

mantida pelas companhias de resseguros Munich Re e Swiss Re. Ambas bases de dados registram as vidas perdidas e os custos monetários de cada desastre. Metanálises dos estudos econométricos sobre os impactos no crescimento têm achado efeitos diretos negativos no crescimento econômico no curto prazo e, de maneira menos conclusiva (variando de acordo com a natureza do desastre), têm achado efeitos negativos de longo prazo, ou efeitos indiretos (Klomp & Valckx, 2014). Em casos específicos, como o terremoto de Kobe, o efeito regional de longo prazo é claramente negativo, como apontam Noy e Edmonds (2019).

As estimativas para os efeitos diretos contidas em Kahn (2005) foram muito influentes na literatura. O propósito de Kahn (2005) foi estudar o papel da renda, das instituições, da política e da geografia em determinar o número de mortes causado por desastres, controlando a intensidade do desastre. Países de mais alta renda têm menos fatalidades que países mais pobres. Estudos mais recentes indicam que o crescimento da população e das economias explica a maior parte do crescimento das fatalidades. Tem-se encontrado também incidência das mudanças climáticas nessa tendência.

Quanto aos efeitos indiretos, tem-se encontrado um menor efeito sobre PIB do que para setores específicos. Em geral, alguns setores atingidos como turismo e indústria saem prejudicados, enquanto outros, como o de construção civil, são afetados positivamente. O componente setorial destacado por modelos de insumo-produto parece ser importante como, por exemplo, em Hallegatte (2008). Anttila-Hughes e Hsiang (2013) têm estudado os impactos dos tufões nas Filipinas sobre a renda familiar, encontrando efeitos persistentes, principalmente nas famílias mais pobres.

Strobl (2011) tem estudado o impacto dos furacões sobre a renda per capita dos municípios da costa leste dos EUA e encontra significativos efeitos sobre a renda per capita. Esse efeito se produz pela emigração das famílias mais ricas, provocando uma estagnação da região atingida. Esse trabalho encontra uma perda de 0,45 pontos percentuais no crescimento da renda per capita nos municípios atingidos frente a uma média de crescimento de 1,68%. Uma perda de mais de um quarto do crescimento.

Uma conclusão também importante dessa literatura é que os efeitos de longo prazo não devem ser subestimados. A persistência dos efeitos negativos sobre agregados, tais como renda, exportação e emprego, persistem, em muitos casos, por décadas e levar em consideração os efeitos de apenas um ano ou dois pode subestimar os impactos negativos, especialmente em países que não experimentam desastres repetidas vezes e, portanto, não preparados para agir contra os danos. O trabalho de Hsiang e Jina (2014) apresenta evidência para o caso de ciclones em um estudo de painel.

Um outro passo importante da literatura tem sido a identificação de fatores mitigantes. Os países industrializados sofrem perdas maiores, porém apresentam menor fatalidade e impactos menores nas taxas de crescimento. Melhores leis e regulamentação de construção, melhor sistema de saúde e economias com maior resiliência explicam em parte este resultado (Kahn, 2005). A lista de fatores mitigadores cresce na literatura e já inclui uma maior integração ao comércio internacional e ao sistema financeiro como fatores mitigadores, como aponta Felbermayr e Gröschl (2014).

2.4 Modelos de equilíbrio geral na avaliação de desastres

Revisa-se aqui a literatura que usa como metodologia os modelos de Equilíbrio Geral Computável (EGC), pois este relatório desenvolve um modelo que usa esta metodologia. Em comparação com outros enfoques, os modelos de equilíbrio geral computável apresentam maior flexibilidade, pois a ação dos preços de bens finais e de fatores de produção reagindo aos impactos do desastre induzem a uma substituição de recursos e moderam os impactos econômicos, seja através de aumento da oferta local de bens e serviços, seja através do aumento de importação de outras regiões ou países. Os movimentos de preços levam, também, à moderação no uso de recursos. Essa propriedade de amortecimento dos impactos torna os modelos de equilíbrio geral atrativos, uma vez que apresentam a propriedade da resiliência, a capacidade de reação para evitar as perdas máximas na economia. Além disso, os modelos de EGC podem utilizar procedimentos de calibração para obtenção de parâmetros que seriam difíceis de obter por estimação direta. Tal característica pode se converter numa vantagem. Modelos econométricos requerem um acúmulo de informação de séries temporais e regionais que por vezes não estão disponíveis, especialmente logo após o desastre.

A moderação dos impactos econômicos se deve em alguns casos a uma substituição de produção em regiões vizinhas que não foram atingidas pelo desastre ou porque substituem-se insumos para evitar a inoperância de algum setor econômico por falta de insumos ou por falta de demanda.

O trabalho de Rose e Liao (2005) foi um dos pioneiros em aplicar a metodologia EGC. A aplicação foi feita com o intuito de dimensionar riscos, uma vez que trataram de simular um desastre para avaliar os riscos envolvidos. Simularam um terremoto que afetaria a oferta de água para a região do porto de Portland, na Califórnia, EUA. Eles realizam uma comparação do que seria o impacto direto com uma matriz de insumo-produto e o que o modelo de equilíbrio geral indicaria. Um impacto direto de 50,5% na oferta de água para 20 setores na primeira semana se converteria em um impacto de 33,7% considerando a elasticidade de substituição no uso do recurso, com 7,3% de

impacto indireto. Somando os dois impactos, chega-se a uma interrupção na oferta de água de 41%. Realizaram esta simulação para dois cenários. No primeiro, prevalecem políticas de mitigação, substituição dos dutos etc. Dessa maneira, Rose e Liao (2005) podem avaliar o valor dessa política de mitigação. De fato, o impacto total cai para 30,5% do que seria o impacto sem essas medidas.

O trabalho de Selcuk e Yeldan (2001) é interessante, pois baseia-se em um modelo de equilíbrio geral computável de crescimento para analisar as consequências na economia nacional do terremoto da Turquia em 1999. A avaliação dos autores é que os impactos sobre o PIB, consumo, investimento, saldo comercial externo e endividamento externo foram significativos a nível nacional. O impacto poderia ter sido menor com ajuda internacional para financiar um período de isenção tributária para bens de capital. Se o governo elevasse os impostos indiretos para financiar gastos públicos, os resultados seriam negativos. A política de isenção tributária evitaria uma contração do PIB de 1,3% e propiciaria a estabilidade do consumo. A ajuda requerida seria da ordem de 5,6% do PIB.

Bosello et al. (2012) têm avaliado os impactos da elevação do nível do mar sobre as zonas costeiras da Europa e avaliado também as políticas de mitigação de proteção das zonas costeiras. O interessante do seu enfoque é que mede os impactos diretos através do modelo DIVA (administrado por centro de pesquisas costeiras de Europa) que captura a perda de áreas costeiras ao avanço do mar. Essa tem sido a medida tradicional de medição dos impactos diretos. A análise é feita com o modelo GTAP EF. Os impactos de elevação do nível do mar se dão através de erosão, alagamentos, umedecimento de terras e salinização. Todos esses fenômenos têm efeitos econômicos nas zonas costeiras e no interior do continente pela migração, perda de terras e danos à agricultura. A conclusão do trabalho é que a perda de terras tem um custo direto importante para os países costeiros, mas para os outros países também. Quando se fazem investimentos de adaptação ou cuidados da costa, o custo da perda de terra por erosão ou inundação em termos de perda de PIB é muito menor.

A maior parte dos modelos compartilha a mesma estrutura levando em consideração os mercados de bens finais e seus fatores primários de produção, de maneira que todos facilitam a compreensão dos canais dos impactos dos desastres através da perda de recursos, impactos na produtividade e finalmente desemprego e perda de remuneração dos fatores primários.

Desastres são eventos de frequência baixa, que afetam vidas, riqueza e em muitos casos geram disputas sobre responsabilidades. Por serem de baixa frequência, causam

surpresas no cálculo da renda permanente e exigem mudanças nos padrões de consumo da população afetada e dos governos. Os impactos se dão ao longo do tempo e em regiões que podem não ter sido atingidas diretamente. O que aprendemos dessa literatura, que ainda está em fase de amadurecimento, são três lições: (i) a dimensão temporal é importante, visto que considerar apenas alguns anos após o desastre pode levar à significativa subestimação; (ii) a dimensão regional pode ser também outra fonte de subestimação, pois regiões que não foram atingidas diretamente podem sofrer as consequências, como no caso da elevação do nível do mar na Europa; (iii) os modelos de EGC são atrativos porque permitem simular políticas mitigadoras. Ao permitir a comparação de simulações, pode-se valorar as medidas mitigadoras ao comparar uma situação sem a aplicação da medida e outra com.

3 MODELO MACROECONÔMICO

3.1 Mercado de bens finais e setores intermediários

Seguindo Acemoglu (2001), vamos admitir a existência de dois bens intermediários que são vendidos em um mercado competitivo e imediatamente transformados em um bem final, o qual serve tanto para consumo quanto para investimento. Os bens intermediários são produtos da extração mineral e não mineral (Y_{Mt}) e um bem agregado que inclui todos os demais bens e serviços (Y_{Gt}), ambos para um dado período t . As preferências dos agentes são definidas em termos desse bem final (Y_t), cujo preço (P) é normalizado para 1. A função de produção agregada é dada pela equação (1).

$$Y_t = \left[\lambda Y_{Mt}^{\frac{\rho-1}{\rho}} + (1-\lambda) Y_{Gt}^{\frac{\rho-1}{\rho}} \right]^{\frac{\rho}{\rho-1}} \quad (1)$$

onde, para um dado período t , ρ é a elasticidade de substituição entre os dois bens intermediários, a qual é fixa no tempo, assim como λ , que determina a importância relativa de Y_{Mt} . Na medida em que as preferências dos agentes são definidas apenas com base em Y_t , podemos pensar (1) como a função utilidade definida em Y_{Mt} e Y_{Gt} .

Desde que os dois bens intermediários são vendidos em um mercado competitivo e temos que $PY_t = P_{Mt}Y_{Mt} + P_{Gt}Y_{Gt}$, seus preços são dados por (2) e (3).

$$P_{Mt} = \lambda Y_{Mt}^{\frac{-1}{\rho}} Y_t^{\frac{1}{\rho}} \quad (2)$$

$$P_{Gt} = (1-\lambda) Y_{Gt}^{\frac{-1}{\rho}} Y_t^{\frac{1}{\rho}} \quad (3)$$

As tecnologias de produção dos bens intermediários são dadas pelas funções Cobb-Douglas (4) e (5), onde A_{jt} é a produtividade total dos fatores (PTF) do setor j no período t , K_{jt} é o estoque de capital físico no setor j no período t , N_{jt} é o estoque de recursos naturais do setor j também no período t e H_{jt} é o estoque de capital humano no setor j em t . Os parâmetros ϕ , θ , α e β são considerados fixos no tempo.

$$Y_{Gt} = A_{Gt} K_{Gt}^{\phi} N_{Gt}^{\theta} H_{Gt}^{(1-\phi-\theta)} \quad (4)$$

$$Y_{Mt} = A_{Mt} K_{Mt}^{\alpha} N_{Mt}^{\beta} H_{Mt}^{(1-\alpha-\beta)} \quad (5)$$

Admita que os trabalhadores escolhem o setor em que eles decidem procurar emprego (M ou G), onde cada setor apresenta um salário distinto em t , w_{Gt} e w_{Mt} ,

respectivamente. Ademais, define-se r_{Gt} e r_{Mt} como as taxas de retorno de curto prazo do capital físico de cada setor no período t , determinadas endogenamente de acordo com o nível de estoque de capital (K_{Gt} e K_{Mt}), δ a taxa de depreciação do capital, constante no tempo. As equações que determinam as demandas pelos fatores de produção são dadas pelas equações de (6) a (11). Considera-se que os recursos naturais são exógenos e especializados, de modo que recursos utilizados na produção de Y_{Gt} não servem para produzir Y_{Mt} e vice-versa. A oferta de N_G e N_M são perfeitamente inelásticas. Assim, a renda por unidade de recursos naturais varia entre setores sendo q_{Gt} e q_{Mt} como o preço do arrendamento dos recursos naturais para o setor G e M, respectivamente.

$$K_{Gt} = \phi \frac{P_{Gt}Y_{Gt}}{r_{Gt} + \delta} \quad (6)$$

$$N_{Gt} = \theta \frac{P_{Gt}Y_{Gt}}{q_{Gt}} \quad (7)$$

$$H_{Gt} = (1 - \phi - \theta) \frac{P_{Gt}Y_{Gt}}{w_{Gt}} \quad (8)$$

$$K_{Mt} = \alpha \frac{P_{Mt}Y_{Mt}}{r_{Mt} + \delta} \quad (9)$$

$$N_{Mt} = \beta \frac{P_{Mt}Y_{Mt}}{q_{Mt}} \quad (10)$$

$$H_{Mt} = (1 - \alpha - \beta) \frac{P_{Mt}Y_{Mt}}{w_{Mt}} \quad (11)$$

A seguir, apresenta-se as estruturas dos mercados de fatores em maiores detalhes. Na próxima subseção apresenta-se o mercado de trabalho e na subseção 3.3 discute-se o ajuste do estoque de capital físico.

3.2 Mercado de trabalho

Considera-se que existe um dado estoque de capital humano H_t em t , como em Katz e Murphy (1992).⁴ Esse capital humano encontra-se empregado no setor M (H_{Mt}), ou empregado no setor G (H_{Gt}) ou desempregado (H_{Ut}). Supõe-se que o desempregado procura emprego em apenas em um setor (G ou M) em cada período, tal que:

$$H_t = H_{Mt} + H_{Gt} + H_{UMt} + H_{UGt} = H_{Mt} + H_{Gt} + H_{Ut}, \quad (12)$$

onde H_{Ujt} é o estoque de capital humano de desempregados que decidem procurar emprego no setor j , onde $j = \{G, M\}$, no período t . Nesse modelo, o desempregado não procura emprego simultaneamente nos dois setores. Assim, o estoque de capital

⁴ As descrições e detalhes sobre a construção da variável de capital humano H_t encontram-se no APÊNDICE B.

humano economicamente ativo no setor j é $(H_{jt} + H_{Ujt})$ e sua correspondente taxa de desemprego é dada por $u_{jt} = \frac{H_{Ujt}}{H_{jt} + H_{Ujt}}$, $j = \{G, M\}$.

Como proposto por Shimer (2005), considera-se que existe uma probabilidade estritamente positiva f_t de um desempregado encontrar emprego em t e uma probabilidade estritamente positiva s_t de um empregado perder o emprego em t . Supõe-se que ambas as taxas são exógenas e que podem ser diferentes entre os setores, de modo que f_{Gt} e f_{Mt} correspondem às probabilidades de encontrar emprego nos setores G e M em t , respectivamente; analogamente, s_{Gt} e s_{Mt} são as probabilidades de se perder o emprego nos setores G e M em t , respectivamente.

Em estado estacionário, dentro de cada setor j , os fluxos de entrada e saída do emprego são iguais e dados pelas seguintes equações:

$$s_{Mt}H_{Mt} = f_{Mt}H_{UMt} \quad (13)$$

$$s_{Gt}H_{Gt} = f_{Gt}H_{UGt} \quad (14)$$

A partir das equações (13) e (14) chegam-se às taxas de desempregos setoriais de estado estacionário:

$$u_G = \frac{H_{UG}}{H_G + H_{UG}} = \frac{s_G}{s_G + f_G} \quad (15)$$

$$u_M = \frac{H_{UM}}{H_M + H_{UM}} = \frac{s_M}{s_M + f_M} \quad (16)$$

É importante ressaltar a hipótese de que os agentes na força de trabalho procuram emprego em apenas um dos setores para um dado período t . Assim, um indivíduo desempregado em t faz parte de H_{UMT} ou H_{UGT} .

A taxa de desemprego agregada (u_t) é dada por:

$$u_t = \gamma_{Gt} \frac{s_{Gt}}{f_{Gt} + s_{Gt}} + (1 - \gamma_{Gt}) \frac{s_{Mt}}{f_{Mt} + s_{Mt}} \quad (17)$$

$$u_t = \gamma_G u_G + (1 - \gamma_G) u_M \quad (18)$$

Onde γ_{Gt} é a parcela do estoque de capital humano total em t que está economicamente ativa em G e definida como em (19).

$$\gamma_G = \frac{H_G + H_{UG}}{H} \quad (19)$$

As estratégias de busca de emprego são representadas por condições de não arbitragem dadas pelas equações de Bellman e especificadas nas equações (20) a (23)

a seguir, onde V_{et} é o valor presente esperado de um trabalhador que se encontrar no estado e , $e = \{G, M, U, UG, UM\}$:

$$r_t V_{Gt} = w_{Gt} - s_{Gt}(V_{Gt} - V_{Ut}), \quad (20)$$

$$r_t V_{Mt} = w_{Mt} - s_{Mt}(V_{Mt} - V_{Ut}), \quad (21)$$

$$r_t V_{UGt} = f_{Gt}(V_{Gt} - V_{Ut}), \quad (22)$$

$$r_t V_{UMt} = f_{Mt}(V_{Mt} - V_{Ut}), \quad (23)$$

onde r_t é a taxa de desconto de longo prazo da economia. Em equilíbrio, o desempregado é indiferente em buscar emprego no setor M ou no setor G em t , tal que:

$$V_{UGt} = V_{UMt} = V_{Ut} \quad (24)$$

A partir das equações (20) a (24) obtém-se salário relativo de equilíbrio da equação (25) a seguir:

$$\frac{w_{Gt}}{w_{Mt}} = \frac{f_{Mt}}{f_{Gt}} \frac{(r_t + f_{Gt} + s_{Gt})}{(r_t + f_{Mt} + s_{Mt})} \quad (25)$$

3.3 Estoque de capital físico

No curto prazo, o estoque de capital físico pode ser diferente do seu nível ótimo⁵ (K_{Gt}^* e K_{Mt}^*). Ele não é ajustado instantaneamente para o nível ótimo em períodos subsequentes. Há uma regra de transição do estoque de capital físico ótimo no longo prazo para o estoque de capital de curto prazo⁶. O estoque de capital do setor j no período t é dado por (26), onde I_{jt} é o investimento líquido do setor j realizado no início do período t . A depreciação (δK_{jt}) é reposta ao final do período, de modo que o investimento bruto no período t é dado por: $\bar{I}_{jt} = I_{jt} + \delta K_{jt}$. O investimento líquido é dado por (27), onde ν é um parâmetro entre 0 e 1 e K_{jt}^* é o estoque ótimo de capital do setor j no período t . Assim, o estoque de capital no início do período t é dado por (28). Os parâmetros ν e δ são considerados invariantes entre os setores. Então, dado ν e δ , conhecendo $K_{jt}^* \forall t \in [0; T]$ e admitindo que $K_{j0} = K_{j0}^*$ (no período 0 o capital observado

⁵ O cálculo do nível ótimo do estoque de bens de capital é apresentado na Seção 6 – Estratégia de parametrização.

⁶ O modelo pode ser racionalizado como em Eisner e Strotz (1963). A empresa maximiza o valor presente do fluxo de lucro decorrente de investimento em capital fixo. O parâmetro ν depende crucialmente da taxa de desconto e os parâmetros de sensibilidade do lucro ao volume de capital instalado e o custo de incrementar marginalmente o capital (custo de instalação).

é igual ao capital ótimo para o período), podemos obter toda a série de estoque de capital de curto prazo: $K_{jt} \forall t \in [0; T]$.

$$K_{jt} = K_{j(t-1)} + I_{jt} \quad (26)$$

$$I_{jt} = v(K_{jt}^* - K_{j(t-1)}) \quad (27)$$

$$K_{jt} = vK_{jt}^* + (1 - v)K_{j(t-1)} \quad (28)$$

3.4 Caracterização do equilíbrio de curto prazo

No curto prazo, os estoques de capital são fixos para os dois setores. O mercado de trabalho tem um papel crucial no modelo. Em cada período t , os fundamentos econômicos determinam o nível salarial de cada setor e a proporção do estoque de capital humano disponível na economia entre os setores M, G e desempregados. Grande parte do ajustamento do modelo acontece no mercado de trabalho.

Das equações (2) e (3) em (8) e (11), obtém-se (29).

$$H_{Gt} = \frac{(1-\phi-\theta)}{(1-\alpha-\beta)} \left(\frac{Y_{Gt}}{Y_{Mt}} \right)^{\frac{\rho-1}{\rho}} \frac{(1-\lambda)}{\lambda} \frac{w_{Mt}}{w_{Gt}} H_{Mt} \quad (29)$$

Apresentada a estrutura do modelo e dos mercados que o compõem, o equilíbrio da economia é representado pelas equações (1), (4), (5), (12), (13), (14), (25) e (29). As variáveis endógenas do modelo são $Y_t, Y_{Mt}, Y_{Gt}, H_{Gt}, H_{Mt}, H_{UMt}, H_{UGt}$ e $\frac{w_{Mt}}{w_{Gt}}$. As variáveis exógenas são $\rho, \lambda, \phi, \theta, \alpha, \beta, \delta, A_{Gt}, A_{Mt}, r_t, K_{Mt}, K_{Gt}, N_{Gt}, N_{Mt}, H_t, s_{Gt}, s_{Mt}$ e f_{Gt} e f_{Mt} . Ao determinar essas variáveis, é possível calcular $P_{Gt}, P_{Mt}, q_{Gt}, q_{Mt}, w_{Gt}, w_{Mt}, r_{Gt}, r_{Mt}$. Para facilitar a leitura, apresenta-se o sistema que caracteriza o equilíbrio da economia:

$$Y_t = \left[\lambda Y_{Mt}^{\frac{\rho-1}{\rho}} + (1-\lambda) Y_{Gt}^{\frac{\rho-1}{\rho}} \right]^{\frac{\rho}{\rho-1}} \quad (1)$$

$$Y_{Gt} = A_{Gt} K_{Gt}^{\phi} N_{Gt}^{\theta} H_{Gt}^{(1-\phi-\theta)} \quad (4)$$

$$Y_{Mt} = A_{Mt} K_{Mt}^{\alpha} N_{Mt}^{\beta} H_{Mt}^{(1-\alpha-\beta)} \quad (5)$$

$$H_t = H_{Mt} + H_{Gt} + H_{UMt} + H_{UGt} \quad (12)$$

$$s_{Mt} H_{Mt} = f_{Mt} H_{UMt} \quad (13)$$

$$s_{Gt} H_{Gt} = f_{Gt} H_{UGt} \quad (14)$$

$$\frac{w_{Gt}}{w_{Mt}} = \frac{f_{Mt}}{f_{Gt}} \frac{(r_t + f_{Gt} + s_{Gt})}{(r_t + f_{Mt} + s_{Mt})} \quad (22)$$

$$H_{Gt} = \frac{(1 - \phi - \theta)}{(1 - \alpha - \beta)} \left(\frac{Y_{Gt}}{Y_{Mt}} \right)^{\frac{\rho-1}{\rho}} \frac{(1 - \lambda_t)}{\lambda_t} \frac{w_{Mt}}{w_{Gt}} H_{Mt} \quad (29)$$

3.5 Caracterização do equilíbrio de longo prazo

No longo prazo, supõe-se que o estoque de capital físico se ajusta instantaneamente, ou seja, sem custo de ajuste ao seu nível ótimo em cada período, no equilíbrio, com base nas equações (2), (3), (6) e (9), obtemos os estoques ótimos de capital em t , equações (30) e (31).

$$K_{Gt}^* = \frac{\phi(1 - \lambda)}{r_t + \delta} Y_{Gt}^{\frac{\rho-1}{\rho}} Y_t^{\frac{1}{\rho}} \quad (30)$$

$$K_{Mt}^* = \frac{\alpha\lambda}{r_t + \delta} Y_{Mt}^{\frac{\rho-1}{\rho}} Y_t^{\frac{1}{\rho}} \quad (31)$$

onde r_t é a taxa de juros de longo prazo da economia no período t , considerada uma variável exógena no modelo. Substituindo (30) em (4) e (31) em (5), obtemos (32) e (33).

$$Y_{Gt} = A_{Gt}^{\frac{\rho}{\rho+\phi-\rho\phi}} \left(\frac{\phi(1-\lambda)}{r_t+\delta} \right)^{\frac{\phi\rho}{\rho+\phi-\rho\phi}} Y_t^{\frac{\phi}{\rho+\phi-\rho\phi}} N_{Gt}^{\frac{\theta\rho}{\rho+\phi-\rho\phi}} H_{Gt}^{\frac{(1-\phi-\theta)\rho}{\rho+\phi-\rho\phi}} \quad (32)$$

$$Y_{Mt} = A_{Mt}^{\frac{\rho}{\rho+\alpha-\rho\alpha}} \left(\frac{\alpha\lambda}{r_t+\delta} \right)^{\frac{\alpha\rho}{\rho+\alpha-\rho\alpha}} Y_t^{\frac{\alpha}{\rho+\alpha-\rho\alpha}} N_{Mt}^{\frac{\beta\rho}{\rho+\alpha-\rho\alpha}} H_{Mt}^{\frac{(1-\alpha-\beta)\rho}{\rho+\alpha-\rho\alpha}} \quad (33)$$

Assim, o nível ótimo do estoque de capital físico da economia é determinado, em equilíbrio, pelo sistema de equações (1), (12), (13), (14), (25), (29), (32) e (33). As variáveis endógenas são Y_t , Y_{Mt} , Y_{Gt} , H_{Gt} , H_{Mt} , H_{UMt} , H_{UGt} , $\frac{w_{Mt}}{w_{Gt}}$ e as variáveis exógenas são ρ , λ , ϕ , θ , α , β , δ , A_{Gt} , A_{Mt} , r_t , N_{Gt} , N_{Mt} , H_t , s_{Gt} , s_{Mt} e f_{Gt} e f_{Mt} . Após solucionar o sistema de equações, para cada período t , é possível calcular P_{Gt} , P_{Mt} , q_{Gt} , q_{Mt} , w_{Gt} , w_{Mt} , K_{Gt}^* , K_{Mt}^* . Para facilitar a leitura e compreensão, apresenta-se o sistema completo a seguir:

$$Y_t = \left[\lambda Y_{Mt}^{\frac{\rho-1}{\rho}} + (1 - \lambda) Y_{Gt}^{\frac{\rho-1}{\rho}} \right]^{\frac{\rho}{\rho-1}} \quad (1)$$

$$H_t = H_{Mt} + H_{Gt} + H_{UMt} + H_{UGt} = H_{Mt} + H_{Gt} + H_{Ut} \quad (12)$$

$$s_{Mt} H_{Mt} = f_{Mt} H_{UMt} \quad (13)$$

$$s_{Gt} H_{Gt} = f_{Gt} H_{UGt} \quad (14)$$

$$\frac{w_{Gt}}{w_{Mt}} = \frac{f_{Mt}}{f_{Gt}} \frac{(r_t + f_{Gt} + s_{Gt})}{(r_t + f_{Mt} + s_{Mt})} \quad (22)$$

$$H_{Gt} = \frac{(1-\phi-\theta)}{(1-\alpha-\beta)} \left(\frac{Y_{Gt}}{Y_{Mt}} \right)^{\frac{\rho-1}{\rho}} \frac{(1-\lambda)}{\lambda} \frac{w_{Mt}}{w_{Gt}} H_{Mt} \quad (29)$$

$$Y_{Gt} = A_{Gt}^{\frac{\rho}{\rho+\phi-\rho\phi}} \left(\frac{\phi(1-\lambda)}{r_t+\delta} \right)^{\frac{\phi\rho}{\rho+\phi-\rho\phi}} Y_t^{\frac{\phi}{\rho+\phi-\rho\phi}} N_{Gt}^{\frac{\theta\rho}{\rho+\phi-\rho\phi}} H_{Gt}^{\frac{(1-\phi-\theta)\rho}{\rho+\phi-\rho\phi}} \quad (32)$$

$$Y_{Mt} = A_{Mt}^{\frac{\rho}{\rho+\alpha-\rho\alpha}} \left(\frac{\alpha\lambda}{r_t+\delta} \right)^{\frac{\alpha\rho}{\rho+\alpha-\rho\alpha}} Y_t^{\frac{\alpha}{\rho+\alpha-\rho\alpha}} N_{Mt}^{\frac{\beta\rho}{\rho+\alpha-\rho\alpha}} H_{Mt}^{\frac{(1-\alpha-\beta)\rho}{\rho+\alpha-\rho\alpha}} \quad (33)$$

Soluciona-se o modelo de longo prazo para obter os valores dos estoques ótimos de capital físico (K_{Mt}^* e K_{Gt}^*). Variáveis importantes para terminar a dinâmica do estoque de capital físico de curto prazo.

Para facilitar a compreensão do modelo e dos parâmetros endógenos e exógenos e constantes ou variantes no tempo, a Tabela 1 resume as variáveis endógenas, exógenas e os parâmetros para melhor compreensão do modelo com custo de ajuste do estoque de capital.

Tabela 1 — Variáveis endógenas, exógenas e parâmetros

Variáveis endógenas	Símbolo
Valor da produção agregada	Y
Valor da produção no setor G	Y_G
Valor da produção no setor M	Y_M
Estoque Capital Humano no setor G	H_G
Estoque Capital Humano desempregado e que procura no setor G	H_{UG}
Estoque Capital Humano no setor M	H_M
Estoque Capital Humano desempregado e que procura no setor M	H_{UM}
Preço da produção do setor G	P_G
Preço da produção do setor M	P_M
Preço dos recursos naturais no setor G	q_G
Preço dos recursos naturais no setor M	q_M
Salário do Capital Humano no setor G	w_G
Salário do Capital Humano no setor M	w_M
Taxa de retorno do capital no setor G no curto prazo	r_G
Taxa de retorno do capital no setor M no curto prazo	r_M
Variáveis e parâmetros exógenos no curto prazo	Símbolo
Participação da renda dos bens de capital do setor M	α
Participação da renda dos recursos naturais do setor M	β
Participação da renda Capital Humano do setor M	$1 - \alpha - \beta$
Participação da renda Bens de Capital do setor G	ϕ
Participação da renda dos Recursos Naturais do setor G	θ
Participação da renda Capital Humano do setor G	$1 - \phi - \theta$

Variáveis e parâmetros exógenos no curto prazo	Símbolo
Elasticidade de substituição entre setores	ρ
Importância relativa do setor extrativo (M)	λ
Taxa de depreciação do capital físico	δ
Taxa de ajuste do capital físico ao nível ótimo	ν
Produtividade Total dos Fatores do setor G	A_G
Produtividade Total dos Fatores do setor M	A_M
Estoque de Capital Físico setor G	K_G
Estoque de Capital Físico no setor M	K_M
Taxa de retorno de longo prazo da economia	r
Estoque de Recursos naturais setor G	N_G
Estoque de Recursos naturais setor M	N_M
Taxa de separação do setor G	s_G
Taxa de separação do setor M	s_M
Taxa de encontro do setor G	f_G
Taxa de encontro do setor M	f_M
Variáveis exógenas no curto prazo, mas endógenos no longo prazo	Símbolo
Nível Ótimo do Estoque de Capital Físico no setor M^*	K_M^*
Nível Ótimo do Estoque de Capital Físico setor G^*	K_G^*

Fonte: Elaboração própria (2020).

Observação: *O nível ótimo de capita físico é considerado.

4 ANÁLISE DOS EQUILÍBRIOS NOS MERCADOS DE PRODUTOS E FATORES

O modelo é composto por três mercados de fatores: i) o mercado de capital; ii) o mercado de terras; iii) o mercado de trabalho; e dois mercados de bens, bens do setor G e bens do setor M . Desse modo, apresenta-se nessa seção as equações de equilíbrio nos cinco mercados e os gráficos teóricos representativos.

I Equilíbrio no mercado de capital

Substituindo as equações (2) em (9) e (3) em (6), obtém-se demanda por bens de capital para respectivamente os setores G e M para dado nível de produto setorial e total, conforme as equações (34) e (35).

$$K_{Gt} = \frac{\phi(1-\lambda)}{r_{Gt} + \delta} Y_{Gt}^{\frac{\rho-1}{\rho}} Y_t^{\frac{1}{\rho}} \quad (34)$$

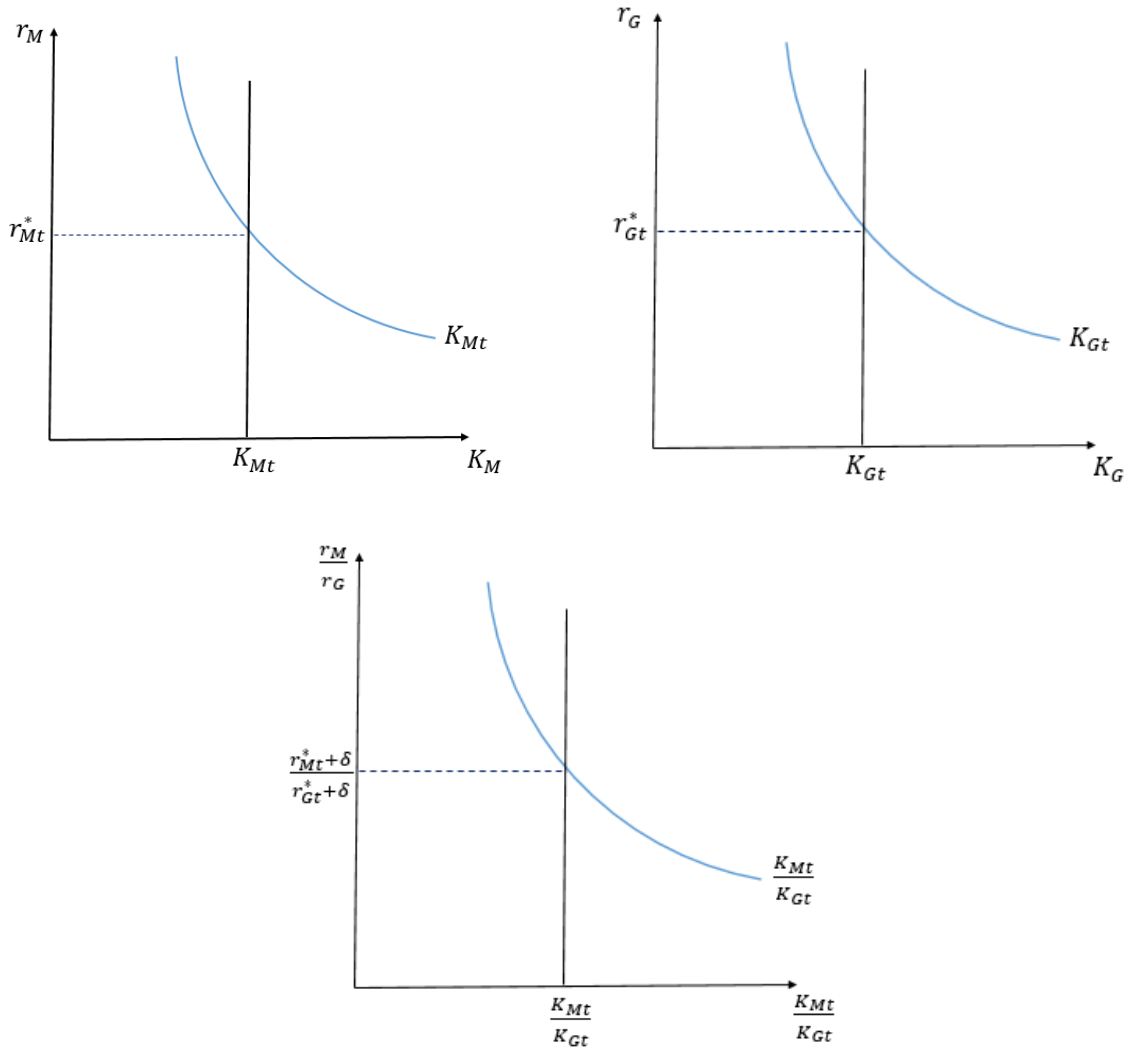
$$K_{Mt} = \frac{\alpha\lambda}{r_{Mt} + \delta} Y_{Mt}^{\frac{\rho-1}{\rho}} Y_t^{\frac{1}{\rho}} \quad (35)$$

A Figura 3 apresenta o equilíbrio entre a demanda e a oferta de capital físico. Observa-se que a função de oferta, no curto prazo, é fixa, de modo que o equilíbrio determina o retorno do capital em cada setor (r_{Mt} e r_{Gt}). Outra forma de analisar o equilíbrio nesse mercado é através da razão K_{Mt}/K_{Gt} . Dividindo (35) por (34), temos (36).

$$\frac{K_{Mt}}{K_{Gt}} = \frac{\alpha\lambda}{\phi(1-\lambda)} \left(\frac{r_{Gt} + \delta}{r_{Mt} + \delta} \right)^{-1} \left(\frac{Y_{Mt}}{Y_{Gt}} \right)^{\frac{\rho-1}{\rho}} \left(\frac{r_{Mt} + \delta}{r_{Gt} + \delta} \right)^{-1} \quad (36)$$

Sob essa perspectiva é possível ilustrar o equilíbrio no mercado de bens de capital como na Figura 3.

Figura 3 — Equilíbrio no mercado de capital físico



Fonte: Elaboração Própria (2020).

II Equilíbrio no mercado de recursos naturais

Em equilíbrio, a demanda por recursos naturais por sua vez pode ser escrita da seguinte maneira:

$$N_{Mt} = \frac{\beta\lambda}{q_{Mt}} Y_{Mt}^{\frac{\rho-1}{\rho}} Y_t^{1/\rho} \quad (37)$$

$$N_{Gt} = \frac{\theta(1-\lambda)}{q_{Gt}} Y_{Gt}^{\frac{\rho-1}{\rho}} Y_t^{1/\rho} \quad (38)$$

Essas equações foram obtidas substituindo (3) em (7) e (2) em (10). Ilustra-se os equilíbrios dos dois setores na Figura 4. A oferta de recursos naturais é perfeitamente

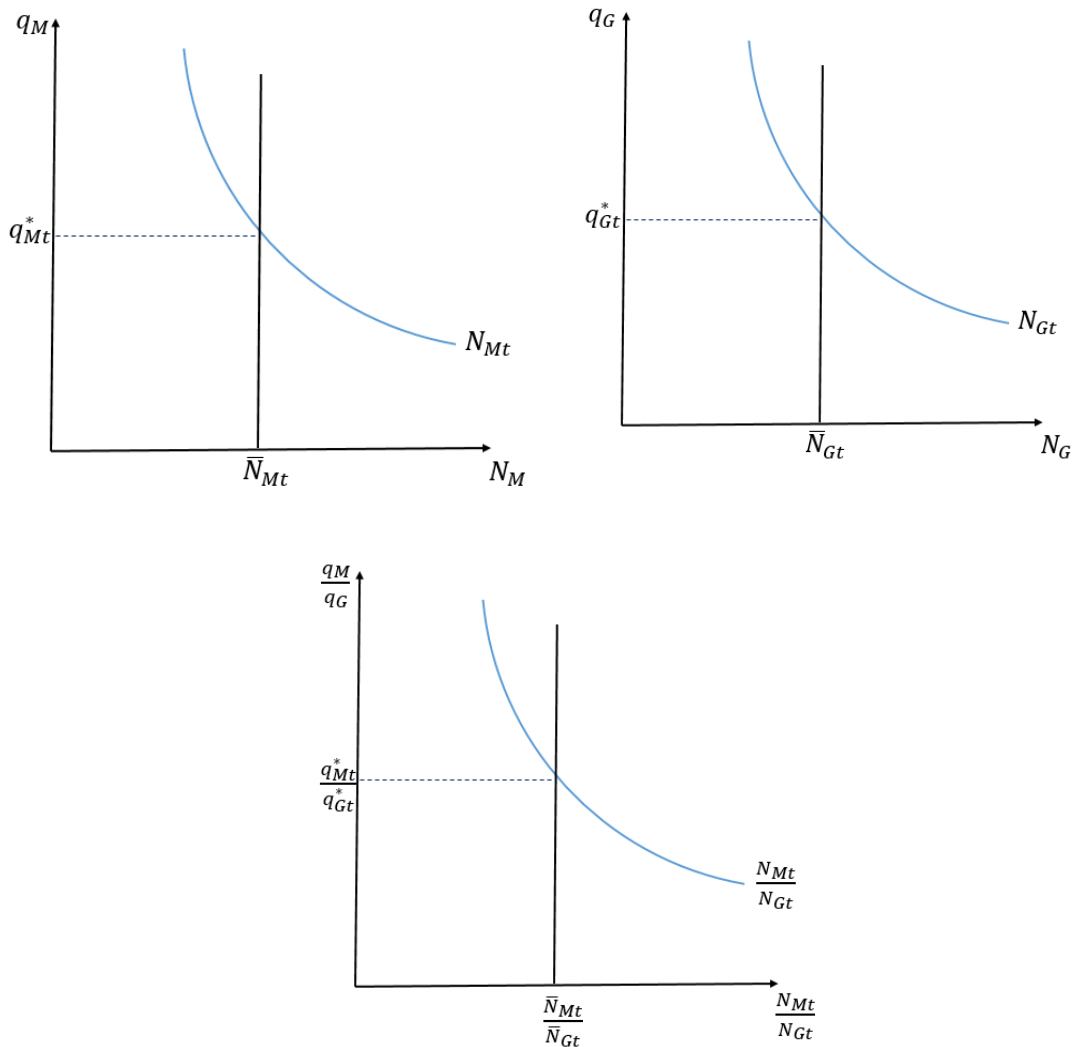
inelástica no curto e longo prazo. De forma similar ao mercado de capital físico, o equilíbrio determina o arrendamento dos recursos naturais q_{Mt} e q_{Gt} .

Similar ao realizado para o mercado de bens de capital, é possível analisar a razão da demanda pelos fatores dividindo (37) por (38):

$$\frac{N_{Mt}}{N_{Gt}} = \frac{\beta\lambda}{\theta(1-\lambda)} \left(\frac{Y_{Mt}}{Y_{Gt}} \right)^{\frac{\rho-1}{\rho}} \left(\frac{q_{Mt}}{q_{Gt}} \right)^{-1} \quad (39)$$

A Figura 4 apresenta o equilíbrio sob essa perspectiva.

Figura 4 — Equilíbrio no mercado de capital natura



Fonte: Elaboração Própria (2020).

III Equilíbrio no mercado de trabalho

Para analisar o equilíbrio no mercado de trabalho, reescreve-se as demandas por capital humano empregadas em cada setor como função das taxas de emprego $(1 - u_{jt})$, $j = \{G, M\}$ e proporção da força de trabalho em G (γ_{Gt}) definida em (19).

$$H_{Gt} = (1 - u_{Gt})\gamma_{Gt}H_t \quad (40)$$

$$H_{Mt} = (1 - u_{Mt})(1 - \gamma_{Gt})H_t \quad (41)$$

Portanto, H_{Gt} é formado pela proporção de H_t que compõem a força de trabalho G, $\gamma_{Gt}H_t$, e que está empregada no setor, representado por $(1 - u_{Gt})$. A interpretação é análoga para o setor M. Note, então, que a variável γ_{Gt} é a principal variável que regula as pressões do mercado de trabalho em ambos os setores.

A demanda por capital humano do setor M, em equilíbrio, é dado por (42):

$$H_{Mt} = \frac{(1 - \alpha - \beta)\lambda}{w_{Mt}} Y_{Mt}^{\frac{\rho-1}{\rho}} Y_t^{1/\rho} \quad (42)$$

Substituindo (41) em (42), obtém-se a demanda por capital humano no setor M como uma função de γ_{Gt} , equação (43).

$$(1 - \gamma_{Gt}) = \frac{(1 - \alpha - \beta)\lambda}{w_{Mt} (1 - u_{Mt})H_t} Y_{Mt}^{\frac{\rho-1}{\rho}} Y_t^{1/\rho} \quad (43)$$

Analogamente para H_{Gt} , substituindo (40) em (44), a demanda por capital humano no setor G no equilíbrio, tem-se a equação (45).

$$H_{Gt} = \frac{(1 - \phi - \theta)(1 - \lambda)}{w_{Gt}} Y_{Gt}^{\frac{\rho-1}{\rho}} Y_t^{1/\rho} \quad (44)$$

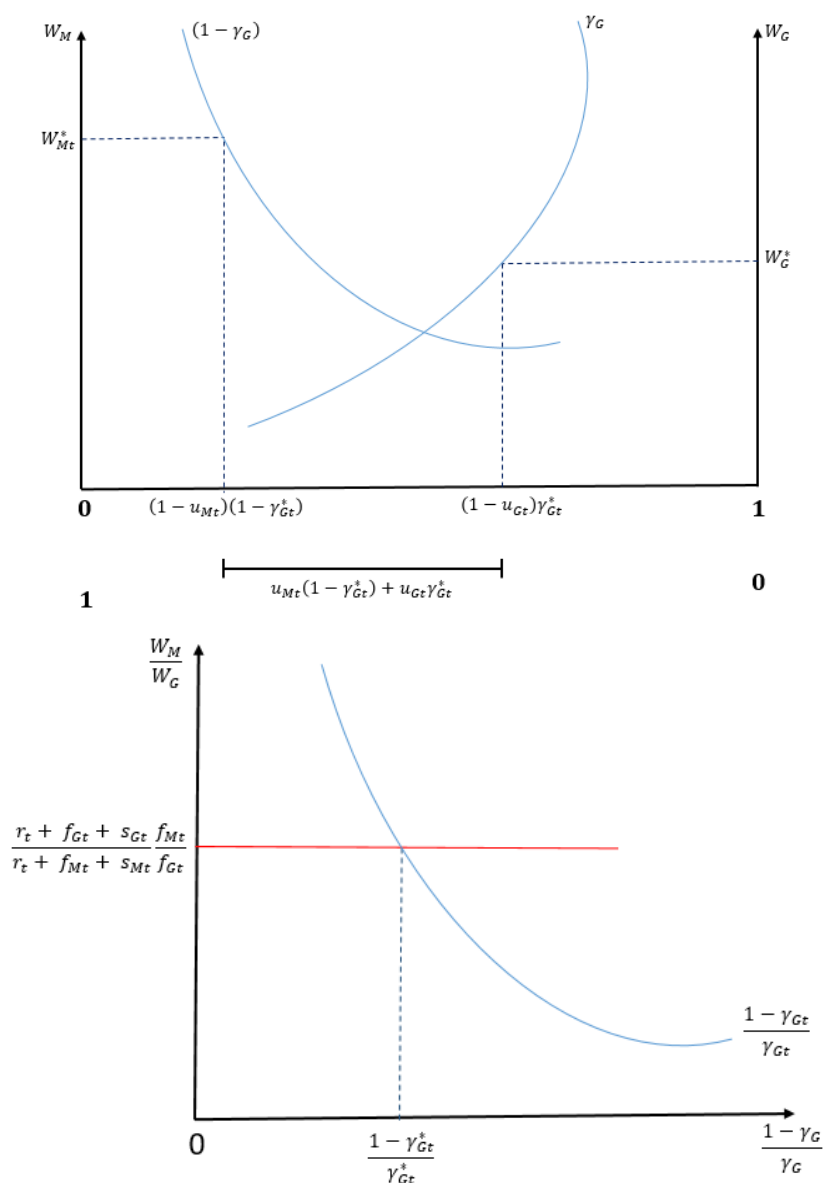
$$\gamma_{Gt} = \frac{(1 - \phi - \theta)(1 - \lambda)}{w_{Gt} (1 - u_{Gt})H_t} Y_{Gt}^{\frac{\rho-1}{\rho}} Y_t^{1/\rho} \quad (45)$$

A razão das demandas por capital humano nos setores é dada por (46), dividindo (43) por (45).

$$\frac{(1 - \gamma_{Gt})}{\gamma_{Gt}} = \frac{(1 - \alpha - \beta)}{(1 - \phi - \theta)} \frac{\lambda}{(1 - \lambda)} \frac{(1 - u_{Gt})}{(1 - u_{Mt})} \left(\frac{Y_{Mt}}{Y_{Gt}}\right)^{\frac{\rho-1}{\rho}} \left(\frac{w_{Mt}}{w_{Gt}}\right)^{-1} \quad (46)$$

A Figura 5 ilustra o equilíbrio no mercado de trabalho utilizando as equações (43) e (45). A figura mostra as proporções do estoque total empregado em cada setor com seus respectivos salários e a proporção do capital humano desempregado (admita que $H_t = 1$).

Figura 5 — Equilíbrio no mercado de trabalho



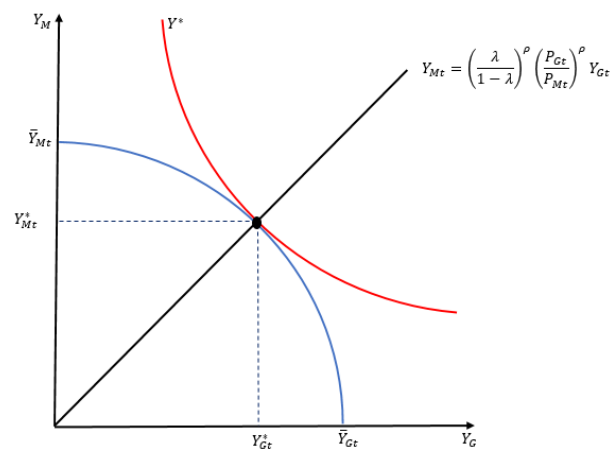
Fonte: Elaboração Própria (2020).

IV Equilíbrio no mercado de bens

A partir das equações (4) e (5) é possível traçar a Fronteira de Possibilidade de Produção (FPP) para a economia variando a utilização do capital humano (γ_G) disponível entre os setores da economia e mantendo K_{Gt} e K_{Mt} constantes. A Fronteira de Possibilidade de Produção para essa economia (linha azul) representa o máximo de produção possível de M para cada nível de produção de G, respeitadas as condições de maximização de lucro e para uma taxa de encontro de emprego e uma taxa de demissões. A Figura 6 mostra a FPP (linha azul) côncava em relação à origem. A curva vermelha é uma curva de nível da produção agregada, equação (1). Representa as

combinações de Y_{Gt} e Y_{Mt} que produzem o nível de produto Y . O equilíbrio da economia é representado pelo máximo Y que pode ser obtido combinando Y_{Gt} e Y_{Mt} no gráfico. O ponto de equilíbrio é representado pelo ponto preto. Em equilíbrio, as equações (2) e (3) definem os preços relativos dos setores na economia (linha preta) para um dado Y , no caso o seu valor máximo.

Figura 6 — Equilíbrio no mercado de bens



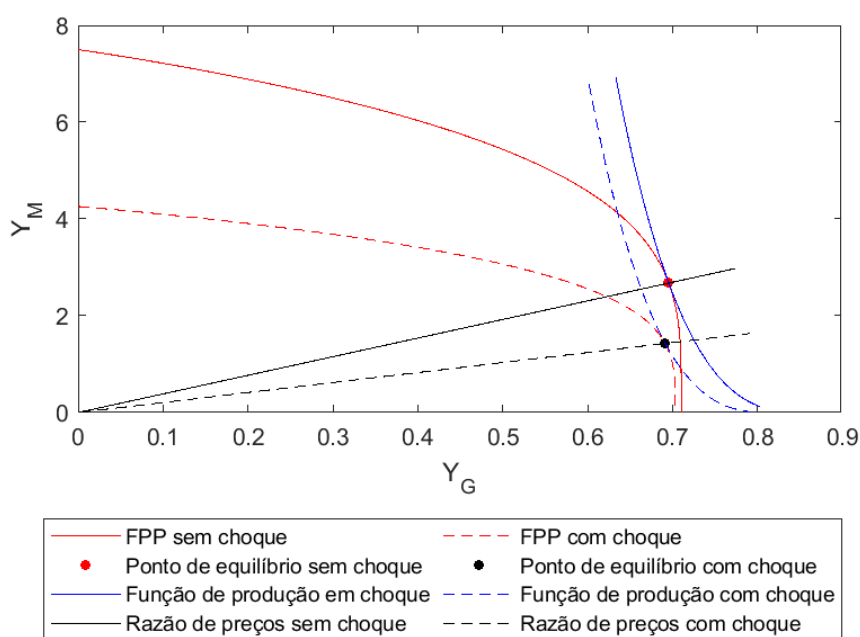
Fonte: Elaboração Própria (2020).

5 ESTÁTICA COMPARATIVA DE UM CHOQUE NO ESTOQUE DE RECURSOS NATURAIS DO SETOR EXTRATIVO (N_M)

Apresentados os equilíbrios nos cinco mercados, apresenta-se agora a dinâmica de como um choque se propaga nesse modelo e como ele afeta o equilíbrio da economia. A fim de fazer essa demonstração, vamos supor um choque negativo no estoque de recursos naturais do setor extrativo (N_M). Outra análise sobre um choque negativo na produtividade total dos fatores do setor G, demais setores da economia, encontra-se no apêndice. Nesses exercícios, utiliza-se os valores reais observados nos dados e parametrizados através das estratégias apresentadas na próxima seção.

Com menos fator de produção para o setor M, há uma queda na produção desse setor, o que pode ser visto na Figura 7 como deslocamento da Fronteira de Possibilidade de Produção para dentro no eixo vertical. A capacidade da economia de produzir bens extrativos é menor devido ao impacto da redução dos recursos naturais. Observa-se também um impacto nos demais setores da economia, de forma que o novo ponto de equilíbrio, Y_M , Y_G e, conseqüentemente, o produto total (Y) seja menor. Com a queda na produção, há uma alteração nos preços relativos. Os bens do setor extrativo ficam relativamente mais caros do que os bens dos demais setores da economia. Isso pode ser observado na alteração da inclinação da linha que sai da origem que cruza o novo ponto de equilíbrio.

Figura 7 — Choque negativo em N_M no mercado de bens

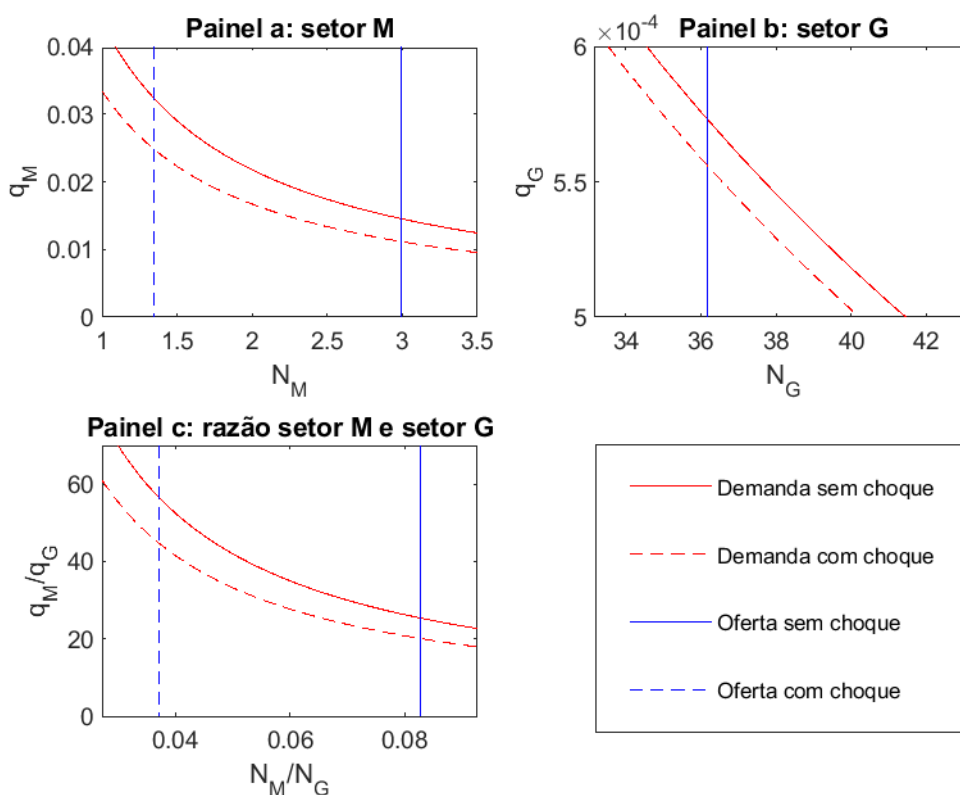


Fonte: Elaboração Própria (2020).

Para discutir os canais pelos quais o impacto em um setor transborda para outros no nosso modelo de equilíbrio geral, analisa-se o impacto em cada um dos mercados de fatores e discute-se as consequências para toda a economia.

A Figura 8 mostra que o choque negativo em N_M desloca a curva de oferta no setor M (painel a) para a esquerda, indo da linha azul sólida à linha azul pontilhada. Devido à queda de Y_G , Y_M e Y , conforme Figura 5 e equações (37) e (38), há um deslocamento das curvas de demanda. O novo preço de equilíbrio é um preço maior para esse fator. Nos demais setores da economia, observa-se no painel b da Figura 8 uma redução no preço dos recursos naturais desse setor (N_G). Analisando pela ótica da renda, espera-se que a massa de arrendamento da terra ($q_G N_G$) seja menor, ou seja, os donos de terras e outros recursos naturais utilizados nos demais setores da economia receberão menos pela utilização desse recurso. Para o setor extrativo, devido à variação em direções opostas do valor do arrendamento e da quantidade de recursos naturais, o impacto na massa de arrendamento da terra no setor M ($q_M N_M$) desse fator após o choque dependerá da variação relativa no preço e quantidade.

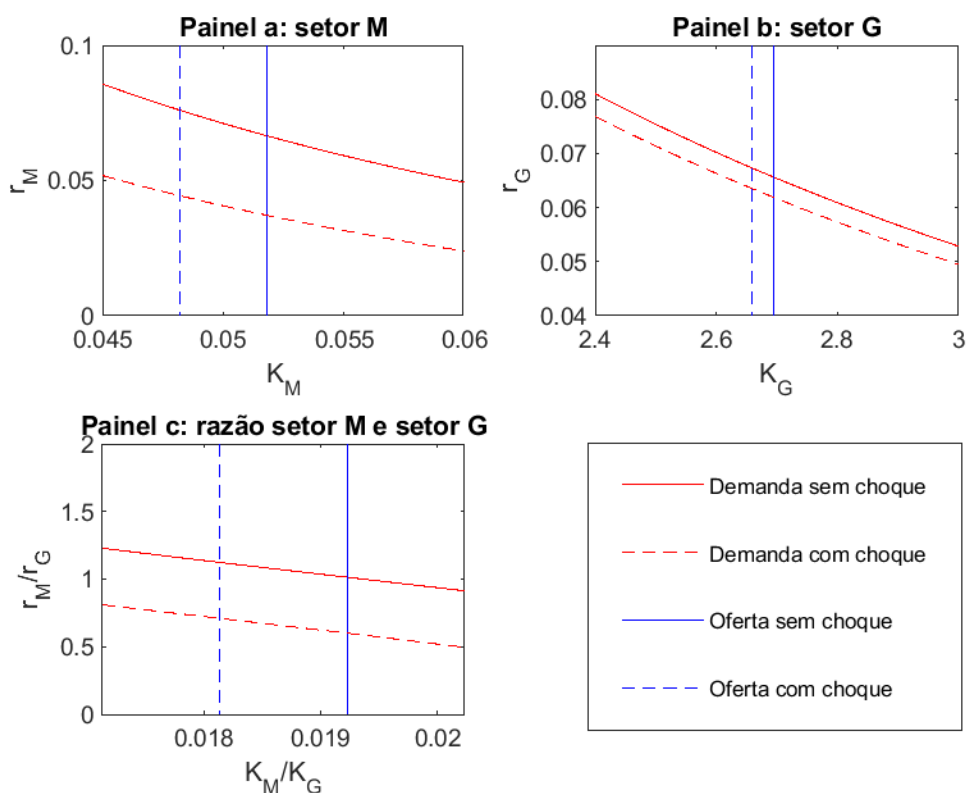
Figura 8 — Choque negativo em N_M no mercado de capital natural



Fonte: Elaboração Própria (2020).

Para analisar o impacto no mercado de capital físico, é necessário retomar uma característica importante do modelo. Choques nos fundamentos da economia alteram o nível de capital ótimo (K^*) e consequentemente impactam o valor do estoque corrente (K) de acordo com a equação (28). A Figura 9 mostra esse efeito através do deslocamento da função de oferta de capital dos dois setores analisados, painéis a e b. Em ambos os setores, há uma redução do estoque de capital físico utilizado na produção devido à redução no nível de capital ótimo (K^*). Como o choque reduziu os produtos dos dois setores e consequentemente o produto agregado (Y_{Mt} , Y_{Gt} e Y_t), há também um deslocamento das demandas de bens de capital, equações (6) e (9), de forma que, ao final, o novo ponto de equilíbrio do estoque de capital físico é menor nos dois setores e a taxa de retorno também é menor.

Figura 9 — Choque negativo em N_M no mercado de capital físico

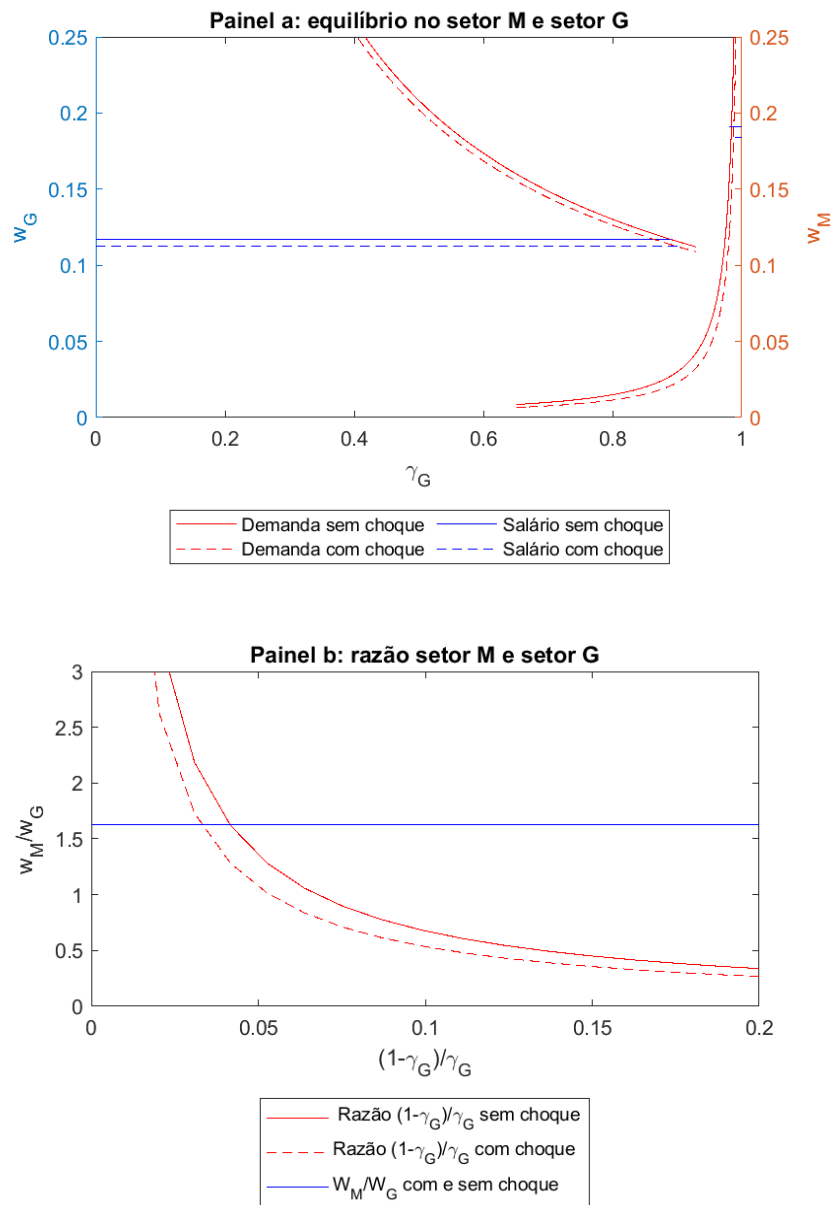


Fonte: Elaboração Própria (2020).

Por último, no mercado de trabalho apresentado pela Figura 10, há uma redução no emprego do setor M devido ao impacto que a redução dos recursos naturais exerceu no produto do setor extrativo. Os salários de ambos os setores se reduziram proporcionalmente iguais de modo a manter o salário relativo constante. Os salários relativos só se alterariam se as taxas de juros de longo prazo (r_t), as taxas de separação

(s_{Gt} e s_{Mt}) e encontro (f_{Gt} e f_{Mt}) sofressem alterações, como pode ser verificado na equação (25). Com mais capital humano desempregado e salários mais baixos, parte dos novos desempregados foi absorvida pelos demais setores da economia.

Figura 10 — Choque negativo em N_M no mercado de trabalho



6 ESTRATÉGIA DE PARAMETRIZAÇÃO

Nesta seção apresenta-se as estratégias adotadas para se obter cada um dos parâmetros e variáveis exógenas necessárias à solução do modelo sem custo de ajuste. Ao final da seção, apresenta-se a Tabela 4 com os valores para os parâmetros fixos no tempo e as referências para as figuras com as variáveis exógenas e variantes no tempo.

I Construção do estoque de Capital Humano dos setores M e G (H_{Gt}) e (H_{Mt}) e o capital humano desempregado (H_{Ut}):

A definição de Capital Humano (H_t), assim como suas partições entre os setores M (H_{Mt}), G (H_{Gt}) e desempregados (H_{Ut}) foram baseadas em Katz e Murphy (1992), que propõem a utilização de indicadores como escolaridade, idade, sexo e localidade para transformar a mão de obra em trabalhadores qualificados e não qualificados. As informações do Capital Humano foram obtidas com base nos dados da Pesquisa Nacional de Amostragem de Domicílios (PNAD IBGE, 2019). A metodologia detalhada, assim como as estatísticas descritas, se encontra no APÊNDICE B.

II Estimativa da participação da renda dos trabalhos ($1 - \alpha - \beta$) e ($1 - \theta - \phi$):

Para o cálculo desses parâmetros, escolhe-se como base o ano anterior mais próximo ao rompimento, 2014. Com base nas informações da PNAD 2014, obtemos a massa salarial total do estoque de capital humano apresentado no item anterior e para os três tipos de trabalhadores: formais, informais e conta própria separados nos setores de extração (M) e outros setores da economia (G). O motivo para a separação desses três tipos de trabalhadores será apresentado a seguir. Como a PNAD coleta dados de salários mensais no mês de referência, os mesmos foram ajustados para valores anuais, adicionando o 13º salário e as contribuições sociais para os indivíduos com empregos formais. Para esses últimos, adicionamos 28% ao salário bruto. Para os trabalhadores informais e por conta própria, adicionamos o 13º salário assumindo que, durante o ano, devido à sazonalidade de seus rendimentos, eles consigam uma renda média mensal tal que, acumulando-a no ano, seria igual a se tivessem recebido 13 salários mensais reportados na PNAD. Os salários dos trabalhadores informais e por conta própria, obviamente, não foram ajustados por encargos e previdência. Assim, somando os salários anuais ajustados, achamos a proporção da massa salarial que é de cada setor e tipo de trabalhador.

Com base nas Contas Nacionais (IBGE, 2019) obtemos, além do PIB total (Y_t), os valores adicionados dos setores G e M para 2014: $P_{Gt}Y_{Gt}$ e $P_{Mt}Y_{Mt}$, respectivamente. Ainda nas Contas Nacionais, obtemos os valores do PIB pela ótica da renda dividida em

três contas: Remuneração, Impostos e Excedente Operacional Bruto/Rendimentos Mistos. Supõe-se que a massa salarial do indicador de capital humano utilizada nesse trabalho seja igual à massa salarial dos trabalhadores apresentada nos Sistemas de Contas Nacionais (IBGE, 2019).

Os rendimentos dos trabalhadores por conta própria são contabilizados na Excedente Operacional Bruto/Rendimentos Mistos devido à dificuldade de separar os rendimentos do trabalho e do capital para esse tipo de trabalhador. Dessa forma, a conta Remuneração está subestimada. Uma alternativa para compatibilizar as informações das Contas Nacionais com os valores calculados na PNAD 2014 é utilizar a massa salarial do capital humano calculada na PNAD, explicada em mais detalhes no APÊNDICE E para calcular as proporções dos rendimentos do trabalho entre os setores e tipos de trabalhador e aplicar diretamente nos valores da renda agregada observada no Sistema de Contas Nacionais para fazer esse ajuste.

Para exemplificar como o ajuste na conta de Rendimentos do trabalho foi feito, suponha que 85% da massa salarial é remuneração dos trabalhadores formais e informais. Suponha também que a conta Remuneração das Contas Nacionais é R\$ 100,00 (valor ilustrativo para simplificação). Desta forma, a conta de remuneração nas contas nacionais é corrigida tal que $\frac{100}{R_{ajuste}} = 0.85$, onde R_{ajuste} é o valor da conta de Remuneração ajustado, ou seja, adicionado o rendimento dos trabalhadores por conta própria. Em seguida, aplica-se os percentuais das massas salariais do capital humano de cada setor calculado na PNAD no valor ajustado das contas nacionais (R_{ajuste}).

Com essa metodologia é possível distinguir o que era remuneração do trabalhador por conta própria da conta Excedente Operacional Bruto e Rendimentos Mistos para a conta Rendimentos do trabalho. Entretanto, o rendimento do trabalhador por conta própria é a soma da renda do capital físico e trabalho. É necessário separá-los para a correta identificação dos parâmetros $(1 - \alpha - \beta)$ e $(1 - \phi - \theta)$. Para isso, explica-se o cálculo para o setor extrativo (M), pois o cálculo para os demais setores da economia é análogo. Então, supõe-se que a parcela do rendimento do trabalho do setor extrativo $(1 - \alpha - \beta)$ é igual à parcela da remuneração do trabalhador por conta própria. Ou seja, se a massa de rendimentos dos trabalhadores por conta própria é C , o rendimento do trabalho corresponde a $(1 - \alpha - \beta)C$. Assim, é possível recuperar $(1 - \alpha - \beta)$ através da equação (48) e utilizando os valores ajustados das Contas Nacionais:

$$\frac{MS_{Ft} + MS_{It} + C_t(1 - \alpha - \beta)}{P_{Mt}Y_{Mt}} = (1 - \alpha - \beta) \quad (47)$$

$$(1 - \alpha - \beta) = \frac{(MS_{Ft} + MS_{It})}{(P_{Mt}Y_{Mt} - C_t)} \quad (48)$$

onde MS_{Ft} é a massa salarial do estoque de capital humano empregado formalmente, MS_{It} é a massa salarial do estoque de capital humano empregado de forma informal e C_t é a remuneração do trabalho e do capital físico do estoque de capital humano por conta própria após os ajustes mencionados para o setor M_t (extrativo).

Para $(1 - \theta - \phi)$, que é a parcela do rendimento do trabalho dos outros setores da economia, o cálculo é similar.

III Estimativa da participação da renda dos recursos naturais do setor G , θ :

Define-se como $q_{Gt}N_{Gt}$ a renda dos recursos naturais em 2014, ano base, para o setor G , no qual a partir do seu cômputo é possível estimar os parâmetros θ . Os valores de N_{Gt} são exógenos e observados. N_{Gt} representa a área considerada produtiva para o setor G para Minas Gerais e Espírito Santo, isto é, áreas de pastagem, agricultura, aquicultura, solo urbano, entre outros. Para o presente trabalho, utilizou-se as informações de uso do solo obtidas pelo Projeto MapBiomas (2018). Especificamente, para o cálculo do estoque de capital natural, utilizou-se as áreas, em hectares, agricultáveis e de pastagem e a área considerada território urbano nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo.

Para q_{Gt} utilizou-se a média das estimativas do valor de arrendamento da terra nua para áreas de lavoura e pastagens da FGV-DADOS (2020). Para as outras áreas, o valor da terra é assumido zero, como por exemplo, os rios, devido à inexistência de direitos de propriedade. Entretanto, qualquer alteração na qualidade dos rios afeta o valor das terras ao redor. Os outros tipos de solo, florestas etc. também assumimos preço igual a zero. Dessa forma, conseguiremos recuperar θ através da equação (7). Com base nisso, calculou-se o valor de $\theta = 0.031$. A título de comparação, o Banco Mundial (1994) estima o valor de 0.079 para o Brasil. Entretanto, eles consideram todos os tipos de solo.

Para encontrar N_{Mt} , assumiu-se que a distribuição do fator terra é proporcional ao tamanho do PIB do setor em relação ao PIB da economia, desta forma, tem-se:

$$N_{Mt} = N_{Gt} \frac{P_{Mt}Y_{Mt}}{P_tY_t}$$

As variáveis N_{Gt} e N_{Mt} foram obtidas para 2014 e são mantidas constantes ao longo do tempo.

IV Estimativa da participação da renda dos bens de capital do setor G , ϕ :

Sob a hipótese de retornos constantes de escala função de produção de G , e dado θ calculado, é possível recuperar ϕ através da fórmula $(1 - \phi - \theta) + \theta + \phi = 1$. Deste modo, $\phi = 0,49$.

V Estimativa da participação da renda dos bens de capital (α) do setor extrativo:

Para o cômputo do α adotou-se a hipótese de que a razão capital-trabalho é igual nos dois setores no longo prazo. O estoque considerado nessa etapa é o estoque ótimo (K_M^* e K_G^*)

$$\frac{K_{Gt}^*}{H_{Gt}} = \frac{K_{Mt}^*}{H_{Mt}} \quad (49)$$

A partir disso, divide-se a equação (6) pela (8) e a equação (9) pela (11) se obtém as razões (50) e (51), respectivamente.

$$\frac{K_{Gt}^*}{H_{Gt}} = \frac{\phi}{(1-\phi-\theta)} \frac{w_{Gt}}{r_t + \delta} \quad (50)$$

$$\frac{K_{Mt}^*}{H_{Mt}} = \frac{\alpha}{(1-\alpha-\beta)} \frac{w_{Mt}}{r_t + \delta} \quad (51)$$

Dividindo (50) por (51), encontra-se a relação entre as razões capital-trabalho:

$$\frac{K_{Gt}^*}{H_{Gt}} = \frac{\phi}{(1-\phi-\theta)} \frac{(1-\alpha-\beta)}{\alpha} \frac{w_{Gt}}{w_{Mt}} \frac{K_{Mt}^*}{H_{Mt}} \quad (52)$$

Como a razão capital-trabalho é igual para os setores G e M , pode-se simplificar (52) para:

$$\frac{\alpha}{(1-\alpha-\beta)} = \frac{\phi}{(1-\phi-\theta)} \frac{w_{Gt}}{w_{Mt}} \quad (53)$$

Assim, conseguimos recuperar α . Os termos da esquerda e o numerador do termo da direita já recuperamos nos passos anteriores.

VI Estimativa das participações das rendas dos recursos naturais (β) do setor extrativo:

Com os valores de $(1 - \alpha - \beta)$ e α , utilizando a hipótese de retornos constantes de escala, se recupera β .

VII Taxa de juros (r_t) de longo prazo:

O valor de r_t é dado pela média móvel de 72 meses da taxa de juros real dos títulos públicos de longo prazo (NTNB com os vencimentos mais longos em cada ano). Esses títulos são comercializados diariamente e remuneram, em seus vencimentos, o valor da

inflação mais uma taxa real de juros preestabelecida. Ela sinaliza a expectativa de juros de longo prazo dos agentes econômicos no período da aquisição do título público, determinante para a acumulação de estoque de capital físico (K) na economia. O critério de escolha dessa taxa de juros, assim como mais detalhes sobre o cálculo da média móvel, pode ser encontrado no APÊNDICE B .

VIII Probabilidade de encontrar emprego na economia (f_t) e perder o emprego no setor G (s_{Gt}):

Com base nos dados da PNAD (PNAD IBGE, 2019) e da PME (PME IBGE, 2020) construiu-se as estimativas para a probabilidade geral de encontrar emprego (f_t) na economia de Minas Gerais e Espírito Santo, e a estimativa da probabilidade de se perder o emprego no setor G (s_{Gt}) da economia. Em ambos os casos se utilizou a metodologia empregada no Capital Humano para calcular as probabilidades para trabalhadores equivalentes. Maior detalhamento sobre a construção de ambas variáveis, assim como estatísticas descritivas, pode ser encontrado no APÊNDICE D .

IX Importância relativa do setor M (λ):

Para a estimação desse parâmetro, aproveita-se dois sistemas de equações derivadas do modelo macroeconômico. O primeiro é através das equações (1) e (29) que se denomina como Sistema (29), onde se utiliza as informações coletadas na PNAD sobre estoque de capital humano setorial (H_G e H_M) e salários (w_G e w_M). O segundo sistema, denominado Sistema (58), é através equações (1) e (56), onde também se utiliza as informações do PIB observadas nos dados. A equação (56) representa a razão dos PIBs dos setores M e G. Para se obter a razão dos preços multiplica-se ambos os lados da equação (2) por Y_{Mt} , o que resulta na equação (54), e a equação (3) por Y_{Gt} , tendo como resultado (55). Obtém-se a equação (56) dividindo (54) por (55).

$$P_{Mt} Y_{Mt} = \lambda_t Y_{Mt}^{\frac{\rho-1}{\rho}} Y_t^{\frac{1}{\rho}} \quad (54)$$

$$P_{Gt} Y_{Gt} = (1 - \lambda_t) Y_{Gt}^{\frac{\rho-1}{\rho}} Y_t^{\frac{1}{\rho}} \quad (55)$$

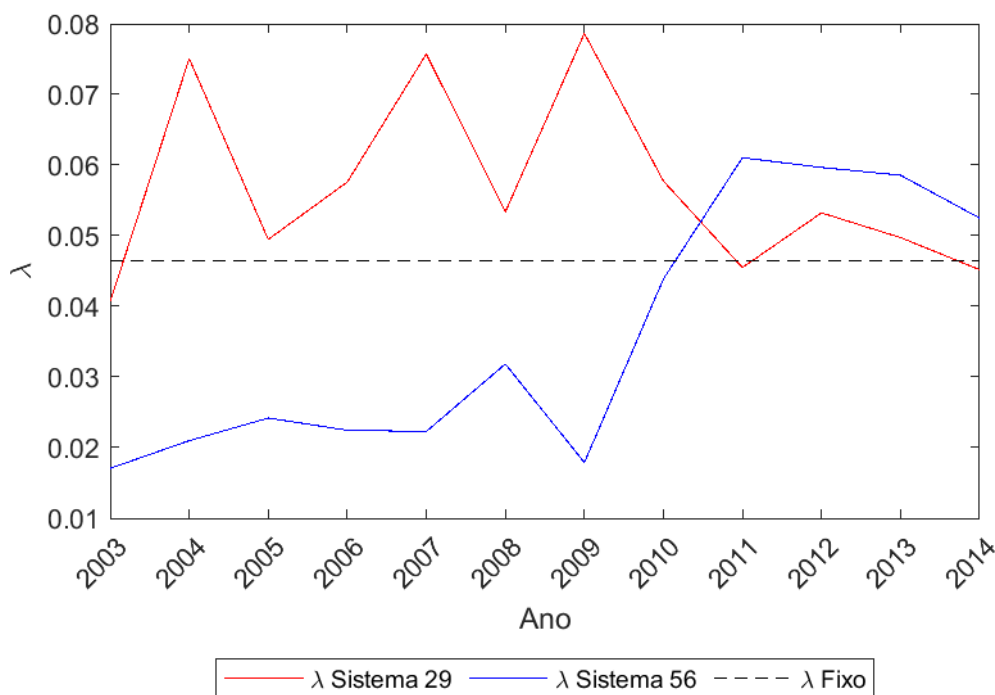
$$\left(\frac{Y_{Mt}}{Y_{Gt}} \right)^{\frac{\rho-1}{\rho}} = \frac{(1 - \lambda_t) \text{PIB}_{Mt}}{\lambda_t \text{PIB}_{Gt}} \quad (56)$$

Para ambos os sistemas, utiliza-se somente informações de 2002 a 2014, período pré-rompimento. Para se obter λ , supõe-se que $P_G = 1$, para todos os períodos, de modo que a restrição $PY = P_G Y_G + P_M Y_M$ seja $Y = Y_G + P_M Y_M$. Nota-se também que P_M nesse caso corresponde aos preços relativos do setor M, com relação ao setor G.

Dessa forma, as quantidades dessa economia são valoradas com relação ao produto do setor G. Essa escolha parece ser razoável, visto que o setor G representa aproximadamente 96% de todo o PIB de Minas Gerais e Espírito Santo. Outro ponto importante a ser esclarecido é que essa hipótese foi imposta somente para a identificação do parâmetro λ . O modelo utilizado para avaliar o impacto permite que os preços de ambos os setores variem.

Esclarecidas as hipóteses feitas nessa etapa da identificação dos parâmetros, soluciona-se os Sistemas (29) e (58) separadamente para cada ano de 2003 a 2014. As variáveis endógenas são Y_{Mt} e λ_t . Assim, é possível obter os resultados presentes na Figura 11.

Figura 11 — Cálculo do λ fixo utilizado



Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

O parâmetro λ_t , portanto, é a média entre o λ médio do sistema (29) e o λ médio do sistema (58) ao longo do tempo. Para deixar mais claro, o parâmetro é calculado utilizando (57).

$$\lambda = \frac{0,5}{12} \sum_{t=2003}^{2014} \lambda_{1,t} + \frac{0,5}{12} \sum_{t=2003}^{2014} \lambda_{2,t} = 0,04 \quad (57)$$

X Produtividade total dos fatores A_{Mt} e A_{Gt} sob a hipótese de estado estacionário

Neste item obtém-se os valores de A_{Mt} e A_{Gt} , admitindo que a economia é observada em estado estacionário. Esses valores serão ajustados no item XIV. Para isso, as estimativas são feitas utilizando a especificação do equilíbrio estacionário de longo prazo, (32) e (33).

Seguindo, então, é possível estimar as produtividades utilizando dois sistemas de equações distintos que compõem o modelo na ausência de custo de ajuste para o capital. O primeiro é formado pelas equações (1), (32), (33) e (56), e soluciona-se para Y_{Gt} , Y_{Mt} , A_{Gt} e A_{Mt} . O segundo é formado pelas equações (1), (29), (32) e (33), pois também podemos utilizar as informações da PNAD para calcular as massas salariais dos setores G e M, $H_{Gt}w_{Gt}$ e $H_{Mt}w_{Mt}$ respectivamente, pois elas não estão disponíveis para essa abertura setorial e regional no Sistema de Contas Nacionais (SCN).

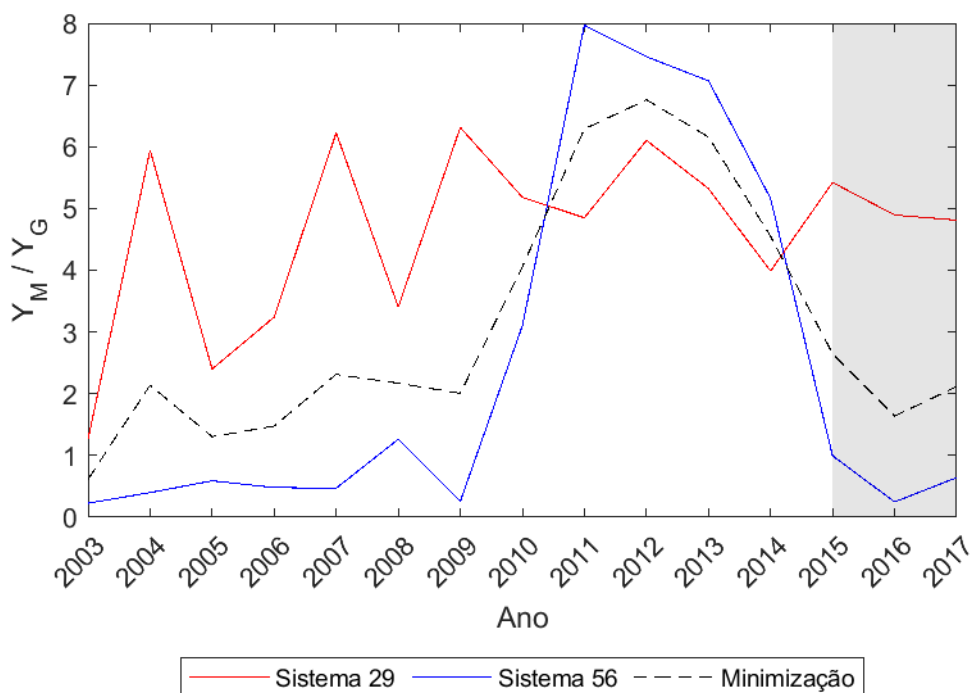
Entretanto, como as informações são de fontes diferentes, elas não são exatamente iguais devido à metodologia abordada em cada publicação, PNAD e SCN. Para aproveitar todas essas informações disponíveis opta-se pela seguinte estratégia⁷.

Inicialmente, recupera-se $\frac{Y_{Mt}}{Y_{Gt}}$ e, com base nas equações (29) e (56), através da minimização da função perda dada por (58) para cada ano individualmente, incluindo os anos após o rompimento. Esse procedimento é semelhante ao método dos momentos generalizados com uma matriz de pesos igual à identidade. É importante destacar que, para os últimos anos da amostra, os valores encontrados para $\frac{Y_{Mt}}{Y_{Gt}}$ já são aqueles impactados pelo desastre. A Figura 12 apresenta os resultados das razões $\frac{Y_{Mt}}{Y_{Gt}}$ para ambos os momentos e a estimada pelo processo de minimização.

$$L_t = \left(\frac{PIB_{Mt}}{PIB_{Gt}} - \frac{\lambda_t}{(1 - \lambda_t)} \left(\frac{Y_{Mt}}{Y_{Gt}} \right)^{\frac{\rho-1}{\rho}} \right)^2 + \left(\frac{w_{Mt} H_{Mt}}{w_{Gt} H_{Gt}} - \frac{(1 - \alpha - \beta)}{(1 - \phi - \theta)} \frac{\lambda}{(1 - \lambda)} \left(\frac{Y_{Mt}}{Y_{Gt}} \right)^{\frac{\rho-1}{\rho}} \right)^2 \quad (58)$$

⁷ Destaca-se que para a solução de ambos os sistemas será necessário saber o valor da elasticidade de substituição (ρ) que será explicado na próxima subseção. Entretanto, para ficar mais fácil a compreensão, a estimação desse parâmetro também depende da metodologia de estimação das produtividades, como será visto.

Figura 12 — Evolução temporal de $\frac{Y_{Mt}}{Y_{Gt}}$

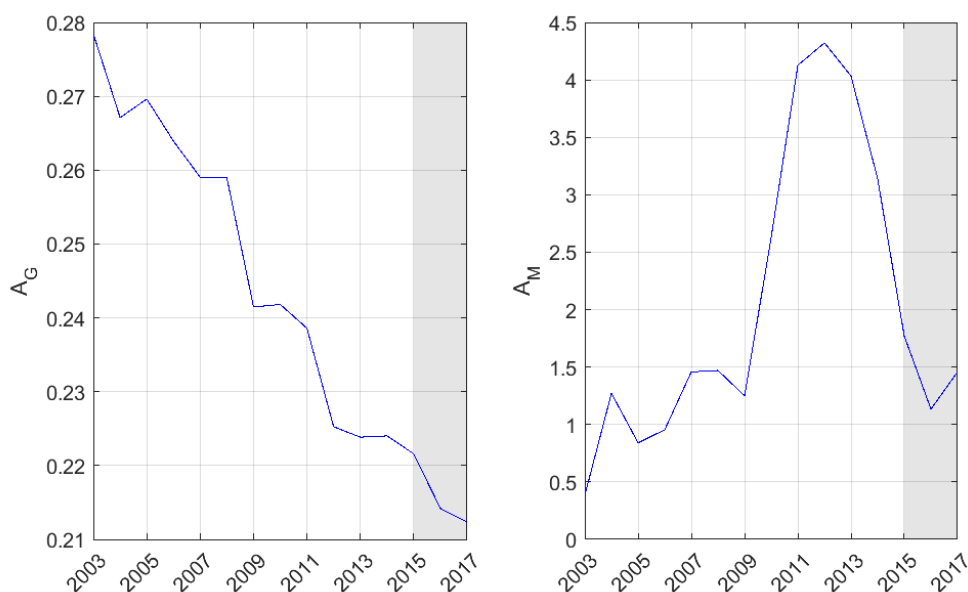


Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

Obtido $\frac{Y_M}{Y_G}$, volta-se para a equação (1) para encontrar Y_{Gt} e Y_{Mt} . O passo subsequente é o cálculo das Produtividades Totais dos Fatores A_{Gt} e A_{Mt} pelas equações (32) e (33), as funções de produção de longo prazo. A evolução das produtividades e do quanto de cada setor são apresentados na Figura 13.

Adota-se a estratégia de utilizar as funções de produção (32) e (33), pois para o cálculo dos estoques de capital físico de curto prazo (K), é necessário ter uma estimativa do estoque de capital físico de longo prazo (K^*) e, para isso, se faz necessário obter os valores das produtividades. Assim, como pode ser observado, para a calibração do modelo, será necessário aplicar um método recursivo de estimação de produtividades e estoques de capital físico de curto e longo prazo que será explicado nas próximas seções.

Figura 13 — Produtividades Totais dos setores M e G



Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

XI Elasticidade de substituição entre os setores (ρ):

Para a estimação da elasticidade de substituição entre os setores, parte-se do fato de o setor extrativo ser intensamente influenciado por choques externos, uma vez que seus produtos são considerados commodities no mercado internacional. Dessa forma, choques externos, como por exemplo, mudanças no preço internacional do minério de ferro, seriam capturados pelo modelo por variações na produtividade do setor extrativo. Para clarificar, suponha que todo o produto do setor extrativo seja exportado e, em troca, os estados de MG e ES recebam o produto Y'_M que não é produzido nacionalmente.

Desse modo, podemos dizer que o setor M produz Y'_M para o mercado nacional. Assim, se o preço do produto Y_M fica mais caro no mercado internacional é possível comprar mais Y'_M com a mesma infraestrutura. No nosso modelo, interpreta-se o aumento da quantidade de Y'_M devido ao aumento do preço internacional de Y_M como um aumento na produtividade do setor M.

Assim, estima-se a elasticidade de substituição ρ de modo a minimizar a diferença entre a variação da produtividade do setor M e o preço internacional do minério de ferro⁸. As variáveis são transformadas em número índice com base em 2003 e a minimização é feita no período pré-rompimento, de 2003 a 2014.

⁸ US\$/Mton negociado Tianjin (FMI, 2009).

Por último, devido à complexidade dessa estimação, visto que para cada valor de ρ é necessário reestimar o valor do λ e calcular as produtividades (itens IX e X dessa seção), define-se um intervalo para ρ abrangente o suficiente para manter a flexibilidade do modelo. Lembrando que valores de $\rho < 1$ implicam que os setores são complementares e, para $\rho > 1$, eles são considerados substitutos. Para $\rho = 1$, a função CES não é definida, mas no limite ela converge para a função Cobb-Douglas.

Como não se tem conhecimento sobre trabalhos similares, com relação à abertura setorial e estrutura, e devido à interpretação do setor extrativo nesse modelo ser como um setor prioritariamente para exportação, para embasar a definição do intervalo, propõe-se usar a literatura de bens negociáveis e não negociáveis no mercado internacional (mais habitualmente conhecidos na literatura econômica pelos termos em inglês, *tradables* e *non-tradables*). A Tabela 2 apresenta os trabalhos analisados em que a metodologia é semelhante à utilizada neste estudo. Especificamente, a semelhança está na utilização da tecnologia de produção do tipo CES e a economia ser dividida em dois setores. Assim, define-se o intervalo entre 0,4 e 2 crescendo de 0,05 em 0,05 e evitando os valores maiores 0,9 e menores que 1,1 devido à função CES não ser definida para valores próximos a 1. Desse modo, o intervalo mantém a flexibilidade adequada do modelo, não sendo necessário impor a relação entre os setores extrativos e demais setores da economia.

Tabela 2 — Resumo dos trabalhos que embasaram a escolha da elasticidade de substituição entre o setor extrativo e demais setores no modelo

Autor(es)	Período de referência	Elasticidade	Base de dados	Base de dados	Método
Stockman e Tesar (1995)	1975	0,44	Dados transversais (PIB per capita)	30 países, sendo 17 em desenvolvimento e 13 industrializados	OLS
		[1,22;1,27]	Painel	13 países em desenvolvimento	
Ostry e Reinhart (1992)	1968-1987	0,76	Painel	4 países da América Latina, incluindo o Brasil	GMM
		0,655	Painel	5 países da Ásia	
		1,279	Painel	4 países da África	

Autor(es)	Período de referência	Elasticidade	Base de dados	Base de dados	Método
Mendoza (1992)	1975	0,74	Dados transversais (PIB per capita)	13 países desenvolvidos (os mesmos 13 do Stockman e Tesar (1995))	OLS
Cashin e McDormott (2003)	1970-1995	[0,63,3,5]	Painel	5 países desenvolvidos	GMM
Rozada et al. (2004)	1993-2001	[0.40,0,48]	Séries de tempo	Argentina	VEC
Corsetti, Dedola e Leduc (2008)	Literatura	0,74	Mendoza (1991)	Dados dos EUA	OLS
Kravis e Lipsey (1986)	1975	0,44	Dados transversais (PIB per capita)	30 países, sendo 17 em desenvolvimento e 13 industrializados	OLS

Fonte: Elaboração própria (2020).

A equação (59) resume a estratégia utilizada para a escolha da elasticidade de substituição entre os setores (ρ).

$$\min_{\hat{\rho} \in P} \sum_{t=2003}^{2014} (I_{AMt}(\hat{\rho}) - I_{PFt})^2, \quad (59)$$

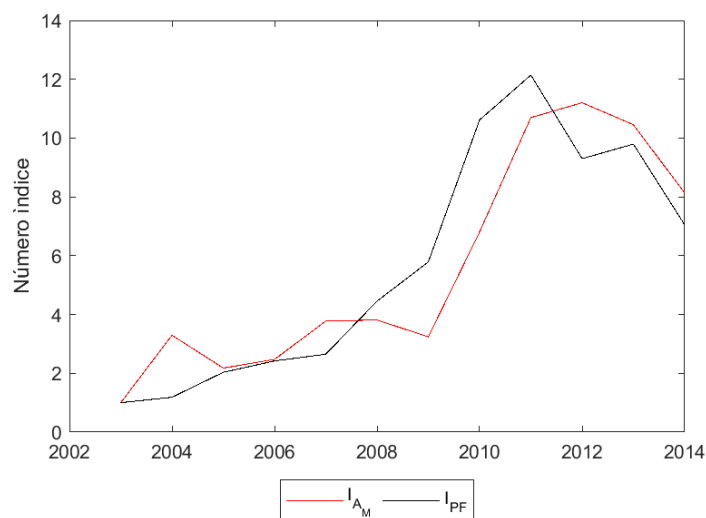
onde $I_{AM}(\hat{\rho})$ é a função que tem ρ como argumento e gera a produtividade do setor M como explicado no item anterior, transformando-a em número índice com base em 2003, I_{PFt} é o número índice do preço internacional do minério de ferro e $P \in [0,4; 0,9] \cup [1,1; 2]$. A Tabela 3 apresenta o erro quadrático médio (EQM) para os diferentes valores de ρ . É evidente que para valores próximos a 1, há um aumento substancial no EQM demonstrando uma característica da utilização da função tipo CES. Ela não é definida para $\rho = 1$. Caso o parâmetro ρ fosse igual à unidade, ou seja, elasticidade unitária, a CES convergiria para a função Cobb-Douglas e o modelo deveria ser atualizado com essa função. Entretanto, observa-se na Tabela 3 que o EQM tem comportamentos diferentes para intervalos distintos de valores de ρ . O EQM é crescente em $\rho < 0,9$. Para valores acima de 1, o EQM é decrescente até $\rho = 1,6$ e crescente para valores maiores. Desse modo, seu ponto mínimo é em $\rho = 1,6$. A Figura 14 compara o índice da produtividade do setor extrativo (I_{AM}) com $\rho = 1,6$ e o índice do preço do minério de ferro e comprova a próxima relação que há entre as duas variáveis.

Tabela 3 — Erro Quadrático Médio para diferentes valores de ρ

P	EQM	ρ	EQM
0,40	39,21	1,25	1179,34
0,45	39,92	1,30	309,57
0,50	40,68	1,35	102,63
0,60	35,56	1,40	38,35
0,65	42,37	1,45	15,29
0,70	43,27	1,50	6,60
0,75	44,19	1,55	3,54
0,80	45,09	1,60	2,87
0,85	45,89	1,75	5,04
0,90	46,52	1,80	6,06
0,95	46,88	1,85	7,05
1,00	29319219	1,90	8,00
1,05	119203	2,00	9,69
1,10	7146		

Fonte: Elaboração Própria (2020).

Figura 14 — Comparação entre os índices de produtividade do setor M (I_{AM}) e de preço internacional do minério de ferro (I_{PF})



Fonte: Elaboração própria (2020) a partir de dados PNAD IBGE e PME IBGE.

XII Identificação das taxas de separação e encontro setorial (s_{Mt} , f_{Mt} e f_{Gt}):

Para a solução do modelo desenvolvido é necessário identificar as taxas de separação e encontro dos setores analisados. Devido ao setor G compor todos os setores da economia exceto o setor extrativo, identifica-se a taxa de separação do setor G (s_{Gt}) utilizando os dados da PNAD contínua para os anos de 2012 a 2017. Entre 2003 a 2011 utilizou-se as informações da taxa de separação do setor G com base na dinâmica da variável construída a partir da Pesquisa do Emprego Mensal (PME).

Essa taxa representa a probabilidade de se perder o emprego no setor G. Para a probabilidade de encontrar emprego (taxa de encontro) nesse setor, não é possível saber em qual setor o indivíduo estava procurando emprego nas pesquisas utilizadas, então, identifica-se a taxa de encontro no setor G juntamente com as taxas de separação e encontro no setor M. Como essas pesquisas não são representativas para os setores da CNAE, adota-se essa estratégia para ser mais conservador no estudo.

Assim, para a identificação desses parâmetros, resolve o sistema de equações (13), (14), (25) e a equação (60), que representa a probabilidade de encontrar emprego agregada da economia e $\eta_t = \frac{H_{UMt}}{H_{Ut}}$.

$$f_t = \eta_t f_{Mt} + (1 - \eta_t) f_{Gt} \quad (60)$$

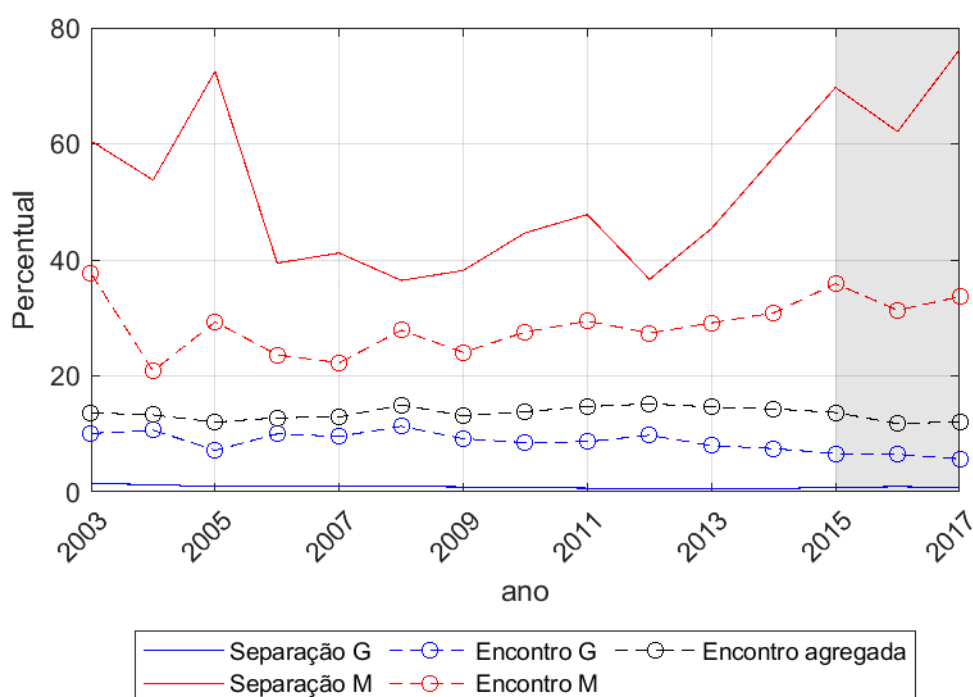
A variável f_t também pode ser calculada utilizando as bases da PNAD Contínua e PME. Dessa forma, soluciona-se o sistema acima para as variáveis (s_{Mt} , f_{Mt} , f_{Gt} e η_t). A Figura 15 apresenta a dinâmica das variáveis entre 2003 a 2017.

$$s_{Mt} H_{Mt} = f_{Mt} H_{UMt} \quad (13)$$

$$s_{Gt} H_{Gt} = f_{Gt} H_{UGt} \quad (14)$$

$$\frac{w_{Gt}}{w_{Mt}} = \frac{f_{Mt}}{f_{Gt}} \frac{(r_t + f_{Gt} + s_{Gt})}{(r_t + f_{Mt} + s_{Mt})} \quad (25)$$

Figura 15 — Taxas de separação e de encontro em MG e ES



Fonte: Elaboração própria (2020) a partir de dados PNAD IBGE e PME IBGE.

XIII Coeficiente de ajuste do estoque de capital ao seu nível ótimo (ν):

Para a identificação do parâmetro ν , pressupõe-se que ela é igual para os dois setores. O estoque de capital físico da economia é dado por $K_t = K_{Gt} + K_{Mt}$ e o estoque ótimo, de forma similar é $K_t^* = K_{Gt}^* + K_{Mt}^*$. O nível de estoque ótimo utilizado para a identificação do ν é aquele obtido através do modelo sem o custo de ajuste apresentado na subseção 3.5. Dessa forma, ν é escolhido de forma a minimizar a função perda $\min_{\nu} \sum_{t=2004}^{2014} \left[\frac{FBK_t}{PIB_t} - \frac{((1+\delta)K_t(\nu) - K_{t-1}(\nu))}{Y_t} \right]^2$, onde $\frac{FBK_t}{PIB_t}$ é a formação bruta de capital físico dividida pelo PIB do Brasil coletada no IBGE e $\frac{((1+\delta)K_t(\nu) - K_{t-1}(\nu))}{Y_t}$ é o correspondente no modelo apresentado. Assim, supõe-se que essas razões FBK/PIB do Brasil seriam similares às dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo. É importante notar que, nesse processo, K_t também é endógeno, pois depende do próprio valor de ν (equação (28)).

XIV Estoque de capital físico (K_G e K_M) e ajustes das produtividades setoriais (A_G e A_M):

A inclusão do custo de ajuste para o estoque de capital físico faz com que ele seja mais suave entre os anos, pois há um custo para passar de um nível ótimo para o outro. Para calcular o estoque de capital físico nos setores, adota-se a seguinte estratégia. Supõe-se que em 2003 os níveis de capital ótimo setoriais (K_{Gt}^* e K_{Mt}^*) são iguais aos níveis de capital físico corrente (K_{Gt} e K_{Mt}), ou seja, em 2003 a economia estava no estado estacionário. Dessa forma, dado o valor ν , podemos utilizar a equação (28) para calcular o estoque de capital em cada ano subsequente. Utiliza-se 2003 como o ponto inicial, pois quanto mais distante ele está, menor o seu impacto no estoque de capital físico corrente.

Entretanto, esse ajuste no estoque de capital implica que as produtividades dos setores calculadas no subitem X também devam ser ajustadas, pois elas foram calculadas na ausência de custo de ajustamento do capital. Elas são importantes para se ter um ponto inicial e uma primeira estimativa do nível de capital ótimo (K^*) e, consequentemente, capital corrente (K). Dessa forma, alterações nas produtividades implicam em ajustes em K^* que implicam em alterações em K que implicam novamente alterações nas produtividades. Sendo necessário um método iterativo para resolver conjuntamente essas três variáveis.

O procedimento completo é o seguinte:

1. Resolve $K_G^{*0}, K_M^{*0}, H_G^0, H_M^0$ e w_M^0/w_G^0 através do modelo de longo prazo apresentado na subseção 3.5, tomando A_{Mt} e A_{Gt} conforme o procedimento apresentado em XI.
2. Calcula K_G^0 e K_M^0 usando a equação (28).
3. Resolve o sistema (1), (4), (5) e (29) para Y_G^0, Y_M^0, A_G^0 e A_M^0 usando como insumos $H_G^0, H_M^0, w_M^0/w_G^0, K_G^0$ e K_M^0 .
4. Soluciona-se simultaneamente:
 - a. De posse de A_G^0, A_M^0, K_G^0 e K_M^0 , soluciona-se o modelo apresentado na seção 3 e recupera-se Y_G^1, Y_M^1, H_G^1 e H_M^1 .
 - b. Soluciona-se o modelo sem custo de ajuste do capital (apresentado na subseção 3.5,) colocando as produtividades A_G^0 e A_M^0 e recupera-se K_G^{*1} e K_M^{*1} .
5. Em posse de K_G^{*1} e K_M^{*1} , calcula-se K_G^1 e K_M^1 através da equação (28).
6. Com Y_G^1 e Y_M^1, H_G^1 e H_M^1 calculado no passo (4.a) conjuntamente com K_G^1 e K_M^1 do passo (5), calcula-se as produtividades A_G^1 e A_M^1 através das equações de produção (4) e (5).
7. Em posse de K_G^1, K_M^1, A_G^1 e A_M^1 , retorna ao passo (IV). Esse procedimento é repetido até que $\sum_{t=2003}^{2014} (K_{Mt}^\tau - K_{Mt}^{\tau-1})^2$ e $\sum_{t=2003}^{2014} (K_{Gt}^\tau - K_{Gt}^{\tau-1})^2$ são menores do que 10^{-5} ao mesmo tempo, onde τ representa τ -ésima interação.

Através desse procedimento, as variáveis que foram inicialmente calculadas desconsiderando o custo de ajustamento do estoque de capital são corrigidas para considera-lo.

Como critério de convergência, utiliza-se a função de erro quadrático médio para cada setor separadamente e, assim, considera-se as diferentes velocidades de convergências do estoque de capital dos setores devido às diferenças na escala.

Por último, é importante destacar que, no cenário onde o desastre aconteceu, as estimativas dos K_G e K_M nos passos (2) e (5) também consideram a perda de capital físico devido ao rompimento. Por exemplo, suponha que, em 2014, há um estoque de capital físico no setor M de $K_{M,2014}$. Houve uma destruição no montante no valor de D_M no setor M e D_G no setor devido ao desastre. Para o cálculo de $K_{M,2015}$ e $K_{M,2016}$ seguiu-se como as equações (61) e (62), respectivamente.

$$K_{M,2015} = vK_{M,2015}^* + (1 - v) \left(K_{M,2014} - \frac{1}{6} D_M \right), \quad (61)$$

$$K_{M,2016} = vK_{M,2016}^* + (1 - v) \left(K_{M,2015} - \frac{5}{6} D_M \right). \quad (62)$$

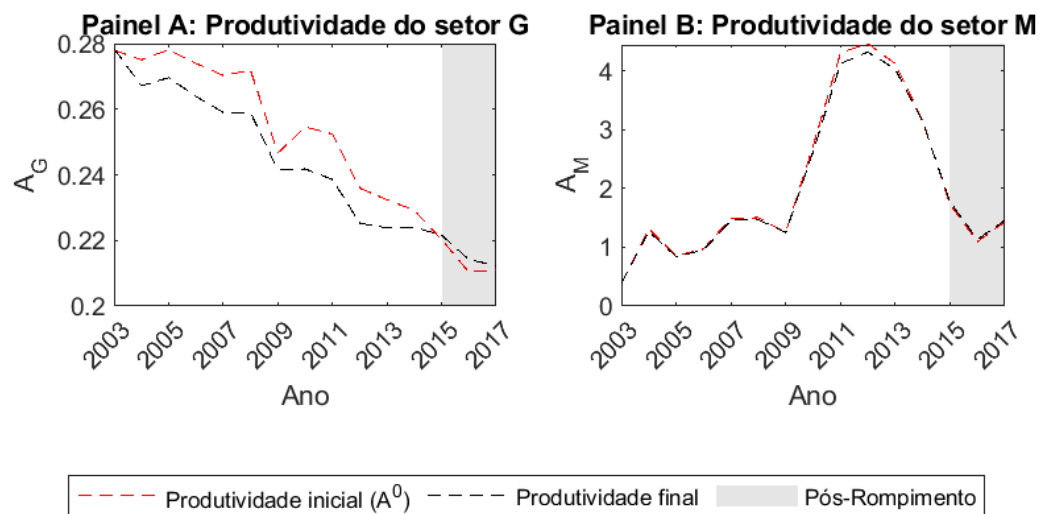
Como o desastre aconteceu em novembro de 2015, houve a destruição do capital que seria empregado para a produção dos setores M e G nos dois últimos meses do ano. Assim, utiliza-se a fração de 1/6 do montante total destruído para representar o impacto do desastre no estoque de capital físico que influenciou a produção em 2015. O restante da destruição foi em 2016. No tocante à magnitude do choque, adotou-se uma perda de 6,4% de $K_{M,2014}$. Esse valor representa a média do valor adicionado da Mineradora Samarco S.A. no PIB do setor M em Minas Gerais e Espírito Santo.

Para o setor G, utilizou-se a mesma estratégia, porém com valor do estoque de capital físico diferente. Aplicou-se um choque equivalente a 0,5% do Capital G em 2014, aproximadamente R\$ 600 milhões, o que inclui as declarações de perda do relatório do Grupo Força-Tarefa (2016)⁹ na região do Alto Rio e os demais impactos ao longo dos 45 municípios. Novamente, aplicou-se 1/6 desse choque em 2015 e 5/6 em 2016.

A Figura 16 apresenta a evolução das produtividades dos setores ao começo da interação e ao final da interação. É possível ver que houveram algumas alterações nas produtividades durante o processo interativo, pequenas. A Figura 17 apresenta as dinâmicas do estoque de capital corrente (K) e em seu nível ótimo (K^*). A evolução de K ficou mais suave, de acordo com o esperado, enquanto que o estoque ótimo (K^*) apresenta maior variação devido à ausência de custos de ajustes.

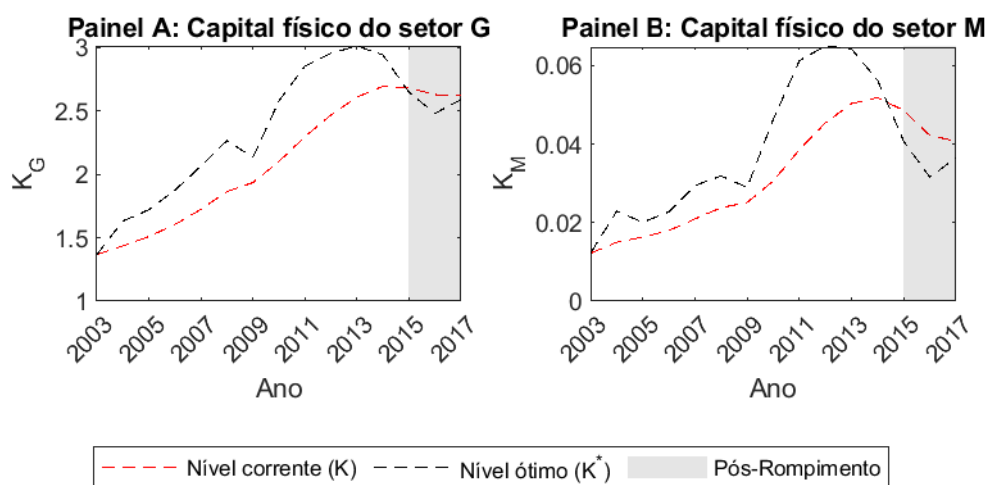
⁹ MINAS GERAIS. Secretaria de estado de desenvolvimento regional, política urbana e gestão metropolitana. Grupo Força-Tarefa. **Avaliação dos Efeitos e Desdobramentos do Rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG**. Belo Horizonte: Secretaria de Estado de Desenvolvimento Regional, Política Urbana e Gestão Metropolitana, 2016.

Figura 16 — Evolução das produtividades iniciais e finais do setor extrativo (M) e demais setores (G)



Fonte: Elaboração Própria (2020).

Figura 17 — Evolução do estoque de capital físico do setor extrativo (M) e demais setores (G)



Fonte: Elaboração Própria (2020).

Por fim, a Tabela 4 apresenta as variáveis exógenas e seus correspondentes valores para o modelo com custo de ajuste.

Tabela 4 — Lista da parâmetros e variáveis exógenas

Parâmetros	Valores
Participação da renda dos bens de capital (α)	0,11
Participação da renda dos recursos naturais (β)	0,73
Participação da renda capital humano ($1 - \alpha - \beta$)	0,16
Participação da renda dos recursos naturais (θ)	0,03
Participação da renda capital humano ($1 - \phi - \theta$)	0,48
Elasticidade de substituição entre setores (ρ)	1,60
Importância relativa do setor extrativo (λ)	0,046
Custo de ajuste do capital físico (ν)	0,26
Taxa de depreciação do capital físico (δ)	0,06
Taxa de separação do setor G (s_G)	Figura 15
Taxa de separação do setor M (s_M)	Figura 15
Taxa de encontro da economia (f)	Figura 15
Taxa de encontro do setor G (f_G)	Figura 15
Taxa de encontro do setor M (f_M)	Figura 15
PTF setor G (A_G)	Figura 16.A
PTF setor M (A_M)	Figura 16.B
Estoque de capital físico setor G (K_G)	Figura 17.A
Estoque de capital físico setor M (K_M)	Figura 17.B
Estoque de recursos naturais do setor G (N_G)*	36,18 mi ha
Estoque de recursos naturais do setor M (N_M)	Figura 19
Estoque de capital humano (H)	APÊNDICE B
Taxa de juros de longo prazo (r)	APÊNDICE C

Fonte: Elaboração própria (2020).

Observação: * O valor exato é 36.184.343,1836216 hectares. ** Calculado através da hipótese de que o mesmo percentual da produção no setor extrativo no PIB dos estados é a quantidade de hectares utilizada no setor. O valor é 2.506.788,46343307 hectares.

7 ANÁLISE DO AJUSTAMENTO DO MODELO

O objetivo desta seção é analisar o desempenho do modelo desenvolvido nas seções anteriores para replicar a economia de Minas Gerais e Espírito Santo para o período pré-desastre de 2002 a 2014. A Figura 18 apresenta as variáveis observadas e as estimações do modelo. Como pode ser visto, o primeiro painel mostra o PIB agregado e é possível ver que há uma aderência alta aos valores observados com os estimados. O mesmo acontece para o setor G, tanto para o PIB quando para o estoque de capital humano.

Para o setor M, é preciso um pouco mais de atenção na interpretação do seu ajuste. Para as equações (29) e (56), é possível observar nos dados todas as variáveis que as compõem. Após identificado o parâmetro λ e ρ , observa-se que há uma diferença entre o que se observa nos dados e o que as equações indicam. Enquanto a equação (56) faz com que o mercado de produto se ajuste perfeitamente, a equação (29) faz com que o mercado de trabalho se ajuste melhor.

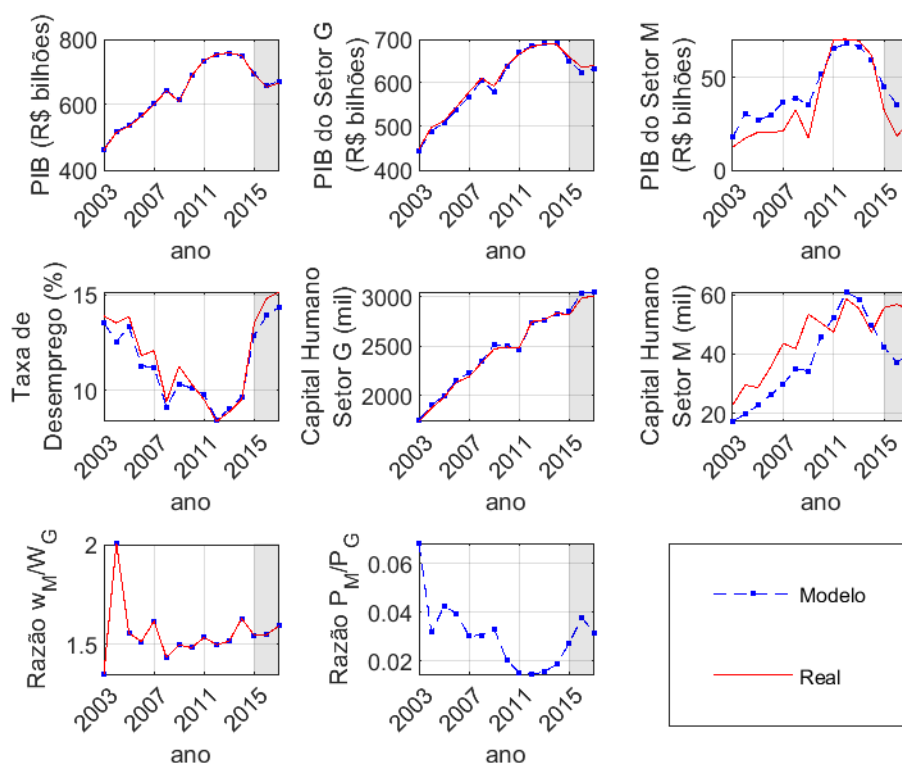
Essa situação pode ser originada do fato de se utilizar bases de dados com metodologias de coletas diferentes, como por exemplo o Sistema de Contas Nacionais e a PNAD. Trata-se de um problema de superidentificação. Há mais informações que o necessário para solucionar o modelo.

Para aproveitar toda a informação disponível, se faz uma minimização entre a diferença do que seria observado utilizando somente equações (29) e o que seria observado através da equação (56), somente, assim como detalhado na seção anterior na estimação das produtividades (seção 6, item X). Desse modo, observa-se que na solução do modelo, o ajuste é uma média ponderada entre aquele que seria observado utilizando somente a equação (56) ou aquele utilizando somente (29), onde os pesos são escolhidos de forma a minimizar a distância entre os dois sistemas.

Por fim, observa-se também que a estimativa para os salários relativos e taxas de desemprego também estão próximos do que foi observado nos dados. Assim, o modelo desenvolvido e os valores dos parâmetros conseguem se ajustar de forma razoável à economia dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo no período pré-rompimento.

A Figura 18 também mostra o ajuste das variáveis analisadas após o rompimento, área cinza, que inclui as hipóteses sobre como a economia foi afetada, discutidas na seção anterior. É possível ver que as variáveis acompanham de forma próxima a dinâmica e o nível dos valores observados, com exceção do capital humano do setor extrativo.

Figura 18 — Análise do ajustamento do modelo



Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

Por fim, para mensurar de forma mais objetiva o nível de explicação do modelo, calcula-se um pseudo- R^{210} para o período pré-rompimento, de 2003 a 2014, e período todo, de 2003 a 2017. A Tabela 5 apresenta os resultados. Em ambos os períodos, é possível ver que o modelo se ajusta perfeitamente ao PIB total e à razão salarial. Para o capital humano do setor M, o ajuste é de 36% antes do rompimento e 7% quando inclui o período pós-rompimento. Há piora no ajuste como discutido anteriormente. Para as outras variáveis, entretanto, os valores ainda são muito elevados. O menor deles é para a taxa de desemprego cujo pseudo- R^2 está em 94,36%.

¹⁰ R^2 é um indicador que mede o ajustamento de modelos econométricos lineares. Como o modelo desenvolvido não é desse tipo, utiliza-se o termo pseudo- R^2 . Sua interpretação deve ser feita com cautela para modelos não lineares, mas nos dá uma ideia do ajustamento do modelo sem a necessidade de compará-lo com outros modelos alternativos, como é o caso de outros indicadores de ajuste conhecidos como critérios de informação. Pseudo- $R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (y_t - \hat{y}_t)^2}{\sum_{t=1}^T (y_t - \bar{y})^2}$, onde y_t é o valor observado em t, $\hat{y}_t$ é o valor previsto pelo modelo em t, $\bar{y}$ é a média da variável observada para o período em análise e T é o tamanho do intervalo que é feito a análise.

Tabela 5 — Indicador de ajustamento do modelo – Pseudo- R^2 (%)

Variável	2003-2014	2003-2017
PIB	100,00	100,00
PIB do setor G	99,99	99,99
PIB do setor M	98,73	98,11
Taxa de desemprego	94,36	94,81
Capital humano do setor G	99,66	99,58
Capital humano do setor M	36,36	7,54
Razão salarial	100,00	100,00

Fonte elaboração própria (2020).

8 CONSTRUÇÃO DAS VARIÁVEIS CONTRAFACTUAIS

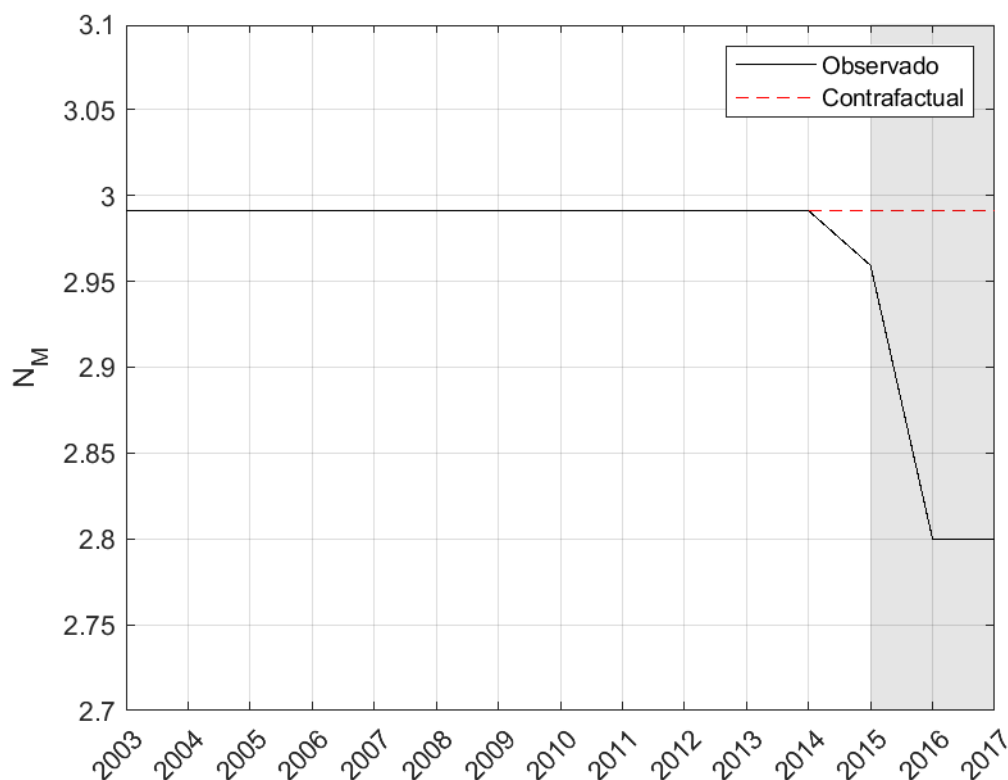
A fim de mensurar o impacto do rompimento da Barragem de Fundão na economia de Minas Gerais e Espírito Santo, é necessário que se estime o cenário no qual o desastre não tivesse ocorrido. A intuição do cenário contrafactual construído nessa seção se assemelha com a estimação do estado sintético elaborado pela FGV no Produto 4 do EDT 2 (Fundação Getulio Vargas, 2019), apesar dos métodos de construção serem diferentes. Nesta seção, discute-se as estratégias para a construção dos cenários contrafactuals após o rompimento, em 2015, para os parâmetros e variáveis exógenas no modelo apresentadas na Tabela 4.

Os parâmetros e variáveis exógenos constantes no tempo ($\alpha, \beta, \phi, \theta, \rho, \nu, \delta, N_G, N_M$), por suposição, não são afetados pelo rompimento, com exceção do estoque de recursos naturais do setor extrativo (N_M). A Figura 19 apresenta a trajetória de N_{Mt} que foi observada anteriormente ao rompimento, linha contínua preta até 2014 e nos cenários com o desastre, linha contínua preta, e contrafactual, linha tracejada vermelha, ambas entre 2015 e 2017. A hipótese-chave adotada é de que as terras ocupadas pela Samarco são proporcionais ao valor adicionado no PIB da indústria extrativa de MG e ES, o que corresponde a 6,4% segundo as Demonstrações do Valor Adicionado (DVA) da Empresa¹¹ em 2014.

Desta forma, no observado no cenário com o desastre, ou seja, com o rompimento da Barragem de Fundão e a parada da operação da empresa Samarco, supõe-se que N_{Mt} tenha uma redução nas terras utilizadas equivalentes à queda da geração de receita da empresa, a saber, diminuição de 6,4% de N_{Mt} . Para 2015 supõe-se uma redução de 1/6 de 6,4%, redução de 1,06%, dado que o rompimento, seguido pela parada da operação da empresa ocorreu em 5 novembro de 2015. Portanto, a produção foi comprometida em dois meses nesse ano. Em 2016 e 2017, considera-se uma redução de 6,4% do que tinha antes do desastre ($N_{M,2014}$) no estoque de recursos naturais do setor M em cada ano.

¹¹ Para mais informações sobre o DVA da Samarco ver APÊNDICE F .

Figura 19 — Terras do setor extrativo: observado vs contrafactual



Fonte: Elaboração própria (2020) a partir de dados da MapBiomass (2018).

A hipótese sobre o efeito no estoque de recursos naturais dos demais setores da economia (N_G) merece maiores explicações, visto o impacto ambiental do desastre. Supõe-se que N_G não foi afetado em termos de disponibilidade de terras para Minas Gerais e Espírito Santo, mas o canal pelo qual o desastre afetou a produção do setor G se deu através do impacto na produtividade total dos fatores desse setor, A_G . A razão pela qual se faz essa hipótese é devido ao fato de não se ter uma boa estimativa, até o momento, do valor do Rio Doce para a produção dos demais setores da economia. É comum na literatura assumir que o rio é um bem comum, portanto não há custo em utilizá-lo e, dessa forma, ele não deve ser tratado como um insumo ordinário para a produção. Assim, a piora na qualidade das águas, que afeta substancialmente a produção de alguns setores econômicos, será capturada por uma queda na produtividade do setor G (A_G). Outro ponto importante é a consideração da área por onde a lama passou. Dentre os tipos de solo e utilização de toda a extensão atingida, algumas áreas também podem ser classificadas como bens públicos e/ou são consideradas de difícil valoração monetária, como por exemplo, matas e florestas naturais. Dessa forma, esses impactos são capturados pelo modelo como um impacto negativo na produtividade total dos fatores do setor G. Uma última consideração a se

fazer sobre essa estratégia é que ela também considera o impacto do rompimento nos preços dos imóveis, devido à perda de alguma amenidade. Por exemplo, imóveis que margeiam o Rio Doce e o litoral do Espírito Santo. Parte do valor desses imóveis considera a sua proximidade com tais amenidades. Com a perda delas, apesar de não terem sido atingidos diretamente pela lama, podem ter sofrido alguma desvalorização e isso influencia no nível de riqueza das regiões afetadas pelo rompimento.

Para as variáveis exógenas e variantes no tempo (H_t , r_t , s_{Mt} , s_{Gt} , f_{Gt} , f_{Mt} , A_{Gt} e A_{Mt}) adotou-se estratégias distintas para cada uma. Supõem-se que o rompimento da Barragem de Fundão não afetou as trajetórias contrafactuais das variáveis r_t e H_t . Elas se mantiveram com a mesma trajetória em todos os cenários. Para taxa de juros de longo prazo r_t , por exemplo, é razoável supor que não foram afetadas, pois, no longo prazo, é possível que a estrutura produtiva dos estados atingidos possa ser recuperada totalmente ou quase que totalmente. A taxa de juros de longo prazo, no modelo, é a média móvel 72 meses da NTN-B com o vencimento mais longo.

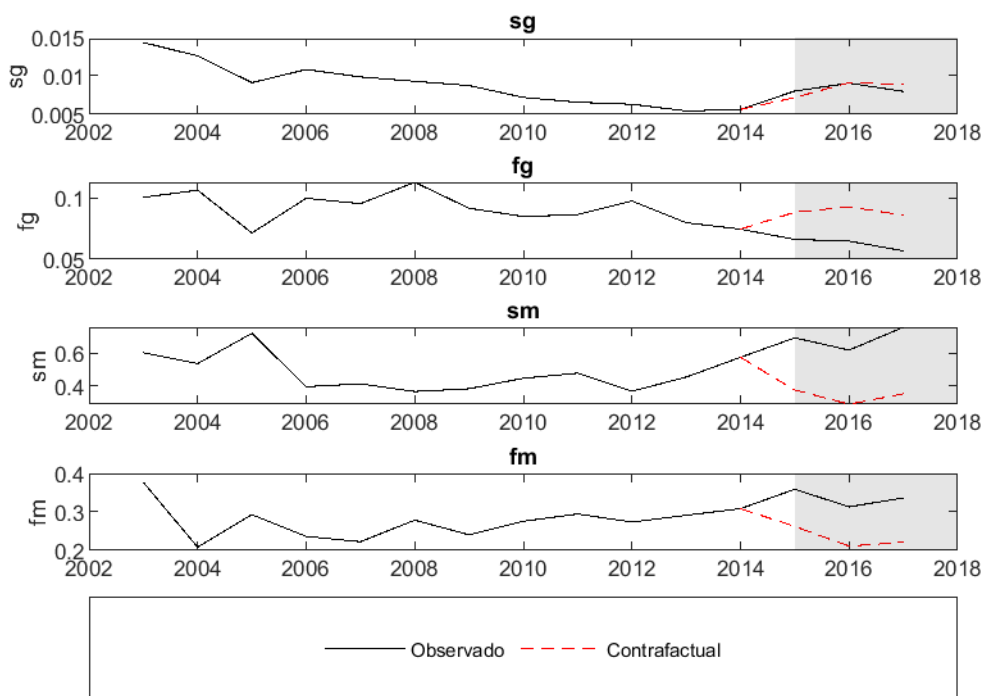
Para o estoque total de trabalhadores eficientes (H_t), supõe-se que o efeito da migração é diferente entre níveis geográficos. É possível que entre os municípios atingidos de Minas Gerais e Espírito Santo, tenha ocorrido uma elevada entrada e/ou saída de pessoas, de modo a afetar o estoque de capital humano. Entretanto, quando se analisa a migração para fora dos Estados de Minas Gerais e Espírito Santo, é menos provável que tenha acontecido uma mudança relevante no estoque de capital humano total (H_t). Uma justificativa é a diversificação econômica e a extensão desses dois estados conjuntamente.

Para as trajetórias contrafactuais das variáveis do mercado de trabalho s_{Mt} , s_{Gt} , f_{Gt} , f_{Mt} , tendo em vista as interações do mercado de trabalho dos setores M e G apresentadas na seção 3, estimou-se um modelo vetor autorregressivo de ordem 1 utilizando as informações de 2002 a 2014 das variáveis de interesse. Para considerar informações importantes que estavam afetando todo o Brasil, adiciona-se as taxas de separação (s_{GBRt}) e de encontro geral da economia (f_{BRt}). Ambas são calculadas para todos os estados brasileiros sem Minas Gerais e Espírito Santo. Como é uma estimação linear, para garantir a não negatividade das previsões, utiliza-se as variáveis em logaritmo neperiano ($\ln(\cdot)$) e pressupõe-se um modelo de ordem 1 para não reduzir ainda mais a pequena amostra disponível para a estimação. O APÊNDICE G apresenta os detalhes da estimação do modelo na equação (63) a seguir:

$$\begin{pmatrix} \ln(s_{Gt}) \\ \ln(s_{Mt}) \\ \ln(f_{Gt}) \\ \ln(f_{Mt}) \end{pmatrix} = C + A \begin{pmatrix} \ln(s_{Gt-1}) \\ \ln(s_{Mt-1}) \\ \ln(f_{Gt-1}) \\ \ln(f_{Mt-1}) \end{pmatrix} + B \begin{pmatrix} \ln(s_{GBRt}) \\ \ln(f_{BRt}) \end{pmatrix} + \epsilon_t \quad (63)$$

Após esse período, faz-se a previsão para os anos de 2015 a 2017, os resultados das previsões correspondem às trajetórias contrafactuais no cenário sem o rompimento da Barragem de Fundão e sem a parada da operação da empresa Samarco. A Figura 20 contém os resultados empiricamente observados, linhas contínuas pretas, e seus respectivos valores no cenário contrafactual, linhas tracejadas vermelhas.

Figura 20 — Mercado de trabalho: observado vs contrafactual



Fonte: Elaboração própria (2020) a partir de dados PNAD IBGE e PME IBGE.

De cima para baixo, é possível observar que a taxa de separação do setor G (s_G) encontrava-se em tendência de queda no período pré-rompimento (2002-2014). Isso indica uma permanência maior dos trabalhadores no setor G, uma vez que a probabilidade de um trabalhador ser desligado do seu trabalho diminuiu. A partir de 2013, nota-se uma mudança de tendência dessa variável, agora com aumento ao longo do tempo, o que continua no período pós-rompimento. Parte da explicação está no fato de o país vivenciar um período de recessão econômica que começou justamente em 2015, por isso a utilização da variável de taxa de separação para o Brasil sem MG e ES é importante.

De todo modo, quando se analisa a trajetória contrafactual dessa variável (linha tracejada vermelha) pode-se observar que a diferença comparada com a observada é pequena, mas se observa que a taxa de separação em 2015 teria sido menor na ausência do desastre. Duas conclusões podem ser tiradas dessa análise, a tendência de aumento da taxa de separação no setor G para os estados de MG e ES ocorreria, mesmo sem o rompimento, devido à conjuntura macroeconômica e o efeito do desastre na taxa de separação pode ter sido pequeno devido ao tamanho desse setor, que representa aproximadamente 94% de toda a economia.

Seguindo para o próximo gráfico, a comparação entre a taxa de encontro do setor G (f_G) nos cenários observado e contrafactual indica que houve uma diferença significativa entre os dados empíricos e o cenário contrafactual. O caso observado indicou uma queda da taxa de encontro entre 2014 e 2015, mantendo-se razoavelmente constante entre 2015 e 2017. Isso implica que a probabilidade de um desempregado encontrar emprego no setor G diminuiu. No cenário contrafactual, pode-se notar que essa variável apresentaria uma trajetória de leve aumento, o que resultaria em maior facilidade de se encontrar emprego para os que buscam no setor G.

Para o mercado de trabalho do setor M nota-se que as taxas observadas de separação (s_M) e de encontro (f_M), linhas pretas, apresentaram tendência de aumento entre 2014-2017, tanto em comparação ao período anterior, quanto em relação às trajetórias contrafactuais, linhas vermelhas. Dessa forma, pode-se entender que o efeito do desastre no mercado de trabalho do setor M foi o aumento da rotatividade, ou seja, tanto a probabilidade de encontrar emprego aumentou, quanto a probabilidade de se perder o emprego.

Por último, para as trajetórias contrafactuais das produtividades totais dos fatores (A_M e A_G) e estoques de capitais físicos (K_{Gt} e K_{Mt}) adota-se um procedimento semelhante ao apresentado no item XIV da seção 6. Inicia-se por calcular as produtividades através do modelo no estado estacionário e, após, ajustá-las calculando conjuntamente o estoque de capital físico. Explica-se a seguir esses dois procedimentos adaptados ao cenário contrafactual.

Para a construção dos contrafactuais das produtividades dos setores, cria-se dois cenários, a fim de mitigar incertezas sobre como o desastre as afetou:

- Cenário 1: ambas as produtividades são afetadas pelo desastre;
- Cenário 2: somente a produtividade do setor G (A_G) foi afetada pelo desastre.

O Cenário 1 é o mais plausível, pois considera o efeito que o desastre pode ter causado a outros agentes do setor extrativo, por exemplo, impacto na produção provocado por mudanças de regras na regulação de barragens¹². Propõe-se o Cenário 2 devido à interpretação da produtividade total dos fatores do setor M (A_M) dado no modelo. É através desse parâmetro que os choques externos, como preço do minério de ferro, são considerados no modelo. Assim, supõe-se que a produtividade do setor M não foi afetada pelo rompimento, somente a produtividade dos demais setores da economia.

Para a estimação desses cenários, realiza-se o procedimento em três etapas.

A primeira etapa consiste em assumir que a trajetória contrafactual da produtividade do setor M não foi alterada pelo desastre, $A_{Mt} = A_{Mt}^{c1}$, onde A_{Mt}^{c1} é a produtividade contrafactual do setor M na primeira etapa. Assim, todo o impacto na produtividade foi no setor G, ou seja, afetou apenas A_{Gt} . Desta forma, estima-se a produtividade contrafactual do setor G na primeira etapa, A_{Gt}^{c1} , a partir da solução do seguinte sistema de equações:

$$Y_t = \left[\lambda Y_{Mt}^{\frac{\rho-1}{\rho}} + (1-\lambda) Y_{Gt}^{\frac{\rho-1}{\rho}} \right]^{\frac{\rho}{\rho-1}} \quad (1)$$

$$Y_{Gt} = A_{Gt}^{c1 \frac{\rho}{\rho+\phi-\rho\phi}} \left(\frac{\phi(1-\lambda)}{r_t+\delta} \right)^{\frac{\phi\rho}{\rho+\phi-\rho\phi}} Y_t^{\frac{\phi}{\rho+\phi-\rho\phi}} N_{Gt}^{\frac{\theta\rho}{\rho+\phi-\rho\phi}} H_{Gt}^{\frac{(1-\phi-\theta)\rho}{\rho+\phi-\rho\phi}} \quad (32)$$

$$Y_{Mt} = A_{Mt}^{\frac{\rho}{\rho+\alpha-\rho\alpha}} \left(\frac{\alpha\lambda}{r_t+\delta} \right)^{\frac{\alpha\rho}{\rho+\alpha-\rho\alpha}} Y_t^{\frac{\alpha}{\rho+\alpha-\rho\alpha}} N_{Mt}^{\frac{\beta\rho}{\rho+\alpha-\rho\alpha}} H_{Mt}^{\frac{(1-\alpha-\beta)\rho}{\rho+\alpha-\rho\alpha}} \quad (33)$$

$$H_t = H_{Mt} + H_{Gt} + H_{UMt} + H_{UGt} \quad (12)$$

$$s_{Mt} H_{Mt} = f_{Mt} H_{UMt} \quad (13)$$

$$s_{Gt} H_{Gt} = f_{Gt} H_{UGt} \quad (14)$$

$$\frac{(r_t + f_{Gt} + s_{Gt})}{(r_t + f_{Mt} + s_{Mt})} = \frac{f_{Gt} w_{Gt}}{f_{Mt} w_{Mt}} \quad (20)$$

$$H_{Gt} = \frac{(1-\phi-\theta)}{(1-\alpha-\beta)} \left(\frac{Y_{Gt}}{Y_{Mt}} \right)^{\frac{\rho-1}{\rho}} \frac{(1-\lambda)}{\lambda} \frac{w_{Mt}}{w_{Gt}} H_{Mt} \quad (29)$$

onde as variáveis endógenas são A_{Gt}^{c1} , Y_{Mt} , Y_{Gt} , H_{Mt} , H_{Gt} , H_{UMt} , H_{UGt} , e $\frac{w_{Gt}}{w_{Mt}}$. Para as variáveis exógenas, utilizam-se os valores contrafactuais e apresentados anteriormente. Destaca-se que o PIB total contrafactual utilizado como variável exógena nesse sistema

¹² Em setembro de 2020 foi aprovada a Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020, que altera alguns pontos sobre regulação de barragens dada pela Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010.

é o mesmo calculado em Fundação Getulio Vargas (2020) através do Contrafactual 2. Este procedimento gera os valores de A_{Gt} , A_{Mt} , K_{Gt}^* e K_{Mt}^* que entram como valores iniciais no procedimento apresentado no item XIV da seção 6. É importante destacar que essa é a estimativa contrafactual do Cenário 2. Para a construção do Cenário 1, segue-se para os próximos passos.

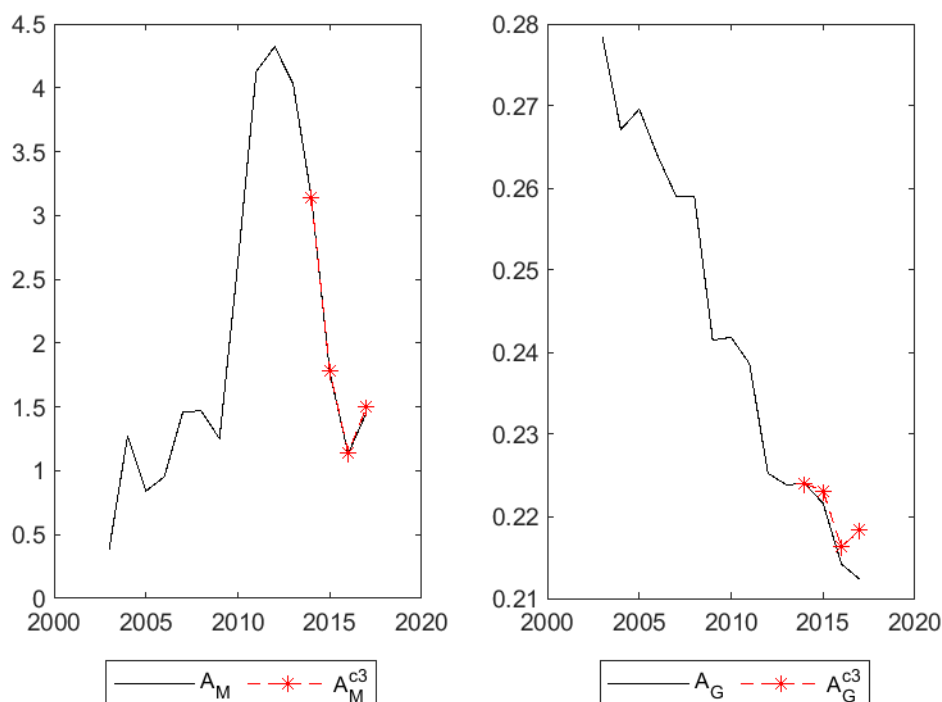
A segunda etapa consiste em calcular qual o impacto na produtividade do setor M. Para isso, assume-se que A_{Mt} foi afetado proporcionalmente igual a A_{Gt} em cada ano, ou seja, aplica-se a diferença percentual entre a trajetória do A_{Gt} e A_{Gt}^{c1} para a construção do A_{Mt}^{c2} . A equação (64) apresenta o cálculo:

$$A_{Mt}^{c2} = A_{Mt} * \left(1 + \frac{A_{Gt}^{c1} - A_{Gt}}{A_{Gt}}\right) \text{ para } t \geq 2015. \quad (64)$$

É importante destacar que não houve alteração na produtividade do setor G, isto é, $A_{Gt}^{c2} = A_{Gt}^{c1}$ nessa etapa.

E, por fim, a terceira etapa consiste em resolver novamente o sistema das equações (1),(12),(13),(14),(20),(29),(47), e (48), mas utilizando A_{Mt}^{c2} ao invés de A_{Mt} . Assim, obtêm-se a solução final para A_{Gt}^{c3} que correspondem à trajetória contrafactual para a produtividade total dos demais setores (setor G). Para o setor M, não houve alteração na produtividade nessa etapa, de modo que $A_{Mt}^{c3} = A_{Mt}^{c2}$. A Figura 21 apresenta as produtividades contrafactuais para os setores G e M que compõem o Cenário 1. É importante destacar que a diferença entre A_{Mt} e A_{Mt}^{c3} é muito pequena, 0,3% em 2015, 0,4% em 2016 e 2,15% em 2017, sendo assim imperceptível graficamente.

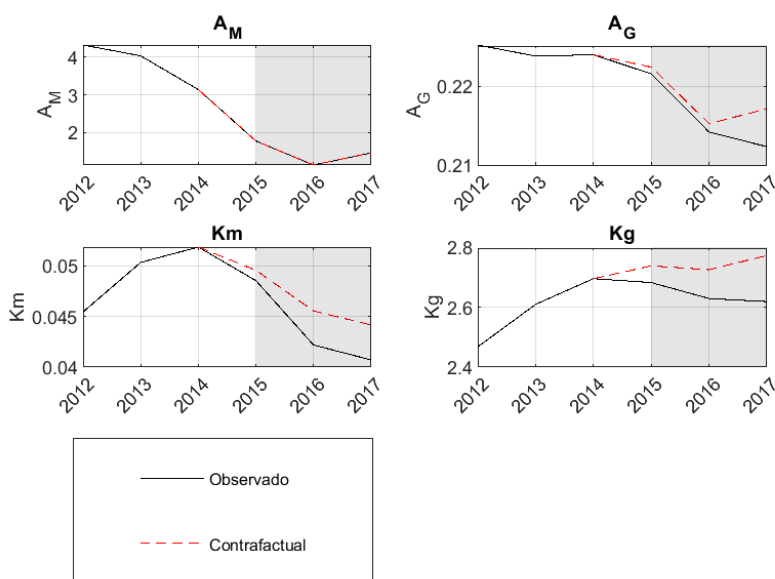
Figura 21 — Produtividade etapa 3: observado vs contrafactual



Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

Por fim, utiliza-se A_{Mt}^{c3} e A_{Gt}^{c3} como as condições iniciais para o processo iterativo explicado na seção 6 item XIV, onde é realizado o ajuste na produtividade para o modelo de curto prazo e são calculadas as trajetórias contrafactuais dos estoques de capital físico. Para todas as variáveis exógenas, imputa-se os valores contrafactuais. A Figura 22 contém as dinâmicas consolidadas de todas as variáveis contrafactuais utilizadas no processo iterativo no cenário 1 e a Figura 23 apresenta o mesmo procedimento para o cenário 2. As diferenças entre as produtividades e estoque de capital físico entre os cenários é muito pequena. Por exemplo, em 2017, a diferença entre A_{Mt} do Cenário 1 e Cenário 2 é de, aproximadamente, 2%. Para os outros anos, as diferenças são menores. Dessa forma, não se espera que os resultados sejam muito discrepantes entre os cenários.

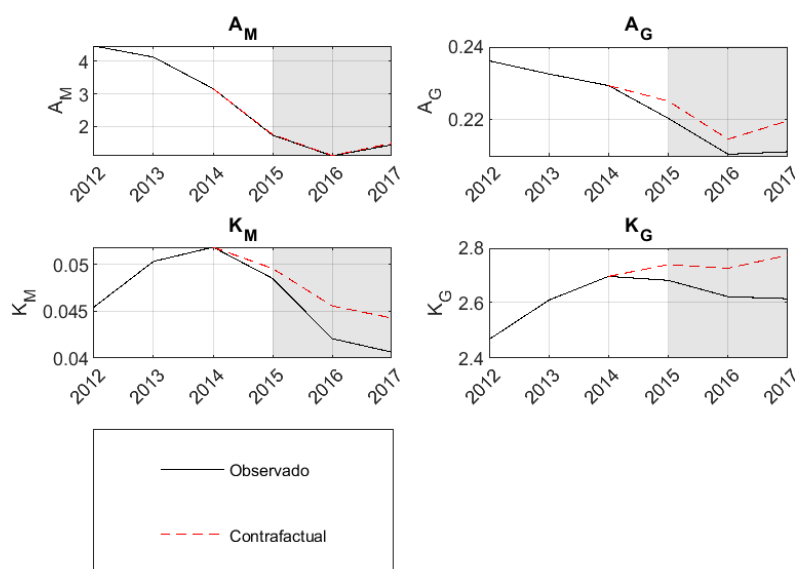
Figura 22 — Dinâmica das variáveis exógenas e suas trajetórias contrafactuais – Cenário 1



Fonte: Elaboração própria (2020).

Para concluir esta seção, é possível interpretar o desastre como uma alteração nas produtividades A_{Mt} e A_{Gt} , nos fatores de produção N_{Mt} , K_{Mt} e K_{Gt} e nas probabilidades de encontrar e perder o emprego, s_{Gt} , s_{Mt} , f_{Gt} e f_{Mt} , representando o impacto no mercado de trabalho. Dessa forma, é possível analisar a heterogeneidade do impacto entre os setores e diferentes determinantes da produção.

Figura 23 — Dinâmica das variáveis exógenas e suas trajetórias contrafactuais – Cenário 2



Fonte: Elaboração própria (2020).

9 MENSURAÇÃO DO IMPACTO DO ROMPIMENTO NA ECONOMIA

Nesta seção, apresenta-se o resultado¹³ da mensuração do impacto do rompimento da Barragem de Fundão na economia dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo para os anos de 2015, 2016 e 2017 sob duas óticas do PIB – óticas da produção e óticas da renda – e no mercado de trabalho. Inicia-se a discussão dos resultados pelo Cenário 1, por ser considerado o mais realista, e em seguida, passa-se para o Cenário 2, onde se altera a hipótese sobre o impacto nas produtividades dos setores.

A Tabela 6 apresenta o impacto no PIB pela ótica da produção calculado através do Cenário 1 em bilhões de reais¹⁴ na terceira coluna. Em 2015, o impacto do rompimento calculado em Fundação Getulio Vargas (2020) é uma perda no total de R\$ 35,39 bilhões. Desses, apenas R\$ 1,93 bilhões foi perdido no setor extrativo e R\$ 33,46 foi perdido nos demais setores. Em termos percentuais, isso representa que 94,55% do impacto total foi nos demais setores da economia. Comparando o valor do impacto em cada setor relativamente ao seu PIB contrafactual (PIB_{CF}), última coluna da Tabela 6, observa-se que em 2015 o rompimento da Barragem de Fundão acarretou em uma perda de 4,16% do PIB_{CF} do setor extrativo e 4,92% do PIB_{CF} dos demais setores.

Em 2016, o impacto total no PIB foi uma perda de R\$ 40,12 bilhões. A maior parte recaiu sobre o PIB dos demais setores da economia, 93,93% da queda total, ou seja, R\$ 37,69 bilhões, enquanto que o setor extrativo teve uma perda um pouco maior que o ano anterior, R\$ 2,44 bilhões que representam 6,07% da perda total. Os impactos nos setores também aumentaram em relação ao seu respectivo PIB contrafactual. O setor G perdeu 5,74% e o setor M perdeu 6,48%.

No ano seguinte, 2017, essa tendência de aumento do tamanho do impacto continua, tanto em termos absolutos quanto relativos. A perda no setor extrativo foi de R\$ 3,69 bilhões, o que representa -8,59% do PIB contrafactual desse setor, enquanto que a perda nos demais setores da economia foi de R\$ 57,08 bilhões, em termos proporcionais ao PIB contrafactual do setor, -8,35%. Somando os dois setores, em 2017, o impacto do rompimento da Barragem de Fundão foi uma perda de R\$ 60,77 bilhões de reais, -8,36% do PIB contrafactual.

¹³ O APÊNDICE I e APÊNDICE J apresentam algumas análises de sensibilidade dos resultados aos valores dos parâmetros.

¹⁴ Em valores de 2016.

Somente nos três primeiros anos após o rompimento, a perda no PIB dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo soma R\$ 136,28 bilhões, sendo R\$ 8,05 bilhões (5,91%) no setor extrativo e R\$ 128,23 bilhões (94,09%). Em ambos os setores, observa-se a mesma tendência crescente do impacto no PIB, sugerindo que o rompimento da barragem impactou de forma substancial a capacidade produtiva desses estados, seja através da perda de fatores de produção, desestruturação dos mercados ou mesmo das produtividades.

Tabela 6 — Mensuração do impacto no PIB (em R\$ bilhões de 2016) pela ótica da produção: Cenário 1

Ótica do Produto				
Ano	Variação	R\$ bi	% do impacto	% do PIB _{CF}
2015	PIB M	-1,93	5,45	-4,16
	PIB G	-33,46	94,55	-4,92
	Total	-35,39	100,00	-4,87
2016	PIB M	-2,44	6,07	-6,48
	PIB G	-37,69	93,93	-5,74
	Total	-40,12	100,00	-5,78
2017	PIB M	-3,69	6,07	-8,54
	PIB G	-57,08	93,93	-8,35
	Total	-60,77	100,00	-8,36
Acumulado	PIB M	-8,05	5,91	-6,33
	PIB G	-128,23	94,09	-6,34
	Total	-136,28	100,00	-6,34

Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

Entramos agora na discussão sobre o impacto na renda dos fatores de produção, os quais são apresentados na Tabela 7. Para os anos de 2016 e 2017, observa-se a mesma tendência de aumento do valor do impacto em todos os componentes do PIB pela ótica da renda, mas proporcionalmente ao tamanho do impacto, os valores são relativamente estáveis. A perda na massa de renda da terra do setor M foi R\$ 1,78 bilhões (4,43%) e R\$ 2,69 bilhões (4,43%) em 2016 e 2017, respectivamente. Para o setor G, a perda na massa da renda dos recursos naturais foi R\$ 1,13 bilhões (2,83%) em 2016 e R\$ 1,71 bilhões (2,82%) em 2017.

Para a massa da renda do capital físico, a perda no setor extrativo foi de R\$ 270 milhões (0,67%) e R\$ 410 milhões (0,67%) em 2016 e 2017, respectivamente. Já os demais setores da economia perderam R\$ 18,47 bilhões (46,03%) em 2016 e R\$ 27,97 bilhões

(46,03%) em 2017. Em magnitudes similares ao capital físico, a perda na massa da renda do trabalhador no setor extrativo foi R\$ 390 milhões (0,97%) em 2016 e R\$ 590 milhões (0,97%) em 2017. Nos demais setores da economia, os trabalhadores perderam R\$ 18,09 bilhões (45,09%) em 2016 e R\$ 27,40 bilhões (45,09%) em 2017.

Resumindo, no acumulado, os valores entre os setores e componentes se mantiveram estáveis. Em valores monetários, a massa salarial foi negativamente impactada no valor de R\$ 62,84 bilhões (46,11% do total do impacto), o capital físico, em R\$ 63,72 bilhões (46,75% do total do impacto) e o rendimento dos recursos naturais perdeu R\$ 9,72 bilhões (7,14% do total do impacto). O desastre impactou a renda agregada mais abruptamente dos empresários, investidores e, principalmente, trabalhadores, o que inclui a remuneração dos trabalhadores rurais.

A Tabela (7) mostra o impacto do desastre no PIB pela ótica da renda, ou seja, o impacto na remuneração dos fatores de produção (recursos naturais, capital físico e capital humano). Em 2015, dos R\$ 35,39 bilhões de perda no PIB total, R\$ 16,37 bilhões foram na massa salarial do trabalho e um número similar, R\$ 16,61 bilhões, foi na massa de remuneração do capital físico, como se pode observar na segunda coluna. Para os anos de 2016 e 2017, observa-se a mesma tendência de aumento do valor do impacto em todos os componentes do PIB pela ótica da renda, mas proporcionalmente ao tamanho do impacto, os valores são relativamente estáveis. A perda na massa de renda da terra do setor M foi R\$ 1,78 bilhões (4,43%) e R\$ 2,69 bilhões (4,43%) em 2016 e 2017, respectivamente. Para o setor G, a perda na massa da renda dos recursos naturais foi R\$ 1,13 bilhões (2,83%) em 2016 e R\$ 1,71 bilhões (2,82%) em 2017.

Para a massa da renda do capital físico, a perda no setor extrativo foi de R\$ 270 milhões (0,67%) e R\$ 410 milhões (0,67%) em 2016 e 2017, respectivamente. Já os demais setores da economia perderam R\$ 18,47 bilhões (46,03%) em 2016 e R\$ 27,97 bilhões (46,03%) em 2017. Em magnitudes similares ao capital físico, a perda na massa da renda do trabalhador no setor extrativo foi R\$ 390 milhões (0,97%) em 2016 e R\$ 590 milhões (0,97%) em 2017. Nos demais setores da economia, os trabalhadores perderam R\$ 18,09 bilhões (45,09%) em 2016 e R\$ 27,40 bilhões (45,09%) em 2017.

Resumindo, em valores monetários, a massa salarial foi negativamente impactada no valor de R\$ 62,84 bilhões (46,11% do total do impacto), o capital físico, em R\$ 63,72 bilhões (46,75% do total do impacto) e o rendimento dos recursos naturais perdeu R\$ 9,72 bilhões (7,14% do total do impacto). O desastre impactou a renda agregada mais abruptamente dos empresários, investidores e, principalmente, trabalhadores, o que inclui a remuneração dos trabalhadores rurais.

Em termos relativos, ainda em 2015, o impacto na massa salarial do trabalho foi 46,26% do impacto total e 46,93% na massa de rendimentos do capital físico. O restante, R\$ 2,41 bilhões (6,82%), foi a perda na remuneração dos recursos naturais.

Entre os setores, o impacto foi proporcionalmente maior nos demais setores da economia (setor G) para a massa de rendimentos do trabalho e capital físico. O setor extrativo perdeu R\$ 210 milhões em rendimento dos bens de capital e R\$ 310 milhões em rendimento do trabalho, enquanto que o setor G perdeu R\$ 16,40 bilhões e R\$ 16,06 bilhões, respectivamente nos componentes capital e trabalho, em 2015. Essa diferença em magnitude dos impactos entre os setores é devido ao tamanho do setor G em relação ao setor M. O setor extrativo (M) representa, em média, 6% do PIB total, enquanto que os demais setores é 94% do PIB de Minas Gerais e Espírito Santo.

Para os rendimentos agregados dos recursos naturais, o impacto setorial foi o oposto. A perda no setor extrativo foi R\$ 1,41 bilhões ou 3,98% do total para uma perda de R\$ 1,00 bilhão nos demais setores da economia ou 2,84% do impacto total. É importante destacar nesse resultado que os impactos no Rio Doce, assim como na vegetação, são capturados na produtividade dos setores. Portanto, deve-se considerar a massa da renda das terras utilizadas para agricultura, pecuária, área urbana no setor G e área de extração mineral para o setor M.

Tabela 7 — Mensuração do impacto no PIB (R\$ bilhões de 2016) pela ótica da renda: Cenário 1

	2015		2016		2017		Acumulado	
	Ótica da Renda							
Variação	R\$ bi	%	R\$ bi	%	R\$ bi	%	R\$ bi	%
Massa da Renda da Terra M	-1,41	3,98	-1,78	4,43	-2,69	4,43	-5,88	4,31
Massa da Renda da Terra G	-1,00	2,84	-1,13	2,82	-1,71	2,82	-3,85	2,82
Subtotal	-2,41	6,82	-2,91	7,25	-4,40	7,25	-9,72	7,14
Massa da Renda do Capital M	-0,21	0,60	-0,27	0,67	-0,41	0,67	-0,89	0,65
Massa da Renda do Capital G	-16,40	46,33	-18,47	46,03	-27,97	46,03	-62,83	46,11
Subtotal	-16,61	46,93	-18,74	46,69	-28,38	46,69	-63,72	46,75
Massa da Renda do Trabalho M	-0,31	0,87	-0,39	0,97	-0,59	0,97	-1,29	0,95
Massa da Renda do Trabalho G	-16,06	45,38	-18,09	45,09	-27,40	45,09	-61,55	45,16
Subtotal	-16,37	46,26	-18,48	46,06	-27,99	46,06	-62,84	46,11
Total	-35,39	100,00	-40,12	100,00	-60,77	100,00	-136,28	100,00

Fonte: Elaborado própria (2020).

Analisa-se agora mais detalhadamente o impacto no emprego em cada setor e o desemprego na economia. A Tabela 8 apresenta as taxas de desemprego e o número

de desempregados na economia de Minas Gerais e Espírito Santo na situação com desastre e os valores que teriam sido observados se o desastre não tivesse ocorrido, calculados através do Cenário 1. Para os três anos subsequentes ao desastre, 2015 a 2017, estima-se que a taxa de desemprego seria, em média, 3,64 pontos percentuais menor. Em 2015, ela seria 9,17%, mas foi de 12,86%. Em 2016, ela seria 10,21%, mas observa-se 13,93% e, em 2017, a taxa de desemprego seria 10,87%, mas foi de 14,37%. Em número de trabalhadores que ficaram desempregados, o desastre deixou 420 mil pessoas em 2015, 420 mil em 2016 e 400 mil em 2017. É interessante notar que nosso modelo captura a crescimento fraco da economia brasileira entre 2015 e 2017, portanto, os valores apresentados levam em consideração o movimento de subida do desemprego no qual toda a economia brasileira enfrentou no período. Mesmo no Cenário contrafactual 1, há uma tendência da taxa de desemprego de aumentar, o que sugere que o desastre só potencializou o crescimento do desemprego nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo.

Calcula-se também que o impacto, assim como foi visto no PIB pelas duas óticas, é maior no setor G. Quando se analisa as taxas de ocupação dos setores, observa-se que, em média, o emprego no setor G é 3,6 pontos percentuais menor devido ao desastre. O impacto agregado no emprego do setor extrativo é inferior, em parte devido à sua participação no setor. Em 2015, a diferença é de 0,07 p.p., de 1,27% e 1,34% para a economia com Desastre e o Cenário contrafactual 1, respectivamente. Para 2016 as taxas vão de 1,04% e 1,11% entre os cenários, e para 2017, as taxas são 1,11% e 1,15%, respectivamente para a situação após o desastre e o cenário contrafactual. Observa-se uma tendência muito próxima ao que aconteceu com a economia brasileira. Entre 2015 e 2016, o PIB brasileiro caiu em 3,3% e entre 2016 e 2017, ele cresceu em 1,06% (IBGE, 2020).

Tabela 8 — Mensuração do impacto no emprego e desemprego: Cenário 1

	2015		2016		2017	
	Desastre	Cenário 1	Desastre	Cenário 1	Desastre	Cenário 1
Número de trabalhadores						
Desemprego total (%)	12,86	9,17	13,93	10,21	14,37	10,87
Número de desempregados (milhões)	1,46	1,04	1,59	1,16	1,64	1,24
Emprego no setor M (%)	1,27	1,34	1,04	1,11	1,11	1,15
Emprego no setor G (%)	85,86	89,49	85,03	88,68	84,52	87,97
Salário relativo (M/G)	1,54	1,52	1,55	1,52	1,59	1,60

Fonte: Elaboração própria (2020).

Em suma, observa-se uma redução da massa salarial do setor extrativo (Tabela 7), mas um aumento da taxa de ocupação (Tabela 8) indicando que, proporcionalmente, houve uma queda maior no nível salarial desse setor em relação ao aumento do emprego. Enquanto que para os demais setores da economia, visto que o emprego caiu, a direção da variação do salário mais provável também é de queda, pois como a quantidade de desempregados na economia aumentou, maior é a oferta de força e trabalho e, conseqüentemente, menor o salário. Soma-se a isso, o fato de que, com a renda agregada menor devido ao desastre, menor a demanda agregada de bens finais e, conseqüentemente, menor a demanda por mão de obra, o que força ainda mais o valor dos salários para baixo. Desse modo, uma das conseqüências do desastre foi a mudança dos salários relativos.

Para analisar essa questão, a última linha da Tabela 8 apresenta a razão dos salários do setor extrativo e demais setores da economia (w_M / w_G). Observa-se que os salários relativos foram impactados pelo desastre. Entendidas as direções das variações dos salários dos dois setores, o aumento dessa razão indica que os salários dos demais setores da economia estão caindo proporcionalmente mais do que os salários do setor extrativo. Observa-se essa tendência nos três anos após o desastre. Uma sugestão de explicação para esse efeito, mas com a ressalva de que está além do poder de explicação desse modelo, é o fato de o emprego no setor extrativo ser mais formalizado em comparação com o nível de informalidade nos demais setores da economia. Os salários dos trabalhadores informais respondem de forma mais intensa e rápida à situação econômica do período e região. Situação essa que foi prejudicada pelo rompimento da Barragem de Fundão.

Em seguida, analisa-se o Cenário contrafactual 2, onde supõe que o desastre não afetou a produtividade do setor extrativo (A_M), mas somente a produtividade dos demais setores da economia (A_G). Interpreta-se esse cenário como um limite superior para o impacto no setor G, pois o efeito em A_G é o maior possível e o efeito em A_M é zero.

No Cenário 2, os resultados não mudam qualitativamente do que foi encontrado no Cenário 1, as principais diferenças são nos valores do impacto, isto é, proporcionalmente, o efeito nos demais setores da economia foi bem maior do que no setor extrativo. A Tabela 9 mostra o impacto pela ótica da produção. Observa-se que o impacto no setor M foi um pouco menor se comparado com o Cenário 1, em todos os anos. Respectivamente no Cenário 1 e Cenário 2, os impactos são -R\$ 1,93 bilhões e -R\$ 1,85 bilhões em 2015, -R\$ 2,44 bilhões e -R\$ 2,36 bilhões em 2016 e -R\$ 3,69 bilhões e -R\$ 3,28 bilhões em 2017. Como o impacto total não foi alterado, pois ele é baseado na estimativa apresentada em Fundação Getúlio Vargas (2020), uma redução

no impacto do setor M indica que esse custo econômico foi para o setor G. De fato, o impacto foi maior para todos os anos no setor G, no Cenário 1 e no Cenário 2, respectivamente, os impactos são -R\$ 33,46 bilhões e -R\$ 33,53 bilhões em 2015, -R\$ 37,69 bilhões e -R\$ 37,77 bilhões em 2016 e -R\$ 57,09 bilhões e -R\$ 57,49 bilhões em 2017. No acumulado, os dois cenários indicam que o impacto do desastre está entre -R\$ 8,05 bilhões e -R\$ 7,49 bilhões no setor extrativo e -R\$ 128,23 bilhões e -R\$ 128,79 bilhões.

Tabela 9 — Mensuração do impacto no PIB (em R\$ bilhões de 2016) pela ótica da produção: Cenário 2

Ótica do Produto				
Ano	Variação	R\$ bi	% do impacto	% do PIB
2015	PIB M	-1,85	5,24	-4,00
	PIB G	-33,53	94,76	-4,93
	Total	-35,38	100,00	-4,87
2016	PIB M	-2,36	5,87	-6,28
	PIB G	-37,77	94,13	-5,75
	Total	-40,12	100,00	-5,78
2017	PIB M	-3,28	5,40	-7,68
	PIB G	-57,49	94,60	-8,40
	Total	-60,77	100,00	-8,36
Acumulado	PIB M	-7,49	5,50	-5,92
	PIB G	-128,79	94,50	-6,37
	Total	-136,28	100,00	-6,34

Fonte: Elaboração própria (2020).

A Tabela 10 apresenta os valores do impacto no PIB pela ótica da renda para o Cenário 2. É interessante observar que não houve uma mudança proporcional do impacto entre as massas de renda dos fatores de produção em cada setor. Comparando a Tabela 7 e a Tabela 10, observa-se que o impacto pouco alterou na massa da renda da terra do setor G, no acumulado dos três anos, o impacto foi uma perda de -R\$3,89 bilhões no Cenário 2 contra uma perda de R\$ 3,89 bilhões no Cenário 1. Entretanto, para o setor M, o impacto do rendimento dos recursos naturais foi de -R\$ 5,47 bilhões para -R\$5,88 bilhões. De outra forma, teve uma variação de -R\$ 410 milhões no setor M e R\$ 17 milhões no setor G.

Dessa forma, as massas dos outros fatores de produto, capital físico e capital humano devem ter sofrido mais entre os cenários. Isso é o que se observa nos resultados. O

Cenário 2 estima um impacto relativamente maior para o setor G tanto para a massa da renda do capital quanto para a massa salarial. No acumulado, o intervalo entre os cenários para o impacto na massa da renda do capital físico é de -R\$ 0,67 bilhões a -R\$ 0,59 bilhões para o setor M e de -R\$ 62,63 bilhões a -R\$ 63,93 bilhões para o setor G. Para a massa salarial, o impacto acumulado do rompimento da barragem é de -R\$1,29 bilhões a -R\$1,20 bilhões para o setor M e, para o setor G, é de -R\$ 61,55 bilhões a -R\$ 61,82 bilhões.

Tabela 10 — Mensuração do impacto no PIB (em R\$ bilhões de 2016) pela ótica da renda: Cenário 2

	2015		2016		2017		Acumulado	
	Ótica da Renda							
Variação	R\$ bi	%	R\$ bi	%	R\$ bi	%	R\$ bi	%
Massa da Renda da Terra M	-1,35	3,82	-1,72	4,29	-2,40	3,95	-5,47	4,01
Massa da Renda da Terra G	-1,01	2,84	-1,13	2,82	-1,72	2,84	-3,86	2,84
Subtotal	-2,36	6,67	-2,85	7,11	-4,12	6,78	-9,33	6,85
Massa da Renda do Capital M	-0,20	0,58	-0,26	0,65	-0,36	0,59	-0,82	0,60
Massa da Renda do Capital G	-16,43	46,43	-18,51	46,12	-28,17	46,35	-63,11	46,31
Subtotal	-16,63	47,01	-18,77	46,77	-28,53	46,95	-63,93	46,91
Massa da Renda do Trabalho M	-0,30	0,84	-0,38	0,94	-0,53	0,86	-1,20	0,88
Massa da Renda do Trabalho G	-16,09	45,49	-18,13	45,18	-27,59	45,41	-61,82	45,36
Subtotal	-16,39	46,32	-18,51	46,12	-28,12	46,27	-63,02	46,24
Total	-35,38	100,00	-40,12	100,00	-60,77	100,00	-136,28	100,00

Fonte: Elaboração própria (2020).

Os impactos nas taxas de ocupações setoriais, emprego e razão salário estão na Tabela 11. Os resultados mostram magnitudes similares e consistentes ao resultado encontrado no Cenário 1. Isso mostra que mesmo com diferentes perturbações nas produtividades dos setores, houve um impacto substancial no mercado de trabalho. Essa similaridade entre os cenários pode ser consequência da diferença do tamanho do estoque de capital humano empregado em cada setor. O setor extrativo é relativamente pequeno na economia dos estados com aproximadamente 5% do estoque de capital humano.

Tabela 11 — Mensuração do impacto no emprego e desemprego: Cenário 2

	2015		2016		2017	
	Desastre	Cenário 2	Desastre	Cenário 2	Desastre	Cenário 2
Número de trabalhadores						
Desemprego total (%)	12,86	9,17	13,93	10,20	14,37	10,86
Número de desempregados (milhões)	1,46	1,04	1,59	1,16	1,64	1,24
Emprego no setor M	1,27	1,34	1,04	1,11	1,11	1,14
Emprego no setor G	85,86	89,49	85,03	88,69	84,52	88,00
Salário relativo (M/G)	1,54	1,52	1,55	1,52	1,59	1,60

Fonte: Elaboração própria (2020).

Concluindo, este exercício mostra que o impacto total no PIB de Minas Gerais e Espírito Santo é de R\$ 136,28 bilhões até 2017. Identifica-se que o impacto vem crescendo ano a ano, o que sugere que ações para a recuperação devem ser implementadas rapidamente. Além disso, encontra-se que o impacto do rompimento da barragem foi desigual entre os setores econômicos e entre agentes econômicos (detentores dos fatores de produção). Dentre o setor extrativo e os demais setores da economia, esse último foi o mais afetado, aproximadamente 94,09% do impacto total. Entretanto, como proporção do PIB de cada setor, ambos foram afetados de forma semelhante, visto que o setor extrativo perdeu 6,33% do PIB, em média, e os demais setores perderam 6,34% do PIB, em média. A massa salarial e massa de renda do capital foram igualmente afetados, juntos representando 92,86% do impacto total. Além disso, houve aumento do desemprego total da economia e redução dos salários médios pagos ao trabalhador dos dois setores, sendo que para o setor extrativo, a queda foi proporcionalmente menor do que para os demais setores da economia. Como é possível concluir, toda a economia de Minas Gerais e Espírito Santo foi afetada pelo rompimento da Barragem de Fundão e os esforços para a retomada da economia devem considerar que os setores e agentes econômicos foram todos afetados de forma diferente.

10 DECOMPOSIÇÃO DO IMPACTO

Nesta seção, analisa-se o impacto do rompimento da Barragem de Fundão no PIB dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo através da perturbação nas produtividades totais dos fatores de cada setor, A_{Mt} e A_{Gt} , nos recursos naturais (N_{Mt}), estoques de capital físico (K_{Mt} e K_{Gt}) e no mercado de trabalho através da alteração das probabilidades de encontrar e perder o emprego, s_{Gt} , s_{Mt} , f_{Gt} e f_{Mt} . De outra forma, interpreta-se o desastre pelo impacto desses parâmetros da economia.

Nessa seção, decompõe-se o impacto entre aquilo que deve ser devido às mudanças na produtividade (A_{Mt} e A_{Gt}), no mercado de trabalho (s_{Gt} , s_{Mt} , f_{Gt} e f_{Mt}) e fatores de produção (N_{Mt} , K_{Mt} e K_{Gt}). Esse último, divide-se em duas análises. A primeira é sobre o impacto nos fatores de produção em todos os setores (N_{Mt} e K_{Mt} para o setor M e K_{Gt} para o setor G) e a segunda se divide entre fatores de produção, recursos naturais (N_{Mt}) e capital físico (K_{Mt} e K_{Gt}).

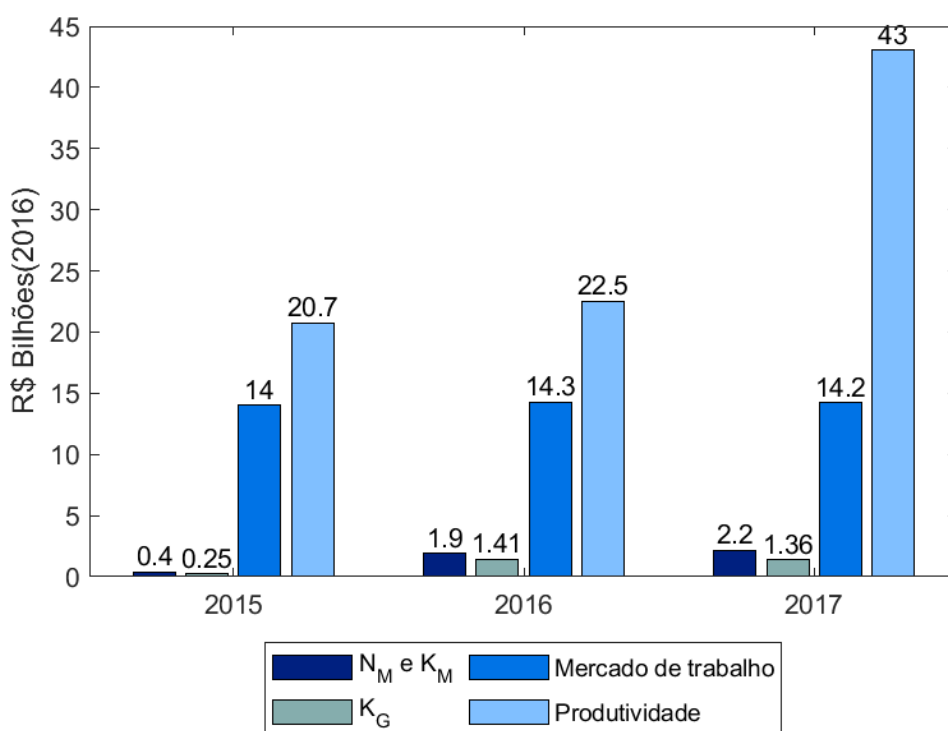
Este exercício de decomposição também pode ser interpretado da seguinte forma. Suponha que o desastre não tenha alterado o estoque de capital natural do setor extrativo (N_{Mt}), mas alterado todos os outros parâmetros. Qual teria sido o PIB dos estados para aquele ano? Suponha agora que, além de N_{Mt} , o desastre também não tenha afetado os estoques de capital físico (K_{Gt} e K_{Mt}). Qual o valor do PIB nesse cenário? O mesmo se faz para o mercado de trabalho e produtividades. É importante esclarecer que a decomposição é feita de forma cumulativa e não isoladamente para cada parâmetro, mantendo os outros constantes.

Para essa decomposição é importante lembrar que a mudança em um parâmetro que altere o nível ótimo de capital físico (K^*) da economia, também altera o estoque de capital corrente (K). Desse modo, a cada etapa, K_{Mt} e K_{Gt} são recalculados. Outro ponto a se esclarecer é que se tem consciência de que alterações em um desses determinantes poderiam causar alteração em outro. Por exemplo, alterações na produtividade dos setores também poderiam causar um efeito no mercado de trabalho. Entretanto, isso poderia dificultar a interpretação da decomposição e se tornar demasiado complexo ou subjetivo, pois como o determinante afetaria outro, dependeria de hipóteses. Assim, decide-se manter o exercício simples, mas robusto, sempre tendo em mente que esses efeitos secundários não estão sendo considerados na decomposição.

Esclarecidos esses pontos importantes, a Figura 24 mostra a decomposição do impacto nas partes causadas pelas alterações nos fatores de produção setorial (N_{Mt} e K_{Mt} para

o setor M e K_{Gt} para o setor G), mercado de trabalho (s_{Gt} , s_{Mt} , f_{Gt} e f_{Mt}) e produtividades (A_{Mt} e A_{Gt}). A parcela do impacto devida à destruição de recursos naturais e capital físico no setor M varia entre R\$ 390 milhões em 2015, R\$ 1,92 bilhões em 2016 e R\$ 2,17 bilhões em 2017.

Figura 24 — Decomposição dos impactos por canal



Fonte: Elaboração própria (2020).

De outra forma, pode-se interpretar esse resultado como, se o desastre não tivesse alterado o nível de capital físico do setor extrativo e os recursos naturais desse setor, o impacto total teria sido menor para todos os anos. Em números, a perda do PIB de R\$ 136 bilhões teria sido de R\$ 131 bilhões.

Mantendo a hipótese de ausência de impacto nos fatores de produção do setor extrativo e adicionando a hipótese de que o estoque de capital físico nos demais setores da economia não foram afetados, o impacto teria sido menor em R\$ 3 bilhões no acumulado dos três anos. Em termos relativos, a parcela devida à alteração no estoque de capital físico no setor G varia de 0,71% em 2015, 3,51% em 2016 e 2,24% em 2017 do impacto total do respectivo ano.

Esses valores ainda são muito pequenos no total do impacto do rompimento da barragem. Mais de 90% do impacto foi devido à perturbação no mercado de trabalho e

nas produtividades. Analisando o mercado de trabalho, em 2015, a parcela causada por esse fator é R\$ 14 bilhões; em 2016, é R\$ 14,27 bilhões e R\$ 14,20 bilhões em 2017.

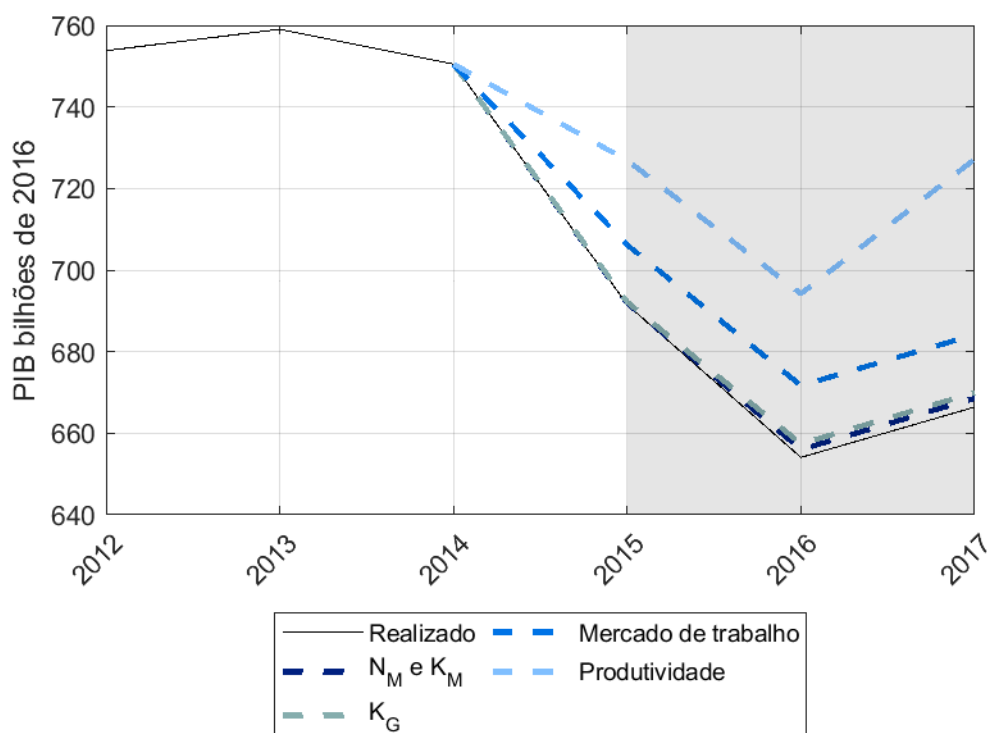
Por último, a parcela do impacto devido às alterações nas produtividades é ainda maior do que no mercado de trabalho. Em 2015, se as produtividades também não tivessem sido impactadas, a perda no PIB teria sido R\$ 20,74 bilhões menor em 2015, R\$ 22,51 bilhões em 2016 e R\$ 43 bilhões em 2017. Isso representa 58,61%, 51,11% e 70,82% do impacto total do respectivo ano, 2015, 2016 e 2017.

É interessante ver como a decomposição do mercado de trabalho e produtividades evoluíram ao longo do tempo. Enquanto que a parcela do primeiro se reduz com o tempo, a parcela da produtividade cresce, sugerindo que o impacto do rompimento nas produtividades vem causando danos maiores a cada ano. Isso pode ser interpretado devido ao fato de a produtividade representar no modelo vários fatores importantes de produção, como a poluição do rio.

Para se ter uma ideia melhor do tamanho do impacto nas produtividades e mercado de trabalho, em 2017, dos R\$ 60,8 bilhões de perda no PIB, R\$ 43 bilhões foi devido ao impacto nas produtividades e R\$ 14,20 bilhões foi devido ao mercado de trabalho. É importante se ter em mente que efeitos secundários entre esses determinantes não foram considerados nesse exercício.

Uma outra maneira de analisar a decomposição apresentada é a partir da construção da trajetória do PIB em cada um dos casos apresentados. A Figura 25 indica como seria o PIB utilizando a mesma lógica cumulativa de decomposição dos efeitos. Haja vista que o impacto no estoque de capital do setor G é pequeno, essa trajetória está muito próxima à do caso que retornamos o setor M (K_{Mt} e N_{Mt}). Por outro lado, é notável o quanto o PIB total de Minas Gerais e Espírito Santo seria maior caso não tivesse ocorrido o impacto no mercado de trabalho (linha azul escura) e, cumulativamente, no caso da produtividade (linha azul clara).

Figura 25 — Dinâmica do PIB na decomposição dos impactos por setor

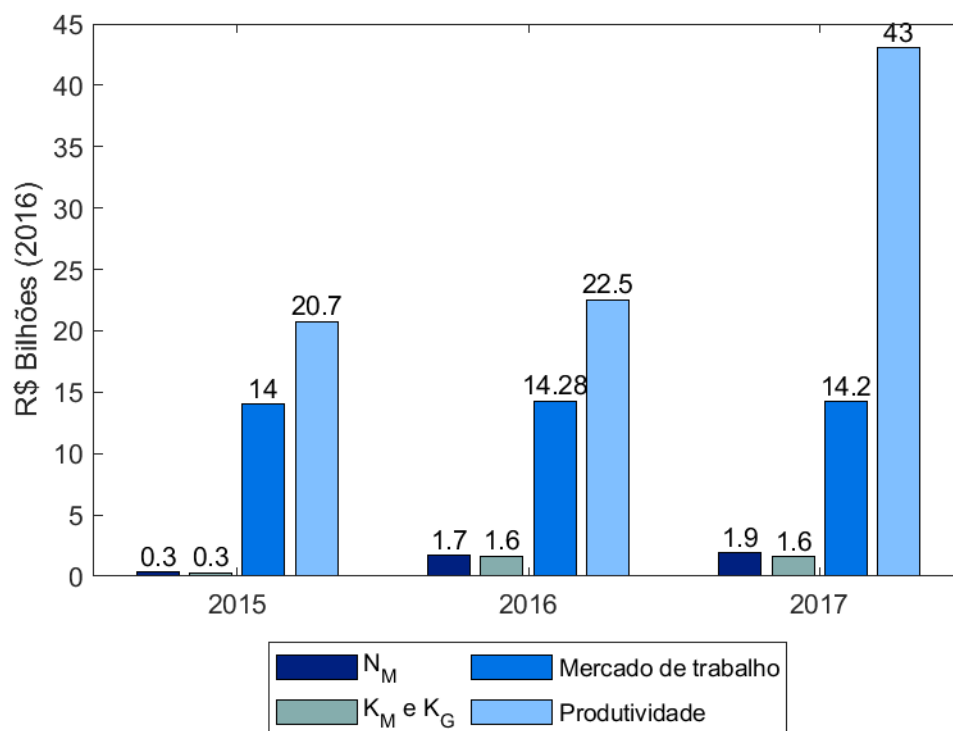


Fonte: Elaboração própria (2020).

Uma proposta alternativa de decomposição é a partir dos fatores de produção de ambos os setores, ou seja, qual parcela do impacto foi causada pela destruição de N_{Mt} e quanto foi devido à destruição de K_{Gt} e K_{Mt} . A Figura 26 mostra que a parcela do impacto devido à destruição dos recursos naturais foi de R\$ 0,344 bilhões em 2015, R\$ 1,7 bilhões em 2016 e R\$ 1,9 bilhões em 2017. Comparando com a decomposição anterior, é possível decompor de forma bruta o impacto da destruição de N_{Mt} do impacto da destruição de K_{Mt} . Comparando a Figura 26 com a Figura 24, observa-se que quase toda a parcela de impacto nos fatores de produção no setor extrativo foi devido à destruição de N_{Mt} .

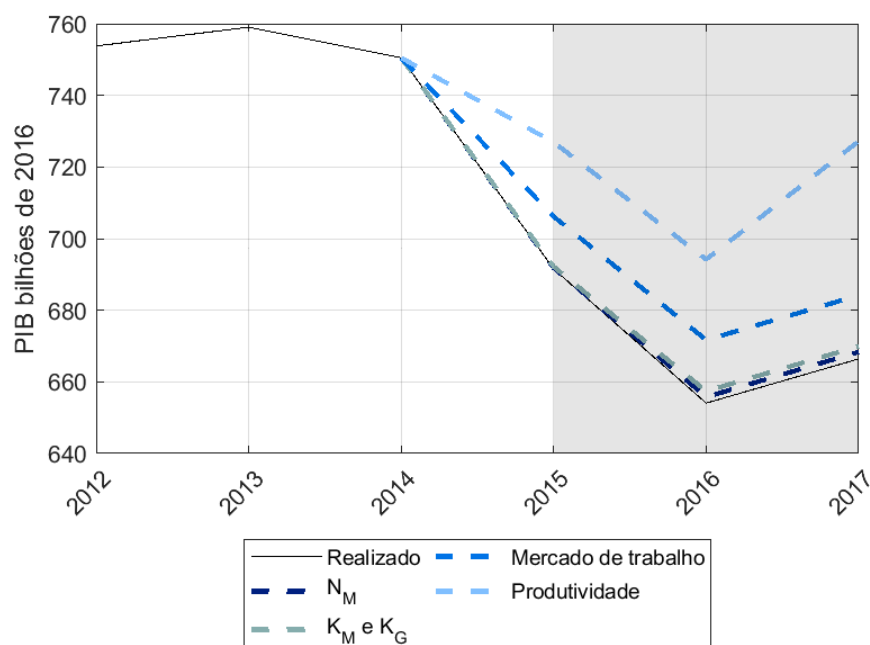
Por outro lado, quando se analisa o impacto da destruição do capital físico nos dois setores, observa-se como a parcela causada por esse fator de produção aumenta substancialmente. Em outras palavras, a parcela provocada pela destruição de capital no setor extrativo é relativamente maior do que o efeito da destruição de capital nos demais setores da economia. Em 2015, a destruição de capital físico (K_{Gt} e K_{Mt}) foi de R\$ 300 milhões; em 2016, R\$ 1,64 bilhões e, em 2017, foi de R\$ 1,6 bilhões.

Figura 26 — Decomposição dos impactos por fatores



Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 27 — Dinâmica do PIB na decomposição dos impactos por fator



Fonte: Elaboração própria (2020).

Uma questão que pode ser levantada sobre essa estratégia de decompor o impacto está relacionada à ordem à qual decomparamos os efeitos. Em virtude disso, o APÊNDICE H contém o mesmo exercício de decomposição a nível de setor e de fator, porém agora na ordem invertida, começando por produtividade, mercado de trabalho, estoque de capital no setor G e estoque de capital e terra no setor M para o caso da decomposição de setor e a decomposição do impacto a nível de fatores, começando por produtividade, mercado de trabalho, estoque de capital, de ambos os setores, e com estoque total de terras.

Concluindo, a decomposição mostra que a maior parte da perda do PIB foi causada pelo impacto que o rompimento teve nas produtividades setoriais e pelas perturbações no mercado de trabalho. Com relação aos fatores de produção, grande parte da perda no PIB do setor extrativo foi devido à destruição de seus recursos naturais. Enquanto que, em termos percentuais ao seu próprio estoque, a parcela da destruição do capital físico no setor extrativo é relativamente maior do que a destruição nos demais setores da economia.

11 DISCUSSÃO SOBRE O FECHAMENTO DA MINERADORA SAMARCO S.A.

A Mineradora Samarco S.A. tem sua atividade da extração até a exportação nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo. Ela representa aproximadamente 6% do PIB extrativo desses estados (Samarco, 2014). Após o rompimento, ela parou suas atividades e, até 2020, não havia retomado. Essa parada influenciou vários municípios que, de forma direta ou indireta, faziam parte da cadeia produtiva de extração mineral. Esse efeito pode ter sido potencializado devido ao efeito multiplicador que esse importante setor tem na economia mineira e capixaba. Simonato et al. (2018) estimam que, a cada R\$ 1,00 de queda na produção do setor extrativo, há uma redução de R\$ 1,37 no PIB de Mariana e R\$ 1,44 no PIB de Minas Gerais.

Dessa forma, essa seção busca discutir o impacto que a parada da atividade da Samarco teve nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo, considerando o seu efeito em toda a cadeia produtiva. Para isso, pressupõe-se três hipóteses. A primeira é que a parada da Samarco não afetou a produtividade do setor como um todo. A segunda e terceira são relacionadas aos fatores de produção. Suponha que, no Cenário A, toda a redução dos recursos naturais foi da empresa Samarco, de modo a supor que reabrir a Samarco signifique que o fator de produção N_{Mt} retorne ao que era anteriormente ao desastre. A última hipótese compõe o Cenário B, onde, além de N_{Mt} , todo o estoque de capital físico não utilizado após o rompimento também seja da Samarco. Assim, retomar a produção pode ser interpretado no modelo como retornar N_{Mt} e K_{Mt} igual ao contrafactual. Esses dois cenários são considerados conservadores, pois admitem que todo o impacto no setor extrativo foi devido ao fechamento da empresa. É importante ter em mente que não se considerou o impacto no mercado de trabalho devido à retomada da Samarco.

A Figura 24 e a Figura 26 ajudam a responder essa questão proposta. Analisando os valores das decomposições, o impacto do fechamento da Samarco foi de R\$ 344 milhões em 2015, R\$ 1,7 bilhões em 2016 e R\$ 1,9 bilhões em 2017 no Cenário A. No acumulado, isso representa 2,9% do impacto total, R\$ 3,96 bilhões. No Cenário B, esse valor será maior, pois agora, a Samarco representa todo o impacto nos estoques de capital físico e recursos naturais do setor extrativo. No acumulado, o impacto é R\$ 4,48 bilhões ou 3,29% do impacto total. Em 2015, o PIB perdeu R\$ 390 milhões, em 2016, R\$ 1,92 bilhões e, em 2017, R\$ 2,17 bilhões.

12 CONCLUSÃO

O presente estudo é uma extensão do relatório apresentado em 2019 (Fundação Getúlio Vargas, 2019), cujo objetivo é mensurar o impacto do rompimento da Barragem de Fundão em 5 de novembro de 2015 na economia dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo. Neste trabalho, desenvolve-se um Modelo de Equilíbrio Geral desagregado em dois setores intermediários, extrativo e demais setores, e que utilizam três insumos de produção, capital físico, capital humano e recursos naturais. Dessa forma, pretende-se mensurar o impacto no PIB calculado pela ótica da produção e da renda, permitindo, assim, analisar como o impacto do desastre se propagou de um setor ao outro e afetou o rendimento do trabalho, recursos naturais e bens de capital utilizados na produção.

Os resultados mostram que a perda de renda agregada de Minas Gerais e Espírito Santo, conjuntamente, situou-se em R\$ 136,28 bilhões entre 2015 e 2017, sendo 35,39 bilhões em 2015, 40,12 bilhões em 2016, e 60,77 bilhões em 2017. A divisão desse impacto entre os setores depende das trajetórias contrafactuais das variáveis. Para o presente exercício, elaborou-se dois cenários para as estimações das produtividades totais dos fatores, desse modo, pode-se observar uma perda agregada de 2015 a 2017 entre R\$ 7,49 bilhões e R\$ 8,05 bilhões para o setor M, e entre R\$ 128,23 bilhões e R\$ 128,79 bilhões para o setor G.

Sob a ótica da renda, do total do impacto de R\$ 136,28 bilhões entre 2015 e 2017, 92,9% se concentrou na remuneração total da renda do trabalho (46,11%) e do capital (46,75%). Os R\$ 9,72 bilhões (7,1%) restantes advém da perda de renda do fator terra. No tocante às análises de emprego, constatou-se que 420 mil pessoas ficaram desempregadas em 2015, as quais não estariam sem posto de trabalho no caso do Cenário sem o acontecimento do rompimento da Barragem de Fundão e todos os seus desdobramentos. Para 2016, o resultado foi de 420 mil pessoas desempregadas e, em 2017, esse número foi de 400 mil. É importante ressaltar que desse resultado já se desconta o aumento cíclico do desemprego que assolou todo o país no mesmo período de análise.

Além disso, faz-se também a decomposição da perda do PIB devido ao desastre entre os efeitos que o rompimento causou no mercado de trabalho, na produtividade dos setores e na destruição de capital físico, como por exemplo, rodovias, pontes e a parada Hidrelétrica Risoleta Neves. Os resultados mostram que, entre 2015 e 2017, R\$ 83,3 bilhões, ou 63,31% do total do impacto, está relacionado à perda da produtividade total dos fatores, o que inclui a perda da produtividade provinda do Rio Doce; R\$ 42,5 bilhões, ou 31,17% do total do impacto, deveu-se aos danos no mercado de trabalho, com

diminuição de novas contratações e aumento do desemprego; R\$ 7,5 bilhões (5,5%) devido à inibição do estoque de capital físico e de terra do setor M e das perdas do estoque de capital G, o que incorpora, por exemplo, a perda das moradias em Mariana e Barra Longa, diretamente destruídas pelos rejeitos.

Ademais, esse estudo também discute o efeito da paralização das atividades da Samarco Mineração S.A. através de dois cenários: o primeiro considera que todo o recurso natural do setor extrativo não utilizado após o rompimento é somente da Samarco; o segundo considera que todo o recurso natural e capital físico do setor extrativo que não foi utilizado após o desastre é da mesma empresa. Dessa forma, busca decompor o efeito do rompimento da consequente parada da produção extrativa e seus impactos nas economias das regiões atingidas.

Os resultados mostram que o impacto da parada da atividade da Samarco Mineração S.A. entre 2015 e 2017, no Cenário em que a Samarco pode ser representada por toda a variação na terra causada pelo desastre no setor extrativo, se a empresa não tivesse parado a perda no PIB seria de R\$ 3,96 bilhões, no acumulado dos três anos. No segundo Cenário, no qual a empresa representa toda a variação na terra e no capital físico no mesmo setor causada pelo desastre, a perda no PIB seria R\$ 4,48 bilhões. Desse modo, o custo econômico da parada da atividade da empresa é de 2,9% a 3,29% do total do impacto na economia.

Para concluir, este estudo sugere que o impacto do rompimento da Barragem de Fundão se encontra em trajetória de aumento nos três insumos de produção analisados, sobretudo nas produtividades totais de fatores e no mercado de trabalho. Desse modo, é essencial a adoção de ações de forte reparação nos fatores de produção, com soluções para cobrir a perda de produtividade no caso do Rio Doce, assim como o fortalecimento de oportunidades para a força de trabalho local, com ações voltadas às aberturas de novas vagas de emprego no setor extrativo e nos demais setores.

REFERÊNCIAS

ACEMOGLU, D. Good jobs versus bad jobs. **Journal of labor Economics**, v. 19, n. 1, p. 1-21, 2001.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Encarte Especial sobre a Bacia do Rio Doce: Rompimento da barragem em Mariana/MG**, 2016.

ANTTILA-HUGHES, J.; HSIANG, S. **Destruction, disinvestment, and death: Economic and human losses following environmental disaster**, 2013.

BANCO CENTRAL DO BRASIL (BCB). **Sistema Gerenciador de Séries Temporais**, [s.d.]. Disponível em: <<https://www3.bcb.gov.br/sgspub/localizarseries/localizarSeries.do?method=prepararTelaLocalizarSeries>>. Acesso em: 10 fev.2020.

BOSELLO, F. Economic impacts of climate change in Europe: sea-level rise. **Climatic change**, v. 112, n. 1, p. 63-81, 2012.

BRASIL. **Lei nº 12.334**, de 20 de setembro de 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm>.

_____. **Lei nº 14.066**, de 30 de setembro de 2020. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/L14066.htm>.

CASHIN, P; MCDERMOTT, C. J. Intertemporal Substitution and Terms-of-Trade Shocks. **Review of International Economics**, v. 11, n. 4, p. 604-618, 2003.

CAVALLO, NOY, I. Natural disasters and the economy – a survey. **International Review of Environmental and Resource Economics**, v. 5, n. 1, p. 63-102, 2011.

CORSETTI, G.; DEDOLA, L.; LEDUC, S. International risk sharing and the transmission of productivity shocks. **The Review of Economic Studies**, v. 75, n. 2, p. 443-473, 2008.

DIAMOND, P. A. Wage determination and efficiency in search equilibrium. **The Review of Economic Studies**, v. 49, n. 2, p. 217-227, 1982.

_____. **A Search Equilibrium Approach to the Micro Foundations Of Macroeconomics**. MIT press, 1984.

EISNER, R.; STROTZ, H. R. **Determinants of business investment**. Prentice-Hall, 1963.

EMATER MINAS GERAIS. Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado de Minas Gerais (EMATER-MG). **VALOR TERRA NUA** [s.d.]. Disponível em: <http://www.emater.mg.gov.br/portal.do?flagweb=novosite_pagina_interna&id=19167>

FELBERMAYR, G.; GRÖSCHL, J. Naturally negative: The growth effects of natural disasters. **Journal of development economics**, v. 111, p. 92-106, 2014.

FERNANDES, R.; MENEZES FILHO, N. A. Educação, Salários e a Alocação de Trabalhadores entre Tarefas: Teoria e evidências para o Brasil. **Pesquisa e Planejamento Econômico**, v. 42, n. 42, 2012.

FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS (FGV). **Impacto do Rompimento da Barragem de Fundão sobre a Renda Agregada nos Estados e Sub-regiões de Minas Gerais e Espírito Santo**. Rio de Janeiro; São Paulo: FGV, 2020.

_____. **Impacto do Rompimento da Barragem de Fundão sobre a Renda Agregada de Minas Gerais e Espírito Santo**. Rio de Janeiro; São Paulo: FGV, 2019.

_____. **Pesquisas Agrícolas – Preços médios de arrendamentos e vendas de terras, resultados de 2020**. Rio de Janeiro; São Paulo: FGV, 2020.

FUNDO MONETÁRIO NACIONAL (FMI). **World Economic Outlook Database**, 2009. Disponível em: <www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2019/02/weodata/index.aspx>. Acesso em: 11 nov. 2019.

HALLEGATTE, S. An adaptive regional input-output model and its application to the assessment of the economic cost of Katrina. **Risk Analysis: An International Journal**, v. 28, n. 3, p. 779-799, 2008.

HERDEIRO, R.; MENEZES FILHO, N.; KOMATSU, B. Explicando a Evolução dos Salários Relativos por Grupos de Qualificação no Brasil. **Inspier Policy Paper**, n. 38, 2019.

HSIANG, S. M.; & JINA, A. S. **The causal effect of environmental catastrophe on long-run economic growth: Evidence from 6,700 cyclones**. National Bureau of Economic Research, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico de 2010**, 2010.

_____. **Produto Interno dos Municípios** [s.d.]. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9088-produto-interno-bruto-dos-municipios.html?=&t=o-que-e>> Acesso em: 15 dez. 2019.

_____. **Sistema de Contas Nacionais** [s.d.]. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9052-sistema-de-contas-nacionais-brasil.html?=&t=o-que-e>> Acesso em: 15 nov. 2020.

_____. **Pesquisa Mensal do Emprego e Renda** [s.d.]. Disponível em <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/9180-pesquisa-mensal-de-emprego.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: 15 nov. 2020.

_____. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios** [s.d.]. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/educacao/9127-pesquisa-nacional-por-amostra-de-domicilios.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: 15 dez. 2010.

_____. COMISSÃO NACIONAL DE CLASSIFICAÇÃO (CONCLA). **CNAE-domiciliar 2.0**, [s.d.]. Disponível em <<https://concla.ibge.gov.br/classificacoes/por-tema/atividades-economicas/cnae-domiciliar-2-0.html>>. Acesso em: 23 jul. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Lauda Preliminar: Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da Barragem de Fundão**, em Mariana, Minas Gerais, 2015.

INSTITUTOS LACTEC. **Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da Barragem de Fundão na bacia do Rio Doce**. Curitiba: Institutos Lactec, 2019.

KAHN, M. E. The death toll from natural disasters: the role of income, geography, and institutions. **Review of Economics and Statistics**, v. 87, n. 2, p. 271-284, 2005.

KATZ, L. F.; MURPHY, KEVIN M. Changes in relative wages, 1963-1987: supply and demand factors. **The Quarterly Journal of Economics**, v. 107, n. 1, p. 35-78, 1992.

KIRCHGÄSSNER, G., Wolters, J., & Hassler, U. **Introduction to modern time series analysis**. Springer Science & Business Media, 2012.

KLOMP, J.; VALCKX, K. Natural disasters and economic growth: A meta-analysis. **Global Environmental Change**, v. 26, p. 183-195, 2014.

KRAVIS, I. B.; LIPSEY, R. E. **The Assessment of National Price Levels**. NBER Working Paper, 1986.

LJUNGQVIST, L.; SARGENT, T. J. **Recursive Macroeconomic**. Nova York, 2012.

MAPBIOMAS. **Coleção 2 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil**, 2018. Disponível em: <mapbiomas.org>.

MCCALL, J. J. Economics of information and job search. **The Quarterly Journal of Economics**, p. 113-126, 1970.

MINAS GERAIS. Secretaria de estado de desenvolvimento regional, política urbana e gestão metropolitana. Grupo Força-Tarefa. **Avaliação dos Efeitos e Desdobramentos do Rompimento da Barragem de Fundão em Mariana (MG)**. Belo Horizonte: Secretaria de Estado de Desenvolvimento Regional, Política Urbana e Gestão Metropolitana, 2016.

MOL, J. M.; BOTZEN, W. J. W.; BLASCH, J. E. Risk reduction in compulsory disaster insurance: Experimental evidence on moral hazard and financial incentives. **Journal of Behavioral and Experimental Economics**, v. 84, 2020.

MORTENSEN, D. T. ET AL. Job search and labor market analysis. **Handbook of Labor Economics**, v. 2, n. 15, p. 2005-2009, 1986.

NORDHAUS, W. D. To slow or not to slow: the economics of the greenhouse effect. **The Economic Journal**, v. 101, n. 407, p. 920-937, 1991.

NOY, I.; EDMONDS, C. **Increasing Fiscal Resilience to Disasters in the Pacific**. Natural Hazards, 2019.

OSTRY, J. D.; REINHART, C. M. Private Saving and Terms of Trade Shocks: Evidence from Developing Countries. **Palgrave Macmillan Journals on Behalf of the International Monetary Fund**, 1992.

PISSARIDES, C. A. Short-run equilibrium dynamics of unemployment, vacancies, and real wages. **The American Economic Review**, v. 75, n. 4, p. 676-690, 1985.

_____. **Equilibrium Unemployment Theory**. 2. ed., 2000.

RIBAS, R. P.; SOARES, S. S. D. O atrito nas pesquisas longitudinais: o caso da pesquisa mensal de emprego (PME/IBGE). **Estudos Econômicos**, v. 40, n. 1, p. 213-244, 2010.

ROSE, A.; LIAO, S. Y. Modeling regional economic resilience to disasters: A computable general equilibrium analysis of water service disruptions. **Journal of Regional Science**, v. 45, n. 1, p. 75-112, 2005.

ROZADA, M. G., NEUMEYER, P. A., CLEMENTE, A., SASSON, D. L., & TRACHTER, N. **The Elasticity of Substitution in Demand for Non-Tradable Goods in Latin America: The Case of Argentina**. Nova York: Inter-American Development Bank, 2004.

SAMARCO. **Relatório da Administração e Demonstrações Financeiras**, 2014.

SANTOS, E. T. dos; HADDAD, E. A. Mapeamento das perdas econômicas potenciais dos pontos de alagamento do município de São Paulo, 2008-2012. **Ambiente & Sociedade**, v. 17, n. 4, p. 77-94, 2014.

SECRETARIA DO TESOUREIRO NACIONAL (STN). **Banco de dados** [s.d.]. Disponível em: <<https://sisweb.tesouro.gov.br/apex/f?p=2031:2:0>>. Acesso em: 10 fev. 2020.

SELCUK, F.; YELDAN, E. On the macroeconomic impact of the August 1999 earthquake in Turkey: a first assessment. **Applied Economics Letters**, v. 8, n. 7, p. 483-488, 2001.

SHIMER, R. The cyclical behavior of equilibrium unemployment and vacancies. **American Economic Review**, v. 95, n. 1, p. 25-49, 2005.

SIMONATO, T. C.; DOMINGUES, E. P.; MAGALHÕES, A. S. **Projeção dos impactos econômicos regionais do desastre de Mariana (MG)**. Texto para Discussão nº 586. Belo Horizonte: CEDEPLAR-UFMG, 2018.

SOUZA, P. H. G. F. A distribuição de renda nas pesquisas domiciliares brasileiras: harmonização e comparação entre Censos, PNADs e POFs. **Rev. Bras. Estud. Popul.** v.32, n.1, p. 165-188, 2015.

STOCKMAN, A. C.; TESAR, L. L. Tastes and Technology in a Two-Country Model of the Business Cycle: Explaining International Comovements. **The American Economic Review**, p. 168-185, 1995.

STROBL, E. The economic growth impact of hurricanes: Evidence from US coastal counties. **Review of Economics and Statistics**, v. 93, n. 2, p. 575-589, 2011.

ULYSSEA, G. Regulation of entry, labor market institutions and the informal sector. **Journal of Development Economics**, v. 91, n. 1, p. 87-99, 2010.

VAZ, B. O. E.; BARREIRA, T. C. **Metodologia de retropolação da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua de 1992 a 2012**. Rio de Janeiro; RJ: FGV-IBRE, 2016.

VEREDA, L.; CAVALCANTI, M. A. **Modelo Dinâmico Estocástico de Equilíbrio Geral (DSGE) para a Economia Brasileira**. Working Paper, 2010.

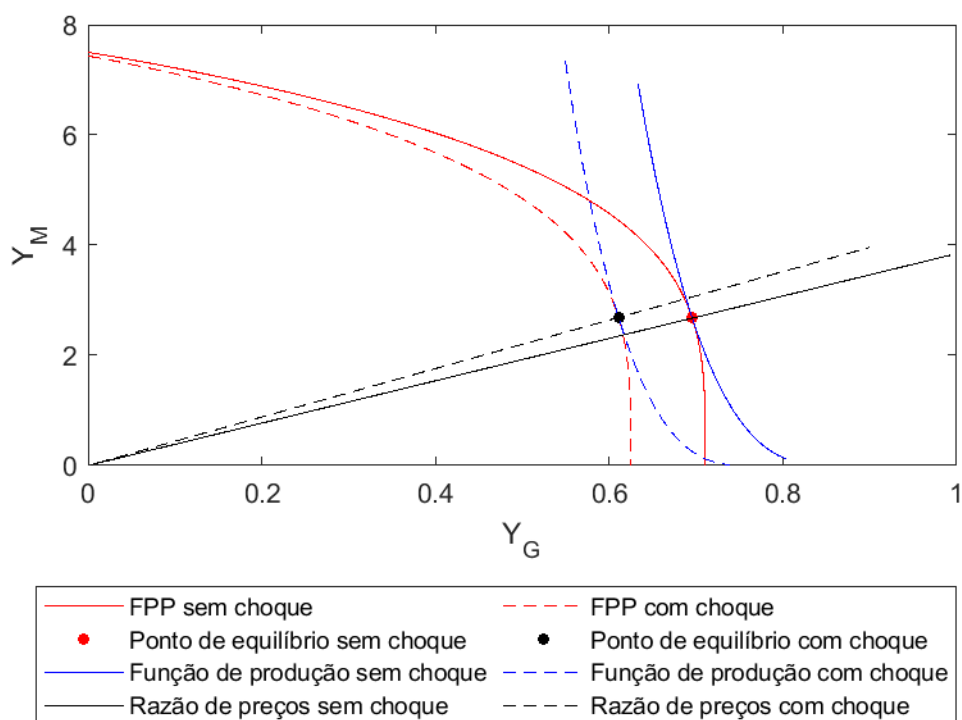
WOOLDRIDGE, J. M. **Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data**. MIT press, 2010.

WISE URANIUM PROJECT. **World Information Service on Energy (Wise)**, 2020.
Disponível em:< <https://www.wise-uranium.org/>>. Acesso em: 20 de agosto de 2020.

APÊNDICE A — Estática comparativa de um choque negativo na produtividade do setor extrativo (A_G)

Nesta seção, apresenta-se a dinâmica do modelo quando há um choque negativo na produtividade total dos fatores do setor G (A_G). A Figura 1 mostra o impacto na Fronteira de Possibilidade de Produção. Há uma redução da capacidade de produzir os bens do setor G. Dessa forma, o novo ponto de equilíbrio da economia produz menos no setor G, mas devido aos dois setores serem considerados substitutos brutos ($\rho = 1.6$), há um pequeno aumento na produção do setor M. No geral, há uma redução no PIB da economia como um todo.

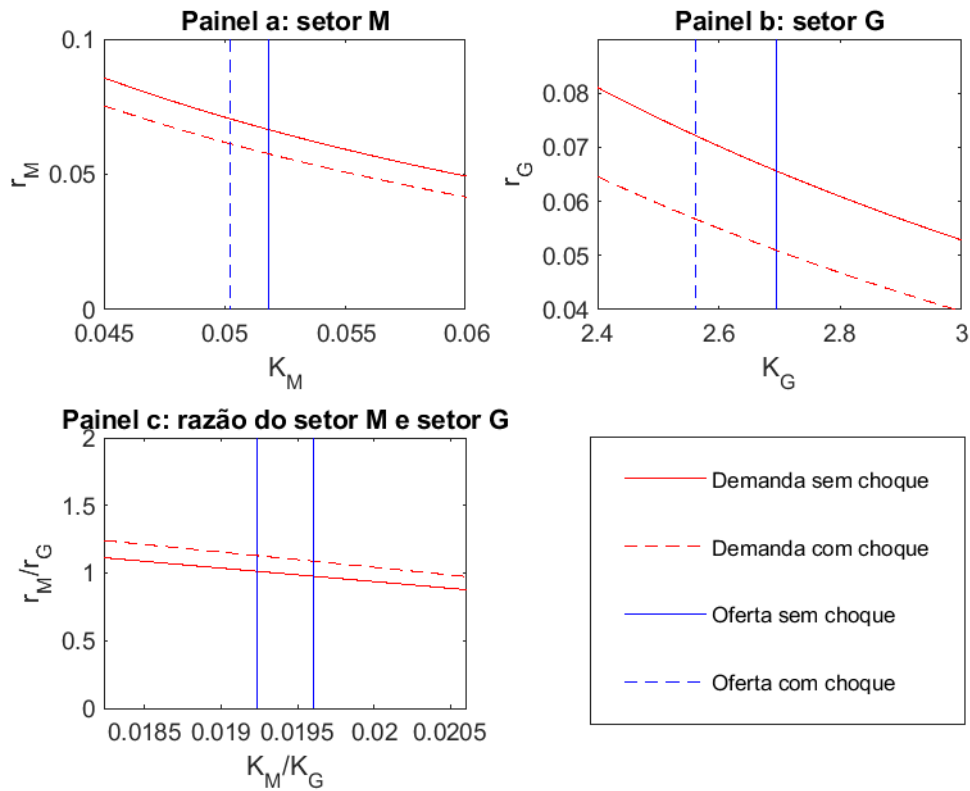
Figura 1 — Choque negativo em A_G no mercado de bens



Fonte: Elaboração Própria (2020).

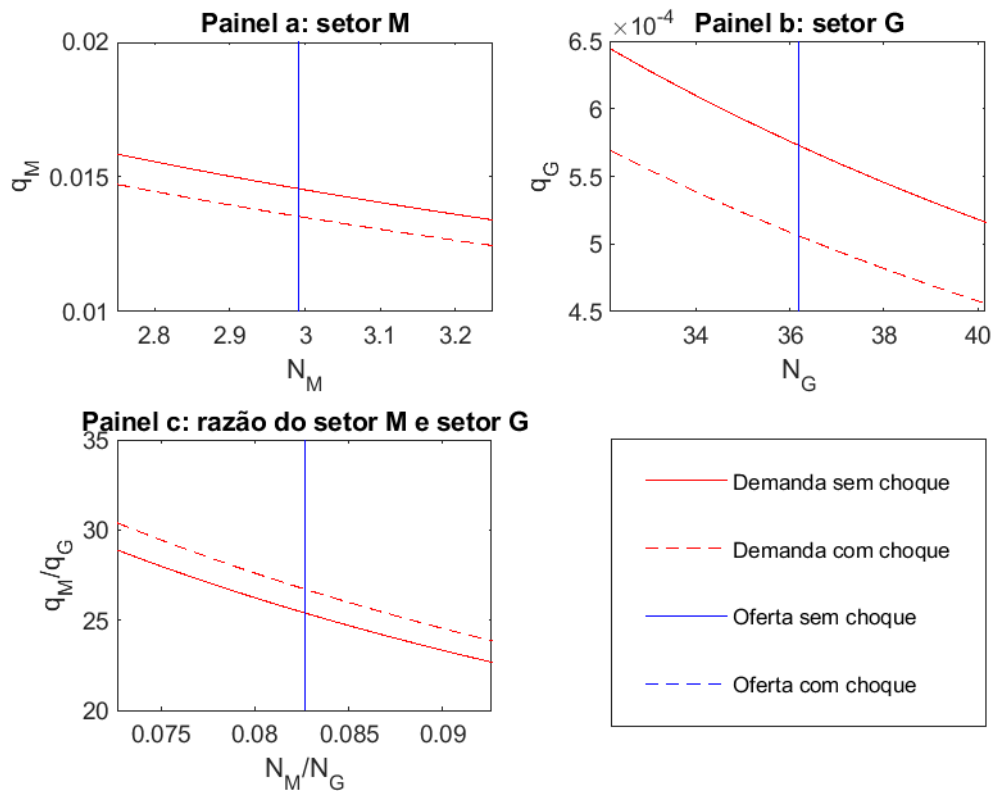
A Figura 2 mostra como o estoque de capital varia devido à redução na produtividade total dos fatores no setor G (A_G). O impacto nos níveis de estoque ótimo (K_M^* e K_G^*) nos dois setores é negativo, ou seja, há uma redução. Dessa forma, os estoques de capital físico correntes também sofrem uma variação negativa devido à redução em $P_{Mt}Y_{Mt}$ e $P_{Gt}Y_{Gt}$. No novo equilíbrio, tanto o estoque quanto o retorno são menores nos dois setores.

Figura 2 — Choque negativo em A_G no mercado de capital físico



No mercado de recursos naturais apresentado na Figura 3, como são fatores inelásticos, o efeito do choque é sobre o valor do arrendamento (q_G e q_M). Em ambos os setores, há uma redução da demanda por fatores de produção. Desta forma, também há uma redução do valor dos recursos naturais utilizados em toda a economia.

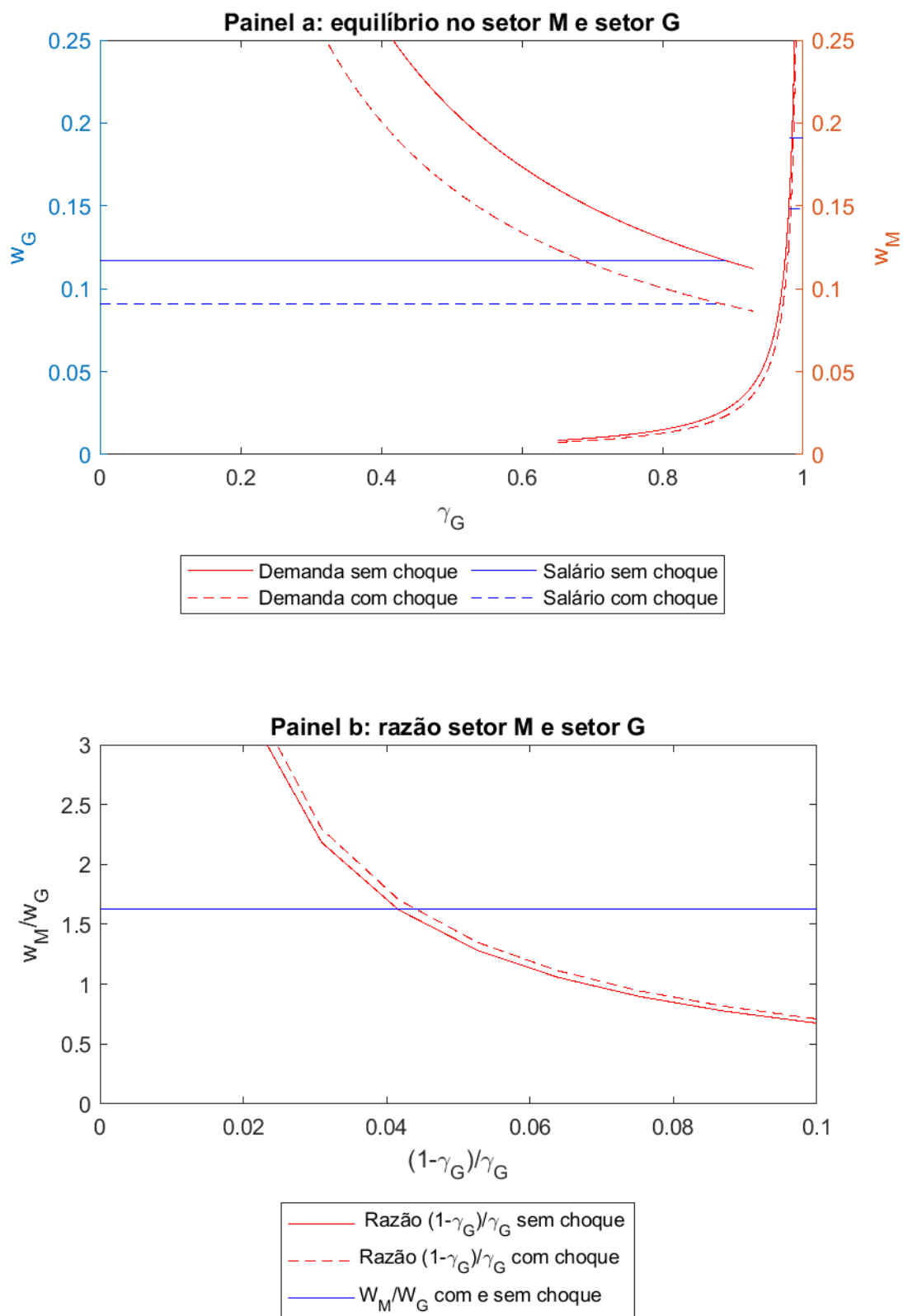
Figura 3 — Choque negativo em A_G no mercado de capital natural



Fonte: Elaboração Própria (2020).

Os painéis a e b da Figura 4 apresentam o impacto no mercado de trabalho. Observa-se que os salários caem em ambos os setores, mantendo sua razão constante. Há uma redução no capital humano empregado no setor G. Parte desse estoque que ficou desempregado é absorvido no setor M, mas o efeito líquido ainda é o aumento do desemprego na economia.

Figura 4 — Choque negativo em A_G no mercado de trabalho



Fonte: Elaboração Própria (2020).

APÊNDICE B — Capital humano para os setores M, G e desempregados

A definição de capital humano é baseada no trabalho de Katz e Murphy (1992), que desenvolvem um modelo para estimar a demanda e a oferta com uma elasticidade constante de substituição entre trabalhadores qualificados e não qualificados. Vamos admitir que o estoque de capital humano (H_{it}) para o estado i no tempo t é dado por (65), onde L_{1it} é o número de trabalhadores não qualificados, L_{2it} é o número de trabalhadores qualificados, b é a elasticidade de substituição entre os distintos de tipo de trabalho (constante no tempo e entre os estados) e a_{it} é um parâmetro que determina a importância relativa do trabalho não qualificado (que varia entre estados).

$$H_{it} = \left[a_{it} L_{1it}^{\frac{b-1}{b}} + (1 - a_{it}) L_{2it}^{\frac{b-1}{b}} \right]^{\frac{b}{b-1}} \quad (65)$$

Sob regras competitivas e sob a restrição que $wH = w_1 L_1 + w_2 L_2$, os salários relativos dos dois tipos de trabalho são dados por (66) e (67).

$$\frac{w_{1it}}{w_{it}} = a_{it} \left(\frac{L_{1it}}{H_{it}} \right)^{-\frac{1}{b}} \quad (66)$$

$$\frac{w_{2it}}{w_{it}} = (1 - a_{it}) \left(\frac{L_{2it}}{H_{it}} \right)^{-\frac{1}{b}} \quad (67)$$

$$\ln \left(\frac{w_{1it}}{w_{2it}} \right) = \ln \left(\frac{a_{it}}{1 - a_{it}} \right) - \frac{1}{b} \ln \left(\frac{L_{1it}}{L_{2it}} \right) \quad (68)$$

Como base nessa equação podemos obter uma estimativa para os parâmetros b e a_{it} , se os salários e quantidade de trabalhadores são disponíveis. Podemos obter b e a_{it} por uma regressão em painel da equação (69).

$$\ln \left(\frac{w_{1it}}{w_{2it}} \right) = \mu_i + \delta_t + c_2 \ln \left(\frac{L_{1it}}{L_{2it}} \right) + u_{it} \quad (69)$$

Onde μ_i é o efeito fixo do estado, δ_t é o efeito fixo tempo e u_{it} é o termo de erro idiossincrático. Logo, é possível se obter os parâmetros da equação (69) através das funções $\mu_i + \delta_t = \ln \left(\frac{a_{it}}{1 - a_{it}} \right)$ e $c_2 = -\frac{1}{b}$.

Por fim, necessitamos obter L_{1it} e L_{2it} . A definição dos grupos de trabalhadores se dará com base nas informações de escolaridade de Censo populacional 2010, PNAD e PNAD

Contínua¹⁵. Os trabalhadores não qualificados são aqueles que estudam ou estudaram até os níveis: 1) Fundamental 1 (até a 4ª série); 2) Fundamental 2 (da 5ª a 8ª série); 3) Médio. Os trabalhadores qualificados têm os níveis de escolaridade: 4) Superior incompleto; 5) Superior completo. Para cada um desses grupos serão definidos subgrupos (células) com base no nível de escolaridade, idade e sexo.

Para o presente estudo foram construídas 40 células de tipos de trabalhadores equivalentes com as seguintes definições:

Sexo:

- Assume o valor 1 para o sexo masculino;
- Assume o valor 0 para o sexo feminino.

Idade:

- Assume o valor 1 para indivíduos com idade entre 14 e 24 anos;
- Assume o valor 2 para indivíduos com idade entre 25 e 44 anos;
- Assume o valor 3 para indivíduos com idade entre 45 e 59 anos;
- Assume o valor 4 para indivíduos com idade acima de 60.

Educação:

- Assume o valor 1 para indivíduos que são alfabetizados e/ou frequentam ou frequentaram o fundamental 1;
- Assume o valor 2 para indivíduos que frequentam ou frequentaram o fundamental 2;
- Assume o valor 3 para indivíduos que frequentam ou frequentaram o ensino médio;
- Assume o valor 4 para indivíduos com ensino superior incompleto;
- Assume o valor 5 para indivíduos com ensino superior completo ou mais.

A partir do indicador de Educação, assume-se como trabalhador não qualificado os indivíduos com indicadores de 1 a 3 e qualificado os indivíduos com valores 4 e 5. Em

¹⁵ Para compatibilizar a amostra das três bases se exclui as pessoas com menos de 14 anos, pessoas que trabalham menos do que uma hora por semana, trabalhadores para consumo próprio e afastados do trabalho das bases da PNAD e Censo Demográfico 2010 (Vaz e Barreira, 2016) e dessa última também foi retirado os 0,1% mais ricos (Souza, 2015).

ambos os casos, criou-se uma célula de referência igual a 1, de modo que as demais células reportam os pesos relativos em cada caso.

- Peso igual a 1 para trabalhadores não qualificados: célula 123 (homens, com idade entre 25 e 44 anos com ensino médio);
- Peso igual a 1 para trabalhadores qualificados: célula 125 (homens com idade entre 25 e 44 anos com superior completo).

Então, dada a célula de referência para cada tipo de trabalhadores (qualificados e não-qualificados), os trabalhadores das demais células serão considerados substitutos perfeitos aos trabalhadores de referência em uma razão determinada pelo fator de equivalência δ_{jk} , onde $j = \{1,2\}$ e $k = \{1, \dots, 40\}$, que é constante no tempo e entre os estados. Se $j = 1, k = \{1, \dots, 32\}$, ou seja, trabalhadores com até o ensino médio. Se $j = 2, k = \{33, \dots, 40\}$, o que significa que são os trabalhadores com ensino superior completo e incompleto. Para a construção do número de trabalhadores equivalentes do tipo j , no estado i e no tempo t (N_{jit}), primeiro foram computados o total de horas/semanas trabalhadas dentro de cada célula e divididos por 44 horas para que consistisse de indivíduos trabalhando 44 horas semanais.

Assim, se a célula j para o estado i no tempo t possui N_{jit} trabalhadores por 44 horas trabalhadas na semana, nós diremos que ela possui $\delta_{jk}N_{jit}$ “trabalhadores equivalentes” ao da célula de referência. Os trabalhadores de referência para os não qualificados são representados pela célula dos trabalhadores homem, com ensino médio de 25 a 44 anos e a categoria de referência para os do ensino superior é a dos trabalhadores homens com ensino superior e idade entre 25 e 44 anos. Desse modo, computa-se a quantidade de trabalhadores:

$$L_{jit} = \sum_{k \in j} \delta_{jk} N_{kit}, j = \{1,2\} \quad (70)$$

Ou seja, $L_{1it} = \sum_{k \leq 32} \delta_k N_{kit}$ e $L_{2it} = \sum_{k > 32} \delta_k N_{kit}$.

Em (70), N_{jit} é o número de trabalhadores na célula $jkit$ e δ_{jk} é definido como a razão entre o salário médio da célula $jkit$ e o salário médio da célula de referências dos trabalhadores de tipo j , de modo que para as células de referência temos $\delta_{jk} = 1$. Como a razão entre os salários pode variar de ano para ano e entre os estados, δ_{jk} será determinado pela a razão média entre todos os anos e estados considerados na análise. Os salários médios foram ajustados para uma semana-padrão de trabalho de 44 horas e não foram considerados os trabalhadores cujas semanas típicas de trabalho tivessem menos do que 30 horas. A Tabela 1 apresenta os valores de δ_{jk} para todas as células utilizadas.

Tabela 1 — Pesos dos trabalhadores equivalentes

Id	Indicador	Peso
1	011	0,30
2	012	0,34
3	013	0,47
4	021	0,42
5	022	0,50
6	023	0,69
7	031	0,52
8	032	0,59
9	033	0,92
10	041	0,56
11	042	0,65
12	043	1,17
13	111	0,39
14	112	0,46
15	113	0,58
16	121	0,58
17	122	0,73
18	123	1,00
19	131	0,75
20	132	0,94
21	133	1,46
22	141	0,82
23	142	1,03
24	143	1,70
25	014	0,25
26	015	0,41
27	024	0,39
28	025	0,69
29	034	0,53
30	035	0,92
31	044	0,60
32	045	1,08
33	114	0,31
34	115	0,50
35	124	0,57
36	125	1,00
37	134	0,85
38	135	1,45
39	144	0,89
40	145	1,80

Fonte: Elaboração própria (2020) a partir de dados PNAD IBGE.

Com isso, podemos calcular o montante de trabalhadores equivalentes para os dois grupos L_{1it} e L_{2it} para cada estado i e período de referência t . Desta forma, utilizamos a equação (65) para computar o estoque de capital humano H_{it} para um dado estado i no período t . Para o caso de Minas Gerais e Espírito Santo, utilizamos os parâmetros a_i e b da Tabela 2 na construção do Capital Humano.

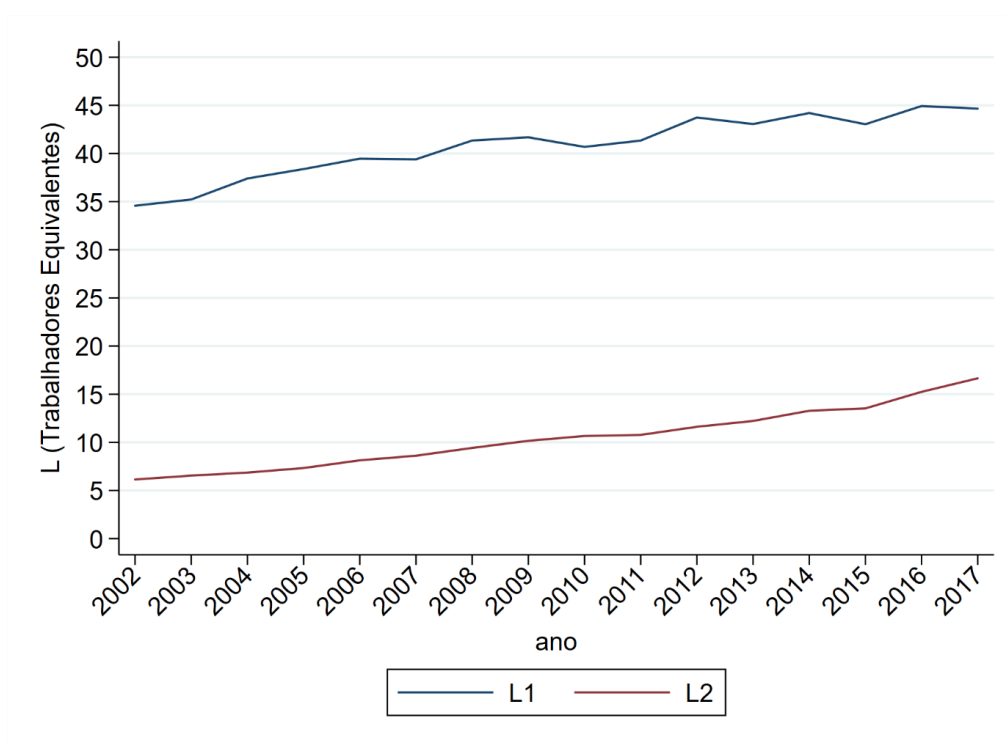
Tabela 2 — Parâmetros para o cálculo do estoque de capital humano (H_{it})

Ano	a_{it} MG	a_{it} ES	b
2012	0,36	0,37	3,44
2013	0,36	0,37	3,44
2014	0,36	0,37	3,44
2015	0,35	0,36	3,44
2016	0,35	0,36	3,44
2017	0,35	0,36	3,44
2018	0,34	0,35	3,44

Fonte: Elaboração própria (2020) a partir de dados PNAD IBGE.

Note que o parâmetro b é constante para ambas as unidades federativas e para todos os períodos. A fim de fornecer algumas estatísticas descritivas sobre o estoque de Capital Humano, a Figura 1 apresenta a evolução do número total de trabalhadores não qualificados e qualificados e do capital humano estimado através da equação (70) para o Brasil, a Figura 2 número total de trabalhadores não qualificados e qualificados para Minas Gerais e Espírito Santo, sendo a Figura 3 apenas para os trabalhadores de Minas Gerais e Espírito Santo do setor M e a Figura 4 para o setor G.

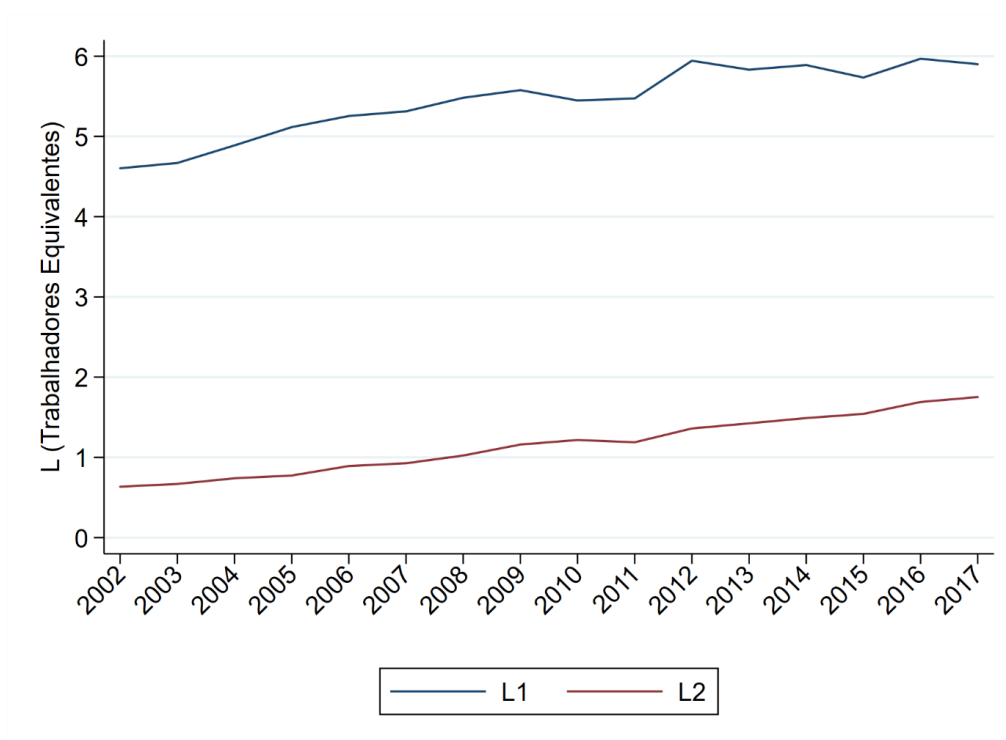
Figura 1 — Evolução dos trabalhadores qualificados e não qualificados do Brasil



Fonte: Elaboração própria (2020) a partir de dados do IBGE.

Observação: Sistematização das bases PNAD, Censo Demográfico de 2010 e PNAD contínua.

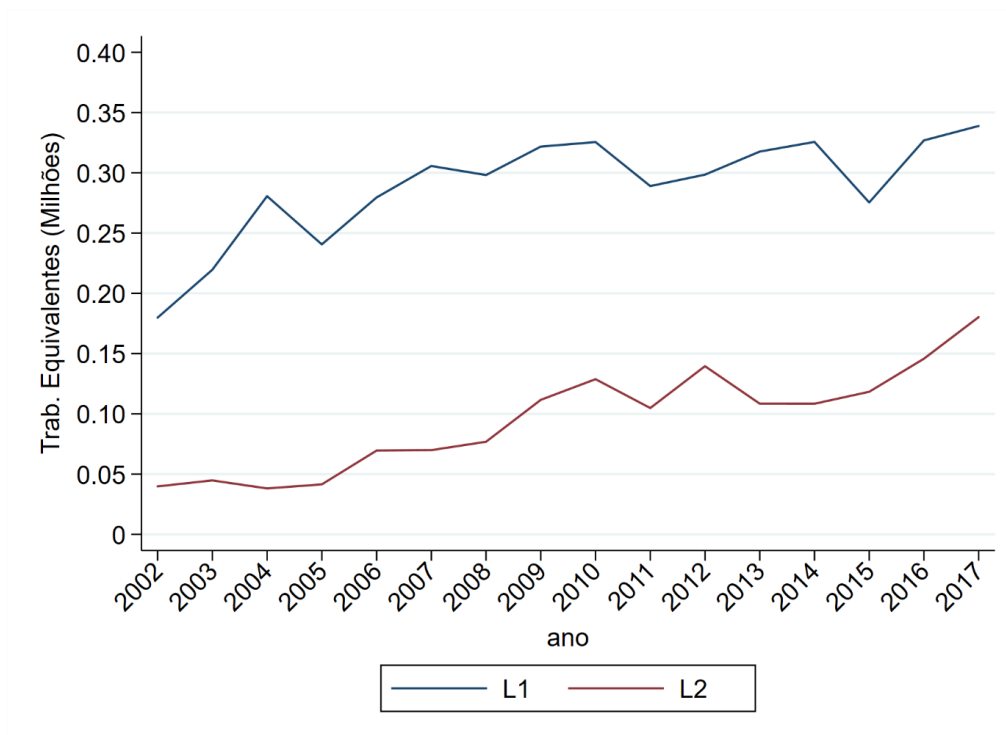
Figura 2 — Evolução dos trabalhadores qualificados e não qualificados em Minas Gerais e Espírito Santo



Fonte: Elaboração própria (2020) a partir de dados do IBGE.

Observação: Sistematização das bases PNAD, Censo Demográfico de 2010 e PNAD contínua.

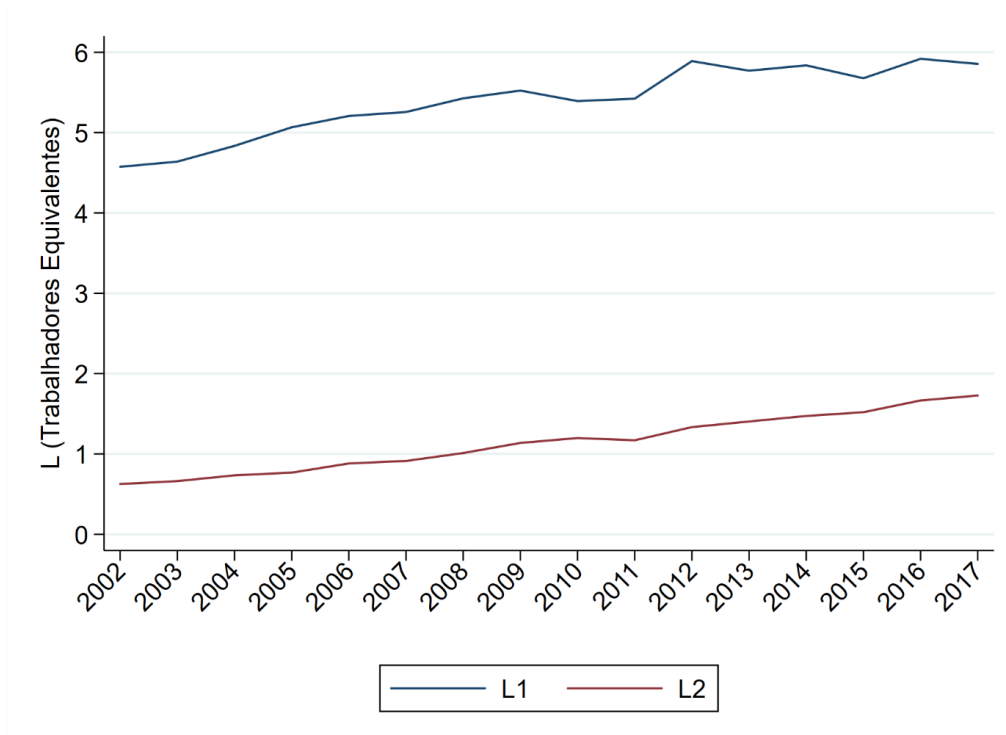
Figura 3 — Evolução dos trabalhadores qualificados e não qualificados para o setor extrativo em Minas Gerais e Espírito Santo



Fonte: Elaboração própria (2020) a partir de dados do IBGE.

Observação: Sistematização das bases PNAD, Censo Demográfico de 2010 e PNAD contínua.

Figura 4 — Evolução dos trabalhadores qualificados e não qualificados para os demais setores em Minas Gerais e Espírito Santo



Fonte: Elaboração própria (2020) a partir de dados do IBGE.

Observação: Sistematização das bases PNAD, Censo Demográfico de 2010 e PNAD contínua.

Sobre os detalhes das estimações dos parâmetros a_{it} e b estimados, a Tabela 3 apresenta as estimativas da elasticidade de substituição entre os dois tipos de trabalhadores. As três primeiras colunas mostram a estimativa utilizando todos os anos de 2002 a 2014. As últimas três colunas apresentam a estimativa excluindo o ano de 2010 devido às diferenças nos conceitos e ponderações entre as duas bases de dados. Os resultados mostram que não há diferença significativa entre as estimativas com a inclusão e exclusão do ano de 2010. Entretanto, para ser mais conservador, não se utiliza o ano do Censo Demográfico para essa estimativa.

A diferença entre os valores estimados para a elasticidade de substituição é causada pela forma funcional. Observa-se que, sem a inclusão de variáveis de tendência, toda a variação da diferença salarial é explicada pela diferença entre as quantidades de trabalhadores, o que implica que eles sejam pouco substitutos, elasticidade de 1,901. Entretanto, com a inclusão da tendência e tendência quadrática, os trabalhadores apresentam elasticidade de substituição maior, 3,41. A título de comparação, Fernandes e Menezes Filho (2012) estimam elasticidades de substituição para o Brasil entre 1,44 e 2,98 entre trabalhadores não qualificados e intermediários e 1,60 a 2,03 entre os intermediários e qualificados utilizando as PNAD de 1981 a 2009. Herdeiro, Menezes Filho e Komatsu (2019), utilizando uma base de dados da PNAD mais extensa, de 1981 a 2015, estimam elasticidades de substituição para o Brasil entre 7,35 entre os trabalhadores intermediários e pouco qualificados e 1,44 para os qualificados e intermediários. A diferença entre os valores pode ser explicada pela diferença na metodologia aplicada pelos autores mencionados e aquele utilizado neste estudo. Destacam-se três diferenças. A primeira é a estrutura da base de dados. Os autores estimam a elasticidade de substituição para o Brasil, enquanto que, neste estudo, estima-se para os estados. A segunda é a utilização de séries de tempo que começam em 1981. Nós utilizamos um painel de estados com séries de tempo mais curta desde 2002. A terceira é a quantidade de abertura dos níveis de qualificação dos trabalhadores. Eles utilizam três níveis e, neste estudo, calculam-se dois níveis. Apesar das diferenças substanciais entre as metodologias implementadas pelos autores e aquela utilizada nesta análise, os resultados encontrados podem ser considerados semelhantes.

Tabela 3 — Estimativa da elasticidade de substituição entre os trabalhadores não qualificados (L₁) e qualificados (L₂) total

Variáveis	Estimativas com 2010			Estimativas sem 2010		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
ln(L ₁ /L ₂)	-0.509*** (-11.36)	-0.193*** (-2.654)	-0.217*** (-3.935)	-0.526*** (-10.47)	-0.235*** (-2.756)	-0.291*** (-5.339)
Tendência		0.0154*** (5.175)	0.0315*** (4.561)		0.0140*** (4.106)	0.0343*** (5.406)
Tendência ²			-0.00118** (-2.527)			-0.00156*** (-3.699)
Elasticidade (b)	1.964	5.187	4.600	1.901	4.261	3.438
Efeito fixo	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Observações	351	351	351	324	324	324
R ²	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998

Fonte: Elaboração própria (2020) a partir de dados do IBGE.

Observação: Estatística t robusta entre parênteses. *** p-valor < 0,01, ** p-valor < 0,05, * p-valor < 0,1.

Tabela 4 — Estimativa da elasticidade de substituição entre os trabalhadores não qualificados (L₁) e qualificados (L₂) do setor extrativo

Variáveis	Estimativas com 2010			Estimativas sem 2010		
	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
ln(L ₁ /L ₂)	0.132*** (2.726)	0.132** (2.374)	0.140** (2.477)	0.130** (2.594)	0.127** (2.178)	0.134** (2.277)
Tendência		4.25e-05 (0.00495)	0.0257 (0.840)		-0.000788 (-0.0892)	0.0293 (0.912)
Tendência ²			-0.00168 (-0.950)			-0.00197 (-1.051)
Elasticidade (b)	-7.582	-7.573	-7.140	-7.716	-7.895	-7.472
Efeito fixo	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Observações	-7.582	-7.573	-7.140	-7.716	-7.895	-7.472
R ²	0.956	0.956	0.956	0.952	0.952	0.953

Fonte: Elaboração própria (2020) a partir de dados do IBGE.

Observação: Estatística t robusta entre parênteses. *** p-valor < 0,01, ** p-valor < 0,05, * p-valor < 0,1.

Tabela 5 — Estimativa da elasticidade de substituição entre os trabalhadores não qualificados (L1) e qualificados (L2) dos demais setores

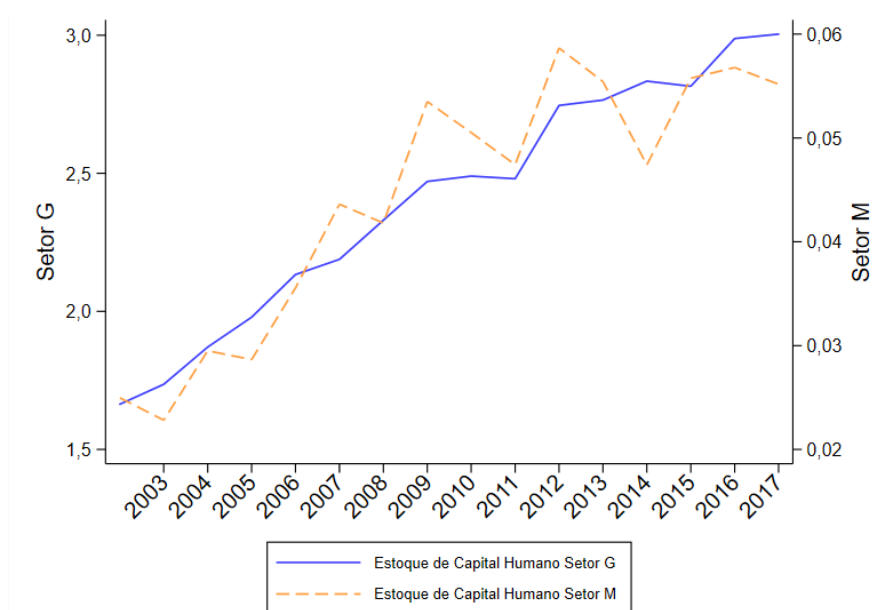
Variáveis	Estimativas com 2010			Estimativas sem 2010		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
$\ln(L_1/L_2)$	-0.516*** (-11.07)	-0.202*** (-2.650)	-0.229*** (-3.965)	-0.532*** (-10.17)	-0.242*** (-2.701)	-0.302*** (-5.234)
Tendência		0.0152*** (5.071)	0.0317*** (4.474)		0.0139*** (4.022)	0.0346*** (5.268)
Tendência ²			-0.00122** (-2.532)			-0.00160*** (-3.665)
Elasticidade (b)	1.940	4.957	4.371	1.880	4.133	3.314
Efeito fixo	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Observações	351	351	351	324	324	324
R ²	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998

Fonte: Elaboração Própria (2020) a partir de dados do IBGE.

Observação: Estatística t robusta entre parênteses. *** p-valor < 0,01, ** p-valor < 0,05, * p-valor < 0,1.

A Figura 5 apresenta a evolução do capital humano estimado através da equação (65) para cada setor dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo, conjuntamente. A Figura 6 e a Figura 7 mostram a evolução do estoque de capital humano para o setor extrativo e demais setores, respectivamente, dos estados atingidos em comparação ao estoque brasileiro.

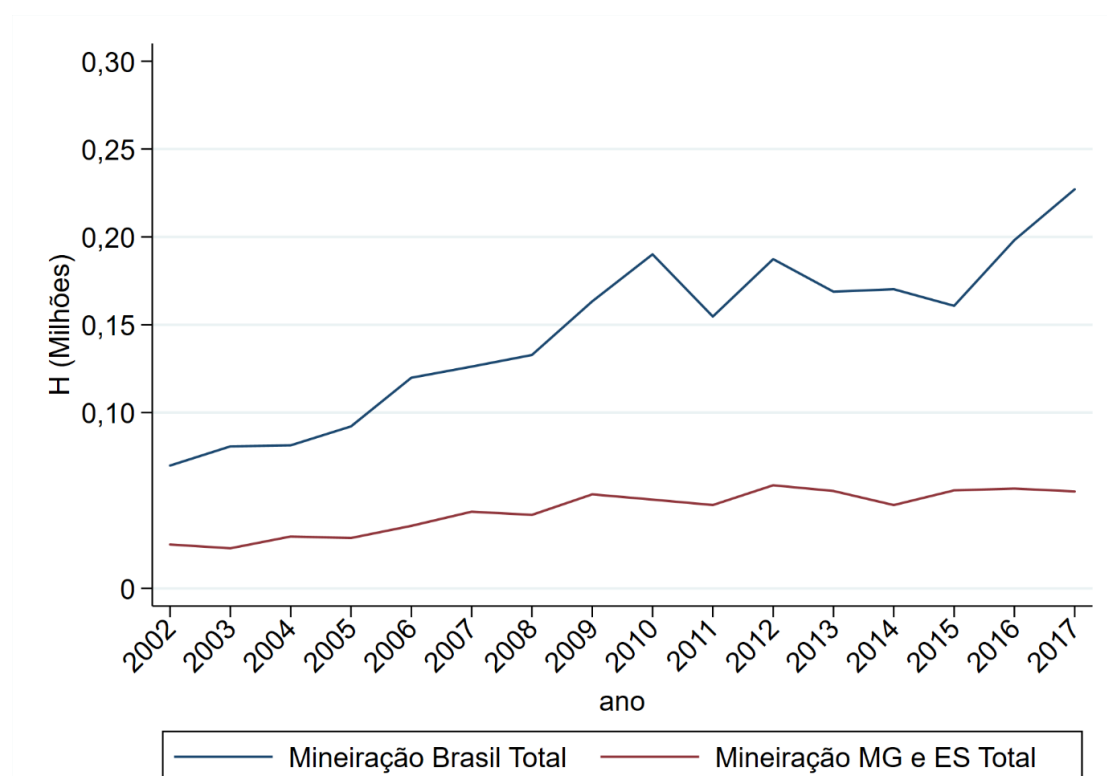
Figura 5 — Evolução do capital humano empregado em MG-ES



Fonte: Elaboração própria (2020).

Observação: Sistematização das bases PNAD, Censo Demográfico de 2010 e PNAD contínua.

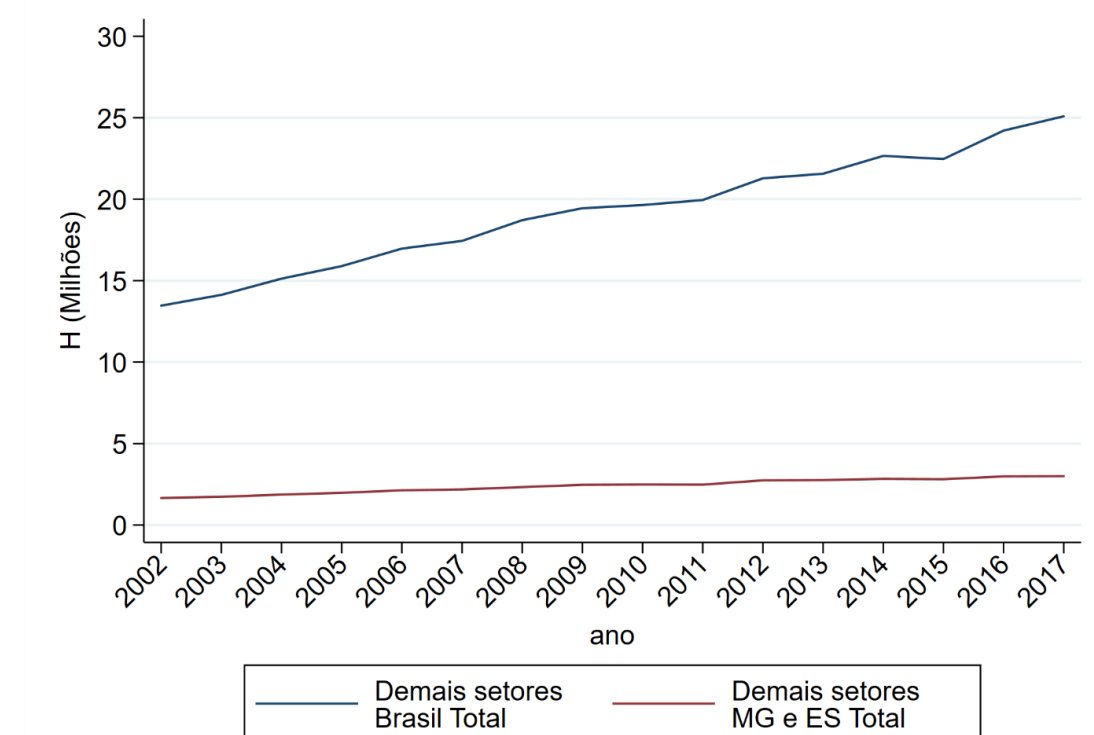
Figura 6 — Evolução do capital humano no Brasil e MG-ES – Extração



Fonte: Elaboração própria (2020).

Observação: Sistematização das bases PNAD, Censo Demográfico de 2010 e PNAD contínua.

Figura 7 — Evolução do capital humano no Brasil e MG-ES – Demais setores



Fonte: Elaboração própria (2020).

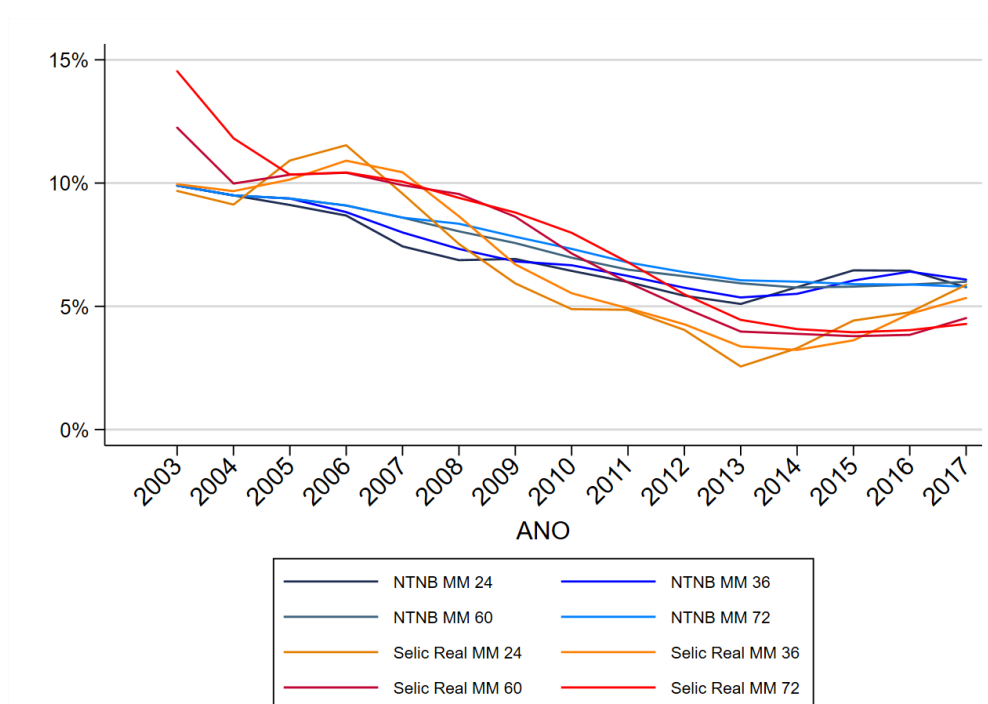
Observação: Sistematização das bases PNAD, Censo Demográfico de 2010 e PNAD contínua.

APÊNDICE C — Taxa de juros (r_t)

Para o caso da taxa de juros r_t optou-se por utilizar a taxa de juros real dos títulos públicos de longo prazo (NTNB¹⁶ com os vencimentos mais longos em cada ano) pelo fato de essas informações sinalizarem as expectativas de longo prazo dos agentes econômicos no período da aquisição dos títulos públicos. Essa variável corrobora na tomada de decisão dos investimentos de longo prazo, como é o caso de bens de capital físico, tanto para o setor M quanto para o setor G.

A partir da taxa de juros dos títulos NTNB, a decisão subsequente foi a suavização da taxa, para dar ainda mais aderência às taxas de juros de longo prazo utilizadas como balizadoras nos investimentos. A Figura 1 apresenta as médias móveis com diferentes janelas temporais para a NTNB e para a taxa Selic¹⁷, nota-se que quanto maior o intervalo calculado para a média móvel menos volátil se apresenta a taxa em questão.

Figura 1 — Taxas de Juros – Médias Móveis (MM)



Fonte: Elaboração própria (2020) a partir de dados BCB e STN.

O primeiro ponto que salta aos olhos é o fato de as taxas NTNB serem menos voláteis que as taxas Selic, quando comparadas com a mesma janela temporal da média móvel,

¹⁶ Nota do Tesouro Nacional da série B.

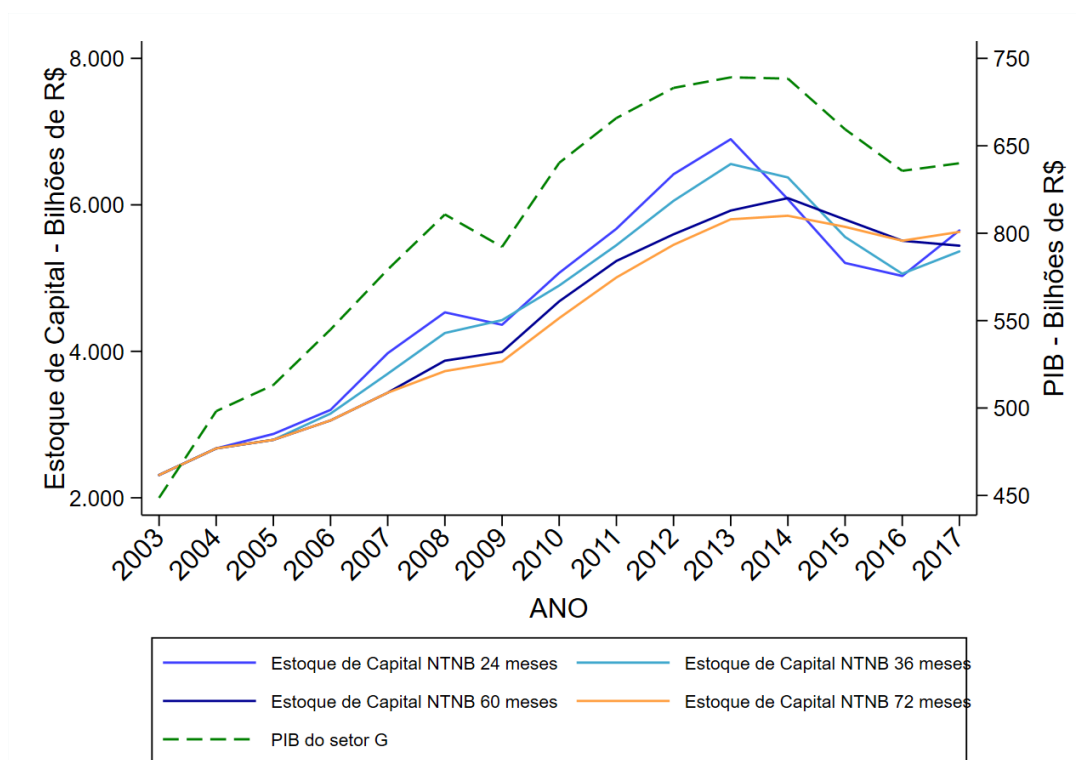
¹⁷ Taxa referencial do Sistema Especial de Liquidação e de Custódia.

isso se explica pelo fato de a taxa Selic depender de fatores de curto prazo, como conjuntura econômica atual e condições macroeconômicas atuais, por isso utilizou-se a NTN-B, mais especificamente a NTN-B com média móvel de 72 meses.

Uma ressalva importante é que essa taxa começou a ser comercializada em 2003, portanto, até 2006 as médias móveis foram calculadas do primeiro mês com informação até o mês de referência da taxa, até que completasse 72 meses e pudesse efetivamente calcular a média móvel com o período especificado. Para o presente estudo supõe-se que a taxa de juros de longo prazo praticada na economia não foi afetada pelo rompimento da barragem. Assim, após 2015, utiliza-se a taxa de juros observada mesmo nos cenários contrafactuais.

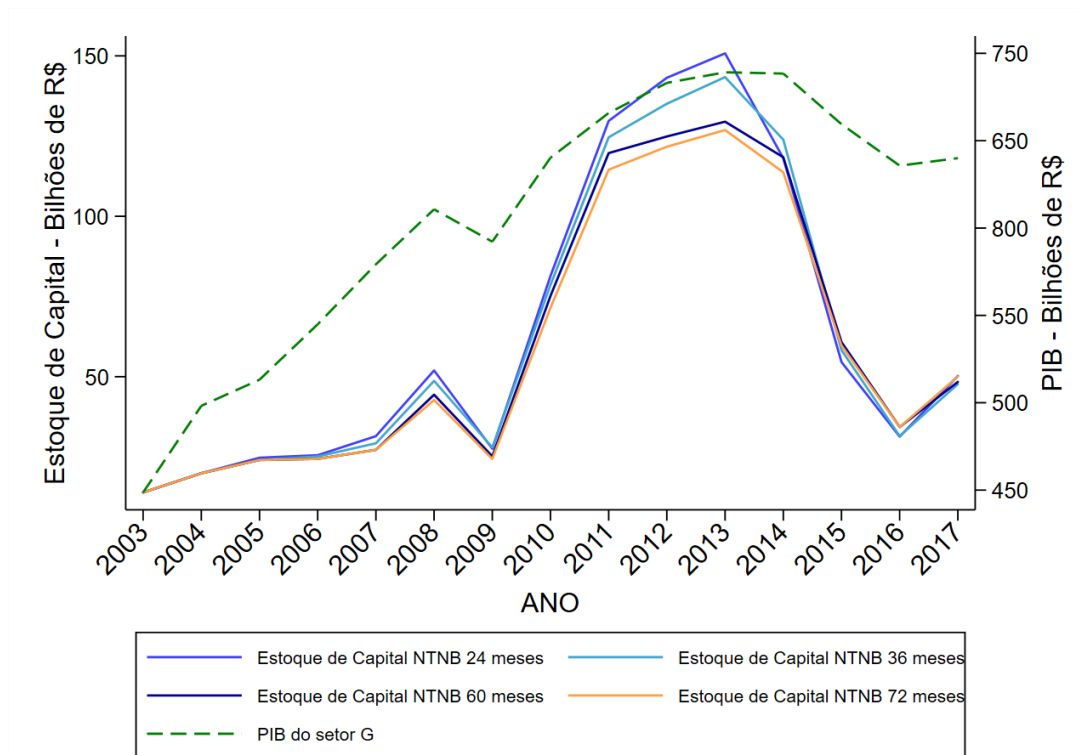
A partir das taxas de juros é possível calcular o estoque de capital de longo prazo para os setores M e G, a partir das equações (6) e (9), respectivamente. As Figuras 2 e 3 mostram o resultado do valor do estoque de capital para os setores M e G, respectivamente, a partir de cada uma das médias móveis da NTN-B.

Figura 2 — Estimativa do Estoque de Bens Capital para o setor extrativo para os anos de 2003 a 2017 com diferentes médias móveis da NTN-B



Fonte: Elaboração própria (2020) a partir de dados BCB e STN.

Figura 3 — Estimativa do Estoque de Capital para os demais setores para os anos de 2003 a 2017 com diferentes médias móveis da NTNB



Fonte: Elaboração própria (2020) a partir de dados BCB e STN.

APÊNDICE D — Estimativa das taxas de encontro e de separação

Como se pode observar no APÊNDICE B referente à elaboração do capital humano, classificou-se a força de trabalho, ou estoque de trabalhadores equivalentes, para a economia de Minas Gerais e Espírito Santo em três grupos: i) os que trabalham no setor extrativo (H_M); ii) os que trabalham nos demais setores (H_G); e iii) os desempregados (H_U). Os inativos e desalentados não são incluídos na força de trabalho. Dessa forma, o estoque de capital humano (H), assim como o mercado de trabalho, é caracterizado pelas equações (13), (14), (25), e (60) apresentadas na seção 3:

$$s_{Mt}H_{Mt} = f_{Mt}\eta_t H_{Ut} \quad (13)$$

$$s_{Gt}H_{Gt} = f_{Gt}(1 - \eta_t)H_{Ut} \quad (14)$$

$$\frac{w_{Gt}}{w_{Mt}} = \frac{f_{Mt}}{f_{Gt}} \frac{(r_t + f_{Gt} + s_{Gt})}{(r_t + f_{Mt} + s_{Mt})} \quad (25)$$

$$f_t = \eta_t f_{Mt} + (1 - \eta_t) f_{Gt} \quad (60)$$

Onde

$$\eta_t = \frac{H_{UMt}}{H_{Ut}}$$

O intuito deste apêndice é apresentar os cálculos de estimativas para a taxa de separação do setor G (s_{Gt}) extraídas dos dados secundários disponíveis e taxa de encontro da economia f_t . A taxa de separação, s_{Gt} , corresponde à probabilidade de um trabalhador equivalente que trabalha no setor G no período $t - 1$ incorrer em um desligamento no período t , equação (71). Utilizou-se o termo trabalhador equivalente, pois o cálculo leva em conta o capital humano e as horas trabalhadas do trabalhador, o período de análise por sua vez é o mensal.

$$s_{git} = \frac{H_{it} | \text{empregado em } t - 1 \text{ e } t}{H_{it} | \text{empregado em } t} \quad (71)$$

As variáveis relacionadas ao estoque de capital humano H_t e seus setores constam no APÊNDICE B. As variáveis relacionadas às taxas de encontro para um dado setor j , são representadas por f_{jt} e indicam a probabilidade de um desempregado que está procurando vagas no setor j encontrar emprego no período seguinte. Note que f_{Mt} e f_{Gt} são taxas difíceis de se obter empiricamente pois necessitariam da informação de qual setor a pessoa desempregada está procurando emprego. Por isso, ambas as taxas, assim como s_{Mt} , serão obtidas endogenamente no modelo via calibração a partir das equações (13), (14), (25), e (60).

Para os anos de 2012 a 2014 computou-se a taxa de s_{Gt} a partir dos microdados da PNAD (PNAD IBGE, 2019) para os estados de Minas Gerais e Espírito Santo conjuntamente. O primeiro ponto importante de se destacar é que a construção dessas variáveis exigem um acompanhamento dos indivíduos em, ao menos, dois períodos de tempo, só assim pode-se calcular a transição entre emprego do setor G e desemprego, assim como do desemprego para o emprego para f_t .

No caso da PNAD não há uma identificação do indivíduo entre os períodos, a solução adotada foi utilizar a proposta de Ribas e Soares (2010) utilizada na PME (Pesquisa Mensal do Emprego e Renda) com o mesmo intuito. Nesse trabalho Ribas e Soares (2010) constroem uma identificação do indivíduo com base na Unidade Primária de Análise (UPA), Número de seleção do domicílio, Grupo de amostra, sexo do entrevistado e data de nascimento, com dia, mês e ano. A partir dessa estratégia é possível identificar as respostas de emprego nos dois períodos de tempo e calcular a taxa de separação do setor G.

A partir deste subgrupo de respondentes que são acompanhados em duas PNADs consecutivas, utilizou-se as informações da classificação da CNAE Domiciliar 2.0 contidas na pesquisa para se classificar o setor extrativo, setor M, que pode ser verificada na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 — Classificação CNAE da Indústria Extrativa

Seção	Divisão	Classe	Denominação
B			INDÚSTRIAS EXTRATIVAS
		05	EXTRAÇÃO DE CARVÃO MINERAL
		05000	Extração de carvão mineral
		06	EXTRAÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL
		06000	Extração de petróleo e gás natural
		07	EXTRAÇÃO DE MINERAIS METÁLICOS
		07001	Extração de minérios de metais preciosos
		07002	Extração de minerais metálicos não especificados anteriormente
		08	EXTRAÇÃO DE MINERAIS NÃO METÁLICOS
		08001	Extração de pedras, areia e argila
		08002	Extração de gemas (pedras preciosas e semipreciosas)
		08009	Extração de minerais não metálicos não especificados anteriormente
		09	ATIVIDADES DE APOIO À EXTRAÇÃO DE MINERAIS
		09000	

Fonte: IBGE; CONCLA (s.d.).

O setor G é marcado por todas as categorias da CNAE que não estão no conjunto apresentado para a indústria extrativa. Ademais, outra questão importante é a periodicidade trimestral da PNAD Contínua. Dessa forma, a taxa de separação é calculada entre dois trimestres consecutivos. A construção da taxa de separação para um dado ano se deu da seguinte forma: adotou-se dois trimestres consecutivos de referência, suponha o 2º e o 3º trimestre, e assume-se que o primeiro trimestre entre esses dois é considerado como o período inicial, a saber, t_0 , e o trimestre subsequente é o t_1 ; note que isso pode ser feito para quaisquer conjuntos de dois trimestres consecutivos, trimestres 1 e 2, trimestres 2 e 3, e 3 e 4.

Feito isso, empilhou-se todos os respondentes com informações de emprego para t_0 e para t_1 e então, com base nas informações de escolaridade, idade e sexo, calculou-se a taxa de separação para o setor G em trabalhadores equivalentes (capital humano). Dado a periodicidade trimestral da PNAD, os resultados obtidos foram mensalizados sob a hipótese de um crescimento contínuo ao longo dos três meses, portanto:

$$e^{t_{\text{mens}} \times n} = 1 + t_{\text{trim}}$$

Assim, temos:

$$t_{\text{mens}} = \frac{\ln(1 + t_{\text{trim}})}{n}$$

No nosso caso $n = 3$.

Para os valores entre 2003 a 2011, utilizou-se o cálculo da taxa de separação para o setor G com os microdados da PME para preencher os valores passados. Especificamente, foi utilizado a proporção média entre as taxas. A Tabela 2 contém os valores da taxa mensalizada de separação do setor G com base nos dados da PNAD e a taxa calculada com base nos dados da PME para as seis regiões metropolitanas da pesquisa e apenas para a cidade de Belo Horizonte.

Tabela 2 — Comparação da taxa de separação da PNAD e PME

Ano	PNAD	PME	
	Sg MGES	Sg 6 RM	Sg BH
2012	0,67%	0,56%	0,81%
2013	0,58%	0,56%	0,70%
2014	0,75%	0,48%	0,68%

Fonte: Elaboração própria (2020) a partir de dados PNAD IBGE; PME IBGE.

Especificamente no caso da PME, podemos comparar a evolução de quatro taxas ao longo do tempo, sendo duas referentes às taxas de separação de contagem de pessoas, para as seis regiões metropolitanas e apenas para Belo Horizonte (MG), e duas calculadas com a ponderação de trabalhadores equivalentes, novamente para as seis regiões e apenas para Belo Horizonte (MG).

O ajuste feito para os valores da taxa de separação para o setor G entre 2003 e 2011 foram calculados com base na PME das seis Regiões Metropolitanas (Sg 6 RM). Um ponto importante é que, no caso da PME, a coleta é mensal, portanto as taxas não precisam ser transformadas em mensais. Temos então a série da taxa de separação utilizada como exógena no modelo para a resolução da primeira etapa de calibração.

APÊNDICE E — Massa salarial com base no capital humano

A massa salarial de uma economia para um dado período t compreende a soma de todos os salários recebidos pelos agentes dessa economia no mesmo período de referência. Como o modelo macroeconômico do presente estudo contempla a força de trabalho dos trabalhadores equivalentes, de acordo com o capital humano dos indivíduos, a massa salarial foi calculada sob a mesma metodologia.

Como visto no APÊNDICE B, a massa salarial do capital humano da economia é $wH = w_1L_1 + w_2L_2$. Assim, dado o salário médio w , as equações (66) e (67) determinam w_1 e w_2 .

APÊNDICE F — Demonstração do Valor Adicionado (DVA)

Para determinadas hipóteses assumidas neste exercício, utilizou-se a proporção do PIB da empresa mineradora Samarco com relação ao PIB total do setor M, como é o do choque no do estoque de terra do setor M, N_{Mt} . Para tal simulação utilizou-se as informações de Demonstração do Valor Adicionado (DVA) da Samarco nos anos anteriores ao rompimento da Barragem de Fundão.

O DVA é uma boa proxy para o Valor Adicionado do PIB das empresas, pelo fato de ele estar relacionado ao valor que as entidades agregam aos insumos adquiridos de terceiros. Neste caso, desconta-se os insumos utilizados como: matérias-primas, energia, serviços, dentre outros.

Após a Lei nº 6.404/76, todas as empresas que estão na Bolsa de Valores devem realizar seu DVA anualmente. Apesar de a DVA das empresas implicar no resultado do PIB, há uma diferença temporal entre os modelos contábil e econômico. No caso da economia, baseia-se na produção para o cálculo do PIB enquanto que o contábil se baseia no regime de competência ou realização da receita.

A Tabela 1 apresenta a Demonstração do Valor Adicionado (DVA) da Samarco no período pré-rompimento e, como se pode observar, a participação do Valor Adicionado da Samarco está em torno de 6,0% do PIB do setor extrativo.

Tabela 1 — Demonstração do Valor Adicionado (DVA) da Samarco e o PIB da Indústria Extrativa

Ano	Samarco DVA (milhões de R\$)	PIB Indústria Extrativa MG e ES (R\$ milhões)	Proporção Samarco/PIB
2007	842	21.271	4,0%
2008	1.974	32.456	6,1%
2009	1.100	17.345	6,3%
2010	3.727	47.659	7,8%
2011	4.079	70.609	5,8%
2012	3.551	70.662	5,0%
2013	3.679	69.866	5,3%
2014	3.999	62.039	6,4%

Fonte: Samarco.

Observação: Fontes disponíveis em <<https://www.samarco.com/categoria-de-relatorios/relatorio-da-administracao-e-demonstracoes-financeiras/>>.

APÊNDICE G — Estimação do contrafactual das taxas de separação e encontro através de um modelo de vetor autorregressivo

Nesta seção, apresenta-se a estimação do vetor autorregressivo de ordem 1 para estimar os valores das taxas de separação e encontro contrafactuais, ou seja, no Cenário que considera que o desastre não aconteceu. Define-se a ordem igual a um devido ao tamanho da amostra, 11 observações, de 2003 a 2014, período pré-desastre. Para esse tamanho de amostra, os testes de inferência estatísticos sobre as propriedades das séries e o estimador dos parâmetros têm pouco poder (Wooldridge, 2010; Kirchgässner, Wolters, & Hassler, 2012). Logo, a apresentação foca no valor dos parâmetros. A Tabela 1 apresenta os valores estimados para os parâmetros do modelo (72).

$$\begin{pmatrix} \ln(s_{Gt}) \\ \ln(s_{Mt}) \\ \ln(f_{Gt}) \\ \ln(f_{Mt}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C(1,1) \\ C(2,1) \\ C(3,1) \\ C(4,1) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} A(1,1) & A(1,2) & A(1,3) & A(1,4) \\ A(2,1) & A(2,2) & A(2,3) & A(2,4) \\ A(3,1) & A(3,2) & A(3,3) & A(3,4) \\ A(4,1) & A(4,2) & A(4,3) & A(4,4) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ln(s_{Gt-1}) \\ \ln(s_{Mt-1}) \\ \ln(f_{Gt-1}) \\ \ln(f_{Mt-1}) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B(1,1) & B(1,2) \\ B(2,1) & B(2,2) \\ B(3,1) & B(3,2) \\ B(4,1) & B(4,2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ln(s_{G_{BRt}}) \\ \ln(f_{BRt}) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \epsilon_{s_{Gt}} \\ \epsilon_{s_{Mt}} \\ \epsilon_{f_{Gt}} \\ \epsilon_{f_{Mt}} \end{pmatrix} \quad (72)$$

Tabela 1 — Vetor autorregressivo para as taxas de separação e encontro

Parâmetros	Valor	Erro padrão	Estatística t
C(1,1)	-1,28	0,89	-1,44
C(2,1)	-4,29	3,10	-1,38
C(3,1)	2,86	1,59	1,80
C(4,1)	-2,10	1,04	-2,02
A(1,1)	0,20	0,17	1,15
A(2,1)	0,46	0,60	0,77
A(3,1)	0,15	0,31	0,49
A(4,1)	-0,11	0,20	-0,57
A(1,2)	-0,13	0,14	-0,89
A(2,2)	0,59	0,50	1,18
A(3,2)	-0,18	0,26	-0,70
A(4,2)	0,41	0,17	2,46

Parâmetros	Valor	Erro padrão	Estatística t
A(1,3)	-0,35	0,24	-1,45
A(2,3)	0,79	0,83	0,94
A(3,3)	-0,48	0,43	-1,13
A(4,3)	0,46	0,28	1,64
A(1,4)	0,10	0,10	0,98
A(2,4)	0,07	0,34	0,20
A(3,4)	0,08	0,17	0,48
A(4,4)	-0,48	0,11	-4,21
B(1,1)	-0,29	0,25	-1,15
B(2,1)	-1,21	0,88	-1,38
B(3,1)	1,38	0,45	3,06
B(4,1)	0,58	0,30	1,97
B(1,2)	0,81	0,13	6,21
B(2,2)	-1,12	0,46	-2,44
B(3,2)	0,57	0,23	2,43
B(4,2)	-0,45	0,15	-2,91

Nº observações 11

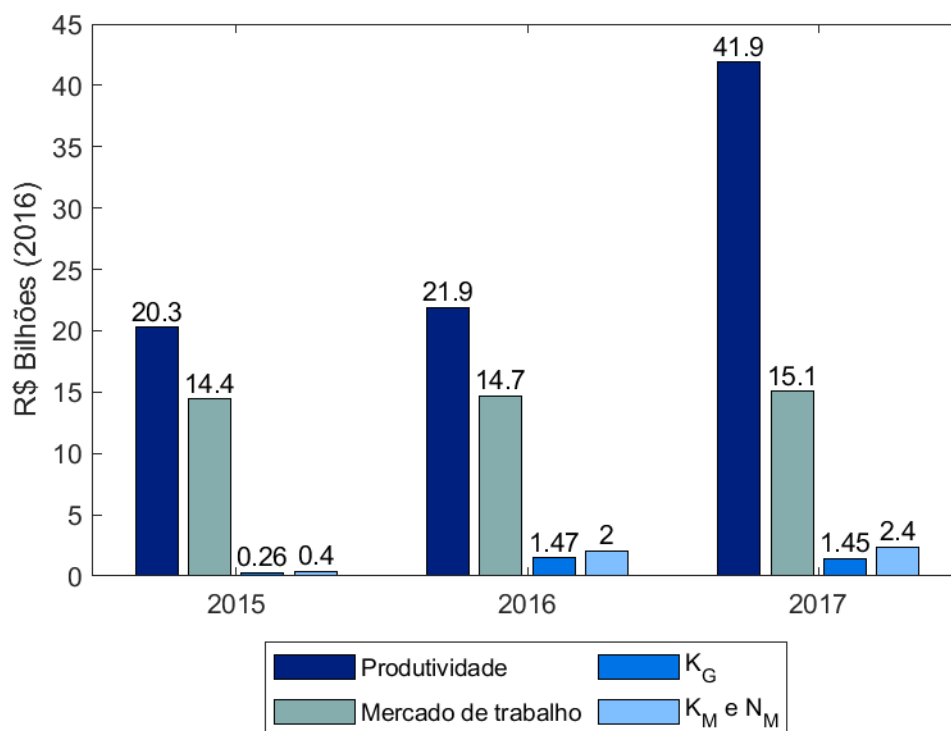
Fonte: Elaboração própria (2020) utilizando o software Matlab.

APÊNDICE H — Análise de sensibilidade da ordem dos determinantes da produção na decomposição do impacto

A decomposição a seguir presente na Figura 1 e na Figura 2 contém o mesmo exercício de decomposição a nível de setor, porém agora na ordem invertida, começando pela produtividade, mercado de trabalho, estoque de capital no setor G e estoque de capital e terra no setor M. A Figura 1 mostra que a parcela do impacto devido à destruição nas produtividades totais dos fatores R\$ 20,3 bilhões em 2015, R\$ 21,9 bilhões em 2016 e R\$ 41,9 bilhões em 2017. No caso do mercado de trabalho, constatou-se uma perda de R\$ 14,4 bilhões em 2015, R\$ 14,7 bilhões em 2016 e R\$ 15,1 bilhões em 2017.

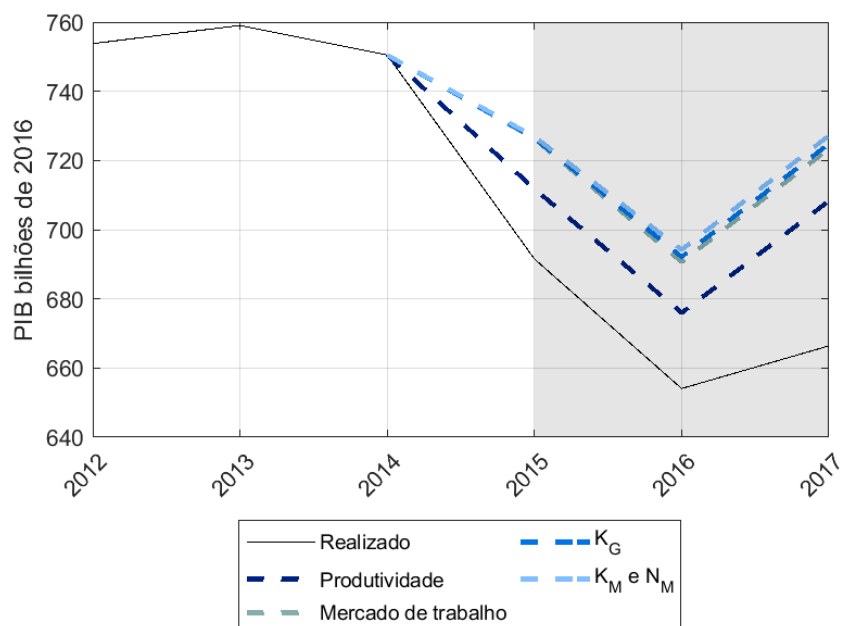
No que tange ao estoque de capital físico do setor G, a perda pelo foi de R\$ 262 milhões, em 2016, R\$ 1,47 bilhões e, em 2017, foi de R\$ 1,45 bilhões. Por fim, a perda nos fatores especificamente do setor M (K_{Mt} e N_{Mt}) foi de R\$ 400 milhões em 2015, R\$ 2 bilhões em 2016 e R\$ 2,4 bilhões em 2017.

Figura 1 — Decomposição dos impactos por setor (volta)



Fonte: Elaboração própria (2020).

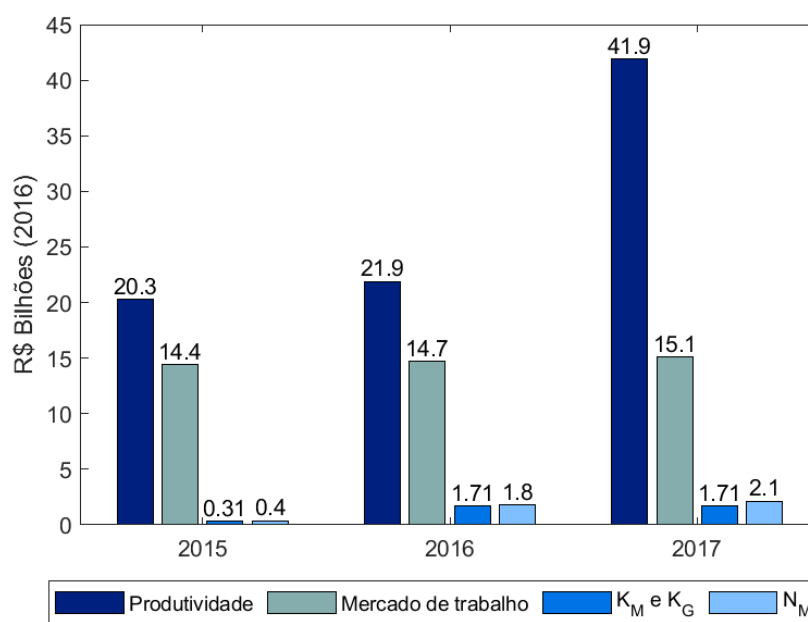
Figura 2 — Dinâmica do PIB na decomposição dos Impactos por setor (volta)



Fonte: Elaboração própria (2020).

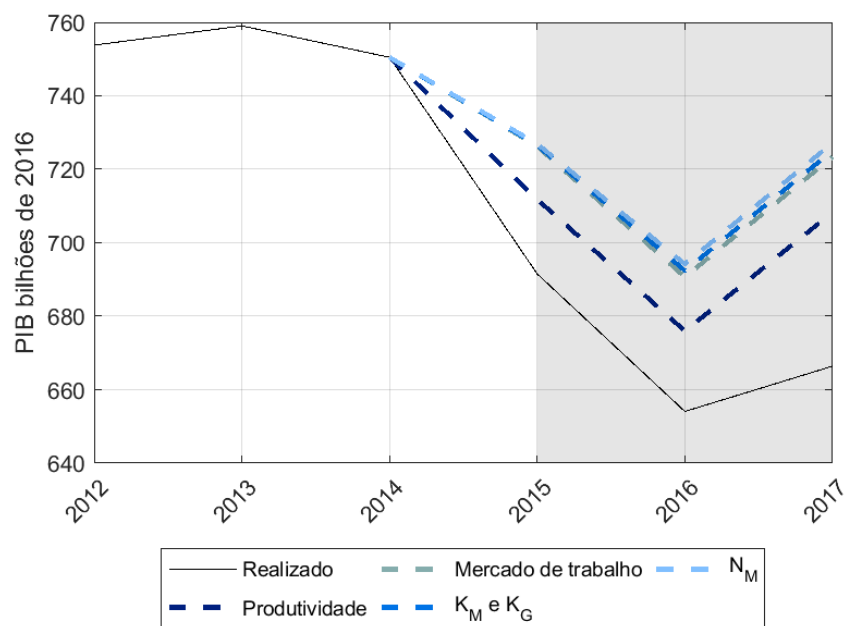
Na decomposição por fatores, apresentados na Figura 3 e na Figura 4, os resultados são semelhantes. A perda no PIB devido à destruição de capital físico foi, em 2015, de R\$ 310 milhões, em 2016 e 2017, R\$ 1,71 bilhões em cada ano. A destruição dos recursos naturais (N_{Mt}) representou uma perda de R\$ 400 milhões em 2015, R\$ 1,8 bilhões em 2016 e R\$ 2,1 bilhões em 2017.

Figura 3 — Decomposição dos impactos por fatores (volta)



Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 4 — Dinâmica do PIB na decomposição dos impactos por fator (volta)



Fonte: Elaboração própria (2020).

APÊNDICE I — Análise de sensibilidade do resultado com relação ao valor da elasticidade de substituição (ρ)

Neste apêndice, verifica-se algumas análises de sensibilidade dos impactos do rompimento da Barragem de Fundão apresentados neste estudo para variações nos valores da elasticidade de substituição entre os setores (ρ).

Esse parâmetro mede o grau de substituição entre as preferências dos bens dos setores extrativo e demais. Para $\rho > 1$, os bens considerados substitutos brutos e para $\rho < 1$, os bens são considerados complementares brutos. Quanto menor o valor, menos substitutos os bens dos setores são. Nessa interpretação, o choque em um setor pode ser atenuado com o aumento da produção em outro setor. Se, por outro lado, os setores fossem complementares, o choque em um setor, necessariamente, reduziria a produção do outro setor.

Para dar robustez ao estudo, analisa-se para um intervalo para os valores de ρ ao redor do número estimado ($\rho = 1,6$). Analise-se a sensibilidade dos resultados para os valores $\rho = \{1,4; 1,8\}$.

De forma resumida, os resultados não se alteram substancialmente com essas modificações. Indicando uma consistência dos valores apresentados para variações em parâmetros importantes do modelo. Foi utilizado o Cenário 1 para a análise. Nas próximas subseções, apresentam-se as principais tabelas de resultados.

APÊNDICE I.1 — Elasticidade de substituição entre o setor extrativo (M) e demais setores (G): $\rho = 1.4$

Nesta subseção, altera-se o valor da elasticidade de substituição para $\rho = 1,4$. A Tabela 1 apresenta os resultados do PIB pela ótica da produção, a Tabela 2, pela ótica da renda e a Tabela 3 apresenta o impacto no mercado de trabalho. Os resultados são muito próximos aos encontrados para $\rho = 1,6$, utilizado no texto principal.

Tabela 1 — Mensuração do impacto no PIB (em R\$ bilhões de 2016) pela ótica da produção: Cenário 1 e $\rho = 1,4$

Ótica do Produto				
Ano	Variação	R\$ bi	% do impacto	% do PIB
2015	PIB M	-2,03	5,73	-4,34
	PIB G	-33,36	94,27	-4,90
	Total	-35,39	100,00	-4,87
2016	PIB M	-2,38	5,93	-6,29
	PIB G	-37,74	94,07	-5,75
	Total	-40,12	100,00	-5,78
2017	PIB M	-3,69	6,06	-8,49
	PIB G	-57,09	93,94	-8,35
	Total	-60,77	100,00	-8,36
Acumulado	PIB M	-8,09	5,94	-6,33
	PIB G	-128,19	94,06	-6,34
	Total	-136,28	100,00	-6,34

Fonte: Elaboração própria (2020).

Tabela 2 — Mensuração do impacto no PIB (R\$ bilhões de 2016) pela ótica da renda: Cenário 1 e $\rho = 1,4$

	2015		2016		2017		Acumulado	
	Ótica da Renda							
Variação	R\$ bi	%	R\$ bi	%	R\$ bi	%	R\$ bi	%
Massa da Renda da Terra M	-1,48	4,18	-1,74	4,33	-2,69	4,43	-5,91	4,34
Massa da Renda da Terra G	-1,00	2,83	-1,13	2,82	-1,71	2,82	-3,85	2,82
Subtotal	-2,48	7,01	-2,87	7,15	-4,40	7,24	-9,75	7,16
Massa da Renda do Capital M	-0,22	0,63	-0,26	0,65	-0,41	0,67	-0,89	0,65
Massa da Renda do Capital G	-16,35	46,19	-18,50	46,09	-27,97	46,03	-62,81	46,09
Subtotal	-16,57	46,82	-18,76	46,75	-28,38	46,70	-63,70	46,74
Massa da Renda do Trabalho M	-0,32	0,92	-0,38	0,95	-0,59	0,97	-1,29	0,95
Massa da Renda do Trabalho G	-16,01	45,25	-18,12	45,15	-27,40	45,09	-61,53	45,15
Subtotal	-16,34	46,17	-18,50	46,10	-27,99	46,06	-62,83	46,10
Total	-35,39	100,00	-40,12	100,00	-60,77	100,00	-136,28	100,00

Fonte: Elaboração própria (2020).

Tabela 3 — Mensuração do impacto no emprego e desemprego: Cenário 1 e $\rho = 1,4$

	2015		2016		2017	
	Desastre	Cenário 1	Desastre	Cenário 1	Desastre	Cenário 1
Número de trabalhadores						
Desemprego Total (%)	12,88	9,18	13,94	10,21	14,38	10,88
Número de desempregados (milhões)	1,46	1,04	1,59	1,16	1,64	1,24
Emprego no setor M	1,28	1,35	1,05	1,12	1,12	1,16
Emprego no setor G	85,84	89,47	85,01	88,67	84,50	87,96
Salário Relativo (M/G)	1,54	1,52	1,55	1,52	1,59	1,60

Fonte: Elaboração própria (2020).

APÊNDICE I.2 — Elasticidade de substituição entre o setor extrativo (M) e demais setores (G): $\rho = 1,8$

Nesta subseção, altera-se o valor da elasticidade de substituição para $\rho = 1,8$, ou seja, os setores são mais substitutos. A Tabela 1 apresenta os resultados do PIB pela ótica da produção, a Tabela 2, pela ótica da renda e a Tabela 3 apresenta o impacto no mercado de trabalho. Novamente, os resultados são muito próximos aos encontrados para $\rho = 1,6$.

Tabela 1 — Mensuração do impacto no PIB (em R\$ bilhões de 2016) pela ótica da produção: Cenário 1 e $\rho = 1,8$

Ano	Ótica do Produto			
	Variação	R\$ bi	% do Impacto	% do PIB
2015	PIB M	-1,85	5,22	-4,01
	PIB G	-33,54	94,78	-4,93
	Total	-35,39	100,00	-4,87
2016	PIB M	-2,48	6,19	-6,64
	PIB G	-37,64	93,81	-5,73
	Total	-40,12	100,00	-5,78
2017	PIB M	-3,69	6,07	-8,58
	PIB G	-57,08	93,93	-8,34
	Total	-60,77	100,00	-8,36
Acumulado	PIB M	-8,02	5,88	-6,34
	PIB G	-128,26	94,12	-6,34
	Total	-136,28	100,00	-6,34

Fonte: Elaboração própria (2020).

Tabela 2 — Mensuração do impacto no PIB (R\$ bilhões de 2016) pela ótica da renda: Cenário 1 e $\rho = 1,8$

	2015		2016		2017		Acumulado	
	Ótica da Renda							
Variação	R\$ bi	%	R\$ bi	%	R\$ bi	%	R\$ bi	%
Massa da Renda da Terra M	-1,35	3,81	-1,81	4,52	-2,69	4,43	-5,85	4,30
Massa da Renda da Terra G	-1,01	2,84	-1,13	2,81	-1,71	2,82	-3,85	2,82
Subtotal	-2,36	6,66	-2,94	7,33	-4,41	7,25	-9,70	7,12
Massa da Renda do Capital M	-0,20	0,57	-0,27	0,68	-0,41	0,67	-0,88	0,65
Massa da Renda do Capital G	-16,43	46,44	-18,44	45,97	-27,97	46,03	-62,85	46,12
Subtotal	-16,64	47,01	-18,72	46,65	-28,38	46,69	-63,73	46,76
Massa da Renda do Trabalho M	-0,30	0,84	-0,40	0,99	-0,59	0,97	-1,28	0,94
Massa da Renda do Trabalho G	-16,10	45,49	-18,07	45,03	-27,40	45,09	-61,57	45,18
Subtotal	-16,39	46,33	-18,47	46,02	-27,99	46,06	-62,85	46,12
Total	-35,39	100,00	-40,12	100,00	-60,77	100,00	-136,28	100,00

Fonte: Elaboração própria (2020).

Tabela 3 — Mensuração do impacto no emprego e desemprego: Cenário 1 e $\rho = 1,8$

	2015		2016		2017	
	Desastre	Cenário 1	Desastre	Cenário 1	Desastre	Cenário 1
Número de trabalhadores						
Desemprego total (%)	12,86	9,16	13,92	10,20	14,36	10,87
Número de desempregados (milhões)	1,46	1,04	1,59	1,16	1,64	1,24
Emprego no setor M	1,27	1,33	1,03	1,11	1,11	1,15
Emprego no setor G	85,88	89,51	85,05	88,69	84,53	87,99
Salário relativo (M/G)	1,54	1,52	1,55	1,52	1,59	1,60

Fonte: Elaboração própria (2020).

APÊNDICE J — Análise de sensibilidade do resultado aos pesos dos momentos sobre os PIBs e massas salariais

Uma decisão importante é o peso que se dá aos momentos observados nos dados no mercado de bens, representados pela razão dos PIBs dos setores (equação (56)), e aos momentos do mercado de trabalho, representados pela razão das massas salariais dos setores (equação (29)). A implicação dessa decisão é a aderência do modelo ao mercado de bens intermediários ou ao mercado de trabalho. Utilizando-se somente a equação (56), a aderência aos PIBs setoriais seria maior, enquanto que se utilizado somente a equação (29), aconteceria o oposto, sendo a aderência dos estoques de capital, taxas de desemprego e razão salarial melhores.

$$\left(\frac{Y_{Mt}}{Y_{Gt}}\right)^{\frac{\rho-1}{\rho}} = \frac{(1-\lambda_t) \text{PIB}_{Mt}}{\lambda_t \text{PIB}_{Gt}} \quad (56)$$

$$H_{Gt} = \frac{(1-\phi-\theta)}{(1-\alpha-\beta)} \left(\frac{Y_{Gt}}{Y_{Mt}}\right)^{\frac{\rho-1}{\rho}} \frac{(1-\lambda_t) w_{Mt}}{\lambda_t w_{Gt}} H_{Mt} \quad (29)$$

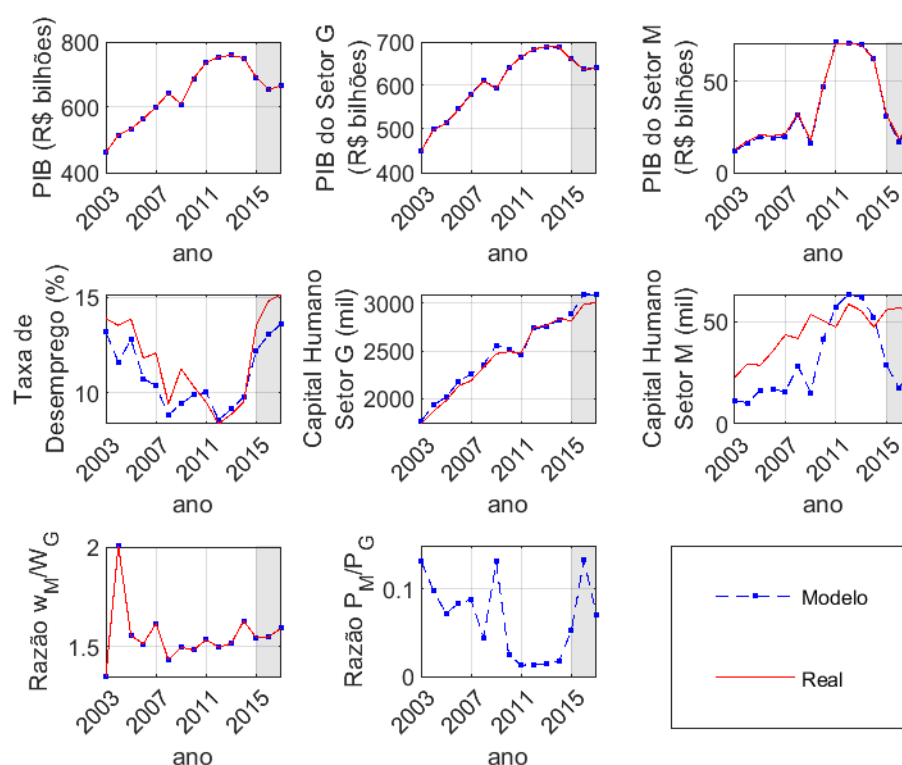
Nesta seção, analisa-se a sensibilidade dos resultados a variações nos pesos desses momentos na parametrização do modelo. Os resultados são apresentados a seguir.

APÊNDICE J.1 — Maior aderência do modelo a razão dos PIBs do setor extrativo e demais setores

Nesta seção, utiliza-se somente a equação (56) para a parametrização. Dessa forma, como esperado e apresentado na Figura 1, o ajuste do modelo aos dados dos PIBs é o maior possível, enquanto que os estoques de capital humano apresentam maiores erros. Os resultados para o PIB pela ótica da produção são apresentados na Tabela 1, pela ótica da renda, na Tabela 2 e na Tabela 3 apresenta os resultados para o mercado de trabalho.

Observa-se que o impacto no setor extrativo foi um pouco menor, representando no total do impacto 3,64%. O mesmo se observa para o PIB pela ótica da renda, com exceção do rendimento do capital que foi superior. As taxas de desemprego e ocupação são semelhantes ao nosso resultado principal.

Figura 1 — Análise do ajustamento do modelo



Fonte: Elaboração própria (2020).

Tabela 1 — Mensuração do impacto no PIB (em R\$ bilhões de 2016) pela ótica da produção: Cenário 1

Ótica do Produto				
Ano	Variação	R\$ bi	% do impacto	% do PIB
2015	PIB M	-1,37	3,86	-4,27
	PIB G	-34,02	96,14	-4,90
	Total	-35,39	100,00	-4,87
2016	PIB M	-1,22	3,04	-6,71
	PIB G	-38,91	96,96	-5,75
	Total	-40,12	100,00	-5,78
2017	PIB M	-2,38	3,91	-8,69
	PIB G	-58,39	96,09	-8,34
	Total	-60,77	100,00	-8,36
Acumulado	PIB M	-4,96	3,64	-6,40
	PIB G	-131,32	96,36	-6,34
	Total	-136,28	100,00	-6,34

Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

Tabela 2 — Mensuração do impacto no PIB (R\$ bilhões de 2016) pela ótica da renda: Cenário 1

	2015		2016		2017		Acumulado	
	Ótica da Renda							
Variação	R\$ bi	%	R\$ bi	%	R\$ bi	%	R\$ bi	%
Massa da Renda da Terra M	-1,00	2,82	-0,89	2,22	-1,74	2,86	-3,62	2,66
Massa da Renda da Terra G	-1,02	2,88	-1,17	2,91	-1,75	2,88	-3,94	2,89
Subtotal	-2,02	5,70	-2,06	5,13	-3,49	5,74	-7,56	5,55
Massa da Renda do Capital M	-0,15	0,42	-0,13	0,33	-0,26	0,43	-0,55	0,40
Massa da Renda do Capital G	-16,67	47,11	-19,06	47,51	-28,61	47,08	-64,35	47,22
Subtotal	-16,82	47,53	-19,20	47,85	-28,87	47,51	-64,89	47,62
Massa da Renda do Trabalho M	-0,22	0,62	-0,20	0,49	-0,38	0,63	-0,79	0,58
Massa da Renda do Trabalho G	-16,33	46,15	-18,67	46,54	-28,03	46,12	-63,03	46,25
Subtotal	-16,55	46,76	-18,87	47,03	-28,41	46,75	-63,83	46,83
Total	-35,39	100,00	-40,12	100,00	-60,77	100,00	-136,28	100,00

Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

Tabela 3 — Mensuração do impacto no emprego e desemprego: Cenário 1

	2015		2016		2017	
	Desastre	Cenário 1	Desastre	Cenário 1	Desastre	Cenário 1
Número de trabalhadores						
Desemprego Total (%)	12,21	8,64	13,05	9,54	13,59	10,29
Número de desempregados (milhões)	1,38	0,98	1,49	1,09	1,55	1,17
Emprego no setor M	0,87	0,91	0,49	0,53	0,70	0,72
Emprego no setor G	86,93	90,45	86,46	89,93	85,71	88,98
Salário Relativo (M/G)	1,54	1,52	1,55	1,52	1,59	1,60

Fonte: Elaboração própria (2020).

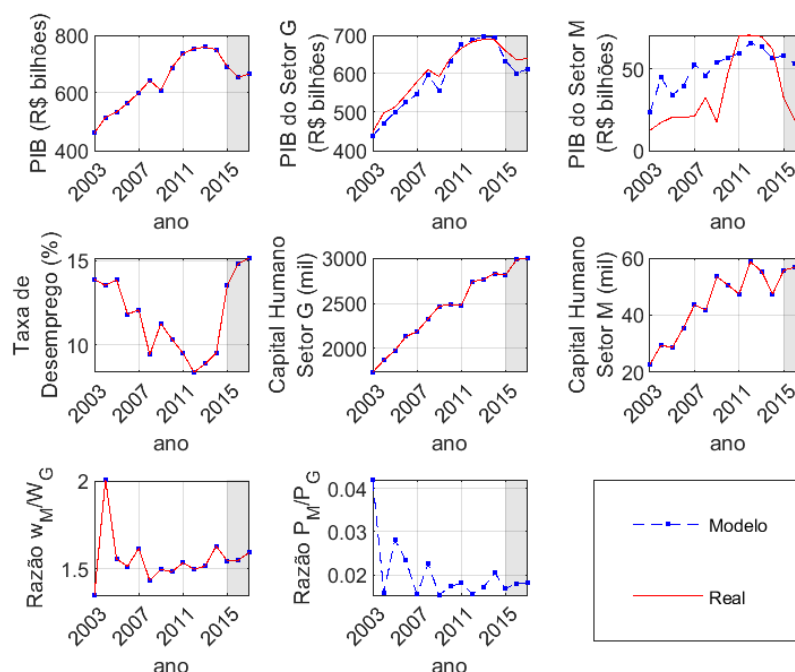
APÊNDICE J.2 — Maior aderência do modelo à razão das massas salariais do setor extrativo e demais setores

Nesta seção, utiliza-se somente a equação (29) na parametrização e, como esperado, o modelo ajusta perfeitamente as dinâmicas dos estoques de capital humano, mas erram significativamente os PIBs setoriais (Figura 1).

Na Tabela 1, observa-se que o impacto no setor extrativo foi pouco maior do que no resultado principal. O efeito é o oposto do analisado anteriormente. A Tabela 2 apresenta os impactos para o PIB na ótica da renda e análise é semelhante. Para todos

os componentes, o impacto no setor extrativo foi maior. A Tabela 3 mostra o resultado no mercado de trabalho que foi semelhante ao encontrado nos resultados principais.

Figura 1 — Análise do ajustamento do modelo



Fonte: Elaboração própria (2020).

Tabela 1 — Mensuração do impacto no PIB (em R\$ bilhões de 2016) pela ótica da produção: Cenário 1

Ótica do Produto				
Ano	Variação	R\$ bi	% do impacto	% do PIB
2015	PIB M	-2,47	6,98	-4,07
	PIB G	-32,92	93,02	-4,94
	Total	-35,39	100,00	-4,87
2016	PIB M	-3,58	8,93	-6,32
	PIB G	-36,54	91,07	-5,73
	Total	-40,12	100,00	-5,78
2017	PIB M	-4,95	8,15	-8,43
	PIB G	-55,82	91,85	-8,35
	Total	-60,77	100,00	-8,36
Acumulado	PIB M	-11,00	8,08	-6,25
	PIB G	-125,28	91,92	-6,35
	Total	-136,28	100,00	-6,34

Fonte: Elaboração própria (2020).

Tabela 2 — Mensuração do impacto no PIB (R\$ bilhões de 2016) pela ótica da renda: Cenário 1

	2015		2016		2017		Acumulado	
	Ótica da Renda							
Variação	R\$ bi	%	R\$ bi	%	R\$ bi	%	R\$ bi	%
Massa da Renda da Terra M	-1,80	5,09	-2,62	6,52	-3,61	5,95	-8,03	5,89
Massa da Renda da Terra G	-0,99	2,79	-1,10	2,73	-1,67	2,76	-3,76	2,76
Subtotal	-2,79	7,88	-3,71	9,25	-5,29	8,70	-11,79	8,65
Massa da Renda do Capital M	-0,27	0,77	-0,39	0,98	-0,54	0,90	-1,21	0,89
Massa da Renda do Capital G	-16,13	45,58	-17,90	44,62	-27,35	45,01	-61,39	45,04
Subtotal	-16,40	46,35	-18,30	45,61	-27,90	45,90	-62,60	45,93
Massa da Renda do Trabalho M	-0,40	1,12	-0,57	1,43	-0,79	1,30	-1,76	1,29
Massa da Renda do Trabalho G	-15,80	44,65	-17,54	43,71	-26,79	44,09	-60,13	44,12
Subtotal	-16,19	45,77	-18,11	45,14	-27,59	45,39	-61,89	45,42
Total	-35,39	100,00	-40,12	100,00	-60,77	100,00	-136,28	100,00

Fonte: Elaboração própria (2020).

Tabela 3 — Mensuração do impacto no emprego e desemprego: Cenário 1

	2015		2016		2017	
	Desastre	Cenário 1	Desastre	Cenário 1	Desastre	Cenário 1
Número de trabalhadores						
Desemprego Total (%)	13,52	9,70	14,82	10,88	15,15	11,46
Número de desempregados (milhões)	1,53	1,10	1,69	1,24	1,73	1,31
Emprego no setor M	1,68	1,77	1,59	1,70	1,53	1,59
Emprego no setor G	84,80	88,53	83,60	87,42	83,32	86,96
Salário Relativo (M/G)	1,54	1,52	1,55	1,52	1,59	1,60

Fonte: Elaboração própria (2020).