



ANÁLISE MULTI-ESCALAR INTEGRADA DA PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA NO TRIÂNGULO MINEIRO EM RELAÇÃO AO USO DA ÁGUA

Marcos Henrique Godoi

Diretoria de Sustentabilidade, Universidade Federal de Uberlândia

marcos_h_godoi@hotmail.com

Ademar Ribeiro Romeiro

Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas

arromeiro@gmail.com

Resumo

A sustentabilidade é uma questão complexa por reunir sob um mesmo conceito diversos problemas específicos tratados em qualidades diferentes. Este trabalho usa a metodologia *Multi-Scalar Integrated Analysis of Societal and Environmental Metabolism* (MuSIASEM) para integrar duas diferentes representações de uma mesma mesorregião, a do Triângulo Mineiro, que se referem ao uso da água, em termos ambientais (bacia hidrográfica) e socioeconômicos (a mesorregião administrativa). Após estruturar as representações nos diferentes níveis de uma holarquia, analisou-se que a pecuária extensiva presente na região configura um desperdício de água tanto do ponto de vista ambiental quanto do socioeconômico. Com base nessa análise, testou-se um cenário com uma política pública baseada em pagamentos por serviços ecossistêmicos (PSE) que verificou que é possível, com base em incentivos econômicos, tornar a situação mais satisfatória tanto para os agentes quanto para os ecossistemas.

Palavras-chave: sustentabilidade, complexidade, água, PSE

Abstract

Sustainability is a complex issue because it conjoins under the same concept as a variety of specific problems with different qualitative aspects. This paper uses the *Multi-Scalar Integrated Analysis of Societal and Environmental Metabolism* (MuSIASEM) to integrate two different representations of the same mesoregion, the Triângulo Mineiro, both in environmental terms (the watershed) and in socioeconomic terms (the administrative mesoregion). We first structured the representations in a holarchy and then used it to conclude that extensive cattle raising in the region is wasteful of water in both representations. Based on this analysis we have simulated a scenario in which a payment for ecosystem services (PES) was considered. This simulation provides us with evidence that economic incentives can make the situation better for both the agents and the ecosystems.

Keywords: sustainability, complexity, water, PES

JEL Codes: Q1, Q2, Q5, C3, C6



1. Introdução

Um dos mais eminentes problemas complexos que emergiram em tempos recentes e que não encontra um tratamento adequado dentro das abordagens convencionais é a questão da sustentabilidade. Se antes da Segunda Guerra Mundial o esgotamento de recursos naturais e a degradação ambiental ocorriam de forma localizada, o desenvolvimento das forças produtivas no pós-guerra atingiu uma escala suficiente para afetar todo o planeta, levando alguns autores a considerar os chamados *Golden Years* como o período de “Grande Aceleração”, no sentido de que houve um aumento exponencial da pressão das atividades econômicas sobre a estabilidade dos ecossistemas (Andrade et al., 2012). A complexidade da questão ambiental aparece na multiplicidade de problemas que a compõe. Problemas ambientais surgem em inúmeras formas, como efeito estufa, contaminação de lençóis freáticos, acúmulo de metais pesados nos ecossistemas, redução da polinização em função da redução da quantidade de abelhas, entre muitos outros. Esses problemas têm diferenças tanto qualitativas quanto de escala que tornam o tratamento simultâneo de todas elas uma tarefa impossível.

Entre os problemas multidimensionais que caracterizam questões complexas, está a escassez de água. No Brasil, a escassez de recursos hídricos vem se disseminando, não mais se limitando ao semiárido nordestino e passando a afligir regiões onde anteriormente a água era abundante. O impacto dessa escassez sobre a economia pode ser entendido diretamente pela consideração das atividades produtivas que se usam dessa água para gerar valor. No entanto, há também os efeitos indiretos que essa escassez provoca por meio da diminuição do metabolismo ecossistêmico da água, que reduz a oferta de serviços ecossistêmicos que também são essenciais para a produção (e para a vida em geral), e estes impactos indiretos são mais

difíceis de se avaliar e mensurar. Este artigo busca identificar se a água na região está sendo usada de forma a melhor gerar renda e garantir a provisão de serviços ecossistêmicos, e de qual forma este uso poderia ser melhorado.

Para tratar adequadamente estas questões, este trabalho irá utilizar o método *Multi-Scalar Integrated Analysis of Societal and Environmental Metabolism* (MuSIASEM) para estruturar o problema da gestão de recursos hídricos da mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba (doravante, apenas Triângulo Mineiro) em diferentes representações não equivalentes estruturadas em holarquias, que permitam a avaliação dos impactos sobre diferentes dimensões qualitativas dos impactos do uso da água na região. Este método será utilizado para modelar a mesorregião do Triângulo Mineiro em relação ao metabolismo social e ecossistêmico da água. Para isso, o artigo se divide em cinco seções, afora esta introdução: a segunda seção traz a caracterização da mesorregião; a terceira trata da relação entre complexidade e sustentabilidade; a quarta traz a análise integrada da mesorregião em relação aos recursos hídricos; a quinta testa um cenário com uma política pública para melhorar a situação diagnosticada; e as considerações finais.

2. A Mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba

A região do Triângulo Mineiro se situa no bioma Cerrado, que, embora apresente uma precipitação razoável (750 a 2000 mm por ano), têm uma estação seca de maio a outubro. As chuvas concentradas em um período relativamente curto do ano removem os nutrientes do solo, tornando-os pobres e pouco férteis (Eiten, 1990). Essa pobreza de nutrientes tornou o preço da terra no bioma mais barato relativamente aos preços



praticados no bioma Mata Atlântica, o que, em conjunto com a pluviosidade média anual de cerca de 1500 mm (embora concentrada em um período demarcado do ano), temperaturas amenas e alta incidência de luz solar, permitiu a expansão agrícola sem precedentes ocorrida nos últimos 50 anos. O desenvolvimento de novas tecnologias foi fundamental para a expansão da agricultura para o Cerrado. Entre elas, podemos destacar a fertilização e correção da acidez do solo por meio da

introdução de fósforo e cal, o uso de bactérias que ajudam a fixar o nitrogênio no solo (principalmente do gênero *Rhizobium*), o uso de pesticidas e grande maquinário. A introdução de novas tecnologias ocorreu principalmente na agricultura ligada a culturas para exportação, mas também na pecuária, com a introdução de pastagens africanas que permitiam um maior rendimento por hectare (Klink e Moreira, 2002).

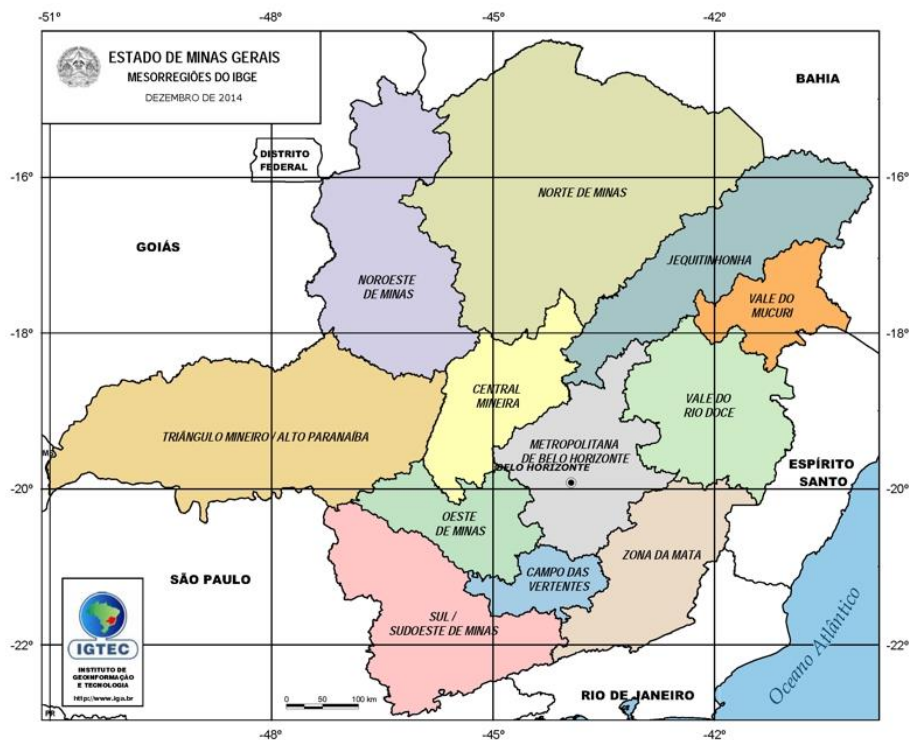


Figura 1 – O Triângulo Mineiro no Estado de Minas Gerais (Governo de Minas Gerais, 2017).

O bioma Cerrado é o segundo maior do país, com 2,04 milhões de km², ficando atrás apenas da Amazônia. Sua posição geográfica, bem no interior do continente, o torna fundamental para o ciclo hidrológico do mesmo. Das doze regiões hidrográficas do

país, oito recebem águas provenientes do Cerrado. A tabela abaixo mostra a contribuição do Cerrado para os recursos hídricos destas regiões, contribuição esta conhecida como “efeito guarda-chuva”:

**Tabela 1.** Contribuição do Cerrado para os recursos hídricos das regiões hidrográficas

<i>Região Hidrográfica</i>	<i>Contribuição do Cerrado para o total de água (%)</i>
Amazônia	3,8
Atlântico Norte Ocidental	8,6
Atlântico Leste	21
Bacia do Paraná	50
Tocantins-Araguaia	60
São Francisco	94
Parnaíba	105*
Paraguai	135*

* A contribuição é superior a 100% porque o restante da bacia tem um balanço hídrico deficitário.

Fonte: Lima (2011, p. 27).

Uma vez que o Cerrado tem uma importância tão grande no abastecimento das bacias hidrográficas brasileiras, é necessário avaliar como se dá o uso da terra no que tange à preservação dos recursos hídricos no bioma, pois tais águas abastecem boa parte do país.

Uma das áreas do Cerrado onde há maior concentração de atividades agrícolas modernas (Klink e Moreira, 2002), o Triângulo Mineiro foi tomado como objeto para se fazer a análise integrada da sustentabilidade do sistema ambiente-sociedade por ser uma região representativa do Cerrado, um bioma de importância fundamental para o regime hídrico brasileiro, pela importância da agropecuária na região, principal fonte de conflitos na gestão dos recursos hídricos e pela densidade de veredas na região, ou seja, pequenos cursos de água que são fundamentais para o ciclo da água no Cerrado (Ramos et al., 2006). A região faz parte de duas bacias hidrográficas: a do Rio Grande, que demarca a divisa sul com o estado de São Paulo, e a do Rio Parnaíba, que demarca a divisa norte com o estado de Goiás e oeste

com o Estado de Mato Grosso do Sul. A posição da região localizada no caminho de São Paulo para a região do Brasil Central, somada à ascensão de São Paulo como centro econômico do país no século XX, garantiram a importância logística e o desenvolvimento econômico da região. A partir do começo da desconcentração econômica do Sudeste para outras regiões do país, na década de 70, o Triângulo Mineiro começou a receber investimentos industriais para a intensificação da agricultura da região, nos moldes descritos acima para o Cerrado em geral. A região passou de mero ponto de ligação e de produção de gado para uma economia mais diversificada, porém ainda muito ligada ao agronegócio (Guimarães, 2004).

Enquanto o uso da água é determinado pela configuração socioeconômica da região, a água é provida a partir do ciclo hidrológico e dos ecossistemas locais. A partir destes inter-relações entre sistemas naturais e humanos, emerge uma complexidade que necessita de um arcabouço conceitual adequado para ser



tratada. A seção seguinte apresenta brevemente este arcabouço.

2. Complexidade e sustentabilidade

Um sistema complexo é um sistema que possua um conjunto de relações grande, aberto e em expansão (Giampietro, 2003). É também uma estrutura dissipativa que importa energia livre e exporta entropia de forma a se auto-organizar, sendo irreversivelmente ligado ao ambiente que o contém e também a outros sistemas, com os quais este mantém relações. A economia pode ser considerada um sistema complexo por ter as seguintes características: é uma estrutura dissipativa que transforma energia em trabalho e informação em conhecimento, mantendo e expandindo a complexidade organizada do sistema; apresenta algum grau de irreversibilidade estrutural, devendo a inerente natureza hierárquica das conexões entre seus componentes que são formadas em seu desenvolvimento estrutural; o processo evolutivo desses sistemas só pode ser entendido no tempo histórico, com fases de emergência, crescimento, estagnação e transição estrutural (Foster, 2005). A problemática ambiental é intrinsecamente complexa, por estarmos falando da relação entre ecossistemas, inegavelmente estruturas dissipativas, e a sociedade. A atividade econômica está inserida tanto no ecossistema do qual depende quanto no sistema social onde ocorre, tendo como núcleo a ideia de que sistemas complexos existem tanto como sistemas completos quanto como parte de um sistema maior, com o qual interagem e se sobrepõem.

Para dar um tratamento analítico adequado às questões complexas, uma boa ferramenta é o conceito de metabolismo social. Metabolismo social é definido como a relação entre o uso de recursos naturais e as funções e estruturas sociais. Tanto os ecossistemas, que fornecem

os recursos, quanto a sociedade, que utiliza estes recursos, podem ser definidas como sistemas complexos, auto-organizáveis e dissipativos, capazes de estabilizar sua própria identidade reproduzindo um determinado padrão metabólico, por meio de um conjunto de relações entre as partes e o todo que às contém (Madrid et al., 2013). Assim, o conceito de metabolismo social permite integrar as dimensões econômica, social e ambiental em paralelo.

O metabolismo social deriva de uma concepção sistêmica da relação entre sociedade e meio ambiente. Para que se possa visualizar estas relações é necessário, portanto, uma representação destas relações que reflita os preceitos explicitados acima. Para isso, utilizar-se-á o conceito de holarquia. Holarquia pode ser definida como uma hierarquia adaptativa de sistemas dissipativos inseridos uns dentro dos outros. Uma holarquia é um sistema hierárquico composto por holons. Um holon é um todo composto de partes menores que ao mesmo tempo é parte de um todo maior (Koestler, 1969). Um sistema holárquico é composto por holons, que por sua vez, podem ser entendidos como é um todo composto de partes menores e que ao mesmo tempo é parte de um todo maior. O termo holon mostra o fato de que entidades pertencentes a sistemas dissipativos adaptativos organizados em elementos inseridos um dentro do outro (em níveis hierárquicos diferentes) possuem uma dualidade inerente.

A dinâmica de cada holon se baseia na definição de sua identidade por parte do observador, uma vez que diferentes aspectos qualitativos incluídos na representação irão focar em diferentes aspectos da dinâmica. A identidade do sistema pode ser definida como um conjunto de qualidades relevantes que tornam possível para um observador perceber o sistema sob observação como uma entidade individual, distinta do contexto e de outros sistemas como os quais interage. A identidade



formal do sistema é o modelo que elege um conjunto finito de variáveis que serão usadas para descrever mudanças no estado do sistema (Giampietro, 2003). É preciso ressaltar que, nessa definição, o estado de um sistema natural não faz sentido quando isolada de seu sistema formal específico (Rosen, 2012).

As diferentes escalas são representadas nos diferentes níveis da holarquia. As representações não equivalentes, por sua vez, são segmentos da realidade delimitados por relações de interesse (Kampis, 1991). A partir dessa noção, introduz-se o conceito de domínios descritivos, que são os aspectos escolhidos pelo analista para representar um sistema complexo. O domínio descritivo é uma parte da realidade que foi separada do resto com base em uma escolha pré-analítica de como descrever o sistema em relação aos objetivos buscados pela análise (Giampietro, 2003). Ou seja, sistemas complexos não podem ser reduzidos à uma única representação correta, sendo necessário atentar para as diferentes dinâmicas presentes tanto em representações não equivalentes de um mesmo fenômeno quanto em suas diferentes escalas. Diferentes representações são não equivalentes quando construídas com base em domínios descritivos diferentes.

Na seção seguinte será apresentada a modelagem feita a partir do método

MuSIASEM, que leva estas questões em consideração bem como a descrição da metodologia utilizada e a análise dos resultados.

3. Análise Multi-Escalar Integrada do uso da água no Triângulo Mineiro

A metodologia MuSIASEM permite uma análise integrada das variáveis sociais e econômicas associadas às ambientais, descritas entre níveis hierárquicos diferentes, identificando padrões de metabolismo social, e das características dos processos ecológicos descritas entre diferentes níveis hierárquicos de análise. O método MuSIASEM permite uma análise entre níveis hierárquicos (subsistemas da sociedade), ao se utilizar de uma definição semanticamente aberta dos sistemas e recursos sob análise (Madrid e Cabello, 2011).

No que toca à representação do Triângulo Mineiro dentro do marco teórico desenvolvido na seção anterior, é necessário fazer a distinção entre as duas representações não equivalentes, uma em termos socioeconômicos e a outra em termos biofísicos. Para tratar disso, é útil usar da distinção feita por Madrid (2014) entre a bacia hidrográfica (*watershed*) e a bacia “problemática” (*problemshed*). A **figura 2** abaixo traz essa distinção conforme apresentada no trabalho da autora:

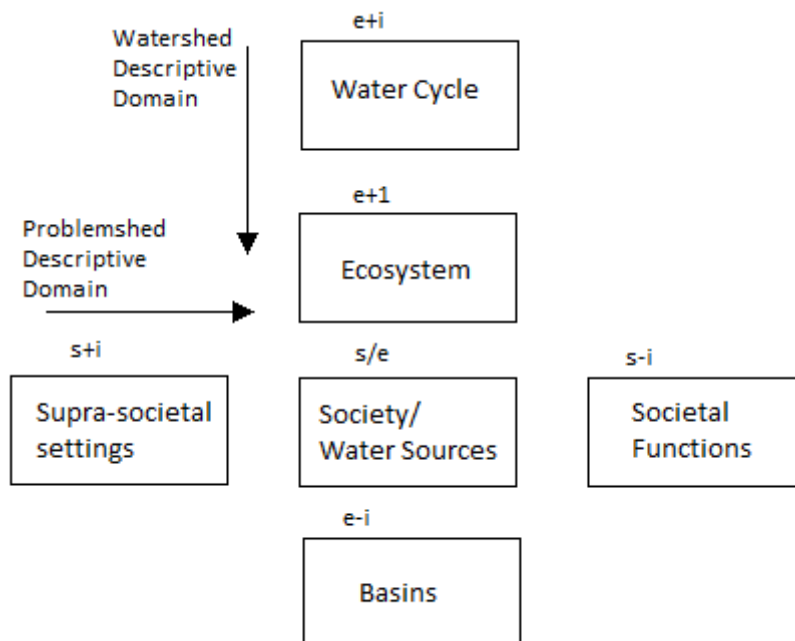


Figura 2. Domínios Descritivos Não Equivalentes da *Watershed* e da *Problemshed* (Madrid, 2014, p. 94).

A representação em termos socioeconômicos corresponde à bacia problemática, enquanto a representação em termos biofísicos corresponde à bacia hidrográfica. Diferenças nas prioridades entre diferentes agentes determinam o que é representado como fatores de fundo e o que é representado como fatores de fluxo. Os fatores de fundo são aqueles que geram um serviço a uma taxa limitada, mas que não se esgota com o uso, como, por exemplo, um quarto de hotel, que só pode abrigar um número limitado de pessoas ao mesmo tempo, mas que uma vez desocupado pode voltar a abrigar outras pessoas. Já um fator fluxo é uma variável que tem um estoque limitado que pode ser usado a qualquer taxa, como, por exemplo, um poço de petróleo, que se esgotará mais rápido ou mais lentamente conforme o ritmo mais ou menos acelerado de extração (Georgescu-Roegen, 1971). No entanto, neste trabalho, a água é tratada como fluxo nas duas representações, uma vez que neste trabalho

entende-se que o fator de fundo em termos extensos e formais é a própria região, com sua identidade dada pelas diferentes fisionomias vegetais (tomadas enquanto tipos, ou seja, como valores médios do metabolismo da água neles) que caracterizam o uso do solo, e não pelos corpos de água em si.

A especificação dos modelos foi feita a partir desta divisão do sistema entre hólons distribuídos em diferentes níveis hierárquicos, com as categorias epistêmicas sendo classificadas como fundos ou fluxos de acordo com o contexto em que estão inseridas. A especificação proposta por Madrid e Cabello (2011) será utilizada, de forma adaptada, como base para a análise, considerando os objetivos propostos anteriormente. Os quadros abaixo descrevem esta especificação:



Quadro 1. Representações Não-Equivalentes

Variável Fundo	Variável Fluxo	Dimensão analisada
Terra	Água	Contribuição hídrica para a bacia hidrográfica e saúde dos ecossistemas
Terra	Valor Adicionado	Viabilidade econômica para o proprietário de terras
Atividade Humana	Valor Adicionado	Viabilidade econômica para o trabalhador rural

Fonte: Elaboração Própria

Uma vez distribuídos os processos com escalas diferentes de forma a construir uma holarquia, é necessário atentar para o fato de que a água pode cumprir funções diferentes em diferentes níveis hierárquicos do sistema. Para dar um tratamento adequado a essas diferentes funções, utiliza-se o conceito de água virtual. Este conceito pode ser definido como a água associada à produção de um bem ou serviço, ou seja, não apenas a água presente no produto, mas também toda a água necessária para a produção deste (Allan, 1998). É importante ressaltar, também, o caráter central que tem o comércio dos produtos do metabolismo social da água, que revela conflitos relacionados ao uso da água, na teoria da água virtual, não focando apenas a produção (Madrid, 2014).

A estimação dos fluxos de água foi feita por meio do método da Pegada Hídrica, um indicador de água potável que mede não apenas o uso direto da água na produção e consumo, mas também o uso indireto, analisando toda a cadeia produtiva. Esse indicador divide a água em três tipos para dar conta dos fluxos de água virtuais: azul, avinda dos cursos de água superficiais e dos reservatórios subterrâneos; verde, advinda da

água apropriada pelos ecossistemas (umidade do solo, água dentro das plantas, etc.); e cinza, a água necessária para diluir a poluição de forma a não prejudicar a qualidade da água nos cursos que receberem os efluentes. A água azul mostra o uso direto da água, enquanto as águas verde e cinza mostram o uso indireto. Além disso, enquanto as águas azul e verde representam água consumida no processo, a água cinza representa água não consumida, ou seja, que pode ser utilizada para outros fins. A contabilidade destes fluxos de água se dá por meio do chamado método volumétrico, que busca medir toda a contribuição da água ao longo do processo produtivo (Hoekstra et al., 2011). Essa mensuração pode ser feita de duas formas: a partir do topo, que considera o uso total de água agregado em um setor e divide este uso pela produção total do setor; e a partir da base, que considera as características específicas do processo produtivo de um determinado bem ou serviço. Neste trabalho, a estimação dos fluxos de água foi feita tanto a partir do topo quanto a partir da base, uma vez que os dados para uma mesorregião geográfica não estão disponíveis de forma completa.

**Quadro 2.** Matriz Multinível das Diferentes Representações Não Equivalentes

	Nível	Fluxos		Fundos	
		Água (m3)	Valor (R\$)*	Terra (ha)	Trabalho (h)
Triângulo Mineiro	n	55.898.073.659	28.864.004.000	9.054.060	18.327.067.560
Domicílio	n-1	182.964.829	0	2.706	16.096.280.120
Parques e Reservas	n-1	4.530.094.244	0	669.498	0
Corpos de Água	n-1	732.738.594	0	81.451,60	0
Áreas não incorporadas	n-1	5.159.437.920	0	2.173.293	0
Setor produtivo	n-1	45.292.838.072	28.864.004.000	6.081.841	2.230.787.440
Agropecuária	n-2	45.083.848.845	4.332.093.000	6.036.571	356.079.073
Produção Urbana	n-2	208.989.227	24.531.911.000	45.270	1.874.708.368
Indústria	n-3	80.625.564	9.181.328.000	**	203.274.144
Serviços	n-3	128.363.662	15.350.582.000	**	1.671.434.224
Terra Inaproveitáveis	n-3	0	0	103.252	0
Aquicultura	n-3	647.539	5.269.209	9.089	155.388
Florestas naturais	n-3	5.814.658.475	2.787.000	859.343	704.876
Florestas plantadas	n-3	1.237.193.870	54.000	134.215	1.770.432
Pastos	n-3	29.389.915.242	1.180.436.000	3.619.002	207.650.386
Plantações	n-3	8.641.433.719	3.143.546.791	1.311.670	145.797.990
Soja	n-4	1.402.130.067	513.355.882	451.281	4.339.824
Cana	n-4	2.095.192.217	964.914.358	148.669	16.380.628
Milho	n-4	1.419.206.332	443.610.434	334.403	6.445.888
Café	n-4	2.109.125.470	953.160.185	131.083	93.721.484
Outras culturas	n-4	1.615.779.633	268.505.932	246.234	24.910.166
*Reais de 2006					
**Não há dados para a área ocupada para as atividades industriais e de serviços.					

Fonte: Godoi (2018).



A pegada hídrica em termos de água azul reflete aquilo cotidianamente considerado como consumo de água, ou seja, a captação a partir de rios e outros corpos de água. Já esta mesma pegada em termos de água verde reflete o uso da água da chuva pela vegetação, de forma a providenciar os recursos no primeiro nível trófico que sustentaram toda a holarquia. A água verde se torna útil ao ser humano apenas por meio de serviços ecossistêmicos, entendidos de forma ampla, ou seja, inclusive os serviços de provisão fornecidos pelos ecossistemas simplificados que constituem a produção agropecuária. A água cinza é a quantidade de água necessária para diluir os efluentes a um nível que não torne o ambiente inadmissível para as formas de vida aquáticas, que também fornecem serviços ecossistêmicos. No quadro 2 não foi considerada a água cinza, pois ela não corresponde a consumo efetivo, uma vez que, diluído o poluente, a água pode ser usada de outras formas, sendo o valor de cada componente (em relação à água) a soma das pegadas azul e verde. O valor dos diferentes componentes da holarquia considerada foi estimado com base em dados retirados de diversas fontes, que poder ser conferidas em Godoi (2018)¹.

Uma vez coletados os dados e calculada a Pegada Hídrica associada a cada nível da holarquia, estes são dispostos no quadro 2. Este quadro mostra as variáveis extensivas, ou seja, o valor absoluto estimado para cada holon em cada uma das dimensões relevantes (água, valor, terra e trabalho). O valor de cada nível é relacionado aos outros por meio de equações de congruência, que garantam a coerência do todo com as partes e vice-versa. Por exemplo, o holon Plantações (n-3) é a soma dos holons imediatamente inferiores,

nominalmente Soja, Cana, Milho, Café e Outras Culturas (que é uma variável residual, uma vez que constitui um número muito grande de culturas com pequena participação no total) no nível n-4. O valor estimado para um holon em um nível é a soma dos holons imediatamente inferiores no quadro, com exceção dos holons Agropecuária (n-2), que é a soma dos holons Terra Inaproveitáveis, Aquicultura, Florestas naturais, Florestas plantadas, Pastos e Plantações (n-3). Devido a incompletude dos dados, as equações de congruência permitem completar dados faltantes, integrando todos os holons em um mesmo modelo e relegando qualquer diferença entre o modelo do nível superior e a soma dos modelos componentes à variável residual.

A partir das variáveis extensivas especificadas, foram calculadas variáveis intensivas, dividindo-se uma variável extensiva pela outra, para obtenção de variáveis que descrevam a produtividade em termos de cada caso considerado, como, por exemplo, produtividade do trabalho (Valor/Trabalho) e o rendimento econômico da terra (Valor/Área), quando considerado o território como um todo. As variáveis extensivas de terra e atividade humana são consideradas fatores de fundo, e o valor adicionado e a água como fatores de fluxo. As relações entre terra e valor e entre atividade humana e valor compõem o nível de renda da população do território. A relação entre terra e água indicam a contribuição hídrica de cada tipo de uso de solo para o Triângulo Mineiro. A diferença da composição dos níveis hierárquicos para cada variável considerada remonta às múltiplas identidades necessárias para caracterizar sistemas dissipativos.

1 Como os dados foram coletados a partir de uma variedade muito grande de fontes, não é possível reproduzi-las aqui, por questão de espaço.

**Quadro 3 – Variáveis Intensivas**

	Nível	Variáveis			
		m3/h	m3/ha	R\$/ha*	R\$/h
Triângulo Mineiro	n	2,87	5.818,00	3.187,96	1,57
Domicílio	n-1	0,01	67.622,05	0,00	0,00
Parques e Reservas	n-1	N/A	6.766,40	0,00	N/A
Setor produtivo	n-1	20,30	7.392,20	4.710,87	12,94
Áreas não incorporadas	n-1	N/A	2.374,02	0,00	N/A
Agropecuária	n-2	125,77	7.412,86	712,30	12,09
Produção Urbana	n-2	0,11	4.616,48	541.898,57	13,10
Indústria	n-3	0,40	N/A	N/A	45,17
Serviços	n-3	0,08	N/A	N/A	9,18
Aquicultura	n-3	4,17	71,24	579,73	33,91
Florestas naturais	n-3	8.249,19	6.766,40	3,24	3,95
Florestas plantadas	n-3	297,60	9.218,00	0,40	0,03
Pastos	n-3	141,54	8.121,00	326,18	5,68
Plantações	n-3	59,27	2,75	2.396,60	21,56
Soja	n-4	323,08	3.107,00	1.137,55	118,29
Cana	n-4	127,91	14.093,00	6.490,35	58,91
Milho	n-4	220,17	4.244,00	1.326,57	68,82
Café	n-4	22,50	16.090,00	7.271,42	10,17
Outras culturas	n-4	64,86	6.561,97	1.090,45	10,78

*Reais de 2006.

Fonte: Godoi (2018).

O maior componente da holarquia considerada aqui é a pecuária bovina, cujos pastos (no nível n-3) ocupam 39,97% da área total da mesorregião e 59,07% da área total dedicada ao setor produtivo. Em termos de água, a pecuária bovina corresponde a 65,19% da pegada hídrica total em termos de água verde associada a produção no Triângulo Mineiro (ou seja, do total utilizado pelo setor primário). Embora responda pela maior parte dos fatores

utilizados na primeira representação não equivalente do quadro 1, ou seja, dos fatores que compõem a identidade formal da representação escolhida neste trabalho para caracterizar o meio ambiente, na representação não equivalente em termos socioeconômicos a situação é bem diferente. Tanto o rendimento monetário por hectare da pecuária como sua produtividade do trabalho são inferiores aos da silvicultura e das florestas



plantadas. Dessa forma, a maior parte da água (efetiva e virtual) utilizada no processo produtivo no Triângulo Mineiro é alocada para atividade produtiva menos eficiente em termos de valor.

Aqui, há mais uma instância do problema de se tratar questões complexas, ou seja, que admitem múltiplas representações logicamente consistentes e validadas por referenciais externos, de forma simples, reducionista, buscando ótimos. A eficiência econômica, por mais que reflita as inúmeras relações causais que produzem o valor, não pode representar todos os aspectos de um objeto complexo. Assim, quando considerada a representação não equivalente do ambiente usando como fluxo a água, a alocação econômica se mostra muito ineficiente. As incomensurabilidades técnicas e sociais (Munda, 2004) levam a diferentes critérios de eficiência, em função das diferentes qualidades analisadas.

Tal problema se coloca em função das diferenças entre como um determinado *trade-off* é entendido em representações não equivalentes diferentes. Enquanto na representação não equivalente em termos de área e valor manter um hectare de Cerrado preservado apareça como um “desperdício” de terra, uma vez que o custo de oportunidade de mantê-lo vis-à-vis ou de usá-lo como pasto é de 322,93 por hectare em reais de 2006. No entanto, o hectare de Cerrado fornece serviços ecossistêmicos que não estão precificados, o que leva a uma maior alocação de terra para os pastos, reduzindo estes serviços ecossistêmicos. O estabelecimento de um preço sobre a tonelada de CO₂ sequestrado poderia incentivar uma conversão de terras de pasto em campo cerrado que poderia potencialmente levar a um sequestro de 19,6 toneladas por hectare ao longo do processo (FEAM, 2008).

No entanto, se o instrumento usado para garantir que a capacidade de sequestro de

carbono fosse aumentada fosse um preço pela tonelada de carbono sequestrada, como aventado acima, apenas plantar as pastagens em sistema de plantio direto poderia levar a um sequestro de 1,5 toneladas de CO₂ por hectare por ano, de acordo com Carvalho et al. (2010). Dessa forma, outros serviços ecossistêmicos realizados pelo Cerrado, como a regulação do microclima, não seriam desempenhados. Ao usar um instrumento de valoração para trazer a oferta ou demanda por serviços ecossistêmicos para um patamar mais próximo do que seria adequado, não se pode utilizar uma única dimensão de análise (no caso, CO₂). É necessária a consideração das múltiplas dimensões nas quais são medidos os resultados do metabolismo em suas diferentes representações não equivalentes.

É possível utilizar estas variáveis intensivas para testar o efeito de diferentes configurações da holarquia em termos de área distribuída entre os tipos de uso do solo. Para cada tipo de uso do solo, as variáveis intensivas presentes no quadro 3 refletem sua composição em termos de fatores de fundo (biomassa por hectare para a representação ambiental; capital e trabalho por hectare para a representação socioeconômica). A seção seguinte usará dessa característica da metodologia MuSIASEM para testar um cenário para uma política combinada que busca reduzir a área de pasto extensivo para promover a expansão de usos do solo que possam melhorar a situação tanto dos recursos hídricos quanto da geração de renda na região.

4. Uma proposta de política combinada

A partir do panorama providenciado pela estruturação dos usos do solo em um holarquia, identificou-se o grande custo de oportunidade em termos de água representado pela grande participação da pecuária bovina na produção agropecuária



como um todo da mesorregião. Também, a partir da análise dos outros componentes, conclui-se que uma redução na área de pasto seria benéfica mesmo se tal mudança no uso do solo se desse do pasto para as plantações de milho e soja.

A simulação de um cenário utilizando a metodologia MuSIASEM se baseia no que é denominado efeito *sudoku* ou efeito mosaico: uma vez que, dentro de uma matriz multinível, a soma do nível imediatamente inferior deve ser igual ao valor de um dos componentes do nível superior, a congruência do sistema é garantida, fazendo com que a alteração de uma das variáveis tenha impacto sobre a configuração do sistema por meio da alteração das variáveis intensivas, levando a uma modificação do padrão de metabolismo. Assim se pode testar o efeito da adoção de políticas públicas que tenham impactos sobre estas variáveis intensivas (Madrid, 2014).

Essencial para o uso do efeito *sudoku* na análise da congruência dos componentes com o sistema como um todo é a redundância no espaço de informação. As variáveis intensivas descrevem as taxas nas quais cada tipo de componente metaboliza o fator de fluxo (Giampietro, 2003). A identidade deste tipo é definida por essa taxa, uma vez que ela é produto de uma determinada composição em termos de fatores de fundo que são especificamente associadas ao metabolismo de um fator de fluxo. A variável intensiva só se altera em função de uma mudança na sua composição em termos de fatores de fundo ou de uma maior disponibilidade de fluxos no ambiente, que, por sua vez, é produzida por uma mudança na composição do ambiente. Assim, é possível usar os testes de congruência para averiguar o impacto de uma mudança na composição da holarquia sobre o padrão de metabolismo. Uma política que provoque alterações nos fluxos de valor apropriados por cada componente do sistema afeta a taxa na qual estes são metabolizados

pelos componentes em função de uma mudança ambiental. Para manter sua identidade (definida matematicamente como a proporção entre fluxos e fundos) frente a essa mudança, a holarquia pode mudar sua composição em termos de fatores de fundo. Uma vez que a congruência entre os subsistemas de um sistema exige que a quantidade total de fluxos distribuídos entre holons com diferentes identidades seja conservada, a mudança na composição em termos de fatores de fundo de cada subsistema provoca o aumento ou redução da participação dos outros componentes. Ao averiguar as mudanças na composição do sistema como um todo frente a essas mudanças em seus componentes, um novo padrão de metabolismo emerge. O teste de cenários dentro da metodologia MuSIASEM permitem, portanto, aferir os impactos de uma política para a sustentabilidade da holarquia a partir do conhecimento dos limites aceitáveis do padrão de metabolismo para que este não esteja acima da capacidade do ambiente de sustentá-lo.

Uma medida de política pública para aumentar a oferta de serviços ecossistêmicos que já é consagrada na literatura, por se basear fortemente em preceitos econômicos, são os pagamentos por serviços ecossistêmicos. Esta medida é construída a partir da noção de externalidade, ou seja, a degradação do meio ambiente é vista como uma externalidade negativa dos processos produtivos em decorrência do fato de que o meio ambiente, com também os serviços ecossistêmicos que gera, é um bem público, o que faz com que os custos associados à sua degradação não sejam internalizados por aquele que os usam de forma excessiva. Os pagamentos por serviços ecossistêmicos buscam, a partir da valoração destes, internalizar estes custos ao processo. No caso tratado aqui, opera a lógica inversa: ao restaurar o que já foi degradado, o agente gera uma externalidade positiva que precisa ser recompensada.



Para estimar o valor dos serviços ecossistêmicos de forma a equilibrar a oferta e a demanda por estes, diversos métodos de valoração ecossistêmica já foram propostos, baseados ou na utilização de uma função de produção de forma a relacionar o serviço ao preço de uma mercadoria já precificada ou em um mercado hipotético para este serviço baseado na disposição a pagar dos agentes demandantes. Um exemplo de política do uso da valoração para a gestão de recursos hídricos é fornecido por Castanier (2015). Ele usa o método de valoração contingente para avaliar o valor total dos serviços, que consiste na soma dos valores de uso e de não uso por meio da construção de um mercado hipotético que permita medir a disposição a pagar dos agentes pelo serviço. O objeto dessa avaliação é a área de captação de água da cidade de Quito, Equador. Considerando um período de 2013 até 2040, a análise de custo-benefício revela que a preservação dessa área geraria benefícios com um valor presente líquido de US\$ 470,318,188, contra apenas US\$ 78,026,976 de custo dessa preservação.

A estrutura holárquica de sistemas dissipativos como a sociedade ou os ecossistemas impede a consideração de algo essencial para o metabolismo como completamente externo ao sistema, pois a identidade de um sistema complexo é fruto de múltiplas causalidades advindas de diferentes níveis da holarquia, operando em diferentes ritmos. No entanto, fluxos de valor são essenciais para a manutenção da sociedade enquanto subsistema de uma holarquia maior, uma vez que, em uma sociedade capitalista, as trocas materiais e energéticas que ocorrem para satisfazer as diversas necessidades e desejos da população são adquiridos usando dinheiro, ou seja, os fluxos de valor vão indicar tanto a capacidade de cada componente deste sistema social (indivíduos, empresas, setores, etc.) de atender às necessidades de sua dinâmica quanto, quando agregados, a escala do metabolismo social. Assim, o uso de fluxos

de valor para favorecer componentes que tenham melhor desempenho em dimensões que não são consideradas pelo mercado pode produzir bons resultados, quando usado em paralelo com representações não equivalentes de outras partes da holarquia.

Dessa forma, é importante identificar que a valoração de serviços ecossistêmicos, quando inserida em uma visão sistêmica da sustentabilidade, não é uma questão de encontrar o preço de equilíbrio para determinado serviço ecossistêmico, de forma a igualar a oferta e a demanda por ele. O caráter multidimensional dos sistemas complexos exige que cada dimensão seja considerada de forma específica. Uma forma de visualizar este problema foi tratada na seção anterior: o uso de um instrumento unidimensional de valoração, preço por tonelada de CO₂, poderia levar apenas à promoção do plantio direto nas áreas de pasto, o que, ainda que um avanço em relação à situação corrente, não promoveria a oferta de outros serviços, como o de regulação do clima.

Assim, a análise dos efeitos da precificação de serviços ecossistêmicos deve ser feita tendo em mente que o que se busca não é o equilíbrio, e sim uma sintonia fina entre os diferentes ritmos de duração de diferentes componentes do sistema e diferentes representações não equivalentes destes sistemas. Se uma das representações relevantes para lidar com a questão da sustentabilidade é a do sistema econômico, medido em termos de fluxos de valor metabolizados por fatores (de fundo) de produção que constituem a identidade do sistema, a quantidade de valor alocada para um componente em um determinado intervalo de tempo (dt) é uma medida do tempo intrínseco deste metabolismo econômico. Os diferenciais de tempo não são os mesmos entre diferentes componentes devido a uma conjunção de causas formais (mais ou menos fatores de produção), causas materiais (mais



ou menos acesso a recursos para serem metabolizados; não adianta uma máquina ser capaz de produzir 200 sapatos por dia se só há couro para 100) e eficientes (competição no setor específico considerado). Ou seja, cada componente é específico em sua forma de metabolizar os fluxos que alimentam sua dinâmica. Mas para que esta dinâmica seja mensurada, é necessário um grau de generalização que muitas vezes oculta a miríade de causalidades que produzem efeitos aparentemente equivalentes.

É importante notar também que, dentro dessa visão sistêmica, a valoração do serviço ecossistêmico não é feita com base em uma relação entre os fluxos metabolizados na geração dos serviços versus fluxos de valor (neste caso, R\$/m³), e sim com base na relação entre fatores de fundo e fatores de fluxo, uma vez que a identidade dos componentes (subsistemas) da holarquia é dada por meio dos fatores de fundo, a partir dos quais é possível avaliar a heterogeneidade

dos componentes e quais deles tem os melhores desempenhos em cada dimensão, o que seria impossível se apenas se considerasse os *inputs* e *outputs* do sistema, pois estes são fluxos que têm que ser homogêneos para que se possam comparar os componentes ao considerar cada dimensão separadamente. Dito de outra forma, diferentes subsistemas precisam ter algo em comum (fluxos) para que se possa compará-los, e algo (fundos) que os diferenciem, pois senão seriam todos representáveis em uma mesma formulação, o que seria reducionismo. Assim, ao transferir renda de um componente mais veloz para outro mais lento, é possível controlar a escala total da holarquia para que esta fique em um nível sustentável. O processo é resumido no diagrama presente na **figura 3** abaixo.

Simulação do Cenário no método MuSIASEM

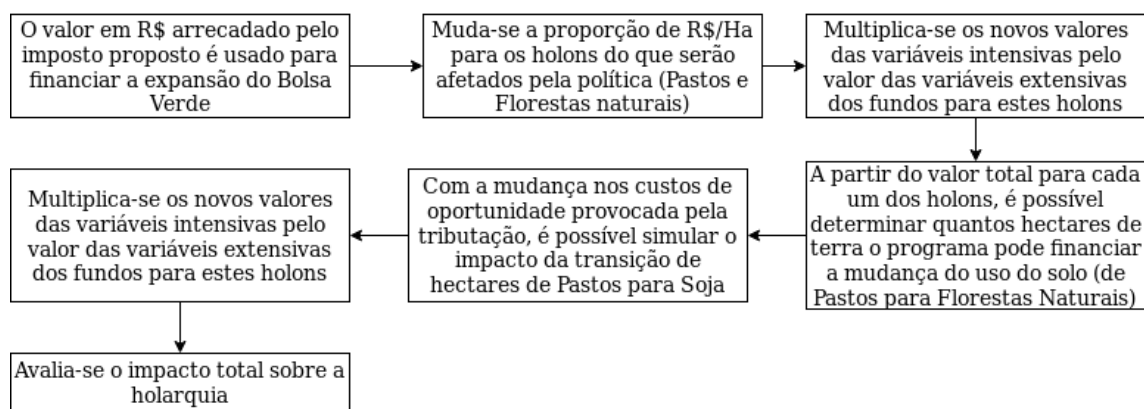


Figura 3. Diagrama da simulação do cenário considerado

Dito isto, passa-se à consideração de cenários com pagamentos por serviços ecossistêmicos (doravante, PSE). O estado de Minas Gerais já conta com um programa de PSE, o bolsa verde, que começou a efetuar pagamentos de R\$ 200 por hectare conservado em

propriedades com até quatro módulos fiscais de área total no ano de 2010. Como este programa ainda não existia em 2006, ano-base para as análises feitas aqui, pode-se verificar dentro da dinâmica simulada qual seria o impacto sobre a holarquia naquele



momento. Para isso, é necessário trazer o fluxo de valor para unidades monetárias de 2006, ou seja, deflacionar o valor para R\$ 170,06, usando o INPC (IBGE, 2017b). O valor é pago para propriedades com até quatro módulos fiscais de extensão (Simões & Andrade, 2013). No ano de 2006, havia pelo menos 792.673 hectares de pasto elegíveis para o programa (IBGE, 2012; IBGE, 2017a, tabela 837; FAEMG, 2017). O número não é preciso, uma vez as estatísticas de uso de solo

por tamanho de propriedade não correspondem exatamente aos módulos fiscais, que são definidos separadamente para cada município da mesorregião.

Porém, ao considerar esses dois grupos de áreas de pasto (até quatro módulos fiscais e acima disto) como subsistemas, o que temos é a situação descrita nos **quadros 4 e 5** abaixo:

Quadro 4. Variáveis Extensivas para os Pastos em Grandes e Pequenas Propriedades

Subsistema (n-4)	Água (m ³)	Valor (R\$)	Terra (ha)	Trabalho (h)
Pastos com menos de 4 módulos fiscais	6.437.297.433	425.945.000	792.673	126.117.673
Pastos com mais de 4 módulos fiscais	22.952.617.809	754.491.000	2.826.329	81.532.713

Fonte: Godoi (2018).

Quadro 5 – Variáveis Intensivas para os Pastos em Grandes e Pequenas Propriedades

Subsistema (n-4)	m ³ /h	R\$/h	R\$/ha
Pastos com menos de 4 módulos fiscais	181,99	3,38	537,35
Pastos com mais de 4 módulos fiscais	78,95	9,25	266,95

Fonte: Godoi (2018).

Como se pode ver acima, o rendimento por hectare é superior em pequenas propriedades do que nas grandes. Dessa forma, o subsídio seria melhor aplicado nas últimas do que nas primeiras. No entanto, o rendimento por hectare em termos monetários ainda é superior a bolsa, mesmo nas grandes áreas. Ao mesmo tempo, considerando que o principal problema identificado na mesorregião é desperdício de água (virtual) representado pelas grandes áreas de pecuária extensiva, é possível pensar em taxar este uso de água

virtual que se traduz em ineficiência na transformação deste recurso em valor. E, como o uso de água virtual na pecuária extensiva é medido por unidade de área, esta taxação pode se dar como um imposto sobre o hectare de pasto. Dessa forma, pode-se pensar em um imposto em tal montante que equalize a receita obtida com o custo do programa. Isto estaria em conformidade com o princípio que norteia a previsibilidade dos sistemas formais criados para representar sistemas complexos. Só é possível prever a



dinâmica de um sistema considerando um número finito de componentes e dimensões de análise: do contrário, a influência de fatores desconhecidos tornaria impossível a determinação de um resultado. No cenário aqui testado, opta-se por conservar a quantidade total dos fluxos de valor para verificar as alterações entre os tempos intrínsecos dos componentes. Esta hipótese não é totalmente realista, uma vez que há diversos fluxos de troca de valor entre o nível focal considerado, a mesorregião do Triângulo Mineiro, e o Estado e o país no qual está contido. Inicialmente, os fluxos de valor serão redistribuídos de acordo com as alterações propostas no cenário (como o PSE), para apenas depois se analisar a relação destes fluxos de valor com os níveis superiores da descrição socioeconômica da holarquia considerada, conservando a quantidade total de fluxos da forma como foi explicado no início da seção. Assim, fica mais clara a visualização do *trade-offs* produzidos pelos diferentes tempos intrínsecos produzidos pela identidade formal dos sistemas que compõem a holarquia considerada.

Assim, para que tal política fosse efetiva, seria necessário um imposto sobre hectare de pasto em tal montante que colocasse o rendimento monetário por hectare da pecuária em grandes propriedades abaixo do valor do subsídio. Considerando o valor estipulado pelo programa Bolsa Verde, este imposto teria de ser de pelo menos R\$ 96,95 para que isto ocorresse. Considerando um imposto de R\$ 100 por hectare de pasto, aplicado apenas sobre as grandes propriedades, o valor total arrecadado, a princípio, chegaria a R\$ 282.632.900, capaz de contemplar até 1.661.960 hectares de pastagens. Uma vez que, dada a sublotação dos pastos na mesorregião, o baixo rendimento da pecuária está relacionado à baixa densidade do gado nessas áreas, tal política levaria o produtor a três cursos de ação possíveis: aumentar a quantidade de cabeças de gado por hectare

para aumentar o rendimento; reservar estas áreas para o reflorestamento; ou substituí-las por culturas que, além de apresentar maior rendimento, não seriam taxadas.

Embora o rendimento das pequenas propriedades seja substancialmente superior ao da Bolsa Verde, este é uma média das muitas propriedades que existem, sendo que, para algumas, o incentivo poderia ser suficiente. Desta forma, apesar de taxar apenas as grandes propriedades seja razoável, uma vez que estas possuem em tese mais garantias para financiar uma transição de pastos para outras culturas, as pequenas propriedades também poderiam continuar participando (voluntariamente) do programa. Porém, é necessário ressaltar que, da forma como ele está colocado, como um subsídio para pequenas propriedades, o programa tende a ter impactos muito baixos, sendo necessário expandi-lo para todas as áreas de pasto da mesorregião.

Se a política conseguisse fazer com que todos estes 1.661.960 hectares fossem reservados para reflorestamento, isto poderia levar a um sequestro de 32.574.414 toneladas de CO₂ ao longo do processo (FEAM, 2008). Porém, uma vez que há outras alternativas, não é realista considerar um reflorestamento dessa monta. Supondo que apenas 10% das áreas de pastagem nas propriedades com mais de quatro módulos fiscais da mesorregião fossem reflorestados, isto equivaleria a 282.633 hectares, com um sequestro de carbono associado de 5.539.605 toneladas de CO₂, além da ampliação da oferta de outros serviços ecossistêmicos de mais difícil mensuração. Tomando a quantidade de trabalho por hectare para as florestas naturais como uma constante, devido a sua exploração ser limitada, tal mudança implicaria uma redução na alocação de trabalho para estas áreas de 7.921.442 horas. Uma vez que o valor do imposto precisa ser mantido para pressionar o rendimento da pecuária extensiva, isto levaria



um saldo positivo de R\$ 234.568.349. Este valor poderia ser usado para fomentar a transição de outras áreas de pasto para outras culturas, preferencialmente a soja, por seu rendimento e baixa dependência de insumos (em relação a outras culturas comerciais).

A simulação realizada aqui é bem simples, e serve apenas como valores de referência para nortear a adoção de políticas. As variáveis intensivas para as áreas reflorestadas são as mesmas do Cerrado nativo, uma vez que não há dados para determinar a dinâmica da recuperação em cada instante. Neste momento da simulação, as variáveis intensivas para os pastos em grandes propriedades foram adaptadas a partir da redução dos fluxos de valor (produzida pela tributação) mantendo a mesma quantidade de trabalho. É razoável supor que uma redução nos fluxos de valor reduziria a quantidade de trabalho empregada nessa produção, mas não há dados disponíveis para construir uma função de produção do tipo necessário para ser usado aqui (com a diferenciação entre fatores de fundo e de fluxo). Um *benchmark* que pode ser utilizado é o valor da renda no período para cada agente, partindo do conceito de aversão à perda, retirado da economia comportamental. Este conceito postula que, ao contrário do que análises baseadas em otimização declaram, o agente dá mais peso a perdas potenciais do que a ganhos potenciais. Esta característica psicológica dos agentes se manifesta como forte viés no sentido da manutenção do valor de referência (Kahneman, 2011). Para manter a produtividade do trabalho em R\$ 9,25 vis-à-vis a redução de valor ocasionada pelo novo imposto, seria necessário reduzir a quantidade de trabalho alocada para este setor em 45.891.207 horas.

Estas modificações levariam, portanto, a uma redução de 53.812.648 horas de trabalho na pecuária. Considerando a jornada semanal média, isto equivale a 25.608 pessoas. Ao

considerarmos a cultura de soja como um tipo cuja identidade é definida por seus parâmetros constitutivos, ou seja, os fatores de fundo trabalho e terra, usa uma proporção fixa (considerando que no intervalo de tempo analisado, um ano, estes são fixos) para quantificar a expansão da soja sobre as áreas de pasto. Isso tem como base o fato de que o número de horas por hectare para a produção em cada cultura foi estimado com base na duração do ciclo na safra principal (período chuvoso do Cerrado) estimada no CROPWAT (FAO, 2017). Mesmo que esse emprego fosse temporário, se este contingente fosse empregado na produção de soja, poderia cultivar 1.469.932 hectares, equivalente a 52% da área de pasto das grandes propriedades e a 40,62% do total de áreas de pastagem. Uma vez que o rendimento da soja é substancialmente superior ao dos pastos mesmo antes do imposto, é possível imaginar que um programa de fomento que financiasse de forma subsidiada os investimentos necessários para essa transição, usando para isso os recursos arrecadados com o imposto (e muito provavelmente recursos de outras fontes, uma vez que os investimentos para iniciar a cultura da soja em uma área deste porte seriam superiores ao montante de imposto sobre pasto arrecadado). Como a produtividade do trabalho da soja é bem mais elevada que a dos pastos, mesmo se dividirmos o fluxo de valor produzido por essa maior produção (a preços constantes) pelo número de horas anteriormente trabalhado, ela fica em R\$ 34,51, superior ao valor da pecuária. A hipótese é aceitável dado o pequeno tamanho do acréscimo de produção em relação que, considerando a mesa produtividade em termos de tonelada de soja por hectare, seria de 3.868.717 toneladas, que representa 1,75% da produção mundial no ano de 2006 (FAO, 2017). É provável que o rendimento por hectare das áreas novas fosse menor que os das anteriormente cultivadas, reduzindo o impacto ainda mais. Se



considerarmos a lotação média (uma vez que não há dados de efetivo de rebanho por grupos de área) de 1,25 cabeças para as áreas de pasto nas propriedades a que serão taxadas, a redução dessas áreas de pasto sem redução de rebanho poderia levar a concentração para 3,29 cabeças por hectare, o que potencialmente (considerando uma relação constante entre o número de cabeças abatido e o número de cabeças no pasto, no intervalo considerado) poderia reduzir a pegada hídrica em termos de água verde da tonelada de carne produzida na mesorregião de 124.134 m³ para 47.243 m³ (Godoi, 2018), em função do melhor uso do pasto, o que indica a redução do custo de oportunidade em termos de água associado à produção da pecuária bovina.

O excedente hídrico da mesorregião, ou seja, a quantidade de água que corre para os corpos de água e alimenta os lençóis freáticos aumentaria em até 7.753.094.479 m³, a maior parte desta quantidade se dando por meio de infiltração, devido à porosidade dos latossolos vermelhos e amarelos que predominam na região. É importante levar em consideração que a água que provém do Triângulo Mineiro alimenta a bacia do Paraná, levando água para as usinas hidrelétricas, inclusive para Itaipu. Um dos benefícios potenciais de tal transição seria um aumento da geração de energia nestas usinas.

Esses valores partem da suposição de uma participação total dos produtores nas áreas sujeitas ao programa, que não é razoável em função do caráter voluntário desta participação. Porém, este cenário busca mostrar um exemplo extremo para que os valores das variáveis gerados na simulação sirvam de referência de qual seria o alcance possível de tal política. Mesmo com a redução nas áreas de pasto depois da mudança de uso do solo, a quantidade remanescente de pastos em propriedades com mais de quatro módulos fiscais ainda seria capaz de prover uma arrecadação de R\$ 107.376.392, o que seria

capaz de manter o Bolsa Verde para uma área de até 631.403 hectares, superior aos 282.633 hectares simulados aqui. No entanto, mesmo no cenário extremo, o desempenho econômico, medido pelas variáveis intensivas, não seria inferior ao apresentado pela distribuição prévia da terra entre seus diferentes tipos de uso do solo. Supondo que o rebanho não seria reduzido, apenas teria sua concentração por hectare aumentada, a área adicional de soja poderia gerar uma renda extra de até R\$ 1.666.602.182, considerando que a renda da pecuária se mantivesse a mesma devido ao aumento do número de cabeças de gado por hectare, hipótese razoável em função do quanto a lotação antes da política era baixa. Este valor, no entanto, não considera os necessários custos adicionais em que incorreriam os produtores no processo de transição.

Embora tenha sido considerada apenas a soja, outras culturas também poderiam ser utilizadas, sobretudo o milho, o que reduziria o problema da absorção desta produção pelo mercado sem perda substancial de preço. Aqui, após considerarmos o comportamento do sistema enquanto todo, ou seja, isolado do resto da holarquia, há a necessidade de voltar a encará-lo como parte. Os fluxos de renda adicionais ocasionados pelo uso mais intensivo da terra (na representação socioeconômica) dependeriam da capacidade de absorção dos sistemas no qual o nível focal está inserido, ou seja, o mercado nacional e internacional. Porém, como *commodities* agrícolas são em grande parte exportadas e o aumento da produção vis-à-vis a produção mundial não seria substancial, é possível pensar numa política que ao mesmo tempo leve a melhores desempenhos nas representações socioeconômica e ambiental. No que toca ao aumento da provisão de serviços ecossistêmicos como o sequestro de carbono e do aumento do fluxo de água para os rios, o resultado desta política também beneficiaria o resto da holarquia, o que poderia



encontrar alguma forma de remuneração em venda de créditos de carbono.

A possibilidade de se obter melhorias nas duas representações se dá em função da subutilização dos recursos do Triângulo Mineiro. O Cerrado, apesar de sua época de seca bem demarcada, tem uma abundância de água que não é metabolizada da melhor forma possível, dentro das representações consideradas. Isto se dá muito em função do limitado número de pressões ambientais às quais estão sujeitos os proprietários de terra na região. Um imposto sobre o hectare de pasto reduziria os fluxos de valor que chegam ao componente com pior desempenho relativo, a pecuária bovina, aumentando a pressão para que estes aumentem a eficiência do uso de seus recursos. Forçados por causas eficientes a mudar sua composição, ou seja, os tipos que caracterizam as combinações de terra e trabalho enquanto fatores de fundo, para se adaptar, alterando o metabolismo dos fluxos associados a esses fundos até que as taxas metabólicas tanto em termos econômicos quanto em termos ambientais se aproximem daquilo que é considerado melhor do ponto de vista do nível focal.

5. Considerações finais

O uso da metodologia MuSIASEM permite estruturar as representações não equivalentes das perspectivas ambiental e socioeconômica em uma holarquia de forma a permitir a consideração de *trade-offs* a partir dos quais é possível encontrar meios de se agir para tornar a situação mais satisfatória para os *stakeholders*. Dessa forma, a complexidade produzida tanto pelos processos naturais quanto pelos conflitos entre os *stakeholders* pode ser tratada analiticamente sem ser reduzida a uma única representação. O método tem como limitação o fato de que a análise produzida por ele é estática, não permitindo um entendimento do processo em

todos os seus passos. A simulação do cenário desenvolvido permite verificar que uma mudança poderia levar a uma melhoria da situação, mas não é possível uma modelagem detalhada de como isso ocorreria. Uma das principais direções que a pesquisa pode avançar na modelagem de cenários é a criação de modelos que descrevam a dinâmica de forma contínua no tempo, como por exemplo com o uso de modelos baseados em agentes.

No caso da mesorregião do Triângulo Mineiro, a modelagem aqui desenvolvida não encontrou grandes conflitos entre os agentes. Antes, há uma situação que poderia ser melhorada da perspectiva das duas representações não equivalentes consideradas, a socioeconômica e a ambiental. Para isso, é necessário agir de forma a substituir as áreas de pasto extensivo por atividades mais intensivas no uso de água com maior potencial de geração de renda, o que pode ser feito pela alteração dos incentivos econômicos por meio de políticas como o PSE, o que levaria a uma melhoria em todas as dimensões consideradas. A mais provável explicação desta situação inadequada está no caráter periférico que a região teve até os anos 70, fazendo com que a subcapitalização levasse a aquisição de terras sem maiores investimentos nelas, apenas ocupando-as com gado. A política proposta na última seção, combinando um imposto sobre o hectare de pasto com uma política de PSE que incentivasse o reflorestamento destas áreas de pasto.

Referências

- Andrade, D. C., Simões, M. S. e A. R. Romeiro, 2012. From an Empty to a Full World: a nova natureza da escassez e suas implicações. *Economia & Sociedade*, Vol. 21: 695-722.
- Carvalho, J. L. N. Avanzi, J. C., Silva, M. L. N., Mello, C. R. e C. E. P. Cerri, 2010. Potencial



de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* Vol. 34: 277-289.

Castanier, H., 2015. Economic valuation for decision making on the protection of water sources em Hipel, K. W., et al. (eds). *Conflict resolution in water resources and environmental management*. Springer, Suíça.

Costa, M. H. e G. F. Pires, 2010. Effects of Amazon and Central Brazil deforestation scenarios on the duration of the dry season in the Arc of Deforestation. *International Journal of Climatology*, Vol. 30: 1970–1979.

Eiten, G., 1990. A vegetação. em Pinto, M. N. (ed.). *Cerrado: Caracterização, ocupação e perspectivas*. Editora UNB, Brasília.

Fausto, M. A., Angelini, L. P., Marques, H. O., Silva Filho, A., Machado, N. G. e M. S. Biudes, 2016. Impacto da alteração do uso do solo no saldo de radiação no Cerrado do sul de Mato Grosso. *Revista Ambiente e Água*, Vol. 11 (2).

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2013. *FAO Statistical Yearbook: Europe and Central Asia, food and agriculture*. FAO, Roma.

Foster, J., 2005. From simplistic to complex systems in economics. *Cambridge Journal of Economics*, Vol. 29: 873-92.

Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), 2008. *Inventário de Emissões de gases de efeito estufa do Estado de Minas Gerais*. Belo Horizonte: FEAM.

Georgescu-Roegen, N., 1971. *The entropy law and the economic process*. Harvard University Press, Cambridge.

Giampietro, M., 2003. *Multi-scale analysis of agroecosystems: Advances in agroecology*. CRC Press, Boca Raton.

Godoi, M. H., 2018. *Complexidade e sustentabilidade: Teoria e uma aplicação para a gestão da água no Triângulo Mineiro*. Tese de doutorado. IE/UNICAMP, Campinas.

Governo de Minas Gerais, 2017. *Localização Geográfica*. Disponível em: <http://mg.gov.br/conteudo/conheca-minas/geografia/localizacao-geografica> Acessado em: 30/11/2017.

Guimarães, E. N., 2004. A influência paulista na formação econômica e social do Triângulo Mineiro. *Anais do XI Seminário Sobre a Economia Mineira*. Disponível em <http://www.cedeplar.ufmg.br/diamantina2004/extos/D04A065.PDF>.

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya M. M. e M. M. Mekonnen, 2011. *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. Earthscan, Londres.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2012. *Censo Demográfico 2006: Brasil, Grandes Regiões e Unidades da Federação. Segunda apuração*. IBGE, Rio de Janeiro.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 2017a. *Sistema IBGE de Recuperação Automática*. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/> Acessado em: 30/11/2017.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2017b. *Sistema Nacional de Índices de Preços ao Consumidor: series históricas*. Disponível em: https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/precos/inpc_ipca/defaultseriesHist.shtm Acessado em: 06/12/2017.

Kahneman, D., 2011. *Thinking, fast and slow*. Macmillan, New York.

Kampis, G., 1991. *Self-modifying systems in biology and cognitive science: A new framework for dynamics, information and complexity*. Pergamon Press, Oxford.

Klink, C. A. e A. G. Moreira, 2002. *Past and current human occupation, and land use em Oliveira, P. S. e R. J. Marquis, The Cerrados of Brazil: Ecology and natural history of a*



neotropical savanna. Columbia University Press, Nova York.

Koestler, A., 1969. Beyond atomism and reductionism: the concept of Holon, em Koestler, A. e J. R. Smythies, Beyond reductionism, Eds Hutchinson, Londres.

Lima, J. E. F. W., 2011. Situação e perspectivas sobre as águas do cerrado. *Ciência e Cultura*, vol. 63: 27-9.

Lima, J. E. S. e C. S. C. Almeida, 2012. Relatório diagnóstico sistema aquífero Bauru–Caiuá no Estado de Minas Gerais - bacia sedimentar do Paraná. Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas, Vol. 13. Serviço Geológico do Brasil (CPRM).

Madrid, C. e V. Cabello, 2011. Re-opening the black box in societal metabolism: the application of MuSIASEM to water. Working Papers on Environmental Science. Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals – ICTA, Universidad Autonoma de Barcelona.

Madrid, C., Cabello, V. e M. Giampietro, 2013. Water-use sustainability in socioecological systems: a multiscale integrated approach. *BioScience*, Vol. 63: 14-24.

Madrid, C., 2014. The water metabolism of socio-ecosystems: Epistemology, methods and application. Tese de Doutorado. Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona.

Mekonnen, M. M. e A. Y. Hoekstra, 2011. National water footprint accounts: the green, blue and grey water footprint of production and consumption. value of water. Research Report Series n. 50. UNESCO Institute for Water Education, Delft, Holanda.

Munda, G., 2004. Social multi-criteria evaluation (SMCE): methodological foundations and operational consequences. *European Journal of Operational Research*, Vol. 158: 662-677.

Ramos, M. V. V., et al., 2006. Veredas do Triângulo Mineiro: Solos, água e uso. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras.

Rosen, R., 2012. Anticipatory systems: Philosophical, mathematical, and methodological foundations. Segunda edição. Springer, Nova York.

Santos, R. M. e S. Koide, 2016. Avaliação da recarga de águas subterrâneas em ambiente de Cerrado com base em modelagem numérica do fluxo em meio poroso saturado. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Vol. 21: 451-465.

Sawyer, D., 2009. Fluxos de carbono na Amazônia e no Cerrado: um olhar socioecossistêmico. *Sociedade e Estado*, Vol. 24, n. 1.

Scolforo, J. R. et al., 2008. Volumetria, peso de matéria seca e carbono, em Scolforo, J. R.; Mello, J. M. e A. D. Oliveira. Inventário florestal de Minas Gerais: Cerrado – florística, estrutura, diversidade, similaridade, distribuição diamétrica e de altura, volumetria, tendências de crescimento e áreas aptas para manejo florestal. UFLA, Lavras.

Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD), 2017. Relação (de pedidos de outorga) deferidos, indeferidos, cancelados e outros. Disponível: <http://www.meioambiente.mg.gov.br/outorga/elacao-deferidos-indeferidos-cancelados-e-outros> Acessado em: 24/11/2017.

Simões, M. S. e D. C. Andrade, 2013. Pagamentos por serviços ecossistêmicos (PSE): o caso do programa bolsa verde no estado de Minas Gerais. *Revista Debate Econômico*, Vol. 1: 101-131.

University of Rochester Medical Center (URMC). 2017. Adult and children's health encyclopedia. Disponível em: <https://www.urmc.rochester.edu/encyclopedia.aspx> Acessado em: 04/12/2017.